

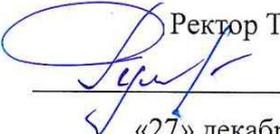
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

УДК 621.396.33:528.8

Рег. № АААА-А19-119121190007-0

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ТУСУР


Рулевский В.М.
«27» декабря 2019 г.



ОТЧЕТ О ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ

по теме: «ПОДДЕРЖКА И РАЗВИТИЕ ЦЕНТРА КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ
ИМПУЛЬС (ТУСУР) НАУЧНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ ПО НАПРАВЛЕНИЮ "ТЕХНО-
ЛОГИИ, РАЗРАБОТКА И ИЗМЕРЕНИЯ СВЧ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ИНТЕ-
ГРАЛЬНЫХ СХЕМ, УСТРОЙСТВ И МОДУЛЕЙ" ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ
ПРИОРИТЕТОВ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ»

Название этапа: ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ.
ПРОВЕДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

ЗАКУПКА ОБОРУДОВАНИЯ

(промежуточный)

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям
развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».
Соглашение о предоставлении гранта в форме субсидии от 08 ноября 2019 г.
№ 075-15-2019-1644 (внутренний номер Соглашения 05.621.21.0029).

Уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0029

Руководитель проекта

д.т.н., главный научный сотрудник


Н.Д. Малютин

Томск 2019

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Руководитель проекта,
главный научный сотрудник, докт.
техн. наук



26.12.19

Малютин Н.Д.
(введение, разделы 1-10,
заключение)

Исполнители:

Начальник ОМК, патентный
поверенный 2008



26.12.19

Аркатова О.Е.
(раздел 8)

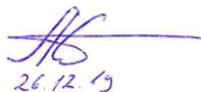
Мл. научн. сотр. СКБ «Смена»
канд. техн. наук



26.12.19

Артищев С.А.
(раздел 1, 3)

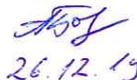
Директор НИИ МЭС, профес-
сор каф. КСУП докт. техн. наук



26.12.19

Бабак Л.А.
(разделы 1, 2, 3)

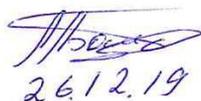
Научный сотрудник ЛИКС каф.
КСУП



26.12.19

Бова А.Г.
(разделы 2, 7)

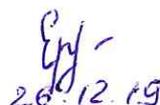
Ст. науч. сотр. СКБ «Смена»



26.12.19

Бомбизов А.А.
(разделы 1-3, 6, 7)

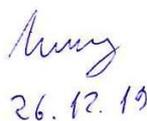
Мл. научн. сотрудник НИИ
СЭС, канд. техн. наук



26.12.19

Ерофеев Е.В.
(раздел 1, 3)

Инженер НОЦ «Нанотехноло-
гии», канд. техн. наук



26.12.19

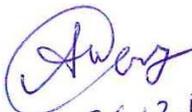
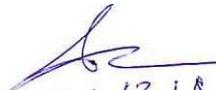
Ишуткин С.В.
(раздел 1, 3)

Доцент каф. КИПР, канд. техн.
наук

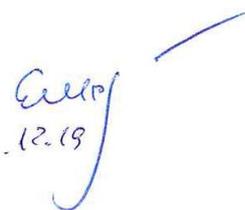


26.12.2019

Карабан В.Н.
(разделы 3, 9)

Инженер НОЦ «Нанотехнологии»	 26.12.19	Кулинич И.В. (разделы 1, 3)
Лаборант	 26.12.19	Малютин Г.А. (раздел 9)
Инженер НИИ СТ, каф. РЭТЭМ	 26.12.19	Олисовец А.Ю. (раздел 3, 4)
Старший научн. сотрудник НОЦ «НОНЛТ», канд. физ.-мат. наук	 26.12.19	Перин А.С. (раздел 3)
Профессор каф. КСУП, докт. техн. наук	 26.12.19	Сычев А.Н. (раздел 4)
Младший научн. сотрудник НИИ СЭС	 26.12.19	Тренкаль Е.И. (раздел 3)
Заведующий кафедрой РЭТЭМ докт. техн. наук	 26.12.19	Туев В.И. (разделы 1, 3, 4, 10)
Инженер ЛИКС каф. КСУП	 26.12.19	Федоров Е. (раздел 3)
Доцент каф. КСУП, канд. техн. наук	 26.12.19	Шеерман Ф.И. (разделы 1-4)

Директор НОЦ "Нанотехнологии", канд. техн. наук


26.12.19

Шестериков Е.В.
(разделы 1- 4, 6)

Ведущий инженер


26.12.2019

Юрченкова Е.А.
(раздел 5)

Нормоконтролер


26.12.2019

Штенина Л.С.
(все разделы)

РЕФЕРАТ

Отчет 325 с., 175 рис., 20 табл., 206 источников, 1 приложение

ТЕХНОЛОГИЯ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗМЕРЕНИЕ СВЧ УСТРОЙСТВ И МИКРОСХЕМ, АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ИМПУЛЬСНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В отчете по этапу 1 нашли отражение результаты работ, выполненных сотрудниками ТУСУР, работающих в том числе с применением оборудования ЦКП «Импульс» и объединенных по четырем направлениям функционирования ЦКП: технологическое обеспечение работ в области нано- микроэлектроники и радиофотоники; измерения на СВЧ; аддитивные технологии; импульсные измерения.

Выполнены следующие работы первого этапа за счет средств гранта:

- 1) Подготовлен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-технические проблемы, исследуемые в рамках тематики работы, в том числе обзор научных информационных источников;
- 2) Составлен перечень оборудования и проведены закупочные процедуры;
- 3) Проведены исследования по плану работ ЦКП 2019 г.;
- 4) Разработаны новые методики измерений;
- 5) Подготовлен и проведен семинар по измерениям.

Работы первого этапа за счет внебюджетных средств:

- 6) Составлен перечень вспомогательного оборудования и аксессуаров для формирования рабочих мест на базе закупаемого научного оборудования и вспомогательных рабочих мест для проведения учебных мероприятий;
- 7) Закуплено вспомогательное оборудование, аксессуары и материалы;
- 8) Разработана техническая документация на стенды;
- 9) Проведены экспериментальные работы по измерению параметров СВЧ устройств по договорам с внешними заказчиками и внутренними потребителями услуг.

В промежуточном отчете 10 разделов, список использованных источников, 1 приложение. Материалы, подтверждающие выполнение показателей, размещены в отчетной документации на сайте sstp.ru.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Радиофотоника (*microwave photonics*) – объединяющий обширный комплекс областей науки и техники, связанных главным образом с проблемами передачи, приёма и преобразования сигнала с помощью электромагнитных волн СВЧ диапазона и фотонных приборов и систем.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Приведен перечень обозначений и сокращений, применяемых в данном отчете о ПНИЭР.

ИС	– интегральная схема
КШ	– коэффициент шума
ЛЧМ	– линейно - частотно модулированный (сигнал)
МИС	– монолитная интегральная схема
МСТ	–микросистемная техника
МЭМС	– микроэлектромеханические системы
СВЧ	– сверхвысокие частоты
УНУ	– уникальная научная установка
ЦКП	– центр коллективного пользования
ЭКД	– эскизная конструкторская документация
ЭМ	– электромагнитная (волна)
ЭМС	– электромагнитная совместимость
ЭОМ	– электрооптический модулятор
ЭПД	– эскизная программная документация

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	7
ВВЕДЕНИЕ	12
1 Аналитический обзор современной научно- технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-технические проблемы, исследуемые в рамках тематики работы, в том числе обзор научных информационных источников	15
1.1 Радиофотонные компоненты	16
1.1.1 Оптические эффекты в полупроводниках	17
1.1.2 Конструкции оптических волноводов на полупроводниковых структурах	25
1.1.3 Влияние СВЧ волноводов на оптические волноводы	28
1.1.3.1 Основные типы конструкций СВЧ волноводов	28
1.1.3.2 Особенности методов согласования СВЧ и оптических элементов ЭОМ и их влияние на параметры ЭОМ	30
1.1.4 ЭОМ на основе различных полупроводниковых материалов	34
1.1.4.1 ЭОМ на основе InP.....	34
1.1.4.1.1 Влияние уровней легирования слоев	39
1.1.4.1.2 Влияние ширины волновода	41
1.1.4.1.3 Влияние относительного положения мультиквантовой ямы между контактными слоями.....	42
1.1.4.1.4 Влияние мольного состава мультиквантовой ямы	42
1.1.5 Конструкции радиофотонных модулей и тенденции их развития.....	44
1.2 Интегральные схемы на основе АЗВ5 с нормами от 250-180 нм до 65-45 нм	47
1.2.1 Основные технологические особенности производства интегральных микросхем.....	50
1.2.2 Особенности формирования ИС на GaAs	52
1.2.3 Особенности формирования ИС на GaN	53
1.2.4 Материалы подложек для ИС на GaN	56
1.3 Особенности формирования ИС на Si	58
1.3.1 Кремний-германиевые гетеропереходные биполярные транзисторы	58
1.3.2 Селективный эпитаксиальный рост (SEG) базы	60
1.3.3 Неселективный эпитаксиальный рост (NSEG) базы	63
1.3.4 Кремний-германиевые НЕМТ/MODFET транзисторы	67
1.4 Микроэлектромеханические системы	77

1.4.1 Классификация МЭМС	78
1.4.2 Технологические особенности формирования МЭМС	79
1.4.3 Методы корпусирования МЭМС	81
1.4.3.1 Корпусирование с помощью монокристаллических капсул	83
1.4.3.2 Корпусирование с помощью пайки стеклокерамическим припоем.....	84
1.4.3.3 Корпусирование методом объемной поверхностной микрообработки	86
1.4.3.4 Методы корпусирования на уровне пластины WLP.....	88
1.4.3.5 Герметизация с помощью лазерного оплавления	90
1.4.3.6 Корпусирование МЭМ структур в объеме кремниевой пластины.....	91
1.4.3.7 Корпусирование МЭМС с применением термопластичных материалов	92
1.4.3.8 Корпусирование МЭМС методом электрохимического осаждения	97
1.4.4 МЭМС на основе Si	98
1.4.5 Типы МЭМС для ИС	105
1.4.5.1 МЭМС ключи	105
1.4.5.2 МЭМС конденсаторы	110
1.4.5.3 МЭМС катушки индуктивности	112
1.4.5.4 МЭМС генераторы.....	114
Выводы.....	118
1.5 Разработка, моделирование, проектирование и измерение систем на кристалле и модулей, радиодифракционных компонентов и ИС	118
1.5.1 Технологии изготовления СВЧ приемопередающих модулей.....	121
1.5.2 Обзор технологий изготовления СВЧ интегральных схем и систем на кристалле для построения приемопередающих модулей высокой степени интеграции.....	125
1.5.3 Аналитический обзор решений в области радиодифрактики	129
1.5.3.1 Основные понятия радиодифрактики	131
1.5.3.2 Применение систем радиодифрактики	133
1.5.3.3 Интегральная радиодифрактика	134
1.5.3.4 Технологии интегральной радиодифрактики.....	136
1.5.3.5 Технология проектирования СВЧ монокристаллических и радиодифракционных интегральных схем.....	137
1.5.3.6 Технологии измерения параметров СВЧ и радиодифракционных интегральных схем	139
Выводы и предложения по развитию ЦКП	143
2 Составление перечня оборудования и проведение закупочных процедур	145
2.1 Перечень оборудования	145

2.2 Проведение закупочных процедур.....	146
2.2.1 Планетарная шаровая мельница Pulverisette 7 Premium Line	146
2.2.2 Установка быстрого термического отжига STE RTA150, SemiTEq	148
2.2.3 Лазерный анализатор размера частиц Analysette 22 Nano Tec	148
2.2.4 Профилометр оптический 3D	151
2.2.5 Анализатор цепей Keysight Technologies N5247B с комплектом аксессуаров	154
2.2.6 Установка плазмохимического травления STE ICP200E SemiTEq	155
2.2.7 Электромагнитный вибрационный грохот ANALYSETTE 3 PRO	156
2.2.8 Осциллограф Keysight Technologies UXR0134A	157
Выводы.....	159
3 Проведение исследований по плану 2019 г.....	160
3.1 Обеспечение исследований, технологическая реализация и измерения перспективных однокристалльных передающих СВЧ модулей миллиметрового диапазона на основе полупроводников типа АЗВ5 для применения в современных информационно-коммуникационных системах нового поколения (5G) по ФЦП 31/17	161
3.2 Исследование, технологическая реализация и обеспечение измерений отечественных электрооптических модуляторов на основе квантоворазмерного эффекта Штарка для высокоскоростных 400Гбит/с волоконно-оптических систем передачи информации по ФЦП 36/17	162
3.3 Разработка технологии формирования оптически прозрачных электропроводящих покрытий.....	171
3.4 Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств	173
3.5 Исследование технологических возможностей, применяемых при разработке элементов радиофотоники и интегральной оптики, для создания научно-технического задела в области разработки интеллектуальных медицинских изделий нового поколения	182
3.5.1 Разработка технологии изготовления металлокерамических штампов для полидиметилсилоксановых матриц систем доставки лекарственных препаратов методом фотолитографии и гальванопластики	182
3.5.2 Исследование влияния типа рабочего газа на структуру и свойства тонких кальций-фосфатных покрытий, сформированных из плазмы магнетронного разряда ..	184
3.5.3 Формирование тонких металлических антибактериальных покрытий из плазмы магнетронного разряда на поверхности пьезоэлектрических полимерных мембран для регенерации слизистых оболочек ротовой полости	186
3.5.4 Люминесцентные высокопористые материалы, допированные комплексом $\text{Eu}(\text{dbm})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ в среде сверхкритического диоксида углерода.....	187

3.5.5 Изучение влияния катионных замещений в твердотельной мишени на основе β трикальцийфосфата на структуру и свойства тонких покрытий, сформированных методом высокочастотного магнетронного распыления	188
3.6 Исследование характеристик микроэлектронной и радиофотонной ЭКБ высокой степени интеграции и компонентов радиотехнических систем с АФАР	189
3.7 Развитие аддитивных технологий	196
3.7.1 Аддитивные технологии изготовления планарных СВЧ-элементов	196
3.7.1 Аддитивные технологии изготовления сложных конструктивных элементов	207
3.8 Перечень договоров, выполнение которых проводилось с использованием оборудования ЦКП «Импульс»	209
4 Разработка новых методик измерений.....	216
4.1 Методика восстановления погонных параметров связанных линий по измеренным с помощью векторного анализатора цепей S-параметрам.....	216
4.1.1 Объект исследования и измерительное оборудование	216
4.1.2 Цель исследования.....	216
4.1.3 Основные этапы методики исследования.....	216
4.1.4 Калибровка векторного анализатора цепей (ВАЦ) и подготовка макета связанных линий (четырёхпортового устройства)	217
4.1.5 Измерение S-параметров четырёхпортового устройства	217
4.1.6 Исключение паразитного влияния межсоединений (деэмбединг)	218
4.1.7 Финальная обработка результатов измерений и восстановление (экстракция, извлечение) погонных параметров связанных линий	218
Заключение	220
4.2 Методика измерения профиля 3D пленок с помощью профилометра Profilm3D.....	221
4.3 Методика измерения относительной диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь для фольгированных ламинатов в СВЧ диапазоне с помощью диэлектрического резонатора с разделенным стержнем	250
4.4 Методика проведения измерений на оптическом микроскопе Leica INM 100 UV	267
5 Подготовка и проведение семинара по измерениям	272
6 Составление перечня вспомогательного оборудования и аксессуаров для формирования рабочих мест на базе закупаемого научного оборудования.....	274
7 Закупка вспомогательного оборудования и аксессуаров	276
8 Разработка технической документации на стенды.....	279
9 Проведение экспериментальных работ по измерению параметров СВЧ устройств	288
10 Значения показателей результатов использования гранта	303

10.1 Удельный вес лабораторного и аналитического оборудования в возрасте до 5 лет в общей стоимости лабораторного и аналитического оборудования центра коллективного пользования научным оборудованием.....	303
10.2 Число организаций-пользователей научным оборудованием центра коллективного пользования научным оборудованием.....	303
10.3 Доля исследователей в возрасте до 39 лет в общей численности исследователей, выполняющих работы с использованием оборудования ЦКП.....	304
10.4 Объем привлеченных внебюджетных средств.....	304
10.5 Выполнение п.2.11 Технического задания «Увеличение доли внешних заказов услуг и работ ЦКП».....	304
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	306
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	307
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	325
Основная форма отчетности ЦКП «Импульс» за 2018 г.	325

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной радиоэлектроники происходит быстрыми темпами по многим направлениям радиолокации [1], телекоммуникаций [2], измерительной техники [3], радиофотоники [4], наноэлектроники [5] и др. Велика роль междисциплинарных подходов, особенно в развитии медицинской аппаратуры и ее применениях на практике [6]. Стало глобальным трендом применение цифровых методов формирования, обработки, хранения и распознавания сигнальных сообщений [7]. Из приведенных [1-7] и многих других источников видно, что обеспечение измерений стало, во-первых, достаточно сложным в реализации на современном уровне достижимой точности и достоверности, во-вторых, стоимость оборудования столь велика, что приобретение того или иного прибора откладывается «до лучших времен». Поэтому идея использования оборудования в режиме коллективного пользования стала актуальной несколько десятилетий назад. В крупных научных, учебных и промышленных центрах вполне естественно начали образовываться лаборатории и иные подразделения, концентрировавшие измерительное оборудование по своей тематике, обслуживая при этом всю инфраструктуру не постоянно, а по мере возникновения потребности.

В ТУСУРе Центры коллективного пользования (ЦКП) были образованы в 2006 - 2007 годах во время выполнения проекта «Инновационная образовательная программы». Первый ЦКП получил название ЦКП «Радиочастотных исследований и измерений». Его основные направления деятельности были анализ и синтез широкополосных управляемых устройств и антенных систем для радиосвязи, радиолокации и управления с помощью радиоканала, разработка устройств и систем связи, радиоуправления и мониторинга. Интересно отметить, что в основе уникальности ЦКП стала разработка оригинального прибора Р4-И-01 на программной платформе «ИмпульсМ». Этот прибор стал первым в мире векторным анализатором цепей, работающим при импульсном воздействии на измеряемый объект [8-10] и способным измерять нелинейные искажения видеоимпульса при прохождении его по цепи. Развитие направления по теме импульсных измерений получила развитие в докторской диссертации Э.В. Семенова, представившего пленарный доклад на Крымской международной конференции в 2019 г. [11]. Постепенное обновление парка измерительных приборов происходило параллельно с новыми разработками, среди которых следует отметить нелинейный рефлектометр [12-17]. В результате обновления научной направленности сотрудников, проводивших работы в ЦКП «Радиочастотных исследований и измерений» созрела необходимость реформирования центра, он получил в 2013 г. новое название «Аппаратно-программные средства измерений и контроля параметров

сверхширокополосных ВЧ- и СВЧ-устройств импульсными методами» (ЦКП «Импульс»). В 2019 г. была сформулирована тема работы ЦКП на период 2019-2020: "Технологии, разработка и измерения СВЧ микро- и оптоэлектронных интегральных схем, устройств и модулей", отвечающая критерию обеспечения реализации приоритетов научно-технологического развития [18].

Цель работы и перечень решаемых задач по проекту:

– развитие и глубокая модернизация технологического и научного оборудования действующего ЦКП "Импульс" исследовательско-технологического типа (далее – ЦКП) по направлению "Технологии, разработка и измерения СВЧ микро- и оптоэлектронных интегральных схем, устройств и модулей" в соответствии со Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации, в том числе в кооперации с ведущими отечественными и мировыми научными центрами, организациями и предприятиями;

– расширение перечня и комплексности оказываемых услуг, а также круга пользователей для обеспечения максимальной загрузки оборудования ЦКП и обеспечения эффективного участия в реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации, включая услуги по технологическим работам, быстрому прототипированию, проектированию и измерениям изделий кремниевой и АЗВ5 СВЧ микроэлектроники и радиофотоники, а также по продвижению аддитивных технологий изготовления СВЧ компонентов и узлов;

– обеспечение внедрения упрощенной модели доступа и использования оборудования ЦКП научными и образовательными организациями вне зависимости от их ведомственной принадлежности и формы собственности;

– развитие компетенций сотрудников ЦКП и заинтересованных организаций путем обучения студентов, магистрантов и аспирантов, проведения образовательных программ переподготовки, стажировок и семинаров для отечественных специалистов в области технологий, разработки и измерений СВЧ микро- и оптоэлектронных интегральных схем (ИС), устройств и модулей.

Отдельной важной задачей является предоставление услуг, современного оборудования, технологического, методического, метрологического и кадрового обеспечения новым лабораториям в период их начального развития и в последующем, а также имеющимся в г. Томске дизайн-центрам по разработке изделий СВЧ микроэлектроники, радиоэлектронных и телекоммуникационных систем, включая Дизайн-центр "Микроэлектронные системы" НИИ микроэлектронных систем ТУСУР, дизайн-центры организаций АО НИИПП, АО "НПФ Микран", ООО "ЛЭМЗ-Т", ООО "50ом Технолоджи" и др. Этим подго-

тавливаются условия для создания в соответствии с проектом Стратегии развития электронной промышленности РФ на период до 2030 г. (Стратегия-2030) в Сибирском регионе (возможно, в г. Томске и в том числе на базе ТУСУР) центра технологических компетенций, регионального дизайн-центра и проектных команд, системы подготовки кадров технологов и проектировщиков в области СВЧ микроэлектроники.

В настоящем промежуточном отчете отражены вопросы, решение которых намечено техническим заданием и планом-графиком по Соглашению № 075-15-2019-1644 от 08.11.2019 г.

1 Аналитический обзор современной научно- технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-технические проблемы, исследуемые в рамках тематики работы, в том числе обзор научных информационных источников

Настоящий раздел подготовлен в соответствии с п.1.1 плана-графика выполнения работ по проекту. Аналитический обзор был подчинен цели провести анализ актуальности наиболее важных для ЦКП «Импульс» и связанных с ним организаций направлений исследований и практической деятельности. Конкретные технические задачи для достижения поставленных целей включают:

а) разработку технологий и технологических операций изготовления и быстрого прототипирования СВЧ приборов и ИС, радиофотонных компонентов и ИС на основе материалов Si КМОП, КНИ, SiGe БиКМОП и АЗВ5 с нормами от 250-180 нм до 65-45 нм; микроэлектромеханических систем (МЭМС) на основе кремния, АЗВ5 (InP, GaAs);

б) синтез материалов и разработку аддитивной технологии изготовления планарных и объемных СВЧ элементов и устройств на основе 3D-печати;

в) разработку, моделирование, проектирование и измерение СВЧ устройств, ИС, систем на кристалле и модулей, МЭМС, радиофотонных компонентов и ИС;

г) построение моделей, создание библиотек элементов для отечественных технологий изготовления СВЧ и радиофотонных ИС на основе материалов Si КМОП, КНИ, SiGe БиКМОП и АЗВ5;

Развитие и расширение комплекса оказываемых в ЦКП услуг, обеспечение целого ряда новых услуг направлено, в конечном счете, на исследование и создание перспективных технологий, производство на российских предприятиях изделий микроэлектроники для существующих рынков, а также "рынков будущего" (автоматизированный транспорт и движущаяся робототехника, автомобильная электроника, персональная и телемедицина, технологии беспроводной связи 5G, Интернет вещей – промышленный и для потребительского рынка, высокоскоростные системы передачи данных и др.).

Проект направлен на реализацию следующих приоритетов Стратегии научно-технологического развития РФ (Указ Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. №642):

– переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, соз-

дание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта;

– связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики.

Аналитический обзор литературы отражает технологии и технологические операции изготовления и прототипирования СВЧ приборов и интегральных схем (ИС): радиофотонных компонентов и ИС на основе АЗВ5 с нормами (длина затвора транзистора) от 250-180 нм до 65-45 нм; микроэлектромеханических систем (МЭМС) на основе кремния, АЗВ5 (InP, GaAs).

Представленные в данном разделе материалы подготовлены за счет средств гранта по Соглашению. Их содержание было обусловлено стремлением коллектива ЦКП выйти на новый уровень в области проектирования изделий микроэлектроники, освоения новых для ЦКП технологий, методов измерения их параметров с применением вновь закупаемого и имевшегося ранее оборудования. Обзор предназначен для сотрудников ТУСУРа и других организаций, заинтересованных в сотрудничестве с ЦКП. Он дает возможность ознакомиться с состоянием рассматриваемых тем в мире и России и тем самым сократить время вхождения в решение возникающих задач. В каком-то смысле это методический материал для деятельности ЦКП.

1.1 Радиофотонные компоненты

ТУСУРом на базе научно-образовательного центра «Нанотехнологии» и ЦКП «Импульс» в 2017 г. коллективами кафедры «Физическая электроника» и НИИ «Микроэлектронных систем» были начаты исследования и разработки радиофотонных устройств. Технологическое обеспечение и проведение измерений в процессе экспериментальных работ потребовали провести обзор методов, конструкций и технологий радиофотонных компонент. В значительной степени этому способствовали внутренние пользователи ЦКП, приступившие к освоению нового для научных коллективов направления. С использованием оборудования ЦКП «Импульс» выполнялись следующие НИР по тематике данного подраздела:

Исследование методов построения радиофотонных систем передачи информации и генерации сигналов на основе перспективной элементной базы для межвидовых комплек-

сов локации, навигации и связи с многоканальными фазированными антенными решетками (хоздоговор 29/17, заказчик ООО ЛЭМЗ-Т);

Измерение параметров радиофотонного интегрального приемника, включая параметры рассеяния и коэффициент оптического преобразования (хоздоговор 27/19, заказчик ООО «ГУСУР-электроника»);

Создание отечественных электрооптических модуляторов на основе квантоворазмерного эффекта Штарка для высокоскоростных 400 Гбит/с волоконно-оптических систем передачи информации (соглашение № 14.577.21.0281, заказчик Минобрнауки РФ).

Данный подраздел – результат анализа состояния и перспектив радиофотоники с проекцией на возможности ЦКП «Импульс» в настоящем состоянии и в ближайшее будущее.

Последние десятилетия в сфере сверхширокополосных систем передачи данных наблюдается процесс замещения «электронных» систем на «фотонные». Связано это, в первую очередь, с иной физической природой фотона. Отсутствие заряда и массы наделяет его свойствами, невозможными для электрона. В результате фотонные системы (в сравнении с «электронными») не подвержены внешним электромагнитным полям, обладают гораздо большей дальностью передачи и шириной полосы пропускания сигнала.

Эти, и многие другие преимущества, уже реализованные на базе фотоники в сфере телекоммуникаций, дают право говорить о возникновении нового направления – радиофотоники, возникшей из слияния радиоэлектроники, интегральной и волновой оптики, СВЧ оптоэлектроники и ряда других отраслей науки и промышленного производства.

Другими словами, под **радиофотоникой** (*microwave photonics*) понимается объединяющий обширный комплекс областей науки и техники, связанных главным образом с проблемами передачи, приёма и преобразования сигнала с помощью электромагнитных волн СВЧ диапазона и фотонных приборов и систем.

1.1.1 Оптические эффекты в полупроводниках

1.1.1.1 Эффект Франца-Келдыша

Влияние электрического поля на край фундаментального поглощения полупроводника впервые было рассмотрено Л.В. Келдышем и В. Францем независимо друг от друга в 50-х годах прошлого века [19-21]. Явление было названо в честь ученых, обнаруживших его – эффект Франца-Келдыша.

Данный эффект обусловлен искривлением энергетических зон монокристаллического полупроводника в присутствии внешнего электрического поля. При отсутствии

внешнего электрического поля фотон с энергией $h\nu > E_g$ (E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника) может поглотиться электроном валентной зоны, что приведет к переходу этого электрона в зону проводимости и образованию электронно-дырочной пары. Такой процесс приводит к появлению фундаментальной полосы поглощения на спектре поглощения полупроводника. Искривление энергетических зон полупроводника в присутствии электрического поля приводит к тому, что возникает возможность межзонных переходов при поглощении фотонов с энергией $h\nu < E_g$ (рисунок 1.1).

Эффект Франца-Келдыша связан с процессом туннелирования возбужденного электрона между состояниями валентной зоны и зоны проводимости через треугольный потенциальный барьер, возникающий при наклоне энергетических зон в присутствии электрического поля.

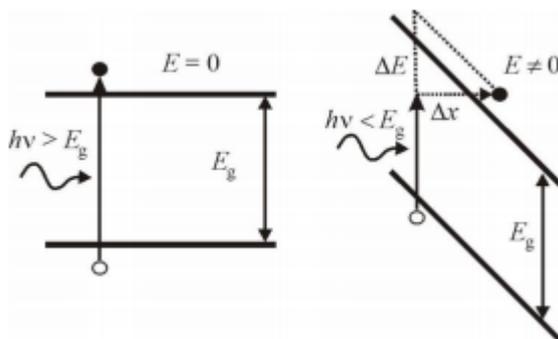


Рисунок 1.1 – Межзонные оптические переходы в полупроводнике в отсутствие ($E = 0$) и при наличии ($E \neq 0$) внешнего электрического поля

На рисунке 2.2 показан спектр поглощения полупроводника вблизи края фундаментальной полосы поглощения в отсутствие и при наличии электрического поля. Из рисунка видно, что для фиксированной энергии фотона $h\nu_0$ ($h\nu_0 < E_g$) увеличение электрического поля приводит к увеличению поглощения.

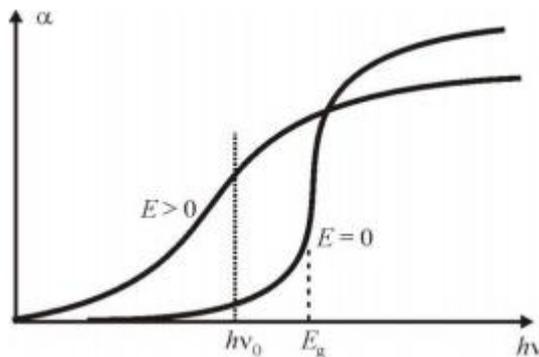


Рисунок 1.2 – Сдвиг фундаментальной полосы поглощения в результате эффекта Франца-Келдыша в полупроводнике

Таким образом, электрооптический эффект Франца-Келдыша приводит к амплитудной модуляции излучения. Данный эффект является практически безынерционным, что позволяет использовать его в быстродействующих оптических переключателях. Времена переключения оптического сигнала в таких устройствах определяются, в основном, быстродействием управляющей электроники и могут составлять 10^{-10} с. Для обеспечения сильной модуляции оптического сигнала напряженность электрического поля в полупроводнике должна достигать 10^5 В/см. Однако, в планарных волноводах, благодаря их малой толщине, управляющее напряжение может составлять всего 5-10 В. Основным недостатком оптических переключателей на основе эффекта Франца-Келдыша является узкая спектральная область их функционирования – вблизи края фундаментальной полосы поглощения полупроводникового материала.

1.1.1.2 Распространение света в двулучепреломляющих кристаллах и линейный электрооптический эффект

В некоторых изотропных средах, например, в жидкостях в присутствии внешнего электрического поля возникает квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра). Данный эффект заключается в том, что под действием электрического поля исходно оптически изотропная среда становится анизотропной и двулучепреломляющей. При этом, под действием поля изменяется исходный показатель преломления среды. Закон Керра для показателя преломления среды имеет следующий вид:

$$n_1 - n_2 = \lambda B(\lambda, T) E^2 ,$$

где n_1 и n_2 – показатели преломления для линейно поляризованного света, распространяющегося соответственно параллельно и перпендикулярно вектору электрического поля E ; B – постоянная Керра, зависящая от материала, длины волны излучения и температуры. Эффект Керра возникает в средах, состоящих из полярных молекул, то есть молекул, имеющих отличный от нуля дипольный момент d .

В присутствии внешнего электрического поля полярная молекула ориентируется так, чтобы ее энергия в поле была минимальной. Действие внешнего электрического поля E на молекулу с дипольным моментом d заключается в возникновении пары сил с моментом $M=(d \times E)$, поворачивающих диполь так, чтобы ориентировать его вдоль поля ($d \parallel E$). Типичное время ориентации молекул имеет величину порядка 1 нс. Возникновение в среде фиксированной ориентации молекул приводит к появлению анизотропии и двулучепреломления и сопровождается изменением показателя преломления. Данный эффект за-

висит от температуры, так как тепловое движение молекул стремится разориентировать молекулы.

Так как результатом эффекта Керра является наведенное двулучепреломление, то данный эффект, как и линейный электрооптический эффект, может быть использован для пространственной, поляризационной, фазовой и амплитудной модуляции излучения. Однако, как правило, он используется лишь для амплитудной модуляции. В этом случае кювета с полярной жидкостью помещается в поперечное электрическое поле между скрещенными поляризаторами (ячейка Керра). Поворот плоскости поляризации под действием электрического поля приводит к модуляции коэффициента пропускания такого оптического устройства.

Основным недостатком квадратичного электрооптического эффекта является необходимость использования высокого управляющего напряжения – до 20 кВ. В настоящее время, квадратичный электрооптический эффект Керра используется редко. Однако, в сильном световом поле возникает оптический или электронный эффект Керра, обладающий быстродействием до 10^{-13} с. Данный эффект и его разновидности широко используются при создании быстродействующих оптических переключателей, однако, для его возникновения требуется высокая интенсивность излучения. Оптический эффект Керра относится к нелинейно-оптическим процессам.

Наиболее часто для управления излучением в устройствах волоконной и интегральной оптики используется *линейный электрооптический эффект* (эффект Поккельса). Данный эффект наблюдается в анизотропных средах, в частности, в монокристаллах.

Внешнее электрическое поле, приложенное к анизотропной среде, приводит к изменению оптических характеристик этой среды – создает наведенную анизотропию. В случае линейного электрооптического эффекта изменения показателей преломления пропорциональны приложенному электрическому полю. Прикладывая электрическое напряжение на электрод, можно регулировать показатель преломления волновода. Это происходит за счет линейного электрооптического эффекта Поккельса, который, как известно, заключается в изменении показателя преломления пропорционально напряженности приложенного электрического поля. Напряжение U , приложенное к электродам, создает электрическое поле, напряженность которого равна:

$$E = \frac{U}{L},$$

где L – расстояние между электродами.

Эффективный показатель преломления волновода записывается в виде [22]:

$$n = n_0 + \frac{n_0^3}{2} \cdot r \cdot E,$$

где n_0 – показатель преломления невозбужденной среды; r – электрооптический коэффициент.

Таким образом, приложив напряжение U к электродам, с помощью электрооптического эффекта можно управлять постоянной распространения. Следует иметь в виду, что положительное либо отрицательное управляющее напряжение приводит, соответственно, к увеличению либо уменьшению коэффициента изменения показателя преломления.

Линейный электрооптический эффект позволяет осуществлять пространственную, поляризационную, фазовую и амплитудную модуляцию излучения. Он обладает высоким быстродействием, которое ограничивается, в основном, быстродействием электронных устройств, формирующих управляющий электрический сигнал. При размещении электрооптического кристалла в объемном СВЧ резонаторе или при использовании полосковой схемы управления (сигнал модуляции в виде бегущей волны) может быть реализована частота модуляции излучения до 10 ГГц.

Основным недостатком электрооптических кристаллов является высокое управляющее электрическое напряжение. В зависимости от типа кристалла и используемого эффекта, управляющее напряжение может составлять 1-15 кВ. В тоже время, при использовании линейного электрооптического эффекта в устройствах интегральной оптики, благодаря малой толщине планарных волноводов, управляющие напряжения могут быть уменьшены до единиц-десятков вольт. Электрооптические эффекты в кристаллах используют для создания модуляторов добротности лазерных резонаторов.

1.1.1.3 Квантово-размерный эффект Штарка

В полупроводниковых наноструктурах наблюдается еще один электрооптический эффект, сопровождающийся увеличением коэффициента поглощения – квантово-размерный эффект Штарка. Квантово-размерные эффекты возникают при размерах кристалла полупроводника не превышающих боровского радиуса экситона:

$$r = \frac{n^2 \hbar^2 \varepsilon}{m e^2},$$

где m – масса экситона; ε – диэлектрическая проницаемость; $n = 1, 2, 3...$

Для большинства полупроводников величина боровского радиуса экситона лежит в интервале 1-10 нм. При таких размерах полупроводниковых кристаллов в них возникает

дополнительное расщепление энергетических уровней, увеличение ширины запрещенной зоны, а также «голубой» спектральный сдвиг экситонных полос поглощения. Данные эффекты широко используются в оптических устройствах на основе полупроводниковых наноструктур с квантовыми ямами. Двумерная квантовая яма представляет собой слой монокристаллического полупроводника с толщиной, не превышающей боровский радиус экситона, с двух сторон окруженный полупроводниковыми слоями с большей шириной запрещенной зоны. В энергетическом смысле такая структура является потенциальной ямой для электронов, находящихся в центральном слое. При малой толщине центрального слоя движение электронов в такой потенциальной яме становится квантованным в направлении перпендикулярном слою, а разрешенные энергетические уровни, соответствующие движению в этом направлении – дискретными.

Внешнее электрическое поле, приложенное перпендикулярно такому слою, приводит к смещению энергетических уровней в квантовой яме (рисунок 1.3), что соответствует уменьшению эффективной ширины запрещенной зоны (квантово-размерный эффект Штарка).

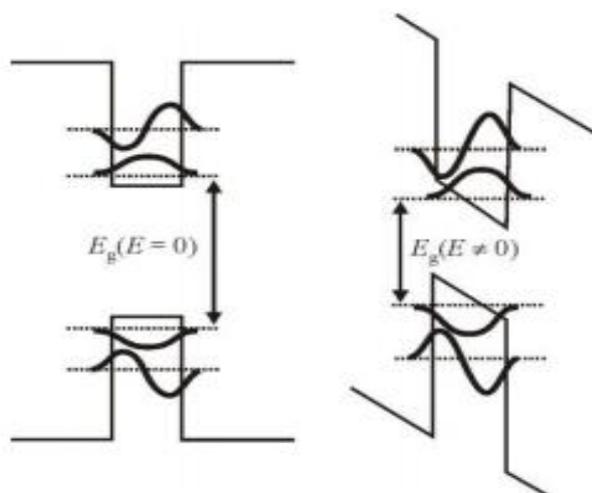


Рисунок 1.3 – Изменение эффективной ширины запрещенной зоны квантовой ямы под действием внешнего электрического поля

Таким образом, квантово-размерный эффект Штарка в полупроводниковых квантовых ямах позволяет осуществлять амплитудную модуляцию излучения. Данный эффект, как и эффект Франца-Келдыша, является безынерционным, поэтому он может использоваться в быстродействующих оптических переключателях с временами переключения до 10^{-10} с. Высокая крутизна края полосы поглощения квантовой ямы позволяет получить высокий коэффициент модуляции излучения при малых управляющих напряжениях. При

изготовлении переключателя в виде планарного волновода, управляющее напряжение может составлять единицы вольт.

Достоинством электрооптического эффекта в квантовых ямах, по сравнению с эффектом Франца-Келдыша, является возможность варьирования рабочей спектральной области в широких пределах, путем изменения ширины квантовой ямы.

Наиболее часто полупроводниковые структуры с квантовыми ямами изготавливаются на основе эпитаксиальных слоев GaAs и тройных соединений типа GaAl_xAs, GaIn_xAs, а также на основе ZnSe и тройных соединений ZnS_xSe. Изменение стехиометрии соединений позволяет изменять глубину квантовой ямы.

1.1.1.4 Оптические эффекты в полупроводниках при инжекции электронов

Для модуляции электромагнитной волны в оптическом волноводе может быть использована и зависимость оптических свойств материала волновода от концентрации свободных носителей заряда, например, электронов зоны проводимости. Для этих целей, как правило, используются полупроводниковые материалы – Si, GaAs, InP и другие. Свободные носители заряда в полупроводнике способны поглощать излучение, а изменение их концентрации приводит к изменению показателя преломления полупроводника.

Коэффициент поглощения полупроводника $\alpha_e(\lambda)$, связанный с поглощением излучения свободными электронами описывается выражением:

$$\alpha_e(\lambda) = \sigma(\lambda) N,$$

где $\sigma(\lambda)$ – сечение поглощения излучения свободным электроном (является функцией длины волны); N – концентрация свободных электронов. Таким образом, при увеличении концентрации электронов происходит увеличение коэффициента поглощения полупроводника. Величина сечения поглощения излучения свободным электроном для ближнего ИК диапазона ($\lambda = 0,8-2,0$ мкм) очень мала. Поэтому эффекты, связанные с поглощением свободными электронами проявляются лишь при очень высоких концентрациях электронов $N = 10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Зависимость показателя преломления полупроводника от концентрации свободных электронов задается соотношением:

$$n = n_0 - \frac{e^2 N}{n \varepsilon_0 m^* \omega^2},$$

где n_0 – показатель преломления полупроводника с нулевой концентрацией свободных электронов; e – заряд электрона; m^* – эффективная масса электрона; ε – диэлектрическая проницаемость вакуума; ω – круговая частота излучения.

Из приведенного соотношения видно, что увеличение концентрации свободных электронов N приводит к уменьшению показателя преломления полупроводника.

Увеличить концентрацию свободных электронов в полупроводнике можно несколькими способами. Например, с помощью фотогенерации электронов при освещении полупроводника светом с энергией фотонов большей запрещенной зоны полупроводника.

Второй способ – лавинное размножение электронов в полупроводнике в сильном электрическом поле. Данный эффект происходит при напряженности электрического поля больше 20 кВ/см и вызван процессами ударной ионизации – передачи энергии связанным электронам от свободных электронов, ускоренных электрическим полем.

Наконец, концентрация электронов в ограниченной области полупроводника может быть увеличена путем инжекции электронов из области, где их концентрация высока.

Рассмотрим последний эффект более подробно. Как правило, для осуществления инжекции электронов используются полупроводниковые структуры с p - n переходом (рисунок 1.4).

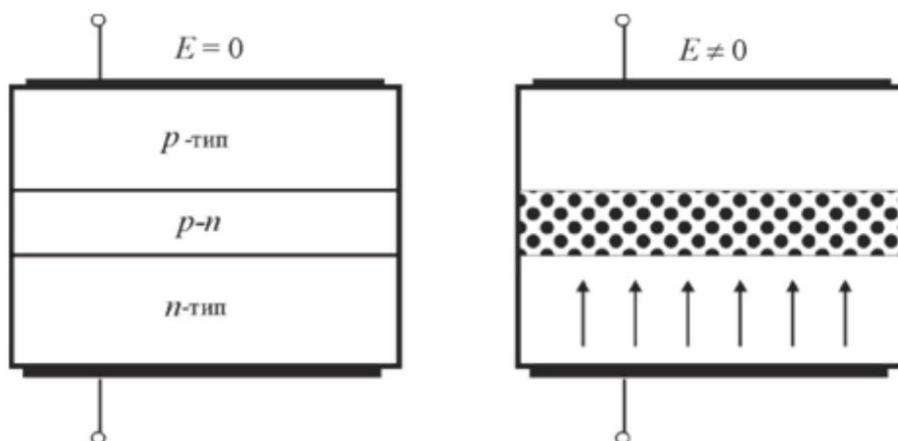


Рисунок 1.4 – Инжекция электронов в p - n переход в присутствии электрического поля

В отсутствие электрического поля ($E = 0$) область p - n перехода обеднена свободными носителями заряда ($N = 10^{13}$ - 10^{15} см⁻³). При приложении поля в прямом направлении ($E \neq 0$) происходит диффузия электронов из области n -типа в область p - n перехода. При этом концентрация электронов в p - n переходе может увеличиваться до 10^{17} см⁻³. Изменение показателя преломления при этом составляет 10^{-4} - 10^{-5} . Это малая величина, однако, ее оказывается достаточно для осуществления фазовой модуляции излучения, а при размещении p - n перехода в интерферометре – и для амплитудной модуляции. Достоинством модуляторов с инжекцией носителей заряда является малое управляющее напряжение (1-5 В) и относительно высокое быстродействие 10^{-9} – 10^{-7} с [5-6].

1.1.2 Конструкции оптических волноводов на полупроводниковых структурах

Для распространения оптического сигнала в полупроводниках существуют различные виды оптических волноводов. Как и традиционное оптическое волокно, полупроводниковые оптические волноводы работают на эффекте полного внутреннего отражения, что достигается использованием материалов с различными показателями преломления.

На рисунке 1.5 представлены различные типы оптических волноводов [25].

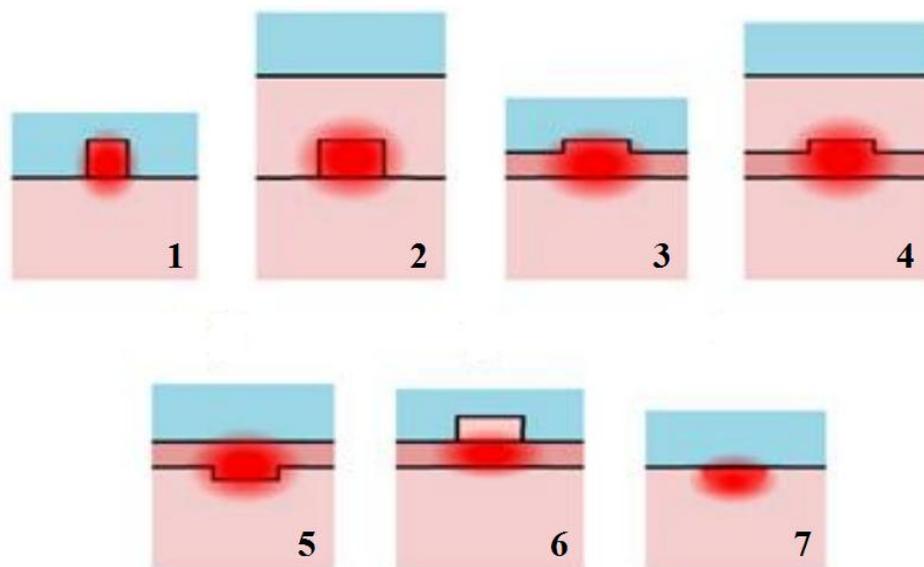


Рисунок 1.5 – Типы оптических волноводов: 1 – хребтовый; 2 – погружено-хребтовый; 3 – гребенчатый; 4 – погружено-гребенчатый; 5 – перевернуто-гребенчатый; 6 – полосковый; 7 – диффузионный

Путем конструирования профиля активной полупроводниковой области радиофотонных приборов достигается заданное сечение распространения оптической волны (рисунок 1.6) [26], для достижения требуемых свойств приборов, профиль волновода может быть необычной формы (рисунок 2.7) [27].

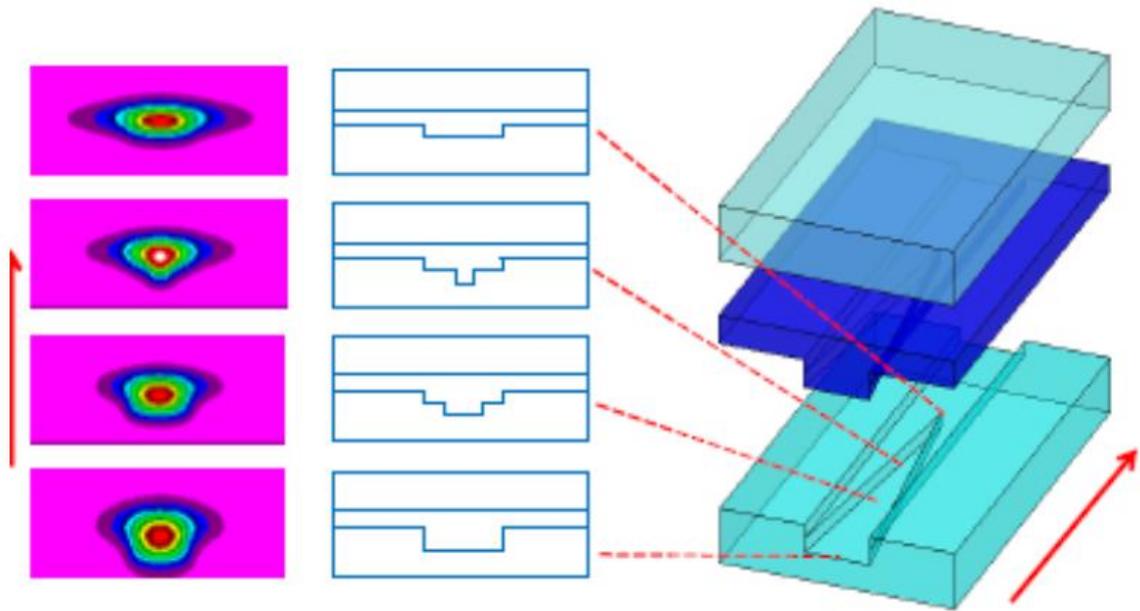


Рисунок 1.6 – Схематичное изображение зависимости сечения оптической волны от профиля волновода

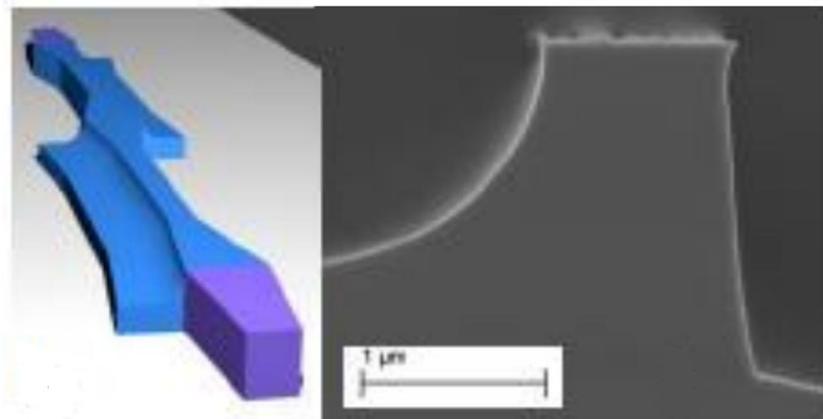


Рисунок 1.7 – Изображение профиля волновода

Для каждой технологической радиофотонной платформы свойственно использование определенных вариантов волнопроводов: для кремниевой фотоники – полосковый, для полимерной – гребенчатый, для LiNbO₃ – диффузионный [28].

Для радиофотоники на основе фосфида индия, с точки зрения технологических и конструкционных решений, наиболее подходящие к использованию гребенчатый и хребтовый волнопроводы в различных конфигурациях. В целом, для базовых гетероструктур оптические волнопроводы можно разделить на три основных типа по глубине травления с учетом того на каком слое травление было остановлено:

- неглубоко потравленные – активный слой остается закрытым небольшим количеством контактного слоя (shallow etch);

- средне потравленные – активный слой остается закрытым небольшим количеством core-слоя (median etch);

- глубоко потравленные – активный слой полностью ограничен сформированным высоким столбиком волновода (deep etch).

Каждый из этих типов волноводов технологически может быть получен на одной радиофотонной микросхеме и в силу различия параметров может применяться в различных функциональных частях микросхемы, тем самым обеспечивая оптимизацию прибора в целом [29].

На рисунке 1.8 приведено изображение всех трех типов оптических волноводов и соответственные виды распределения световой волны в сечении волновода.

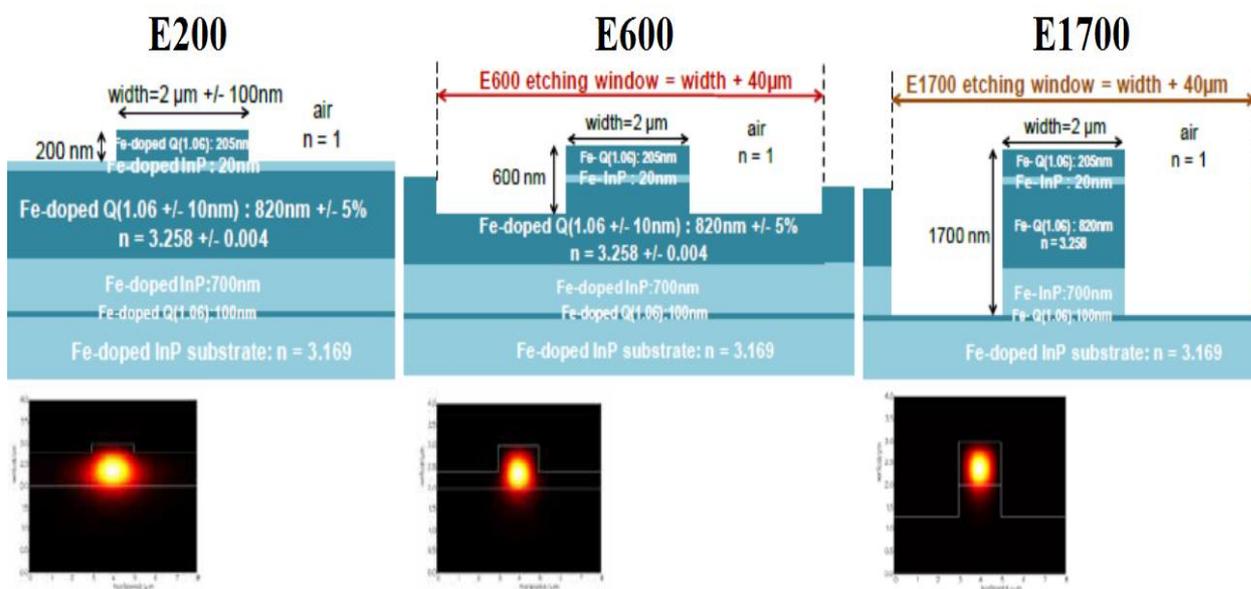


Рисунок 1.8 – Изображение основных видов InP оптических волноводов

Приведенные на рисунке 1.8 волноводы являются типичными конструкционными элементами радиофотонных изделий и доступны для изготовления на большинстве фабрик-производителей радиофотонных микросхем на основе фосфида индия, работающих на заказ (в режиме foundry) [30].

1.1.3 Влияние СВЧ волноводов на оптические волноводы

1.1.3.1 Основные типы конструкций СВЧ волноводов

Под СВЧ волноводами в контексте ЭОМ понимаются планарные линии электропередач, подводящие электромагнитные волны к модулятору. На рисунке 1.9 изображен пример конструкции ЭОМ [31].

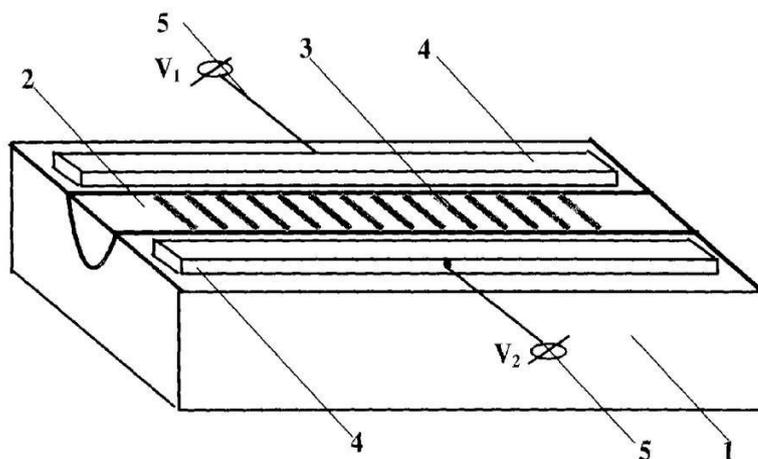


Рисунок 1.9 – Пример конструкции ЭОМ: 1 – диэлектрическая подложка; 2 – оптический волновод; 3 – фазовая решётка Брэгга; 4,5 – электроды и подводящие линии передач (СВЧ волноводы)

Существует множество типов конструкций СВЧ волноводов в составе ЭОМ. Вариантами конструкции СВЧ волновода в составе ЭОМ будут являться такие линии передач, как одиночная полосковая линия, копланарная линия и связанные полосковые линии. Структура ЭОМ, использующая в конструкции СВЧ волновода на основе одиночной полосковой линии, представлена на рисунке 1.10.

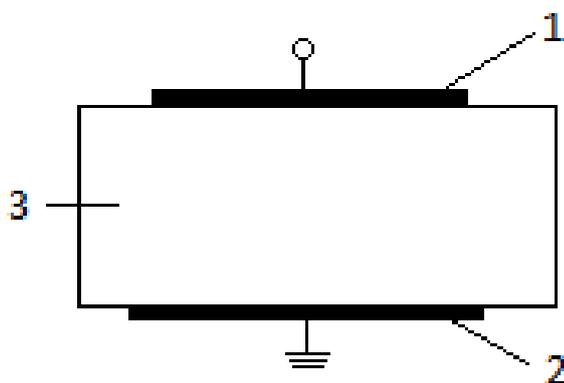


Рисунок 1.10 – Пример простейшей конструкции ЭОМ: 1 – сигнальный электрод; 2 – заземлённый электрод; 3 – оптический волновод.

Подобная конструкция рассмотрена в [32] (рисунок 1.11). Основными недостатками подобных конструкций можно считать сложность подвода СВЧ сигнала и согласование СВЧ и оптических элементов ЭОМ.

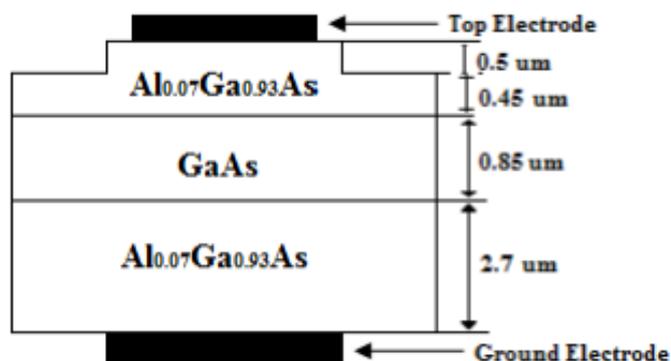


Рисунок 1.11 – Пример конструкции ЭОМ

Пример использования копланарной линии в составе ЭОМ представлен на рисунке 1.12 [33], где темно-серым цветом показана копланарная линия передачи, а светло-серым – оптические волноводы.

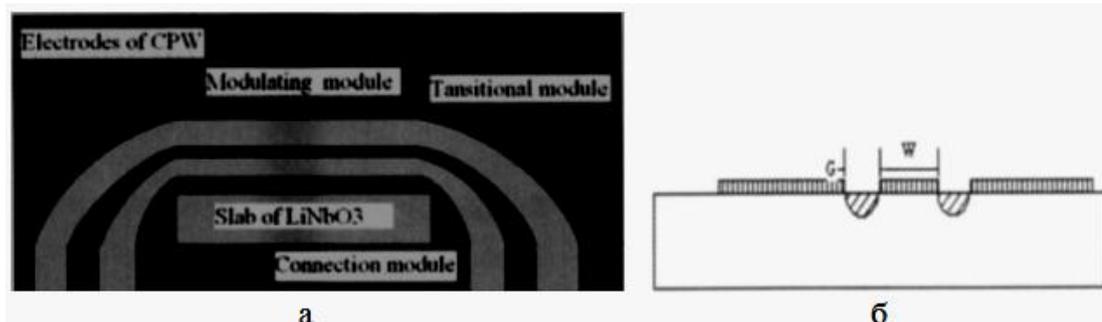


Рисунок 1.12 – ЭОМ на основе копланарной линии передачи: а – вид сверху; б – поперечное сечение

Подобные СВЧ волноводы имеют такие же недостатки, что и одиночная полосковая линия. Лишены данных недостатков ЭОМ на основе связанных линий передачи (рисунок 1.13).

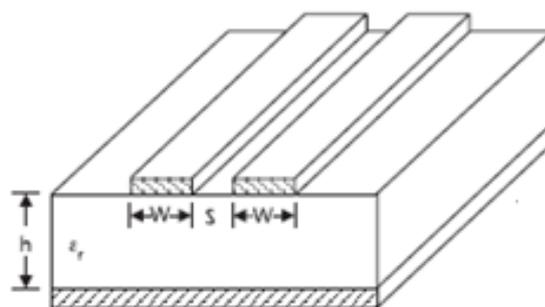


Рисунок 1.13 – Связанные линии передач

На рисунке 1.14 представлен пример использования связанных линий передачи в составе ЭОМ [34].

На подобных линиях сигнал обычно возбуждается либо в фазе, либо в противофазе. При этом на один из концов каждой из линий подключается согласованная нагрузка.

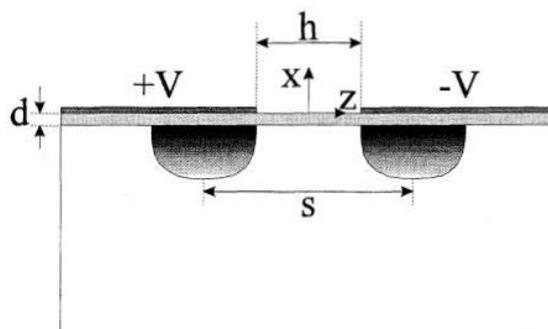


Рисунок 1.14– Пример использования связанных линий в составе ЭОМ:
 d – толщина буферного слоя; h – расстояние между связанными линиями;
 s – расстояние между оптическими волноводами

1.1.3.2 Особенности методов согласования СВЧ и оптических элементов ЭОМ и их влияние на параметры ЭОМ

Рабочая полоса частот – одна из важнейших характеристик ЭОМ, которая определяет его качество и диапазон применимости.

Максимальная рабочая частота ЭОМ определяется как частота, на которой глубина модуляции интенсивности оптического сигнала снижается до 70,7% относительно опорного низкочастотного уровня, что приводит к снижению мощности СВЧ сигнала в принимающем оптоэлектронном преобразователе на 3 дБм.

Для получения эффекта модуляции в ЭОМ необходимо обеспечить наличие бегущей волны в СВЧ линии, электрическое поле которой непрерывно во времени и простран-

стве воздействует на материал оптического канала модулятора. При согласовании оптического и СВЧ каналов наиболее целесообразным является управление свойствами СВЧ линии передачи в ЭОМ.

Для достижения максимальной эффективности электрооптической модуляции необходимо стремиться к соблюдению следующих условий:

- 1) идеальному согласованию входного и выходного СВЧ импедансов ЭОМ;

Качество согласования входного СВЧ импеданса ЭОМ в рабочей полосе устройства определяет, какая доля мощности СВЧ сигнала поступает в ЭОМ и участвует в модуляции свойств оптического канала. Чем качественнее согласование на определенной частоте, тем меньше потери мощности на отражение сигнала и тем выше эффективность модуляции. Качество согласования выходного СВЧ импеданса определяет коэффициент стоячей волны по напряжению внутри СВЧ тракта ЭОМ. Возникновение стоячих волн внутри ЭОМ приводит к снижению эффективности преобразования по причине изменения фазовой скорости СВЧ сигнала.

Качество согласования в рабочей полосе частот достигается путем расчета и оптимизации СВЧ параметров линии передачи в ЭОМ и переходов стандартными методами, применяемыми для анализа и расчета линий передач в технике СВЧ.

- 2) минимизации активных потерь в СВЧ линии ЭОМ;

Активные потери в СВЧ линии ЭОМ приводят к потере части мощности СВЧ сигнала при его распространении от входа к выходу. Это приводит к нарастающему при удалении от СВЧ входа снижению эффективности электрооптического преобразования и сужению рабочей полосы частот ЭОМ.

Основными причинами активных потерь являются:

- конечная электропроводность материалов электродов и скин-эффект;
- геометрия электродов (толщина металлизации и ширина линии);
- топологические особенности СВЧ линии;
- сравнительно высокое электрическое сопротивление полупроводниковых областей кристалла, участвующих в протекании СВЧ тока (потери в омических контактах и легированных областях полупроводниковой структуры).

- 3) идеальному согласованию скоростей распространения оптического и СВЧ сигналов в ЭОМ.

Зависимость между максимальной рабочей частотой идеального ЭОМ на основе бегущей волны и согласованием скоростей распространения оптического и СВЧ сигналов в нем соответствует соотношению [17]:

$$f_0 = \frac{1.39}{\pi \cdot \left| \frac{1}{v_{opt}} - \frac{1}{v_{\mu}} \right| \cdot l},$$

где v_{opt} – групповая скорость распространения оптического сигнала;

v_{μ} – групповая скорость распространения электрического сигнала;

l – длина электродов.

Данное соотношение показывает, что максимальная рабочая частота тем больше, чем ближе значения групповых скоростей распространения оптического и электрического сигнала.

Пояснение к рассогласованию скоростей оптического и электрического сигналов приведено на рисунке 1.15 [36].

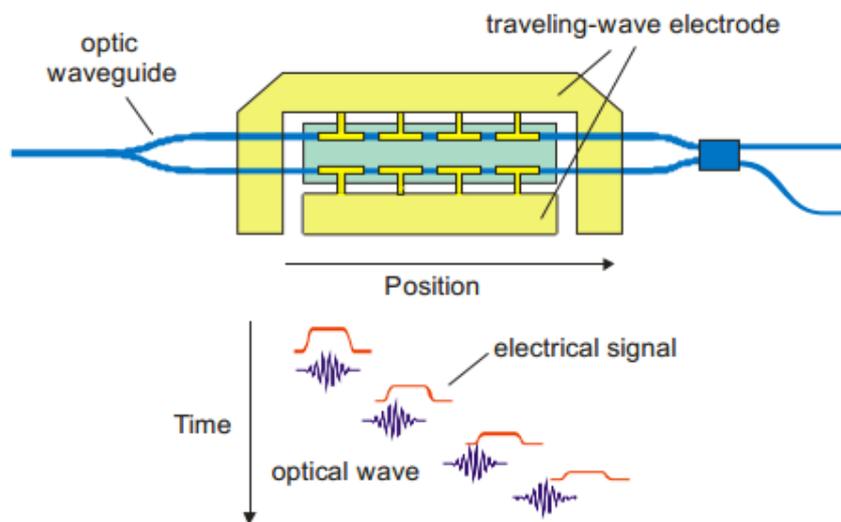


Рисунок 1.15– Пояснение к рассогласованию скоростей оптического и электрического сигналов в электрооптическом модуляторе

Для достижения согласования необходимо вычислить групповую скорость оптического сигнала, например, путем измерения группового показателя преломления. Затем необходимо подобрать конструкцию линии передачи таким образом, чтобы ее эффективная диэлектрическая проницаемость была наиболее близка к оптическому групповому индексу (показателю преломления). Следует учитывать, что эффективная диэлектрическая проницаемость линии СВЧ не является постоянной в диапазоне частот. В качестве примера приведены данные на рисунке 1.16.

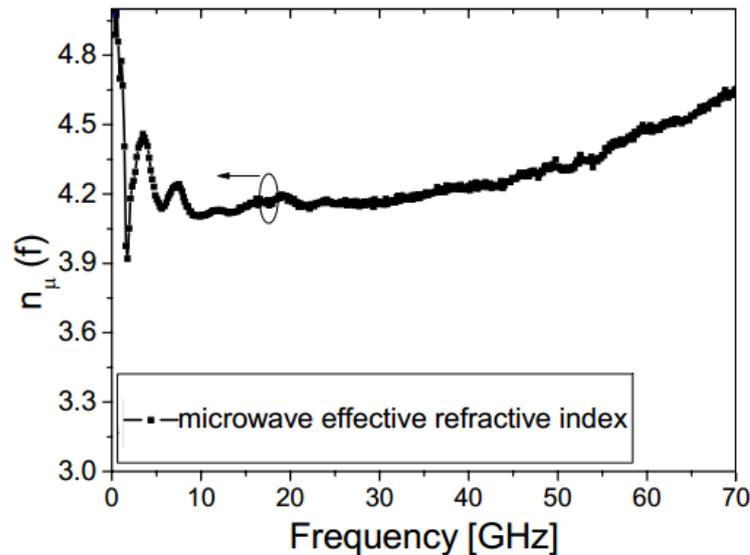


Рисунок 1.16– Частотная зависимость эффективной диэлектрической проницаемости линии СВЧ в ЭОМ

В работе [36] приведен один из способов, позволяющих управлять эффективной диэлектрической проницаемостью линии СВЧ. В данном способе исследованы сравнительные характеристики ЭОМ с электродами, сформированными непосредственно на подложке полуизолирующего фосфида индия, а также ЭОМ с электродами, сформированными на такой же подложке, но с промежуточным слоем бензоциклобутена (BCB, диэлектрик с низкой диэлектрической проницаемостью). Конструкции данных СВЧ линий схематично приведены на рисунке 1.17.

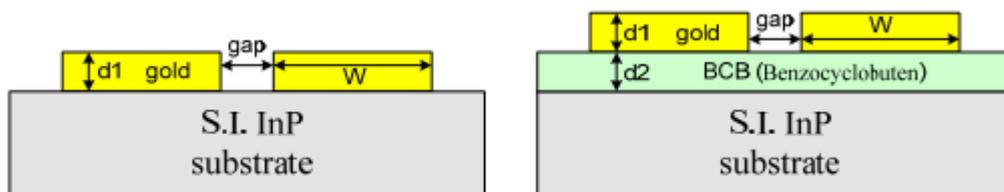


Рисунок 1.17 – Конструкции линий СВЧ с различной эффективной диэлектрической проницаемостью

Различия в эффективной диэлектрической проницаемости полученных линий и соответствующие характеристики ЭОМ приведены на рисунке 1.18.

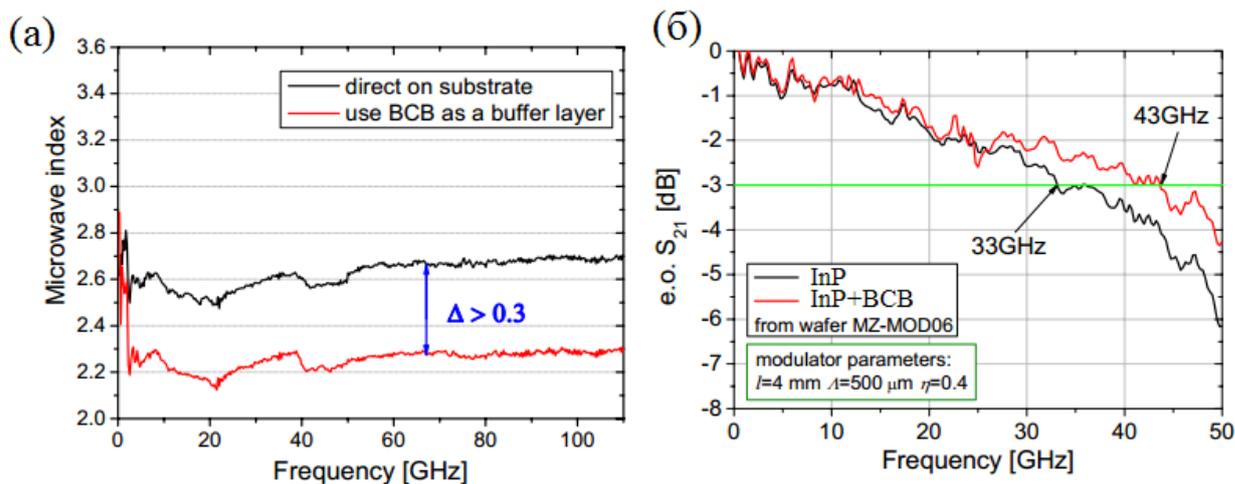


Рисунок 1.18 – Характеристики линий СВЧ с различной конструкцией и ЭОМ на их основе

1.1.4 ЭОМ на основе различных полупроводниковых материалов

1.1.4.1 ЭОМ на основе InP

При анализе различных электрооптических модуляторов обычно проводят сравнение по трем основным параметрам:

- напряжение полуволнового смещения V_p ;
- ширина полосы пропускания F ;
- оптические потери I .

В большинстве случаев при разработке интерферометров Маха-Цендера на основе InP, оптимизация конструкции проводится путем исследования влияния элементов/составных частей модулятора на эти три параметра с целью получения как можно меньших значений V_p и IL , а также как можно большей ширины полосы пропускания. Оптимально выбранные конструкции гетероэпитаксиальных структур, конструкции оптических и СВЧ волноводов, методы согласования СВЧ и оптических элементов ЭОМ, а также конструкции радиофотонных модулей, позволяют добиться оптимальных значений не только трех основных, но и остальных параметров ЭОМ.

1.1.4.2 Анализ конструкций гетероэпитаксиальных оптических волноводов на основе InP

Конструкция гетероэпитаксиальной структуры (гетероструктура) ЭОМ определяет диапазон рабочих длин волн и в первую очередь влияет на значения напряжения полуволнового смещения V_p и уровень оптических потерь. В общем случае, для получения электрооптического эффекта гетероструктура представляет собой pin-диод, выращенный на полуизолирующей подложке (100) InP. Pin-диодная структура позволяет эффективно

управлять коэффициентом преломления при меньших значениях напряженности электрического поля, в сравнении с другими типами структур [37]. На подложках методами эпитаксии выращивают активный слой с заданным коэффициентом преломления, ограниченный снизу и сверху слоями, изготовленными из материалов, имеющих меньший коэффициент преломления. Прохождение световой волны в слое с высоким коэффициентом преломления основано на эффекте полного отражения от границ слоя с слоями-оболочками. В общем виде эффект представлен на рисунке 1.19.

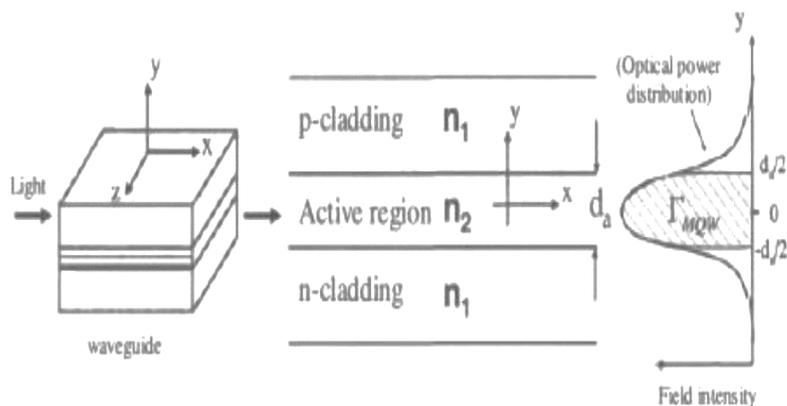


Рисунок 1.19– Схематичное изображение эффекта полного отражения

На рисунке 1.20 приведен пример pin-диодной структуры ЭОМ с обозначенным путем световой волны в сечении активного слоя [38].

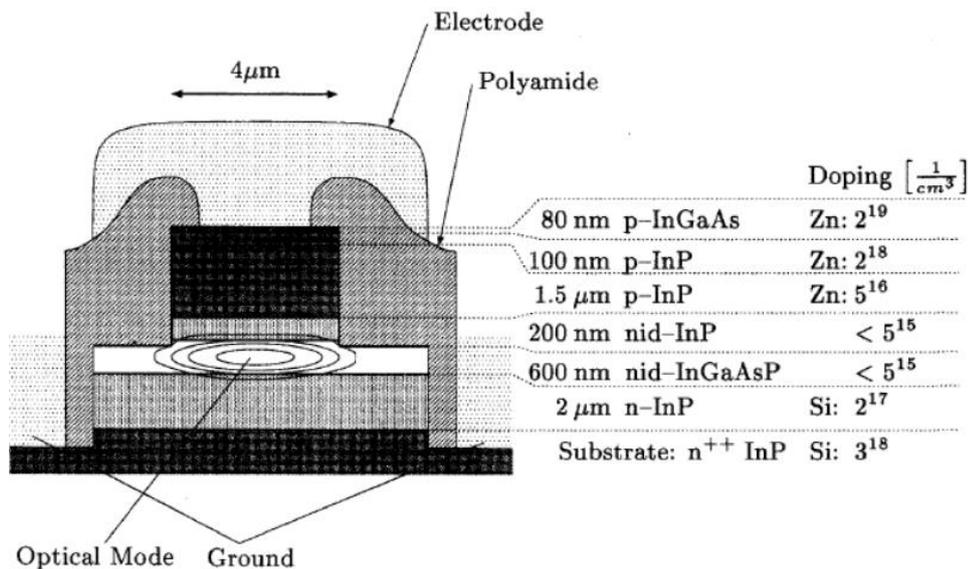


Рисунок 1.20– Pin-диодная структура

Для более эффективного электрооптического преобразования в качестве i-слоя используют мультиквантовые ямы (MQW), за счет возникновения квантоворазмерного эффекта Штарка, значение напряженности электрического поля, необходимого для управле-

ния коэффициентом преломления, существенно снижается. Однако в случае использования MQW необходимо использование специальных дополнительных слоев (core-слоев), уменьшающих адсорбцию на границах активного слоя, в противном случае оптические потери значительно увеличиваются (рисунок 1.21).

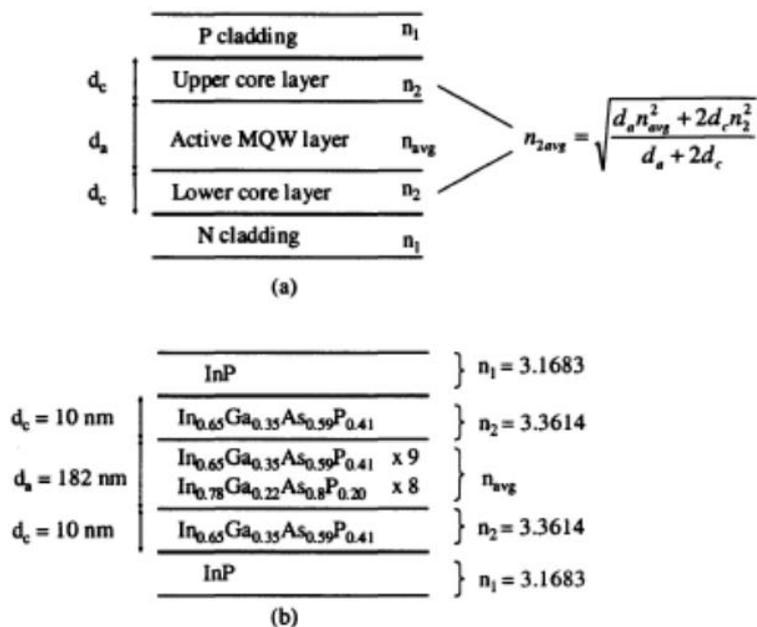


Рисунок 1.21 – Схематичное изображение гетероструктуры с MQW

Для ЭОМ на основе InP при изготовлении мультиквантовой ямы используют несколько типов материалов: InGaAsP и InAlGaAs (в качестве внутренних барьеров MQW выступают слои InP или InGaAsP), а также композицию InGaAs/InAlAs. В случае использования InGaAs/InAlAs, помимо сложностей в согласовании кристаллических решеток при эпитаксиальном росте на InP структурах, InAlAs p-типа имеет очень низкую подвижность дырок и такие ЭОМ значительно проигрывают в ширине полосы пропускания, в сравнении с ЭОМ MQW на основе InGaAsP [39].

MQW на основе InAlGaAs обладают более малым уходом своих свойств при изменении температуры, особенно в область высоких значений температуры [40]. Однако, несмотря на более худшую термоустойчивость, MQW на основе InGaAsP обладают более бездефектной эпитаксиальной структурой, и в силу отсутствия в своем составе алюминия не подвержены окислению в процессе изготовления ЭОМ, что делает этот материал наиболее используемым при производстве ЭОМ на основе InP [41]. Изображение типичной мультиквантовой ямы InGaAsP/InP, полученное методом туннельно-эмиссионной микроскопии, представлено на рисунке 1.22 [42], а схематичное изображение сечения электрооптического модулятора с такой ямой на рисунке 1.23 [43].

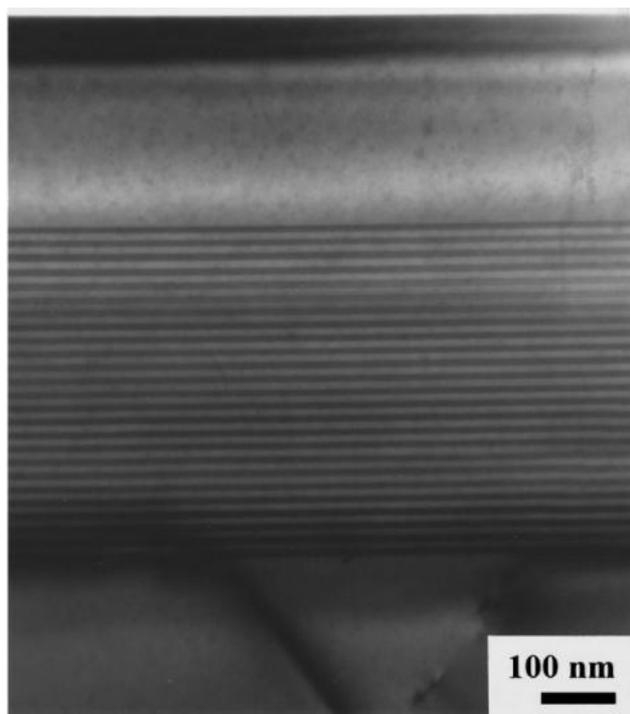


Рисунок 1.22 – Микрофотография MQW гетероструктуры InGaAsP/InP

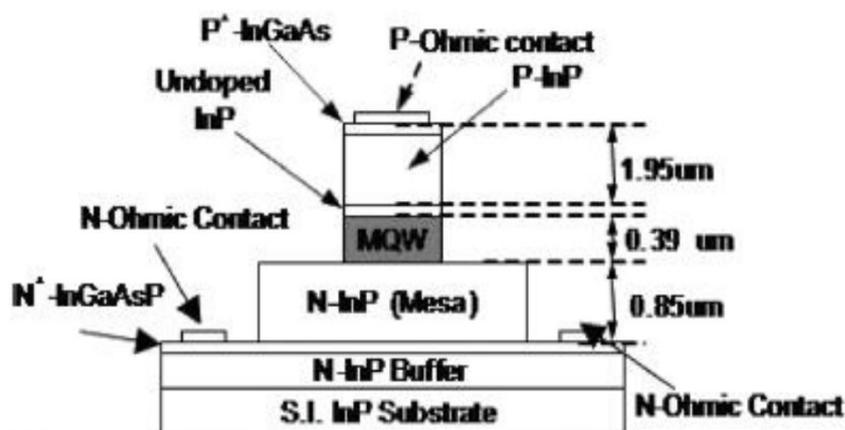


Рисунок 1.23 – ЭОМ на основе InGaAsP/InP MQW

В общем виде типичная конструкция гетероструктуры ЭОМ на основе фосфида индия приведена в таблице 1.1. Однако в большинстве случаев используются более сложные конструкции, с дополнительными слоями, необходимые для оптимизации и достижения требуемых параметров модулятора.

Таблица 1.1 – Конструкция гетероструктуры ЭОМ

Тип легирования	Материал	Типичный уровень легирования, см^{-3}	Описание слоя
p+	InP	1E18	Контактный/отражающий слой
i	InP	<1E15	Core-слой

MQW	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$	$<1\text{E}15$	Мультиквантовая яма
i	InP	$<1\text{E}15$	Core-слой
n+	InP	$2\text{E}18$	Контактный/отражающий слой
Полуизолирующий InP - подложка			

Стоит отметить, что при разработке электрооптических модуляторов на основе квантоворазмерного эффекта Штарка, для уменьшения эффекта адсорбции в квантовой яме, MQW проектируют и изготавливают таким образом, чтобы пик фотолуминесценции был смещен от рабочей длины волны на 140-170 нм (рисунок 1.24).

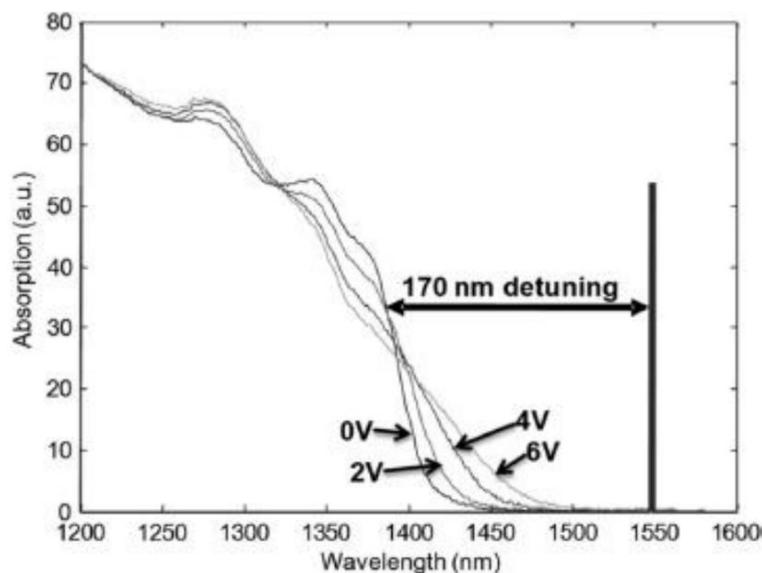


Рисунок 1.24 – Спектр поглощения ЭОМ

Таким образом, путем снижения концентрации фотовозбужденных носителей в рабочем диапазоне длин волн, достигается значительно меньшие оптические потери и полуволновое напряжение, а также повышается электрооптическая чувствительность.

Наряду с pin-структурами, в ряде случаев при изготовлении InP ЭОМ получили распространение nip-структуры, в которых вместо верхних слоев p-типа проводимости используют слои n-типа, обладающие значительно большей подвижностью дырок. За счет этого достигается улучшение частотных свойств и снижаются оптические потери ЭОМ [44]. Схематичное изображение nip-ЭОМ приведено на рисунке 1.25.

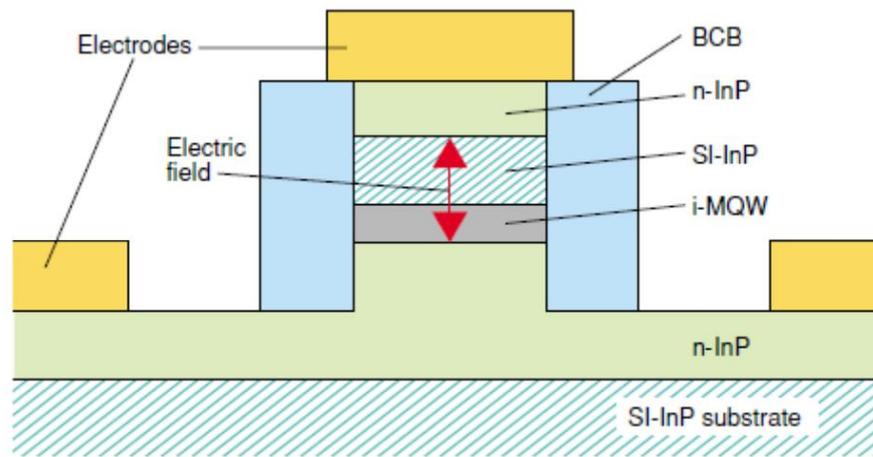


Рисунок 1.25– Схематичное изображение ЭОМ на основе *nin*-структур

Однако низкая линейность электрооптических параметров ограничивает применение ЭОМ такого типа в широкополосных волоконно-оптических системах связи.

1.1.4.3 Влияние особенностей конструкций гетероэпитаксиальных оптических волноводов на параметры ЭОМ

1.1.4.1.1 Влияние уровней легирования слоев

Принцип работы *pin*-диодного интерферометра Маха-Цандера заключается в управлении коэффициентом преломления активной области путем изменения уровня приложенной напряженности электрического поля. Чем меньше толщина *i*-слоя такого диода, тем меньшее значение напряженности требуется приложить к диоду для эффективной модуляции оптического сигнала, что соответственно приводит к малым значениям полуволнового напряжения. С другой стороны, сужение *i*-слоя приводит к тому, что оптическая волна из активного слоя распространяется в высоколегированные контактные области *n*- и *p*-типа проводимости с более высокими уровнями коэффициентов абсорбции, что приводит к повышению общих оптических потерь ЭОМ. В тоже время коэффициент абсорбции легированных слоев зависит от концентрации и типа проводимости, причем для слоев InP *n*-типа коэффициент абсорбции на порядок меньше чем для слоев *p*-типа при равных уровнях легирования, что напрямую влияет на оптические потери (таблица 1.2) [45].

Таблица 2.2 – Зависимость оптических потерь от уровня и типа легирования слоев InP

Тип полупроводника	Уровень легирования, см-3	Оптические потери, дБ/см
p-InP	5E17	-43,6
p-InP	1E18	-87,3
p-InP	1,5E18	-130,9
p-InP	2E18	-174,5
p-InP	5E18	-436,3

n-InP	5E17	-4,1
n-InP	1E18	-8,2
n-InP	1,5E18	-12,3
n-InP	2E18	-16,4
n-InP	5E18	-41,0

Таким образом, при снижении толщины i -слоя и сохранении значения оптических потерь ЭОМ, необходимо снижать концентрацию в близлежащих к MQW контактных слоях. Для того чтобы не увеличить омические потери самого pin -диода, при такой конструкции гетероструктуры, вводят слои, обеспечивающие градиент концентрации от контактного к активному слою (doping profile extension) (рисунок 1.26) [46].

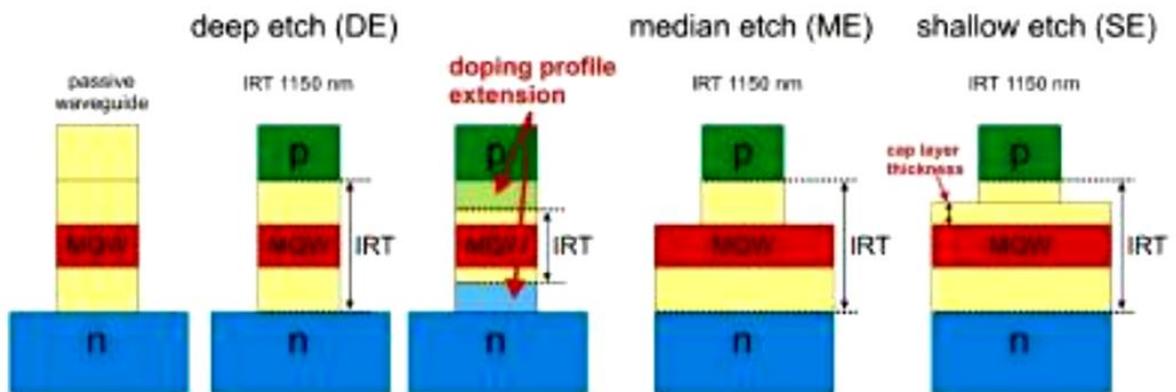


Рисунок 1.26 – Схематическое изображение оптических волноводов различного типа

На рисунке 1.27 приведены зависимости оптических потерь в зависимости от толщины i -слоя для различных типов волноводов и вариантов легирования: однородный (regular) и градиентный (light), а также для пассивного волновода без контактного слоя p-типа. В силу того, что сечение распространения оптической волны зависит от типа волновода, уменьшение толщины i -слоя при различных вариантах легирования по-разному оказывает влияние на оптические потери [47].

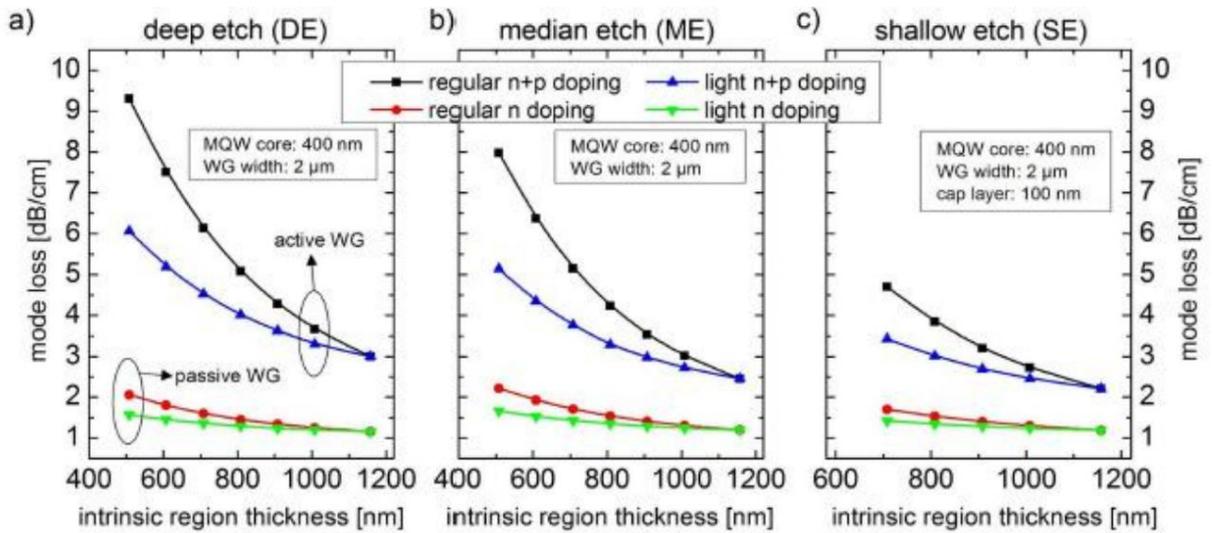


Рисунок 1.27 – Зависимости оптических потерь от толщины *i*-слоя для различных типов ВОЛНОВОДОВ

Для снижения влияния толщины *i*-слоя на параметры ЭОМ, в ряде случаев данный слой изготавливают с незначительным уровнем легирования, однако это приводит к увеличению емкости диода, и как следствие к ухудшению его частотных свойств, поэтому для изготовления ультра широкополосных ЭОМ *i*-слой не легируют [48].

1.1.4.1.2 Влияние ширины волновода

Ширина оптического волновода практически пропорционально влияет на диаметр сечения проходящей через него оптической волны и, как следствие, на оптические параметры ЭОМ. На рисунке 1.28 приведены зависимости оптических потерь от ширины волновода для различных типов конструкционного исполнения волноводов.

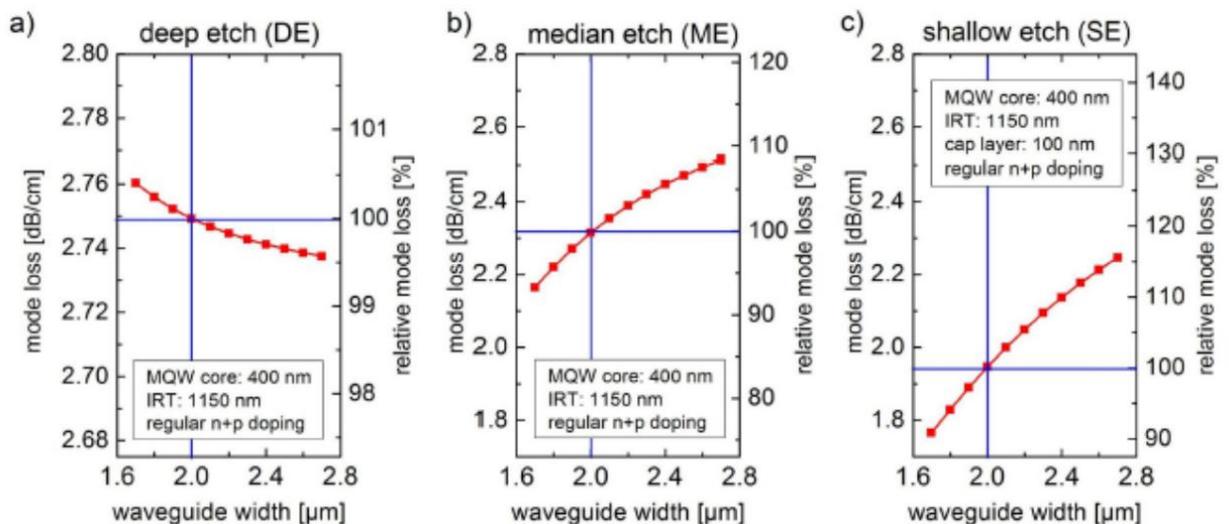


Рисунок 1.28 – Зависимости оптических потерь от ширины волновода для различных типов ВОЛНОВОДОВ

При максимальном уровне потерь среди вариантов конструкций, конструкция «deep etch» обладает наименьшей зависимостью от значения ширины. Использование конструкции «shallow etch» обеспечивает минимальные оптические потери, но параметры данной конструкции более зависимы от точности исполнения линейного размера волновода.

1.1.4.1.3 Влияние относительного положения мультиквантовой ямы между контактными слоями

Одним из путей уменьшения толщины *i*-слоя без увеличения оптических потерь является относительное уменьшение расстояния между контактными слоями *n*-типа проводимости и MQW, при этом расстояния между контактными слоями *p*-типа проводимости и MQW может как оставаться неизменным, так и увеличиться. Искусственно введенная асимметрия между слоями вводится с учетом оценки абсорбционных потерь в слоях различного типа проводимости – в *n*-типе на порядок меньше чем в *p*-типе. За счет баланса разницы между абсорбционными оптическими потерями и уменьшения толщины *i*-слоя добиваются оптимизации баланса между общими потерями модулятора и значением полуволнового напряжения. На рисунке 1.29 для различных типов конструкций и видов легирований волновода приведены зависимости оптических потерь от сдвига центрального положения мультиквантовой ямы в *i*-слое заданной и постоянной толщины.

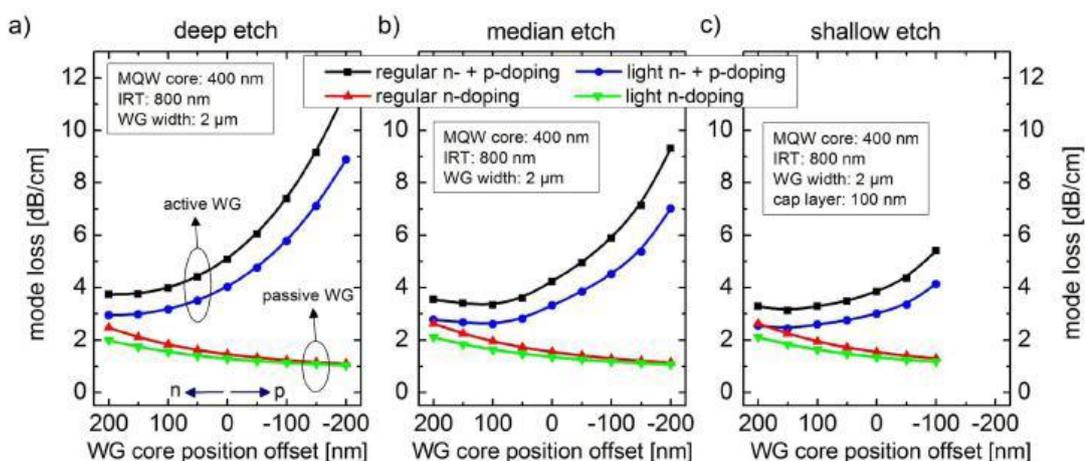


Рисунок 1.29 – Зависимости оптических потерь от сдвига центрального положения мультиквантовой ямы в *i*-слое для различных типов волноводов

1.1.4.1.4 Влияние мольного состава мультиквантовой ямы

При выборе материала $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ для MQW необходимо учитывать особенности процесса эпитаксиального роста – выращенные напряженные слои мультиквантовой ямы обладают рядом нелинейных электрооптических эффектов, сильно зависящих от качества и умения изготовителя. Слои, согласованные по кристаллической решетке с InP,

позволяют более точно рассчитать изменение коэффициента абсорбции и коэффициента преломления в зависимости от приложенного значения электрического поля. На рисунке 1.30 приведен пример подобного расчета.

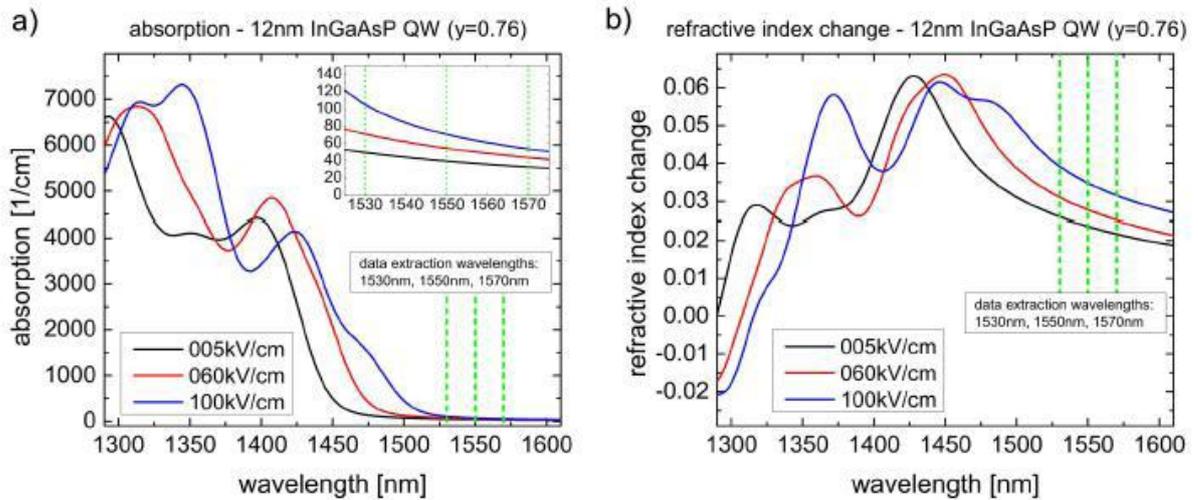


Рисунок 1.30 – Зависимости коэффициента абсорбции и коэффициента отражения от длины волны для различных значений напряженности электрического поля

Для определения соотношения в молярном составе между долями согласованного с InP слоя $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ может быть использована формула [49].

$$\chi = \frac{0,4541}{1-0,029y}$$

Ширина мультиквантовой ямы в зависимости от молярного состава влияет на значение фотолюминесценции (рисунок 1.31), оптимизация молярного состава позволяет получать заданные изменения коэффициента преломления от длины волны и от изменения напряженности электрического поля (рисунок 1.32).

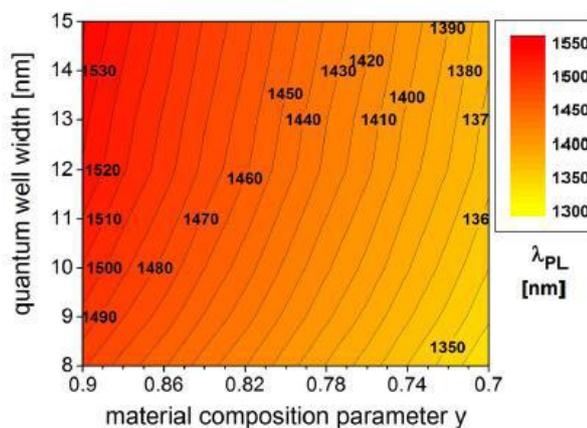


Рисунок 1.31 – Зависимость фотолюминесцентного пика от молярного состава и ширины мультиквантовой ямы

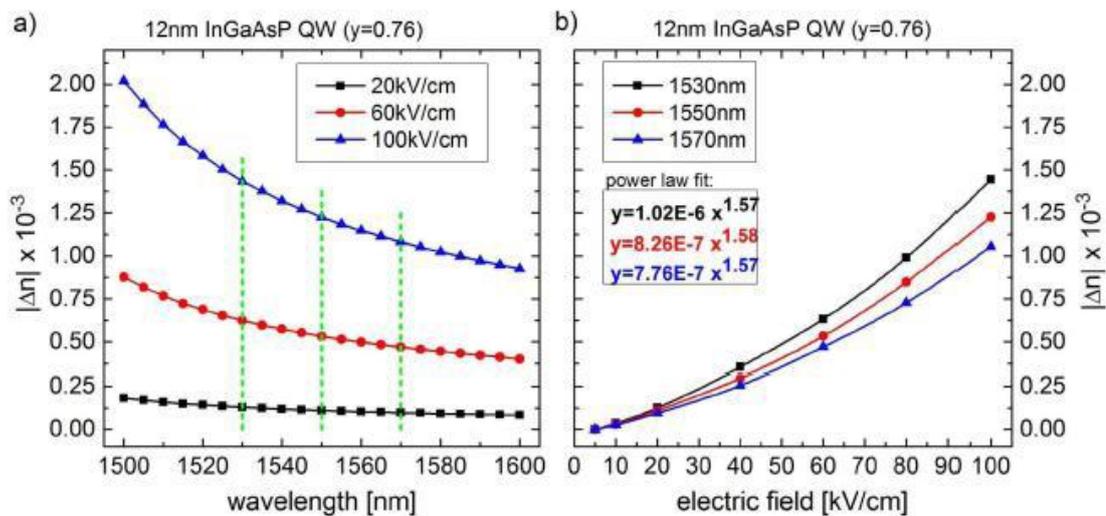


Рисунок 1.32 – Зависимости коэффициента отражения от длины волны и напряженности электрического поля

Определение заданного мольного состава MQW используют для оптимизации значения полуволнового напряжения и диапазона рабочих длин волн ЭОМ.

1.1.4.4 ЭОМ на основе кремния

Одно из направлений развития рынка радиофотонных компонентов – кремниевая фотоника. Основная преимущество кремниевой фотоники - это способность изготавливать на гигантских фабриках изделия в огромных объемах по низкой цене, что может являться ключевым фактором для обеспечения телекоммуникационной отрасли компонентами DWDM-систем.

Однако у кремния, как у материала для фотоники, существует значительное количество недостатков, ограничивающее его применение в разработке и производстве опто-электронных микросхем. К ним относятся: недостаточно отработанная технология, только один поставщик, применение ограничивается только системами передачи данных, очень высокий уровень потери сигнала. К преимуществам относятся очень малые размеры.

1.1.5 Конструкции радиофотонных модулей и тенденции их развития

Радиофотонные модули ЭОМ, условно можно разделить на два класса:

- с монтажом модулей на печатные платы (в виде радиофотонных компонентов);
- без монтажа.

Независимо от класса, внутри модуль представляет собой либо гибридную микросборку пассивных и активных элементов [50], либо содержит радиофотонную интегральную микросхему.

В случае модулей ЭОМ для волоконно-оптических систем широкополосной связи поколения выше 25G, предназначенных под монтаж методом пайки, общепринято использование металлокерамических модулей с большим количеством выводов. Несмотря на попытки производителей модулей жестко стандартизировать модули по габаритным размерам, по положению и количеству выводов, большинство производителей радиофотоники заказывают модули по своей конструкторской документации. Моделирование собственных модулей позволяет более эффективно учесть паразитные параметры микросборки (или микросхемы) и модуля, что крайне важно при разработке и создании широкополосных высокочастотных компонентов радиофотоники в целом, и электрооптических модуляторов в частности [51].

Типичные виды металлокерамических корпусов для радиофотонных модулей компании Kyocera приведены на рисунке 1.33 [52].

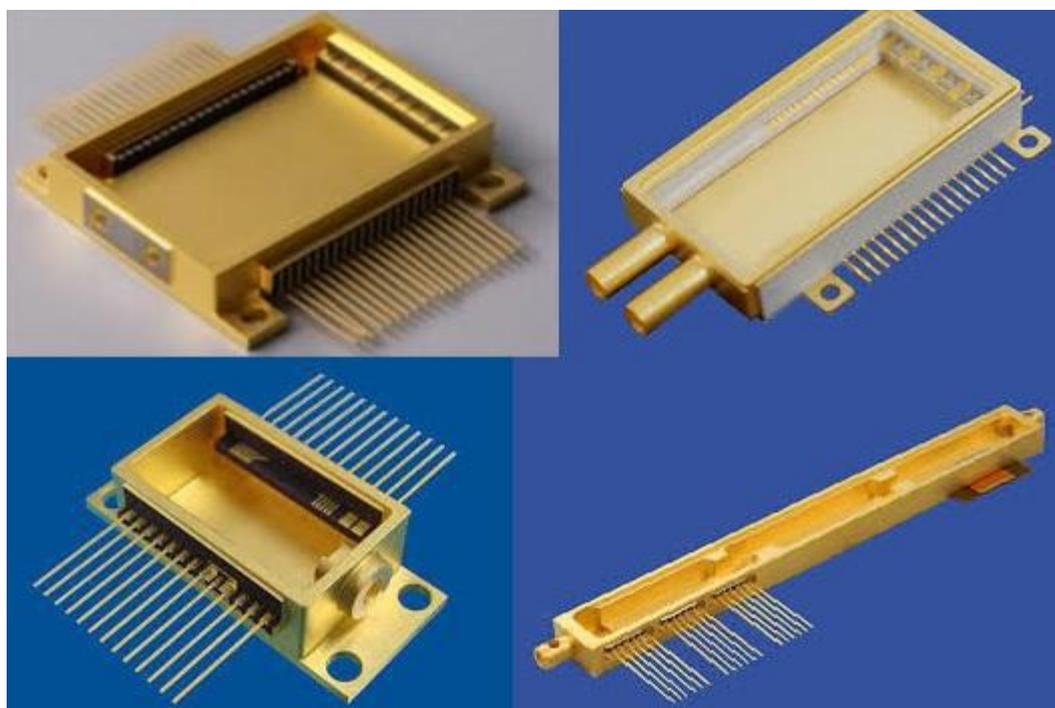


Рисунок 1.33 – Корпуса под монтаж для радиофотонных компонентов компании Kyocera

На рисунке 1.34 приведен пример монтажа радиофотонного модуля типа «бабочка» в плату.

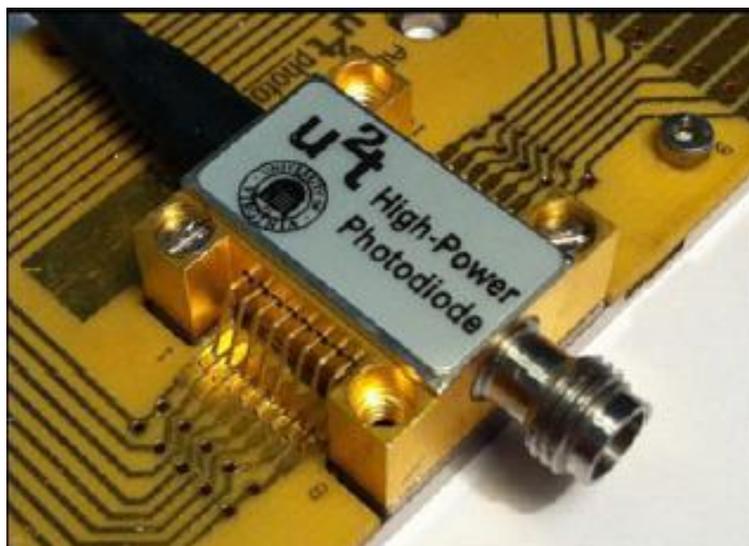


Рисунок 1.34 – Радиофотонный модуль, смонтированный в печатную плату

Модули, не предназначенные под монтаж, отличаются типами разъемов, выбранных для удобства подключения электрических сигналов. Наиболее критичным типом разъемов является СВЧ разъем, ограничивающий частотные возможности ЭОМ.

С точки зрения типов и габаритов модулей, не предназначенных под монтаж, их стандартизация началась более 15 лет назад. Основные типы стандартных конструкций приведены на рисунке 1.35. Основное отличие модулей друг от друга – последовательное уменьшение габаритных размеров с одновременным улучшением функциональных параметров [53].

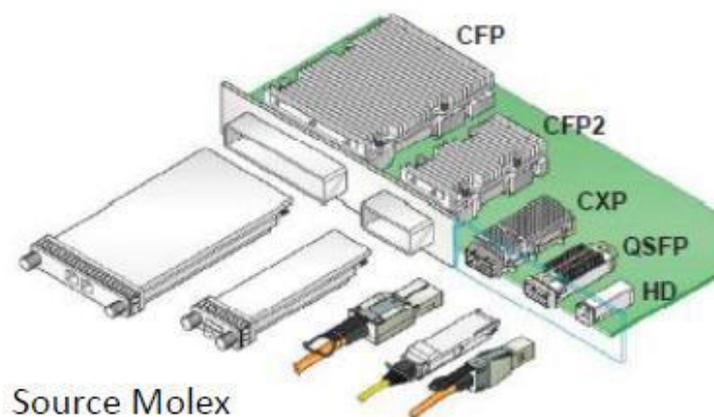


Рисунок 1.35 – Типы стандартных модулей

Основная тенденция развития радиофотонных модулей – постоянная миниатюризация изделий (рисунок 1.36). В первую очередь это связано с возросшими требованиями по частотным параметрам и увеличению количеству модулей в конечной аппаратуре, к примеру, в центрах обработки данных [54].

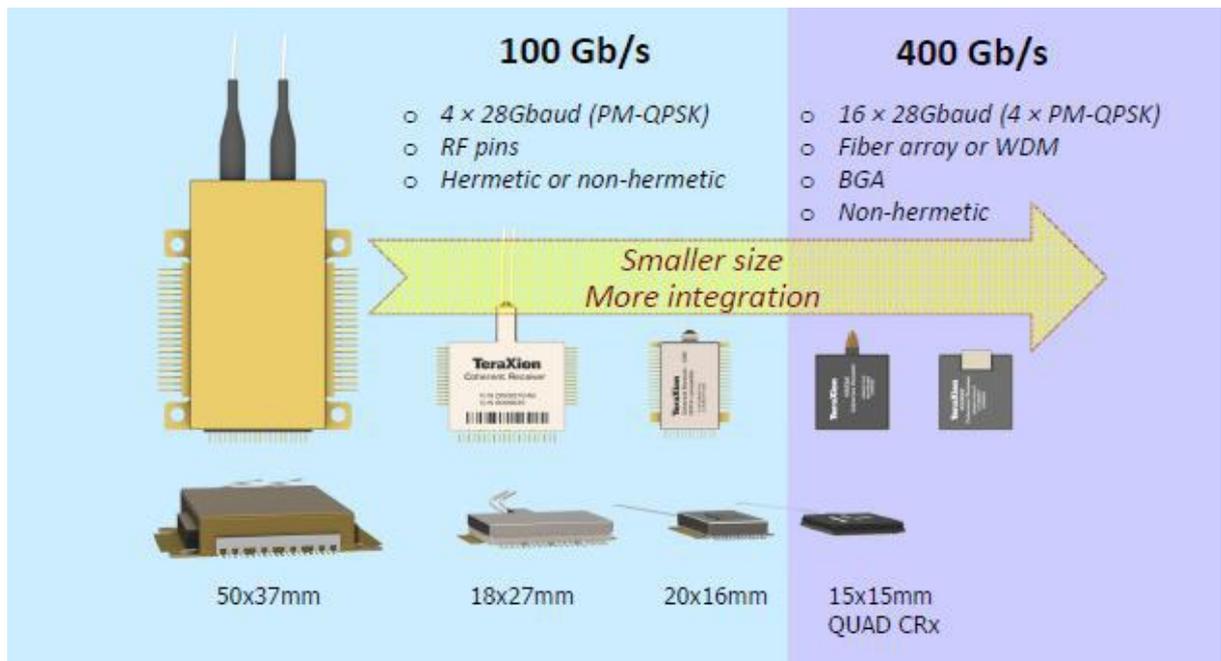


Рисунок 1.36 – Тенденция развития радиофотонных модулей

Следует выделить общие тенденции развития технического уровня радиофотонных модулей, а также факторы, непрерывно подвергающиеся улучшению [55]:

- физические размеры;
- герметичность;
- комплексное проектирование всех элементов, входящих в модуль;
- физическая плотность компонентов;
- 3D интеграция при корпусировании;
- использование новых композитных и наноматериалов;
- тепловое моделирование;
- моделирование механических напряжений;
- экологическая совместимость;
- энергетическая экономия;
- надежность в работе при значительных уровнях внешних воздействующих факторов;
- выход годных изделий и себестоимость.

1.2 Интегральные схемы на основе АЗВ5 с нормами от 250-180 нм до 65-45 нм

Подготовка данного подраздела вызвана несколькими причинами. Первая из них состоит в том, что технологический сектор ЦКП с 2010 г. принимал участие в проведении

НИОКТР по 218 постановлению правительства РФ совместно с индустриальным партнером АО «НПФ «Микран». Необходимость измерений параметров транзисторов, диодов СВЧ и монолитных интегральных схем, проектирование и изготовление которых проводилось в рамках НИОКТР, стимулировали развитие участка измерений до современного уровня. Первые работы по созданию МИС были проведены на гетероструктурах GaAs. Затем в работы были включены разработки на основе GaN. По мере развития компетенций сотрудников, в том числе через опережающую подготовку в 2010-2011 годах специалистов в области наногетероструктурной электроники по проекту Фонда инфраструктурных и образовательных программ РОСНАНО, был поставлен вопрос о начале работ по другим материалам, в частности, SiGe, Si.

Подраздел построен таким образом, чтобы приводимые материалы могли воспринять студенты, аспиранты и молодые специалисты, приступающие к работам в области проектирования и изготовления интегральных схем разной специализации предшествовавшей подготовки. Тем не менее, мы постарались выдержать направленность обзора на оценку перспектив отклика ЦКП на реальные запросы заказчиков, как через заключение договоров с базовой организацией, так и через прямые обращения.

Усложнение электронной аппаратуры, высокая трудоемкость операций по установке и электрическому монтажу дискретных элементов обусловили необходимость использования функционально законченных электронных узлов, изготовление которых было бы автоматизированным – интегральных микросхем, выполняющих функции преобразования, хранения, обработки, передачи и приема информации и определяющих тактико-технические, конструктивно-технологические, эксплуатационные и экономические характеристики ЭВМ.

Интегральной микросхемой (ИМС) называют функционально законченный электронный узел, элементы и соединения в котором конструктивно неразделимы и изготовлены одновременно в едином технологическом процессе.

По конструктивно-технологическому исполнению ИМС делятся на полупроводниковые и гибридно-пленочные.

Полупроводниковые ИМС имеют в своей основе кристалл полупроводникового материала, в поверхностном слое которого (путем внедрения атомов примеси) создаются все элементы ИМС – транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы, а соединения между ними выполняются по поверхности кристалла тонкопленочной технологией.

Полупроводниковые ИМС могут быть:
- однокристалльными (монолитными);

- многокристалльными (микросборки).

Однокристалльные ИМС выполнены на одном кристалле полупроводникового материала, могут иметь индивидуальный корпус с внешними выводами для монтажа на печатной плате, а могут быть бескорпусными и входить в состав микросборок.

Микросборка представляет собой совокупность бескорпусных микросхем, смонтированных на общей коммутационной плате. Также в качестве компонентов в микросборке могут присутствовать бескорпусные электрорадиоэлементы.

Гибридно-пленочные ИМС состоят из пленочных пассивных элементов (резисторов, конденсаторов и т.п.), бескорпусных полупроводниковых кристаллов (транзисторов, диодов, ИМС) и коммутационных проводников, собранных на подложку из изоляционного материала.

Число элементов в ИМС характеризует ее степень интеграции. По этому параметру все микросхемы условно делят на малые (МИС - до 10^2 элементов на кристалл), средние (СИС - до 10^3), большие (БИС - до 10^4), сверхбольшие (СБИС - до 10^6), ультрабольшие (УБИС - до 10^9) и гигабольшие (ГБИС - более 10^9 элементов на кристалл).

Наиболее высокой степенью интеграции обладают цифровые ИМС с регулярной структурой: схемы динамической и статической памяти, постоянные и перепрограммируемые запоминающие устройства. Это связано с тем, что в таких схемах доля участков поверхности ИМС, приходящаяся на межсоединения, существенно меньше, чем в схемах с нерегулярной структурой.

В качестве активных элементов в полупроводниковых ИМС в вычислительной технике чаще всего используют униполярные (полевые) транзисторы со структурой «металл – диэлектрик (оксид) – полупроводник» (МДП- или МОП-транзисторы). Существует два типа МДП-транзисторов: *n*-типа, обладающие электронной проводимостью, и *p*-типа, характеризующиеся проводимостью дырочной. Принцип действия таких транзисторов достаточно прост. В подложке кремния формируются две легированные области с электронной (*n*-тип) или дырочной (*p*-тип) проводимостью. Эти области называются стоком и истоком. В обычном состоянии электроны (для *n*-типа) или дырки (для *p*-типа) хотя и диффундируют в область кремния за счет избыточной концентрации, но не способны перемещаться между стоком и истоком, поскольку неизбежны процессы рекомбинации в области кремния. Кроме того, за счет такой диффузии на границах контактов между легированными областями стока и истока и кремния возникают локальные электрические поля, препятствующие дальнейшей диффузии и приводящие к образованию обедненного носителями слоя. Поэтому в обычном состоянии прохождение тока между истоком и стоком

невозможно. Для того чтобы иметь возможность переносить заряд между истоком и стоком, используется третий электрод, называемый затвором. Затвор отделен от кремниевой подложки слоем диэлектрика, в качестве которого выступает диоксид кремния (SiO_2). При подаче потенциала на затвор создаваемое им электрическое поле вытесняет вглубь кремниевой подложки основные носители заряда кремния, а в образующуюся обедненную носителями область втягиваются основные носители заряда стока и истока (говорится об основных носителях заряда, а не конкретно о дырках или электронах, поскольку возможен и тот и другой вариант). В результате между истоком и стоком в подзатворной области образуется своеобразный канал, насыщенный основными носителями заряда. Если теперь между истоком и стоком приложить напряжение, то по каналу пойдет ток. При этом принято говорить, что транзистор находится в открытом состоянии. При исчезновении потенциала на затворе канал разрушается и ток не проходит, то есть транзистор запирается.

Также в полупроводниковых ИМС могут использоваться и другие типы транзисторов, например, *биполярные*.

Биполярная технология на 30 % сложнее МДП технологии. В МДП технологии меньше количество технологических операций, особенно высокотемпературных диффузии; при одинаковой сложности – меньше размер (20 % от биполярной технологии), и, следовательно, больше процент выхода годных микросхем (т.к. вероятность возникновения дефекта на меньшей площади меньше).

Высокая надежность МДП микросхем обусловлена: меньшими размерами элементов (малые размеры элементов и малое энергопотребление дает возможность широко применять резервирование и мажоритарную логику даже в сложных схемах); значительным уменьшением числа межэлементных соединений.

К достоинству биполярных микросхем можно отнести быстродействие.

1.2.1 Основные технологические особенности производства интегральных микросхем

Важнейшим принципом технологии полупроводниковых МС является *технологическая совместимость* элементов ИМС с наиболее сложным элементом, которым является транзистор. Другие элементы (диоды, резисторы, конденсаторы) должны по возможности содержать только те области, которые включает транзистор. Таким образом, технологический процесс изготовления полупроводниковой ИМС базируется прежде всего на технологии изготовления транзисторных структур.

Второй важный принцип – *групповая обработка* МС. Она должна охватывать как можно большее число операций. При групповой обработке улучшается воспроизводи-

мость параметров ИМС, и существенно снижается трудоемкость изготовления отдельных ИМС.

Следующим важным принципом является *универсальность процессов обработки*. Он означает, что для изготовления совершенно различных по своим возможностям и назначению ИМС применяются одинаковые типовые технологические процессы, оборудование и режимы. Это позволяет одновременно, без переналадки оборудования, выпускать ИМС различного функционального назначения.

Четвертый принцип – *унификация пластин-заготовок*, содержащих максимальное количество признаков микросхемы.

Технологический процесс производства современных полупроводниковых СБИС представляет собой последовательность операций и переходов между ними, осуществляемых над исходными полупроводниковыми пластинами с целью получения микросхем с требуемыми эксплуатационными характеристиками. Технологические операции можно разделить на три группы: подготовительные, основные и заключительные.

К подготовительным операциям относят выращивание полупроводниковых слитков (например, методами Чохральского и зонной плавки), резку слитков на пластины, шлифовку, полировку, травление поверхности пластин, промывку в деионизованной воде, сушку и др.

К основным технологическим операциям относят литографию (фотолитографию в ультрафиолетовой области спектра и в жестком ультрафиолете, рентгенолитографию, электронно-лучевую и ионную литографии), эпитаксию (посредством испарения в глубоком вакууме и распыления ионами инертного газа, эпитаксию за счет реакций разложения и восстановления, жидкофазную и молекулярно-лучевую эпитаксии), окисление, травление (ионно-лучевое и ионно-плазменное), легирование (диффузия, ионная имплантация), отжиг (посредством галогенных ламп, отжиг электронным пучком, лазерный отжиг), осаждение на поверхность пластин различных по химическому составу пленок и др.

К заключительным технологическим операциям относят скрайбирование и ломку пластин на кристаллы, разварку внешних выводов, герметизацию кристаллов в корпусах и др.

Практически все перечисленные технологические операции сопровождаются контрольными операциями, позволяющими осуществлять отбраковку дефектных пластин и кристаллов. К ним относят, например, контроль содержания примесей в пластинах, контроль деформаций поверхности пластин и др.

При производстве различных типов гибридных интегральных микросхем технологический процесс может содержать различные операции (это зависит от выбранной технологии - тонкопленочной или толстопленочной, от того, какие пассивные элементы используются в схеме - есть ли, например, пленочные конденсаторы).

1.2.2 Особенности формирования ИС на GaAs

По основному активному элементу GaAs СВЧ МИС разделяются на МИС с полевыми транзисторами с затвором Шоттки (MESFET, НЕМТ, рНЕМТ, mНЕМТ и др.), гетероструктурными биполярными транзисторами (НВТ), диодами, также возможны смешанные типы (например ВiНЕМТ) [56]. Активные элементы МИС отличаются по конструкции и принципу работы, но все их объединяет использование контактов металл-полупроводник. В GaAs технологии используются два вида контактов металл-полупроводник: омические и барьерные контакты (контакты Шоттки).

Омические контакты должны обладать низким удельным сопротивлением и линейной вольт-амперной характеристикой. Для GaAs *n*- типа проводимости наиболее широкое распространение получила группа омических контактов основе пленок Ge, Au и Ni [57]. В процессе термического отжига происходит жидкофазная взаимодиффузия атомов Ge, Au и Ni и их диффузия в подложку. Атомы Ge, встраиваясь в кристаллическую решетку GaAs, действуют как донорная примесь, обеспечивая низкое сопротивление контакта. Слой Au снижает сопротивление металлизации омического контакта, а слой Ni позволяют улучшить морфологию поверхности контакта, также слой Ni может выполнять в роль диффузионного барьера для верхнего слоя Au. Для GaAs *p*- типа проводимости наиболее широко распространены композиции Au/Zn/Au, AuBe и Au/Pt/Ti [58].

Барьерные контакты обладают нелинейной (диодной) вольтамперной характеристикой, имеют низкое сопротивление при протекании тока в прямом направлении и высокое – в обратном. В настоящее время наиболее широко используется композиция Ti/Pt/Au [56, 59], где слой Ti формирует с полупроводником барьер Шоттки, слой Pt служит диффузионным барьером для Au, а слой Au обеспечивает низкое сопротивление металлизации барьерного контакта. Также в качестве барьерного контакта могут использоваться композиции Ti/Pd/Au, Pt/Ti/Pt/Au, Pd/Ti/Pt/Au [60] и др.

Помимо активных элементов GaAs СВЧ МИС содержат ряд пассивных элементов: конденсаторов (вида металл-диэлектрик-металл или встречно-штыревых), резисторов (объемных и тонкопленочных), индуктивностей, проводников (межэлементная металлизация), контактных площадок, металлизации обратной стороны пластины.

Основными методами, используемыми для формирования элементов металлизации, являются обратная литография и термическое осаждение тонких пленок в вакууме. Метод электрохимического осаждения обычно используется при формировании пленок Au толщиной более 1,5 – 2 мкм [56] в металлизации фронтальной стороны пластины, а также при формировании пленки Au в металлизации обратной стороны пластины.

Обычно межэлементная металлизация содержит 2 – 3 уровня. Металлизация формируется с использованием слоев межуровневого диэлектрика [61] или по технологии с формированием так называемых «воздушных» мостов [62]. В качестве металлизации обычно используются композиции Ti/Au и Ti/Pt/Au [63], где слой Ti выполняет функцию адгезионного подслоя, слой Pt служит диффузионным барьером для Au, а слой Au обеспечивает низкое сопротивление металлизации.

В качестве межуровневого диэлектрика и для защиты поверхности МИС от воздействия внешней среды используются пленки Si₃N₄, полиимида, BCB, полибензоксазола (polybenzoxazole – PBO) [64] и др. Пленки Si₃N₄ также используются в качестве диэлектрика конденсаторов.

Перед формированием металлизации обратной стороны пластина GaAs утоняется до 50 – 100 мкм. Для этого используется метод химико-механической шлифовки/полировки. С обратной стороны утоненной пластины методом плазмохимического травления в GaAs формируются сквозные отверстия к контактным площадкам, расположенным на фронтальной стороне.

Металлизация обратной стороны пластины GaAs формируется на основе пленки Au и состоит из двух частей. Первая содержит один или несколько слоев обеспечивающих адгезию металлизации к GaAs, защиту от диффузии Au в GaAs, возможность последующего формирования слоя Au методом электрохимического осаждения. С этой целью используют пленки Ni формируемые методом химического осаждения, композиции вида TiW/Au формируемые методом магнетронного осаждения [65]. После чего методом электрохимического осаждения формируется слой Au толщиной несколько микрон.

1.2.3 Особенности формирования ИС на GaN

1.2.3.1 Полупроводниковые НЕМТ транзисторы на основе GaN

При изготовлении НЕМТ транзистора необходимо, чтобы полупроводниковые материалы для создания гетероперехода, имели близкие параметры кристаллической решетки для уменьшения плотности дислокаций несоответствия на гетерогранице полупроводников. Чаще всего такой гетеропереход изготавливается на основе базового полупровод-

ника и его твердого раствора, двух типов твердых растворов различного состава на основе базового материала или двух полупроводников с близкими параметрами решетки. В полевом транзисторе с высокой подвижностью электронов в качестве проводящего канала используется квантовая стенка (QW) с двумерным электронным газом (2DEG), которая формируется на интерфейсе двух полупроводников с различной шириной запрещенных зон.

В таком гетеропереходе электроны из *n*-области легированного полупроводникового слоя с широкой запрещенной зоной перемещаются в слой нелегированного (слабо легированного) узкозонного полупроводника, создавая в нем проводящий канал на основе двумерного электронного газа с высокой дрейфовой подвижностью электронов, что обеспечивает высокие рабочие частоты НЕМТ транзистора [67]. Типичная гетероструктура НЕМТ транзистора на базе AlGaN/GaN представлена на рисунке 1.37.



Рисунок 1.37 –Гетероструктура НЕМТ транзистора на базе AlGaN/GaN

В случае НЕМТ транзисторов на базе кубических полупроводников обычно используются подложки из материала, входящего в состав гетероструктуры, поскольку в большинстве случаев имеются соответствующие объемные кристаллы достаточных размеров для изготовления таких подложек. На подложке эпитаксиальными методами выращивается буферный слой базового полупроводника, на котором формируется сравнительно тонкий слой широкозонного полупроводника. В некоторых конструкциях между этими слоями располагается тонкий нелегированный каналный слой узкозонного полупроводника. Также в некоторых конструкциях гетероструктур над узкозонным полупроводником наращивается тонкий разделительный (спейсерный) слой, который способствует пространственному разделению *2DEG* между каналным слоем и расположенным выше широкозонным полупроводником. НЕМТ транзисторы на основе кубических полупроводников демонстрируют отличные частотные характеристики, достигающие до нескольких сотен

ГГц, но при этом имеют малые мощностные параметры из-за невысоких напряжений поля пробоя и низких рабочих температур.

Особенностями нитридов группы III-N являются большие напряжения пробоя ($U_{\text{проб}}$) и скорости дрейфа электронов в режиме насыщения ($V_{\text{нас}}$), высокие рабочие температуры и устойчивость нитридов к внешним высокоэнергетическим воздействиям. Это способствовало их широкому применению в промышленном производстве приборов высокой удельной мощности, способных работать при высоких температурах и в условиях внешних высокоэнергетических воздействий, включая космические излучения. Некоторые фундаментальные параметры нитридных соединений и материалов, используемых в качестве подложек при производстве гетероструктур для НЕМТ транзисторов, представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Некоторые параметры GaN, InN, AlN, 4H-SiC, 6H-SiC, Al₂O₃, Si.

Соединение	AlN	GaN	InN	4H-SiC	6H-SiC	Al ₂ O ₃	Si(111)
E_g , эВ	6,2	3,42	0,7	3,26	3,03	9,4	1,12
E_A , эВ	2,05;1,9	4,16	5,75	3,2	3,4	4,44	4,05
CNL, эВ	3,5	2,7	1,7	1,81	1,78	-	0,4
K_{300} , Вт/см К	2,5-3,3	1,3-2,9	0,45; 0,8	4,9	4,9	0,5	1,5
КТР, 10^{-6} /К	4,2	5,59	-	4,2	4,2	7,5	3,59
$U_{\text{проб}}$, В/см	$8,4 \cdot 10^6$	$3,3 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^5$
$U_{\text{нас}}$, см/с	$2 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^7$	$3,8 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^7$	-	$1 \cdot 10^7$
$T_{\text{пл}}$, К	3487	2791	1373	3003	3003	2345	1688
α , Å	3,111	3,189	3,544	3,070	3,081	4,758	5,431
c , Å	4,978	5,185	5,718	10,053	15,12	12,991	-

Здесь E_g – ширина запрещенной зоны, E_A – электронное сродство, CNL – уровень зарядовой нейтральности, K_{300} – коэффициент теплопроводности, КТР – коэффициент теплового расширения.

Соединения (Al, Ga, In)-N с кристаллической решеткой вюрцита демонстрируют значительную спонтанную поляризацию. При этом би-аксиальные напряжения растяжения/сжатия на интерфейсе широкозонный/узкозонный полупроводники индуцируют эффект пьезополяризации. Большой разрыв зон проводимости в сочетании с индуцированным эффектом поляризации зарядом обеспечивает значительную плотность, более 10^{13} см⁻², двумерного электронного газа в проводящем канале на интерфейсе нитридных полупроводников без легирования широкозонного материала и позволяют в разы повысить удельную выходную мощность НЕМТ транзистора на основе нитридных полупроводников группы III-N по сравнению с транзисторами на базе кубических кристаллов. Так,

HEMT транзисторы AlGaN/GaN, выращенные на подложках сапфира, изолирующего 4H-SiC, а также на подложке GaN показывают более высокие, чем транзисторы на основе GaAs, уровни выходной СВЧ мощности. Использование широкозонных нитридов группы III-N для производства транзисторов не только увеличило выходную мощность, но и температурную и радиационную устойчивость схем.

Конструкция HEMT транзистора на базе полупроводников группы III-N в целом подобна соответствующим конструкциям на основе кубических кристаллов. Их основное отличие состоит в отсутствии качественных GaN подложек большого диаметра для нитридных гетероструктур, что в значительной степени усложнило технологию эпитаксиального выращивания транзисторных структур на базе нитридных полупроводниковых соединений. Структура AlGaN/GaN HEMT обычно включает (сверху вниз): верхний (*cap*) слой нелегированного AlGaN (или GaN) толщиной от 2 до 10 нм, выращенный при низких температурах ($T \sim 550^\circ\text{C}$), слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0,15 < x < 0,5$), проводящий канал на основе легированного, $n = (2 - 5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ или (нелегированного) GaN толщиной порядка 50 нм, легированный примесями р типа для подавления фоновой проводимости буферный слой GaN толщиной от 0,5 до 2 мкм, зародышевый слой GaN, AlGaN или AlN и подложку SiC, Si или Al_2O_3 [70, 71].

Главное отличие нитридных транзисторов от транзисторов на базе кубических кристаллов состоит в использовании подложек из отличных от GaN материалов, которые должны обеспечивать минимальное расхождение с базовым полупроводником по параметрам решетки, иметь высокую теплопроводность для снятия тепловых ограничений и хорошие изолирующие свойства, обеспечивающие малые потери на высоких частотах [72].

1.2.4 Материалы подложек для ИС на GaN

Подложки нитридных полупроводников – критические компоненты в производстве HEMT транзисторов. Основными критериями при выборе материала для подложек при выращивании HEMT транзисторов на основе соединений III-N являются:

- а) соответствие параметров решеток подложки и полупроводникового материала;
- б) соответствие коэффициентов теплопроводности и термического расширения пленка/подложка;
- в) максимальная электрическая изоляция подложки;
- г) низкая плотность остаточных дефектов подложки;
- д) качество и свойство поверхности подложки;
- ж) коробление и прогиб подложки;

з) механические и химические свойства подложки, проявляющиеся при утонении и травлении отверстий;

и) цена за единицу площади подложки и доступность подложки с учетом ее диаметра.

Среди наиболее используемых материалов в качестве подложек для нитридных структур выступают сапфир (Al_2O_3), кремний (Si) и карбид кремния (SiC).

Подложки из кремния Si (111) технологичны, доступны, дешевы и характеризуются достаточно высокой теплопроводностью, практически не ограничены по диаметру пластин и имеют низкую плотность дефектов. Но при этом сильное различие коэффициентов теплового расширения и параметров решетки кремния и GaN достаточно сильно усложняет процесс выращивания качественных эпитаксиальных структур на основе нитрида галлия на таких подложках. Основным недостатком Si (111) подложек состоит в их низкой теплопроводности.

Сапфир (Al_2O_3) доступен по стоимости и технологической разработанности. Недостатком его являются низкая теплопроводность и значительное несоответствие a -параметров решеток Al_2O_3 и GaN (~13 %), что приводит к формированию высокой плотности дислокаций несоответствия на интерфейсе GaN/ Al_2O_3 прорастающих в активную область НЕМТ структуры. Для снижения плотности дислокаций проводится нитридизация поверхности Al_2O_3 или его высокотемпературный ($T \sim 1100^\circ\text{C}$) отжиг, а также наращивание низкотемпературного ($T \sim 550^\circ\text{C}$) зародышевого слоя GaN, AlN, AlGaN. К тому же особенности коэффициентов теплового расширения GaN и Al_2O_3 приводят к биаксиальному сжатию пленки GaN в базальной плоскости, до ~ (0,2-1,0) ГПа, в зависимости от условий ее роста и толщины.

Монокристаллические подложки карбида кремния (4H-SiC) удовлетворяют большинству перечисленных требований к подложечному материалу для GaN. Нитридные гетероструктуры, выращенные на таких подложках, как правило, имеют высокие мощностные и частотные характеристики. В настоящее время большинство производителей СВЧ компонентной базы используют в производстве и разработках СВЧ GaN транзисторов гетероструктуры, выращенные на подложках карбида кремния. Есть ряд производителей, использующих подложки кремния для производства и разработки СВЧ GaN транзисторов и МИС для отдельных сегментов рынка: недорогих транзисторов и МИС с невысокими параметрами и маломощных СВЧ МИС миллиметрового диапазона. Основным недостатком карбида кремния, препятствующим его широкому использованию, является дороговизна по сравнению с подложками на основе сапфира или кремния. Так, соотношение

стоимости единицы площади (отн. ед.) подложек на основе Si, Al₂O₃ и SiC составляет около 1:10:100.

1.3 Особенности формирования ИС на Si

1.3.1 Кремний-германиевые гетеропереходные биполярные транзисторы

На рисунке 1.38 в общем сечении представлены основные области базового устройства высокопроизводительного SiGe HBT (heterojunction bipolar transistor – гетеропереходный биполярный транзистор, ГБТ).

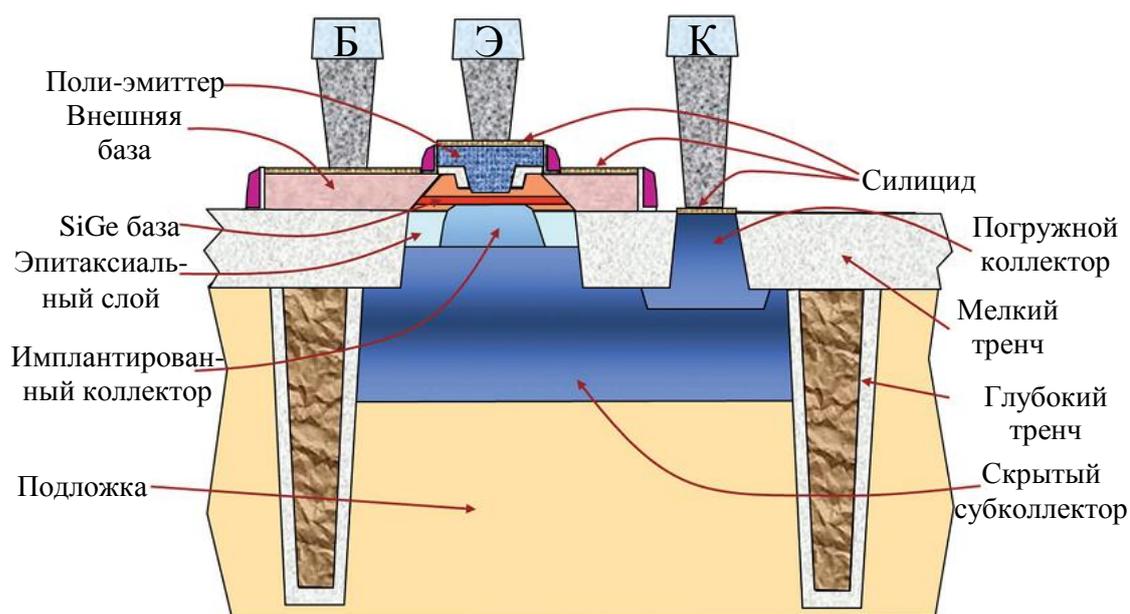


Рисунок 1.38 – Схематическое сечение высокоскоростного SiGe HBT

Инновации в архитектуре устройства и процессах изготовления были основными факторами улучшения радиочастотных характеристик SiGe HBT в течение последних десятилетий. Основными требованиями к архитектуре устройства для высокоскоростных HBT являются минимальные сопротивления доступа к внутренним областям эмиттера, базы и коллектора, а также низкий вклад внешних областей устройства в емкости база-коллектор и база-эмиттер. Разработка архитектуры устройств и процессов, которые облегчают одновременную реализацию низкого сопротивления базы и низкой емкости база-коллектор, были основными задачами. Реализация устройств с низким тепловым сопротивлением является дополнительным требованием для ограничения самонагрева. Вышеупомянутые цели должны быть реализованы для технологических процессов изготовления пластин большого диаметра и с высоким процентом выхода годных чипов.

Еще одним фундаментальным требованием к процессу изготовления SiGe HBT является совместимость с CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник, КМОП) технологией. Интеграция SiGe HBT и других пассивных или активных СВЧ устройств в технологическую платформу BiCMOS должна осуществляться без ухудшения характеристик или производительности устройств HBT или CMOS. Большой потенциал современных CMOS процессов для геометрического масштабирования открывает новые возможности также для изготовления HBT. Однако возникают новые проблемы для интеграции SiGe HBT.

Что касается концепций устройств SiGe HBT, все современные высокоскоростные транзисторы, связанные с производством, используют преимущества так называемой архитектуры двойной поли-Si (double-poly-Si, DP). Эта конфигурация обеспечивает доступ из области контакта ко внутренним областям базы и эмиттера посредством слоев поли-Si, которые диэлектрически изолированы от окружающих транзисторных областей. Это мощное средство для обеспечения низких значений внешних параметров, таких как сопротивление базы, емкость база-коллектор, сопротивление эмиттера и емкость база-эмиттер. Поэтому очевидно, что базовые структуры современных SiGe HBT становятся все более похожими. Тем не менее, существуют совершенно разные подходы к производству устройств, что сказывается на их электрических характеристиках.

Ключевым отличием для изготовления SiGe HBT является способ формирования базы SiGe. Существующие технологии SiGe HBT используют либо селективный эпитаксиальный рост базы (SEG), либо неселективный (NSEG). Оба подхода были использованы для разработки высокопроизводительных процессов SiGe HBT и нашли свое применение в массовом производстве.

В проекте DOTFIVE были разработаны технологические решения, обещающие дальнейшее повышение скорости для концепций HBT как с селективной, так и с неселективной базовой эпитаксией. Ввиду их специфического влияния на сложность процесса и самовыравнивание транзисторных областей, различные технологии были также исследованы в проекте DOTSEVEN с использованием различных методов базовой эпитаксии. Возможности и проблемы двух подходов будут подробно обсуждаться в следующих подразделах.

Выбор подложки, то есть объемного материала или кремний на изоляторе (SOI), является еще одним критерием для дифференциации технологий SiGe HBT. В связи с постоянным развитием технологий CMOS на основе SOI несколько публикаций были по-

связаны проблеме подходящей технологии и концепции устройств для высокоскоростных SiGe HBT на пластинах SOI [73-75].

1.3.2 Селективный эпитаксиальный рост (SEG) базы

Классическая технология SiGe HBT с самосовмещением поли-Si с селективным эпитаксиальным ростом базы (DPSA-SEG) представляет наиболее привлекательную архитектуру процесса с точки зрения производства и степени самовыравнивания. Как описано в следующем разделе партнеры проекта DOTFIVE Infineon и STMicroelectronics, а также FreeScale (теперь NXP) интенсивно работали над этой концепцией в последнее десятилетие, чтобы повысить ее производительность [76, 77]. Отличительной особенностью технологии DPSA-SEG является тот факт, что для создания внутреннего транзистора необходим только один литографический процесс. Нет необходимости в создании дополнительной резистивной маски для формирования области избирательно имплантированного коллектора или изоляции между эмиттером и базой. Обычно этот процесс начинается с последовательного осаждения структуры, содержащей нижний оксид, слой p^+ поли-Si, верхний оксид и нитрид, в качестве защитного слоя. Окно эмиттера вскрывается сухим травлением, которое останавливается на нижнем оксиде (рисунок 1.39, 1). Образование нитридного спейсера препятствует вытягиванию верхнего оксида во время последующего мокрого травления оксида. На этом этапе проявляется внутренняя область коллектора и создается выступ p^+ поли-Si (рисунок 1.39, 2). В этот момент может быть сформирован селективно имплантированный коллектор (СИК), который обеспечивает низкоомное соединение с высоколегированным субколлектором. Кроме того, нитриды внутри спейсеров защищают от затравки Si p^+ поли-Si во время следующей эпитаксии базы. На этом этапе формируется связь между внутренней базой и внешней частью (p^+ поли-Si = база поли-Si) (рисунок 1.39, 3). Слой нитрида может быть оставлен или удален [78].

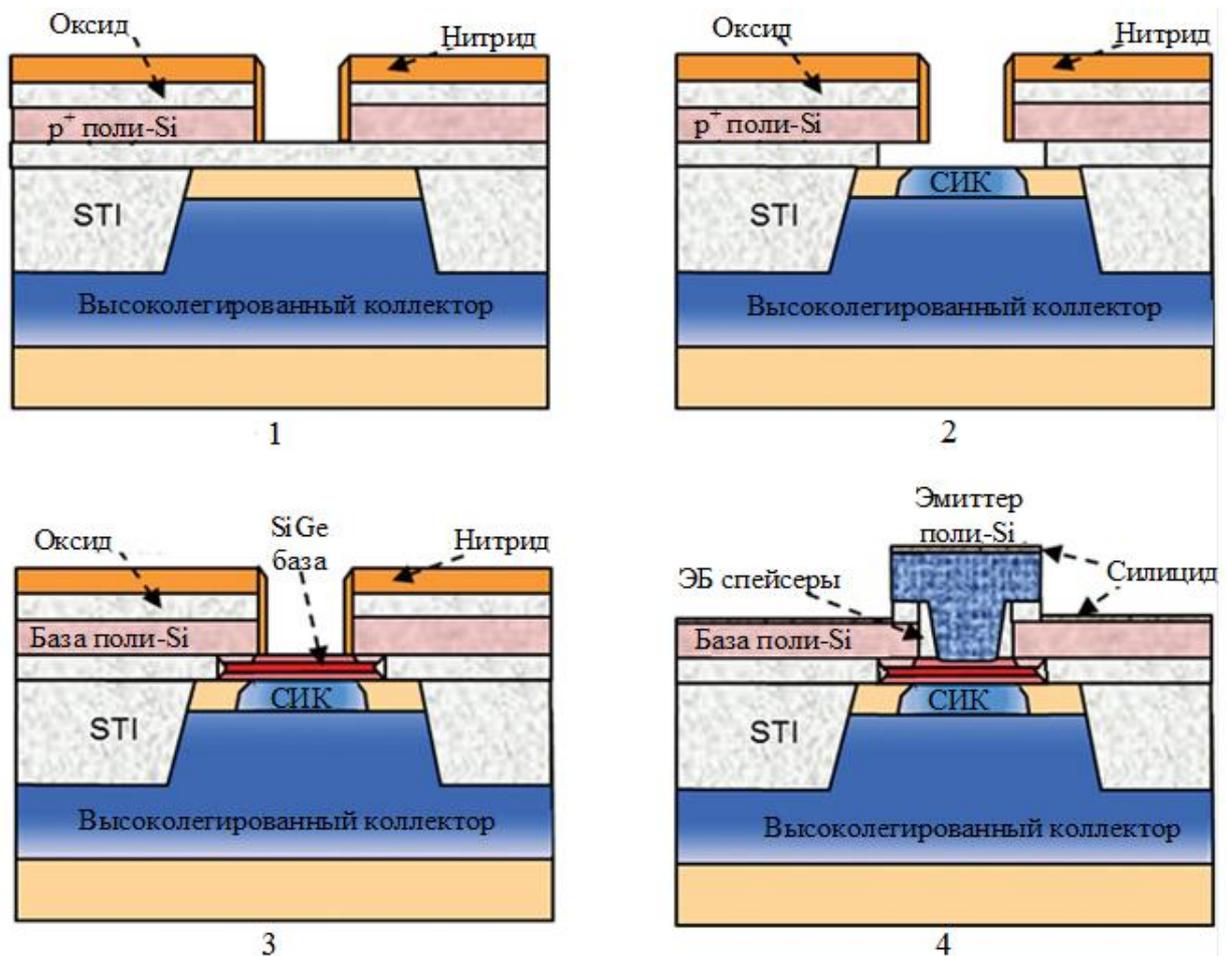


Рисунок 1.39 – Схематические сечения обычного процесса DPSA-SEG

Остальные этапы очень распространены также и для других процессов НВТ, таких как технологии с неселективным эпитаксиальным ростом базы. Внутри базы-эмиттера образуются спейсеры, а слой эмиттера, легированного во время роста, выращивается с неселективным эпитаксиальным этапом. Технологический процесс продолжается путем формирования рисунка слоев эмиттера и базового поли-Si. Наконец, необходима кратковременная высокотемпературная обработка для того, чтобы вытеснить легирующие примеси из высоко легированного эмиттерного слоя в защитные слои до того, как процесс будет завершен путем нанесения силицидных покрытий и изготовления бэкэнда (рисунок 1.39, 4). Финальная стадия отжига способствует не только улучшению тока базы, но также определяет сопротивление эмиттера. В случае только биполярной технологии тепловой баланс в значительной степени определяется потребностями НВТ.

В процессах ViCMOS, как правило, минимальные требования отжига «исток-сток» определяют критический тепловой бюджет НВТ, предполагая, что реализована схема интеграции «исток/сток после НВТ».

На рисунке 1.40 показано поперечное сечение ПЭМ последнего поколения транзисторов SiGe HBT, разработанных компанией Infineon.

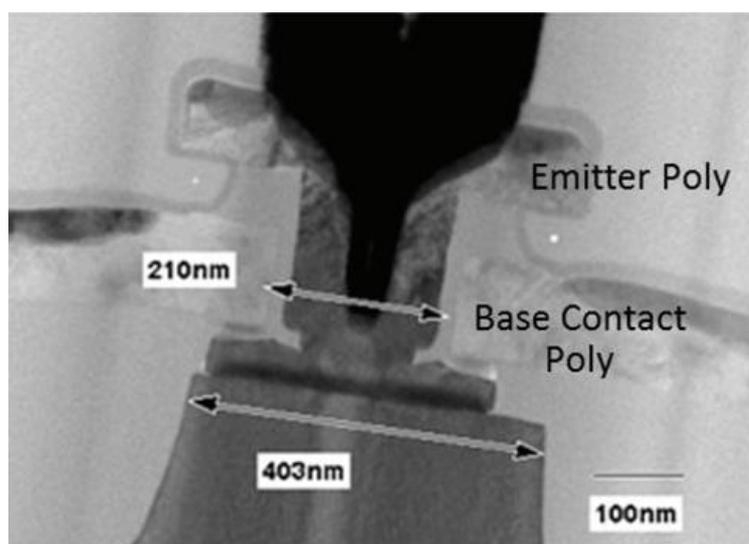


Рисунок 1.40 – Поперечное сечение SiGe HBT созданного по технологии DPSA-SEG, компании Infineon.

В [78] отмечены определенные различия между разработками разных компаний. Например, в Infineon использовали временные вспомогательные спейсеры для регулировки площади СИК, в то время как компания STMicroelectronics формировала SIC сразу после вскрытия окна эмиттера.

Существуют также отклонения в режиме отжига базового поли-Si. В технологическом процессе компании Infineon дополнительная термическая обработка после эпитаксиального роста базы вводится для рассеивания бора из базового поли-Si к внутреннему базовому слою. Следовательно, базовое сопротивление может быть уменьшено, однако это приводит к расширению базового слоя, что, в свою очередь, приводит к снижению значения граничной частоты усиления по току f_T . Тем не менее, вариации этого отжига показали возможность оптимизации для увеличения максимальной частоты генерации f_{MAX} с допустимыми ограничениями для f_T .

Конструкция коллектора, используемая Hitachi, Infineon и STMicroelectronics, включает в себя все элементы, которые типичны для высокоскоростного биполярного транзистора на Si: эпитаксиальный скрытый, высоколегированный субколлектор, изолированный с боков глубокими тренчами и низкоомное контактное соединение с коллектором, осуществляемое так называемым погружным коллектором. Чтобы сэкономить усилия по изготовлению и уменьшить сложность процесса BiCMOS, компания NXP (ранее FreeScale) разработала структуру коллектора с субизолирующим скрытым слоем, исполь-

зуя только мелкую тренчевую изоляцию (МТИ, STI). Общей особенностью всех этих технологий является изоляция мелкими тренчами между внутренними областями транзистора и контакт коллектора, что одновременно обеспечивает низко емкостную базовую связь.

В рамках проекта DOTFIVE Infineon и STMicroelectronics предприняли всесторонние усилия по улучшению СВЧ характеристик транзисторов, сформированных по традиционной технологии DPSA-SEG. Очевидный прогресс был достигнут за счет изменения вертикального профиля, термической обработки, а также боковых размеров транзистора. В результате Infineon смогла увеличить свои начальные значения f_T/f_{MAX} с 190/250 ГГц до 230/350 ГГц, тогда как STMicroelectronics увеличила эти показатели с 230/280 ГГц до 260/400 ГГц. Позже обе компании могли продемонстрировать этот уровень производительности и в среде BiCMOS. Результаты f_{MAX} , полученные в проекте DOTFIVE и в недавнем прошлом для концепции DPSA-SEG, указывают на то, что трудно достичь значений выше 400 ГГц. Ключевым ограничением для увеличения СВЧ и прочих характеристик было отсутствие возможности снижения внешнего сопротивления базы. Однако в дальнейшем компаниям удалось разработать концепции для преодоления этой проблемы.

1.3.3 Неселективный эпитаксиальный рост (NSEG) базы

Неселективный эпитаксиальный рост базового слоя SiGe широко используется при изготовлении SiGe HBT. Примерами являются производственные процессы IBM/Globalfoundries [79], TowerJazz [80], INP [81], NXP и imec [82]. Эти процессы имеют общий набор слоев, состоящий из буферного слоя Si, слоя SiGe, на основании которого формируется база, легированная В, и покрывающий слой Si, нанесенный по всей пластине. Этот набор слоев выращивается монокристаллическим в активных областях HBT, где поверхность Si была заранее вскрыта, в то время как во всех других областях, покрытых оксидом или нитридом, он выращивается поликристаллическим. Этот так называемый дифференциальный режим роста отличается от селективного эпитаксиального роста, где осаждение происходит только в открытых областях Si.

Следствием неселективного режима роста является то, что поликристаллический слой, который выращивается на изоляционных слоях, смежных с активным HBT, может быть использован для формирования внешних основных областей. Как правило, этот подход сочетается с дополнительной ионной имплантацией во внешние области базы для повышения их проводимости. Этот подход был применен, например, в 0,25-мкм BiCMOS-процессе SG25H1 INP, который обеспечивает пиковые значения f_T/f_{MAX} 180/220 ГГц. При таком подходе толщина внешней базы определяется набором слоев, выращенных для формирования внутренней базы. Это ограничивает достижимое слоиое сопротивление

внешней базы и, в частности, проводимость области внешней базы под свисающим поли-Si эмиттером. Вот почему было разработано несколько подходов для повышения проводимости внешней базовой области путем осаждения дополнительных слоев Si. Оказалось, что повышение внешних базовых областей было необходимо для того, чтобы значение f_{MAX} HBT транзистора, сформированного по NSEG технологии, превысило 300 ГГц.

Процесс NSEG с приподнятыми внешними базовыми областями, самосовмещенными с окном эмиттера, используется, например, в 90°нм технологии SiGe BiCMOS IBM, демонстрирующей пиковые значения f_T/f_{MAX} 300/360 ГГц. В одном из вариантов процесса СВЧ характеристики могут быть дополнительно улучшены до f_T/f_{MAX} 285/475 ГГц с помощью миллисекундного отжига.

Альтернативный процесс NSEG HBT с приподнятыми внешними базовыми областями используется в технологии BiCMOS IHP 130 нм. Эта концепция HBT стала отправной точкой для оптимизации производительности в направлении f_{MAX} с частотой 500 ГГц, выполненной в проекте DOTFIVE.

Далее рассматриваются основные особенности процесса изготовления HBT по технологии NSEG. Возвышенные внешние базовые области формируются дополнительным эпитаксиальным ростом после структурирования эмиттера. Описанная ниже реализация соответствует технологии SG13G2 компании IHP, предлагающей HBT со значениями $f_T/f_{MAX}/gate-delay$ 300/450 ГГц/2,0 пс.

Ключевыми особенностями являются:

- 1) приподнятые внешние базовые области, выровненные относительно окна эмиттера, что приводит к низкому внешнему базовому сопротивлению;
- 2) формирование всей структуры HBT в одной активной области без STI между контактами эмиттера и коллектора, что приводит к низкому сопротивлению коллектора и небольшим областям соединения коллектор-подложка;
- 3) изоляция устройства без глубоких тренчей, что приводит к снижению сложности процесса и улучшению отвода тепла.

Различные этапы процесса HBT показаны на рисунке 1.41.

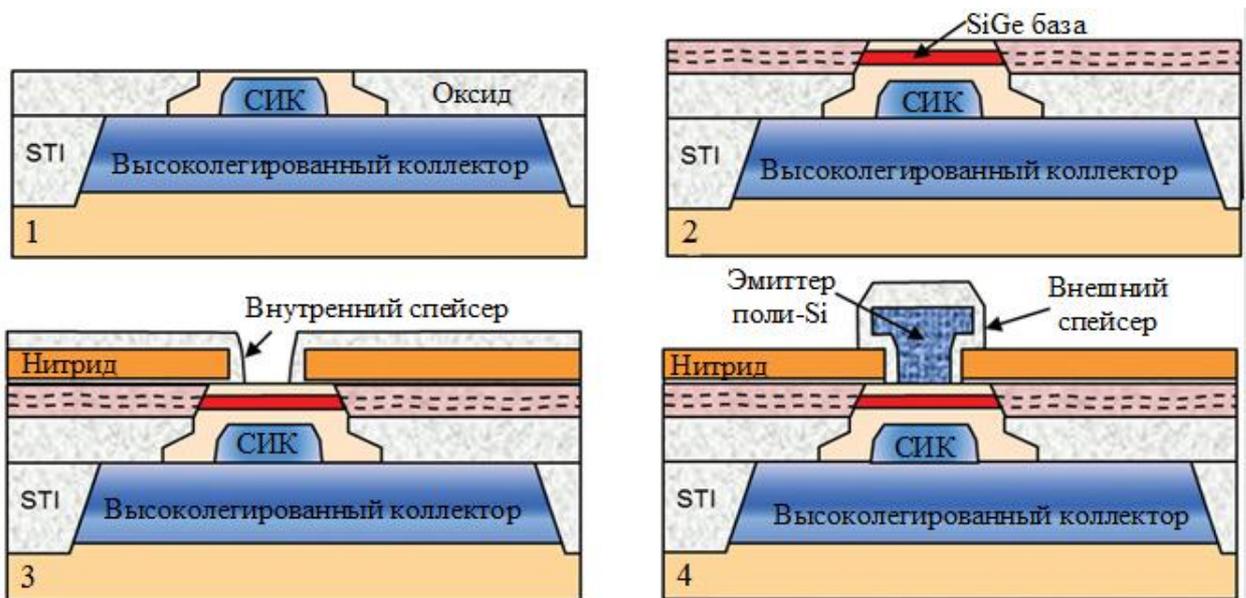


Рисунок 1.41 – Последовательность операций для NSEG HBT с приподнятыми областями базы: 1 – после формирования СИК; 2 – после неселективного роста базы; 3 – до осаждения эмиттера; 4 – после структурирования эмиттера

Изготовление модуля HBT начинается с формирования коллекторной области путем высокодозной ионной имплантации. По бокам область коллектора ограничена неглубокими тренчевыми участками без введения дополнительных глубоких тренчей. Активная область коллектора формируются посредством осаждения оксидного слоя и его дальнейшим травлением через резистивную маску. Сформированные окна в изоляционном оксидном слое заполняются нелегированным Si посредством селективного эпитаксиального роста. Затем области селективно имплантированного коллектора (СИК) формируются через рисунок в маске резиста. Поперечное сечение HBT на этой стадии процесса показано на рисунке 1.41, 1. Теперь выполняется неселективный рост базы. Стек слоев состоит из буферного слоя Si, базового слоя SiGe:C и верхнего слоя Si. Он растет монокристаллическим в областях активного коллектора и поликристаллическим поверх оксида изоляции, как показано на рисунке 1.41, 2). После эпитаксии осаждается стек оксидного/нитридного/оксидного слоев и вытравливается окно эмиттера. Дополнительные внутренние спейсеры формируются до осаждения и травления эмиттера, легированного As.

На рисунке 1.41, 3 показано поперечное сечение устройства перед осаждением эмиттера. Эмиттер покрывают диэлектрическим слоем, а затем травят по рисунку в резистивной маске. На эмиттере формируют наружные спейсеры.

Финишная конструкция устройства показана на рисунке 1.41, 4). Затем слой нитрида удаляют мокрым травлением. Далее осуществляется селективный рост приподнятых

базовых областей, легированных В. Изготовление модуля НВТ продолжается частичным стравливанием базового поли-Si слоя через дополнительную резистивную маску. После описанной последовательности технологических операций по формированию НВТ устройства его подвергают заключительному этапу быстрой термической обработки, которая используется в технологии BiCMOS для активации областей истока и стока. В эталонной технологии SG13G2 для этой цели применяется шип-отжиг при 1050°C. Наконец, выполняется силицидирование кобальта на всех контактных участках, и формируется алюминия металлизация. Схематическое поперечное сечение окончательной структуры НВТ изображено на рисунке 1.42.

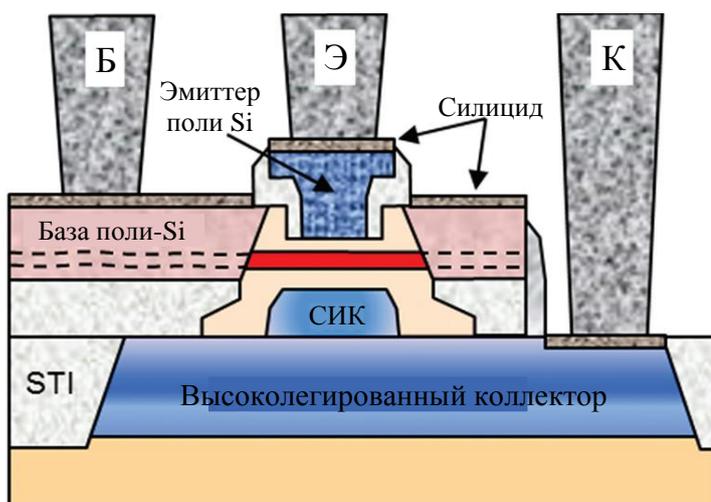


Рисунок 1.42 – Схематическое поперечное сечение NSEG НВТ с приподнятыми внешними областями базы

На рисунке 1.43 представлена ПЭМ фотография поперечного сечения НВТ транзистора с приподнятыми внешними базовыми областями, сформированного по NSEG технологии в процессе SG13G2 BiCMOS.

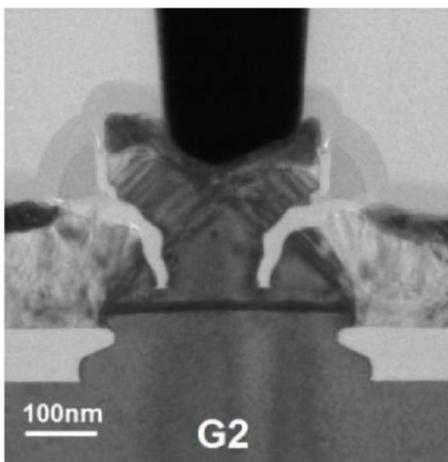


Рисунок 1.43 – ПЭМ фотография поперечное сечение NSEG НВТ по технологии SG13G2

Геометрическая ширина окна эмиттера конечного устройства составляет 120 нм. Приподнятые внешние области базы отделены от окна эмиттера оксидными спейсерами шириной около 25 нм. Такая конструкция устройства облегчает реализацию очень низких внешних сопротивлений базы благодаря самосовмещенному расположению приподнятых внешних областей базы к окну эмиттера и высокой проводимости кристаллических областей внешней базы вблизи эмиттера. Тем не менее, следует отметить, что представленный здесь маршрут NSEG демонстрирует значительно более низкую степень самовыравнивания, чем маршрут процесса DPSA-SEG. В частности, окно коллектора, имплантация СИК, окно эмиттера и вес поли эмиттера не выровнены относительно друг друга. Их относительное выравнивание определяется точностью выравнивания соответствующих шагов литографической маски. Эта чувствительность к точности литографического выравнивания может накладывать серьезные ограничения на дальнейшее масштабирование боковых размеров устройства.

Независимо от вышеупомянутых ограничений описанного процесса NSEG HBT в отношении самовыравнивания и масштабируемости, он служил рабочей лошадкой для оптимизации производительности HBT компании INP в рамках проектов DOTFIVE и DOTSEVEN. Это связано с большим опытом и знакомством с NSEG HBT по сравнению с концепциями с селективной эпитаксией, которые обсуждались выше. Изготовление NSEG HBT в процессе SG13G2 BiCMOS стало результатом интенсивной оптимизации концепции этого транзистора в рамках проекта DOTFIVE. В связи с этим возникает вопрос, можно ли и каким образом добиться дальнейшего повышения производительности. Согласно моделированию устройства все еще существуют солидные резервы для увеличения скорости. В частности, боковое масштабирование должно способствовать дальнейшему увеличению f_{MAX} . Кроме того, для реализации цели сбалансированных высоких значений f_T и f_{MAX} требуется соответствующее вертикальное масштабирование профиля легирования и Ge.

1.3.4 Кремний-германиевые HEMT/MODFET транзисторы

В работе [83] авторы сообщают о создании n -канального Si/SiGe транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT) с Т-образным металлическим затвором Шоттки, длина которого (L_g) не превышала 60 нм и исследовании его характеристик.

Гетероструктура транзистора показана на рисунке 1.44 (индекс «Л» – слой легированный, «Н/Л» – нелегированный).

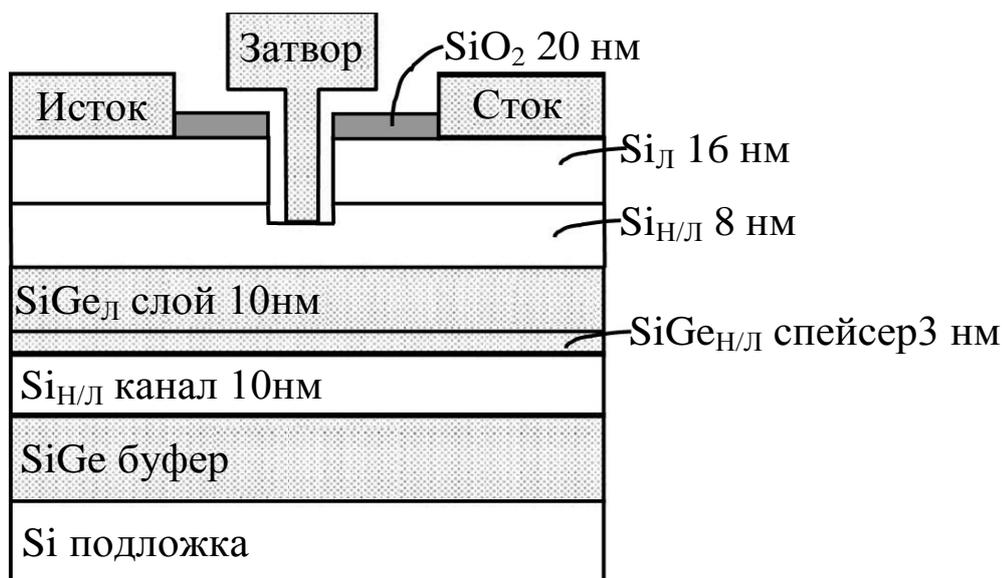


Рисунок 1.44 – Структура Si/SiGe НЕМТ с Т-образным затвором

На Si подложке с высоким удельным сопротивлением последовательно путем химического осаждения из газовой фазы выращивались слои: ступенчатый буфер толщиной 2 мкм; однородный буфер толщиной 1 мкм; нелегированный напряженный каналный слой Si толщиной 10 нм; нелегированный SiGe спейсер толщиной 3 нм; легированный слой носителей SiGe 10 нм; 8 нм верхний Si нелегированный слой и 16 нм верхний легированный фосфором Si слой. Концентрация фосфора в слое носителей составляла $3,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а в легированном верхнем слое - $3,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Содержание Ge в буфере и в слое носителей составляло 30%. Холловские измерения пластины показывали плотность носителей $1,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и подвижность электронов $660 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Изготовление устройства начиналось с формирования мезы толщиной 100 нм, осуществляемого плазменным травлением в SF₆. Области истока и стока (S/D) создавались с помощью фотолитографии «на взрыв» с напылением металлических пленок Ti/Pt/Au. Расстояние между S/D составляло 2 мкм.

Т-образные затворные электроды шириной 50x2 мкм изготавливались методом электронно-лучевой литографии «на взрыв» с напылением металлических пленок Pt/Au. Перед осаждением затворной металлизации область затвора стравливалась 0,1%-ным раствором КОН до нелегированного верхнего Si слоя. Для стравленной пластины измерения Холла показывали плотность носителей $1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и подвижность электронов $950 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Изображение затвора изготовленного транзистора в поперечном сечении, полученное с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ), показано на рисунке 1.45.

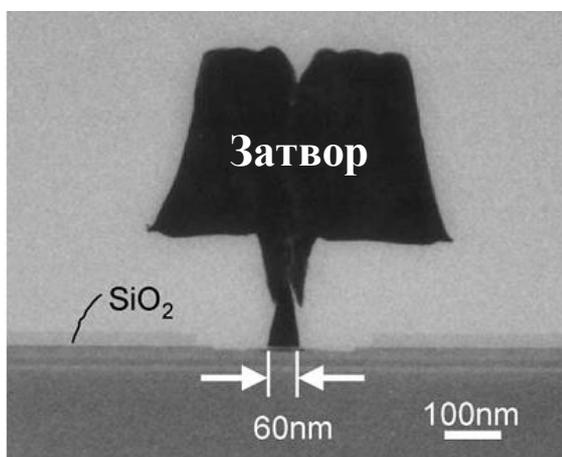


Рисунок 1.45 – Изображение ПЭМ изготовленного транзистора с затвором длиной 60 нм

Измерения Si/SiGe НЕМТ с длиной затвора $L_g = 60$ нм по постоянному току показали хорошие значения параметров и его максимальная проводимость составляла $g_m = 156$ мСм/мм. Значение граничной частоты усиления по току составило $f_T = 52$ ГГц, а максимальной частоты генерации $f_{MAX} = 112$ ГГц. Авторы также утверждают, что на момент написания статьи созданный ими затвор длиной $L_g = 60$ нм являлся самым коротким из когда-либо известных для Si/SiGe НЕМТ.

В работе [84] сообщается о разработке и исследовании высокопроизводительного n -MODFET транзистора на двойной напряженной гетероструктуре Si/Si_{0,6}Ge_{0,4} с Т-образным затвором длиной $L_g = 100$ нм. Вертикальное поперечное сечение структуры n -MODFET эпитаксиальных слоев показана на рисунке 1.46.

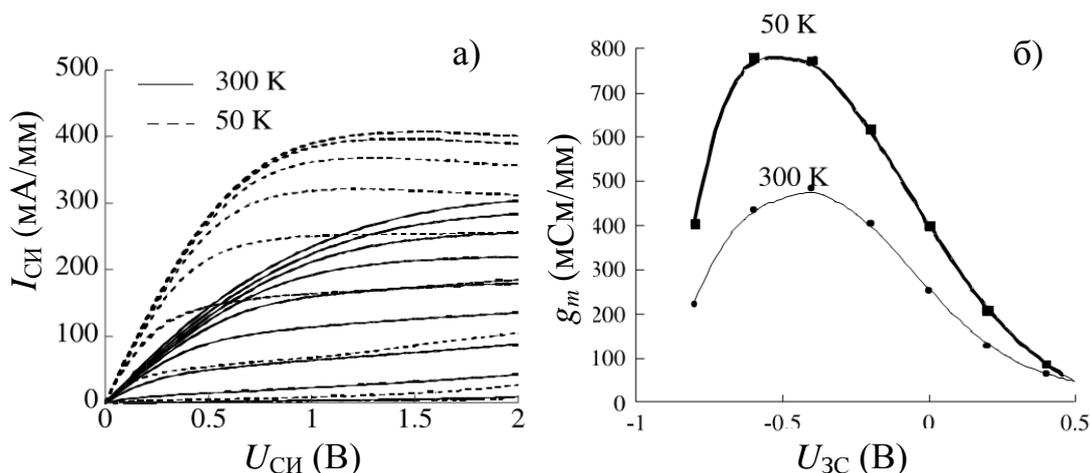
Затвор		
		Si верхний слой
4 нм	н/л	$\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$
5 нм	$2,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \text{ Sb}$	$\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ слой носителей
3,5 нм	н/л	$\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ спейсер
9 нм	н/л	Si канал
4 нм	н/л	$\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ спейсер
5 нм	$1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \text{ Sb}$	$\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ слой носителей
500 нм		$\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ буфер
	5-40%	SiGe ступенчатый буфер
	P	Si подложка

Рисунок 1.46 – Структура слоев Si/Si_{0,6}Ge_{0,4} n-MODFET

Последовательность слоев выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке Si p-типа (100) с высоким удельным сопротивлением, начиная с ослабляющего деформации буферного слоя SiGe, содержание Ge в котором варьировалось от 5% до 40%. Наличие напряженности в кремниевом слое оказывает сильное влияние на зонную структуру. Гидростатическое напряжение вызывает сдвиг энергии запрещенной зоны, в то время как одноосное напряжение вызывает дополнительное расщепление вырожденных уровней путем понижения симметрии решетки. Электроны зоны проводимости в тепловом равновесии в напряженной квантовой яме (КЯ) Si в основном сосредоточены в эллипсоидальных Δ -долинах с главной осью, перпендикулярной плоскости слоя. Они движутся параллельно плоскости слоя с поперечной массой $m_{et} = 0,19m_0$, намного меньшей, чем продольная масса $m_{el} = 0,91m_0$, так что подвижность электронов в канале увеличивается по сравнению с подвижностью в нелегированном объемном Si. Сердцевина активной структуры представляет собой двухосно-деформированный, ненамеренно легированный канал с квантовыми ямами Si, имеющий толщину 9 нм. Он встроен между двумя Si_{0,6}Ge_{0,4} спейсерами 3,5 нм (выше квантовой ямы) и 4 нм (ниже квантовой ямы) и между двумя слоями подачи носителей Si_{0,6}Ge_{0,4}, легированных Sb, толщинами 5 нм. В гетеропереходе Si/Si_{0,6}Ge_{0,4} формируется запрещенная зона $\Delta E_C = 0,24 \text{ эВ}$, что позволяет установить хорошее соединение носителей в напряженной квантовой яме Si, при этом концентрация электронов в слоях достигает $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ с подвижностью $1100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при температуре 300 К.

Формирование мезы осуществлялось сухим травлением через верхний оксидный слой. Исток и сток создаются имплантацией P, а T-образный 100 нм Pt затвор Шоттки формировался посредством электронно-лучевой литографии «на взрыв». Представленные здесь результаты относятся, в основном, к устройствам с длиной затвора $L_g = 100$ нм и шириной 100 мкм, разделенным на два пальца.

На рисунке 1.47 представлены характеристики изготовленных *n*-MODFET SiGe при температурах $T = 50$ и 300 К.



Рисунок

1.47 – ВАХ (а) и зависимость крутизны от напряжения затвор-сток (б) *n*-MODFET параметры транзистора на напряженной гетероструктуре Si/Si_{0,6}Ge_{0,4} с T-образным затвором длиной $L_g = 100$ нм температурах $T = 50$ и 300 К

На рисунке 1.48 представлены зависимости граничной частоты усиления по току f_T и максимальной частоты генерации f_{MAX} от напряжения затвор-сток при температурах $T = 50$ и 300 К.

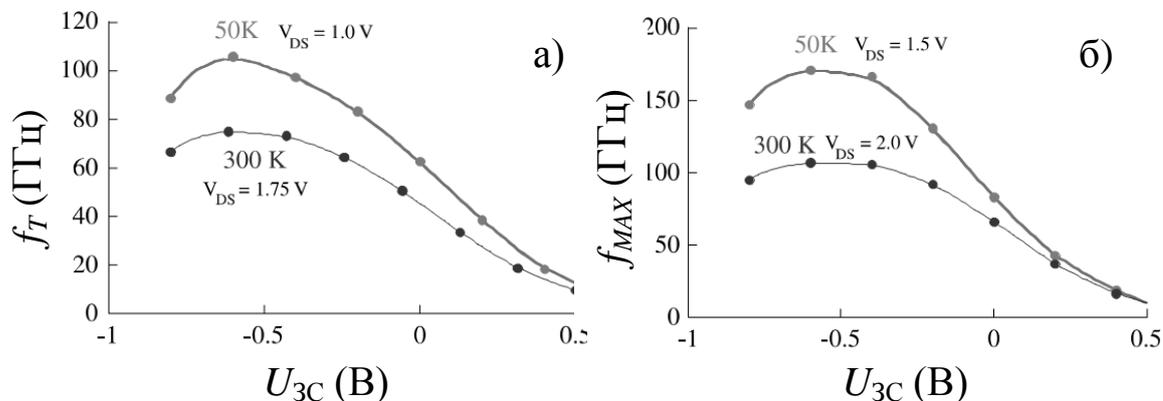


Рисунок 1.48 – Зависимости граничной частоты усиления по току f_T (а) и максимальной частоты генерации f_{MAX} (б) от напряжения затвор-сток при температурах $T = 50$ и 300 К

Авторы работы [84] утверждают, что за счет использования напряженной двойной гетероструктуры Si/Si_{0,6}Ge_{0,4} и T-образного затвора Шоттки длиной $L_g = 100$ нм в *n*-MODFET им удалось достичь новых рекордно высоких значений параметров транзистора: частота усиления по току $f_T = 74$ ГГц, частота генерации $f_{MAX} = 107$ ГГц, крутизна $g_m = 460$ мСм/мм, которые вместе приводят к очень низким шумовым параметрам $NF_{min} = 0,4$ дБ и помехоустойчивости $R_n = 52 \Omega$ на частоте 2,5 ГГц. При температуре $T = 50$ К показатели возрастают до $f_T = 105$ ГГц, частота генерации $f_{MAX} = 170$ ГГц, крутизна на $g_m = 730$ мСм/мм. Впервые такое сочетание параметров по постоянному току и СВЧ сигналу представлено для технологии Si/SiGe *n*-MODFET, что демонстрирует многообещающие перспективы. Однако имеется вполне обоснованная необходимость дальнейшего уменьшения длины T-образного затвора.

Авторы статьи [85] сообщают об исследовании крупных мощных MODFET транзисторов на Si/SiGe с большой шириной затвора. MODFET структура была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке с высоким удельным сопротивлением (> 5000 Ом·см) *n*-Si (001). По мере роста структура снизу вверх состоит из ослабленного буферного слоя Si_{1-x}Ge_x толщиной 4,5 мкм с линейным градиентом *x* от 0 до 0,3, буферного слоя Si_{0,7}Ge_{0,3} толщиной 1 мкм поверх ослабленного буфера Si_{1-x}Ge_x, напряженного не-легированного Si-канала толщиной 8,5 нм, слоя спейсера Si_{0,7}Ge_{0,3} толщиной 4 нм, одномерного δ -легированного слоя Sb с плотностью слоевого легирования $6 \cdot 10^{12}$ см⁻², 5 нм верхнего слоя Si_{0,7}Ge_{0,3} и, наконец, 4 нм верхнего слой Si.

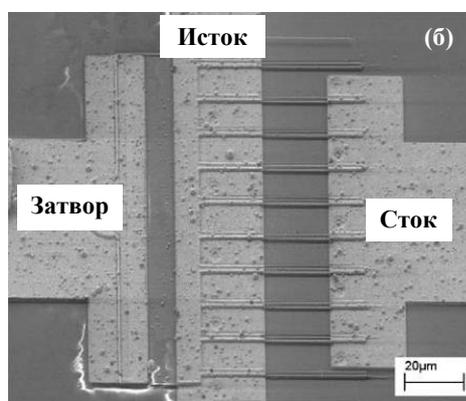
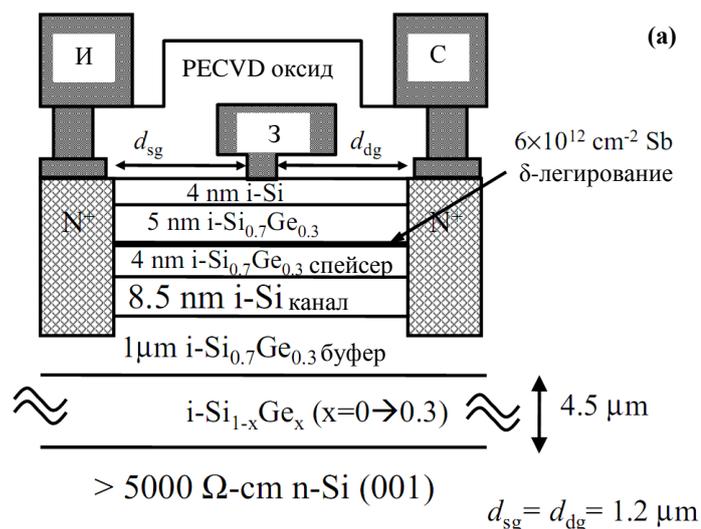


Рисунок 1.49 – Схематическое поперечное сечение гетероструктуры MODFET (а) и СЭМ фотография готового 10-пальцевого силового MODFET с общей шириной затвора $W_g = 500$ мкм (б)

Измеренная при комнатной температуре концентрация электронов в слоях составляет $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ с соответствующей подвижностью Холла $1500 \text{ cm}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Рисунок 1.49, а иллюстрирует схематическое поперечное сечение структуры MODFET и одного Т-образного затвора (в одной группе затворы изолированы друг от друга оксидом PECVD), на основании которых впоследствии были изготовлены реальные транзисторы. На рисунке 1.49, б показано наклонное изображение СЭМ одного из изготовленных силовых MODFET с общей шириной затвора $W_g = 500$ мкм. Также был изготовлен транзистор с 10 пальцами, имеющие общую ширину затвора $W_g = 750$ мкм.

На рисунке 1.50 показаны нормированные выходные и передаточные характеристики мощного MODFET с $L_g = 0,3$ мкм и $W_g = 500$ мкм.

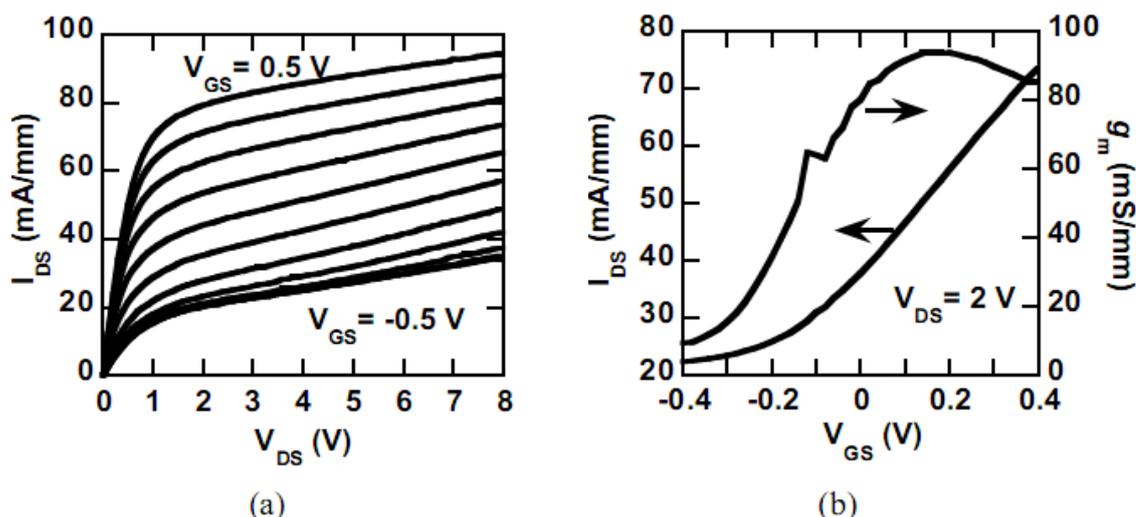


Рисунок 1.50 – Нормированные характеристики постоянного тока силового MODFET с $L_g = 0,3$ мкм и $W_g = 500$ мкм: (а) выходная характеристика, (б) передаточные характеристики

Наблюдался высокий ток в выключенном состоянии, и это не является чем-то необычным для маломощных MODFET, о которых сообщалось ранее. Предполагается, что плохая изоляция между активными слоями и нижележащим SiGe-буфером может способствовать проводимости в выключенном состоянии, и это можно минимизировать, добавляя легирующий слой с р-областями между активными слоями и подложкой. Очень высокое пробивное напряжение (~ 12 В) демонстрировалось в силовых MODFET транзисторах из-за использования большого расстояния исток-затвор и сток-затвор (1,2 мкм). Недостатками высоких напряжений пробоя являются пониженный ток насыщения I_{DS} и, следовательно, пониженные значения крутизны g_m .

В работе [86] авторы проводят сравнение параметров транзисторов, сформированных по технологиям MODFET и MOS-MODFET.

Слои гетероструктуры SiGe/Si был выращены путем химического осаждения из газовой фазы в сверхвысоком вакууме (UHV-CVD) на подложке n -Si. Последовательность слоевого роста начиналась со ступенчатого буферного слоя $\text{Si}_{(1-y)}\text{Ge}_y$, релаксированного до постоянной решетки $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$. Далее выращивался буферный слой $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$ толщиной 1 мкм, на котором формировалась структура p - $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$ толщиной 4 нм легированная В концентрацией $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$ спейсер толщиной 3 нм, $\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_x$ канал толщиной 4,5 нм с градуировкой от 0,8 до 0,7, $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$ верхний слой толщиной 10 нм. Канальный слой показал двумерную подвижность дырочного газа $930 \text{ см}/(\text{В} \cdot \text{с})$ и плотность слоя дырок $2,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, что было определено измерениями Холла при комнатной температуре.

Формирование транзистора по технологии MOS-MODFET началось с осаждения пленки SiO_2 толщиной 5 нм струйным методом (JVD). Для уплотнения пленки образец подвергался отжигу после осаждения при $300\text{ }^\circ\text{C}$ в атмосфере азота в течение 30 мин. Ме- за была сформирована с использованием реактивного ионного травления в плазме CF_4 . Высота мезы составляла 170 нм. Для пассивации образца с использованием электронно- лучевого напыления в вакууме осаждалась пленка SiO_2 толщиной 240 нм. Металлизация омических контактов – Pt толщиной 30 нм. Контактное сопротивление $\sim 0,2\text{-}0,3\ \Omega\cdot\text{мм}$ было получено после спекания образца в атмосфере азота при температуре $350\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 минут. Т-образный затвор Ti/Pt/Au с длиной 0,1 мкм был сформирован с помощью трех- слойной резистивной маски с использованием электронно-лучевой литографии. Наконец, формировались контактные площадки осаждением Ti/Pt/Au. Расстояние между истоком и стоком составляло 2 мкм, а ширина затвора всех устройств составляла 100 мкм двумя пальцами в Т-конфигурации. Структура устройства MOS-MODFET показана на рисунке 1.51. Обычные MODFET были одновременно изготовлены на другом образце с такой же структурой, но без оксида JVD. Обработка MODFET была аналогична обработке MOS- MODFET. Перед напылением металлизаций затвора и омических контактов на моделях MODFET собственный оксид удаляли погружением в разбавленную HF кислоту.

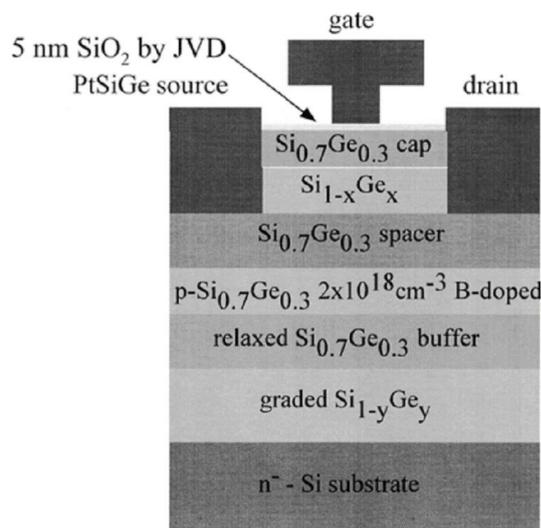


Рисунок 1.51 – Схема поперечного сечения выращенной гетероструктуры SiGe MOS- MODFET p-типа

В результате для MODFET были достигнуты следующие параметры: максимальная крутизна $g_m = 142\text{ мСм/мм}$; максимальный ток стока 114 мА/мм ; напряжение пробоя за- твора на сток $6,7\text{ В}$; частота усиления по току $f_T = 45\text{ ГГц}$; частота генерации $f_{MAX} = 81\text{ ГГц}$. Для MOS-MODFET в качестве диэлектрического слоя затвора использовался высококаче-

ственный ультратонкий оксид JVD. В связи с этим MOS-MODFET показал очень маленький ток утечки затвора (менее 1 нА/мкм напряжении на затворе от 2,16 В до 6,0 В) и широкий перепад напряжения на затворе. Но с введением диэлектрического слоя затвора был введен паразитный поверхностный канал в верхнем слое, который был полностью включен при напряжении около 2 В. В результате MOS-MODFET имеют более высокие напряжения отсечки. Пороговое напряжение изменяется от 0,45 В для MODFET до 1,33 В для MOS-MODFET. Из-за более низкой эффективности модуляции, вызванной большим расстоянием между затвором и каналом, MOS-MODFET продемонстрировали максимумы $g_m = 90$ мСм/мм, $f_T = 38$ ГГц, $f_{MAX} = 64$ ГГц. Они немного ниже, чем полученные для MODFET по причинам, указанным выше. Преимущества MOS-MODFET включают меньший ток утечки на затворе, более широкий размах напряжения на затворе и лучшую линейность устройства. Значения f_T и f_{MAX} , о которых сообщается для этих устройств, являются самыми высокими на сегодняшний день для всех несамосовмещенных МОП-транзисторов SiGe р-типа с гетеропереходом.

Кроме того, впервые были исследованы и зарегистрированы высокочастотные шумовые характеристики SiGe FET. Для MODFET были измерены $NF_{min} = 1,29$ дБ и $G_a = 12,8$ дБ на частоте 2 ГГц, а также $NF_{min} = 1,9$ дБ на частоте 4 ГГц. MOS-MODFET показали $NF_{min} = 0,92$ дБ и $G_a = 12$ дБ на частоте 2 ГГц, а также $NF_{min} = 2,1$ дБ на частоте 4 ГГц. Все эти привлекательные характеристики указывают на потенциальное применение SiGe/Si MODFET и MOS-MODFET в беспроводной связи. Ожидается дальнейшее улучшение характеристик устройств за счет применения технологий SOI и разработки самосовмещенного процесса, который уменьшит влияние сопротивления доступа истока и задержки транзита исток-сток.

1.4 Микроэлектромеханические системы

Начало активных исследований в области разработки микроэлектромеханических систем (МЭМС) для широкого спектра научно-технических приложений пришлось на конец двадцатого века. МЭМС представляют собой миниатюрные приборы, выполняющие роль электромеханических преобразователей. Характерные размеры таких приборов могут варьироваться от миллиметрового до субмикронного уровня, а методы их формирования основаны на технологиях производства интегральных микросхем (ИМС).

МЭМС приборы могут включать такие механические элементы как балки, шестерни, мембраны и пружины. МЭМС могут выступать в качестве составных элементов или же самостоятельных приборов, таких как акселерометры, инерционные датчики, микродвигатели, микророботы, микрозеркала, картриджи струйных принтеров, микроактюаторы, оптические сканеры, микронасосы для перекачки жидкостей, датчики давления, расходомеры и газосигнализаторы. Функциями таких приборов является регистрация механических процессов, их активация или контроль на микроуровне для решения различных прикладных задач.

Снижение размеров функциональных элементов при помощи МЭМС позволяет добиться множества преимуществ. Например, уменьшение размеров функциональных элементов МЭМС до значений, сопоставимых с плотностью дефектов материала, позволяет получить приборы с минимальным количеством структурных дефектов. В результате, такие МЭМС приборы как кантилеверы, оказываются значительно надежнее своих макроскопических аналогов [87]. Стоит отметить, что при моделировании приборов с габаритами, близкими к размерам отдельных зерен или других микроскопических неоднородностей состава, или свойств материала, приближение об однородности массивных материалов становится неприменимо. Тем не менее, гибкость технологических процессов микрообработки материалов позволяет с высокой точностью контролировать свойства получаемых пленок.

Также стоит упомянуть преимущества МЭМС, относящиеся к области гидродинамики. В отличие от макроскопических систем, в которых доминируют турбулентные и хаотические потоки жидкостей, режим потока жидкостей по микроканалам МЭМС практически всегда является ламинарным.

Кроме того, крайне привлекательным является применение МЭМС-анализаторов в химических и биологических системах, что позволяет уменьшить размеры исследуемого образца при сохранении постоянного уровня детектируемой концентрации. Био-МЭМС имеют мультидисциплинарный характер, и включают в себя механические, электрические

и гидравлические элементы. Малые размеры позволяют обеспечить быстрый отвод тепла от МЭМС. В тоже время, существуют варианты исполнения МЭМС с высокой теплопроводностью лишь в одном направлении, в то время как в остальных направлениях их свойства остаются теплоизолирующими.

МЭМС выполняют роль связующих элементов между цифровой электроникой и физическим миром, роль преобразователей самых разнообразных неэлектрических сигналов физического мира в электрический сигнал [88]. Кроме того, возможно и обратное преобразование электрического сигнала в сигналы физической природы. Примером таких преобразователей служат МЭМС актюаторы [89]. Механизм передачи информации может иметь достаточно сложный вид и включать последовательное преобразование сигнала из тепловой формы в механическую, оптическую и электрическую формы. Датчики и актюаторы, построенные на основе МЭМС могут быть сопряжены с электронной частью в виде интегральных микросхем, и представлять собой законченные микросистемы. Наиболее успешные продукты на основе МЭМС отличаются технологичностью и высокими масштабируемыми свойствами.

1.4.1 Классификация МЭМС

Сенсорные элементы микросистемной техники (МСТ) составляют один из классов твердотельных датчиков, основной особенностью которых является конструктивно-технологическая и функциональная интеграция на одном кристалле совместно с устройствами интегральных схем. Как правило, сенсорные элементы являются частью большой микросистемы, состоящей из набора различных, по функциональному признаку, сенсоров и аналого-цифровых цепей обработки сигнала.

В качестве сенсорных элементов МСТ используются как элементы интегральных схем (резисторы, конденсаторы, диоды и транзисторы), изготовленные по традиционным технологиям ИС, так и микромеханические структуры (мембраны, балки), изготавливаемые с использованием технологий МСТ.

В настоящее время классификация сенсоров проводится по различным признакам [90]. По технологии изготовления различают гибридно-пленочные, биполярные или МДП сенсоры. По виду выходного электрического сигнала можно выделить емкостные, резистивные, индуктивные сенсоры. По измеряемому параметру выделяют датчики температуры, давления, электрических и магнитных полей.

С точки зрения формирования сигнала, сенсорные элементы делятся на активные и пассивные. Активный сенсор требует наличия внешнего источника возбуждения, в то

время как пассивный сенсор генерирует свой выходной сигнал без использования внешнего источника тока или напряжения. Примерами активных сенсоров являются тензодатчики и акселерометры, сенсоры магнитного поля и химического состава газовых средств. К пассивным сенсорам можно отнести термоэлементы и фотодиоды, которые образуют термоэлектрические напряжения или фотодиодный ток.

Актюаторами принято называть преобразователи обратного типа, осуществляющие преобразование электрической энергии в другие виды энергии в соответствии с различными формами движения и существования материи. Микроактюаторы являются исполнительными оконечными устройствами микросистемной техники и могут быть реализованы как отдельные функциональные узлы или сложно функциональные микроэлектромеханические системы.

В зависимости от назначения и конструкции микроактюаторы обладают линейными размерами от нескольких микрометров до сантиметра. Области применения микроактюаторов чрезвычайно широки, что обусловлено выполняемыми ими различными функциями в составе информационно-измерительных каналов управляющих систем, Микроактюаторы используются в управляющих системах и устройствах робототехники, ракетно-космической техники, медицины, телеметрии и дозиметрии и измерительных приборах.

В общем случае способы активации микроактюаторов могут быть сведены в пять основных, а именно: электростатический, магнитный, пьезоэлектрический, гидравлический и тепловой.

1.4.2 Технологические особенности формирования МЭМС

1.4.2.1 Объемная микрообработка

Объемная микрообработка – это производственный процесс, идущий от поверхности вглубь пластины, чаще всего кремниевой. С помощью мокрого химического травления последовательно удаляются ненужные участки пластины, в результате чего создается МЭМС. С помощью традиционного метода фотолитографии на пластине формируется рисунок, защищающий те участки, которые необходимо сохранить. Затем пластины погружаются в травитель, в котором удаляются незащищенные участки пластины. Технология объемной микрообработки относительно проста и недорога, и хорошо подходит для не слишком сложных приложений, критичных к цене [91].

1.4.2.2 Поверхностная микрообработка

При поверхностной микрообработке происходит последовательное наращивание слоев материала на кремниевую пластину. Типичный процесс поверхностной микрообра-

ботки представляет собой повторяющуюся последовательность нанесения на поверхность кремниевой пластины тонких пленок, формирования на пленке защитного рисунка методом фотолитографии и химического травления пленки [92]. Чтобы создать подвижные, функционирующие механизмы, в слоях чередуют тонкие пленки конструкционного материала и заполнителя, называемого также абляционным материалом (как правило, двуокись кремния). Из конструкционного материала образуются механические элементы, а абляционный материал заполняет пустоты между ними. На последнем этапе заполнитель удаляется травлением, и конструкционные элементы приобретают подвижность и функциональность.

Поверхностная микрообработка требует большего количества технологических операций, чем объемная, и, соответственно, она дороже. Поверхностная микрообработка используется для создания более сложных, по сравнению с МЭМС получаемые при объемной микрообработке, механических элементов.

1.4.2.3 Технология LIGA

LIGA (Litographie, Galvanoformung и Abformung) технология – это технология, позволяющая методами рентгенолитографии, гальванопластики и пресс-формовки создавать высокоаспектные микроструктуры [93]. На поверхности подложки формируется полимерная пленка (рентгенорезист), затем рентгенорезист подвергается экспонированию рентгеновскими лучами высокой энергии через специальный шаблон. Экспонированные участки удаляются с помощью травителя, в результате чего образуются исключительно точные микроскопические элементы.

На следующем этапе LIGA технологии участки проводящей подложки, вскрывшиеся после удаления, могут быть металлизированы посредством электроформовки-гальваническим осаждением слоя металла из электролита. После чего, оставшийся резист удаляется, оставляя металлические структуры с рисунком, соответствующим шаблону в качестве конечного продукта.

Таким образом, микроструктура из резиста является вторичной маской для создания микроструктуры из металла, например, никеля, меди и золота, или сплавов, таких как кобальта-никеля и железа-никеля. Эта технология может использоваться для производства микроструктур как для прямого использования, так и для изготовления пресс-форм для последующего тиражирования полимерных микроструктур методом горячей формовки (прессования). Эти вторичные полимерные структуры могут формировать конечный полимерный компонент, использоваться как шаблон при вторичном гальванопокрытии или

служить в качестве одноразовой литейной формы для изготовления керамических микроструктур [94].

1.4.2.4 Технология глубокого активного ионного травления

От традиционной объемной микрообработки глубокое реактивное ионное травление (Deep Reactive Ion Etching – DRIE) отличается только тем, что вместо влажного химического травления для создания элементов, используется сухое плазменное травление [95]. Это позволяет намного гибче управлять профилями травления и существенно расширить ассортимент изготавливаемых элементов. Производственное оборудование для ионного травления весьма дорого, поэтому и приборы, созданные по технологии DRIE, как правило, дороже приборов, сделанных с использованием традиционного влажного травления.

1.4.3 Методы корпусирования МЭМС

Технические требования к корпусу интегральной схемы, как правило, четко определены – это механическая поддержка кристалла, электрическое соединение и теплоотвод. Так как МЭМС могут эксплуатироваться в самых различных условиях, следовательно, при корпусировке МЭМС необходимо добиться согласованной работы кристалла и корпуса в условиях конкретной окружающей среды.

Среди методов корпусировки МЭМС можно выделить две группы: методы корпусировки на уровне кристалла (DLP) и методы корпусировки на уровне пластины (WLP). В первой группе методов корпусирование МЭМС производится индивидуально после разделения пластины на отдельные кристаллы и является конечным этапом производства. Во второй группе герметизация всех МЭМС происходит одновременно до их разделения на отдельные чипы.

Для разделения пластин традиционно используется дисковая пила с алмазной режущей кромкой, что требует дополнительного охлаждения пластины потоком хладагента. При этом в случае DLP методов высока вероятность загрязнения МЭМС продуктами резки, смешанными с охлаждающей жидкостью. Альтернативой может выступать способ разделения приборов с помощью лазерной резки, однако при этом вероятность теплового повреждения МЭМС значительно повышается [96].

Для резки МЭМС пластин необходимо применение специальных манипуляторов. Применение традиционных вакуумных захватов осложняется наличием развитого рельефа МЭМС, подверженных механическим повреждениям [97]. Манипуляции с МЭМС кристаллами необходимо проводить за углы кристалла при помощи специальных роботизи-

рованных захватов [98]. Сравнение DLP и WLP методов корпусирования МЭМС приведено на рисунке 1.52.

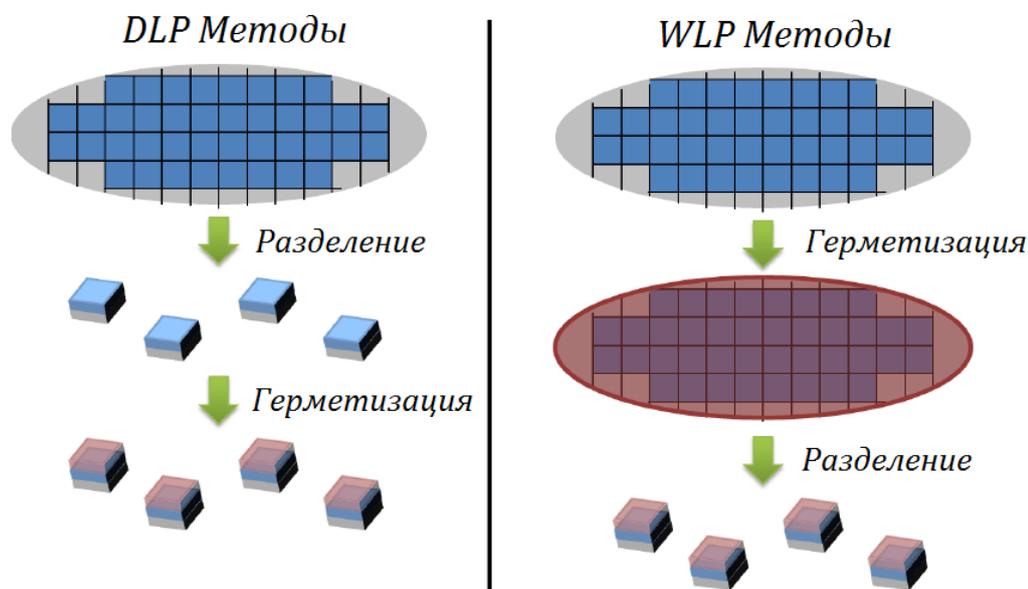


Рисунок 1.52 – Сравнение методов корпусировки МЭМС

К преимуществам WLP методов относятся более высокие экономическая целесообразность и выход годных приборов по сравнению с DLP (Die Level Packaging) методами. Так как каждый МЭМ прибор на пластине снабжается индивидуальным корпусом, отпадают как необходимость применения специальных манипуляторов, так и опасность их загрязнения на стадии разделения. Данные методы также позволяют провести обезгаживание или напустить в полость корпуса инертный газ.

WLP методы позволяют проводить тестирование и отбраковку приборов в процессе производства, что позволяет сократить временные и материальные затраты по сравнению с методами индивидуального корпусирования, при которых тестирование прибора возможно лишь после разделения и герметизации кристалла.

Герметизация полости МЭМС на ранних стадиях технологического процесса обеспечивает механическую защиту прибора, защиту от загрязнений на стадии резки, и избавляют от необходимости применения специализированного оборудования. Также преимуществом WLP методов являются малые габаритные размеры корпуса, позволяющие интегрировать МЭМС в множество других систем.

Несмотря на все вышеперечисленные преимущества, WLP методы не являются универсальными.

1.4.3.1 Корпусирование с помощью монолитных капсул

Данный метод подразумевает использование внешней капсулы, размещенной над активными элементами МЭМС как показано на рисунке 1.53. Подобный корпус включает три ключевых элемента: капсулу, электрические контакты, и слой припоя между капсулой и пластиной прибора. В качестве материала капсулы могут выступать металлы, стекло, керамика, или полупроводниковые материалы [99]. Соединение капсулы с полупроводниковой пластиной производится с помощью припоя.

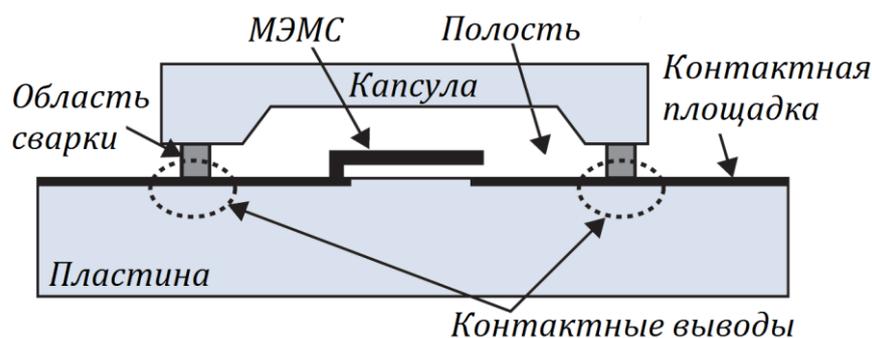


Рисунок 1.53– Сечение МЭМС прибора, корпусированного методом поверхностного монтажа

Для предотвращения термического повреждения элементов МЭМС и межсоединений, необходимо избегать высокотемпературных процессов. Также присутствуют ограничения на рельефность МЭМС пластины. При наличии развитого рельефа на поверхности МЭМС пластины, электрические межсоединения могут выполнены в слое капсулы. Большинство корпусов данного типа устойчивы к негативным факторам окружающей среды.

Одним из наиболее часто применяемых способ соединения кремниевой пластины с капсулой из боросиликатного стекла Pyrex является метод анодной сварки [100]. На рисунке 1.54 показана схема данного процесса и механизм ионного дрейфа, приводящий к химической сварке двух пластин.

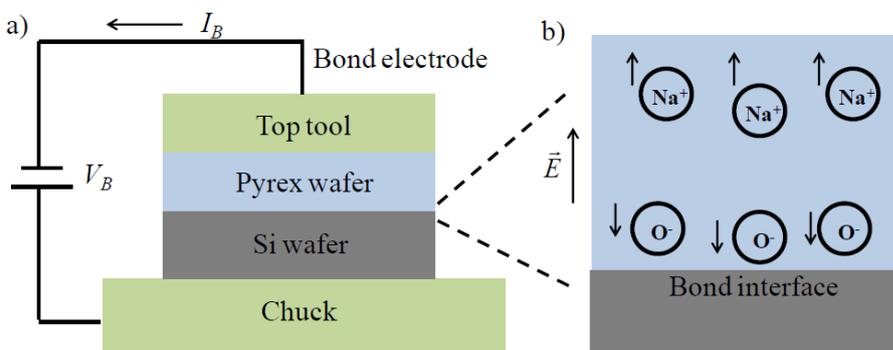


Рисунок 1.54 – Изображение процесса анодной сварки (a) и ионного дрейфа (b)

Механизм сварки основан на электрохимических реакциях, происходящих между поверхностями стекла и кремния при повышенной температуре и воздействии электрического поля. Поверхности двух пластин приводятся в непосредственный контакт и нагреваются до 400°C, после чего к полученной структуре прикладывают напряжение в 800-1500В. Электростатическое поле вызывает дрейф ионов, образованных в результате распада связей Na-O, и окисление поверхности кремниевой пластины ионами O²⁺. После образования устойчивого механического контакта структура охлаждается до комнатной температуры, а хорошее согласование ТКР стекла и кремния в диапазоне температур от 20 до 400°C позволяет избежать формирования в структуре высоких механических напряжений [101].

Высокая прозрачность стеклянной капсулы позволяет использовать ее во множестве микро-опто-электромеханических систем (МОЭМС), а также в ряде биологических микро-электромеханических систем (Bio-MEMS), в которых возникает необходимость передачи СВЧ сигнала сквозь корпус имплантированного прибора. Боросиликатное стекло является устойчивым к коррозии биосовместимым материалом, а технология его производства хорошо отработана, что делает данный материал достаточно доступным.

1.4.3.2 Корпусирование с помощью пайки стеклокерамическим припоем

К методам поверхностного монтажа относятся пайка стеклокерамическим припоем, пайка Si-Au эвтектическим сплавом, пайка при помощи оплавления [102]. Наиболее распространенными являются методы с применением припоя и эвтектического сплава. В первом методе в области контакта между капсулой и пластиной наносится слой припоя, после приведения пластин в контакт нагревание структуры приводит к оплавлению припоя. Нагревание может производиться точно при помощи магнитных катушек, что позволяет сохранять температуру МЭМ прибора ниже 125°C [103]. Однако примеси, содержащиеся в припое и испаряющиеся при нагревании, могут осложнить вакуумное корпусирование МЭМС.

В методе пайки эвтектическим сплавом для формирования герметичного соединения используются металлы, и в частности золото [104]. Эвтектический плав Si-Au с температурой плавления около 360°C обладает высокой чистотой, что позволяет применять его для вакуумного корпусирования. На рисунке 1.55 показан механизм пайки эвтектическим сплавом.

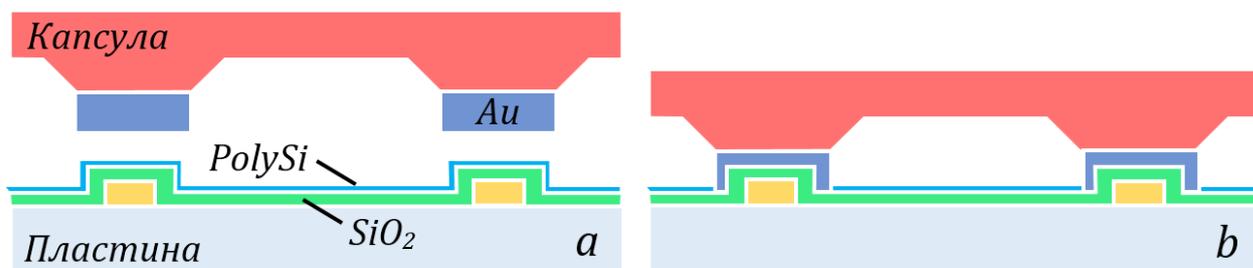


Рисунок 1.55 – Схема корпуса МЭМС до (a) и после (b) пайки эвтектическим сплавом

Золотая пленка, как правило, осаждается на пластину капсулы. А кремний поступает в расплав из поверхности пластины корпусируемой МЭМС или же из осажденной на поверхность поликремниевой пленки. После приведения двух пластин в механический контакт и их нагревания, происходит диффузия кремния в золотой расплав. После охлаждения между двумя пластинами формируется контакт с высокой адгезией. Однако данный метод также имеет свои недостатки. К ним относятся неравномерность и низкая воспроизводимость соединения. Причиной может быть окисление расплава, его неравномерное растекание. Образование полостей в контактном слое приводит к уменьшению площади контакта и снижению адгезии. Несмотря на толщину слоя расплава в несколько микрометров, метод имеет ограничения к плоскостности корпусируемой пластины [105].

Соединение пластин с помощью стеклокерамического припоя при температуре свыше 700°C , что превышает допустимый температурный диапазон большинства МЭМС и ИС. Как упоминалось ранее, существуют методы локального разогрева припоя. В настоящее время разработаны технологии резистивного, лазерного, ИК и СВЧ нагрева, ультразвуковой сварки [106]. В качестве примера, на рисунке 1.56 представлена схема метода резистивного нагрева припоя.

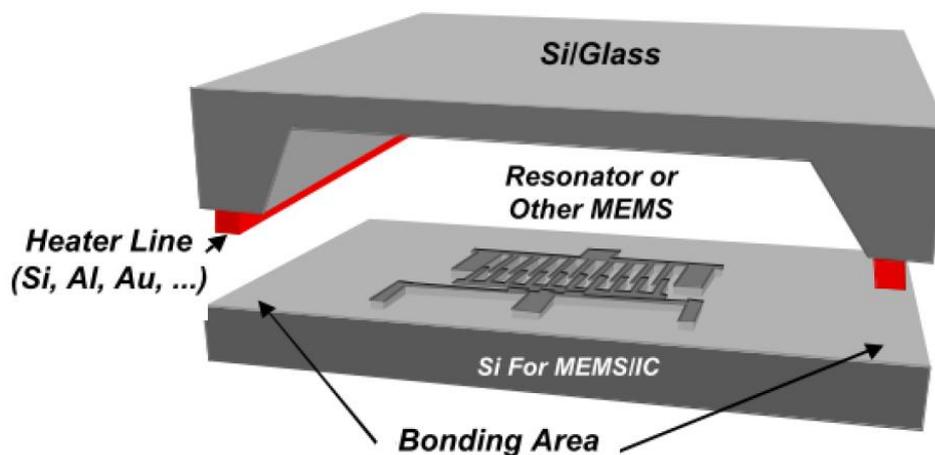


Рисунок 1.56 – Метод локального резистивного нагрева припоя

Для резистивного нагрева могут быть использованы такие материалы как алюминий или поликремний. Осаждаться они могут как на пластины капсулы, так и пластину корпусируемой МЭМС. Данный метод позволяет добиться перепада температур от 50 до 700°C на расстоянии менее 100 мкм [107].

1.4.3.3 Корпусирование методом объемной поверхностной микрообработки

Еще одна технология корпусирования МЭМС основана на методах объемной и поверхностной микрообработки корпусирующей подложки, ее последующего совмещения и пайки с подложкой МЭМС-прибора (Wafer-to-Wafer) [108]. Данная технология является исторически первой и имеет множество вариаций. Общий принцип проиллюстрирован на рисунке 1.57.

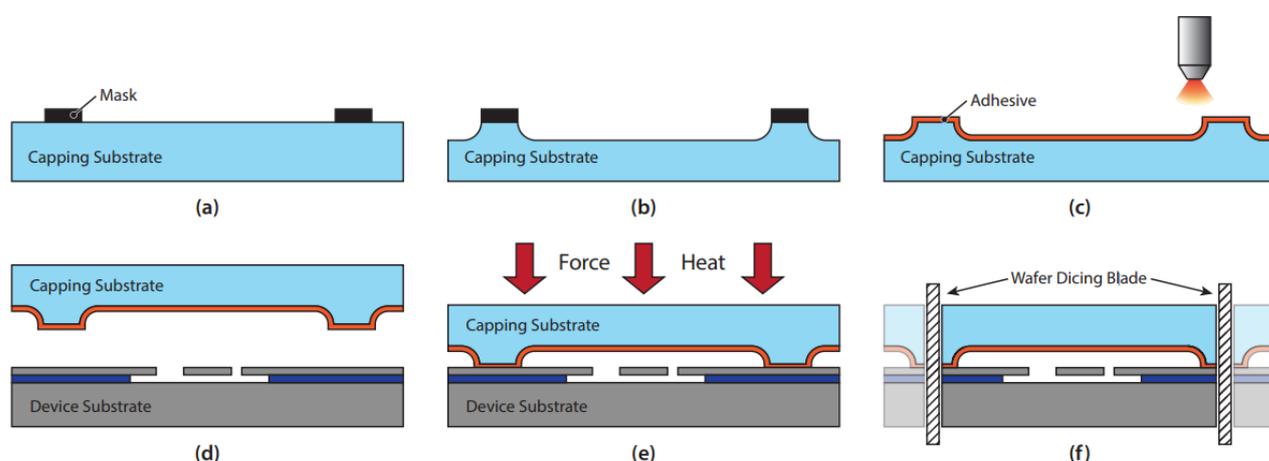


Рисунок 1.57– Этапы процесса упаковки по технологии Wafer-to-Wafer:

- a – формирование ФР маски; b – травление углублений;
- c – осаждение припоя; d – совмещение пластин; e – спекание пластин;
- f – разделение на кристаллы

Данная технология включает несколько основных этапов:

- формирование маски на корпусирующей подложке (a);
- травление полостей и удаление маски (b);
- распыление на поверхности тонкого слоя полимерного клея (c);
- совмещение корпусирующей и основной подложек (d);
- склеивание подложек методом термокомпрессии (e);
- разделение полученной структуры на отдельные приборы (f).

Wafer-to-Wafer метод корпусирования так же может реализовываться путем совмещения с технологией тонкопленочного корпусирования. Суть метода заключается в

формировании массива сар-структур на вспомогательной подложке и их последующем переносе на подложку с элементами МЭМС. К недостаткам метода можно отнести повышенные требования к плоскостности подложек [109].

На рисунке 1.58 изображены основные этапы технологии со вспомогательной подложкой.

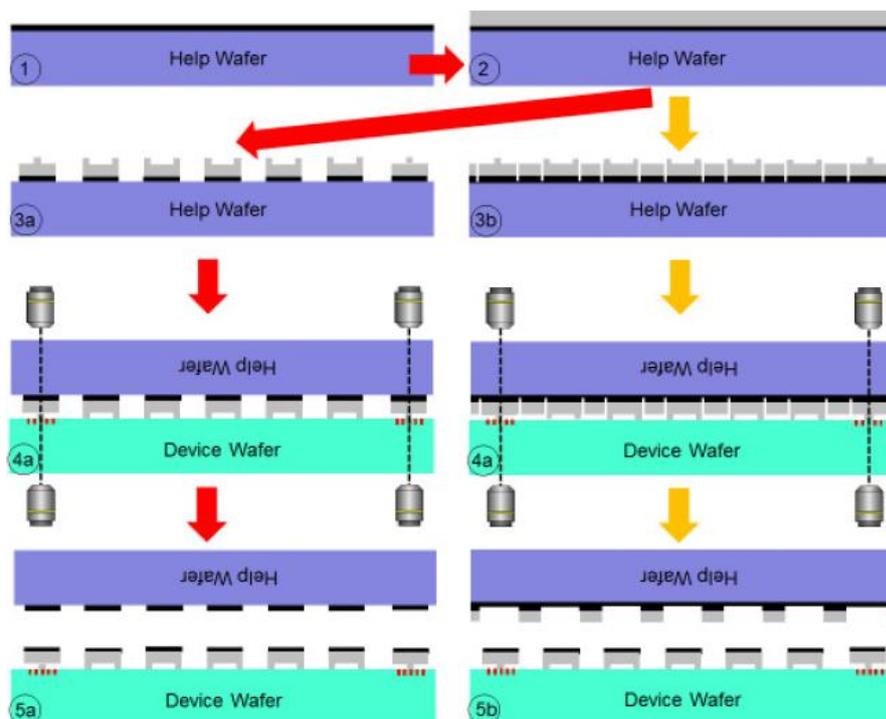


Рисунок 1.58 – Технологии с применением вспомогательной подложкой

На первом этапе вспомогательная стеклянная подложка при помощи клея совмещается с кремневой вспомогательной подложкой. Методами поверхностной микрообработки в слое кремния получают необходимые сар-структуры, после нанесения слоя припоя и совмещения подложек, полученные сар-структуры фиксируются на МЭМС-подложке. Отделение же сар-структур производится при помощи разложения связующего клея или лазерной резки [110].

В зависимости от количества используемых пластин (MEMS, ASIC, Cap) и расположения выводов, которые могут быть выполнены в виде сквозных отверстий (TSV), горизонтальных тонкопленочных выводов или паяных проволочных соединений, можно выделить 9 типов конструкций МЭМС-корпусов, которые представлены на рисунке 1.59.

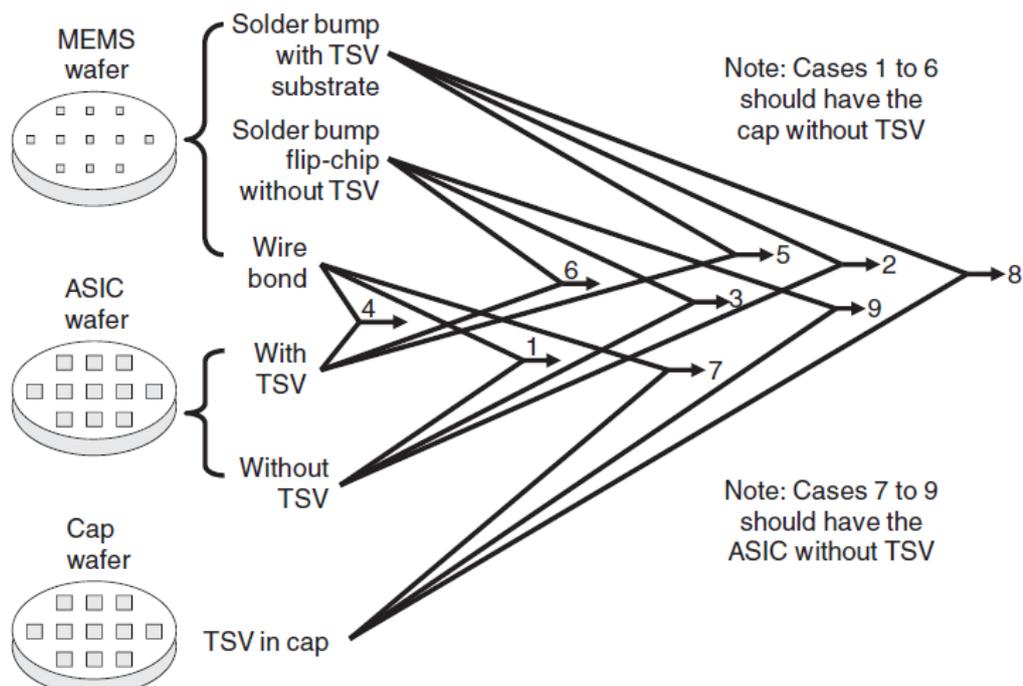


Рисунок 1.59 – Типы конструкций МЭМС-корпусов на основе технологии Wafer-to-Wafer

На рисунке 1.60 представлена иллюстрация четырех вариантов подобных корпусов.

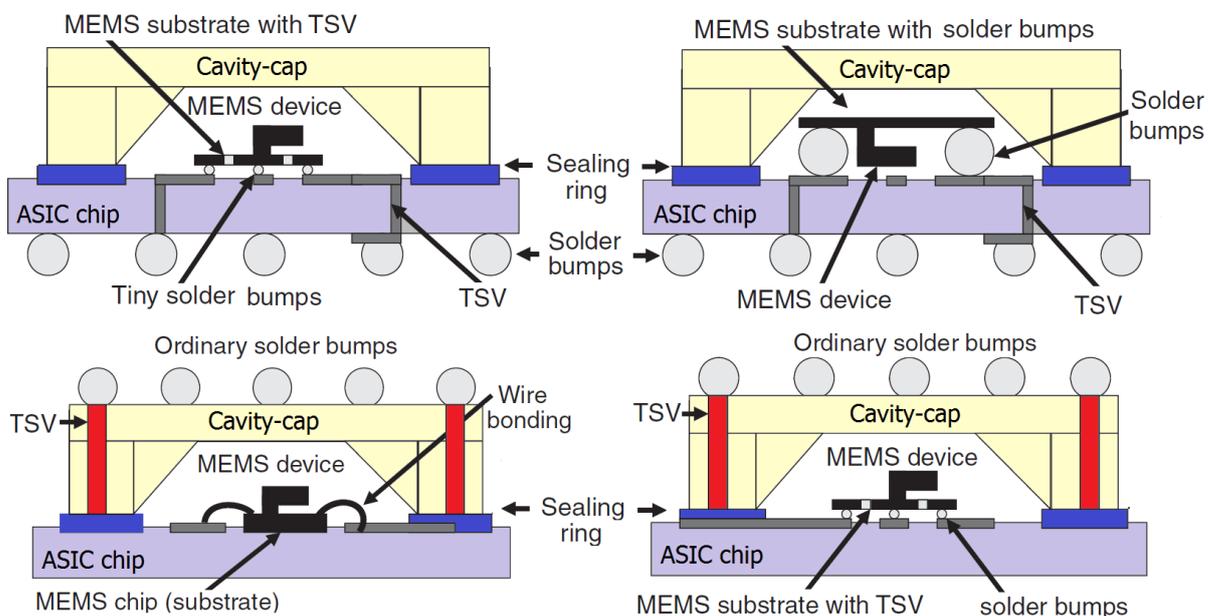


Рисунок 1.60 – Варианты межсоединений в технологии Wafer-to-Wafer

1.4.3.4 Методы корпусирования на уровне пластины WLP

Метод тонкопленочного корпусирования WL μ E (Wafer-level micro Encapsulation) основан на технологии производства полупроводниковых интегральных схем. Ранее дан-

ный метод применялся для герметизации различных МЭМ приборов, таких как датчики давления, резонаторы и акселерометры. Основной чертой технологии тонкопленочного корпусирования является формирование каналов, посредством которых обеспечивается вытравливание жертвенного слоя в корпусируемой полости. Например, если в качестве жертвенного слоя использовался оксид кремния, травителем может выступать буферный раствор плавиковой кислоты. После удаления жертвенного слоя, травильные каналы герметизируются методом химического осаждения нитрида кремния из газовой фазы при пониженном давлении (LPCVD), плазмохимического осаждения оксида кремния (PECVD) или методом осаждения металлической пленки.

На рисунке 1.61 приведена структура СВЧ МЭМ переключателя, корпусированного по технологии WLM (Wafer-level Microencapsulation).

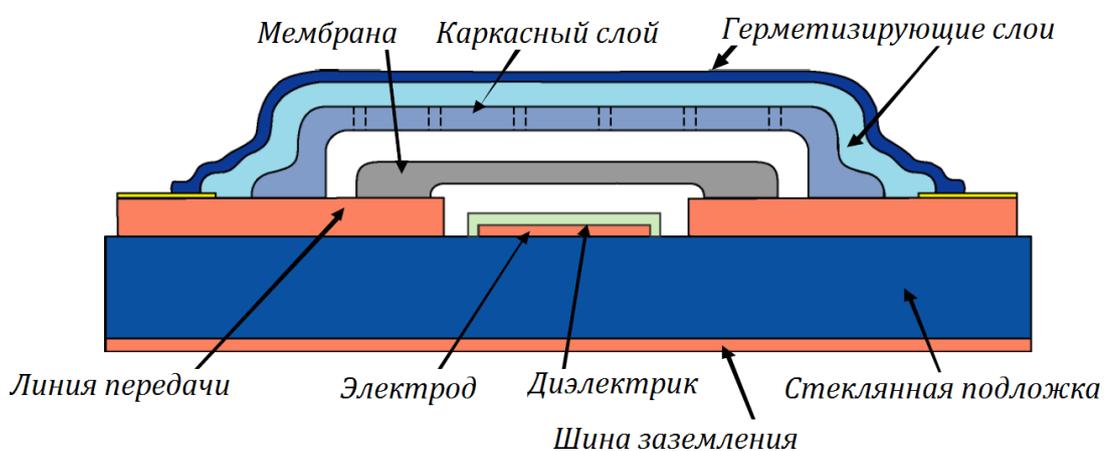


Рисунок 1.61 – Структура МЭМС в тонкопленочном корпусе

Технологический процесс включает в себя очистку подложки, осаждение/фотолитографию/травление (D/P/E) 300-нм золотого электрода, D/P/E 250-нм SiO₂ диэлектрика, электроосаждение медных линий передач толщиной 2.5-мкм, фотолитографию жертвенного слоя органического состава, и D/P/E 350-нм мембраны на основе алюминиевого сплава, формирование опорного жертвенного слоя на поверхности мембраны, поверх которого осаждается каркасный диэлектрический слой (Glob top - BCB). В каркасном диэлектрическом слое выполняются отверстия, через которые при помощи плазменного травления удаляются жертвенные слои как под мембраной, так и над ней. На заключительном этапе данной технологии отверстия в каркасном слое заполняются слоем герметизирующего материала с достаточно высокой вязкостью (SiN/парилен), препятствующей его проникновению в герметизируемую полость.

Можно выделить следующие преимущества WLM технологии [111]:

- Отсутствие высокотемпературных процессов (200°C – 275°C);
- Отсутствие высоких требований к плоскостности и рельефу подложки;

- Отсутствие уплотнительных колец;
- Чрезвычайно малый объем полости;
- Не требует совмещения двух подложек;
- Отсутствие нестандартных для технологии МЭМС процессов;
- Существенное увеличение допустимого числа приборов на подложке;
- Обеспечивает у уменьшение массогабаритных параметров МЭМС прибора;
- Низкие вносимые потери (0.04 dB на частоте 35 GHz);
- Отсутствие дополнительных паразитных параметров;
- Простота проектирования.

На рисунке 1.62 приведено СЭМ-изображение емкостного СВЧ-датчика, на поверхности которого осажден полимерный жертвенный слой толщиной 8 мкм.

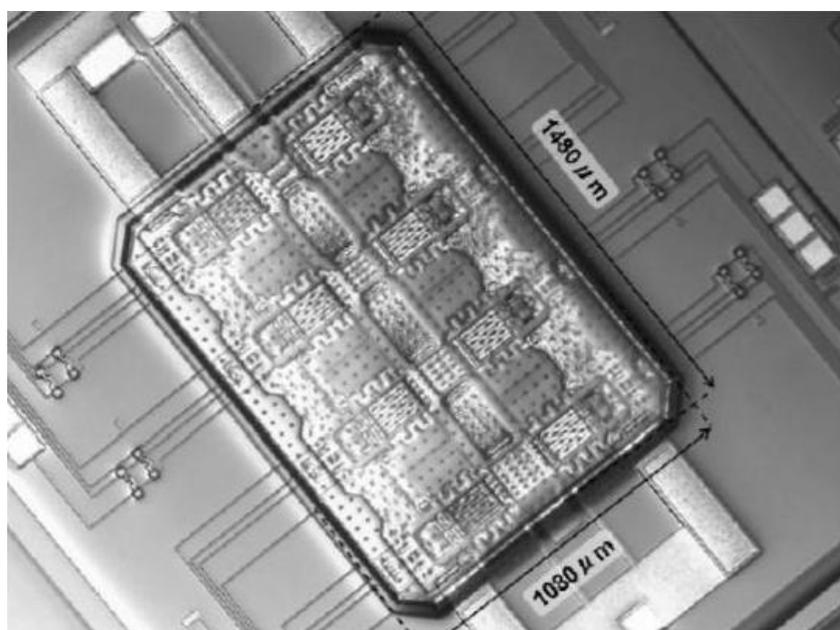


Рисунок 1.62 – СЭМ-изображение емкостного СВЧ-датчика, на поверхности которого осажден полимерный жертвенный слой толщиной 8 мкм

Как видно из рисунка, на основе данной технологии возможно получение корпуса с площадью более 1 мм².

1.4.3.5 Герметизация с помощью лазерного оплавления

Данный метод является вариацией тонкопленочной технологии. Главным отличием здесь выступает метод заполнения отверстий в каркасном слое. На поверхности опорного жертвенного слоя при помощи ионного распыления сформирован каркасный слой нитрида кремния толщиной около 1 мкм. В каркасном слое выполнены множественные сквозные отверстия диаметром около 1 мкм. На поверхности каркасного слоя методом ионного

распыления осаждается пленка меди толщиной 1 мкм. С помощью эксимерного лазера с длиной волны около 308 нм, энергией импульса 500 мДж и площади сфокусированного на поверхности пятна 5 мм на 5 мм происходит оплавление медной пленки, что приводит к заполнению отверстий и герметизации полости [112]. Структура МЭМ переключателя после осаждения опорного жертвенного слоя приведена на рисунке 1.63.

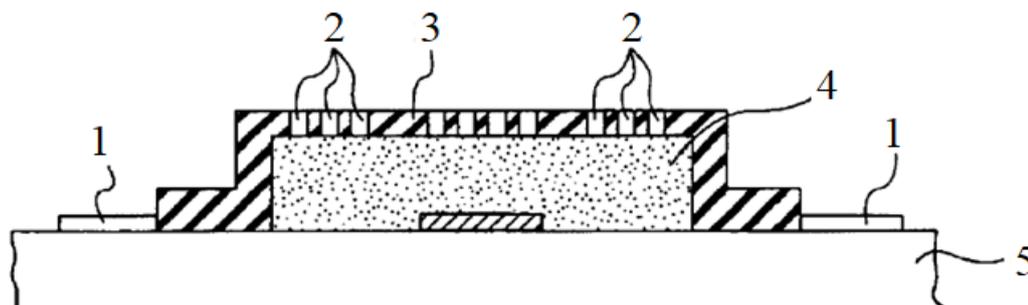


Рисунок 1.63– Структура МЭМ переключателя после осаждения опорного жертвенного и каркасного слоя с множественными сквозными отверстиями:

- 1 – линии передач; 2 - сквозные отверстия; 3 - каркасный слой;
4 – жертвенный слой; 5 – подложка.

На рисунке 1.64 приведена структура МЭМ переключателя с герметизированным корпусом.

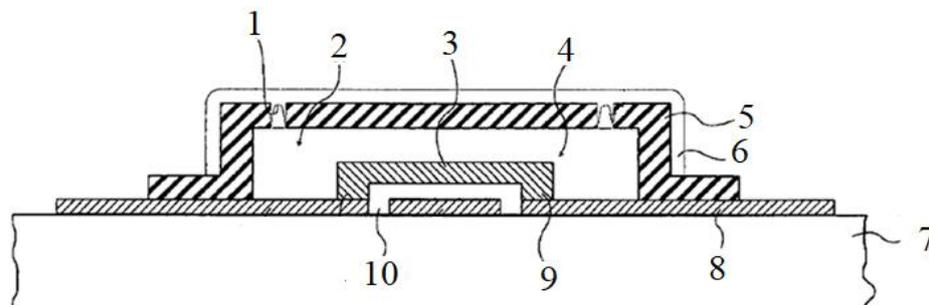


Рисунок 1.64 – Структура МЭМ переключателя с герметизированным корпусом:

- 1 – герметизированные отверстия; 2 – свободное пространство;
3 - мембрана; 4 – МЭМС-переключатель; 5 – каркасный слой;
6 – медная пленка; 7 – подложка; 8 – линии передач

1.4.3.6 Корпусирование МЭМ структур в объеме кремниевой пластины

Для МЭМ структур, выполненных в объеме монокристаллического кремния применяется вариант тонкопленочного корпусирования с использованием множественных жертвенных слоев [113]. Основные технологические операции данного метода корпусировки проиллюстрированы на рисунках 1.65 и 1.66.

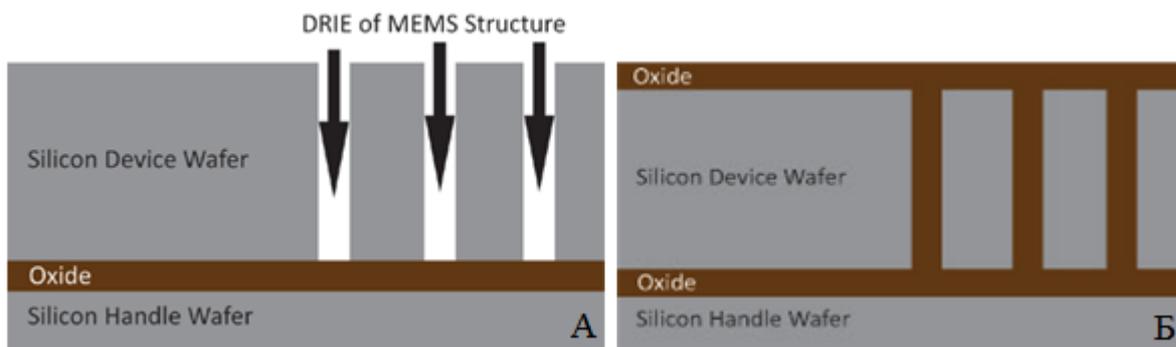


Рисунок 1.65 – Травление МЭМ структуры в объеме кремния (А) и осаждение жертвенного слоя (Б)

На поверхности полученной структуры осаждается слой поликремния, в котором при помощи газофазного травления (HF/XeF_2) удаляются жертвенные слои, окружающие МЭМ структуру.

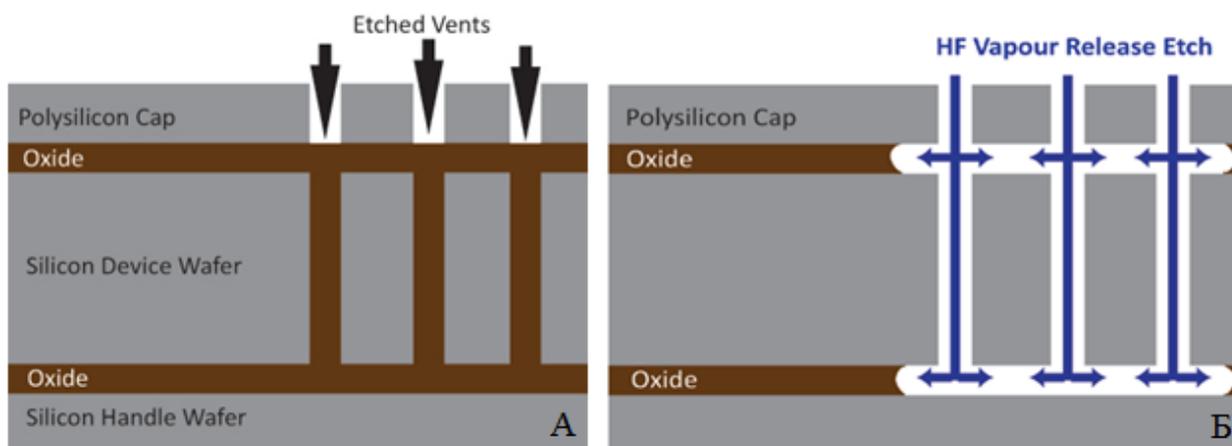


Рисунок 1.66 – Осаждение поликремния, травление отверстий (А) и удаление жертвенных слоев вокруг МЭМ структуры (Б)

Полученные отверстия герметизируются осаждением пленки поликремния, нитрида или оксида кремния, полученных методами эпитаксии или осаждения из газовой фазы при пониженном давлении (LPCVD).

1.4.3.7 Корпусирование МЭМС с применением термопластичных материалов

Отдельного внимания заслуживает метод корпусирования МЭМС на основе пленок карбида кремния [114], который позволяет получить каркасный слой повышенной жесткости, что особенно актуально при производстве вакуумных МЭМ приборов. Авторы приводят подробное описание технологического процесса корпусировки, основные этапы которого изображены на рисунке 1.67.

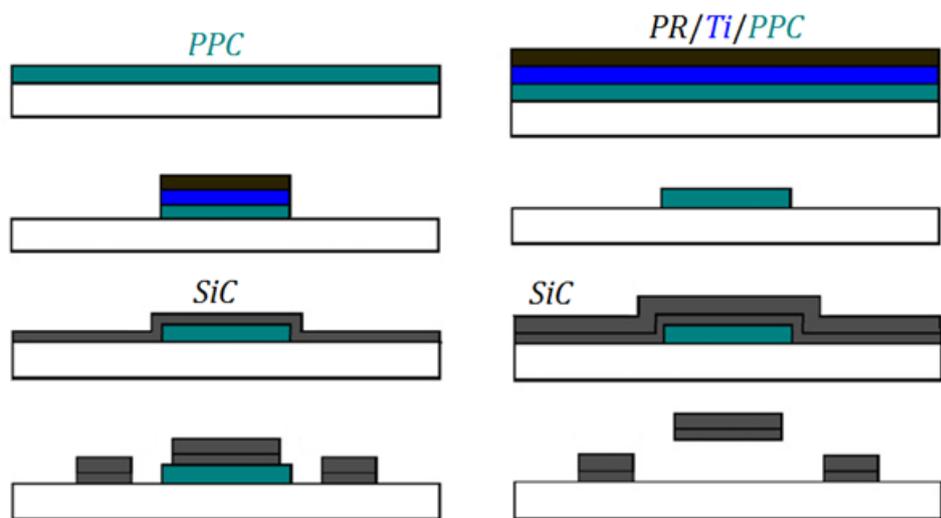


Рисунок 1.67 – Схематичное изображение процесса формирования каркасной структуры

На первом этапе тонкопленочной технологии корпусировки МЭМС формируют каркасный слой корпуса на предварительно осажденном жертвенном слое. Для облегчения травления жертвенного слоя методами сухого или жидкостного травления в каркасном слое вскрываются окна. Время полного вытравливания жертвенного слоя зависит от количества отверстий, их размера и расположения. Данный этап значительно затрудняет технологию производства МЭМС [115]. Несмотря на то, что жидкостные травители обладают большей скоростью, их применение может вызвать залипание как МЭМ прибора, так и корпуса. Для предотвращения попадания герметизирующего слоя на функциональные элементы МЭМС, технологические отверстия в каркасном слое должны достаточно быть малых размеров и/или находиться от них на значительном расстоянии. Данные ограничения также приводят к увеличению длительности процесса травления жертвенного слоя.

Альтернативные методы не требуют формирования технологических отверстий за счет использования пористых материалов. Каркасная структура в этом случае выполняется достаточно тонкой и требует слоя дополнительной механической поддержки [116]. Также известны работы, в которых толщина каркасной структуры достаточна велика и механической поддержки не требует. Данный подход заключается в электрохимическом травлении проводящего жертвенного слоя через пористую мембрану. Электрический контакт к мембране при этом подводится через подложку, что не позволяет интегрировать данный метод в технологию GaAs СВЧ МИС. Процесс электрохимического травления в HF жертвенного слоя PSG через мембрану пористого поликремния проиллюстрирован на рисунке 1.67.

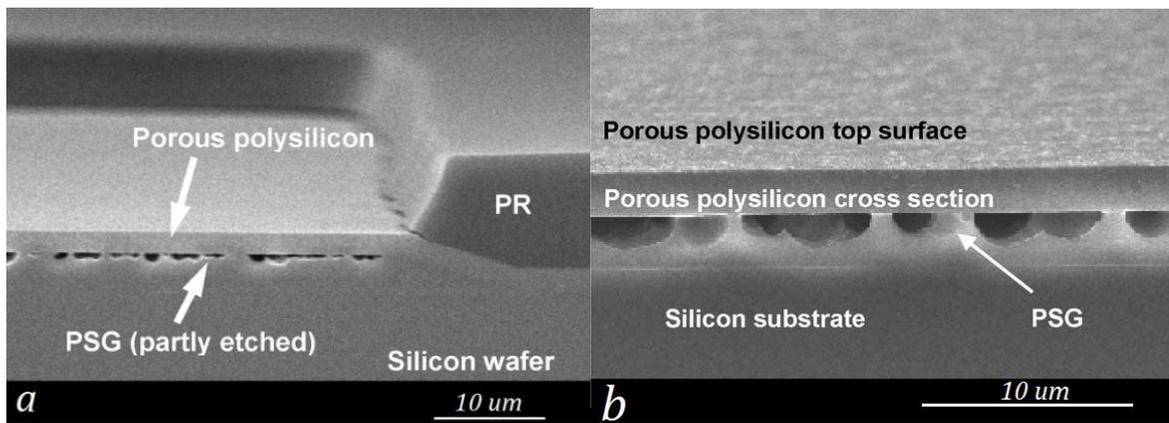


Рисунок 1.67– Электрохимическое травление PSG в HF через слой Poly-Si

С недавнего времени в методах тонкопленочной WLP корпусировке МЭМС в качестве жертвенных слоев получили применение полимерные материалы, разлагающиеся под действием температуры. Данные полимеры разлагаются при относительно низких температурах, а продуктами их распада являются летучие газы, которые проникая через газопроницаемый каркасный слой образуют полость в корпусе МЭМС. Поскольку данный процесс является температурно-активируемым и не требует дополнительных химических реагентов, удаления жертвенного слоя протекает с высокой скоростью и в полном объеме.

В описанной выше технологии корпусировки МЭМС каркасный слой выполняется из газопроницаемого материала, осаждение и сушка которого производится при температуре ниже температуры разложения жертвенного полимера. Стоит отметить, что вследствие низких значений модуля Юнга и температуры стеклования полимерных материалов подобные каркасные структуры на этапе разложения жертвенного слоя подвержены деформации. К тому же зачастую возникают технологические проблемы, связанные с низкой селективностью растворителей к полимерам каркасного и жертвенного слоев. Решением этой проблемы может быть осаждение методом PECVD тонкой оксидной пленки при 100°C под слоем полимера каркасного слоя. Оксидный слой увеличивает механическую прочность корпуса и выступает в качестве химического барьера [117]. Кроме того, осаждение герметизирующего слоя, как правило, производится при пониженном давлении. А увеличение разности внутреннего и атмосферного давлений приводит к появлению значительных вертикальных деформаций, которые отрицательно сказываются на характеристиках МЭМС. Значительно снизить влияние подобных деформаций возможно при помощи оптимизации геометрических размеров корпуса и толщины его стенок.

Альтернативный и наиболее приемлемый метод корпусировки заключается в сочетании термопластичного жертвенного слоя и жесткой каркасной структуры. Ненапряжен-

ные пленки керамического оксида алюминия (Al_2O_3) осаждаются методом ионного распыления поверх жертвенного слоя полипропилен карбоната (PPC) при температуре ниже температуры разложения PPC (200°C). Каркасный слой оксида алюминия, после формирования в нем отверстий и удаления жертвенного слоя PPC обеспечивают высокую структурную надежность корпуса благодаря превосходным механическим свойствам. Модуль Юнга низкотемпературной керамической пленки оксида алюминия (Al_2O_3) находится в диапазоне от 345 до 409 ГПа [75]. В качестве материала каркасного слоя могут быть также использованы такие керамические материалы как карбид германия (GeC) и SiC, осажденные методом PECVD [118, 119], однако их использование затрудняют высокие температуры их осаждения, которые значительно превышают 300°C . Структура WLP корпуса на основе SiC представлена на рисунке 1.68.

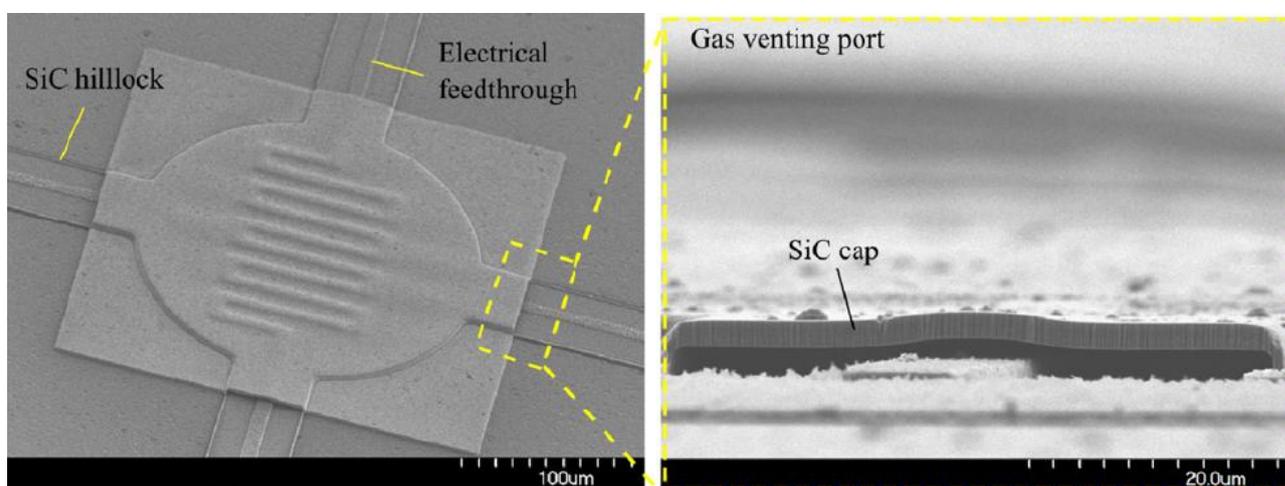


Рисунок 1.68– Структура WLP корпуса на основе SiC

Значение модуля Юнга PECVD-пленок нитрида кремния и других их низкотемпературных аналогов, согласно литературным данным, значительно падает при снижении температуры их осаждения. Например, модуль Юнга PECVD-пленки нитрида кремния, осажденного при 100°C составляет 83 ГПа, что составляет 43% от его значения для пленки, полученной при 300°C . Температурный режим предлагаемой в работе технологии, сочетающей Al_2O_3 и PPC в качестве основных материалов тонкопленочного корпуса МЭМС, позволяет использовать ее в производстве систем на кристалле, включающих интегральные схемы. Схематичное изображение процесса корпусирования МЭМС-датчика Pirani приведено на рисунках 1.69 и 1.70.

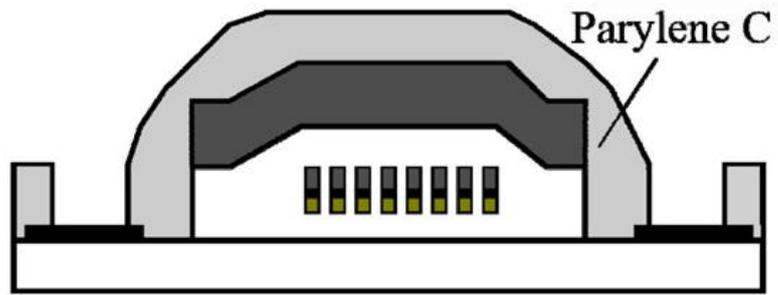


Рисунок 1.69 – Изображение герметизированной структуры Pirani

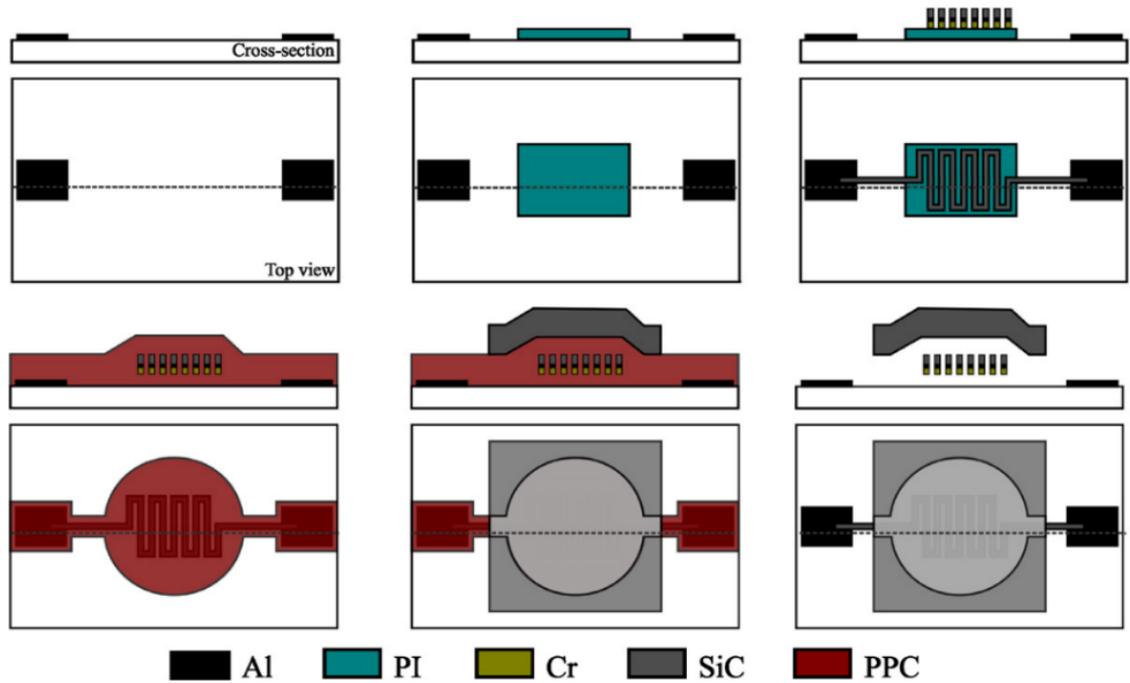


Рисунок 1.70 – Основные этапы процесса корпусирования

МЭМС-датчика Pirani

Структура пленок PPC (a) и SiC (b) после оптимизации процесса осаждения приведена на рисунке 1.71.

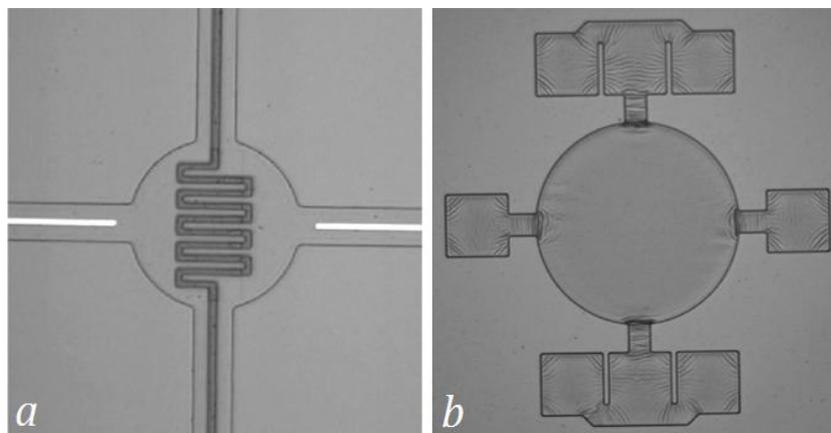


Рисунок 1.71 – Структура пленок PPC (a) и SiC (b) после оптимизации процесса осаждения

Микрофотографии корпусов, полученных по описанной технологии, приведены на рисунке 1.72.

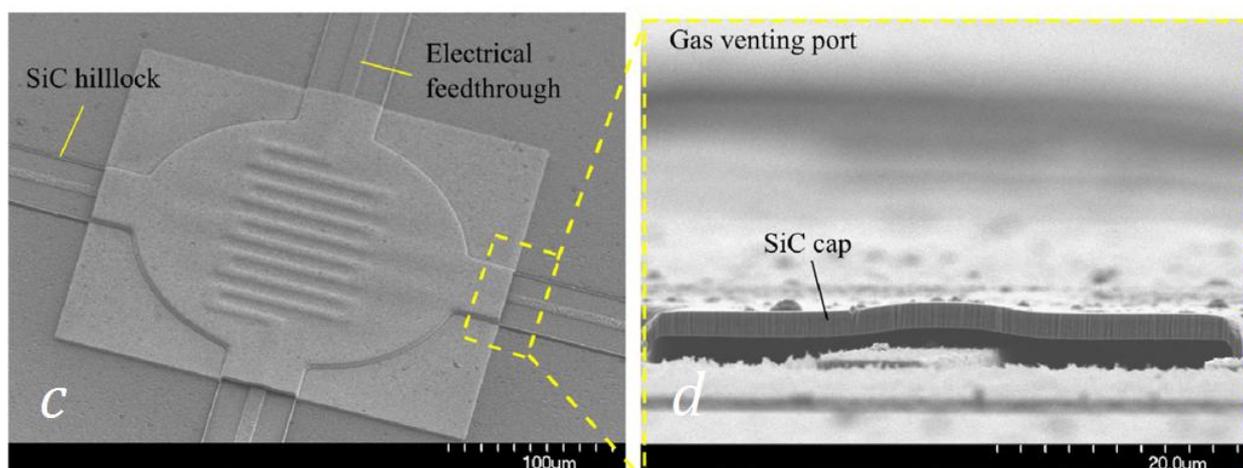


Рисунок 1.72 – Изображение каркасной SiC мембраны (c) и отверстия для выхода продуктов распада PPC (d)

1.4.3.8 Корпусирование МЭМС методом электрохимического осаждения

Данная технология позволяет получить корпус размерами более 800×800 мкм при толщине каркасной металлической структуры около 40 мкм. К достоинству данной технологии можно отнести низкую температуру технологических процессов (<250°C) [120]. Основные этапы технологического процесса проиллюстрированы на рисунке 1.73.

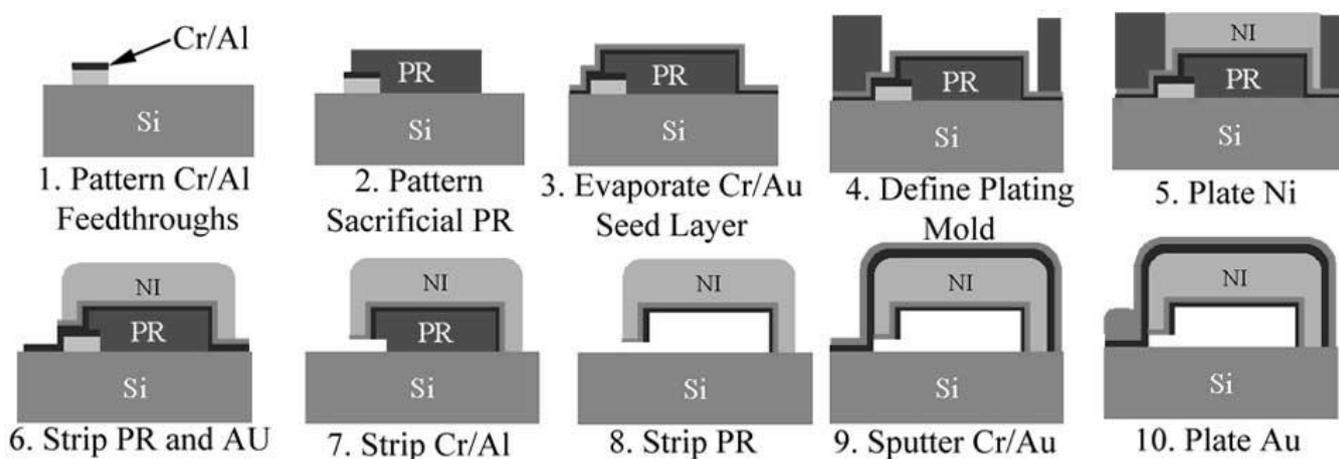


Рисунок 1.73– Схематическое изображение процесса формирования вакуумного корпуса на основе пленки никеля

На первом этапе формируется жертвенный слой алюминия толщиной 150 нм, поверх которого осаждается защитный слой хрома толщиной 30 нм. Жертвенный слой фоторезиста осаждается таким образом, чтобы после селективного удаления пленки Cr/Al образовался полый канал. На поверхности жертвенного слоя осаждают затравочный слой Cr/Au и формируют фоторезистивную маску для электроосаждения никелевого каркасного слоя. После осаждения никеля удаляют жертвенные слои Cr/Al, открывая тем самым

доступ к жертвенному слою резиста. Полученная никелевая капсула герметизируется методом магнетронного распыления пленки Cr/Au.

1.4.4 МЭМС на основе Si

1.4.4.1 Особенности использования карбида кремния в качестве материала подвижного элемента

Карбид кремния достаточно широко известен за счет своей стойкости в условиях жесткой и агрессивной внешней среды (высокие температуры, радиация, повышенный износ и т.д.). Его отличные механические свойства обеспечивают высокий потенциал использования в качестве материала подвижного микромеханического элемента [121]. Так, к примеру, присущие внутренние напряжения и жесткость пленки карбида кремния, позволяют создавать микромостиковые структуры устойчивые к провисанию. Более того, химическая инертность делает подвижные элементы на карбиде кремния очень устойчивым к залипанию и уже отпадает необходимость в дополнительном изоляционном слое между линией передачи и кантилевером [122].

В сравнении с традиционно используемыми материалами подвижных элементов микромеханических ключей (рисунок 1.74), карбид кремния обладает следующими достоинствами:

- высокое значение модуля упругости и, как следствие, повышенная жесткость конструкции;
- низкая плотность (по сравнению с металлами) обеспечивает высокую резонансную частоту конструкции и, как следствие, высокое быстродействие;
- высокие значения теплопроводности и температуры Дебая позволяют значительно расширить диапазон рабочих температур.

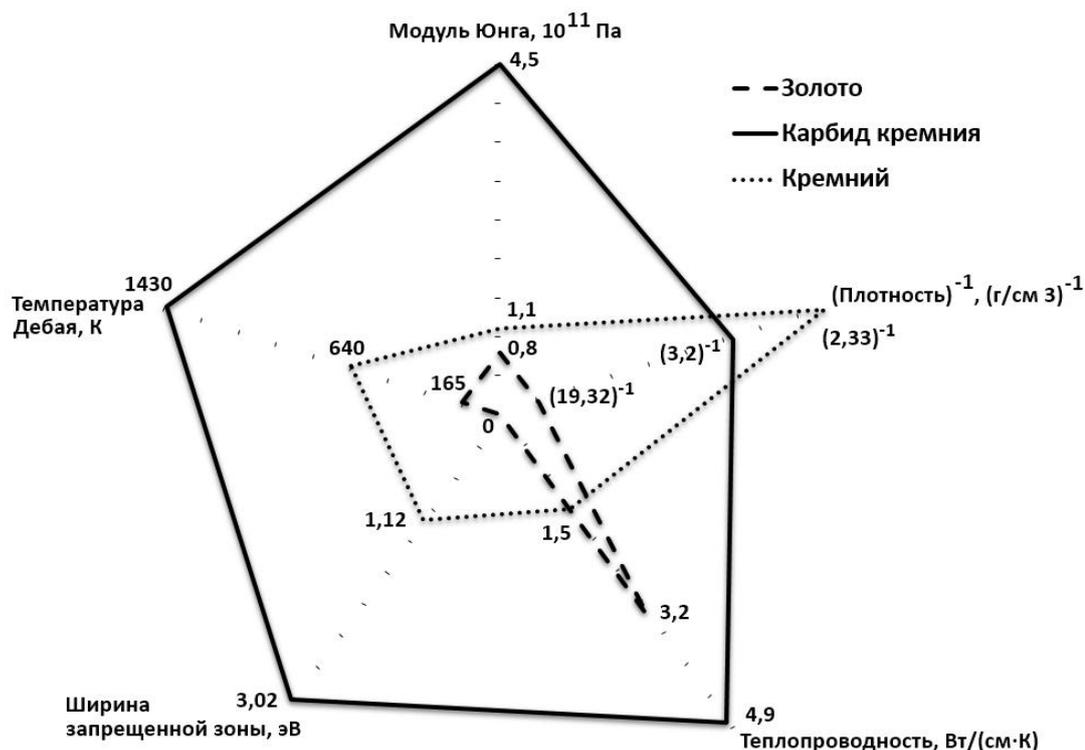


Рисунок 1.74– Сравнение основных свойств карбида кремния, золота и кремния, как базовых материалов подвижного элемента микромеханического ключа

В Таблице 1.4 представлены значения электромеханических параметров микромеханического ключа с подвижным элементом типовой конструкции на основе пленок различных материалов. Так, при использовании карбида кремния значение критерия оптимизации электромеханических параметров в 6 раз выше, чем при использовании золота. Стоит отметить, что у кремния плотность материала ниже, чем у карбида кремния и соотношение электромеханических параметров выше. Однако, за счет высокого значения модуля упругости пленки карбида кремния появляется возможность уменьшения толщины конструкции при сохранении жесткости.

Таблица 1.4 – Электромеханические параметры типовой конструкции подвижного элемента на основе различных материалов

	Численное моделирование в ПО COMSOL Multiphysics			Аналитический расчет		
	SiC	Si	Au	SiC	Si	Au
Критическое напряжение включения (В)	10,6	5	3,2	11,7	5,6	3,6

Продолжение таблицы 1.4

Время переключения (мкс)	15,8	28,6	126,6	15,4	27,4	123,5
Критерий оптимизации, 10^{-5} ($\text{В}^{-2} \cdot \text{мкс}^{-2}$)	3,6	4,9	0,6	3,1	4,3	0,5

Карбид кремния кристаллизуется более чем в 100 модификациях с различной симметрией кристаллов, но одинаковой стехиометрией. Политипную структуру можно представить, как комбинацию гексагональных и кубических бислоев. Структура 2Н состоит только из гексагональных, тогда как 3С только из кубических. Гексагональность политипа определяется долей гексагональных слоев в структуре политипа. Среди известных политипов, кубический (3С) и два гексагональных (4Н, 6Н) наиболее подходят для приложений. Информация по упругим константам является общедоступной и опубликована в надежных источниках.

Было показано, что вязкость разрушения карбидокремниевых тонких пленок и структур микромеханики в 3-4 раза выше, чем для кремния [123]. Однако по значениям твердости, надежная информация отсутствует. Сообщается, что твердость по Кнупу составляет $2480 \text{ кг} \cdot \text{мм}^{-2}$ и $1830 \text{ кг} \cdot \text{мм}^{-2}$ для 3С и 6Н политипов соответственно, а микротвердость для 6Н составляет 22,9 ГПа и 25 ГПа. Значения модуля упругости варьируются от 380 до 700 ГПа для 3С политипа [121]. Анизотропия в кубическом кристалле определяется $2C_{44}/(C_{11} - C_{12})$. Расчетное значение коэффициента анизотропии лежит в диапазоне от 1,6 до 2,2, т.е. модуль упругости является анизотропной величиной.

Следовательно, модуль упругости поликристаллических пленок карбида кремния ниже максимального значения монокристалла, что было экспериментально подтверждено [123]. Температурный коэффициент модуля упругости составляет величину порядка $-0,02 \text{ ГПа} \cdot \text{К}^{-1}$ вплоть до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ и не зависит от политипа.

Микромеханические устройства изготавливаются как на основе монокристаллических подложек карбида кремния, так и с использованием тонких слоев. В случае создания микромеханической структуры с использованием монокристаллической подложки используется технология объемной микромеханики. Изготовление устройства непосредственно из материала подложки имеет существенное преимущество за счет схожести его механических и электрических свойств со свойствами исходной подложки. В результате не требуется проводить оптимизацию материала по градиентам напряжений и деформаций.

Однако, с точки зрения конечного устройства, использование объемной микромеханики достаточно сильно ограничивает спектр конструкций, которые могут быть реализованы. Таким образом, большинство карбидокремниевых устройств изготавливаются с использованием методов поверхностной микромеханики.

В технологии поверхностной микромеханики, структурный слой карбида кремния обычно осаждается на слой другого материала (жертвенный или изолирующий слой), что приводит к отклонению как электрических, так и механических свойств по сравнению с параметрами подложки. При современном состоянии технологии невозможно получить монокристаллический SiC с электрическими и механическими свойствами, оптимизированными для микромеханики, на широко используемых жертвенных или изолирующих слоях: поликремний, диоксид кремния и нитрид кремния. Однако, микромеханические устройства, в сравнении с электронными компонентами, не предъявляют таких жестких требований к электрическим характеристикам. Так, например, поликристаллический карбид кремния может быть получен с механическими характеристиками сопоставимыми с монокристаллом и иметь электрические характеристики достаточные для применений в приложениях микромеханики. По состоянию на сегодняшний день большинство карбидокремниевых микромеханических устройств изготавливаются с использованием поликристаллического карбида кремния [124]. Также используется и аморфный карбид кремния, хотя в основном электроизолирующий [125].

Ключевыми проблемами в технологии тонкопленочных аморфных и поликристаллических пленок карбида кремния являются остаточные напряжения и градиент напряжений в осажденных пленках. Известно много факторов приводящих к возникновению остаточных напряжений в тонких пленках [126].

Пленки осаждаются при температурах, значительно превышающих температуру окружающей среды, и разница в коэффициентах теплового расширения между пленкой и нижележащими слоями приводит к образованию напряжений при обратном охлаждении до комнатной температуры. Кристаллические дефекты, включения примесей, рост и ориентация зерен также являются источниками напряжения в пленке. Когда микромеханическая структура высвобождается, релаксация остаточных напряжений может привести к деформации структурного слоя. В предельных случаях тонкая пленка может растрескиваться или даже отслаиваться от нижележащих слоев.

В устройствах микромеханики обычно используются значительно более толстые пленки, чем в электронных компонентах. Это еще больше усложняет процесс создания пленки с низкими напряжениями и малыми градиентами. Поэтому для изготовления мик-

ромеханических структур требуются процессы, в которых можно с высокой степенью точности контролировать механические характеристики осаждаемых тонких пленок.

1.4.4.2 Технология изготовления карбидокремниевых микромеханических ключей на подложке кремния

Основной композицией «подвижный элемент/жертвенный слой» является «карбид кремния/нитрид алюминия». К композиции предъявляются следующие требования:

- совместимость кристаллических решеток;
- термомеханическая совместимость;
- устойчивость материала в условиях воздействия сильных электрических и магнитных полей, а также высокой температуры;
- способность восстанавливать исходную форму при механических или термических воздействиях разной длительности и цикличности.

Материалы композиции и подложка обладают хорошей кристаллографической совместимостью. Незначительная разница в коэффициентах теплового расширения обеспечивает низкий вклад этого фактора в формирование остаточных механических напряжений. Селективность травления нитрида алюминия, позволяет использовать его в качестве жертвенного слоя при создании микромеханических подвижных структур.

В качестве исходной структуры для создания микромеханического ключа по разработанной технологии берется стандартная пластина кремния диаметром 100 мм ориентацией (100). Перед последующими операциями пластина подвергается очистке с целью удалить органические и механические загрязнения. Для этого используется последовательный двухстадийный процесс – сначала в перекисносерном растворе, а затем в растворе аммиака, перекиси водорода и деионизованной воды.

Далее, на поверхность пластины с двух сторон наносятся защитно-изолирующие слои SiO_2 . Сначала термическое окисление до 0,2 мкм, а затем на лицевой стороне плазмохимическое окисление до 1,6 мкм (рисунок 1.75, этап 1).

Затем, на лицевую поверхность подложки наносится композиция из трех слоев металла: Cr\Ni\V (рисунок 1.75, этап 2).

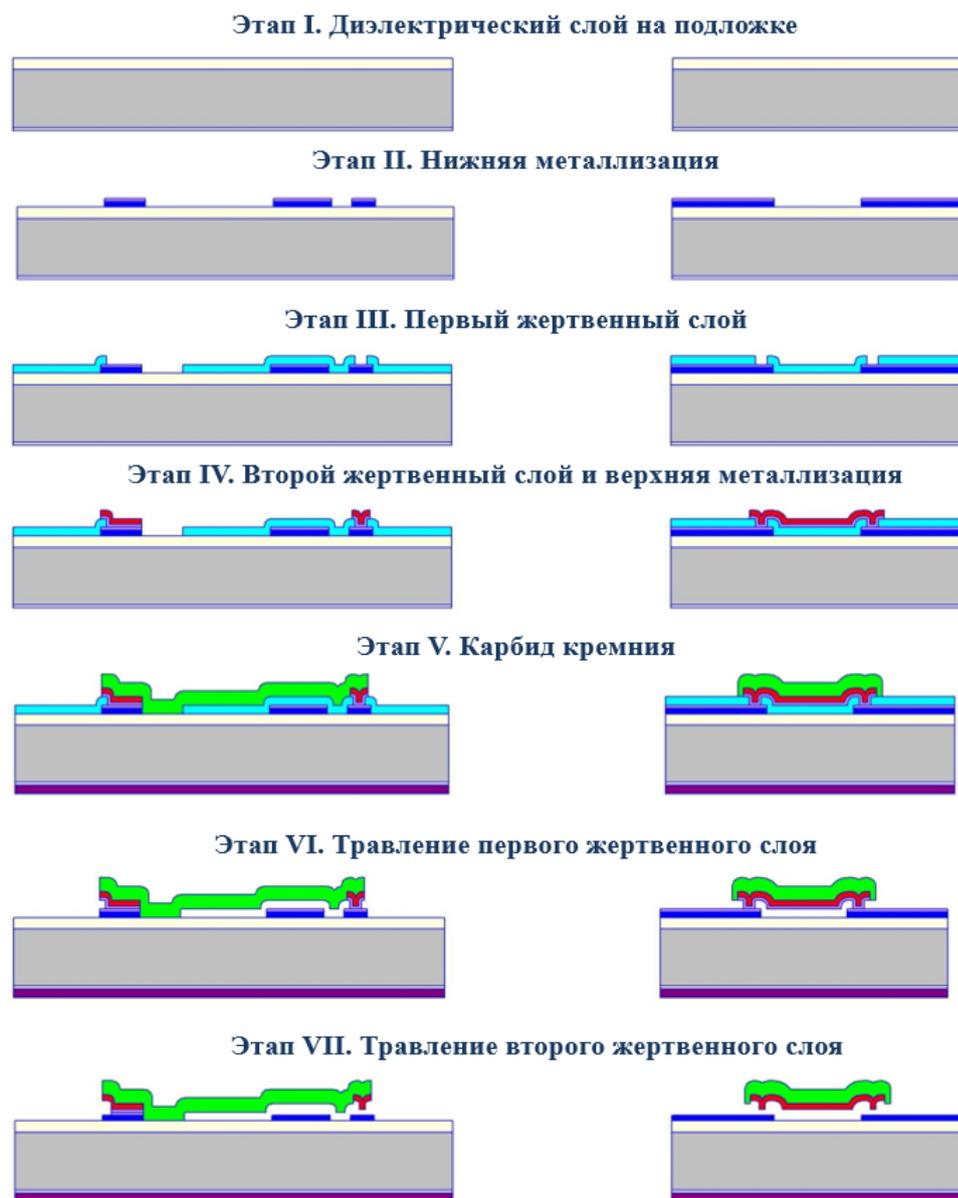


Рисунок 1.75 – Последовательность технологических операций изготовления карбидокремниевых ключей на подложке кремния

При выборе материала металлизации необходимо обеспечить получение тонкого слоя металлизации с хорошей проводимостью, хорошую адгезию, термостойкость и химическую совместимость с подложкой и другими слоями композиции. Слой Cr обеспечивает адгезию никеля к подложке, никель обеспечивает проводимость, ванадий наносится для обеспечения адгезии нитрида алюминия к поверхности никеля. Ванадий удаляется на завершающем этапе технологического процесса, обеспечивая разделение металлизации нижнего и верхнего электродов.

Необходимо отметить, что в результате данного технологического этапа была сформирована топология слоя нижней металлизации с достаточной степенью точности. В

ходе процесса травления наблюдался небольшой боковой подтрав порядка толщины металлизации, который удалось скомпенсировать за счет увеличения ширины дорожек.

На следующем этапе (рисунок 1.75, этап 3) наносится жертвенный слой нитрида алюминия. Метод получения эпитаксиального слоя AlN - магнетронное распыление алюминиевой мишени в среде аргона и азота (50 об. %), ток разряда 0,7 А, температура 300 – 450 °С, при этом скорость роста около 1 мкм/ч. Далее проводится фотолитография для формирования окон в слое AlN в области якоря и контактов к линии передачи. Травление AlN осуществляется в горячей ортофосфорной кислоте или в растворе КОН (33 %). В ходе травления AlN в горячей ортофосфорной кислоте наблюдалось отслаивание жертвенного слоя. В качестве решения данной проблемы было предложено:

- провести предварительную ионную очистку пластины;
- повысить температуру подложки;
- использовать маску из подслоя титана.

Далее наносится трехслойная композиция металлов для формирования верхнего электрода: V\Ni\Cr (рисунок 1.75, этап 4). Затем проводится фотолитография с последующим жидкостным травлением для формирования топологии верхнего электрода.

На пятом этапе наносится слой карбида кремния магнетронным распылением (рисунок 1.75, этап 5). В результате формируются пленки карбида кремния кубического полупроводника n-типа с удельным сопротивлением порядка 10 Ом·см.

Для формирования рисунка подвижного элемента микромеханического ключа проводится фотолитография с последующим реактивным ионно-плазменным травлением (РИПТ) в плазме SF₆ на установке ВЧ магнетронного травления. Маской при РИПТ служит слой алюминия, нанесенный поверх слоя SiC. Для SiC, характеризующегося большими энергиями связи кремния и углерода, актуальность приобретает РИПТ со значительным вкладом физического распыления. Процесс ионной бомбардировки значительно активизирует протекание реакций в приповерхностной области.

Основными задачами сухого травления является достижение высоких скоростей травления и селективности, большого значения отношения глубины рельефа к боковому подтраву. Для обеспечения текущего контроля глубины травления используется метод измерения коэффициента отражения зондирующего излучения от поверхности обрабатываемой пластины. Слой AlN выступает как «стоп-слой», он не травится во фторсодержащей плазме.

Далее проводится жидкостное травление жертвенных слоев (рисунок 1.75, этапы 6 и 7): нитрида алюминия в концентрированной ортофосфорной кислоте при температуре 85 °С и ванадия в растворе перекиси водорода.

К преимуществам данной технологии можно отнести следующее:

– При использовании двух жертвенных слоев появляется возможность создания зазора разной величины между управляющими электродами и в области контакта. При этом управляющие электроды не касаются друг друга и снижается вероятность их залипания.

– Второй жертвенный слой не требует отдельной операции фотолитографии. Во всей технологии всего 4 операции фотолитографии.

В данной технологии также присутствует ряд недостатков:

– Используемая кремниевая подложка требует нанесения дополнительного диэлектрического слоя на ее поверхность. Данный слой должен быть достаточно толстым для того, чтобы добиться согласования линии передач на 50 Ом. Однако, в результате обработки данного технологического этапа было установлено, что при формировании слоя более 1,6 мкм наблюдается отслаивание диэлектрика от подложки.

– Для вытравливания жертвенных слоев используются разные травители, поэтому необходимо использовать две последовательных операции жидкого травления. В процессе вытравливания второго жертвенного слоя наблюдалось явление залипания многих микро-механических подвижных структур к подложке. Вытеснение воды при помощи петролейного эфира не позволило полностью решить эту проблему.

– Контакт Ni-Ni обеспечивает контактное сопротивление порядка нескольких десятков Ом, что приводит к большим ВЧ потерям.

Очевидно, что технология изготовления карбидокремниевых ключей на подложке кремния требует значительных улучшений. Однако, при этом желательно не увеличивать количество операций фотолитографии и сохранить возможность создания зазора разного уровня в контактной области и между управляющими электродами [121].

1.4.5 Типы МЭМС для ИС

1.4.5.1 МЭМС ключи

Для создания микромеханических ключей в качестве исходного материала используют поликристаллический кремний. Такие ключи создают на основе технологии поверхностной микрообработки. Это дает возможность изготавливать их в одном технологическом процессе совместно с элементами интегральных схем.

По принципу действия микромеханические ключи подразделяются на электростатические, магнитные или электромагнитные.

Микромеханические электростатические ключи имеют высокое напряжение срабатывания (более 5 В), что ограничивает сферу их использования. Широкое применение такие ключи находят в системах с невысокой скоростью переключения, где требуется достичь сверхнизкого энергопотребления вследствие отсутствия потребления тока в режиме ожидания. На рисунке 1.76 изображена структура МЭМС-ключа.

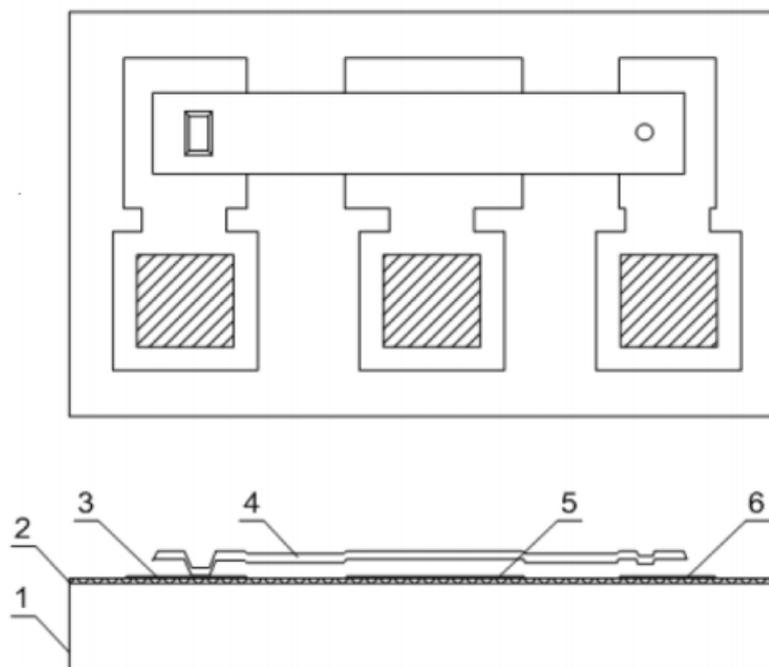


Рисунок 1.76 – Структура МЭМС-ключа:

- 1 – подложка; 2 – диэлектрик; 3 – исток;
- 4 – консольная балка; 5 – затвор; 6 – сток

В качестве основы для МЭМС-ключей, как правило, служит подложка 1 с нанесенным на нее тонким слоем диэлектрика 2. МЭМС-ключи с электростатической активацией в качестве подвижного элемента содержат так называемую консольную балку 4. Одним концом она жестко соединена с областью истока 3. Перемещение другого конца балки осуществляется за счет действия электростатической силы, вызываемой областью затвора 5. Когда балка отклоняется, возможен непосредственный контакт с областью стока 6.

Существует два режима работы МЭМС-ключа: нормальный и инверсный. При *нормальном* режиме работы область стока подключена к шине питания, а область истока – к шине нулевого потенциала. При отсутствии отклоняющего напряжения между областью затвора и консольной балкой последняя находится в исходном положении, и электрический контакт исток-сток отсутствует. Интегральный микромеханический ключ находится в разомкнутом состоянии. При подаче отклоняющего напряжения на область за-

твора относительно консольной балки между ними возникает электростатическая сила [127].

При *инверсном* режиме работы область истока подключена к шине питания, а область стока – к шине нулевого потенциала. При отсутствии отклоняющего напряжения между областью затвора и консольной балкой, соединенной с областью истока, возникает электростатическая сила, которая притягивает консольную балку к затвору. Это приводит к возникновению электрического контакта между истоком и стоком. Интегральный микромеханический ключ замкнут. При подаче отклоняющего напряжения между затвором и консольной балкой последняя возвращается в исходное положение. Микромеханический ключ находится в разомкнутом состоянии.

МЭМС-ключи с электростатической активацией имеют гистерезисную характеристику. Это связано с потерей стабильности механических структур, вызванной неконтролируемым электростатическим притяжением. Если конструкция микромеханического ключа позволяет балке переходить точку потери стабильности, то ключ замыкается и не размыкается до тех пор, пока отклоняющее напряжение не станет ниже порогового напряжения выключения, т.е. появляется гистерезис (рисунок 1.77) [128].

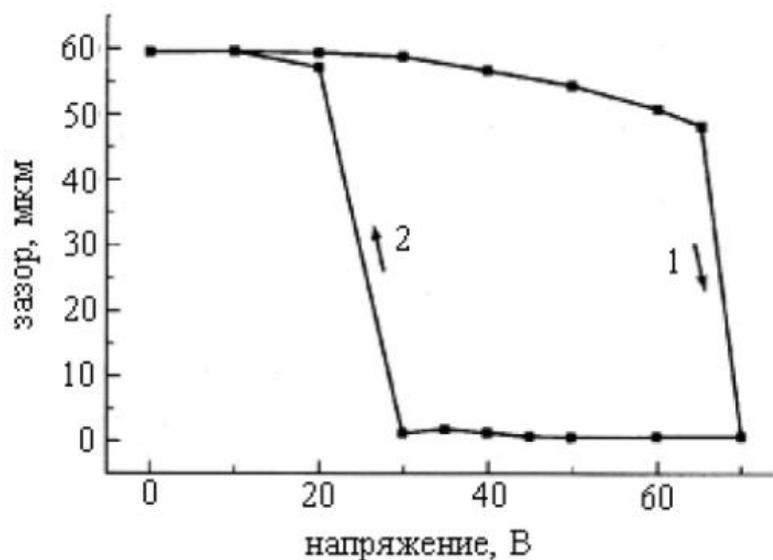


Рисунок 1.77 – Гистерезисная характеристика работы МЭМС-ключа

Избавиться от гистерезиса можно только, если микромеханический ключ будет замыкаться, до того, как консольная балка достигнет точки потери стабильности. При этом пороговые напряжения включения и выключения будут одинаковыми.

Одним из основных достоинств МЭМС-ключей является высокая степень изоляции в разомкнутом состоянии вследствие наличия воздушного зазора между стоком и концом балки. Поскольку микромеханические ключи имеют емкостную природу, то им для рабо-

ты не требуется непрерывная подача постоянного тока. Для переключения ключа в замкнутое или разомкнутое состояние необходима электростатическая энергия, равная $0,5 CU^2$. Таким образом, переключение микромеханического ключа определяется емкостью и прикладываемым напряжением.

При разработке микромеханических ключей необходимо учитывать следующие параметры:

1. Длительность переходных процессов – время, которое определяется от момента отрыва подвижного контакта от одного стационарного контакта до момента его соприкосновения с другим стационарным контактом.

2. Время переключения – время, определяемое от момента достижения управляющим напряжением уровня 50 % до момента перехода выходным сигналом уровня 90 % или 10 %.

3. Переходные процессы при коммутации – паразитные экспоненциально убывающие всплески напряжений во входных и/или выходных цепях ключа, вызванные изменением управляющего сигнала.

4. Коммутируемая мощность сигнала – характеристика, показывающая, насколько эффективно ключ пропускает сигнал.

5. Согласование входных/выходных цепей – подразумевает согласование импедансов. Нарушение согласования влечет за собой появление переотражений.

6. Ширина полосы пропускания – диапазон рабочих частот ключа, в котором он удовлетворяет заданным параметрам.

7. Потери, вносимые микромеханическими ключами – величина полезного сигнала (дБ), на которую он уменьшается в связи с различными паразитными эффектами. Определяются только для включенного состояния.

8. Развязка входа от выхода – определяет степень связи входных и выходных выводов в то время, когда ключ не находится в активном состоянии. Большее значение коэффициента развязки (дБ) говорит о лучшем качестве ключа.

9. Последовательное сопротивление – характеризует ключ как источник сопротивления во включенном состоянии. Высокое сопротивление ключа ведет к возникновению дополнительных потерь в схеме.

10. Напряжение срабатывания – уровень напряжения, необходимый для управления ключом.

11. Срок службы – время безотказной работы ключа.

12. Резонансная частота – собственная резонансная частота элементов ключа, ограничивающая максимальную скорость его переключения.

13. Согласование по амплитуде и фазе – параметры, которые особенно важно учитывать в многоканальных ключах.

При проектировании МЭМС-ключей необходимо учитывать такой эффект, как прилипание консольной балки к поверхности кристалла. В основе данного эффекта лежит действие микроскопических сил на поверхности контактов и, следовательно, этот эффект в основном зависит от морфологии поверхности контактов. Проблема залипания подвижных частей особенно остро стоит для металлических контактов.

Современные РЧ МЭМС-ключи (коммутаторы СВЧ-сигналов) (рисунок 1.78) могут быть контактными («металл – металл») или с емкостным замыканием цепи.

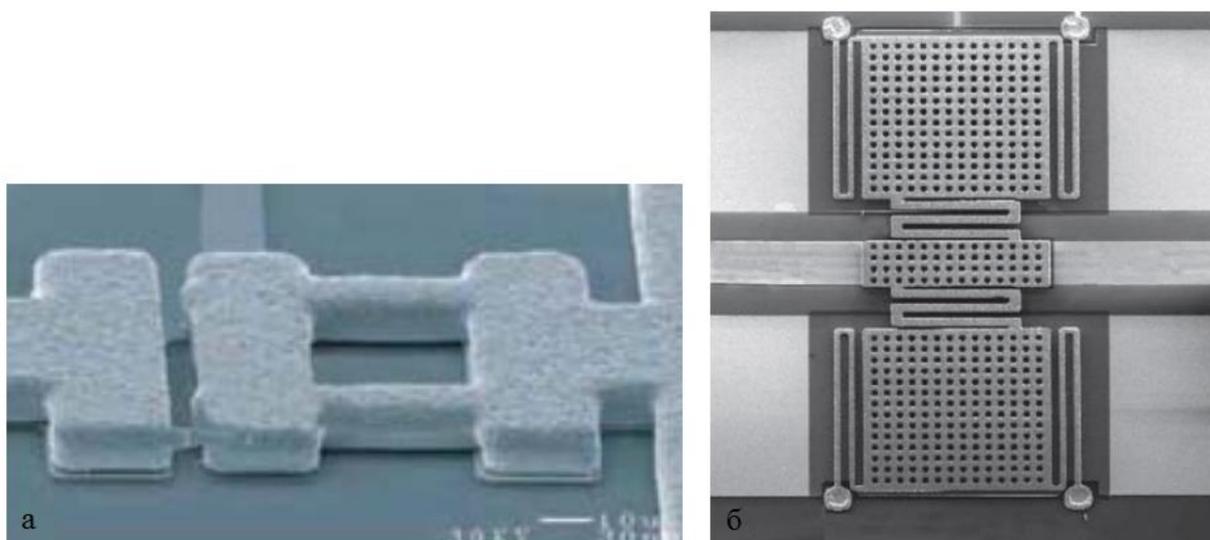


Рисунок 1.78– Микрофотографии ключей: а – контактного; б – емкостного

Новым классом контактных ключей для диапазона миллиметровых волн стали ключи с контактом типа «жидкость – металл». Диапазон частот ключей «металл – металл» составляет от нуля (DC) до 6 – 40 ГГц. Они более чувствительны к температурным и механическим (ударам и вибрациям) воздействиям, чем ключи с емкостным замыканием цепи. Частотный диапазон емкостных ключей составляет 6 – 120 ГГц. Ключи типа «жидкость – металл» рассчитаны на частоты 20 – 100 ГГц. Они отличаются малыми потерями в замкнутом состоянии (1,3 дБ на частоте 40 ГГц) и повышенной мощностью коммутируемого сигнала.

1.4.5.2 МЭМС конденсаторы

Для создания малогабаритных широкополосных СВЧ-схем необходимы сверхминиатюрные элементы с сосредоточенными параметрами, резонанс которых не наступает вплоть до субмиллиметрового диапазона длин волн [129]. К серийно выпускаемым изделиям подобного типа относятся МЭМС-конденсаторы и МЭМС-индуктивности с фиксированными или переключаемыми параметрами.

Емкость конденсаторов, как правило, изменяется в пределах от 1 до 20 пФ с шагом 1 или 2 пФ. В плавно управляемых конденсаторах регулировка емкости осуществляется за счет изменения либо ширины зазора, либо площади его гребенчатой структуры.

В перестраиваемом конденсаторе с электростатической регулировкой зазора нижний электрод закреплен на подложке, а подвешенный над ним верхний электрод толщиной 1 мкм поддерживается четырьмя микропружинами и может перемещаться по нормали к ней. Максимальный (исходный) зазор между фиксированным и подвижным электродами составляет 1,5 мкм. Его ширина регулируется за счет электростатических сил. При изменении управляющего напряжения от 0 до 5,5 В значение емкости меняется от 2,11 до 2,46 пФ. При отклонении верхнего электрода менее, чем на 1/3 от первоначального зазора между силами электростатического притяжения и упругости микропружин устанавливается равновесие. Поэтому диапазон плавной регулировки ширины зазора не превышает 2/3 от среднего значения.

В перестраиваемом МЭМС конденсаторе с гребенчатой структурой одна из гребенок стационарная, а вторая подвижная. При подаче управляющего напряжения электростатические силы заставляют подвижную гребенку перемещаться относительно неподвижной. В результате площадь перекрытия изменяется, а ширина зазора между гребенками остается неизменной. Такая структура перспективна для построения емкостных микропереключателей и перестраиваемых конденсаторов, работающих в диапазоне частот 2 – 45 ГГц. В перестраиваемом микроконденсаторе с такой структурой, разработанном в Калифорнийском университете в Сан-Диего, при изменении напряжения смещения в пределах 80 – 200 В значение емкости изменяется от 35 до 100 фФ. Основное достоинство гребенчатой структуры – возможность перестройки емкости в широких пределах.

Управляемые МЭМС конденсаторы необходимы для создания перестраиваемых частотных фильтров, управляемых напряжением генераторов (ГУН) в составе систем фазовой синхронизации и т.п. Использование для этого полупроводниковых компонентов (варикапов) приводит к существенному ограничению системы по допустимому уровню

мощности. Кроме того, эти компоненты не совместимы с технологией производства микросхем.

МЭМС-варакторы лишены подобных недостатков. Они могут быть выполнены в виде параллельно расположенных пластин с изменяемым расстоянием между ними; сегментов типа «бабочка», принимающих несколько угловых положений относительно оси; встречно-штыревой структуры с изменяемым перекрытием, в виде банка конденсаторов калиброванной емкости с МЭМС-ключами, управляемыми двоичным кодом. В первом случае верхняя пластина представляет собой пружину, расстояние между которой и нижней пластиной изменяется с помощью электростатических сил, вызванных приложенным к пластинам напряжением.

Так, компанией Raytheon разработана конструкция, в которой номинальная емкость пластин составляет 2,05 нФ, добротность на частоте 1 ГГц – 20, диапазон плавной перестройки емкости при изменении напряжения от 0 до 4 В – 150 %, частота собственного резонанса превышает 5 ГГц.

Во встречноштыревой структуре (рисунок 1.79) емкость регулируется путем изменения степени перекрытия элементов гребенчатой структуры в зависимости от приложенного к ним напряжения.

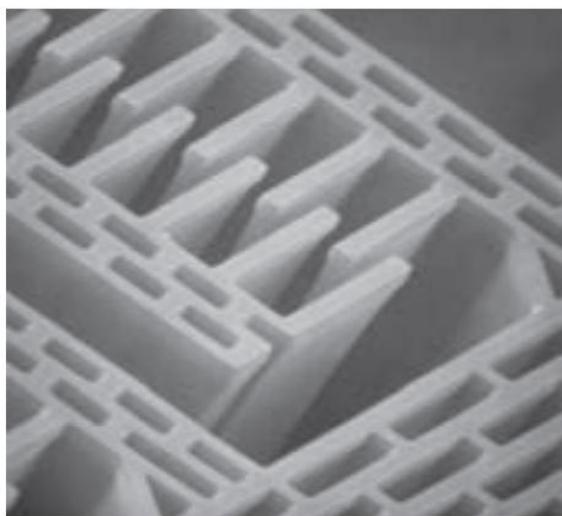


Рисунок 1.79– Микрофотография перестраиваемого МЭМС-конденсатора (диапазон перестройки $> 8:1$, емкость 1,5 – 2 пФ, добротность 30 – 150, управляющее напряжение – 6,4 В, частота собственного резонанса 6 ГГц)

Емкость варакторов этого типа составляет 1 – 6 пФ, добротность на частоте 500 МГц превышает 35, частота собственного резонанса – 5 ГГц, диапазон перестройки емко-

сти при изменении напряжения от 2 до 14 В – 200 %. Линейность такого конденсатора характеризуется уровнем PIP3 > 50 дБ·мВт.

Выпускаются серийно дискретно перестраиваемые конденсаторы, представляющие собой смонтированные в одном корпусе четыре секции емкостью 0,1 – 2 пФ каждая. С помощью управляющего кода секции включаются параллельно за время до 50 нс. Добротность Q такого конденсатора на частоте 2 ГГц превышает 100, резонансная частота – 5 ГГц. Дискретно перестраиваемые конденсаторы содержат преобразователь напряжения питания 5,5 В в необходимое для функционирования изделия напряжение.

1.4.5.3 МЭМС катушки индуктивности

Катушки индуктивности являются ключевыми элементами резонансных контуров, обеспечивающих, в частности, согласование импеданса сети, работу малошумящих усилителей и генераторов, управляемых напряжением (ГУН). На современном рынке представлены различные конструктивные варианты МЭМС-индуктивностей. Наиболее высокие значения добротности и резонансной частоты получены для объемного соленоида с ленточными витками в виде меандра со сторонами 30×30 мкм и высотой около 100 мкм. Интересна конструкция МЭМС-индуктивности, выполненная в виде тора диаметром около 100 мкм с 20-ю прямоугольными витками высотой 10 мкм. Качество подложки существенным образом влияет на добротность индуктивности QL и ее резонансную частоту $f_{рез}$. Для индуктивностей с воздушным зазором шириной 20 мкм измеренные значения добротности достигают 7 при резонансной частоте 18,6 ГГц. Для подобных узлов, изготовленных на высокоомной кремниевой подложке, добротность равна 20,2 при резонансной частоте 25,6 ГГц.

Управляемые МЭМС-индуктивности выполняются на основе двух параллельно включенных катушек. Одна из них размещена на неподвижной подложке, а другая – на термоуправляемом подвижном актюаторе. Диапазон изменения индуктивности в предварительных экспериментах составил примерно 13 % в полосе частот 2 – 5 ГГц.

МЭМС-индуктивности имеют примерно те же параметры (индуктивность, добротность и собственная резонансная частота), что и внешние навесные элементы. Добротность плоской катушки индуктивности Q_s , выполненной по технологии объемной микрообработки (рисунок 1.80), с частотой собственного резонанса от 6 до 18 ГГц лежит в пределах 6 – 28 при значении индуктивности порядка 1 нГн.

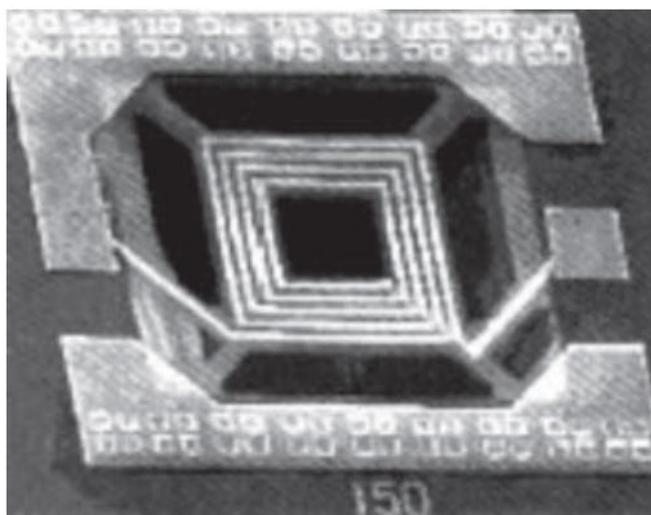


Рисунок 1.80 – Микрофотография МЭМС индуктивности плоской конструкции

С помощью технологии поверхностной микрообработки реализуются и катушки индуктивности, которые получаются в виде витков соленоида, возвышающихся над подложкой (рисунок 1.81).

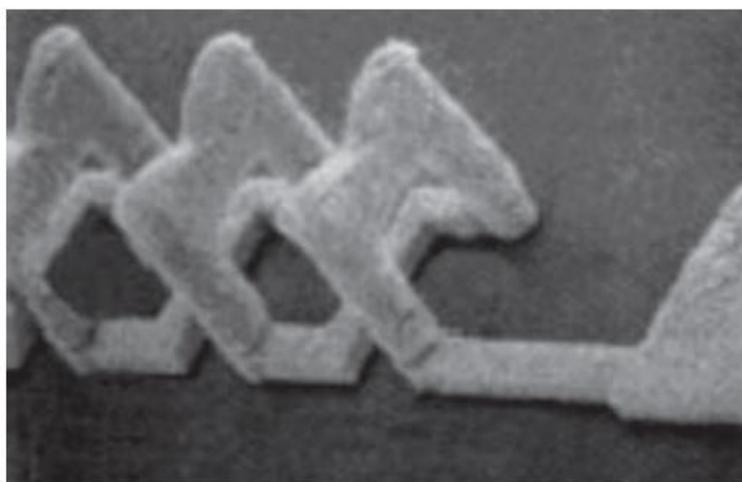


Рисунок 1.81– Микрофотография МЭМС индуктивности объемной конструкции

Увеличение коэффициента усиления, рассеяние мощности или наличие фазовых шумов в таких схемах приводит, в свою очередь, к необходимости объединения МЭМС катушек индуктивности на одном кристалле [112]. Наиболее ярким примером достижений, полученных в результате использования МЭМС катушек индуктивности, является разработка резонансного СВЧ-усилителя с комплементарным металлооксидным транзистором, проведенная Chang, Abidi и Gaitan.

1.4.5.4 МЭМС генераторы

МЭМС-технология применяется и для создания вибрирующих колебательных систем, используемых для формирования колебаний со стабильной частотой. Выделяют три группы генераторов, в которых МЭМС-генераторы могут занять 50 – 90 % рынка:

1. Резонаторы временных импульсов (Clock Oscillator) для электронных схем, например мобильного телефона, MP3-плеера, GPS-устройства и т.д. Они подразделяются на: ХО (кристаллический резонатор – crystal oscillator), VCХО (кристаллический резонатор с контролем напряжения – voltage controlled crystal oscillator), ТСХО (кристаллический резонатор с температурной компенсацией), ОСХО (резонатор с контроллером), VCSO (резонатор на поверхностных волнах).

2. Генераторы временных интервалов с усилителем и фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) (Clock Generator) для разных электронных систем, например: материнской платы ПК, цифрового телевидения и т. д.

3. Таймеры реального времени (Real Time Clock), которые поддерживают отсчет временных интервалов, даже когда прибор выключен.

Особый интерес представляют поликремниевые резонаторы, изготавливаемые по стандартной полупроводниковой технологии. В управляемых по частоте генераторах с диэлектрическими резонаторами широко используются перестраиваемые МЭМС-индуктивности или емкости [129].

Специалисты Мичиганского университета разработали колебательные поликремниевые микромеханические кольцевые резонаторы в форме бокала. Их достоинство – меньший, чем у обычных диэлектрических резонаторов, импеданс. Была продемонстрирована работа таких резонаторов на частоте 828 МГц. При этом их добротность превысила 2200 как в воздухе, так и в вакууме. На частоте 426 МГц измеренная добротность в вакууме достигла 7700.

В лаборатории твердотельной электроники (Solid State Electronics Laboratory, SSEL) создан МЭМС-резонатор на поликристаллическом искусственном алмазе с самосовмещенной поликремниевой ножкой (stem). Его производство добротности на частоту составляет $1,74 \cdot 10^{13}$ Гц. Это больше, чем у лучших кварцевых резонаторов ($1 \cdot 10^{13}$ Гц). Весьма перспективны МЭМС-генераторы для замены в портативных системах кварцевых генераторов со средней стабильностью частоты и небольшим сроком службы.

Корпорация Discera Micro Communication Technologies начала выпускать генераторы типа MRO-100 на частоту 19,2 МГц, предназначенные для замены кварцевых генераторов в сотовых телефонах, что предполагает массовый объем производства этих уст-

ройств. МЭМС-генераторы с механическими вибрирующими резонаторами выпускаются уже несколько лет. Однако широкого распространения они не получили. Причина – сравнительно высокий температурный коэффициент, равный $30 \cdot 10^{-4} \text{ \%}/^\circ\text{C}$, необходимость применения сложных схем температурной компенсации, а также дорогостоящих металлических или керамических корпусов для их герметизации.

Компания SiTime Corp. выпустила кремниевые микросхемы МЭМС генераторов моделей SiT11xx (на фиксированные значения частоты) и SiT8002 (с программируемой частотой), что также вызвало большой интерес.

Измеренная долговременная относительная нестабильность частоты новых генераторов компании SiTime составляет $0,05 \cdot 10^{-6}$ против $3 \cdot 10^{-6}$ для кварцевых и $100 \cdot 10^{-6}$ для других типов кремниевых МЭМС-генераторов. Выращенные поверх резонаторов поликремниевые «колпаки» выдерживают развиваемое при формовании пластмассового корпуса давление в 100 атм. Это позволяет монтировать генераторы серий SiT11xx и SiT8002 на частоту от 1 до 125 МГц в стандартные корпуса типа QFN размером $2,0 \times 2,5$; $2,5 \times 3,2$ и $3,2 \times 5,0$ мм (толщина корпуса для всех вариантов – 0,85 мм).

Очередной пример успеха микросистемной техники – генераторы, изготовленные по лицензированной у фирмы Bosch технологии MEMS First с 0,18 мкм топологическими нормами. В этих изделиях применяется процесс герметизации эпитаксильно выращенных при температуре 1100 °С глубоких (10 мкм) и узких (0,4 мкм) канавок, вытравленных в подложке кремния на изоляторе. Благодаря высокотемпературному процессу герметизации выполняются чрезвычайно чистые безвоздушные выемки, с помощью которых формируются навесные балки резонатора. После полировки поверхности пластина с утопленными резонаторами пригодна для изготовления КМОП-микросхем.

Автогенераторы, частота которых стабилизирована по МЭМС резонатору, отличаются пониженным уровнем спектральной плотности мощности собственного фазового шума (СПМ ФШ) при больших отстройках. Собственная СПМ ФШ интегрального генератора на частоту 33 ГГц, в котором используется МЭМС-резонатор, составляет –113 дБ·мВт/Гц при отстройке на 1 МГц. Для МЭМС-генератора на частоту 900 МГц при отстройке на 3 МГц уровень собственной СПМ ФШ составляет –194 дБн/Гц, тогда как СПМ ФШ такого же генератора с LC-контуром равна – 136 дБн/Гц. Некоторые фирмы выпускают серийные МЭМС-автогенераторы на диапазон частот 1–200 МГц, способные заменить опорные генераторы с кварцевыми резонаторами.

Так, компания Vectron (известный производитель устройств стабилизации частоты на кварцевых и ПАВ-резонаторах) совместно с фирмой Discera в 2007 году выпустила

опорные МЭМС-генераторы серии MOS1, не уступающие кварцевым по относительной нестабильности частоты ($\pm 5 \cdot 10^{-5}$). При этом МЭМС-генераторы значительно превосходят кварцевые по граничной частоте (до 125 МГц), показателю старения номинала частоты ($1 \cdot 10^{-6}$ /год), температурной устойчивости и времени выхода на рабочий режим после включения (5 мкс). В некоторых моделях тактовых МЭМС генераторов компании Vectron предусмотрен режим внутренней частотной модуляции по треугольному закону с девиацией до 2 %, что способствует повышению информационной защищенности цифровых устройств с тактовыми МЭМС-генераторами.

Один из видов МЭМС-генераторов – генераторы временных импульсов. При этом роль МЭМС упругих элементов является определяющей. В конструкции генератора можно выделить две основные составляющие: механический элемент – резонатор и электронное обрамление, которое вызывает движение резонатора, отслеживает и корректирует его отклонение от заданных параметров. Естественно, что главным элементом выступает резонатор. Как упоминалось выше, резонатор – это упругая структура (кантилевер, диск, диафрагма), собственная частота которой задает частоту МЭМС генератора временных импульсов. Сердцевина этой конструкции – упругий элемент с точно заданным спектром частот колебаний. В качестве такого элемента в течение многих лет выступал пьезокварцевый резонатор. Генератор импульсов не обязательно должен содержать резонатор. Давно известна возможность генерирования импульсов на основе контура, содержащего емкость, индуктивность и сопротивление. В эру микроэлектроники эти конструкции получили название КМОП-генераторов. Однако стабильность их частотных (временных) характеристик существенно ниже, чем у устройств, в которых заданная частота определяется собственной частотой упругого элемента.

Задача создания электрических импульсов с постоянной временной последовательностью востребована во многих электронных устройствах: процессорах ЭВМ, часах, таймерах и т. д. Из-за физических явлений разной природы в электронных приборах невозможно обеспечить постоянство их параметров. Эти отклонения характеризуются величиной их изменения в течение какого-либо временного интервала или последовательности измерений. Она может быть задана в виде процента или в долях на миллион значений (ppm).

Задавание импульса на основе резонансной частоты тесно связано с проблемой его затухания из-за рассеяния энергии во внутренней структуре и окружающей среде колеблющего элемента. Это явление чаще всего характеризуется величиной добротности Q . Чем выше Q , тем уже резонансный пик и тем точнее задана частота временного импульса.

Устройства, задающие временные интервалы, в том числе синхронизирующие устройства, являются неременным компонентом большинства электронных систем.

Учитывая, что пьезоэлектрический резонатор имеет аналоги в виде других электромеханических структур, естественно, что появились предложения альтернативных конструкций резонаторов: среди них емкостные МЭМС резонаторы и генераторы на их основе. Как уже указывалось, большинство МЭМС-устройств базируется на использовании кремния. Механические свойства кремния, и особенно их зависимость от температуры, уступают пьезокварцевым структурам. Поэтому для них наиболее существенными являются дополнительно включенные электронные устройства, компенсирующие температурное изменение частоты или ее временный уход от номинала.

Замена кварцевого резонатора на МЭМС резонатор с точки зрения дальнейшей миниатюризации и снижения цены изделия, должна быть выполнена с учетом сравнения совокупного размера резонатора и интегральной микросхемы, обеспечивающей работу генератора временных импульсов (осциллятора). Первые коммерческие МЭМС генераторы принципиально были изготовлены в корпусах с теми же посадочными габаритами, что и у кварцевых генераторов, хотя МЭМС резонатор был в 100 раз меньше кварцевого. Выигрыш при равных характеристиках достигался за счет снижения цены изделия на порядок. Наиболее затратной операцией изготовления генератора является корпусирование (70 – 90 %). Это связано с необходимостью создания вакуумной полости для работы резонатора

В общем величина Q определяется внутренними потерями в материале и конструкции МЭМС $Q_{вн}$ и внешними потерями из-за взаимодействия со средой $Q_{внеш}$.

Величина коэффициента вязкости η зависит от давления среды и при низких давлениях определяется динамическим взаимодействием поверхности изделия с молекулами среды. Экспериментально установлено, что при давлении $< 0,1$ Па величина Q практически не зависит от давления.

Увеличение Q может быть достигнуто только за счет выбора материала и оптимизации конструкции МЭМС. Сохранение величины вакуума достигается за счет газонепроницаемости стенок и их соединений и/или введения геттера, поглощающего молекулы остаточной атмосферы полости. Разработаны различные виды геттеров, например, на основе пористых сплавов Zr. Ряд фирм поставляет геттеры или корпусные заготовки с нанесенным геттерным покрытием (например, фирма SAES, Италия).

Из-за малой массы резонатора даже осаждение моноатомного слоя примесей из остаточной атмосферы полости резко меняет его резонансные свойства. Принцип групповой обработки, характерный для интегральных схем (ИС) и МЭМС-технологий, позволяет

уменьшить затраты путем замены корпусирования единичного чипа на корпусирование на пластине. При этом стандартным способом является соединение двух пластин (кремний-кремний или кремний-стекло) и их последующее разрезание на чипы.

Выводы

Проведен аналитический обзор современного состояния технических и технологических решений, затрагивающий научно-техническую проблему, исследуемую в рамках проекта, в том числе обзор научных информационных источников: статьи в ведущих зарубежных и российских научных журналах, монографии. Показано, что разработка технологий и технологических операций изготовления и прототипирования СВЧ приборов и ИС, радиофотонных компонентов ИС и МЭМС – сложная научно-техническая задача, однако ее решение восполнит технологическую и компонентную базу, что позволит Российской электронике достичь, а в некоторых областях обогнать современный уровень зарубежной промышленности, что свидетельствует об актуальности проводимых в настоящей работе исследований и разработок.

1.5 Разработка, моделирование, проектирование и измерение систем на кристалле и модулей, радиофотонных компонентов и ИС

Акцент данного подраздела сделан на технологии «система на кристалле», но при этом рассматриваются и прототипирование СВЧ приборов и интегральных схем (ИС) на основе Si и AlN с нормами (длина затвора транзистора) от 250-180 нм до 65-45 нм, микроромеханических систем (МЭМС) и фотонных интегральных схем (ФИС) на основе Si, AlN (InP, GaAs).

Современными тенденциями в развитии радиоэлектронных систем (РЭС) гражданского и военного назначения являются освоение все более высокочастотных (ВЧ) диапазонов, в том числе сверхвысокочастотных и крайне высокочастотных (СВЧ и КВЧ), с целями увеличения скорости и объема передачи данных, а также разрешающей и пропускной способности, повышение функциональности, срока службы, надежности и помехоустойчивости, снижение энергопотребления, массогабаритных характеристик и стоимости, повышение технологичности при производстве и др.

В настоящее время наблюдается существенное ускорение темпов развития СВЧ радиоэлектронных и телекоммуникационных систем для различных сфер промышленности, транспорта, общественного потребления, вооружений и др. К традиционным областям применения СВЧ радиоэлектронных систем относят связь, радиовещание, телевидение, радиолокация, навигация, радиоастрономия, телеметрия, телеуправление, телекоммуника-

ции, гигабитовые системы передачи данных, измерительная техника и др. Среди современных СВЧ радиоэлектронных и телекоммуникационных средств большое место занимают системы на базе использования ППМ и АФАР (например, для спутниковых систем связи, авиационных радиолокационных станций и др. – см. рисунок 1.82).

Реализация указанных выше тенденций обеспечивается несколькими путями, к которым относятся, в частности, применение малогабаритной СВЧ полупроводниковой ЭКБ в виде полупроводниковых СВЧ МИС и, особенно, систем на кристалле (СнК, англ. System-on-Chip – SoC), разработка новых технологий производства СВЧ радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на основе высокоинтегрированной компоновки компонентов и др.

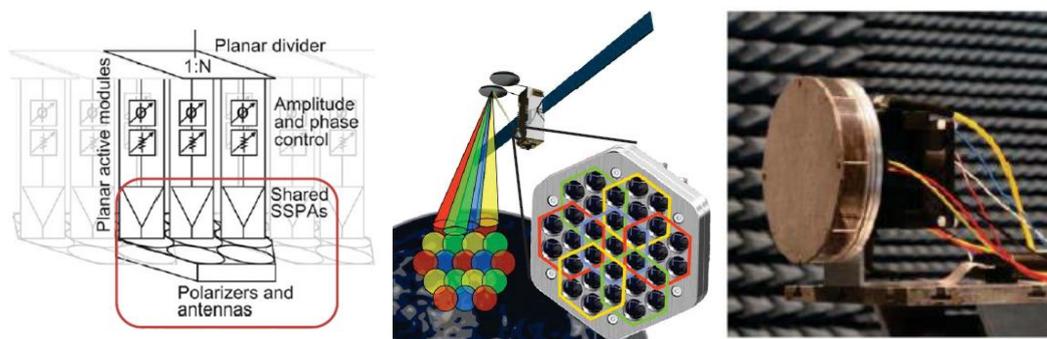


Рисунок 1.82– Примерный вид структуры и конструкций АФАР для спутниковых и авиационных систем

Использование СВЧ МИС и СнК обеспечивает целый ряд преимуществ – значительное снижение массы, габаритов и потребляемой мощности радиоэлектронных узлов, повышение надежности, срока службы, технологичности и др. Например, одна из перспективных технологий изготовления АФАР, исследуемых в зарубежных странах, предполагает, что полотно антенной решетки состоит из множества панелей, которые собраны на основе СВЧ ППМ типа СнК (рисунок 1.83).

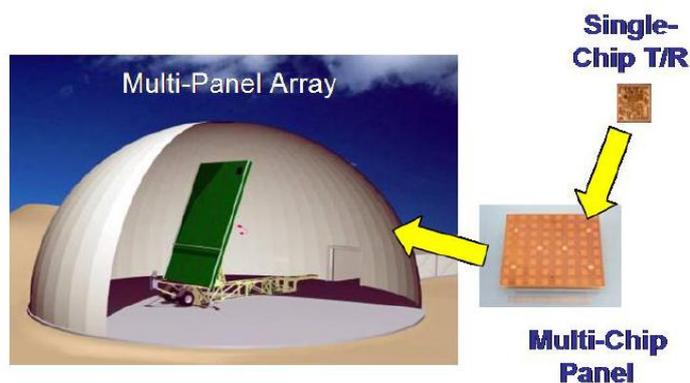


Рисунок 1.83– Перспективный путь развития технологии производства комплексов АФАР

На рисунке 1.84 приведены структурные схемы и топологический вид кристаллов СнК, разработанных для систем спутниковой связи с 4-мя и 8-ю каналами ППМ. Здесь в состав СнК, помимо аналоговой СВЧ части, входят цифровые блоки управления ППМ и передачи данных.

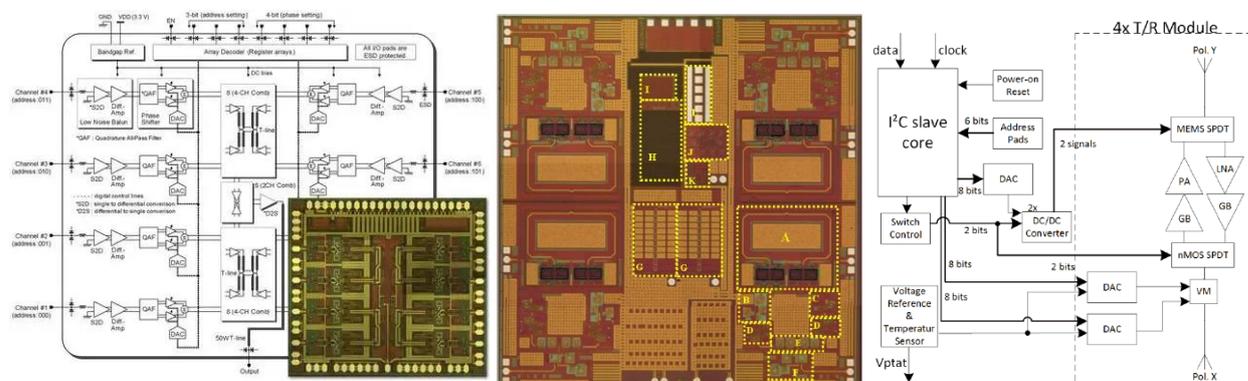


Рисунок 1.84 – Структурные схемы и топологии кристаллов СнК с 4-я и 8-ю каналами ППМ для АФАР

В современных условиях определяющей составляющей обеспечения возможности создания и производства упомянутой выше высокотехнологичной продукции является уровень технологий производства ЭКБ, отдельных компонентов, а также радиотехнических систем в целом. Следует отметить, что в отечественной радиотехнической отрасли системный уровень изделий в основном соответствует мировым показателям, а отдельные образцы превосходят импортные аналоги. Однако, к сожалению, российские предприятия сильно отстают от лидеров мирового рынка ЭКБ (США, Франция, Германия, Япония, Тайвань, Китай) по уровню технологий разработки и изготовления СВЧ МИС и СнК, а также применению их в радиотехнических системах. Практически отсутствуют отечественные промышленные высокоинтегрированные технологии плотной и объемной компоновки компонентов для производства СВЧ РЭА.

Работы, проводившиеся в ТУСУР с применение оборудования ЦКП в 2010-2019 годах были направлены на частичное преодоление указанных проблем при создании высокоинтегрированных приемных модулей типа СнК [131, 132]. Технологии проектирования и производства данных компонентв востребованы в настоящее время и в перспективе будут еще более востребованы в широком спектре упомянутых выше радиотехнических изделий и систем, выпускаемых многими отечественными предприятиями, включая в том числе ЗАО «НПФ «Микран» (например, в системах авиационных станций спутниковой связи).

1.5.1 Технологии изготовления СВЧ приемопередающих модулей

Приведем сравнительный обзор технологических вариантов реализации СВЧ радиоэлектронной аппаратуры и, в частности, СВЧ ППМ.

Технологии СВЧ ГИС. В России для производства СВЧ блоков используются преимущественно технологии ГИС (микросхемы, пассивные и активные дискретные элементы размещаются на печатных платах (ПП) или подложках и соединяются с помощью отдельных проводников, проводников на ПП, микрополосковых перемычек либо полосково-коаксиальных переходов). Такие блоки имеют низкие ТТХ, неприемлемо большие габариты, низкую технологичность и надежность. Пример СВЧ блока, выполненного по гибридной интегральной технологии, приведен на рисунке 1.85.

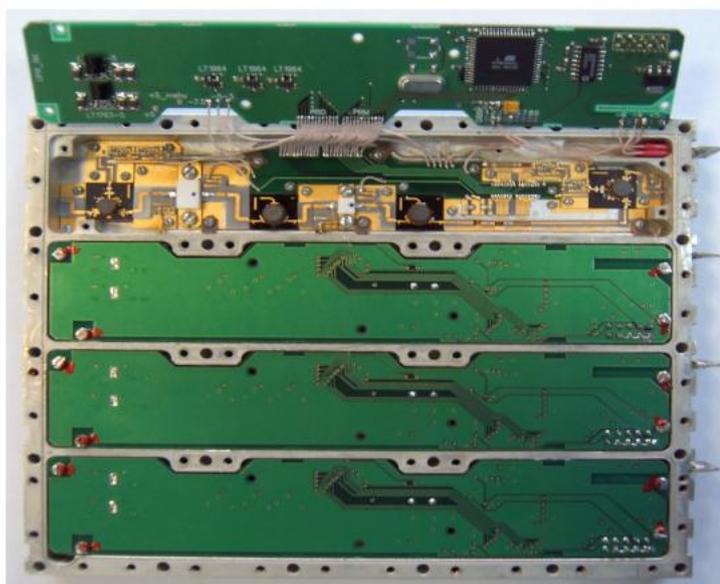


Рисунок 1.85– Четырехканальный СВЧ ППМ, изготовленный по технологии ГИС (габаритные размеры – десятки сантиметров)

Технологии СВЧ ППМ на основе корпусированных ИС. В связи с недостатками технологии СВЧ ГИС в России и за рубежом переходят на более совершенные технологии. В частности, используется технология производства СВЧ ППМ на основе корпусированных ИС (микросхем). Микросхемы представляют собой законченные функциональные узлы, упакованные в корпус (рисунок 1.86). Такие ИС содержат один или несколько полупроводниковых кристаллов (МИС), размещенных на ПП или подложках и соединенных между собой и с выводами микросхемы аналогичными предыдущему примеру способами. Преимущество в сравнении с гибридными технологиями – большая степень интеграции за счет объединения в ИС одного или нескольких законченных функциональных блоков.

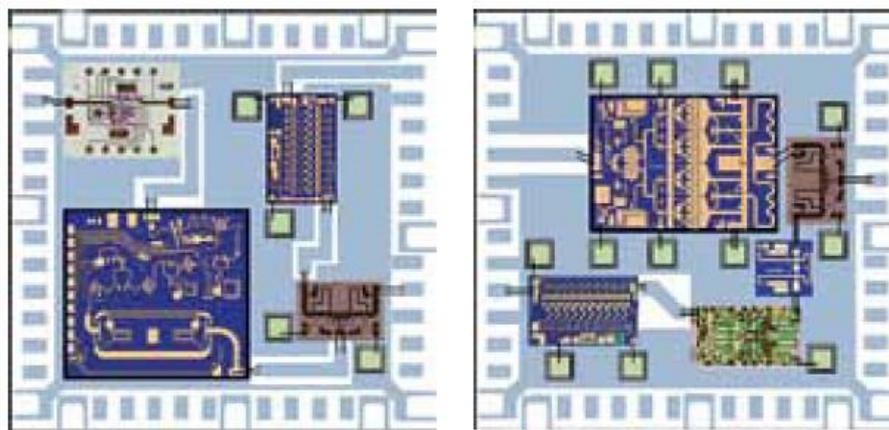
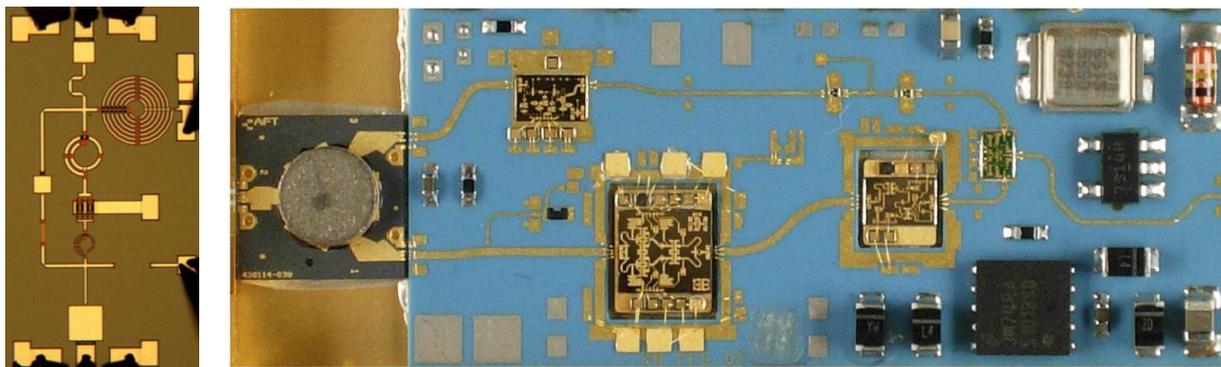


Рисунок 1.86 – Пример реализации корпусированных микросхем на основе нескольких МИС различной функциональности

К сожалению, в Российской Федерации разработка и производство корпусированных СВЧ ИС развиты слабо – узкая номенклатура, низкие ТТХ, отсутствие многофункциональных компонентов (ИС ВСИ). Создание перспективных СВЧ ППМ на основе корпусированных ИС представляется проблематичным по нескольким причинам: затруднительно достижение высоких ТТХ и высокой плотности монтажа СВЧ узлов; рынок отечественных корпусированных ИС не развит и, скорее всего, быстро развиваться не будет вследствие наличия более перспективных технологий; зарубежные образцы не поставляются по причине ограничения экспорта.

Технологии СВЧ МИС и многокристальных модулей. Более перспективной элементной базой являются бескорпусные МИС СВЧ диапазона. За рубежом СВЧ МИС начали использоваться в радиоаппаратуре, начиная с 1990-х годов, и в настоящее время являются самым распространенным типом СВЧ ЭКБ. Блок СВЧ ППМ на основе МИС может быть построен на основе многокристальных модулей, когда несколько функционально различных бескорпусных МИС размещаются на одной подложке (например, полупроводниковой или из низкотемпературной керамики) и объединяются между собой. Такая технология значительно улучшает ТТХ изделий, заметно снижает габариты СВЧ узлов (до единиц миллиметров). Примеры МИС СВЧ малошумящего усилителя (МШУ) и многокристального модуля на основе СВЧ МИС приведены на рисунке 1.87.



а

б

Рисунок 1.87– Изображения МИС МШУ (а) и многокристального модуля (б)

Нужно отметить, что разработка и производство корпусированных и бескорпусных СВЧ ИС является самым дорогостоящим технологическим процессом в производстве ППМ.

Рядом передовых предприятий в области производства радиотехнических систем и компонентов для них (ФГУП НПП «Исток», г. Москва, РНИИРС, г. Ростов-на-Дону, ЗАО «Светлана-Рост», г. Санкт-Петербург, НПФ «Микран» г. Томск, «НИИПП» г. Томск и др.) освоены технологии производства СВЧ МИС на основе материала GaAs (технологии обеспечивают рабочие частоты изделий до 20 ГГц и выше, но имеют низкую степень интеграции). На АО «Микрон» (г. Зеленоград) по кремниевой КМОП технологии запущено производство цифровых ИС и планируется к запуску изготовление также аналоговых СВЧ МИС (особенности технологии – гораздо более высокая степень интеграции изделий, возможность реализации смешанных цифровых и аналоговых схем, рабочие частоты в принципе также могут достигать 20 ГГц и выше).

Технология «Система на кристалле». Достижение наилучших показателей СВЧ узлов и получение возможности создания многофункциональных СВЧ ППМ действительно высокой степени интеграции представляется возможным путем ориентации на самые современные мировые технологии, к которым относится, в частности, технология СнК. Эта технология начала использоваться за рубежом примерно с 2005 года. СнК – это ИС, интегрирующая на одном кристалле несколько различных функциональных блоков, которые образуют законченное изделие для автономного применения в электронной аппаратуре. При разработке СнК используются так называемые виртуальные электронные компоненты, представляющие собой топологию и (или) программный код функционально-законченных блоков и узлов СнК. Для обозначения этих компонентов в англоязычной литературе используются термины «IP-блоки» или «IP-ядра». В русскоязычной литературе устоялся термин «сложно-функциональный блок» (СФБ). СВЧ узел при этом выполняется

по технологии планарного многокристального модуля на единой подложке (например, из поликора), где размещаются один или несколько кристаллов СнК и небольшое количество необходимых дискретных компонентов (например, фильтры, цепи развязки), могут использоваться и кристаллы МИС. В многокристальном модуле возможны варианты гетерогенной (разнородной) интеграции [133], т.е. интеграции нескольких СнК и МИС, выполненных по различным технологиям, что позволяет обеспечить достижение наилучших ТТХ за счет использования лучших показателей отдельных технологий (Si, SiGe, GaAs, GaN и др.).

По технологии СнК за рубежом миллионными партиями изготавливаются не только бытовые устройства связи, робототехники, но и высоконадежные космические и военные системы [134].

Таким образом, по технологии СнК представляется возможным разработка СВЧ ППМ К-диапазона высокой степени интеграции с высокими ТТХ, низким энергопотреблением, технологичным и недорогим в производстве и эксплуатации, стойким к внешним воздействующим факторам. Примеры однокристалльных приемника и передатчика, выполненных по технологии СнК, приведены на рисунок 1.7а [135]. На рисунок 1.88б изображен СВЧ ППМ с цифровой обработкой сигнала (ЦОС) для перспективных радиотехнических систем [136], он использует кристалл СнК.

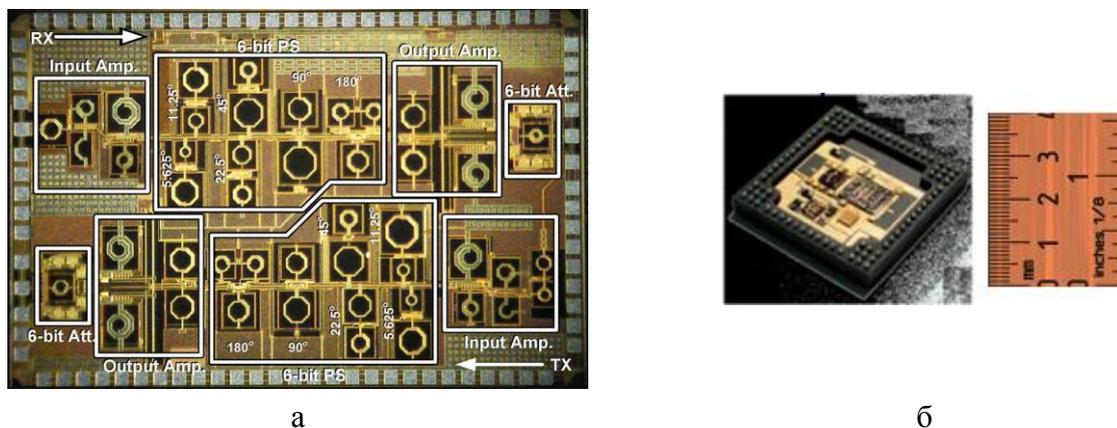


Рисунок 1.88 – Примеры устройств: однокристалльные приемник и передатчик по технологии СнК (а); СВЧ ППМ с ЦОС для перспективных радиотехнических систем (б)

Освоение технологии СнК предполагает теоретические и экспериментальные исследования в части разработки методов проектирования, моделирования и испытаний этих компонентов, путей создания отдельных видов ЭКБ тракта СВЧ, способов построения СВЧ ППМ на базе СнК.

1.5.2 Обзор технологий изготовления СВЧ интегральных схем и систем на кристалле для построения приемопередающих модулей высокой степени интеграции

Чаще всего СВЧ ИС и СнК для построения ППМ выполняются на основе следующих технологий:

а) технологии на основе арсенида галлия GaAs. К ним относятся технологии полевых гетероструктурных транзисторов НЕМТ (High Electron Mobility Transistor), рНЕМТ (псевдоморфные) и мНЕМТ (метаморфные);

б) технологии полевых транзисторов КМОП - CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) на основе кремния Si, а также технологии БиКМОП - BiCMOS на основе соединения кремний-германий SiGe, объединяющие технологию биполярных транзисторов и CMOS технологию.

Приведем основные характеристики этих технологий.

НЕМТ технологии на основе полупроводникового соединения GaAs. GaAs НЕМТ (рНЕМТ, мНЕМТ) технологии – это технологии для промышленного производства сравнительно недорогих аналоговых СВЧ МИС массового применения (МШУ, УМ, СМ, ФВ и др.). GaAs МИС на основе рНЕМТ технологий более дешевые, но обладают меньшими граничными частотами ($F_t < 150$ ГГц при длине затвора 150 нм) и большим коэффициентом шума (КШ). Технологии GaAs мНЕМТ обеспечивают лучшие частотные свойства, но являются более дорогими.

Значительным недостатком GaAs НЕМТ технологий является отсутствие комплементарных транзисторов (например, аналогично транзисторам *p*- и *n*-типа в CMOS технологиях). Это усложняет создание даже простых логических ячеек. К другим существенным недостаткам GaAs НЕМТ технологий относятся: малая степень интеграции, связанная прежде всего со значительными размерами транзисторов; малая максимально возможная площадь кристалла (до 25 мм²); значительная потребляемая мощность ИС; большая стоимость по сравнению с кремниевыми технологиями. Все указанные недостатки сильно затрудняют создание интегрированных МИС по принципу СнК.

Технологии на основе кремния (CMOS) и соединения кремний-германий (BiCMOS). Характерной чертой кремниевой технологии полевых транзисторов CMOS является использование на кремниевой подложке комплементарных и симметричных пар MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) транзисторов *p*- и *n*-типа.

При создании СВЧ МИС CMOS технология имеет ряд достоинств по сравнению с НЕМТ технологиями: позволяет одновременно выполнить функции обработки аналоговых и цифровых сигналов в одном кристалле, т.е. в полной мере реализовать концепцию

СНК; имеет меньшие размеры компонентов в связи с чем допускает более плотную упаковку элементов; разрешает увеличить площадь кристалла (до 4 см²) и может содержать большее число транзисторов на кристалле; кремниевые подложки могут иметь диаметр свыше 150 мм; кремниевые МИС значительно дешевле МИС на основе полупроводников GaAs и GaN.

Технология BiCMOS на основе материала SiGe предполагает изготовление на одной подложке гетероструктурных биполярных транзисторов (HBT – Heterostructural Bipolar Transistor) и полевых MOSFET-транзисторов (по CMOS технологии). Она также использует кремниевую подложку и разрешает одновременно реализовать аналоговые и цифровые функции. При этом технология BiCMOS сочетает достоинства CMOS технологии (малое потребление мощности, высокая степень интеграции) и биполярной технологии (высокая рабочая частота, низкий КШ, малые фазовые шумы). В BiCMOS технологии HBT транзисторы на основе SiGe более высокочастотные, чем кремниевые MOSFET транзисторы в CMOS технологии, их граничная частота может достигать 200 ГГц (при базовом размере 100 нм). Однако в связи с затратами при формировании HBT транзисторов BiCMOS технология дороже технологии CMOS.

В то же время технологии на основе материалов Si и SiGe имеют три значительных недостатка в сравнении с НЕМТ технологиями. Во-первых, при одинаковой топологической норме CMOS и BiCMOS технологии уступают в значении предельной частоты НЕМТ технологиям на базе соединения GaAs. Рабочие частоты существующих СВЧ МИС на основе CMOS и BiCMOS технологий обычно не превышают 60-80 ГГц. Во-вторых, в связи с меньшими значениями пробивных напряжений уровень сигнала СВЧ МИС на базе материалов Si и SiGe значительно ниже, поэтому эти технологии не могут применяться для создания усилителей с высокой выходной мощностью. В-третьих, кремниевые подложки обладают повышенной проводимостью, что значительно ухудшает добротность пассивных компонентов и приводит к повышению КШ транзисторов и МИС.

Производство СВЧ МИС за рубежом. В настоящее время рНЕМТ и mНЕМТ технологии на подложках GaAs с топологическими нормами 0,07-0,15 мкм освоены в зарубежной промышленности. МИС до 40 ГГц и выше выпускаются в промышленных масштабах, например, фирмами TriQuint Semiconductor (США), UMS (Франция), OMMIC (Франция), Sumitomo (Япония), Win Semiconductors (Тайвань) и др.

Промышленный выпуск МИС на основе CMOS и BiCMOS технологий в необходимых частотных диапазонах налажен несколькими зарубежными фирмами, среди них IHP (Германия), ST Microelectronics (Франция), AMS (Австрия), TSMC (Тайвань) и др.

Опытное и промышленное производство отечественных СВЧ МИС на основе материала GaAs. В России в настоящее время имеется ряд организаций, где ведется производство СВЧ МИС на основе GaAs НЕМТ технологий.

В частности, промышленные производственные линии для изготовления GaAs рНЕМТ МИС с топологической нормой 0,15 мкм запущены на предприятиях ФГУП НПП «Исток» (г. Москва), ОАО «НИИПП» и ЗАО «НПФ «Микран» (г. Томск). При этом рабочая частота серийно выпускаемых СВЧ МИС достигает 12-20 ГГц, осваиваются технологии изготовления более высокочастотных МИС. Недостатками отечественных промышленных технологий пока являются нестабильность и невысокий процент выхода годных изделий.

Опытное производство СВЧ МИС ведется в Институте СВЧ полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН, г. Москва). Здесь, по-видимому, реализованы наилучшие на настоящий момент в России опытные технологии изготовления СВЧ МИС. В институте имеется собственное опытное оборудование для выращивания НЕМТ-наногетероструктур на подложках GaAs и InP, имеется также опытная технологическая линия по изготовлению СВЧ МИС на основе материалов GaAs, GaN и InP. На этой основе разработан ряд технологий изготовления наногетероструктурных СВЧ МИС с топологическими нормами 0,07-0,15 мкм. Это позволило создать в Ka-диапазоне GaAs рНЕМТ МИС МШУ со значениями КШ 2,5-3,5 дБ. Однако институт не имеет возможности обеспечить промышленное производство СВЧ МИС в силу своего статуса исследовательской организации.

Производство отечественных СВЧ МИС на основе материалов Si и SiGe. Единственной в России фабрикой, на которой может быть организовано производство отечественных СВЧ МИС К-диапазона на основе материалов Si и SiGe, является предприятие АО «Микрон» (г. Зеленоград). На предприятии запущены кремниевые CMOS технологические процессы с топологическими нормами 0,25 мкм, 0,18 мкм и 0,09 мкм. Технология CMOS с нормой 0,18 мкм разрабатывалась совместно с компанией IHP (Германия), поэтому она имеет близкие характеристики к технологиям IHP. В 2012 г. путем встраивания SiGe НВТ транзисторов в CMOS процесс с помощью компании IHP в АО «Микрон» была создана также SiGe BiCMOS технология с топологической нормой 0,18 мкм, однако в данный момент ИС по этой технологии не изготавливаются.

На базе упомянутых CMOS технологий в АО «Микрон» разрабатываются и выпускаются отечественные цифровые ИС различного назначения. С целью проектирования аналоговых СВЧ ИС разработаны библиотеки элементов для CMOS технологий. Однако

проектирование и производство аналоговых СВЧ ИС по CMOS технологиям сдерживается в связи с тем, что на данный момент отсутствует подтвержденный опыт проектирования и изготовления таких ИС (в том числе СнК) с использованием библиотек. Поэтому первоначально необходим этап опытного проектирования, изготовления и испытания тестовых ИС для верификации библиотек.

SiGe BiCMOS технологии компании IHP. В качестве примера приведем краткое описание SiGe BiCMOS технологий известной компании IHP. Компания IHP образована в 1983 году. Основные производственные мощности расположены во Франкфурте (Одер) в Германии. Специализируется на SiGe BiCMOS технологиям и их ВЧ применениям.

Поперечное сечение техпроцесса 0,25 мкм SGB25RH представлено на рисунок исунок 1.89.

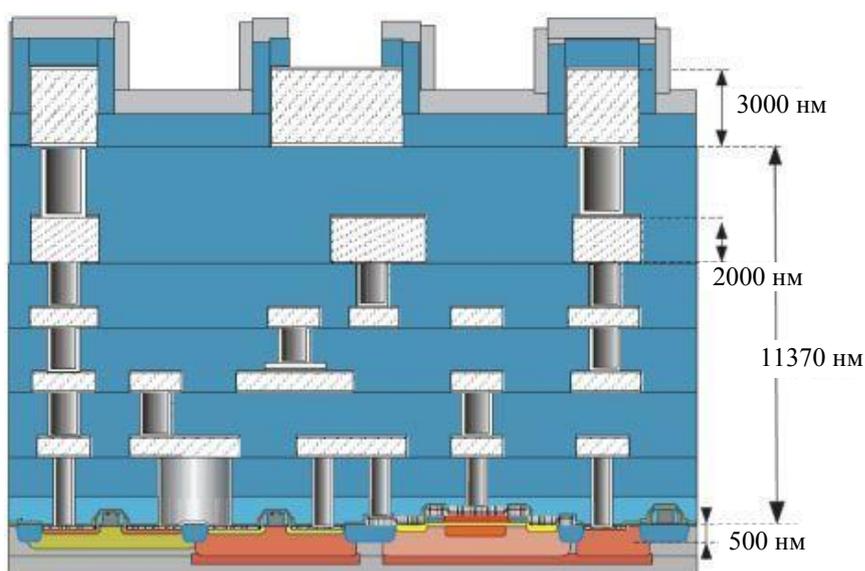


Рисунок 1.89 – Поперечное сечение 0,25 мкм SiGe БиКМОП техпроцесса SGB25RH

Технологии компании IHP позволяют интегрировать на одной подложке HBT с граничными частотами до 500 ГГц, LDMOS (англ. Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductors) транзисторы с пробивными напряжениями до 22 В и стандартные CMOS цепи. Основные разновидности техпроцессов представлены в таблице 1.5.

В виде дополнительных интегрируемых модулей для любого техпроцесса доступны LDMOS и МЭМС устройства. Компания предлагает радиационно-стойкий техпроцесс SGB25RH. Основные его параметры аналогичны техпроцессу SGB25V, поскольку используется один и тот же маршрут изготовления. Радиационная стойкость достигается применением особых правил проектирования и специальных топологических ячеек. С целью проектирования компанией IHP предоставляется широкий набор инструментов для систем Cadence и ADS.

Таблица 1.5 – Техпроцессы фабрики ИНР (Германия)

Тех. процесс	Характеристика
SG25H1 0,25 мкм	Высокочастотная технология с ГBT npn-типа; $f_T/f_{max} = 180/220$ ГГц
SG25H3 0,25 мкм	Технология с несколькими типами ГBT - высокочастотные ($f_T/f_{max}=110/180$ ГГц) и высоковольтные с пробивными напряжениями до 7 В
SGB25V 0,25 мкм	Технология с низкой стоимостью ($f_T/f_{max} = 75/95$ ГГц), пробивные напряжения до 7 В
SGB25RH 0,25 мкм	Радиационно-стойкая версия тех. процесса SGB25V
SG13S 0,13 мкм	Высокочастотная технология с ГBT npn-типа; $f_T/f_{max} = 250/300$ ГГц; КМОП логика с напряжениями 3,3 В и 1,2 В
SG13G2 0,13 мкм	То же что и SG13S, для биполярных транзисторов $f_T/f_{max} = 300/500$ ГГц

В качестве выводов следует отметить следующее:

1) При использовании только КМОП транзисторов технологии компании ИНР весьма схожи с техпроцессами, имеющимися на отечественном предприятии АО «Микрон» (г. Зеленоград). Таким образом, проектирование ИС и СнК по одной из технологий ИНР позволит в дальнейшем перенести и адаптировать проект на отечественный техпроцесс.

2) Преимущества Si/SiGe технологий по сравнению с GaAs – более высокая степень интеграции, возможность объединения нескольких аналоговых СВЧ блоков (а также цифровых и аналоговых блоков) на одном кристалле, низкая себестоимость при массовом производстве, низкое энергопотребление. Эти преимущества являются *решающими аргументами* при выборе полупроводниковых технологий для создания ППМ ВСИ типа СнК. Тем не менее, нужно учитывать, что в Si/SiGe МИС, как правило, выше уровень шумов и трудно обеспечить высокую выходную мощность усилительных каскадов. Поэтому при предъявлении повышенных требований к коэффициенту шума и выходной мощности на входе и выходе однокристалльного ПМ или ППМ, выполненного по кремниевой технологии, возможно использование дополнительных GaAs МИС МШУ и усилителя мощности.

1.5.3 Аналитический обзор решений в области радиофотоники

Другим важным направлением развития современной радиоэлектроники является объединение в единой системе устройств, функционирующих на различных физических принципах. Одним из таких ярких направлений, получивших широкое распространение за последние 10 лет является радиофотоника.

Радиофотоника [137-140] – направление, объединяющее в себе радиоэлектронику и оптоэлектронику, за последние 30 лет вызвала огромный интерес как со стороны ученых, так и со стороны коммерческого сектора, и ему предсказывают светлое будущее. Это направление получило такую широкую популярность, с одной стороны, благодаря тому, что позволяет реализовывать СВЧ-компоненты, которые ранее было сложно либо практически невозможно создать в радиодиапазоне, а с другой стороны она открывает новые пути для построения информационных и телекоммуникационных систем и сетей.

В настоящее время радиофотоника решает широкий круг задач в областях сотовой, беспроводной и спутниковой связи, кабельного телевидения, распределенных антенных систем и систем оптической обработки сигналов [137-140]. Во многих этих областях постоянно возрастают требования к скорости передачи, полосе пропускания и динамическому диапазону, и в то же время уменьшению веса и размеров, потребляемой мощности, с большим диапазоном перестройки и невосприимчивостью к электромагнитным помехам. Несмотря на то, в настоящее время в этой области широко используется цифровая обработка сигналов, скорость обработки не превышает нескольких гигагерц, что связано в основном со скоростью аналого-цифрового преобразования. Чтобы сохранить гибкость этих систем, необходимо, использовать настолько же гибкую систему аналоговой обработки сигнала на входе системы. Радиофотоника позволяет получить такую гибкость за счет использования уникальных возможностей фотоники, в плане размера, веса и потребляемой мощности в системах обработки радиосигналов.

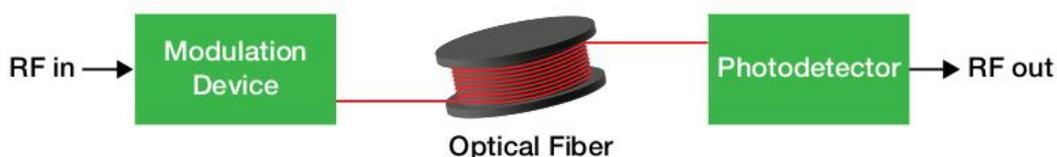
Ожидается, что основным стимулом к развитию систем радиофотоники в ближайшем будущем будет развитие беспроводных широкополосных сетей общего доступа, установленных в торговых центрах, аэропортах, больницах, стадионах и других крупных зданиях. Рынок радиофотонного оборудования, скорее всего, будет расти вместе с возрастающим спросом на беспроводные сервисы. Фактически, в связи с широким распространением носимых беспроводных устройств, требуется развитие соответствующей беспроводной инфраструктуры. Кроме того, также считается, что спрос на системы радиофотоники будет обусловлен распространением систем FTTH, конвергентных и внутренних сетей. Чтобы справиться с этим сценарием развития, ожидается, что будущие сети будут поддерживать беспроводную передачу данных на скоростях, достигающих нескольких гигабит в секунду. Кроме того, чрезвычайно низкое энергопотребление сетей доступа, состоящих из пико- или фемтоячеек, позволило бы снизить энергопотребление, по сравнению с текущими макроячейками, требующими мощных базовых станций.

В течение последних 25 лет в системах радиофотоники использовались в основном дискретные оптоэлектронные компоненты, стандартные оптические волокна и компоненты на их основе, для реализации различных устройств генерации, передачи, обработки и анализа радиосигнала. Из-за использования дискретных компонентов они были громоздкими, дорогими и потребляли много энергии, при этом обладая плохой гибкостью. Считается, что второе поколение, получившее название интегральной радиофотоники нацеленное на объединение отдельных компонент и подсистем на одном чипе, позволит решить большинство вышеописанных проблем и реализовать дешевые системы аналоговой обработки оптических сигналов.

1.5.3.1 Основные понятия радиофотоники

Основой любой системы радиофотоники является аналоговый оптический канал передачи данных. Как показано на рис.1.90 (а), канал передачи состоит из модулятора для преобразования электрического сигнала в оптический, линии передачи (оптического волокна) и фотодетектора, который производит обратное преобразование оптического сигнала в электрический. Большинство используемых в настоящее время радиофотонных систем связи используют амплитудную модуляцию и прямое детектирование, хотя, как будет показано ниже схемы фазовой или частотной модуляцией в сочетании с прямым либо когерентным детектированием также набирают популярность. В настоящее время широко используются два типа модуляции: прямая и внешняя модуляция. В первом случае модуляция осуществляется за счет подачи модулирующего сигнала непосредственно на лазерный диод, который действует одновременно и как источник света, и как модулятор. При использовании внешней модуляции лазерный диод работает в непрерывном режиме, а управление параметрами оптической несущей осуществляется с использованием внешнего электрооптического модулятора. В качестве детектора в подавляющем большинстве оптических систем передачи используются р-і-п фотодиоды. Обзор различных устройств, используемых в системах радиофотоники, может быть найден в [141].

(a) MWP link



(b) MWP system

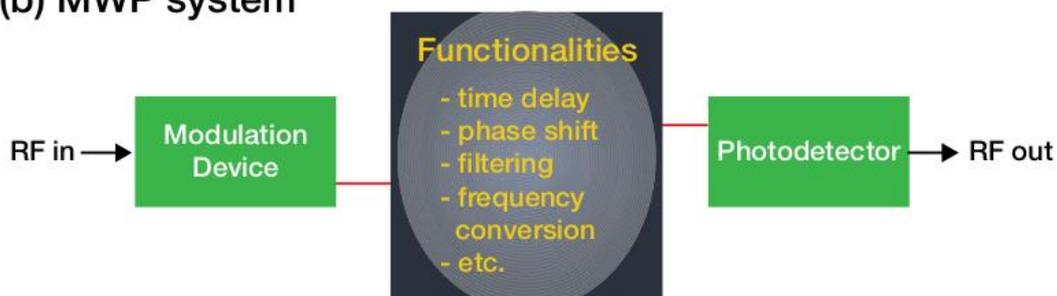


Рисунок 1.90 – Схематичное изображение аналоговой волоконно-оптической системы передачи (а) и системы оптической обработки аналогового сигнала (б)

Система радиофотоники строится путем добавления дополнительной обработки сигнала между двумя преобразованиями сигнала в аналоговом оптическом тракте передачи, т.е. весь процесс обработки происходит в оптической области (рис. 1.90 (б)). Преимуществом такого способа является большая полоса пропускания, равномерное ослабление во всем диапазоне радиосигнала, малый размер и вес, практически полная невосприимчивость к внешним электромагнитным помехам и большой диапазон перестройки с малой потребляемой мощностью. К возможностям таких систем относится генерация, передача, управление и обработка радиосигнала. Основными задачами таких систем являются передача радиосигнала с малыми искажениями, создание линий задержки и фазовращателей радиосигналов, перестраиваемых и высокочастотных фильтров, преобразование частоты радиосигнала и создание сигналов произвольной формы.

Для создания высококачественных систем обработки сигналов, аналоговый канал передачи должен обладать определенными характеристиками. Основным препятствием на этом пути является тот факт, что преобразование электрического сигнала в оптический и обратно вносит дополнительные потери, шум и искажения в обрабатываемый радиосигнал. Более того, потери радиосигнала и оптические потери в радиофотонном канале связаны квадратично. Поэтому необходимо минимизировать оптические потери, и большая часть работ по радиофотонике в 80-х и 90-х годах была посвящена проектированию и оп-

тимизации оптического канала передачи. В следующем разделе приведены основные параметры, описывающие качество аналогового оптического канала передачи. Обзор успехов в этой области приведен в работах [142, 143].

1.5.3.2 Применение систем радиофотоники

За последние 20 лет направление радиофотоники получило широкое распространение в различных задачах формирования, передачи и обработки сигнала. Одним из первых применений данного направления была передача и распределение радиосигнала [142], где система радиофотоники использовались, как прямая замена коаксиальным кабелям, благодаря их малому весу, гибкости и равномерном затуханий во всей полосе частот радиосигнала. Затем эта концепция была использована для передачи сигнала от антенн в удаленные пункты обработки сигнала, где она используется для разнесения чувствительного и сложного оборудования приемной части системы и антенны. Благодаря чему система обработки сигнала может быть защищена от суровых погодных условий, в которых развернута антенная система, как например, в системах радиолокации [144] или радиоастрономии [145]. С другой стороны, эта концепция также очень привлекательна для распределения сигнала в антенной системе, где требуется большое количество антенн для расширения зоны покрытия, как например, в системах мобильной связи. В этом случае система радиофотоники используется для централизованной обработки сигнала (модуляция, фильтрация и т. д.), и как, и ранее разнесение оборудования обработки сигнала и антенной системы. В этом случае преимуществом является то, что архитектура антенны может быть значительно упрощена. Это концепция получила название радио-по-волокну (RoF) [139, 146], которая в настоящее время является основным коммерческим стимулом для развития систем радиофотоники.

Хотя задача передачи и распределения сигнала была основным стимулом для развития систем радиофотоники, такие направления, как генерация и обработка сигналов набирают все большую популярность. Так, в настоящее время, одним из направлений исследования является генерация высокочистых монохроматических сигналов и сверхширокополосных сигналов сложной формы. Основным фактором использования систем радиофотоники для генерации сигнала является большой диапазон частотной перестройки и возможность получения очень высоких частоты (вплоть до ТГц), используя более простые, по сравнению с традиционными, подходы. Более того, привлекательной также является возможность непосредственной передачи сигналов такой высокой частоты, с использованием оптического волокна с очень малыми потерями, которые не достижимы при исполь-

зовании коаксиальных кабелей. Для генерации сигналов произвольной формы системы радиофотоники предоставляют широкую полосу пропускания и возможность управления амплитудной и фазовой характеристикой канала [147, 148]. Также системы радиофотоники позволяют создавать широкополосные устройства обработки радиосигнала, такие как фильтры, линии задержки, фазовращатели и т.д. Использование этих устройств позволило создать схему оптической обработки сигнала для формирования диаграммы направленности в фазированной антенной решетке.

1.5.3.3 Интегральная радиофотоника

Существует несколько причин, ограничивающих широкое распространение систем радиофотоники в реальных устройствах вместо лабораторных установок. Первым фактором является параметры системы, особенно динамический диапазон. Как правило, системы радиофотоники показывают уникальные функциональные возможности (например, задержку или формирование формы импульса) в большой полосе частот, но при этом обладают малым динамическим диапазоном. Другими факторами, ограничивающими применения таких систем, являются их стоимость и надежность. Большинство систем радиофотоники состоят из дискретных компонентов, то есть лазеров, модуляторов и детекторов, соединенных оптическим волокном. Это приводит к нескольким проблемам. Во-первых, дискретные компоненты занимают много места, а их соединение с использованием оптического волокна приводит к снижению надежности системы. Во-вторых, использование дискретных компонентов приводит к высокой стоимости системы, поскольку в его стоимость также включена и стоимость корпусирования отдельных элементов. Применение дискретных компонентов может также привести к увеличению потребляемой мощности. В настоящее время эти причины не позволяют системам радиофотоники заменить традиционные, хорошо развитые решения СВЧ-техники.

Большим толчком к развитию систем радиофотоники будет снижение их стоимости, потребляемой мощности и увеличение надежности, в этом случае они смогут конкурировать с традиционными СВЧ-компонентами применяемыми в настоящее время для обработки сигналов, а не только с коаксиальными линиями передачи. Многие исследователи сходятся во мнении, что это может быть решено за счет интеграции электронных и фотонных компонентов [147-152]. При использовании технологии интегральной фотоники можно добиться снижения размера системы, потерь между элементами, стоимости корпусирования, а также потребляемой мощности, поскольку один охлаждающий элемент будет

использоваться для нескольких функций [153]. Таким образом, характеристики систем радиофотоники могут быть приближены к требуемым для применения в реальных системах.

Хотя изначально концепция интегральной радиофотоники в значительной степени соответствовала последним тенденциям в области технологии больших радиофотонных интегральных схем (РИС) [156-159], в них появились существенные различия из-за разницы в области их применения, а также объеме рынка. Требования к РИС были сформированы с учетом их применения в цифровых системах, таких как высокоскоростные оптические линии связи и оптические межсоединения. Эта концепция в значительной степени предполагает увеличение скорости передачи, количества компонентов, а также создание как можно большего числа функциональных возможностей (активных и пассивных) на единой платформе/технологии. Однако в настоящее время нет единой технологической платформы, позволяющей получить наилучшие параметры во всех аспектах, поэтому РИС большой степени интеграция часто представляют компромисс между различными параметрами, что в свою очередь снижает общую эффективность системы.

Из-за высоких требований, предъявляемых к качеству обработки аналоговых сигналов, технология интегральной фотоники используемая для создания систем радиофотоники должна обладать параметрами превосходящими, параметры, требуемые для цифровых систем. Что в значительной степени влияет должно подтолкнуть основных представителей рынка РИС для разработки других подходов для использования в системах интегральной радиофотоники.

Ниже будут приведены основные технологии РИС, которые в последнее время использовались для создания устройств интегральной радиофотоники. Для этих технологий будут обсуждаться два основных критерия - это параметры устройств и доступность технологии разработчикам. Как обсуждалось в предыдущем разделе, важной задачей радиофотоники является оптимизация коэффициента передачи системы и получения малого коэффициента шума, что требует минимизации вносимых потерь РИС. В большинстве случаев это приводит к жестким требованиям к потерям в волноводах, а также на вводе и выводе излучения из волокна в РИС. Что касается доступности технологии РИС, в настоящее время существует несколько объединений, таких как ePIXfab [160] и Jerrix [161] в Европе, а также OpSIS [162] в США, которые позволяют разработчикам получить доступ к технологиям изготовления оптических интегральных схем, за счет объединения на одной подложке разработок нескольких групп, которые в противном случае оказались бы слишком дорогостоящими для отдельных групп. Это уже проявилось в растущем числе публикаций в области интегральных устройств и систем радиофотоники, с момента появления

этих инициатив. В следующем разделе приведены некоторые доступные технологические платформы для создания систем интегральной радиофотоники.

1.5.3.4 Технологии интегральной радиофотоники

В настоящее время в области интегральной фотоники выделилось несколько основных технологий: составные полупроводники (*GaAs*, *InP*), нелинейные кристаллы (*LiNbO₃*), диэлектрики (волноводы на основе нитрида кремния и диоксида кремния) и полупроводники (кремний-на-изоляторе). Каждая из этих технологий обладает определенными преимуществами, такими как генерация и детектирование света, модуляция, создание волноводов с низкими потерями, интеграция с электронными компонентами, легкость в корпусировании и т. д. Тем не менее, объединение в единую технологическую платформу без ущерба для общих параметров системы еще не было достигнуто. За последние 20 лет выделились четыре платформы, наиболее часто используемые при разработке устройств интегральной радиофотоники. Это фосфид индиевая технология, технология планарной оптики на диоксиде кремния, кремний-на-изоляторе и технология *Si₃N₄/SiO₂*, известная как TriPleX™.

Развитие технологических процессов интегральной радиофотоники подстегнуло рост коммерческих продуктов, построенных с применением этих достижений. Наибольший рост таких применений наблюдается в области создания цифровых систем связи для датацентров [163] и магистральных информационных узлов [164], поскольку именно снижение себестоимости, обусловленное внедрением доступных решений интегральной фотоники, имеет ключевое значение на рынке массовых телекоммуникаций. В настоящее время компанией Luxtera предлагаются массовые QSFP модули, рассчитанные на скорости передачи до 100 Гбит/с.

Другим активно развивающимся направлением является создание СВЧ аналоговых линий связи с полосой пропускания до 40 ГГц [165-168]. Этот сектор имеет важное значение в радиолокационных системах, авионике нового поколения и в других ответственных применениях. В этом случае ключевым преимуществом интегральных тех. процессов является возможность расширения частотного диапазона СВЧ сигнала за счет миниатюризации и уменьшения влияния паразитных параметров, а также благодаря уменьшению потерь на передачу сигнала от одного устройства к другому.

1.5.3.5 Технология проектирования СВЧ монолитных и радиофотонных интегральных схем

В настоящее время разработку СВЧ и радиофотонных МИС невозможно представить без использования систем автоматизированного проектирования (САПР). Необходимость использования САПР СВЧ устройств обусловлена, прежде всего, сложностью современных МИС и отсутствием возможности корректировки её параметров после изготовления.

На рынке САПР присутствует ряд профессиональных программных продуктов, позволяющих провести полный цикл проектирования СВЧ устройств, в том числе СВЧ МИС. К наиболее популярным коммерческим продуктам относятся: 1) Microwave Office (MWO), компания National Instruments AWR, США; 2) Advanced Design System (ADS), компания Keysight Technologies, США; 3) Virtuoso, компания Cadence, США; 4) DesignerRF, компания ANSYS, США.

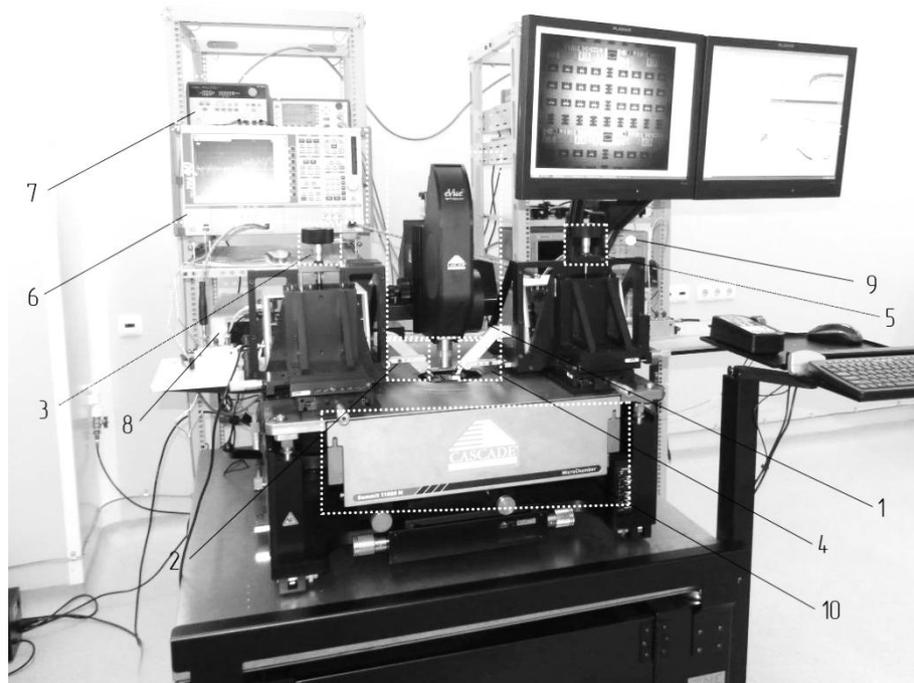
Технология (маршрут) проектирования СВЧ МИС в общем виде с использованием САПР представлена на рисунке 1.91.



Рисунок 1.91 – Технология проектирования СВЧ МИС в САПР СВЧ устройств

Процесс проектирования начинается с формирования технических требований к характеристикам МИС. Далее следует этап разработки структурной схемы, выбор оптимальной элементной базы и технологии изготовления СВЧ устройства для достижения поставленных требований. Одним из важнейших обстоятельств на данном этапе является наличие для выбранной САПР адекватных моделей активных элементов (АЭ), отражающих особенности технологии их изготовителя. В зависимости от требований к СВЧ МИС могут применяться различные типы моделей: линейные, параметрические, шумовые, нелинейные и др. Использование точных моделей АЭ позволяет разработчику на ранних стадиях проектирования устройства оценить предельные возможности технологии, реализуемость технических требований и скорректировать направление работ.

Как правило, разработка моделей невозможна без проведения высокоточных измерений. Для решения этой задачи используется технология измерения отдельных компонентов интегральных схем зондовым способом непосредственно на пластине (см. рис. 1.92). Это позволяет исключить из результатов измерений влияние соединительных цепей и подводящих линий.



1 – микроскоп для позиционирования; 2 – контактный зонд-1; 3 – позиционер зонда-1; 4 – контактный зонд-2; 5 – позиционер зонда-2; 6 - векторный анализатор цепей; 7 – источник питания; 8 – генератор шума; 9 - анализатор спектра; 10 – отсек загрузки образцов.

Рисунок 1.92– Стенд для проведения зондовых измерений

1.5.3.6 Технологии измерения параметров СВЧ и радиофотонных интегральных схем

Одним из основных измерительных приборов, используемым для измерений на СВЧ является векторный анализатор цепей (ВАЦ), позволяющий измерить малосигнальные параметры рассеяния в широком частотном диапазоне. Современные приборы позволяют выполнить измерения в непрерывном диапазоне частот 10 МГц – 110 ГГц. Наиболее продвинутые модели объединяют в себе широкие функциональные возможности, позволяя выполнять широкий спектр СВЧ измерений:

- исследование диапазона рабочих частот;
- исследование диапазона промежуточных частот преобразователя;
- исследование коэффициента шума (КШ);
- исследование верхней границы линейности амплитудной характеристики (P1дБ);
- исследование уровня интермодуляционных искажения третьего порядка (IP3);
- исследование КСВН по входу и выходу;
- исследование частотной зависимости коэффициента преобразования смесителя;

Наиболее продвинутыми приборами такого класса являются СВЧ-анализаторы цепей серии PNA-X (см. рис. 1.93).



Рисунок 1.93 – Векторный анализатор цепей серии PNA-X

Объединение двух внутренних источников сигналов, схемы суммирования сигналов, приёмников для измерения S-параметров и шума, импульсных модуляторов и генераторов, гибкого набора коммутаторов и ВЧ-точек доступа создаёт мощную аппаратную платформу для широкого диапазона измерений линейных и нелинейных параметров, обеспечиваемых при одном наборе подключений к тестируемому устройству (ТУ). Такая гибкость достигается благодаря применению уникальной архитектуры измерительного прибора (см. рис. 1.94).

Каждый измерительный порт в данной архитектуре включает измерительные и опорные ответвители и приёмники, аттенюаторы источников и приёмников, а также втулки подачи смещения по постоянному току для обеспечения максимальной точности и гибкости измерений. Встроенная схема суммирования сигналов значительно упрощает установку для измерения интермодуляционных искажений и X-параметров. Внутренние импульсные модуляторы позволяют проводить интегрированные измерения импульсных ВЧ-сигналов в пределах полного диапазона частот работы прибора, исключая необходимость использования дорогих и громоздких внешних модуляторов.

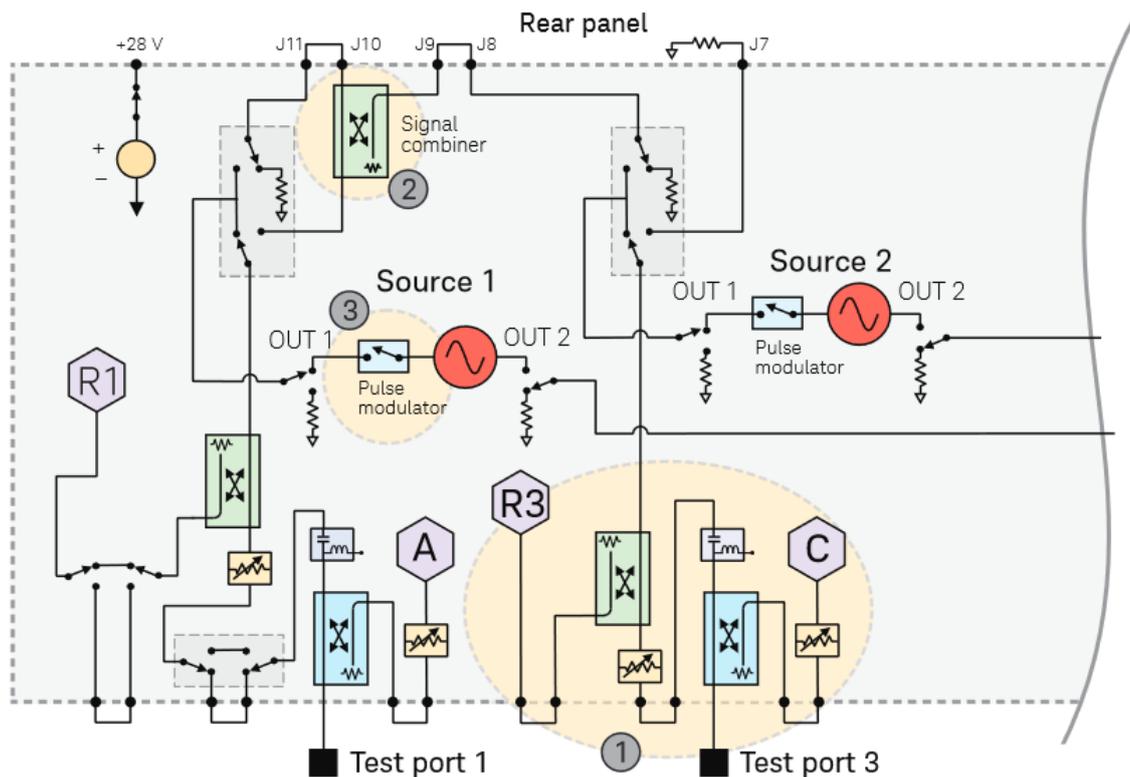


Рисунок 1.94 – Внутренняя архитектура анализатор цепей серии PNA-X

Переключаемые переключатели задней панели обеспечивают возможность добавления оборудования формирования сигналов или подключения дополнительного измерительного оборудования к тестируемому устройству (ТУ) без переподключения измерительных кабелей. Настройка импульсной синхронизации для импульсных модуляторов и внутренних затворов ПЧ упрощается благодаря использованию встроенных импульсных генераторов. Внутренние высокочувствительные приёмники при использовании с передовыми алгоритмами калибровки и измерений обеспечивают самые точные в отрасли измерения коэффициента шума.

Другим важным видом измерений, необходимых при разработке современных систем связи и радиолокации, а также радиофотонных систем следующего поколения являются измерения во временной области. Основным измерительным прибором для выполнения этого вида измерения является осциллограф (рис. 1.95). Однако, до недавнего времени приходилось использовать преобразователи для переноса спектра исследуемого сигнала вниз по частоте. Кроме того, уровень собственных шумов осциллографа (фазовых и амплитудных) не позволял исследовать современные высококачественные системы связи.

С появлением серии высокоскоростных осциллографов реального времени серии UXR возможности этого класса приборов существенно расширились.



Рисунок 1.95 – Осциллограф серии UXR

Осциллографы серии UXR обеспечивают:

- разрешение 10 разрядов и лучшую в отрасли целостность сигналов, позволяя использовать максимальное эффективное число разрядов (ENOB) при измерении параметров постоянно усложняющихся стандартов модуляции;
- четыре широкополосных канала для уменьшения временной ошибки при исследовании когерентных модулированных сигналов с двойной поляризацией;
- внутреннюю калибровку, гарантирующую повышение точности измерений без прерывания работы;
- сверхширокую полосу пропускания и существенное снижения уровня собственных шумов за счет использования многокристалльных модулей на основе фосфида индия собственной разработки Keysight.
- Превосходное качество сигнала с модулем вектора ошибки (EVM) менее 0,6 % для тестирования оборудования 5G New Radio (NR) FR2 и 1 % для технологий 802.11ay. То есть, теперь измерения EVM отражают истинные характеристики исследуемого устройства, исключая влияние искажений, порождаемых шумом измерительной системы.

Одной из уникальных возможностей осциллографов данного класса является возможность измерения фазовых шумов на гармонических сигналах методом кросс-корреляционной обработки. Это позволяет обеспечить уникальную чувствительность среди приборов подобного класса. Все эти возможности позволяют существенно ускорить разработку новых устройств для высокоскоростных цифровых систем и широкополосных беспроводных систем, а также для оптических и радиофотонных исследований.

Выводы и предложения по развитию ЦКП

Итак, проделанный анализ показал, что SiGe и Si микросхемы активно разрабатываются и производятся. Особенно перспективно использование этих материалов в радиофотонике и развитии технологии система - на - кристалле. Руководству ЦКП «Импульс» в рамках проекта по его поддержке целесообразно приобрести технологическое и измерительное оборудование для материально-технической поддержки работ по СнК с применением новых для центра материалов.

На основании выполненного аналитического обзора и анализа тенденций в области разработки СВЧ и радиофотонных ИС можно сформулировать следующие выводы и предложения по развитию и обновлению парка приборов ЦКП.

1. Современные системы связи базируются на использовании сигналов со сложной цифровой модуляцией. Применение традиционных измерительных приборов, использующих либо гармонические сигналы, либо простые виды модуляции зачастую ограничивает возможности исследователя по правильной характеристике разрабатываемых устройств. Для получения достоверных результатов, устройства и системы желательно исследовать на тех же сигналах, с которыми они должны работать в дальнейшем. Наиболее простым решением является проведение измерений во временной области с применением осциллографа и генератора сигналов произвольной формы. Однако, до недавнего времени динамический диапазон и чувствительность осциллографов не позволяли проводить измерения современных связных устройств. Осциллограф серии UXR снимает этот барьер, расширяя возможности этого класса приборов. Таким образом закупка этого класса приборов позволит расширить возможности ЦКП в области измерения перспективных систем на базе СВЧ и радиофотонных ИС. Другим важным преимуществом этого осциллографа является возможность расширения частотного диапазона до 33 ГГц в дальнейшем без замены аппаратной части, что также позволит снизить затраты на развитие инфраструктуры ЦКП в будущем. Из дополнительных опций, поставляющихся в базовой комплектации прибора, следует отметить возможность выполнения таких традиционных видов измерений, как измерение фазовых шумов на гармонических сигналах. Приборы для проведения такого вида измерений в ЦКП до сих пор отсутствовали, с приобретением UXR появляется возможность исследования ГУНов и синтезаторов частот в интегральном исполнении. А благодаря тому, что это измерения во временной области, становится возможным исследование этого вида шумов на сложных цифровых сигналах (джиттер).

2. Выполнение измерений СВЧ ИС в частотной области с применением векторного анализатора цепей – наиболее востребованный в ЦКП вид измерений всилу специфики

проводимых работ. Однако, в последнее время требования к объему проводимых измерений существенно возросли: необходимо измерять не только малосигнальные параметры, но и параметры на большом сигнале, интермодуляционные искажения, коэффициент шума. И все эти виды измерений должны выполняться зондовым способом, что зачастую не позволяет использовать большой парк приборов и существенно усложняет процедуру калибровки. Использование ВАЦ класса PNA-X позволит выполнять весь спектр измерений за одно подключение без разборки соединений и повторной калибровки, что очень важно при зондовых измерениях. Частотный диапазон прибора до 67 ГГц позволит в будущем добавить модули расширения и получить измерительную систему с непрерывным диапазоном частот 10 МГц – 110 ГГц, что также является важным требованием при характеристике СВЧ транзисторов, разработка которых традиционно ведется томскими предприятиями. Аппаратные опции, включенные в состав прибора, позволяют проводить измерения на сложных сигналах благодаря наличию прямых выходов тракта ПЧ, что является современным трендом, как уже было сказано ранее.

Наконец, комплектация прибора подобрана таким образом, чтобы иметь возможность дооснастить прибор оптическими преобразователями для выполнения исследований радифотонных МИС – это также является актуальным и востребованным направлением работ в ЦКП.

2 Составление перечня оборудования и проведение закупочных процедур

Настоящий раздел содержит отчет о выполнении п. 1.2 плана-графика выполнения работ по проекту.

2.1 Перечень оборудования

Проведенный аналитический обзор, предварительный анализ состояния оборудования ЦКП «Импульс» и намеченные работы по развитию услуг и обеспечению внутренних потребностей подразделений ТУСУРа в выполнении НИР определили перечень и параметры закупаемого оборудования. Его список приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – закупаемое оборудование 2019 года

№ п/п	Название	Стоимость, рубли	Выполняемые основные функции	Кол-во, шт.	Наличие аналога в ТУСУР
1	Планетарная шаровая мельница Pulverisette 7 Premium Line	1 919 355,00	Подготовка нанопорошков для подготовки чернил для 2D и 3D принтеров при реализации аддитивных технологий нанесения пленок металлов, диэлектриков, полупроводников.	1	нет
2	Установка быстрого термического отжига STE RTA150, SemiTEq	9 000 000,00	Проведение ранее слабо контролируемой операции отжига металлизации Cu и ее сплавов, барьерных переходов и др. в газовой среде и на воздухе.	1	нет
3	Лазерный анализатор размера частиц Analysette 22 Nano Tec	5 140 677,00	Освоение операции анализа качества нанопорошков и наночернил для более точного исследования реологических параметров чернил при реализации аддитивных технологий.	1	нет
4	Профилометр оптический 3D	4 000 000,00	Проведение ранее нереализуемых в ЦКП точных измерений толщины пленок металлов и др. материалов, наносимых электронным распылением, 2D принтерами.	1	нет
5	Анализатор цепей Keysight Technologies N5247B с комплектом аксессуаров.	37 304 843,00	Измерение параметров СВЧ компонент, узлов в четырехпортовом режиме в диапазоне до 67 ГГц.	1	нет
6	Установка плазмохимического травления STE ICP200E6 SemiTEq	19 000 000,00	Проведение недостающих операций плазмохимического травления полупроводниковых подложек GaAs, GaN, Si, SiGe и др.	1	нет
7	Электромагнитный вибрационный грохот ANALYSETTE 3 PRO	1 004 493,00	Предназначен для освоения операции непрерывного отсева сыпучих материалов по классам крупности частиц после помола.	1	нет
8	Осциллограф Keysight Technologies UXR0134A	11 998 173,00	Ранее недоступные измерения однократных быстрых процессов, в том числе для измерения амплитудных и фазовых шумов в диапазоне до 13 ГГц.	1	Имеется, но без функции анализа фазовых шумов
Итого:		89 367 541			

2.2 Проведение закупочных процедур

2.2.1 Планетарная шаровая мельница Pulverisette 7 Premium Line

Прибор поставлен по договору № ЕИ 76/967/19 от 29 ноября 2019 г., заключенного на основании пп. 5 п. 1 Раздела 2 Главы IV Положения о закупке товаров, работ, услуг федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (новая редакция) от 24.12.2018 года (далее-Положение о закупке) и Приказа № 967 от 08.11.2019 года. Назначение – подготовка нанопорошков для подготовки чернил для 2D и 3D принтеров при реализации аддитивных технологий нанесения пленок металлов, диэлектриков, полупроводников. Установка показана на рисунке 2.1.

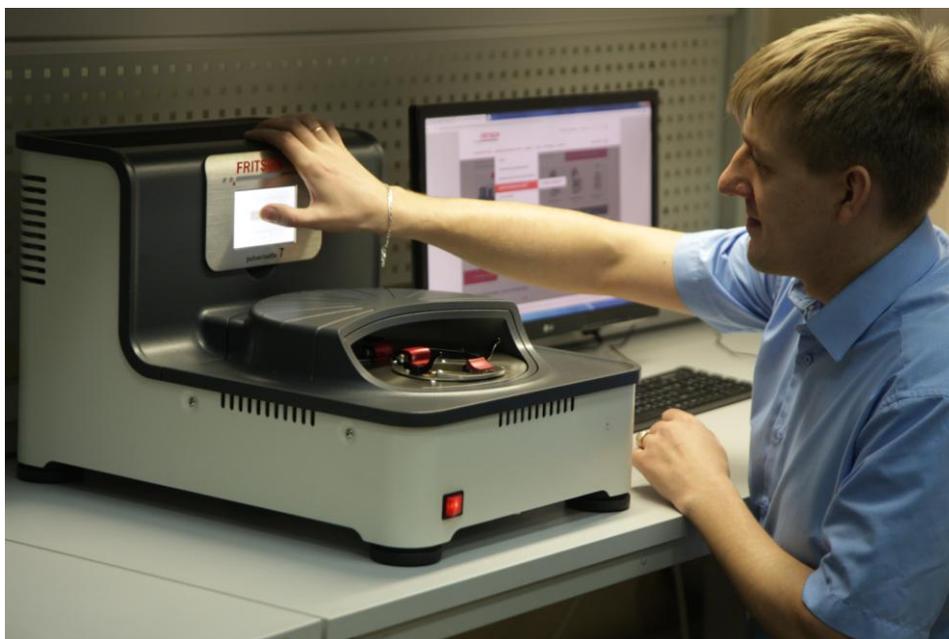


Рисунок 2.1 – Освоение планетарной шаровой мельницы Pulverisette 7 Premium Line

Характеристики и состав планетарной шаровой мельницы Pulverisette 7 Premium Line, описаны в спецификации на поставку:

Планетарная шаровая мельница «Pulverisette 7» PremiumLine (производитель FRITSCH) – 1 шт.

Принцип работы: высокоэнергетический удар мелющими шарами в стакане с измельчаемым материалом.

1. Типы измельчаемых материалов: твердые, среднетвердые, хрупкие, влажные.
2. Количество мест для размольных стаканов: 2.
3. Процесс измельчения: сухой/мокрый.

4. Измельчающие части: размольные стаканы и мелющие шары.
5. Материал измельчающих частей: агат, спеченный корунд, нитрид кремния, оксид циркония, нержавеющая сталь, закаленная сталь, твердый сплав – карбид вольфрама.
6. Размеры размольных стаканов: 20, 45, 80 мл.
7. Диаметр мелющих шаров: 0,1-20 мм.
8. Наличие возможности измельчения в среде защитного газа.
9. Наличие возможности измерения температуры и давления в размольном стакане с помощью аналитической измерительной системы EASY GTM.
10. Число оборотов планетарного диска, в диапазоне: 100-1100 об/мин.
11. Эффективный диаметр планетарного диска: 140 мм.
12. Наличие клиноременного привода стаканов для постоянного передаточного отношения.
13. Число оборотов должно регулироваться встроенным в мельницу микропроцессором.
14. Наличие цифровой индикации фактического числа оборотов несущего диска.
15. Наличие программируемого времени измельчения, пауз, и циклов измельчения.
16. Наличие интерфейсов USB, Bluetooth, Ethernet для передачи параметров процесса.
17. Наличие автоматической проверки параметров перед каждым измельчением.
18. Наличие системы защиты от перегрузки с автоматической регулировкой числа оборотов и индикацией.
19. Наличие обозримого сенсорного экрана, обеспечивающего простую и точную работу со структурой меню.
20. Материал корпуса прибора: ударопрочная пластмасса.
21. Камера измельчения должна иметь принудительную вентиляцию.
22. Тип исполнения прибора: настольный
23. Электропитание 220 (+10–15%) В, 50-60 Гц.
24. Срок гарантии: не менее 12 месяцев.
25. Макс. начальный размер частиц: не менее 5 мм.
26. Макс. количество пробы: не менее 70 мл.
27. Мощность вала двигателя: не менее 0,94 кВт.
28. Типичная продолжительность измельчения до необходимой для анализа тонкости: не более 4 мин.
29. Конечная степень измельчения: не более 0,1 мкм.

30. Мин. количество пробы: не более 0,5 мл.

2.2.2 Установка быстрого термического отжига STE RTA150, SemiTEq

Поставка осуществлена по договору № ЕИ-78/969/19 от 29.11.2019 г., заключенного на основании пп. 5 п. 1 Раздела 2 Главы IV Положения о закупке товаров, работ, услуг федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (новая редакция) от 24.12.2018 года (далее-Положение о закупке) и Приказа № 969 от 08.11.2019 года.

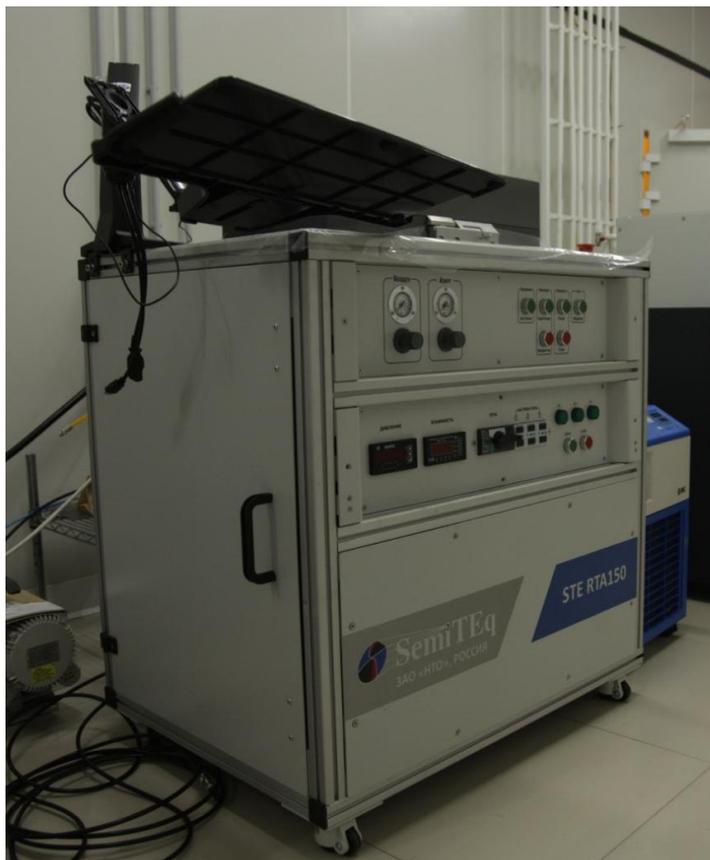


Рисунок 2.2 – Установка быстрого термического отжига перед началом монтажа рабочего места в помещении технологического участка

Копия договора на поставку установки, ее технические характеристики приведены в файле «Договор скан быстрый термический отжиг.pdf» в отчетной документации.

2.2.3 Лазерный анализатор размера частиц Analysette 22 Nano Tec

Прибор поставлен по договору № ЕИ 76/967/19 от 29 ноября 2019 г., заключенного на основании пп. 5 п. 1 Раздела 2 Главы IV Положения о закупке товаров, работ, услуг федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

(новая редакция) от 24.12.2018 года (далее-Положение о закупке) и Приказа № 967 от 08.11.2019 года (рисунок 2.3).

Лазерный дифракционный анализатор предназначен для измерений размеров частиц суспензий, эмульсий и порошкообразных материалов. Этот прибор необходим для анализа качества подготовки чернил для отладки технологических операций печати на 2D- принтерах по направлению «Аддитивные технологии».

Технические характеристики Analysette 22 Nano Tec

1. Метод анализа: рассеяние/дифракция лазерного излучения.
2. Общий диапазон измерения размеров частиц должен составлять от 0,01 до 2100 мкм, и должен перекрываться не более чем двумя индивидуальными диапазонами.
3. Общий диапазон измерения должен поддерживать до 110 каналов измерения.
4. Лазерный анализатор должен быть укомплектован двумя независимыми полупроводниковыми лазерами, один с зеленым излучением (532 нм, 7 мВт), второй с инфракрасным (850 нм, 15 мВт) (конструкция прибора должна позволять измерение с использованием обоих лазеров одновременно и без перемещения измерительной ячейки).
5. Автоматическое отключение лазеров при неиспользовании.
6. Фокусное расстояние линз Фурье 260 мм и 560 мм (зеленый или инфракрасный).
7. Диаметр лазерного пучка в линзе Фурье должен составлять не более 10 мм.
8. Расстояние между ячейкой и детектором: не менее 20 мм для зеленого лазера, не менее 540 мм для инфракрасного лазера.
9. Угловой диапазон измерения: 0,014° - 165°.
10. Наличие автоматической юстировка пучка лазерного излучения.
11. Типичная продолжительность измерения должна быть не более 5-10 секунд при регистрации результатов одного измерения и не более 2 минут при полном цикле измерения.
12. Возможность управления работой, изменения параметров и создания методики анализа с использованием персонального компьютера.
13. Блок диспергирования в жидкой среде должен удовлетворять следующим требованиям:
 - общий объем количества жидкости от 300 до 500 мл;
 - возможность использования в качестве дисперсионной среды бензина, спиртов и многих других органических растворителей;
 - должна присутствовать возможность регулирования интенсивности ультразвукового воздействия мощностью не более 100 Вт;

- наличие насоса для прокачки суспензий с возможностью регулирования мощности и скорости вращения двигателя;

- наличие автоматического управления режимами работы через компьютер;
- наличие системы удаления измеренного образца.

14. Блок диспергирования в сухой среде должен удовлетворять следующим требованиям:

- измерение пробы в ускоренном потоке воздуха;
- объем измеряемой пробы начиная от менее чем 1 см.куб до 100 см.куб.;
- высокочастотный лотковый питатель подачи проб;
- сопло Вентури с кольцевым зазором для эффективного разрушения агломератов;
- защита от размола частиц, за счет отсутствия отражающих поверхностей;
- автоматическое управление режимами работы через компьютер;
- система удаления измеренного образца;
- наличие возможности переналадки блока диспергирования в сухой среде в блок подачи пробы без диспергирования.

15. Предустановленное на управляющий компьютер программное обеспечение должно позволять осуществлять:

- анализ данных по теориям Фраунгофера и Ми;
- управление процессом измерения посредством стандартных операционных процедур;
- создание индивидуальных отчетов и схем;
- построение сравнительных кривых и графиков Мин-Макс;
- вывод данных в табличной форме свободно задаваемых пользовательских значений;
- статистическую обработку данных;
- ручной ввод сравнительных данных;
- учет результатов рассева;
- перерасчет результатов на другие методы измерения;
- экспорт данных в Excel™;
- поиск по базе данных на основе SQL.

16. Электропитание 220 (+10-15%) В, 50-60 Гц.

17. Необходимый ПК – стандартный ПК с ОС Windows, мин. 500 мБ свободного места на жестком диске, 2 Гб RAM, Windows 7, Windows 8, порт USB, монитор мин. 19“.



Рисунок 2.3 – Лазерный анализатор в упаковке

2.2.4 Профилометр оптический 3D

Прибор поставлен по договору № ЕИ - 75/966/19 на основании пп. 5 п. 1 Раздела 2 Главы IV Положения о закупке товаров, работ, услуг федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (новая редакция) от 24.12.2018 года (далее-Положение о закупке) и Приказа № 966 от 08.11.2019 года (см. рисунок 2.4).

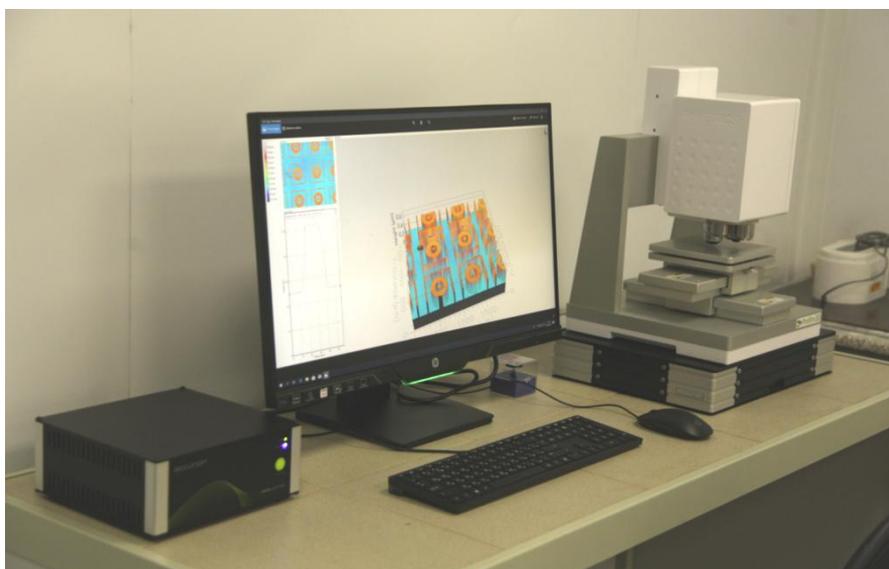


Рисунок 2.4 – Комплект, составляющий 3D оптический профилометр, модель Profilm3D

Характеристики 3D оптического профилометра, модель Profilm3D, описанные в спецификации на поставку, страна производитель – США, представлены ниже.

Profilm3D является оптическим профилометром с технологией VSI (вертикальное сканирование) и автофокусом и с технологией PSI (интерферометрия фазового сдвига).

В состав входят:

4х-позиционный револьвер для объективов с ручным поворотом;
XY автоматический столик;
интерферометрический объектив, Nikon 10x;
интерферометрический объектив, Nikon 50x;
антивибрационная платформа с блоком управления;
калибровочная пластина;
вычислитель.

Метрологические характеристики:

1. Диапазон значений измеряемой толщины в режиме WLI (интерферометрия белого света): 50нм – 10 000 000 нм (10мм). Погрешность измерения толщины – в соответствии с сертификатом калибровки.

2. Диапазон значений измеряемой толщины PSI (интерферометрия фазового сдвига): 0,1 нм – 3000 нм). Погрешность измерения толщины, в соответствии с сертификатом калибровки.

Технические характеристики:

1. Вертикальная скорость сканирования 12 мкм/сек
2. Диапазон коэффициента отражения образцов: не менее 0,05-100%
3. Диапазон перемещений XY автоматического столика: 100x100 мм.
4. Грубое перемещение по оси Z: 100 мм
5. Точное перемещение по оси Z: 500 мкм
6. Разрешение камеры: 5 Мегапикселей
7. Габаритные размеры:

длина 300 мм;

ширина 300 мм;

высота 550 мм;

масса 15 кг.

Интерферометрический объектив, Nikon 10x

1. Поле зрения: 2,0*1,7 мм
2. Минимально описываемый пикселем диаметр: 0,88 мкм

Интерферометрический объектив, Nikon 50x

1. Поле зрения: 0,4*0,34 мм
2. Минимально описываемый пикселем диаметр: 0,176 мкм

Антивибрационная платформа с блоком управления

1. Модель – Accurion Nano30.

Активная компенсация по шести степеням свободы.

Активная изоляция в диапазоне от 1Гц до 200Гц.

Пассивная изоляция свыше 200Гц.

Модель блока управления – Accurion Nano30.

2. Изоляционная производительность при колебаниях >5Гц: 23 dB (93%).
3. Изоляционная производительность при колебаниях >15Гц: 40 dB (99%).
4. Время реагирования: 300 мс.
5. Максимальная сила коррекции по вертикали: ±8 Н.
6. Максимальная сила коррекции по горизонтали: ±4 Н
7. Максимальный уровень компенсации при 2Гц и 8кг: 55 мкм/сек.
8. Максимальный уровень компенсации при 6Гц и 8кг: 350 мкм/сек.
9. Габариты и масса антивибрационной платформы Accurion Nano_30.
10. Габариты и масса блока управления антивибрационной платформой Accurion Nano_30.

Вычислитель

1. Монитор, с разрешением: 2560*1440 пикс.
2. Частота обновления изображения: 144 Гц.
3. Процессор серии: intel core i7
4. Техпроцес: 14 нм
5. Количество ядер: 8 шт.
6. Кэш L1, 256 КБ.
7. Кэш L2, 2 МБ.
8. Базовая частота процессора, 3200 МГц.
9. Графическое ядро – Интегрированное.
10. Память – DDR4, 2666DIMM объемом 16 Гб.
11. SSD SATA 6Gbit/s, объемом: 512 Гб.
12. Тип чипов памяти: MLC 3D V-NAND или MLC.
13. Максимальная скорость чтения 560 Мбайт/сек.
14. Чипсет Intel B360
15. Слотов памяти DDR4 – 4 шт.
16. Наличие: USB Клавиатура, USB Мышь.

Profilm-Analysis Software

1. Программное обеспечение для анализа Profilm - бессрочная лицензия, без сшивки
2. Включает два года Profilm Online – Advanced.
3. **UPG-Stitching** – Апгрейд ПО Profilm-Analysis Software для сшивки изображений.
4. **UPG-ColorImaging** – Опция цветного изображения Color Imaging (включая UPG Total Focus- изображения с большой глубиной резкости).



Рисунок 2.5 – Работа на профилометре Profilm3D

2.2.5 Анализатор цепей Keysight Technologies N5247B с комплектом аксессуаров

Прибор N5247B поставлен по договору № ЕИ - 80/971/19 на основании пп. 5 п. 1 Раздела 2 Главы IV Положения о закупке товаров, работ, услуг федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (новая редакция) от 24.12.2018 года (далее-Положение о закупке) и Приказа № 971 от 08.11.2019 года.

Комплект поставки обеспечивает все необходимые виды измерений из списка запросов внутренних пользователей по ряду проектов:

- анализатор цепей N5247B-423 (4-порта, прямой доступ к измерительным приемникам с передней панели, встроенные втулки питания по всем портам, ступенчатые аттенюаторы генератора и приемника по всем портам, встроенный сумматор для двухтоновых измерений, встроенный электронный тюнера для шумовых измерений);
- опция N5247B-020 (внешние входы промежуточной частоты);
- опция N5247B-021 (импульсный модулятор для первого внутреннего источника);
- опция N5247B-029 (приемник шума до 50 ГГц);
- опция S93029B (измерение коэффициента шума с векторной коррекцией);
- опция S93025B (импульсные измерения);
- опция S93082B (скалярные измерения смесителей);
- адаптер N1966A (ввод/вывод импульсов);
- измеритель мощности U8488A (термопарный, до 67 ГГц, с шиной USB)

Фотография рабочего места с прибором N5247B показана на рисунке 2.6.

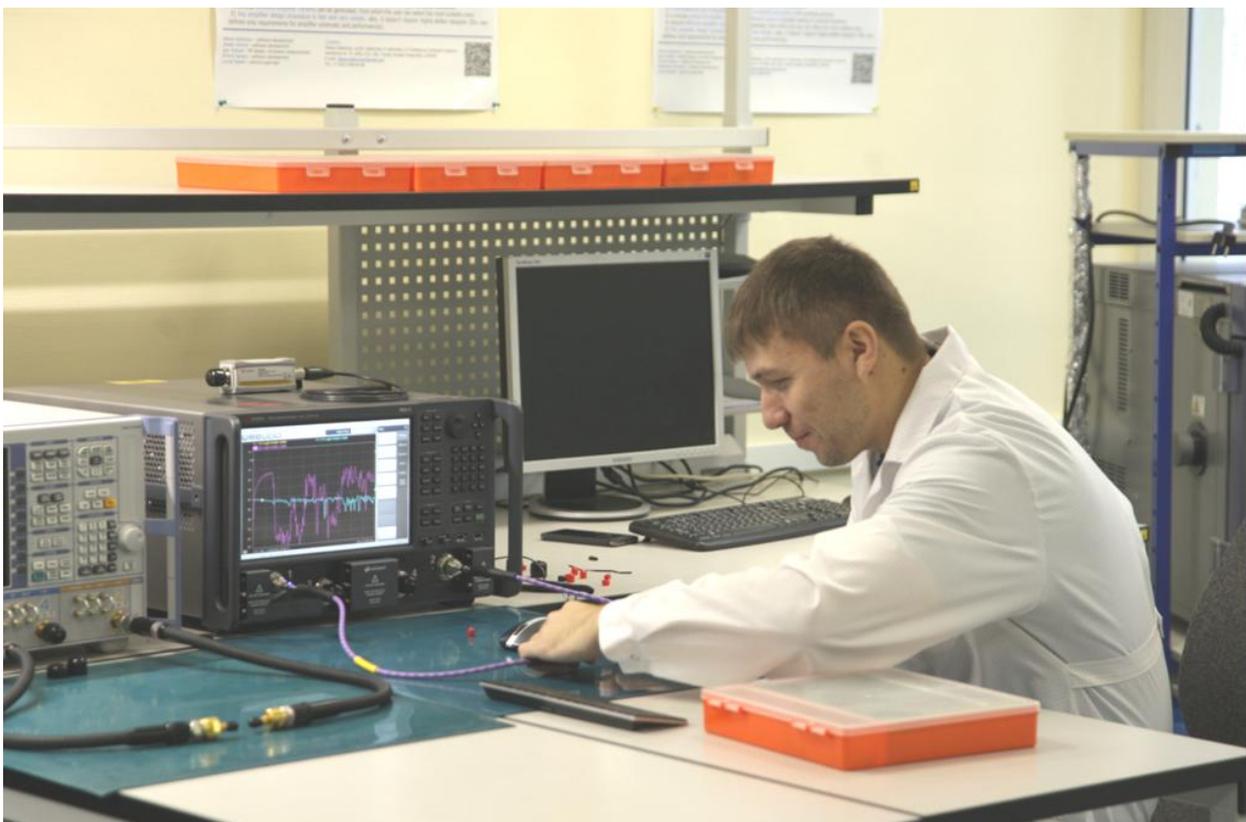


Рисунок 2.6 – Рабочее место с прибором N5247B

2.2.6 Установка плазмохимического травления STE ICP200E SemiTEq

Установка поставлена по договору № ЕИ - 87/1051/19 на основании пп. 5 п. 1 Раздела 2 Главы IV Положения о закупке товаров, работ, услуг федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (новая редакция) от 24.12.2018 года (далее-Положение о закупке) и Приказа № 1051 от 29.11.2019 года.

Назначение – автоматизированная система для проведения процессов плазмохимического травления в комбинированной плазме емкостного и индуктивного разряда. Реализованы современные особенности процессов контролируемого плазмохимического травления полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев. Установки серии STE ICP применимы для процессов с использованием как хлорной, так и фторной химии. В установках реализованы два типа возбуждения плазмы: емкостная (охлаждаемый стол-электрод) и индуктивная (планарный спиральный ICP электрод).

2.2.7 Электромагнитный вибрационный грохот ANALYSETTE 3 PRO

Прибор поставлен по договору № ЕИ 76/967/19 от 29 ноября 2019 г., заключенного на основании пп. 5 п. 1 Раздела 2 Главы IV Положения о закупке товаров, работ, услуг федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (новая редакция) от 24.12.2018 года (далее-Положение о закупке) и Приказа № 967 от 08.11.2019 года (рисунок 2.4).

Установка ANALYSETTE 3 PRO в упаковке и в собранном виде показана на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 – Электромагнитный вибрационный грохот

Технические характеристики

1. Метод анализа: просеив.
2. Состояние образца: сухой/мокрый.
3. Сухой просеив: диапазон измерения 32 мкм – 63 мм.
4. Мокрый просеив: диапазон измерения 20 мкм – 10 мм.
5. Прецизионный просеив: диапазон измерения 5 – 100 мкм.
6. Наличие точного цифрового таймера.
7. Наличие оптической индикации амплитуды.
8. Электромагнитный привод.
9. *Диапазон задаваемых значений амплитуды: 0,1 – 3 мм.*
10. Наличие цифрового управления.
11. Наличие различных типов регулировки амплитуды:
 - заданное номинальное значение амплитуды;
 - автоматическая регистрация амплитуды;

- автоматическая регулировка амплитуды;
- цифровая индикация действительного значения амплитуды;
- цифровая индикация числа колебаний сит в секунду;
- обработка всех параметров рассева с помощью предустановленного программного обеспечения.

12. Наличие возможности запоминания и вызова до 9 программ рассева.
13. Наличие возможности использовать аналитические сита с диаметром обечайки 100 мм, 200 мм и 8“.
14. Наличие возможности использования за один цикл работы до 10 аналитических сит одновременно.
15. Крепление колонны аналитических сит должно осуществляться при помощи высококачественных усиленных сталью пластиковых ремней.
16. Наличие возможности быстрого переоборудования на микромельницу, в том числе для работы на прецизионных микроситах.
17. Наличие предустановленного программного обеспечения на компьютер с программой, для автоматической обработки результатов рассева.
18. Наличие функции Power-Safe (режим экономии тока).
19. Управление компьютером должно осуществляться через интерфейс RS-232.
20. Наличие режима постоянной и периодической работы для микропрецизионного рассева.
21. Не требующего технического обслуживания грохот.
22. Электропитание 220 (+10-15%) В, 50-60 Гц.

2.2.8 Осциллограф Keysight Technologies UXR0134A

Прибор UXR0134A поставлен по договору № ЕИ - 80/971/19 на основании пп. 5 п. 1 Раздела 2 Главы IV Положения о закупке товаров, работ, услуг федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Гомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (новая редакция) от 24.12.2018 года (далее-Положение о закупке) и Приказа № 971 от 08.11.2019 года.

Внешний вид осциллографа показан на рисунке 2.8.

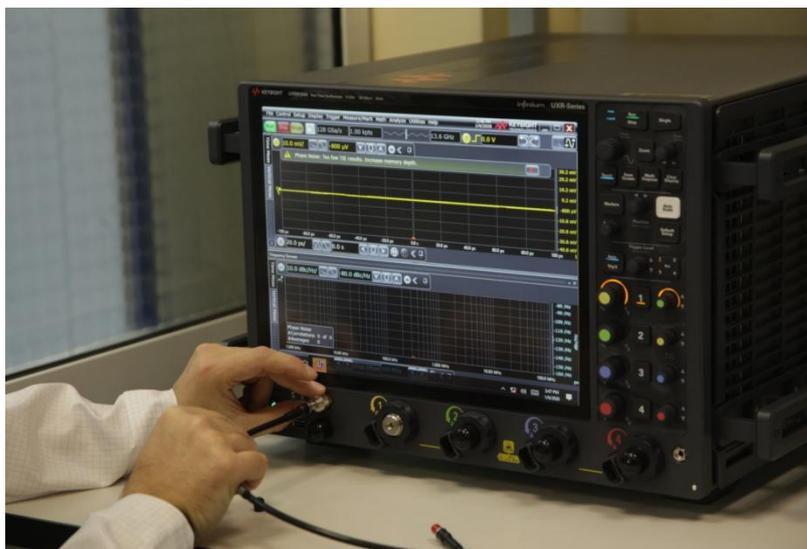


Рисунок 2.8 – Осциллограф Keysight Technologies UXR0134A

Осциллограф Keysight UXR0134A обладает следующими характеристиками особенностями:

- 1) Уровень шума – менее 150 мкВ (что очень важно при измерении малошумящих генераторов и усилителей на пластине зондовым способом);
- 2) Четыре независимых канала измерения (отсутствие режима интерливинга);
- 3) Разрядность АЦП – 10 бит;
- 4) Подтвержденная целостность сигнала благодаря высокому показателю эффективной разрядности (ENOB) АЦП – более 6,8;
- 5) Возможность расширения полосы пропускания вплоть до 33 ГГц (программным способом) и до 110 ГГц (аппаратным способом);
- 6) Возможность расширения памяти до 2 ГВыб/канал;
- 7) Возможность измерения параметров электрического сигнала (в базе) и оптического сигнала (с использованием блоков электрооптических преобразователей). Высокая точность измерений обеспечивается за счёт выполнения калибровки системы в метрологической лаборатории Keysight. Возможность когерентного анализа оптических сигналов с модуляцией OFDM (используется на магистральных линиях передачи данных);
- 8) Большое количество приложений для анализа/декодирования/синхронизации стандартных протоколов цифровой связи, тестирования на соответствие стандартов;
- 9) Возможность анализа ВЧ/СВЧ сигналов, широкополосных сигналов стандарта 5G, сигналов автомобильных радаров;
- 10) Режим цифрового преобразователя частоты. Позволяет анализировать высо-

кочастотный сигнал, преобразованный на нулевую ПЧ с использованием цифрового квадратурного преобразователя частоты. Данный режим за счёт децимации потока позволяет существенно уменьшить объем анализируемых данных.

11) Открытый интерфейс автоматизации, позволяющий удаленно управлять прибором, загружать на внешний ПК результаты измерений.

12) Возможность измерять фазовый шум источников сигнала (опция), необходимая для тестирования генераторов. Подавая исследуемый сигнал на несколько входов осциллографа можно выполнять процедуру кросс корреляции, которая позволяет существенно снизить пороговый уровень измеряемого фазового шума.

Выводы

Таким образом, в 2019 г. осуществлено пополнение состава технологического и измерительного оборудования ЦКП «Импульс». В связи с этим развернуты работы по подготовке методик измерения, проведения НИР. Одно из важных мероприятий предстоящего 2020 г. – поддержка новых лабораторий, возглавляемых молодыми кандидатами и докторами наук. Программы деятельности двух лабораторий ТУСУРа, руководимых к.т.н. Ерофеевым Е.В. и д.т.н. Заболоцким А.М., соответствуют направленности ЦКП «Импульс».

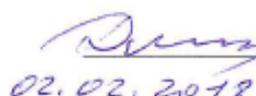
3 Проведение исследований по плану 2019 г.

Данный раздел отражает результаты работ, выполненных в соответствии с п. 1.3 плана-графика по проекту. План работы ЦКП «Импульс» и УНУ, составленный на 2018-2019 г., предусматривал обеспечение крупных работ, выполняемых в НИИ СЭС, НОЦ «Нанотехнологий», на кафедре Физической электроники по ФЦП, хозяйственным договорам, заявкам внешних и внутренних пользователей. План был размещен на сайте ТУСУР, раздел ЦКП: https://regulations.tusur.ru/storage/128881/plan_.pdf?1566812696:

План работы ЦКП «Импульс» на 2018-2019 гг.

№ п/п	Планируемые работы	Период выполнения	Требуемое оборудование
1	Обеспечение исследований, технологическая реализация и измерения перспективных однокристалльных передающих СВЧ модулей миллиметрового диапазона на основе полупроводников типа АЗВ5 для применения в современных информационно-коммуникационных системах нового поколения (5G) по ФЦП 31/17	01.01.2018-30.12.2019	Оборудование технологического сектора и сектора измерений СВЧ, 18 ед.
2	Исследование, технологическая реализация и обеспечение измерений отечественных электрооптических модуляторов на основе квантоворазмерного эффекта Штарка для высокоскоростных 400Гбит/с волоконно-оптических систем передачи информации по ФЦП 36/17	01.01.2018-30.12.2019	Оборудование технологического сектора и сектора измерений СВЧ, 18 ед.
3	Исследование ЭКБ радиофотонных систем формирования сигналов по заказу ЛЭМЗ-Т	01.01.2018-30.12.2018	Оборудование сектора измерений СВЧ, 4 ед.
4	Исследования характеристик синтезаторов частот (СЧ) на основе оптоэлектронных генераторов для радиотехнических систем с АФАР по х/д 22/18	01.01.2018-30.12.2018	Оборудование сектора измерений СВЧ, 4 ед.
5	Измерение параметров делителей-сумматоров в импульсном режиме по ФЦП 34,17	01.01.2018-30.12.2019	Оборудование сектора измерений СВЧ, 4 ед.
6	Краткосрочные работы в рамках хоздоговоров	01.01.2018-30.12.2019	По потребности

Руководитель ЦКП

 Н.Д. Малютин
02.02.2019

В 2019 г. проводились все работы плана. Приведем неполный перечень работ в виде аннотаций их результатов, окончание которых пересеклось по времени начала выполнения настоящего проекта по дооснащению ЦКП.

3.1 Обеспечение исследований, технологическая реализация и измерения перспективных однокристалльных передающих СВЧ модулей миллиметрового диапазона на основе полупроводников типа АЗВ5 для применения в современных информационно-коммуникационных системах нового поколения (5G) по ФЦП 31/17

Изготовление макетов СВЧ ЭМ производилось с использованием технологического и измерительного оборудования ЦКП «Импульс» и НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУР. Руководитель работ – к.т.н. **Ерофеев Е.В.**

Разработана технология формирования наноразмерных Т-образных затворов на поверхности полупроводниковых структур диаметром до 100 мм методами электронно-лучевой литографии на электронном микроскопе Zeiss Supra 55 с функцией электронного литографа (Raith 150 Two). Показано, что использование единовременного электронно-лучевого экспонирования с энергией электронов 30 кэВ в трехслойной резистивной маске ПММА 950К/LOR 5В/ПММА 495К минимально достижимый размер ножки Т-образного затвора может составлять 200 нм. На рисунке 3.1 представлено изображение внешнего вида изготовленного макета передающего СВЧ электронного модуля (ЭМ).

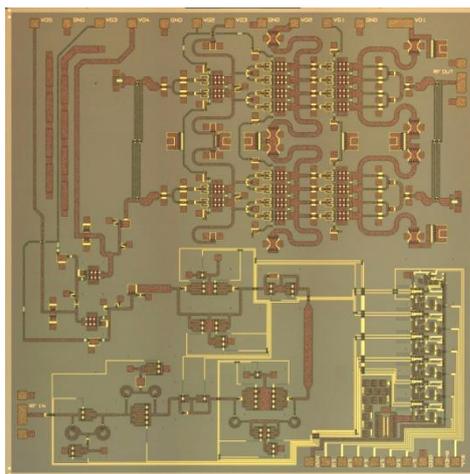


Рисунок 3.1 – Изображение внешнего вида изготовленных макетов передающего СВЧ

Проведены экспериментальные исследования технических характеристик десяти макетов СВЧ МИС фазовращателя, усилителя мощности и передающего СВЧ ЭМ. полностью удовлетворяют требованиям ТЗ. Выполнен комплекс экспериментальных работ по исследованию воспроизводимости параметров однокристалльных передающих СВЧ ЭМ, а также исследованию процента выхода годных кристаллов, изготовленных на полупроводниковых пластинах диаметром 100 мм. Для исследования параметров однокристалльных передающих СВЧ ЭМ, изготовленных на полупроводниковых пластинах диаметром 100 мм была разработана программа ЭВМ «Анализ S-параметров СВЧ МИС миллиметрового диапазона».

3.2 Исследование, технологическая реализация и обеспечение измерений отечественных электрооптических модуляторов на основе квантоворазмерного эффекта Штарка для высокоскоростных 400Гбит/с волоконно-оптических систем передачи информации по ФЦП 36/17

В аналитическом обзоре была показана актуальность исследований в области радиофотонных интегральных схем. В данном подразделе приведена аннотация решения одной из задач: разработки процесса низкотемпературного плазмохимического травления InP/InGaAsP гетероструктур в индуктивно-связанной плазме на основе Cl₂. Эта задача решалась в рамках ФЦП 36/17 по созданию электрооптического модулятора, в том числе с использованием оборудования ЦКП. Автор подраздела к.т.н. **Ишуткин С.В.**, активный сотрудник НОЦ «Нанотехнологии» и ЦКП «Импульс».

В настоящее время оптоэлектроника является динамично развивающимся направлением науки и техники. При создании интегральных оптоэлектронных устройств InP является одним из базовых материалов, позволяющим создавать как активные, так и пассивные элементы. Создание оптоэлектронных устройств зачастую требует формирования волноводных структур с высоким аспектным соотношением и гладкой морфологией поверхности, при этом ширина элементов может быть менее 1 мкм. Для формирования таких структур широкое распространение получил метод плазмохимического травления (ПХТ) в индуктивно-связанной плазме. Преимуществом данного метода является возможность независимого управления плотностью и энергией ионов плазмы, что позволяет гибко управлять режимами травления. Для ПХТ InP наибольшее распространение получили процессы с использованием газовых смесей на основе CH₄/H₂ и Cl₂. При травлении InP в хлорсодержащей плазме, для получения профиля структур с высоким аспектным соотношением в состав газовой смеси вводятся пассивирующие добавки N₂, O₂ и др. Однако процессам на основе хлора, также присущи свои недостатки. Образующиеся в процессе травления InCl_x соединения обладают низкой летучестью при комнатной температуре, что может приводить к высокому уровню шероховатости поверхности формируемых структур. Для решения данной проблемы обычно перед травлением подложка нагревается до 150-200 °С и выше, что повышает требования к установке для травления. В работах некоторых авторов показано, что можно эффективно управлять десорбцией InCl_x соединений с поверхности подложки за счет усиления роли физической составляющей процесса травления. Тем самым травление InP можно выполнять без предварительного нагрева подложки.

Сотрудниками ТУСУРа совместно с коллегами из Микрана и ИОА СО РАН был разработан процесс плазмохимического травления гетероструктур на основе InP в индуктивно-связанной плазме Cl₂/Ar/N₂. Разработанный процесс травления характеризуется высокой анизотропностью (угол наклона профиля травления достигает 87°) и низкой селек-

тивностью по отношению к слоям InGaAs и InGaAsP. Скорость травления гетероструктуры достигает 0,55...0,6 мкм/мин, при этом глубина нарушенного слоя не превышает 30 нм (рисунок 3.2). Преимуществом процесса также является отсутствие необходимости предварительного разогрева подложки.

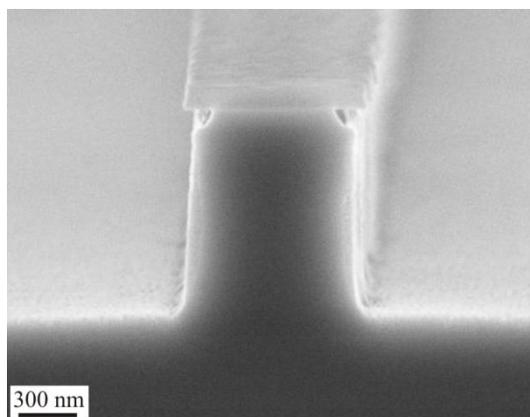


Рисунок 3.2. Микроскопическое изображение поперечного сечения гетероструктуры на основе InP после ПХТ в плазме Cl₂/Ar/N₂

Также была исследована возможность удаления образовавшегося в процессе травления нарушенного слоя. С этой целью травление гетероструктуры было выполнено в несколько стадий (таблица 3.1). На первом этапе выполнялось травление гетероструктуры на общую глубину 1,7–2,5 мкм (стадия main etching). Затем проводились один или несколько циклов кратковременного травления с предварительным охлаждением образцов до комнатной температуры (стадия polishing).

Таблица 3.1. Зависимости глубины травления гетероструктуры в плазме на основе Cl₂/Ar/N₂ и толщины нарушенного слоя после травления с использованием многостадийного процесса.

Process #		P_{RF} , W	t_{etch} , s	h_{total} , μm	h_{etch} , μm	h_{grass} , μm
1	Main etching	75		1.76	1.52	0.27
	Polishing	65	30	1.77	1.66	0.11
		65	3 x 30	1.82	1.71	0.1
2	Main etching	100		2.47	2	0.47
	Polishing	65	30	2.47	2.18	0.29
		65	3 x 30	2.42	2.2	0.22
3	Main etching	100		2.47	2	0.47
	Polishing	100	30	2.45	2.22	0.23
		100	3 x 30	2.44	2.36	0.08

Как видно из данных таблицы введение циклов кратковременного травления приводило к последовательному уменьшению толщины нарушенного слоя (h_{grass}). Наиболее эффективно процесс протекал при равных величинах P_{RF} мощности на электроде смещения в основном процессе и циклах травления (process #3). При этом общая глубина травления (h_{total}) во всех трех режимах практически не изменялась. Это свидетельствует о том, что при температуре подложки близкой к комнатной, травление массива материала практически отсутствует, а травится только нарушенный слой (Рисунок 2). Введение стадии полировки позволяет значительно расширить возможности управления параметрами основного процесса травления.

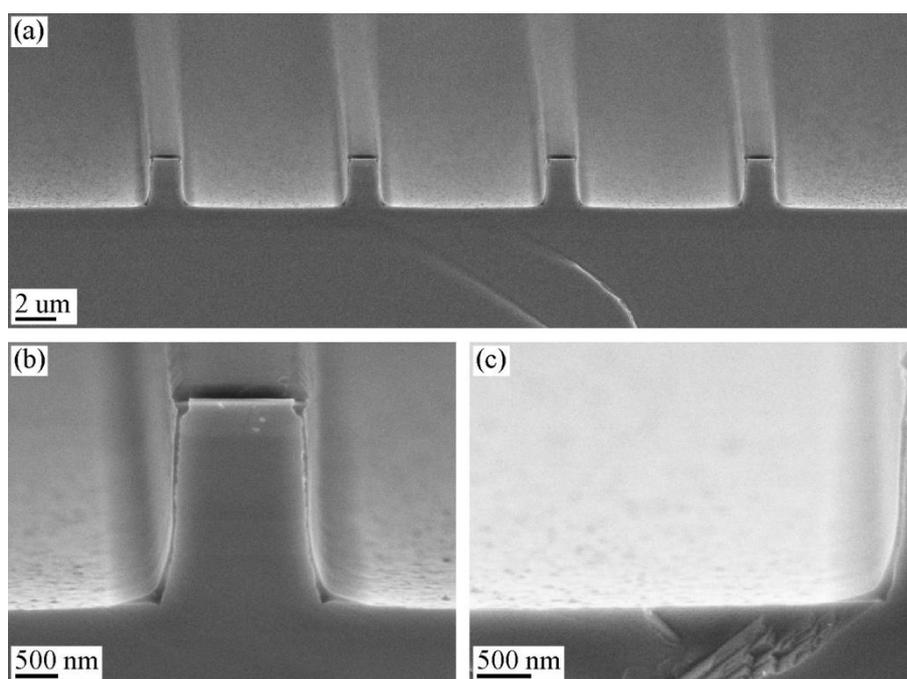


Рисунок 3.3 – Микроскопические изображения поперечного сечения структур сформированных после ПХТ в плазме на основе $\text{Cl}_2/\text{Ar}/\text{N}_2$ с использованием многостадийного процесса #3: (а), (b) оптические волноводы, (с) травленая поверхность.

Для формирования тестовых оптических и электрооптических элементов сотрудниками ТУСУРа совместно с коллегами из Микрана и ИОА СО РАН был составлен технологический маршрут, включающий в себя три стадии плазмохимического травления InP/InGaAsP гетероструктуры. Разработанный технологический маршрут состоит из следующих блоков технологических операций:

- 1) формирование омических контактов TiPtAu к слою p -типа проводимости;
- 2) плазмохимическое травление полупроводника p -типа проводимости по маске сформированного металлического омического контакта;
- 3) формирование первой диэлектрической маски нитрида кремния;

- 4) плазмохимическое травление полупроводника i-типа проводимости по маске сформированного диэлектрического рисунка;
- 5) формирование второй диэлектрической маски нитрида кремния;
- 6) плазмохимическое травление полупроводника n-типа проводимости по маске сформированного диэлектрического рисунка;
- 7) формирование омических контактов AuGeNi к полупроводникам n-типа.

С использованием разработанного технологического маршрута на пластинах были изготовлены следующие тестовые образцы оптических и электрооптических элементов электрооптических модуляторов:

- интегральные оптические волноводы шириной 2 мкм различных длин (рисунок 3.4);
- интегральные Y-делители/сумматоры (рисунок 3.5);
- интегральные ММИ-делители/сумматоры (рисунок 3.6);
- фазосдвигающая секция (рисунок 3.7).

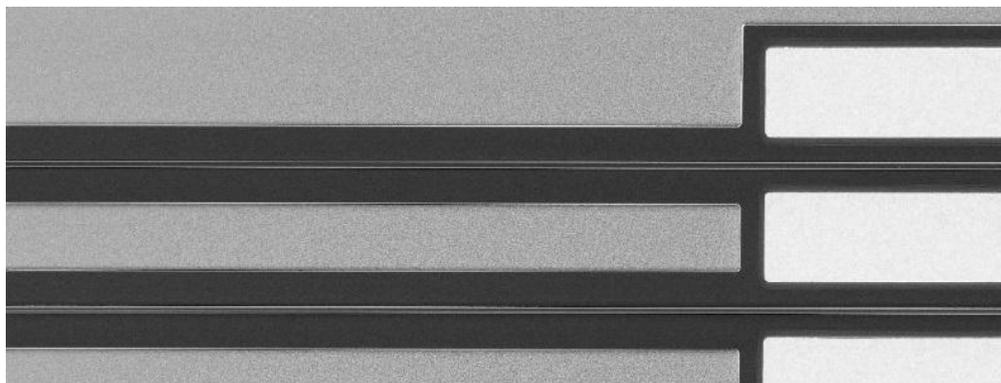


Рисунок 3.4 – Микроскопическое изображение интегральных оптических волноводов

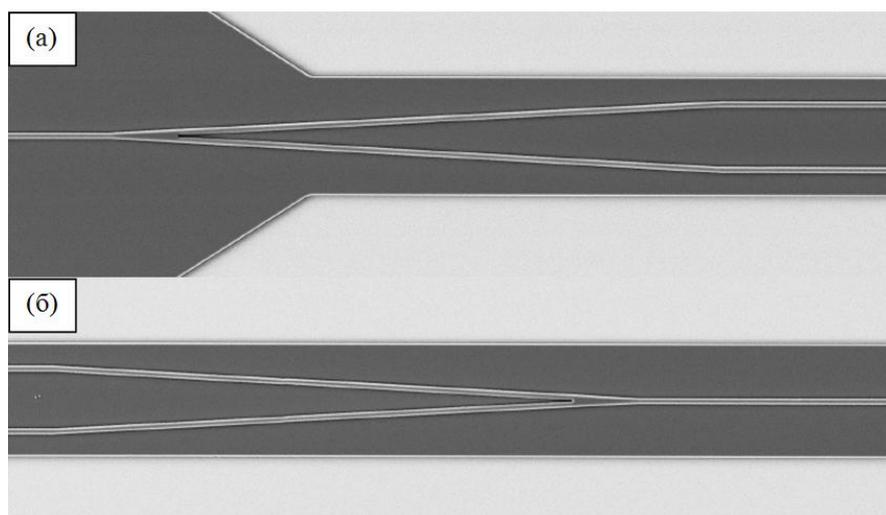


Рисунок 3.5 – Микроскопическое изображение интегрального Y-делителя (а) и Y-сумматора (б).

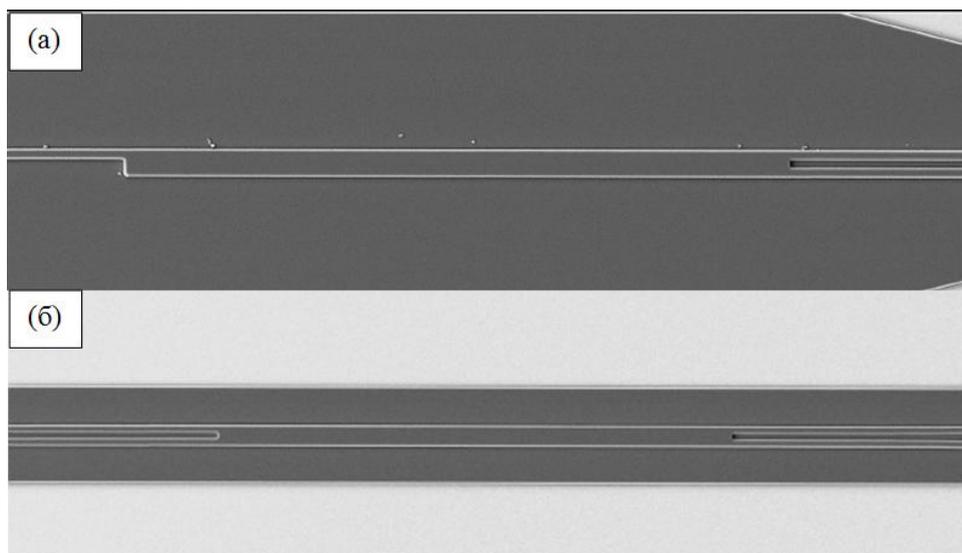


Рисунок 3.6 – Микроскопическое изображение интегрального ММИ-делителя (а) и ММИ-сумматора (б)

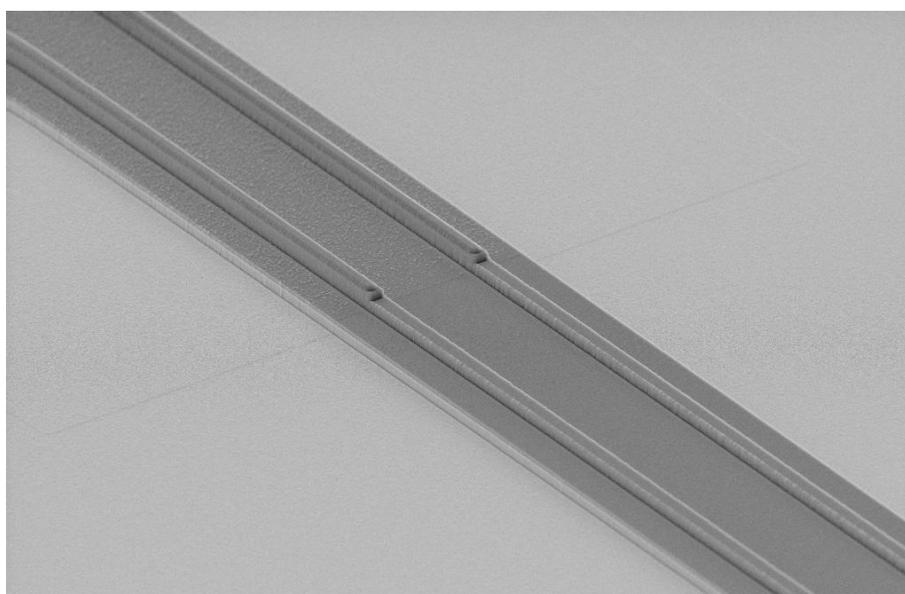


Рисунок 3.7 – Микроскопическое изображение отрезка фазосдвигающей секции электрооптического модулятора

На базе технологического маршрута изготовления тестовых оптических и электрооптических элементов сотрудниками ТУСУРа совместно с коллегами из Микрана и ИОА СО РАН был разработан технологический маршрут изготовления электрооптических модуляторов. Техмаршрут состоит из следующих блоков технологических операций:

- 1) формирование омических контактов TiPtAu к слою p-типа проводимости (рисунок 3.8);
- 2) плазмохимическое травление полупроводника p-типа проводимости по маске сформированного металлического омического контакта (рисунок 3.9);

- 3) формирование первой диэлектрической маски нитрида кремния;
- 4) плазмохимическое травление полупроводника i-типа проводимости по маске сформированного диэлектрического рисунка (рисунок 3.10);
- 5) формирование второй диэлектрической маски нитрида кремния;
- 6) плазмохимическое травление полупроводника n-типа проводимости по маске сформированного диэлектрического рисунка (рисунок 3.11);
- 7) формирование омических контактов AuGeNi к полупроводникам n-типа (рисунок 3.12);
- 8) планаризация подложек пленкой ВСВ (рисунок 3.13);
- 9) плазмохимическое травление пленки ВСВ до вскрытия омических контактов к полупроводникам p-типа проводимости (рисунок 3.14);
- 10) формирование тонкопленочного резистора;
- 11) формирование «толстой» металлизации на основе золота методом электрохимического осаждения (рисунок 3.15);
- 12) разделение подложки на отдельные кристаллы электрооптических модуляторов.

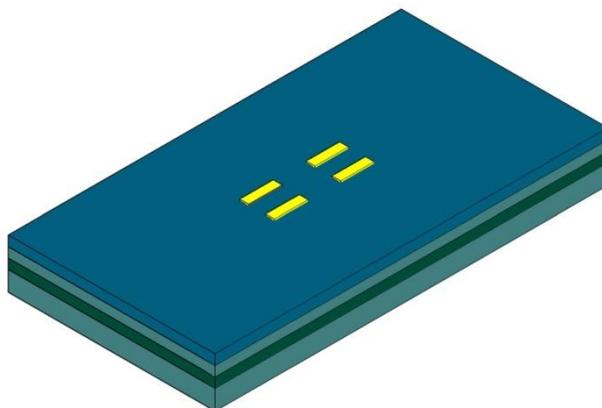


Рисунок 3.8 – Формирование омических контактов TiPtAu к полупроводникам p-типа проводимости

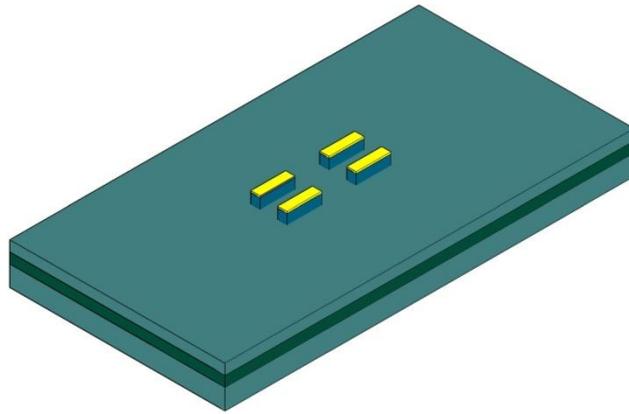


Рисунок 3.9 – Результат плазмохимического травления полупроводника р-типа проводимости

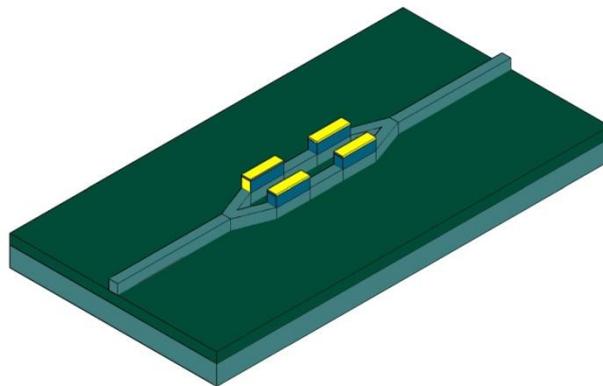


Рисунок 3.10 – Результат плазмохимического травления полупроводника i-типа проводимости по маске сформированного диэлектрического рисунка

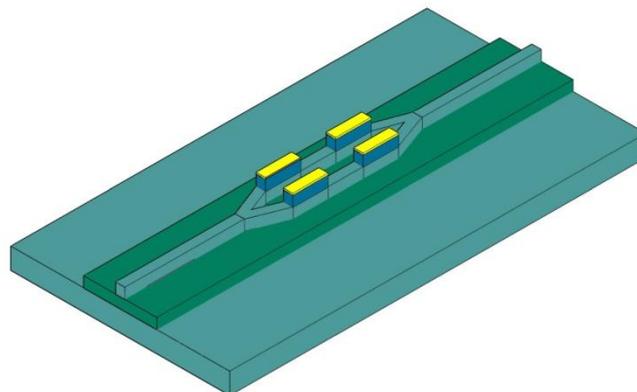


Рисунок 3.11 – Результат плазмохимического травления полупроводника n-типа проводимости по маске сформированного диэлектрического рисунка

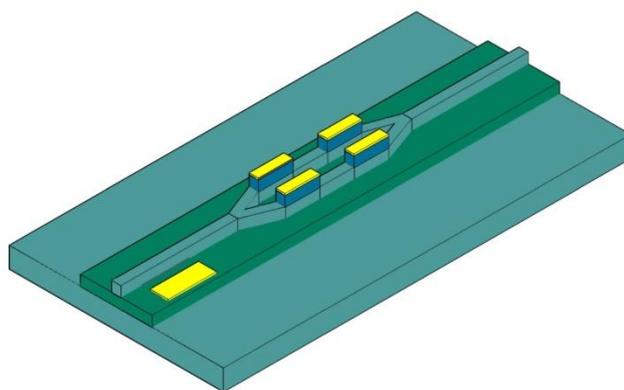


Рисунок 3.12 – Формирование омических контактов AuGeNi к полупроводникам n-типа проводимости

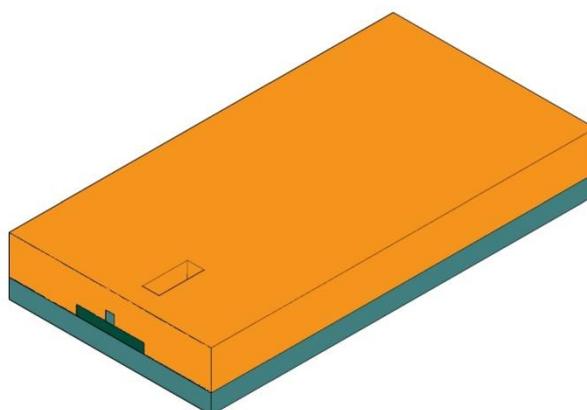


Рисунок 3.13 – Результат планаризации подложки пленкой ВСВ и вскрытия окон

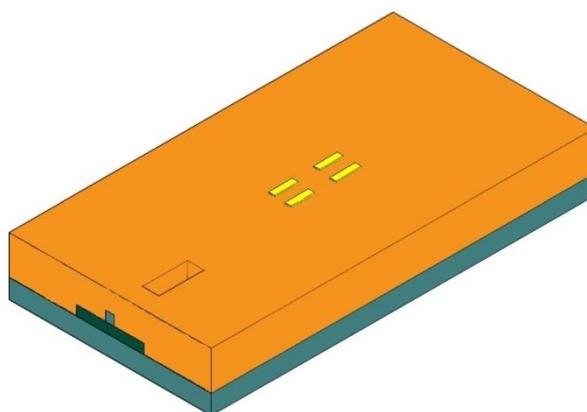


Рисунок 3.14 – Результат плазмохимического травления пленки ВСВ

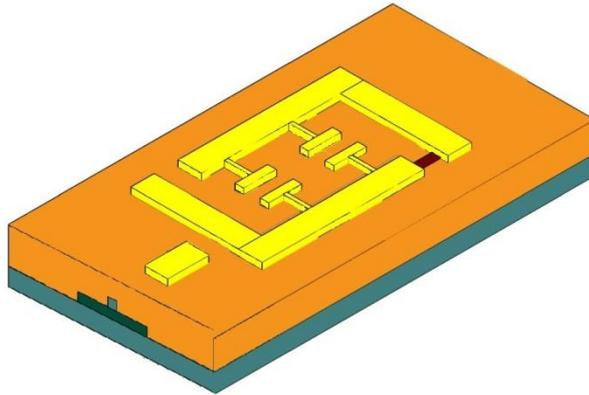


Рисунок 3.15 – Результат формирования всех топологических слоев электрооптического модулятора

По сформированному техмаршруту были изготовлены несколько подложек с электрооптическими модуляторами (рисунки 3.16 и 3.17). Проводится оценка параметров полученных образцов модуляторов.

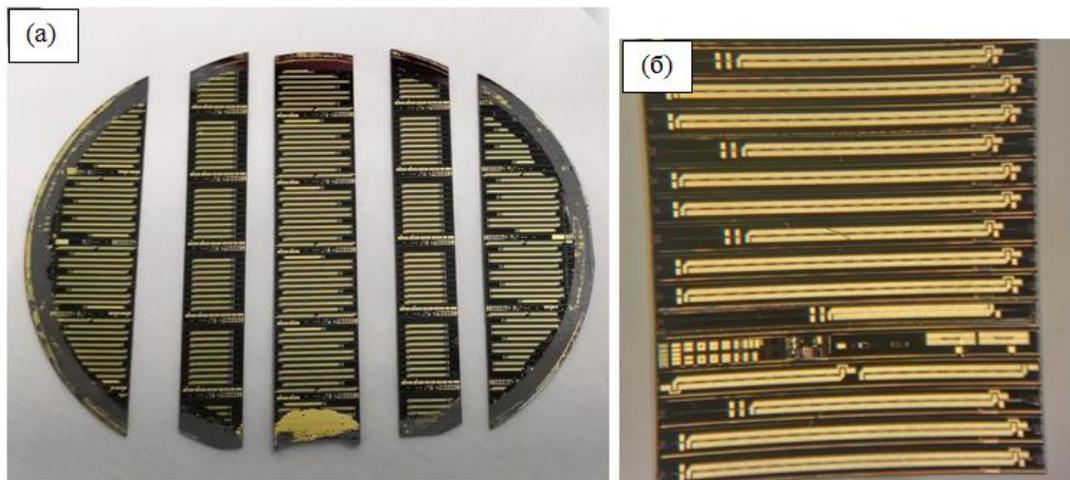


Рисунок 3.16 – Фотографии полупроводниковой пластины (а) и блока кристаллов (б) со сформированными ВРСК модуляторами и тестовыми элементами после разделения по торцам кристаллов.

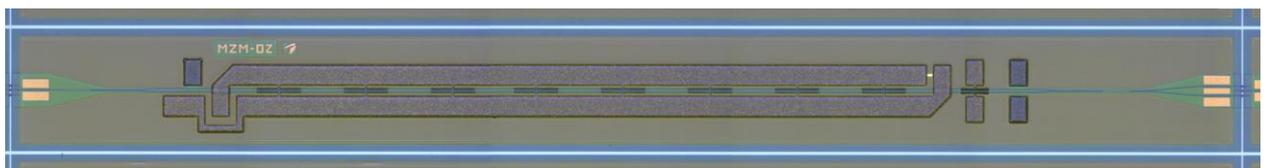


Рисунок 3.17 – Микроскопическое изображение отдельного ВРСК модулятора на подложке.

3.3 Разработка технологии формирования оптически прозрачных электропроводящих покрытий

Данный подраздел представил **Жидик Ю.С.**, защитивший в 2019 г. кандидатскую диссертацию.

В настоящее время все большую значимость приобретает новое направление развития электроники не на основе полупроводниковых соединений, а на основе прозрачных оксидных полупроводниковых материалов – прозрачная электроника [174 - 176]. Основными сферами применения прозрачной электроники являются сенсорные и гибкие дисплеи, органическая электроника, тонкопленочная фотовольтаика, различные электронные и оптические покрытия для полупроводниковой оптоэлектроники и радиофотоники.

Принимая во внимание отсутствие результатов комплексных исследований электрофизических свойств широкозонных оксидных полупроводниковых материалов в рассмотренной научно-технической литературе [174 - 182], посвященной данному вопросу, за отчетный период сотрудниками ЦКП «Импульс» совместно с коллегами из Томского политехнического университета были проведены исследования влияния плазмы газового разряда на процесс формирования пленок сложного состава и их свойства, результаты которых отражены в работах коллективов [183] и [184]. По проведению данных исследований были даны рекомендации по напылению пленок прозрачных проводящих оксидов для достижения их наилучших электрофизических свойств.

Полученные рекомендации были применены при разработке технологии получения пленок оксидов металлов Sn, In, Zn методом ионно-плазменного распыления и исследование их электрофизических свойств. Были подобраны технологические режимы получения пленок In_2O_3 , SnO_2 , ZnO методом реактивного магнетронного распыления без высокотемпературного нагрева и отжига подложек и в последовательном подборе технологических режимов реактивного магнетронного распыления мишеней Sn, In, Zn в кислородосодержащей атмосфере [185]. На первом этапе, при распылении металлических мишеней Sn, In, Zn в атмосфере смеси газов $\text{Ar}(80\%)/\text{O}_2(20\%)$, была определена номинальная мощность газового разряда, позволяющая достичь оптимальной скорости роста пленок 2 – 3,5 Å/с. Оптимальный режим напыления пленок был достигнут при мощности разряда 100 Вт, время напыления пленок толщиной 130 нм составило 12 минут. Следующий этап заключался в подборе оптимального соотношения газов Ar/O_2 в составе рабочей смеси. Подобранные соотношения рабочей смеси газов Ar/O_2 , дающие наилучший результат параметров получаемых пленок толщиной 130 нм, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры полученных пленок прозрачных проводящих оксидов

Состав пленок	Рабочая смесь газов	Поверхностное сопротивление, КОм/□	Интегральный коэффициент пропускания в диапазоне 300 – 600 нм
In ₂ O ₃	Ar(84%)/O ₂ (16%)	0,28	0,82
ZnO	Ar(90%)/O ₂ (10%)	4,3	0,87
SnO ₂	Ar(92%)/O ₂ (8%)	100	0,76

Полученные результаты показывают, что даже при очень тщательном подборе состава рабочей атмосферы при реактивном ионно-плазменном распылении мишеней Sn, In и Zn без проведения высокотемпературного отжига получаемое сопротивление пленок прозрачных проводящих оксидов выше, нежели при их синтезе на нагретые подложки или с проведением последующего отжига. Было отмечено, что из исследуемых пленок прозрачных проводящих оксидов наибольшим потенциалом обладают пленки оксида индия, легированного оловом (пленки ИТО).

Последующая корректировка технологии получения пленок ИТО заключалась в введении отжига пленок после их осаждения. Путем проведения исследований влияния температуры отжига пленок ИТО и состава атмосфере в среде которой отжиг пленок производился был выбран режим, обеспечивающий величину удельного сопротивления $1,8 \cdot 10^{-4}$ Ом·см при интегральном коэффициенте пропускания синтезированных пленок в видимой области спектра на уровне 85% [186]. Таким образом, был разработан метод низкотемпературного формирования высококачественных пленок ИТО на поверхности термочувствительных подложек. Полученные данные представляют физическую основу создания технологии формирования элементов оксидной электроники, в том числе на гибких и термочувствительных подложках.

Для получения пленок ИТО с еще более меньшим значением удельного сопротивления были приведены обширные исследования электрофизических свойств пленок ИТО подвергнутых высокотемпературному отжигу в кислородосодержащей атмосфере [187 - 189]. Было показано, что исходные пленки ИТО, на подвергавшиеся высокотемпературному отжигу имеют полупроводниковый тип электропроводности и аморфную структуру. При этом, последующий отжиг пленок при температуре 600°C способствует образованию кристаллической фазы, увеличению концентрации и подвижности носителей заряда. Все это увеличивает их электропроводность на два порядка. Было выявлено, что высокотемпературный отжиг пленок ИТО после их напыления способствует смене типа проводимости, в

результате чего пленки ИТО проявляют электрофизические свойства металлов [187]. Рассчитанный уровень Ферми исследуемых пленок ИТО на 0,09 эВ находится выше зоны проводимости, что указывает на вырождение пленок ИТО при проведении высокотемпературного отжига [188]. Исследование электрофизических свойств пленок ИТО показало их применимость помимо областей оптоэлектроники и оксидной электроники в качестве активного слоя газочувствительных сенсоров [189].

3.4 Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств

Работы и некоторые результаты данного подраздела проводились в 2019 г. и в своей финальной стадии запуска автоматизированной линии по сборке нитевидныхборок светодиодов имеют большое значение для Томской области. Подраздел подготовлен руководителем УНУ «2D-плоттер» д.т.н. **Туевым В.И.**

Основание для проведения ПНИЭР: Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы», утвержденная постановлением Правительства Российской Федерации от 3 октября 2015 г. № 1060.

Целью ПНИЭР являются:

1. Развитие имеющегося научного задела до стадии готовности к практическому применению (использованию) технологии интеллектуального роботизированного производства светодиодного излучающего элемента и ламп на его основе.
2. Создание инновационной продукции отечественного производства, включая получение охраноспособных результатов интеллектуальной деятельности и их правовую охрану на светодиодный излучающий элемент и лампы на его основе.

По плану 2019 г. с использованием оборудования УНУ и ЦКП, а также дополнительного оборудования, приобретенного по внебюджетной составляющей финансирования проекта, проведены исследования и получены следующие перспективные результаты для решения задач проекта:

- исследована зависимость сопротивления печатных проводников от количества слоев нанесения раствора материала;
- подтверждена возможность соединения электрических выводов кристалла с печатным проводником методом ультразвуковой сварки;
- определены исходные установки устройства печати для получения заданных геометрических параметров проводников;

- подтверждена возможность электрического соединения печатного проводника с металлическим наконечником основания;

- подтверждена возможность соединения электрических выводов кристалла с печатным проводником методом приклеивания электропроводящим клеем.

Далее приведены результаты проведенных работ.

Светодиодный излучающий элемент (СИЭ) состоит из несущей конструкции (далее НК), светодиодного кристалла (далее кристалла), люминофорной композиции (далее ЛК).

На основании результатов моделирования тепловых характеристик СИЭ с различным материалом основания установлен материал основания – керамика.

Подготовка основания для нанесения проводников печатными методами осуществлялась в следующей последовательности:

- Промывка в растворе NH_4OH (5%), $t= 50\text{C}$, время – 5мин. (рис. 3.18).
- Промывка в ультразвуковой ванне. Раствор NH_4OH (5%), $t= 50\text{C}$, время – 5мин (рисунок 3.19).
- Промывка дважды в дистиллированной воде.
- Промывка 5 минут в растворе H_2O_2 (5%).
- Промывка дважды в дистиллированной воде.
- Промывка 5 минут в растворе уксусной кислоты (5%).
- Промывка дважды в дистиллированной воде.
- Высушивание на воздухе при комнатной температуре.
- Плазменная очистка (рисунок 3.20).

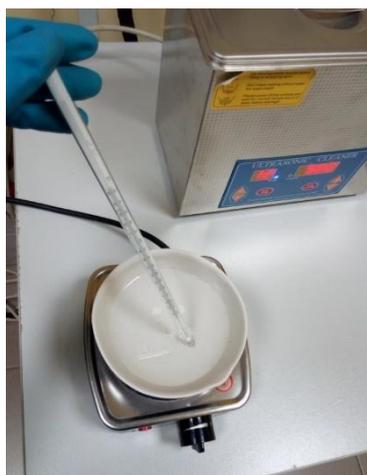


Рисунок 3.18 – Установка для промывки



Рисунок 3.19 – Установка для промывки в ультразвуковой ванне (дополнительное оборудование УНУ)



Рисунок 3.20– Установка плазменной очистки (дополнительное оборудование ЦКП)

Исследования зависимости сопротивления печатных проводников от количества слоев нанесения раствора материала проведены при одно -, двух -, трех- и четырехслойном нанесении раствора материала. Результат печати проводников на подложке представлен на рисунке 3.21. Первые однослойные токопроводящие дорожки по окончании печати приобрели металлический цвет, что указывает на их высыхание.

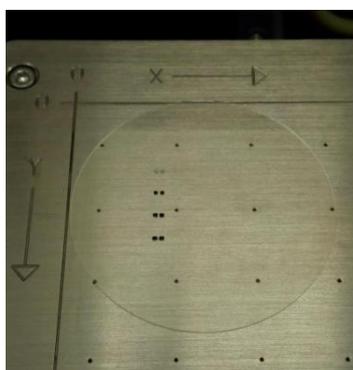


Рисунок 3.21– Результат печати проводников на подложке

Образец высушивали в ИК-конвекционной печи АПИК 1.0 (рисунок 3.22), при температуре 150°C в течении 15 минут.

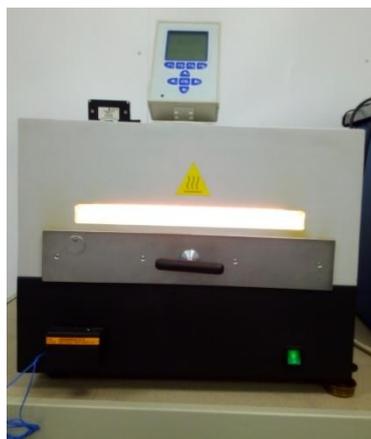


Рисунок 3.22– ИК-конвекционная печь АПИК 1.0

Сопротивление проводников определяли с использованием прибора Keithley 2410 1100V source meter. Результаты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты оценки сопротивления печатных проводников

Тип токопроводящей дорожки	Сопротивление, Ом
Однослойная	Не постоянное, больше 2
Двухслойная	2
Трехслойная	1,3
Четырехслойная	1,1

Фотография дорожек при четырехслойном нанесении приведена на рис. 3.23. Здесь и далее фотографии приведены при увеличении в 40 раз.

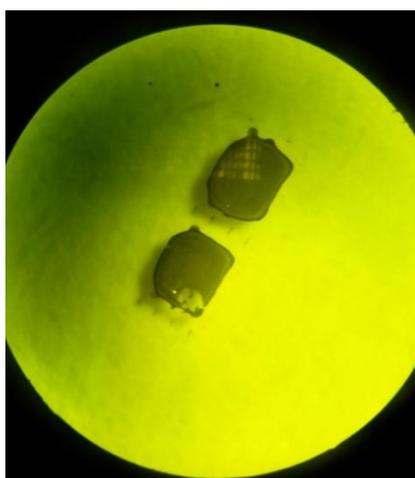


Рисунок 3.23– Фотография дорожек

Для подтверждения возможности соединения электрических выводов кристалла с печатным проводником методом сварки выполнены следующие действия:

между контактами на клей Dow Corning OE-8001 приклеен кристалл Epistar EDI-EE0926F;

кристалл разварен микросваркой (рисунок 3.24) методом «шарик-клин» на установке iBOND 5000.

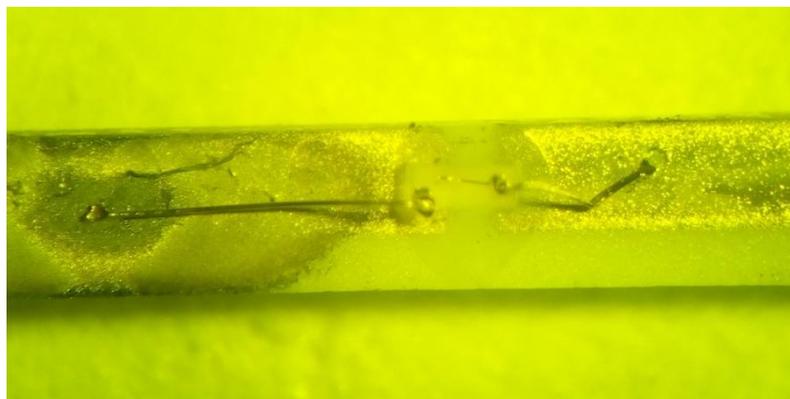


Рисунок 3.24 – Фотография кристалла, электрически соединенного с печатными проводниками металлической проволокой

Проверка качества электрического соединения кристалла проведено экспериментально. При подключении источника напряжения 2,65 В к печатным проводникам наблюдается свечение кристалла (рисунок 3.25), что подтверждает наличие электрического соединения.



Рисунок 3.25 – Фотография светящегося кристалла, электрически соединенного с печатными проводниками металлической проволокой

Нанесение проводников осуществлялось на покупную керамическую подложку с металлическими наконечниками по краям, фотография которой приведена на рисунке 3.26.



Рисунок 3.26 – Фотография керамической подложки с металлическими наконечниками по краям

Топология проводников (заштрихованные участки, размеры указаны в микрометрах) приведена на рисунке 3.27. Размеры проводящих участков рассчитаны таким образом, чтобы крайние проводящие участки попадали на металлические наконечники подложки.

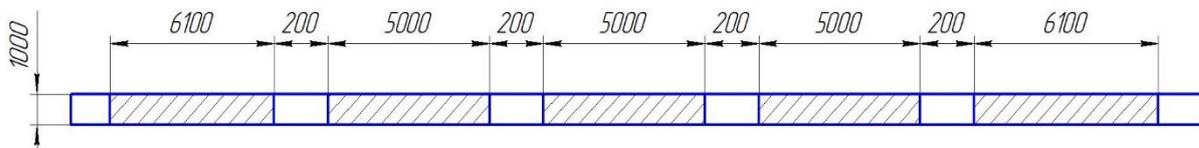


Рисунок 3.27 – Рисунок топологии проводников

Отжиг проводили при температуре 210°C в течении 10 минут. Фотография участка топологии приведено на рисунке 3.28. Видны капли/мазки между токопроводящими участками, которые приводят к замыканию контактов.

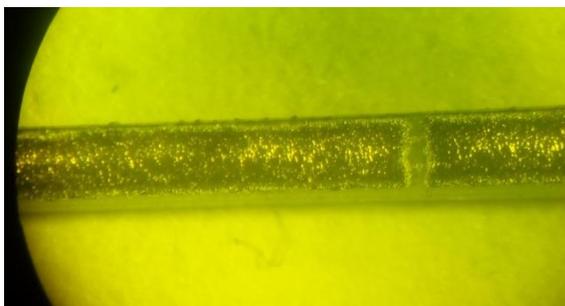


Рисунок 3.28 – Фотография участка топологии

Расстояние между напечатанными участками вместо задаваемых 200 мкм из-за растекания раствора наносимого материала оказалось 150 мкм. В последующих экспериментах шаблон печати изменен: расстояние между участками задано в 300 мкм. Фотография

топологии с измененным расстоянием между проводящими участками приведена на рисунке 3.29.

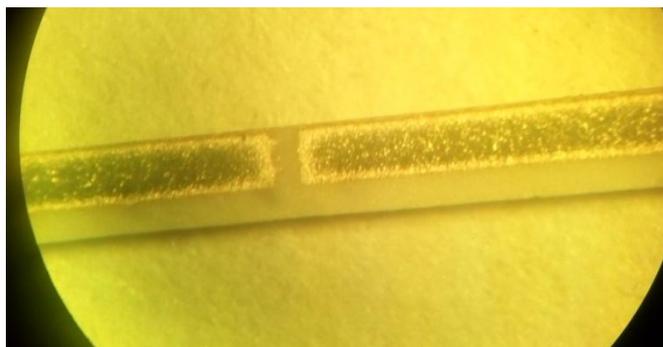


Рисунок 3.29 – Фотография топологии с расстоянием между участками по шаблону 300 мкм

Проведено нанесение раствора проводящего материала на основание с одновременным переходом на металлический наконечник основания (рисунок 3.30).



Рисунок 3.30 – Фотография топологии проводящего материала с переходом на металлический наконечник основания

Кристалл flip-chip типа SZ8-Y11 приклеили на электропроводящий клей, совместив электрические контакты кристалла с рисунком проводников на основании (рисунок 3.31).

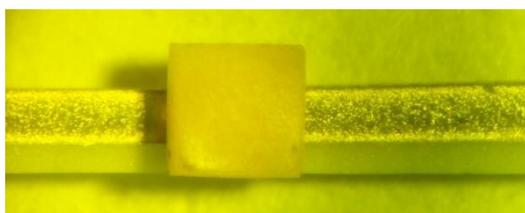


Рисунок 3.31 – Фотография кристалла, электрически соединенного с печатными проводниками приклеиванием

Проверка качества электрического соединения кристалла проведено экспериментально. При подключении источника напряжения 2,5 В к печатным проводникам наблюдается свечение кристалла (рисунок 3.32), что подтверждает наличие качественного электрического соединения.



Рисунок 3.32 – Фотография светящегося кристалла, электрически соединенного с печатными проводниками приклеиванием

Для проверки качества соединения печатного проводника на поверхности основания с металлическим наконечником проведено измерение вольт-амперной характеристики токопроводящего участка и металлического контакта линейки. Измерения проводили с использованием прибора Keithley 2410 1100V source meter. Результаты представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты оценки переходного сопротивления печатный проводник – металлический контакт основания

Ток, мА	Напряжение, мВ	Ток, мА	Напряжение, мВ
0,8	1	4,5	6
1,5	2	5,3	7
2,2	3	6	8
3	4	6,8	9
3,7	5	7,5	10

Графическая зависимость падения напряжения на переходе печатный проводник – металлический контакт основания от протекающего тока приведена на рисунке 3.33.

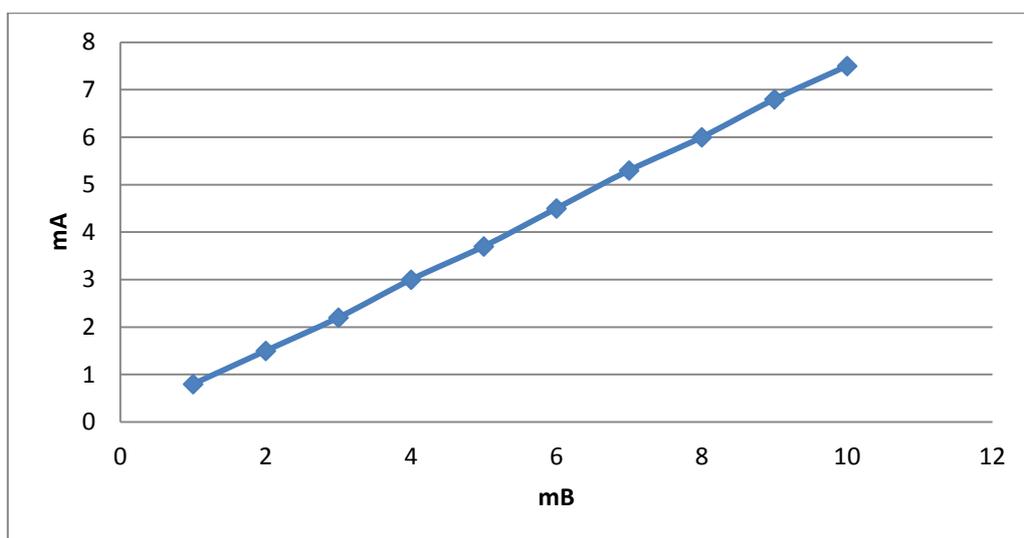


Рисунок 3.33 – Зависимость падения напряжения на переходе печатный проводник – металлический контакт основания от протекающего тока

Среднее значение сопротивления R определяется по формуле (3.1)

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{10} \frac{U_i}{I_i}}{10} = 1,328 \text{ Ом}, \quad (3.1)$$

где U_i, I_i – значения напряжения и тока при i -том измерении;
 $i=1, \dots, 10$ – порядковый номер измерения.

Среднеквадратическое отклонение ∇ определяется по формуле (3.2)

$$\nabla = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (R_i - R)^2}{10}} = 0,028 \text{ Ом}, \quad (3.2)$$

где $R_i = \frac{U_i}{I_i}$ – значение сопротивления в i -том измерении.

Таким образом значение переходного сопротивления печатный проводник – металлический контакт основания составляет $(1,328 \pm 0,028 \text{ Ом})$.

С использованием УНУ «Установка плоттерной печати чернилами с широким диапазоном вязкости» (<http://www.ckp-rf.ru/usu/506739>) и дополнительного оборудования проведены исследования и получены следующие перспективные результаты для решения задач проекта:

- исследована зависимость сопротивления печатных проводников от количества слоев нанесения раствора материала;
- подтверждена возможность соединения электрических выводов кристалла с печатным проводником методом ультразвуковой сварки;
- определены исходные установки устройства печати для получения заданных геометрических параметров проводников;

- подтверждена возможность электрического соединения печатного проводника с металлическим наконечником основания;

- подтверждена возможность соединения электрических выводов кристалла с печатным проводником методом приклеивания электропроводящим клеем.

3.5 Исследование технологических возможностей, применяемых при разработке элементов радиофоники и интегральной оптики, для создания научно-технического задела в области разработки интеллектуальных медицинских изделий нового поколения

Этот подраздел подготовил к.т.н., директор НОЦ «Нанотехнологии», руководитель технологического сектора ЦКП «Импульс» **Шестериков Е.В.** В основе аннотации стали материалы, полученные совместно с коллективом сотрудников НИ ТПУ, ВИАМ, СПбГУ, ТУСУР, СибГМУ, СО РАН, опубликованные в высокорейтинговых журналах, например:

Surface Modification of Electrospun Poly-(L-Lactic) Acid Scaffolds by Reactive Magnetron Sputtering / Bolbasov E.N., Maryin P.V., Stankevich K.S., Kozelskaya A.I., Shesterikov E.V., Khodyrevskaya Y.I., Tverdokhlebov S.I., Nasonova M.V., Shishkova D.K., Kudryavtseva .A., Anissimov Y.G. // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2018. Т. 162. С. 43-51;

Polylactic acid nano- and microchamber arrays for encapsulation of small hydrophilic molecules featuring drug release via high intensity focused ultrasound / Frueh J., Gai M., Tao T., Sukhorukov G.B., Petrov A.V., Petrov V.V., Shesterikov E.V., Tverdokhlebov S.I. // Nanoscale. 2017. Т. 9. № 21. С. 7063-7070;

Bioactivity and osteointegration of hydroxyapatite-coated stainless steel and titanium wires used for intramedullary osteosynthesis / Popkov A.V., Kononovich N.A., Gorbach E.N., Popkov D.A., Tverdokhlebov S.I., Shesterikov E.V. // Strategies in Trauma and Limb Reconstruction. 2017. Т. 12. № 2. С. 107-113.

3.5.1 Разработка технологии изготовления металлокерамических штампов для полидиметилсилоксановых матриц систем доставки лекарственных препаратов методом фотолитографии и гальванопластики

Создание плёнки из биодергадируемого полимера с микрокамерами для доставки лекарственных средств требует использования специальной полидиметилсилоксановой (ПДМС) матрицы с системно расположенными микропорами. Такая матрица является обратной копией металлокерамического штампа, который предполагает сложную и дорогостоящую технологию изготовления. Существующая технология LIGA (**L**ithographie, **G**alvanoformung, **A**bformung), несмотря на приемлемое качество получаемой топологии, требует больших материальных затрат (рентгеновская литография, реактивное ионное травление). Для поиска более оптимальной технологии коллективом ЦКП «Импульс» совместно с коллегами из ТПУ предложена технология фотолитографии с последующим электрохимическим осаждением поверхностного слоя металлизации для создания желаемой

мой топологии. В качестве подложек использовались керамические пластины ВК-100 с 0,5 мкм медным покрытием, полученным посредством магнетронного напыления. Для фотолитографии был изготовлен темнопольный фотошаблон с рисунком (рисунок 3.34) – круги диаметром 10 мкм на расстояниях 20 мкм по горизонтали и по вертикали. Для фотолитографии использовали позитивный фоторезист AZ9260 от AZ Electronic Materials (Люксембург), который экспонировали излучением 380 – 410 нм через фотошаблон. После создания фоторезистивной маски производили электрохимическое осаждение никеля из сульфатного электролита никелирования.

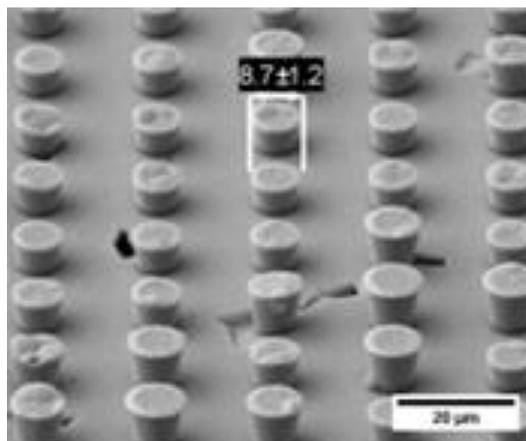


Рисунок 3.34 – SEM-снимки топологии, изготовленной методом фотолитографии с последующим электрохимическим осаждением никеля через фоторезистивную маску

В последствии металлокерамические штампы были успешно использованы для создания ПДМС-матрицы, на основе которой получили пленку с микрокамерами из полимолочной кислоты (рисунок 3.35). В результате проведенных испытаний установлено, что полученная технология позволяет успешно получать подобные топологии высотой до 10 мкм. В последствии металлическая топология посредством трафаретной печати переводится сначала в ПДМС, а затем в тонкопленочную топологию из полимолочной кислоты, в которую возможна упаковка лекарственных препаратов. Результаты исследований прошли независимое международное рецензирование и опубликованы в журнале IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IF 0,6.

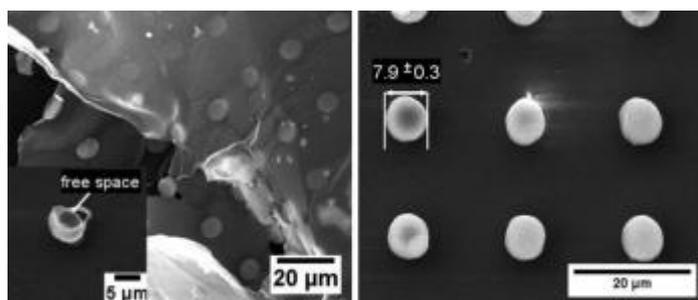


Рисунок 3.35 – SEM-снимки микрокамер из полимолочной кислоты

3.5.2 Исследование влияния типа рабочего газа на структуру и свойства тонких кальций-фосфатных покрытий, сформированных из плазмы магнетронного разряда

Формирование тонких биологически активных покрытий из плазмы магнетронного разряда благодаря высокой адгезионной прочности покрытий, возможности контролировать химический состав покрытия изменяя химический состав распыляемой мишени, тип рабочего газа, давление в распылительной камере и мощность магнетронного разряда, является одним из наиболее эффективных, динамично развивающихся и высокотехнологичных методов модифицирования поверхности имплантатов, используемых в реконструктивно-восстановительной хирургии. В настоящее время для формирования тонких покрытий методом высокочастотного магнетронного распыления (ВЧМР) в качестве рабочего газа используется аргон, что обусловлено его доступностью и относительно не высокой стоимостью. В тоже время известно, что масса и энергия ионизации ионов рабочего газа являются ключевыми факторами, определяющими структуру и свойства сформированных покрытий. В настоящее время в мировой научно-технической литературе отсутствуют результаты исследований, посвящённые изучению влияния этих ключевых параметров на структуру и свойства тонких кальций-фосфатных покрытий сформированных на поверхности титановых имплантатов, используемых в травматологии и ортопедии.

В отчетном периоде сотрудниками ЦКП «Импульс» совместно с коллегами из Томского политехнического университета впервые в мировой практике были проведены пилотные исследования направленные на изучение влияния типа рабочего газа (неона, криптона, аргона и ксенона) в рабочей камере на скорость формирования, структуру, химический состав и механические свойства тонких покрытий. В результате проведенных исследований установлено что наибольшая скорость формирования покрытий зависит от массы ионов рабочего газа при этом наибольшей скоростью обладают покрытия, сформированные из газов с меньшим атомным весом. Установлено, что степень кристалличности покрытий (рисунок 3.36) также зависит от массы ионов газа при этом наименьшей кристалличностью обладали покрытия, сформированные в атмосфере ксенона, а наибольшей в атмосфере неона.

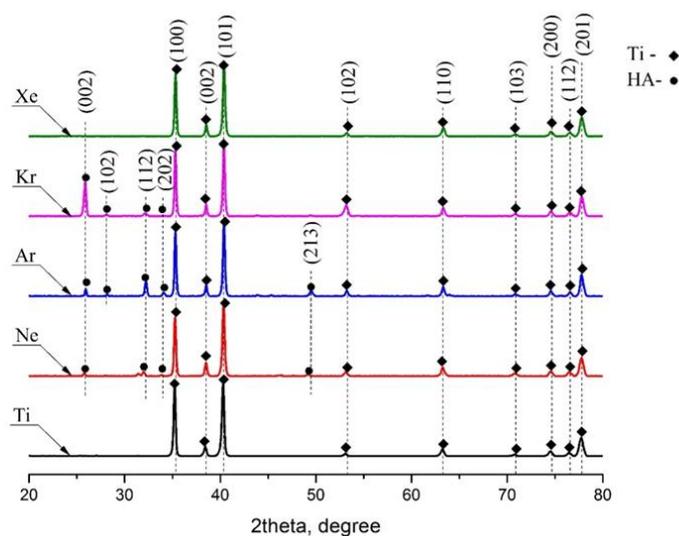


Рисунок 3.36 - Кристаллическая структура покрытий сформированных с использованием различных газов

Показано что наилучшей адгезией к титановому имплантату (рисунок 3.37) обладают аморфные покрытия, сформированные в атмосфере ксенона. При этом покрытия, сформированные в атмосфере криптона и аргона по своему химическому составу в наибольшей степени сходны с составом костной ткани. Результаты исследований прошли независимое международное рецензирование и опубликованы в журнале *Materials Chemistry and Physics* IF -2.781 Q 2.

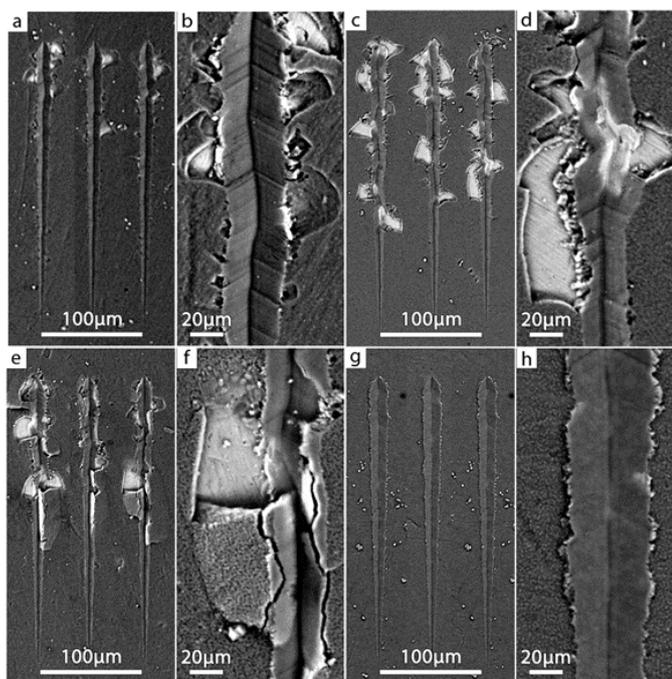


Рисунок 3.37 - Адгезионные свойства сформированных покрытий

3.5.3 Формирование тонких металлических антибактериальных покрытий из плазмы магнетронного разряда на поверхности пьезоэлектрических полимерных мембран для регенерации слизистых оболочек ротовой полости

Многие неудачи зубной имплантации напрямую связаны с проблемами мягких тканей, что может проявляться в форме послеоперационной рецессии, гиперплазии десны, переимплантита с одновременной потерей кости в зоне прилегания к имплантату и последующего обнажения резьбы на теле имплантата. Для решения этой задачи в хирургической стоматологии используются свободные аутотрансплантаты. Источником таких ауто-трансплантатов является слизистая оболочка твердого неба. Существенным недостатком методики использования аутотрансплантатов на основе слизистой оболочки твердого неба является открытая раневая поверхность. Открытая раневая поверхность подвергается повреждениям твердой пищей и пищевым комком, контаминацией патогенной микрофлорой, в результате чего увеличивается вероятность кровотечений, нагноений и повреждение образующейся грануляционной ткани в донорской области. Для решения этих проблем специалистами ЦКП «Импульс» совместно с коллегами из ТПУ, ВИАМ, СПбГУ, ТУСУР, СибГМУ предложено формировать на поверхности пьезоэлектрических полимерных мембран тонкие медные антибактериальные покрытия из плазмы магнетронного разряда (рисунок 3.38).

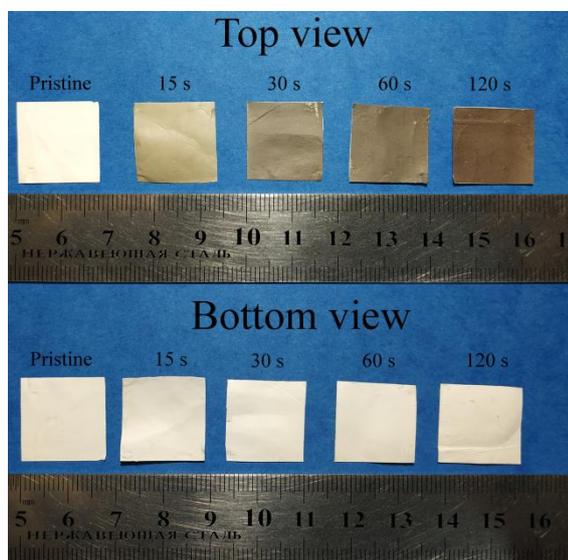


Рисунок 3.38 – Внешний вид внешней и внутренней поверхности полимерных мембран в зависимости от времени формирования покрытия в плазме магнетронного разряда

В ходе исследований установлено, что процесс формирования тонкого медного покрытия в зависимости от времени экспозиции не приводит к образованию на поверхности мембран микродефектов в виде оплавления, прожогов и т.д. не вызывает достоверных

изменений в показателях краевого угла смачивания мембраны водой, не изменяет физико-механические свойства мембран. Методами энергодисперсионной фотоэлектронной спектроскопии исследовано влияние времени экспозиции на химический состав поверхности мембран. Установлено увеличение концентрации меди на поверхности при сохранение элементного состава вне зависимости от времени модифицирования. Показано что тонкие медные покрытия, сформированные в течение 120 секунд, придают мембранам бактериостатическими свойства, что обусловлено обогащением химического состава мембраны медью и ее соединениями. Гистологические исследования позволили установить, что пьезоэлектрические полимерные мембраны с бактерицидным покрытием в наибольшей степени способствуют процессу регенерации тканей слизистой оболочки ротовой полости. Результаты исследований прошли независимое международное рецензирование и опубликованы в журнале Applied Surface Science IF -5.155 Q 1.

3.5.4 Люминесцентные высокопористые материалы, допированные комплексом $\text{Eu}(\text{dbm})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ в среде сверхкритического диоксида углерода

Полимерные материалы с внедренными в них металлокомплексными соединениями (МКС) трехвалентных редкоземельных ионов (РЗИ) представляют большой интерес для различных областей науки и техники, в том числе для применения в оптоэлектронике, фотовольтанике, биомедицинских исследованиях и сенсорике. Учитывая специфику возможных применений допированных соединений трехвалентного европия предлагаемых материалов, в частности, в качестве хемосенсоров некоторых токсичных газов в атмосферном воздухе, выдвигаются определенные требования к их морфологии. Подобные материалы, содержащие пустоты микронного и субмикронного размера, в которых закрепляются молекулы-сенсоры, одновременно должны обладать эффективной доступностью для проникновения в них молекул определенных газов, которые могут находиться в окружающей атмосфере. Для решения этой задачи предложено использовать полимерные нетканые материалы на основе ультратонких волокон политетрафторэтилена. Изготовлены опытные образцы таких материалов, представлен ряд высокопористых полимерных люминесцирующих материалов на основе ПТФЭ и пеноподобные структуры на поверхности пленок ОПБИ, полученные методом лазерного «рисования», которые могут быть использованы в качестве сенсорных материалов после активации их комплексом $\text{Eu}(\text{dbm})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. В настоящей работе реализован способ эффективного внедрения этого комплекса в полимерные матрицы с использованием среды sc CO_2 при добавлении соразтворителя этанола. Изучение спектров ФЛ импрегнированных образцов при возбуждении импульсным лазером с длиной волны 337 нм показало, что данный метод пропитки является более эффек-

тивным, чем пропитка через раствор этанола. При этом, наиболее интенсивная ФЛ наблюдается в волокнистых образцах ПТФЭ, полученных с помощью электроформования. Значения отношения интенсивностей полос ЭД и МД переходов спектров ФЛ в матрицах на основе ПТФЭ указывают на возникновение процессов трансформации окружения ионов Eu^{3+} в зависимости от условий импрегнации и промывки импрегнированных образцов. Показано также, что для возбуждения ФЛ полученных образцов может быть использован полупроводниковый лазер 405 нм. Результаты работы прошли рецензирование и опубликованы в журнале “Сверхкритические флюиды: Теория и практика”. ИФ РИНЦ - 0,617.

3.5.5 Изучение влияния катионных замещений в твердотельной мишени на основе β трикальцийфосфата на структуру и свойства тонких покрытий, сформированных методом высокочастотного магнетронного распыления

Одним из наиболее эффективных методов повышения эффективности биосовместимых и биоактивных покрытий на основе фосфатов кальция является легирование. Тонкие кальций-фосфатные покрытия сформированные методом высокочастотного магнетронного распыления легированные ионами Zn, Mg и Al обеспечивают лучшие условия для прикрепления, пролиферации и дифференцировки мультипотентных стволовых клеток в остеообласты. Однако внедрение этих ионов в структуру распыляемой мишени существенно снижает скорость роста покрытия при этом повышает его дефектность, что существенно увеличивает стоимость таких покрытий. Для решения этих проблем предложено использовать для формирования покрытий твердотельные мишени на основе трикальцийфосфата легированных ионами стронция и магния. Теоретические исследования показали возможность увеличения скорости распыления таких мишеней при сохранение высоких эксплуатационных свойств сформированных покрытий (рисунок 3.39).

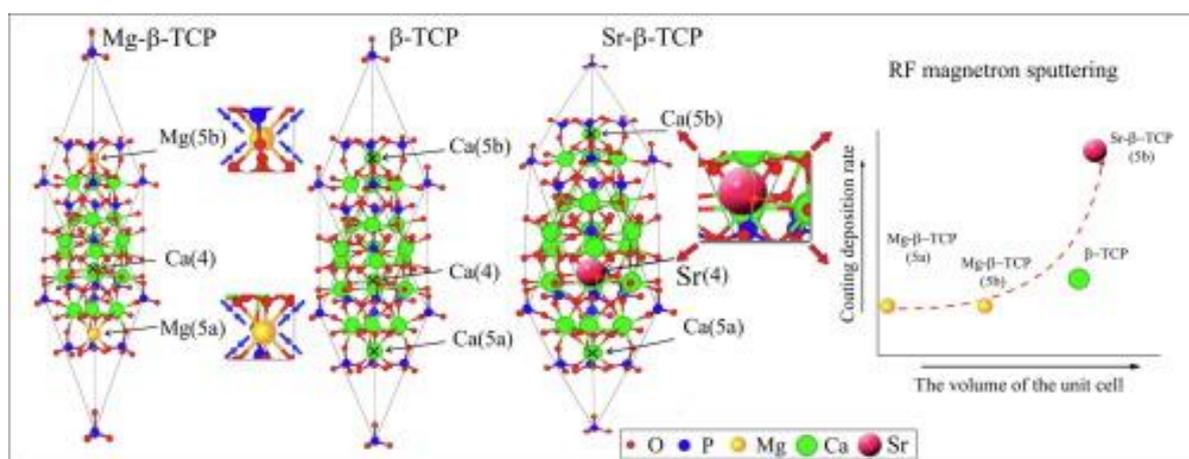


Рисунок 3.39 - Влияние катионных замещений на скорость формирования покрытий методом высокочастотного магнетронного распыления

В результате совместных исследований изучено влияние замещения катионов кальция в кристаллической структуре трикальцийфосфата, катионами магния и/или стронция, на скорость осаждения и физико-механические и химические свойства покрытий. Показано, что наличие заменителей стронция в распыляемой мишени приводит к значительному увеличению скорости осаждения покрытий, тогда как магний незначительно снижает скорость формирования покрытия. Установлено, что эти различия обусловлены изменением объема элементарной ячейки кристаллической фазы порошка β -TCP. Так замещения стронцием приводит к увеличению объема элементарной ячейки, что приводит к увеличению скорости осаждения покрытия Sr- β -TCP и Mg/ Sr- β -TCP, тогда как уменьшение объема элементарной ячейки при легировании магнием приводит к снижению скорости осаждения Mg- β -TCP. Компьютерное моделирование показывает, что наибольшее изменение длины связи происходит в кислородных связях с замещающими атомами и атомами кальция, ближайшими к замещению. Установлено что по химическому составу (отношение кальция к фосфору) наиболее близки в покрытиях, сформированных из стронций замещенных трикальцийфосфатов, при этом эти покрытия обладают наилучшими механическими свойствами. Результаты исследований прошли независимое международное рецензирование и приняты к публикации в журнале Applied Surface Science IF - 5.155 Q 1.

3.6 Исследование характеристик микроэлектронной и радиофотонной ЭКБ высокой степени интеграции и компонентов радиотехнических систем с АФАР

Подраздел анонсирует работы коллектива лаборатории ЛИКС, поддерживающей на высоком уровне измерения в СВЧ диапазоне в ЦКП «Импульс», выполняя хозяйственные работы, НИР по госзаказу по разработке и исследованию компонентной базы СВЧ. Руководитель коллектива д.т.н. **Бабак Л.И.**, зав. лабораторией к.т.н. **Шеерман Ф.И.**

Цель работы являлось исследование характеристик и разработка микроэлектронной ЭКБ высокой степени интеграции, включая монолитные интегральные схемы (МИС) цифрового аттенюатора, буферного усилителя, смесителя и усилителя промежуточной частоты, для перспективных многоканальных АФАР, а также исследование характеристик, вариантов изготовления и применения алгоритмов обработки сигналов и усилителей мощности. В ходе работы решались следующие задачи

- Разработка КД, изготовление кристаллов, измерение характеристик МИС цифрового аттенюатора и буферного усилителя для приемных и передающих трактов АФАР.
- Разработка КД, изготовление кристаллов, измерение характеристик МИС смесителя и усилителя промежуточной частоты для приемных и передающих трактов АФАР.

– Разработка КД, изготовление кристаллов, измерение характеристик МИС цифрового аттенюатора для приемных и передающих трактов АФАР.

В ходе работы разработаны и изготовлены кристаллы ИС1 и ИС2 (см. рис 3.40 и 3.42) и проведено всестороннее исследование кристаллов и с использованием оборудования ЦКП. Проведены следующие исследования и измерения:

1. Измерение коэффициента преобразования (в дБ) в зависимости от частоты: ВЧ, ПЧ сигналов.
2. Измерение коэффициента преобразования (в дБ) в диапазоне в зависимости от мощности сигнала гетеродина.
3. Измерение коэффициента отражения (в дБ) по входу ВЧ, ПЧ и гетеродину.
4. Измерение уровня подавления (в дБ) сигнала гетеродина в тракте ПЧ (LO-IF), сигнала гетеродина в тракте ВЧ (LO-RF), сигнала ВЧ в тракте ПЧ (RF-IF).
5. Измерение уровня входной мощности по P1дБ (в дБм).
6. Измерение уровня входной мощности по IP3 (в дБм).

Список использованного оборудования представлен в таблице 3.1

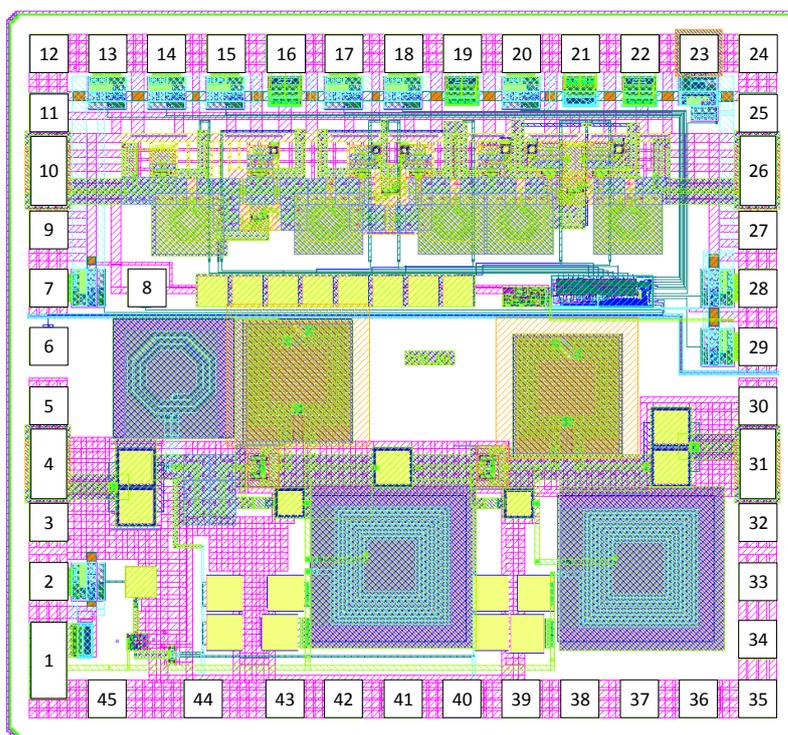


Рисунок 3.40 – Чертеж топологии кристалла ИС1 содержащего БУ и ЦАТТ

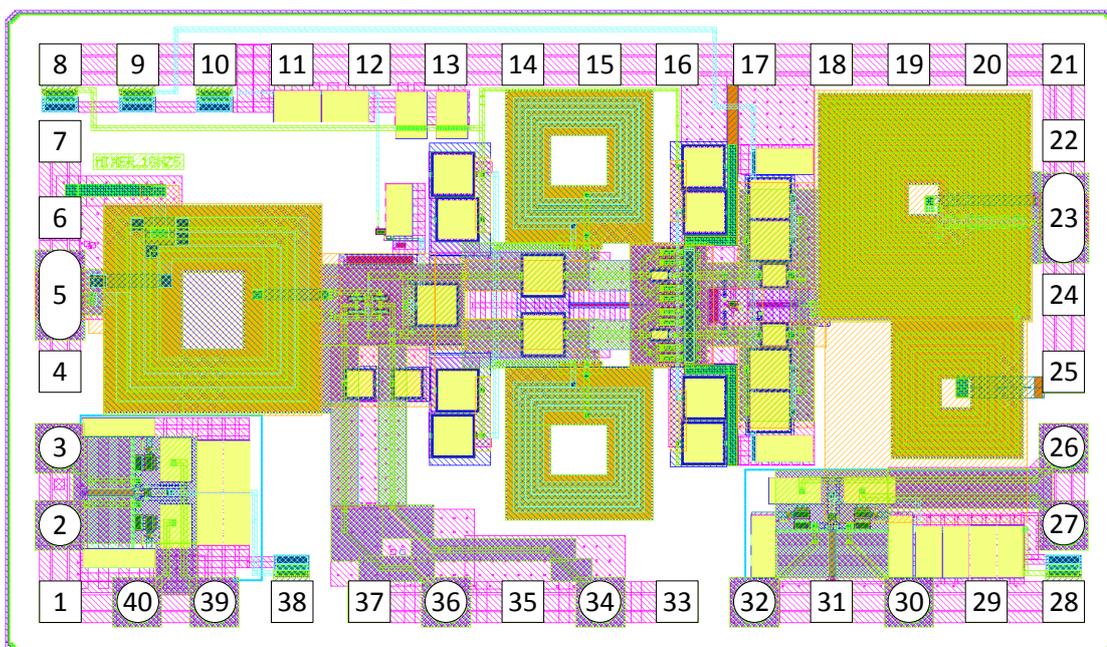


Рисунок 3.42 – Чертеж топологии кристалла ИС2

Таблица 3 – Используемое оборудование ЦКП

№ п/п	Наименование	Тип и нормативные документы	Назначение	Измеряемые характеристики	Метрологические и технические характеристики
1	Трёхканальный источник питания с возможностью измерения тока и напряжения	Keysight E36313A	Установка рабочего режима по напряжению	-	Погрешность установки по напряжению не более 5 мВ, по току не более 5 мА. Погрешность измерения не более 0,1%
2	Векторный анализатор цепей с набором калибровочных мер и с опцией измерения смесителей	R&S ZVA40 4 портовый	Измерение параметров смесителя	измерение коэффициентов преобразования и отражения	Диапазон частот: 10 МГц – 40 ГГц; Погрешность измерения по модулю: не более 0,2 дБ
3	Генератор СВЧ сигналов	R&S SMB100A	Формирование сигнала гетеродина	-	Диапазон частот: 100 кГц – 20 ГГц

Исследовались характеристики синтезаторов частот (СЧ) на основе оптоэлектронных генераторов для радиотехнических систем с АФАР и вариантов их усовершенствования с использованием радиофотонных интегральных схем (РИС) (Шифр - "Фотон СЧ-ТУСУР") (Шифр - "Поиск). Целями работы являлось:

1. Исследование характеристик и разработка радиофотонной ЭКБ высокой степени интеграции, включая радиофотонные интегральные схемы (РИС) делителей/сумматоров мощности, спектральных фильтров, фотодиодов и модуляторов для дискретных и интегральных устройств передачи аналоговых и цифровых сигналов по оптическим каналам АФАР.

2. Исследование преимуществ применения синтезаторов частот (СЧ) на основе опто-электронных генераторов для радиотехнических систем с АФАР в сравнении аналогичными изделиями на основе высокостабильных термостатированных кварцевых генераторов.

В ходе работы решались следующие задачи:

1. Исследование вариантов усовершенствования СЧ за счет применения радиофотонных интегральных схем (РИС).

2. Разработка КД, изготовление кристаллов, измерение характеристик РИС мультиплексоров/демультиплексоров, спектральных фильтров и фотодиодов для устройств передачи аналоговых и цифровых сигналов по оптическим каналам АФАР.

3. Разработка КД, изготовление, измерение характеристик РИС, входящих в состав многоканальной волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП) со спектральным уплотнением аналоговых и цифровых сигналов, в том числе РИС приемной части с делителем мощности и фотодиодами, и РИС передающей части с сумматором мощности.

4. Расчет конструкции и моделирование РИС оптического модулятора для передающей части ВОЛП

По результатам работы были изготовлены и экспериментально исследованы две радиофотонные интегральные схемы РИС1 и РИС2 оптического мультиплексора и демультиплексора. При помощи измерительного оборудования ЦКП проводилось экспериментальное исследование частотных характеристик оптических демультиплексоров. Перечень используемого оборудования ЦКП и дополнительного оборудования представлен в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Перечень оборудования для измерения четырехканального оптического приемника

№	Название	Описание
1.	Agilent N7714a	Перестраиваемый лазерный источник
2.	KeysightB2902A	Параметрический прецизионный измеритель
3.	Rohde&Schwarz ZVA-40	Векторный анализатор цепей
4.	General Photonics PolaRITE PLC-003-S-90	Контроллер поляризации
5.	Fujitsu Optical Modulator FTM7937EZ/202	Оптический модулятор

Продолжение таблицы 3.4

6.	СВЧ-зонд GSG с шагом 150 мкм	
7.	8-ми канальный массив оптических волноводов (расстояние между волокнами 127 мкм)	
8.	Оснастка для установки массива волноводов на зондовую станцию	

АЧХ передаточной функции оптического демультиплексора, полученная по результатам измерений представлена на рис. 3.43.

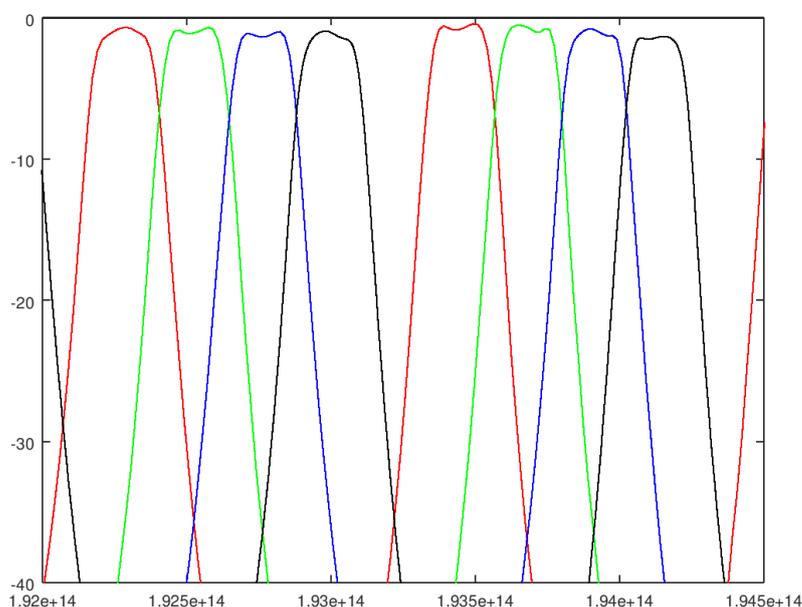


Рисунок 3.43 – Передаточная функция оптического демультиплексора, в соответствии с рис.1: канал 1 – красный ($\lambda_1 = 1559,39$ нм, $f_1 = 192.25$ ТГц), канал 2 – зеленый ($\lambda_2 = 1557,36$ нм, $f_2 = 192.5$ ТГц), канал 3 – синий ($\lambda_3 = 1555,34$ нм, $f_3 = 192.75$ ТГц), канал 4 – черный ($\lambda_4 = 1553,33$ нм, $f_4 = 193$ ТГц)

Осуществлена разработка блока накачки отрицательного напряжения подложки и блока защиты от электростатического электричества для технологии КНИ-0,18 мкм (шифр - "Цифра-38-ТУСУР"). Целью работы являлась разработка схем электрических и топологий, а также проведение моделирования блока накачки отрицательного напряжения подложки и блока защиты от электростатического электричества для радиационно-стойких микросхем преобразователя последовательного кода в параллельный, изготовленных на технологии КНИ-0,18 мкм.

По результатам работы проводилось испытание указанных блоков с применением оборудования ЦКП. Результаты испытаний представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты испытаний блока накачки в составе микросхем ИС1-ИС8

Параметр	Полученные значения
Диапазон напряжений питания микросхемы, В для ИС1, ИС3, ИС5, ИС7 для ИС2, ИС4, ИС6, ИС8	4,5...5,5 2,97...3,63
Вырабатываемое напряжение смещение подложки, В	минус 0,65
Ток потребления блока накачки отрицательного напряжения смещения подложки, мкА	500
Максимальный выходной ток нагрузки, мкА	10

Проведены исследование и разработка умножителя частоты и цифрового аттенюатора для приемного модуля К-диапазона, выполняемого по кремниевой технологии. Целью работы являлось моделирование, проектирование, исследование способов схемотехнической реализации и экспериментальное изучение основных элементов высокоинтегрированных приемных модулей К-диапазона типа "Система на кристалле", выполняемых по кремниевым наногетероструктурным технологиям, а также разработка и изготовление опытных образцов МИС и элементов СнК приемных модулей в диапазоне частот от 18 до 24 ГГц.

По результатам работы были изготовлены кристаллы субгармонического смесителя К-диапазона и проведено их измерений с использованием оборудования ЦКП. На рис. 3.44, 3.45 представлена фотография МИС двойного балансного субгармонического смесителя. Размеры кристалла 1x1.36 мм².

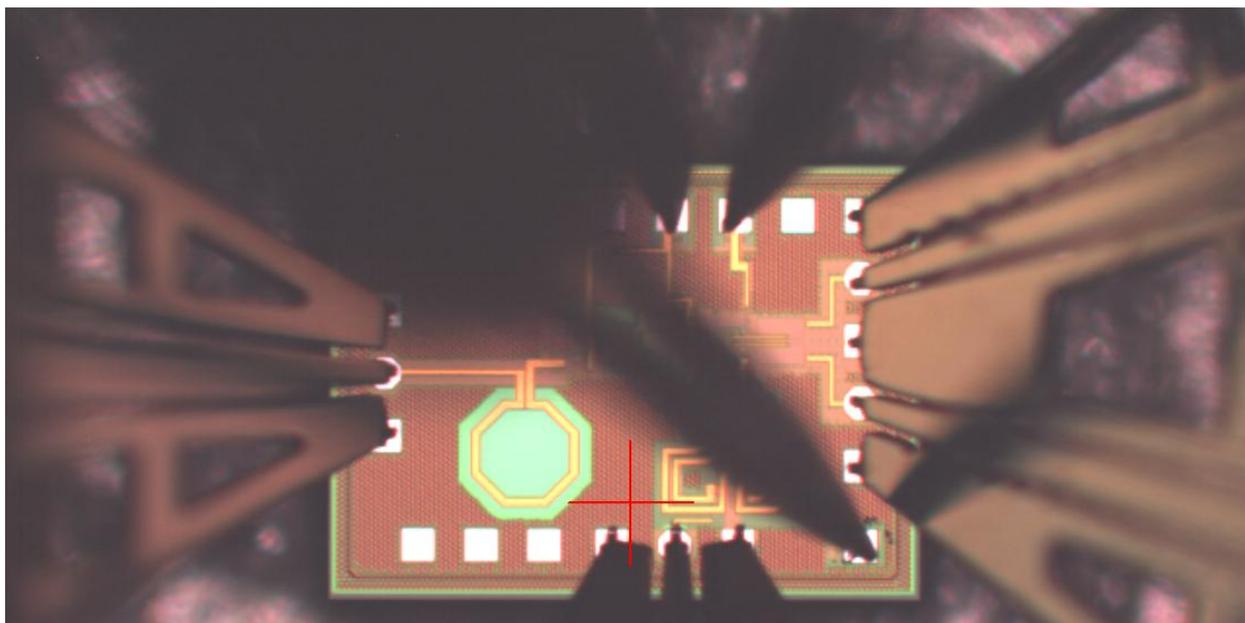


Рисунок 3.44 – Фотография МИС двойного балансного субгармонического смесителя (1x1.36 мм²)

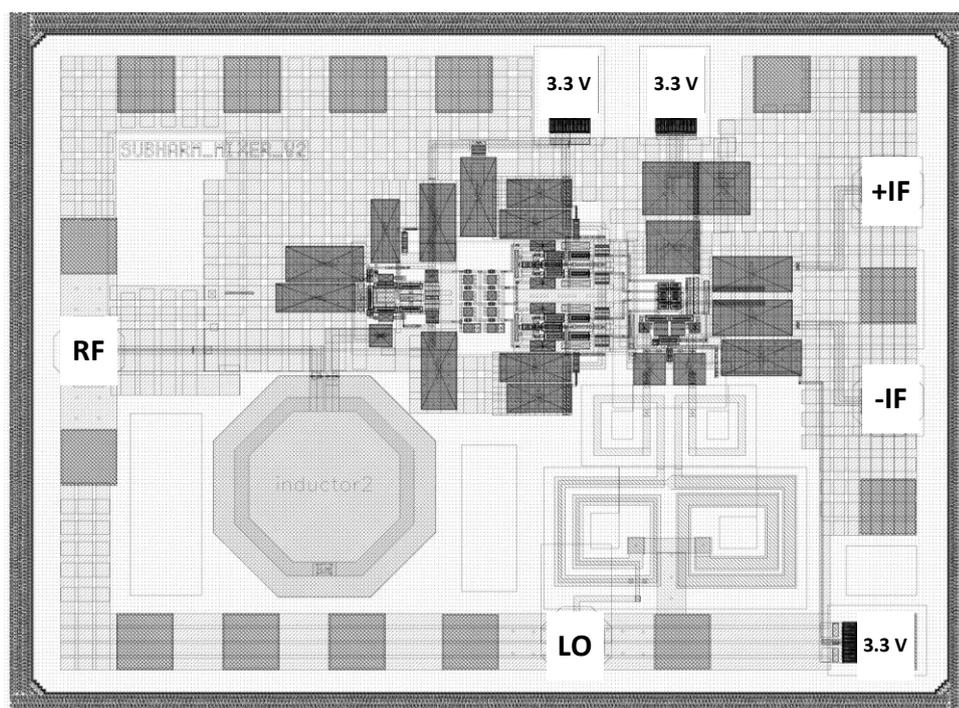


Рисунок 3.45 – Топология МИС двойного балансного субгармонического смесителя (1x1.36 мм²)

Измерения проводились на зондовой станции Cascade, с использованием следующего измерительного оборудования: векторный 4-х портовый анализатор ZVA, набор DC зондов, один дифференциальный ВЧ зонд (GSGSG) и два обычных (GSG), источник питания. Перед началом измерений была проведена калибровка в сечении зондов по S-параметрам и по мощности (использовался ваттметр R&S). Таким образом, потери в СВЧ зондах не учитывались при измерениях.

Так как выход дифференциальный – на один из выходов была подключена 50-омная нагрузка. Условия измерений: $P_{in} = -30 \text{ dBm}$, $P_{LO} = 0 \dots -16 \text{ dBm}$ (стандартные $P_{LO} = -10 \text{ dBm}$), $V_{CC} = 3.3 \text{ В. (65 мА)}$, $f_{IF} = 2 \dots 4 \text{ GHz}$, $f_{RF} = 18 \dots 25 \text{ GHz}$.

На рисунке 3.46 представлены результаты измерений коэффициента преобразования (ConvGain), коэффициенты отражения по ВЧ (RF_RL), ПЧ (IF_RL) и гетеродину (LO_RL), при $P_{in} = -30 \text{ dBm}$, $P_{LO} = -10 \text{ dBm}$, $V_{CC} = 3.3 \text{ В. (65 мА)}$, $f_{IF} = f_{RF} - 2f_{LO} = 3.9 \text{ GHz}$, в диапазоне частот $f_{RF} = 5 \dots 30 \text{ GHz}$.

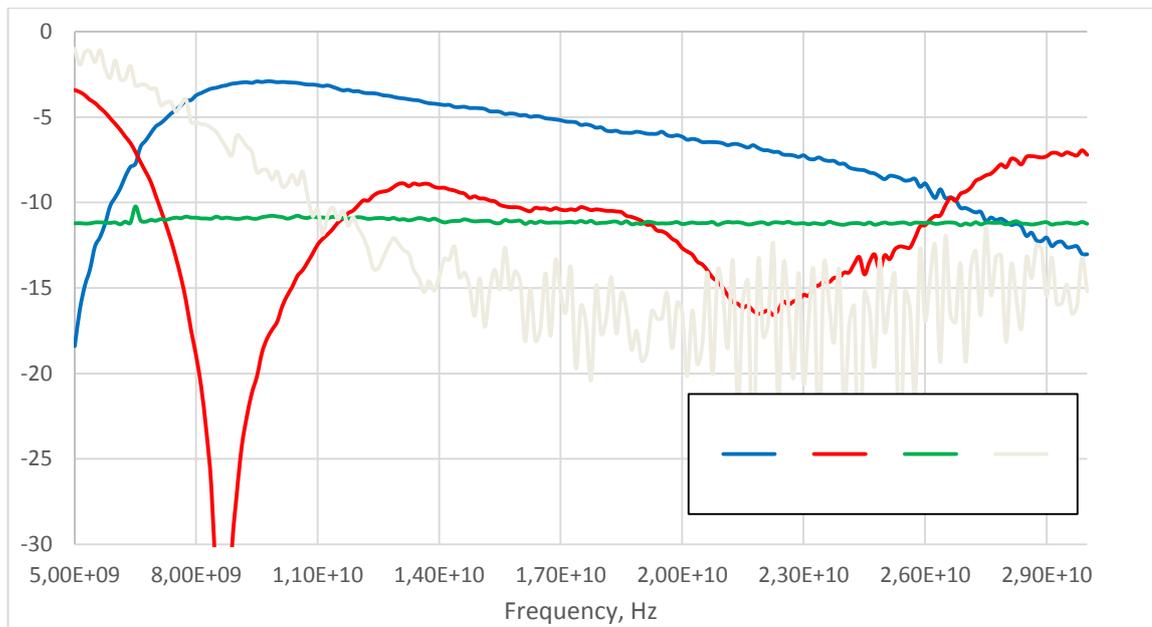


Рисунок 3.46 – Коэффициента преобразования (ConvGain), коэффициенты отражения по ВЧ (RF_RL), ПЧ (IF_RL) и гетеродину (LO_RL) ($P_{in} = -30 \text{ dBm}$, $P_{LO} = -10 \text{ dBm}$, $V_{CC} = 3.3 \text{ В.}$ (65 м А), $f_{IF} = f_{RF} - 2f_{LO} = 3.9 \text{ GHz}$, $f_{RF} = 5 \dots 30 \text{ GHz}$)

3.7 Развитие аддитивных технологий

Наличие в составе оборудования ЦКП/УНУ принтеров для реализации аддитивных технологий формирования сначала 2D и в последствии и 3D элементов позволило, во-первых, провести исследования, во-вторых, выполнить ряд практических разработок с изготовлением конструкций в мелкосерийном их поворении. Но при этом выявились и проблемы развития аддитивных технологий. Аннотацию работ этого направления подготовил к.т.н. **Бомбизов А.А.**

3.7.1 Аддитивные технологии изготовления планарных СВЧ-элементов

Аддитивная технология изготовления элементной базы получила широкое распространение в настоящее время. Она используется для нанесения паяльных паст при автоматизированной сборке печатных узлов, изготовления органических светоизлучающих диодов [190] и полевых транзисторов [191]. Вариативность использования возможностей аддитивной технологии может позволить успешно изготавливать и применять элементы СВЧ-электроники. Краткий обзор технологий планарной печати показывает, что появилось множество методик формирования топологического рисунка на диэлектрической подложке.

Условно печатные технологии классифицируют по двум признакам: тип основания, на котором формируется топология, и способ нанесения материала (рисунок 3.47).

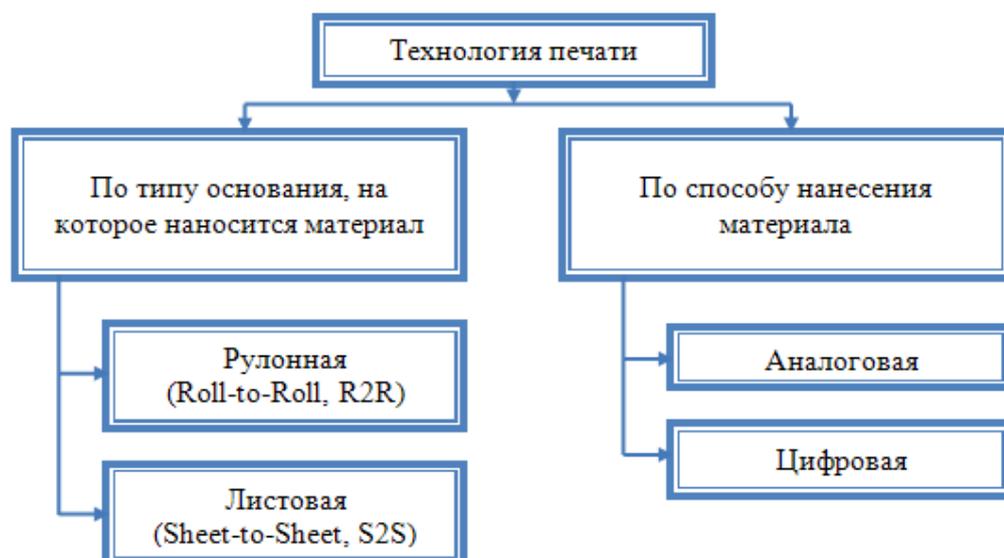


Рисунок 3.47– Классификация технологии печати

По типу основания, на котором формируется топология, различают: рулонную печать и листовую [192]. Главным преимуществом листовой перед рулонной является то, что могут применяться как гибкие основания, так и жесткие, в то время как рулонная технология подразумевает использование исключительно гибких материалов.

По способу нанесения материала различают аналоговую и цифровую печати (рисунок 3.48). Аналоговая печать подразумевает использование печатных форм, с помощью которых изображение переносится на основание для печати. Как вариант, изображение может наноситься ракелем с использованием специально отфрезерованного трафарета. Основным недостатком данного типа печати является то, что изменение изображения требует и изменения печатных форм, что приводит к росту итерации процесса печати и накоплению печатных форм в хранилище. Кроме того при аналоговой печати образуется большое количество отходов материалов.

Цифровая печать подразумевает осуществление формирования изображения из электронного файла. Её в свою очередь можно разделить на контактную и бесконтактную. Бесконтактная печать – формирование изображения происходит без контакта сопла, выдающего чернила, с поверхностью основания для печати, контактная значит обеспечение максимально малого расстояния между выдающим отверстием печатающей головки и основанием для печати.

Бесконтактная печать делится на технологию Slot-Die, каплеструйные принтеры с непрерывной циркуляцией чернил – технология CIJ (Continuous Ink Jet) и каплеструйные принтеры с применением технологии «капля-по-требованию» – DoD (Drop-on-Demand).



Рисунок 3.48 – Классификация технологии печати по способу нанесения материала

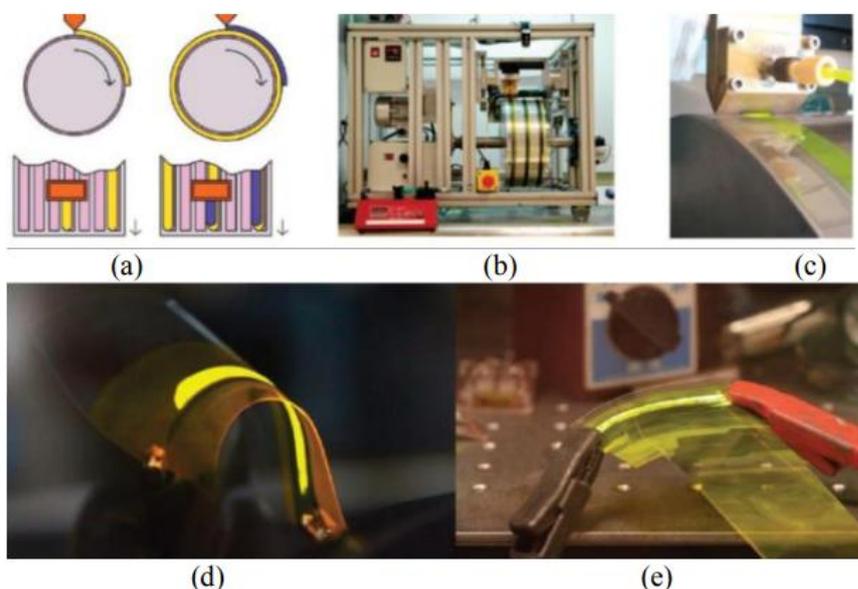
Технология Slot-Die представляет собой прямой путь развития рулонной печати, при котором раствор наносится на подложку путем дозирования, как показано на рисунке 3.49. Процесс нанесения покрытий на слот-матрицу можно разделить на две стадии:

- 1) достижение равномерного потока раствора покрытия (рисунок 3.49 а);
- 2) регулировка рабочих параметров, таких как отжим между щелевой матрицей и подвижной подложкой, скорость подложки. [193]

Раствор выливают сверху через отверстие, показанное на рисунке 3.49 (а), на подложку, установленную на вращающемся цилиндре. Этот вид печати хорошо подходит для больших площадей, но трудно получить разбивку структур с высоким разрешением. Именно поэтому этот метод обычно используется для устройств большой площади, то есть светоизлучающих диодов и солнечных элементов. На рисунке 3.49 (d) показано изображение светоизлучающей электрохимической ячейки с прорезиненным слоем.

Рабочий режим разработан для оптимизированного процесса с использованием максимальной и минимальной скоростей покрытия. На работу влияют различные дефекты покрытия, такие как капание, захват воздуха, ребризация, запуск и остановка цикла покрытия. Неэффективное управление процессом печати приводит к изнашиванию раствора покрытия, а также влияет на форму рисунков на подложке путем введения краевых эффектов. Повышенная вязкость жидкости, желоб сопла, расстояние между соплом и подложкой, уменьшенная длина губчатого края уменьшают размер цилиндра, что, следова-

тельно, сокращает время, необходимое для достижения устойчивого состояния. Проблемы стабильности, связанные с этим процессом, затрудняют адаптацию этого метода для печати электроники на гибких подложках.



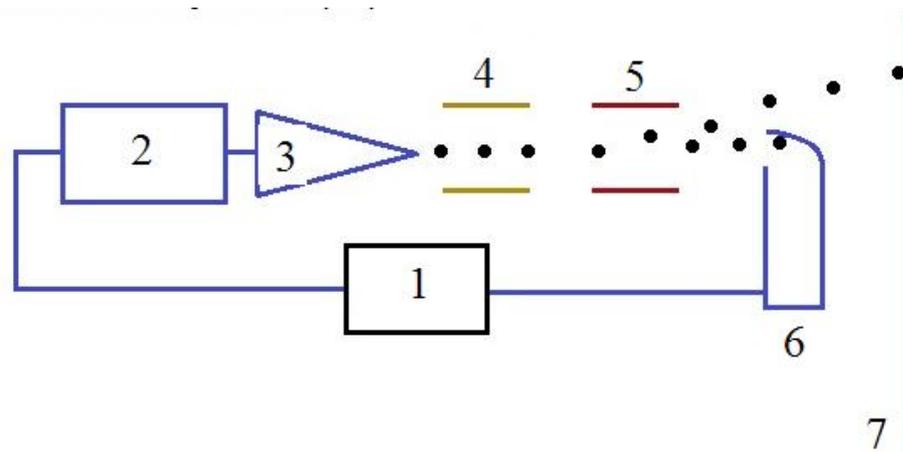
а) схематический вид покрытия щелевого прокатного валика активного слоя (желтый) и полупрозрачного анода (синий) поверх гибкой катодной подложки (розовый); (b) фотография рулонной машины, осаждающей активный слой; (c) крупномасштабная фотография щелевой головки во время покрытия полосы активного слоя; (d) фотография ЛЕС с прорезями, иллюстрирующая двунаправленное излучение света и качество пленки; (e) излучение света из полупрозрачного покрытого слоем ЛЕС, следующего за > 6 месяцев хранения в перчаточном блоке.

Рисунок 3.49 – Изображение технологического процесса Slot-Die

Струйные принтеры с непрерывной подачей чернил (CIJ, Continuous Ink Jet) выбрасывают капли чернил с электрическим зарядом из форсунок печатающей головки, при этом капли проходят через электрическое поле (рисунок 3.50) [193].

В камере пьезоэлектрический кристалл заставляет чернила пульсировать и разбивает струю чернил на капли. Электрод придает заряд отдельным нужным для печати каплям и отделяет их от струи чернил. Ненужные капли возвращаются в систему. Заряженные капли проходят через электростатическое поле между отклоняющими пластинами. Сочетание скорости и заряда определяет правильное положение капли на носителе.

Благодаря тому, что CIJ-печать является неконтактным методом, она имеет широкое применение. Эти принтеры печатают на большинстве материалов, независимо от их текстуры, пористости, размера или формы.



1 – резервуар для чернил; 2 – чернильный насос; 3 – сопло; 4 – электрод; 5 – отклоняющие пластины; 6 – желоб; 7 – подложка.

Рисунок 3.50– Схема технологического процесса СИ

Однако данная методика имеет свои недостатки:

- 1) необходимость разработки специальных печатных материалов;
- 2) образование эффекта кофейного кольца на подложках при печати;
- 3) пропуск выдачи капли, засорение выдающего отверстия;
- 4) хаотические капли на высоких частотах и брызги на печатных линиях.

Технология DoD (Drop-on-Demand, «капля-по-требованию») – технология струйной печати, при которой каплеобразование происходит не постоянно (как при Continuous InkJet), а в нужный для формирования изображения момент. Это обеспечивает высокое качество отпечатка при высокой скорости его вывода. Технология Drop-on-demand применяется в термо- и в пьезоструйных печатающих головках [193].

Пьезоэлектрическая – в печатающей головке над соплом расположены пьезокристалл и диафрагма. Когда на пьезоэлемент подаётся электрический ток, он изгибается и давит на диафрагму, которая, в свою очередь, оказывает давление на чернила и формирует каплю. Капля впоследствии выталкивается на бумагу (рисунок 3.51). Преимуществом данного оборудования является то, что печать осуществляется из герметичных печатающих головок, исключая механизм испарения. Современные системы струйной печати имеют в своем составе печатающие головки с большим (16 и более) количеством сопел, выполненных по интегральной технологии, что позволяет обеспечить большую скорость печати. Возможность регулировки температуры чернил в печатной головке позволяет регулировать вязкость чернил.

Основной недостаток таких систем заключается в следующем – высокие требования к параметрам чернил (вязкость, кислотность, поверхностное натяжение, удельная плотность и другие). В первую очередь это относится к размерам частиц, которые долж-

ны быть на порядок меньше диаметра сопла. Применение чернил с большим размером частиц может привести к засорению сопла и выходу печатающей головке из строя. Если поверхностное натяжение слишком высокое, то чернила не будут должным образом продвигаться к печатающей головке, что приведет к неоднородности печати. Если поверхностное натяжение слишком низкое, то чернила будут вытекать из сопел и образовывать при печати кляксы [196].

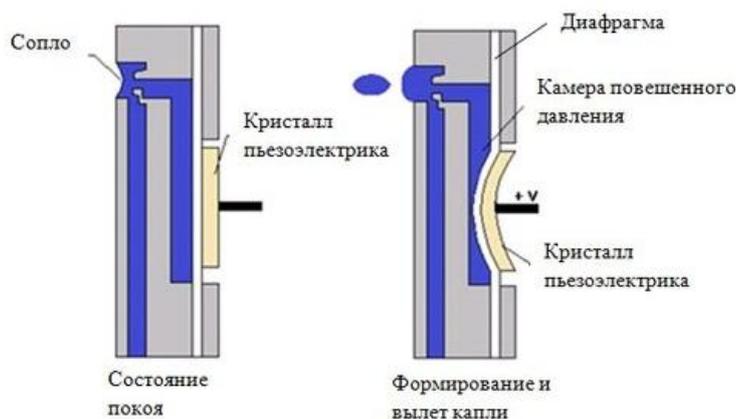


Рисунок 3.51– Устройство пьезоэлектрической головки

Термическая – в сопле расположен микроскопический нагревательный элемент, который при прохождении электрического тока мгновенно нагревается до температуры около 500 °С, при нагревании в чернилах образуются газовые пузырьки, которые выталкивают капли жидкости из сопла на основание для печати [194] (рисунок 3.52).

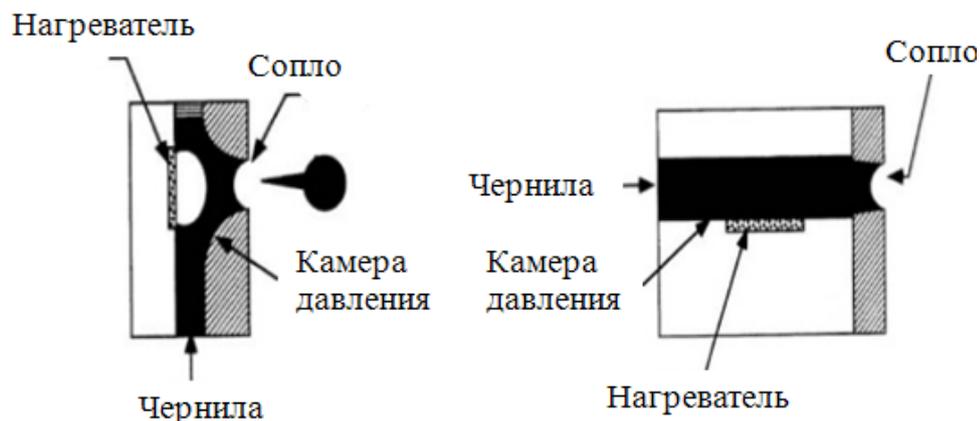


Рисунок 3.52 Устройство термической головки

Несмотря на различия в конструктиве печатающих головок и принципе формирования капли, пьезоэлектрическая и термическая печать обладают одинаковыми недостатками:

- 1) возможность малого смачивания подложки чернилами;
- 2) появление эффекта кофейного кольца;

- 3) пропуск выдачи чернил (засорение сопел);
- 4) хаотические капли на высоких частотах и брызги на печатных элементах.

Контактная печать. Под «контактной технологией печати» следует понимать не растровое формирование изображения, а непрерывное движение жидкости из выдающего сопла, при котором печатающая головка должна находиться максимально близко к поверхности подложки, для формирования жидкостного моста между подложкой и соплом [197]. Системы, применяющие контактную технологию печати, называют плоттерами, так как принцип формирования изображения заимствован у, известных в полиграфии, графопостроителей. Принцип работы плоттеров заключается в следующем: печатающая головка, которая имеет одно единственное сопло, закреплена на трехкоординатном устройстве позиционирования, которое для печати перемещает печатающую головку над поверхностью основания. Данные системы создают изображение сравнительно медленнее струйных принтеров, но качество пленки и прецизионность нанесения намного выше.

Главными преимуществами систем ультразвукового капиллярного дозирования является: высокая точность дозирования, наилучшая однородность пленок, низкие требования к параметрам чернил.

Основным элементом систем является дозатор (печатающий элемент): стеклянная полая игла, прикрепленная к торцевой части пьезоэлемента (рисунок 3.53). В дозаторе для контроля нанесения жидкости используется ультразвук: на пьезоэлемент печатающего элемента подается сигнал с определенной частотой и напряжением, после чего на кончике капилляра образуется капля, которая контактирует с поверхностью. Рабочая частота дозатора находится в диапазоне от 400–700 кГц. С кончика капилляра под действием ультразвуковых колебаний в направлении продольной оси свисает капля. В задачи системы позиционирования плоттеров входит обеспечение контакта мениска жидкости с поверхностью подложки и последующее перемещение капилляра по заданной траектории. При этом в каждой точке траектории контакт самого капилляра с поверхностью подложки должен быть исключен [190]. Представленный метод дозирования основан на принципе ультразвукового капиллярного эффекта.

Эта технология может формировать капли объемом от пиколитра, которые контактным дозированием формируют на поверхности точки и линии размером до 5 мкм в ширину. Так же может быть использован широкий спектр чернил, в том числе водные растворы и многие органические растворители. В данной системе могут использоваться

жидкости с вязкостью до 450 сП. Ультразвуковое воздействие также является эффективным механизмом очистки.

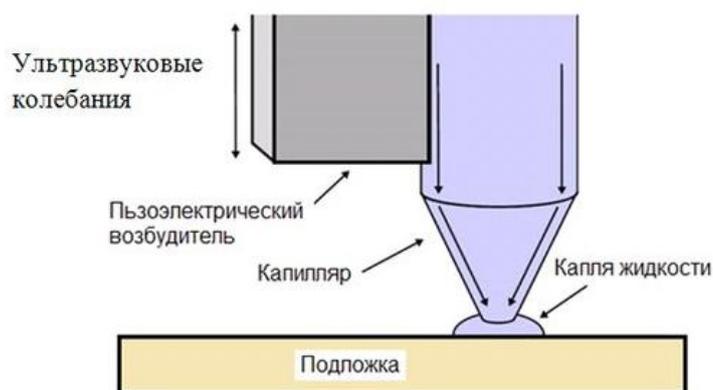


Рисунок 3.53 – Принцип формирования капли жидкости в системе ультразвукового капиллярного дозирования

К недостаткам данной системы следует отнести испарение вещества, так как стеклянный капилляр не герметичен, а заправка печатающего элемента осуществляется из открытой емкости, что приводит к изменению концентрации вещества в чернилах и вязкости, соответственно.

Шприцевое дозирование. Принцип действия оборудования основан на пневматическом дозировании раствора в тонкую трубку (иглу) с малым внутренним диаметром отверстия. Перемещение шприцевого дозатора системой позиционирования по заданным пространственным координатам одновременно с выдавливанием токопроводящих чернил позволяет создавать необходимый рисунок на поверхности диэлектрической подложки. Данный метод позволяет формировать как отдельные капли, так и непрерывный поток жидкости [195]. На рисунке 3.54 схематически представлен принцип работы шприцевого дозатора.

Следует отметить, что минимальная толщина пленок, при использовании данного метода дозирования, составляет не менее 1 мкм, а минимальный размер топологического элемента рисунка – не менее 20 мкм.

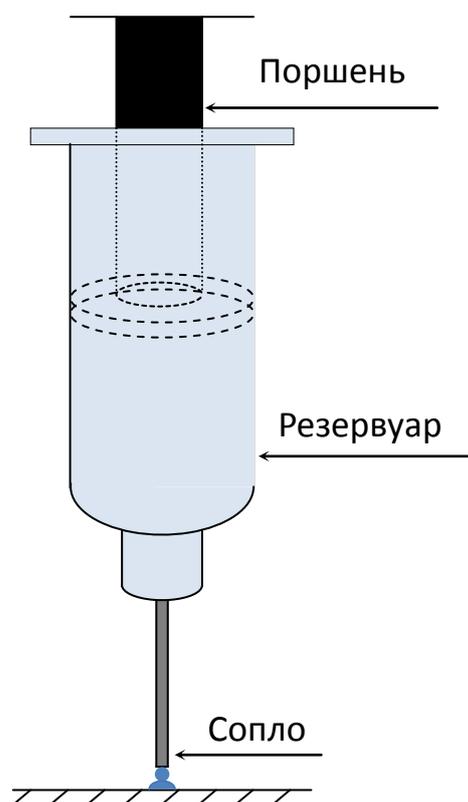


Рисунок 3.54 – Схематическое представление шприцевого дозирования

Недостатком шприцевого дозирования является инерционность из-за создаваемого в шприце давления. Ввиду этого нанесение не непрерывного топологического рисунка является затруднительным. На рисунке 3.55 изображен макет установки плоттерной печати со шприцевым дозированием.

Существующие микропрецизионные шнековые дозаторы лишены этого недостатка, причем они позволяют в отличие от шприцевых более успешно работать с пастами высокой вязкости.

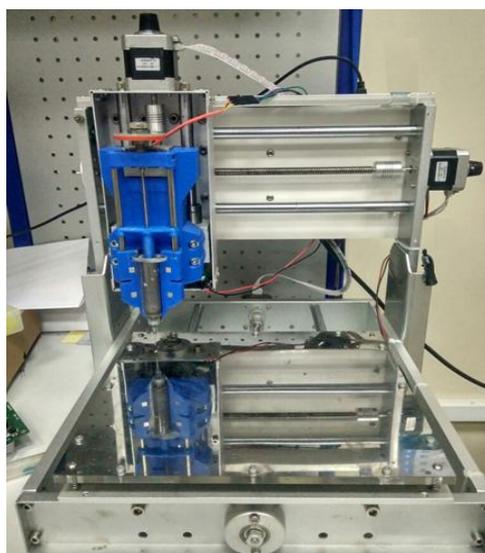


Рисунок 3.55 – Устройство плоттерной печати со шприцевым дозированием

На основании представленных материалов можно сделать следующие заключения:

1) Применение аналоговых методов печати требует высоких энерго- и ресурсозатрат, таких как: обеспечение печатных форм в соответствии с топологией функционального элемента, большое количество печатного материала, контроль технологического процесса печати и др. Так же следует отметить, что аналоговые технологии – высокоотходное производство.

2) Использование бесконтактных цифровых технологий позволяет автоматизировать и упростить процесс печати, однако они предъявляют высокие требования к параметрам чернил (вязкости, составу, поверхностному натяжению и прочее). Также для достижения определенной толщины пленки требуется последовательное нанесение нескольких слоев, что может оказать влияние на внутреннюю структуру пленки. Таким образом, бесконтактная печать наиболее подходит для применения в однослойной тонкопленочной технологии.

3) Контактные методы позволяют снизить энергозатраты, обеспечить экономию материала, четкость контуров и однородность пленок, имеет широкий спектр разрешенных материалов для печати.

В Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники проводились работы по созданию устройств печатной электроники, в частности органических светоизлучающих диодов (ОСИД) в матричной компоновке. Работы выполнялись с использованием плоттера Microplotter GIX II (Sonoplot), представленного на рисунке 3.56.



Рисунок 3.56 – Microplotter GIX II

В основу принципа работы положен ультразвуковой капиллярный эффект. Печатающим элементом является капилляр с жидкостью, который с помощью системы пози-

ционирования перемещается над поверхностью подложки. С кончика капилляра, под действием вибрации в направлении продольной оси, свисает капля. В задачи системы позиционирования входит обеспечение контакта мениска жидкости с поверхностью подложки и последующее перемещение капилляра по заданной траектории. При этом в каждой точке траектории контакт самого капилляра с поверхностью подложки должен быть исключен.

Перед процессом нанесения, для определения эффективных частот накачки жидкости, измеряется частотная характеристика модуля входного импеданса электромеханической резонансной системы, состоящей из пьезоэлемента и капилляра, заполненного жидкостью. Вид такой характеристики приведен на рисунке 3.57.

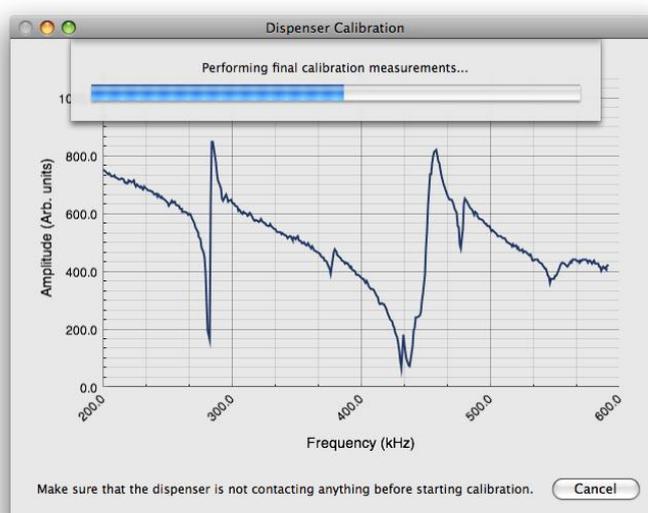


Рисунок 3.57– Частотная характеристика импеданса пьезоэлемента

Впоследствии, в процессе печати, воздействие электрическим сигналом на пьезоэлемент осуществляется на частотах соответствующих минимуму импеданса. Причем более низкая резонансная частота соответствует продольному колебанию пьезоэлемента, более высокая – поперечному. При необходимости, в процессе печати процедуру калибровки повторяют.

На рисунке 3.58 приведена фотография примера нанесения раствора при помощи плоттера.

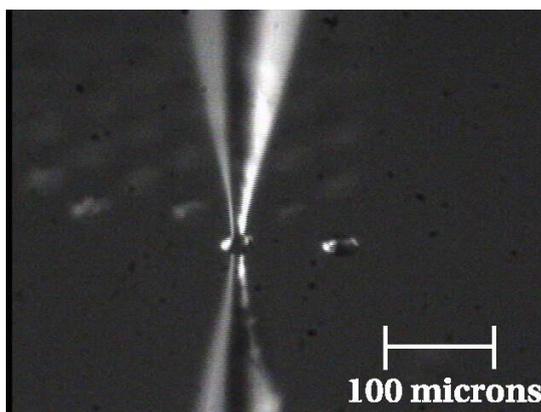


Рисунок 3.58 – Пример нанесения жидкости при помощи плоттера

Приведенные в подразделе сведения позволили выбрать направления аддитивной технологии, которые имеют перспективу практического применения на данном этапе развития ЦКП [195-203]. Продолжение исследований аддитивных методов в технологии – одна из целей проекта.

3.7.1 Аддитивные технологии изготовления сложных конструктивных элементов

Одно из очевидных преимуществ аддитивных принтерных технологий состоит в возможности изготавливать конструкции произвольной формы. В ЦКП с привлечением сотрудников СКБ «Смена» проведены работы по проектированию сложных конструкций устройств хранения и выдачи пластиковых карт картоматов. На рисунке 3.59 показан вид сверху разработанного модуля хранения для системы обработки пластиковых карт.

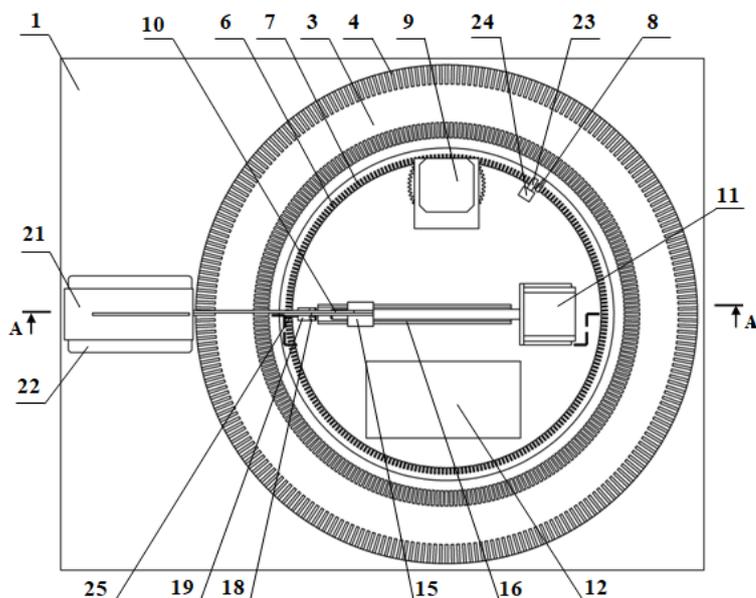


Рисунок 3.59 – Модуль хранения для системы обработки пластиковых карт (вид сверху)

Вид сбоку модуля хранения для системы обработки пластиковых карт приведен на рисунке 3.60.

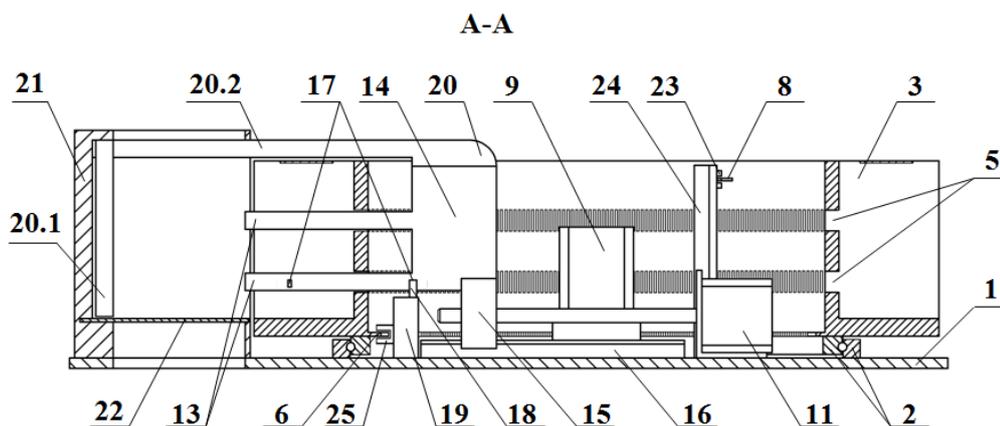


Рисунок 3.60 – Модуль хранения для системы обработки пластиковых карт (вид сбоку)

Устройство (модуль хранения), представленное на рисунках 3.59, 3.60, содержит корпус (условно не показан), в котором установлены на основании (поз. 1) опорный подшипник (поз. 2) с закрепленным на нем накопителем карт (поз. 3), который выполнен в виде цилиндра с углублениями (поз. 4) с внешней стороны, в виде ячеек, для установки карт, а с внутренней стороны цилиндра выполнены сквозные отверстия (поз. 5), расположенные против места расположения каждой карты, в количестве по два на каждую карту, но может быть как меньше, так и больше, с внутренней стороны по низу цилиндра накопителя карт (поз. 3) выполнены лепестки (поз. 6) со щелями (поз. 7) между соседними лепестками, которые служат для определения местоположения каждой карты, при этом над одним лепестком выполнена метка (поз. 8), в виде штырька, отмечающего таким образом точку отсчета, то есть нулевой лепесток, от которого будет вестись отсчет всех остальных лепестков, а, следовательно, номеров последующих ячеек.

Лепестки (поз. 6) могут быть расположены не только по низу цилиндра, но и по окружности, отстоящей от основания цилиндра на некоторой высоте, которая определяется конструктивными возможностями устройства.

В конкретной представленной реализации накопителя карт (поз. 3) углубления (поз. 4) выполнены частично открытыми в верхней части цилиндра (поз. 3), однако они могут быть выполнены и полностью закрытыми в верхней части цилиндра (поз. 3).

Внутри пространства, ограниченного накопителем карт (поз. 3) расположены конструктивные элементы устройства, а именно, двигатель (поз. 9), вращающий накопитель карт (поз. 3) по часовой и против часовой стрелки; блок загрузки и выгрузки карт (поз. 10), совершающий возвратно-поступательные движения с помощью двигателя (поз. 11);

блок управления (поз. 12), управляющий и координирующий работу всех датчиков и исполнительных механизмов.

Столь сложная конструкция при изготовлении в металле будет очень трудоемка и поэтому потребуются упрощения для повышения технологической реализуемости. Использование принтерной аддитивной технологии все ограничители подобного свойства снимает.

3.8 Перечень договоров, выполнение которых проводилось с использованием оборудования ЦКП «Импульс»

В течение 2019 г., в том числе в период начала действия соглашения № 075-15-2019-1644 от 08.11.2019 г., ресурсы ЦКП использовались при выполнении проектов Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 гг.»:

1. «Прикладные исследования и экспериментальная разработка многочастотных радиолокационных станций дистанционного зондирования Земли на платформах легкомоторной и беспилотной авиации для решения задач мониторинга и противодействия техногенным и биогенным угрозам» (соглашение № 14.577.21.0279 от 26 сентября 2017 г.);

2. «Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств» (соглашение № 14.577.21.0266 от 26 сентября 2017 г.);

3. «Создание отечественных электрооптических модуляторов на основе квантоворазмерного эффекта Штарка для высокоскоростных 400 Гбит/с волоконно-оптических систем передачи информации» (соглашение № 14.577.21.0281 от 23 октября 2017 г.);

4. «Разработка перспективных однокристалльных передающих СВЧ-модулей миллиметрового диапазона на основе полупроводников типа АЗВ5 для применения в современных информационно-коммуникационных системах нового поколения (5G)» (соглашение № 14.577.21.0250 от 26 сентября 2017 г.).

5. Хоздоговорные работы и задания Минобрнауки (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Хоздоговорные работы и проектная часть Минобрнауки

№ темы	Наименование	Объем в руб.	Заказчик
--------	--------------	--------------	----------

044/19	Исследование вариантов построения и моделирование интегральных блоков перспективных СВЧ передающих, приемных и приемо-передающих радиотрпктов Ку-диапазона длин волн, выполненных по полупроводниковым технологиям Si/SiGe/GaAs/GaN.	6000000,00	АО "Концерн ВКО"Алмаз-Антей"
027/19	Измерение параметров радиофотонного интегрального приемника, включая параметры рассеяния и коэффициент оптического преобразования.	30000,00	ООО "ТУСУР-Электроника"
013/19	Исследование характеристик микроволновой и радиофотонной ЭКБ высокой степени интеграции и компонентов радиотехнических систем с АФАР (Шифр - "Поиск 2-ТУСУР")	2700000,00	ООО "ЛЭМЗ-Т"
010/19	Компьютерное моделирование электрических характеристик приемо-передающих модулей, комплексированных сборок на их основе и их составляющих элементов.	1700000,00	АО "НИИМЭ"
022/18	Исследования характеристик синтезаторов частот (СЧ) на основе оптоэлектронных генераторов для радиотехнических систем с АФАР и вариантов их усовершенствования с использованием радиофотонных интегральных схем (РИС) (Шифр - "Фотон СЧ-ТУСУР") (Шифр - "Поиск	4200000,00	ООО "ЛЭМЗ-Т"
001/18	Разработка блока накачки отрицательного напряжения подложки и блока защиты от электростатического электричества для технологии КНИ-0,18 мкм (шифр - "Цифра-38-ТУСУР")	16000000,00	АО "НИИМЭ"

Продолжение таблицы 3.4

022/17	Исследование и разработка умножителя частоты и цифрового аттенюатора для приемного модуля К-диапазона, выполняемого по кремниевой технологии.	15000000,00	АО "НПФ "Микран"
ПЧ-10/17	Исследование и разработка элементов высокоинтегрированных приемных модулей К-диапазона типа "Система на кристалле", выполняемых по кремниевым наногетерструктурным технологиям, для систем связи	30342800,00	Минобрнауки РФ

Выполнение перечисленных и других работ потребовало организации взаимодействия руководства ЦКП и руководителей и ответственных исполнителей тем. Были составлены формы документов, по которым осуществлялось внутреннее использование ре-

сурсов ЦКП. Ниже приведены примеры оформленных приказа, акта и протокола измерений.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ПРИКАЗ № 688

г. Томск

«22» 08 2019 г.

Во исполнение условий Соглашения о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий от 3 июня 2019 г. № 075-15-2019-963 (№ 14.574.21.0172)

ПРИКАЗЫВАЮ:

1. Создать комиссию в составе:

Председатель комиссии:

Газизов Т.Р., главный научный сотрудник НИЛ «БЭМС РЭС».

Члены комиссии:

Заболоцкий А.М., заведующий НИЛ «БЭМС РЭС»;

Комнатнов М.Е., старший научный сотрудник НИЛ «БЭМС РЭС»;

Куксенко С.П., старший научный сотрудник НИЛ «БЭМС РЭС»;

Малютин Н.Д., ведущий научный сотрудник НИИ СЭС, руководитель ЦКП «Импульс».

2. Созданной комиссии рассмотреть факты изготовления и проведения экспериментальных исследований:

прототипа устройства для измерения характеристик элементов и узлов оптимальной сети высоковольтного электропитания при совместных климатических и электромагнитных воздействиях;

прототипов устройств для измерения уровня излучаемой помехозащиты и уровня восприимчивости элементов и узлов оптимальной сети высоковольтного электропитания к излучаемому воздействию;

прототипа устройства для измерения уровня кондуктивной помехозащиты и уровня восприимчивости элементов и узлов оптимальной сети высоковольтного электропитания к кондуктивному воздействию;

прототипа устройства для защиты силовой шины электропитания от сверхкороткого импульса;

прототипа аппаратно-программного комплекса для синтеза и испытаний оптимальной сети высоковольтного электропитания для космического аппарата;

лабораторного макета силовой шины электропитания.

3. Контроль за исполнением приказа возложить на начальника научного управления Медовника А.В.

4. Канцелярии довести настоящий приказ до сведения председателя и членов комиссии и начальника научного управления.

Ректор

 Шелупанов А. А.




Исп. Комнатнов М.Е.
(3822) 41-34-39

УТВЕРЖДАЮ



Ректор ТУСУРа

к.т.н., доцент В.М. Рулевский

« 3 » 12 2019 г.

проведения экспериментальных исследований

«Прототип устройства для защиты силовой шины электропитания от сверхкороткого импульса»

Соглашение с Минобрнауки России

от «3» июня 2019 г. № 075-15-2019-963 (№ 14.574.21.0172)

« 3 » 12 2019 г.

Комиссия в составе:

Председатель	Главный научный сотрудник	Газизов Тальгат Рашитович
Члены комиссии	Заведующий лабораторией	Заболоцкий Александр Михайлович
	Руководитель ЦКП «Импульс»	Малютин Николай Дмитриевич
	Старший научный сотрудник	Комнатнов Максим Евгеньевич
	Старший научный сотрудник	Куксенко Сергей Петрович,

назначенная приказом по ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» от 22 августа 2019 г. № 688, в период с 2 декабря 2019 г. по 3 декабря 2019 г. рассмотрела проведение экспериментальных исследований объекта испытаний.

1. Комиссии предъявлены:

- 1.1. Прототип устройства для защиты силовой шины электропитания от сверхкороткого импульса (далее – Объект испытаний) в количестве 1 шт.
- 1.2. Программа и методика экспериментальных исследований прототипа устройства для защиты силовой шины электропитания от сверхкороткого импульса ЕГВА.758782.001 ПМ.
- 1.3. Технический отчет и протокол экспериментальных исследований ЕГВА.758782.001 Д.

2. Результаты:

Подтверждено проведение экспериментальных исследований Объекта испытаний в ЦКП «Импульс» в период с 2 декабря 2019 г. по 3 декабря 2019 г. в соответствии с программой и методикой экспериментальных исследований прототипа устройства для защиты силовой шины электропитания от сверхкороткого импульса ЕГВА.758782.001 ПМ.

3. Вывод

Характеристики Объекта испытаний соответствуют требованиям пунктов ТЗ 4.2.3.3 и 4.2.5.5. Подтверждена возможность использования фильтров на основе связанных линий для защиты от СКИ. Прототип обеспечивает ослабление синфазных и дифференциальных кондуктивных помех.

Председатель комиссии

Т.Р. Газизов

Члены комиссии

А.М. Заболоцкий

Н.Д. Малютин

М.Е. Комнатнов

С.П. Куксенко

ПРОТОКОЛ

экспериментальных исследований по пункту № 6

Программы и методики экспериментальных исследований прототипа устройства для защиты силовой шины электропитания от сверхкороткого импульса

ЕГВА.758782.001 Д

№ 1

3 декабря 2019 г.

1. **Объект испытания:** Прототип устройства для защиты силовой шины электропитания от сверхкороткого импульса в количестве 1 шт., акты изготовления от 18.10.2019.
2. **Цель экспериментальные исследования:** проверка соответствия объекта испытания требованиям пункта № 4.2 Технического задания.
3. **Дата начала экспериментальных исследований:** 2 декабря 2019 г.
4. **Дата окончания экспериментальных исследований:** 3 декабря 2019 г.
5. **Место проведения экспериментальных исследований:** ЦКП «Импульс», г. Томск, пр. Ленина, 40.
6. **Средства проведения экспериментальных исследований:**
 - 6.1 Векторный анализатор цепей E5071C, частотный диапазон 300 кГц – 20 ГГц.
 - 6.2 Цифровой стробоскопический осциллограф DSA8300, полоса пропускания 70 ГГц, частота дискретизации 300 Квыб./с.
 - 6.3 Цифровой стробоскопический модуль 80E04, 50 Ом, полоса пропускания 20 ГГц.
 - 6.4 Обостритель GZ1117DN-35/1V, 50 Ом, $U > 25$ В, длительность импульса < 37 пс.
 - 6.5 Генератор импульсов GZ1105DLP2, 50 Ом, время нарастания фронта не более 1 нс, частота повторения импульсов от 10 кГц.
 - 6.6 Атенюатор, 50 Ом, 20 дБ.
 - 6.7 Ответвитель, 50 Ом, 2 дБ на проход, 14 дБ на ответвление.
 - 6.8 Нагрузка 50 Ом, активное сопротивление 50 Ом, 0 – 20 ГГц.
7. **Результаты экспериментальных исследований**

Наименование параметра	Ед. изм.	Номера пунктов		Требования к параметру	Измеренное значение
		Технического задания	Программы и методики испытаний		
Частота среза в синфазном режиме	МГц	4.2.3.3 4.2.5.5	7	-	76
Частота среза в дифференциальном режиме	МГц	4.2.3.3 4.2.5.5	7	-	62
Вносимое затухание при воздействии импульса длительностью 60 пс (по половине амплитуды) в синфазном режиме	дБ	4.2.3.3 4.2.5.5	7	-	24,3
Вносимое затухание при воздействии импульса длительностью 60 пс (по половине амплитуды) в дифференциальном режиме	дБ	4.2.3.3 4.2.5.5	7	-	26,6

8 Замечания и рекомендации

Отсутствуют.

9 Выводы

9.1 Объект испытания *ЕГВА.758782.001* выдержал испытание по пункту № 7 Программы и ме-

тодики экспериментальных исследований прототипа устройства для защиты силовой шины электропитания от сверхкороткого импульса ЕГВА.758782.001 ПМ.

9.2 Объект испытания *ЕГВА.758782.001* соответствует требованиям пункта № 4.2 Технического задания.

Испытание проводили:

Научный сотрудник

С.А. Артишев



Младший научный сотрудник

Е.С. Жечев



Инженер

В.П. Костелецкий



4 Разработка новых методик измерений

Содержание данного раздела соответствует п. 1.4 плана-графика выполнения работ по проекту.

4.1 Методика восстановления погонных параметров связанных линий по измеренным с помощью векторного анализатора цепей S -параметрам

Методика разработана в связи с приобретением нового оборудования для измерения S -параметров рассеяния (Анализатор цепей Keysight Technologies №5247В с комплектом аксессуаров). Автор методики – д.т.н., профессор каф. КСУП Сычев А.Н., признанный специалист в теории связанных линий. Копия утвержденной методики приведена в отчетной документации. Далее приведено содержание методики с рубрикацией разделов и формул по оригиналу.

4.1.1 Объект исследования и измерительное оборудование

1. Наименование объекта – макет отрезка связанных линий (СЛ), выполненный в отдельном корпусе с коаксиальными соединителями и представляющий собой четырёх-портовое устройство («черный ящик»).

2. Назначение СЛ – использование в качестве базового компонента в составе фильтров, направленных ответвителей, балансных усилителей, согласующе-трансформирующих устройств, фазовращателей отражательного типа, аттенюаторов, модуляторов, диаграммообразующих устройств (ДООУ) антенных систем.

3. Измерительное оборудование ЦКП «Импульс»: векторный анализатор цепей (ВАЦ) Keysight Technologies №5247В, или Rohde Schwarz ZVA40 (ФРГ), или S5048 ПЛАНАР (Россия).

4.1.2 Цель исследования

Целью экспериментального исследования СЛ является восстановление (экстракция, извлечение) «внутренних» погонных параметров связанных линий по измеренным «внешним» S -параметрам четырёхпортового устройства.

Расчетная часть методики восстановления базируется на математическом решении обратной задачи отыскания погонных параметров связанных линий по S -параметрам устройства («черного ящика»).

4.1.3 Основные этапы методики исследования

Методика экспериментального исследования состоит из следующих основных этапов:

1. Калибровка векторного анализатора цепей и подготовка макета связанных линий (четырёхпортового устройства).

2. Измерение S-параметров четырёхпортового устройства.

3. Исключение паразитного влияния межсоединений (деэмбединг).

4. Финальная обработка результатов измерений и восстановление (экстракция, извлечение) погонных параметров связанных линий.

Весь набор погонных параметров связанных линий восстанавливается на заданной частоте из специфицированного диапазона.

4.1.4 Калибровка векторного анализатора цепей (ВАЦ) и подготовка макета связанных линий (четырёхпортового устройства).

1) Подготовить ВАЦ к проведению измерений. Установить диапазон рабочих частот.

2) Для выполнения полной однопортовой калибровки необходимо подготовить комплект калибровочных мер: КЗ, ХХ, нагрузка. Комплект калибровочных мер имеет наименование и характеризуется числовыми параметрами мер.

3) Выполнить полную двухпортовую калибровку.

4) Подготовить макет устройства – симметричных СЛ – для измерений. На макете необходимо обозначить номера портов: 1, 2, 3, 4. Измерить геометрическую длину отрезка СЛ и зафиксировать полученное значение.

5) Подготовить две согласованные нагрузки.

4.1.5 Измерение S-параметров четырёхпортового устройства

Главной особенностью процедуры СВЧ измерений является то что, ВАЦ является двухпортовым прибором, следовательно, для измерения четырёхпортового симметричного устройства требуется не одно, а три измерения. Выполнение в диапазоне частот измерения S-параметров четырёхпортового устройства осуществляется в следующем порядке.

1) Подключить ВАЦ к портам 1 и 2 макета. К портам 3 и 4 подключить согласованные нагрузки (СН). Выполнить измерение модуля и фазы переходного ослабления (связи) $S_{21}=S_{12}$, а также возвратных потерь (коэффициента отражения) $S_{11}=S_{22}$.

2) Подключить ВАЦ к портам 1 и 3 макета. К портам 2 и 4 подключить СН. Выполнить измерение модуля и фазы вносимых потерь (рабочего затухания) $S_{31}=S_{13}$, а также возвратных потерь (коэффициента отражения) $S_{11}=S_{33}$.

3) Подключить ВАЦ к портам 1 и 4 макета. К портам 2 и 3 подключить СН. Выполнить измерение модуля и фазы развязки (изоляции) $S_{41}=S_{14}$, а также возвратных потерь (коэффициента отражения) $S_{11}=S_{44}$.

4) По данным измерений в диапазоне частот сформировать массив матриц S-параметров полного четырехпортового устройства и занести в файл в формате Touchstone с расширением *.s4p.

4.1.6 Исключение паразитного влияния межсоединений (деэмбединг)

1) Выбрать рабочую частоту, на которой требуется выполнить всю дальнейшую обработку полученных экспериментальных данных и восстановить погонные параметры связанных линий.

2) Для устранения влияния паразитных параметров соединителей – дополнительно удлинения каждого из портов из-за ненулевой длины подводящих линий – требуется осуществить процедуру исключения (деэмбединга), которая может быть выполнена следующим образом

$$A = A_1 A_0 A_1; \quad A_0 = A_1^{-1} A A_1^{-1},$$

где A , A_0 , A_1 – матрицы передачи макета СЛ с подводящими линиями, СЛ без подводящих линий и самих подводящих линий, соответственно.

3) Параметры подводящих линий A_1 устанавливаются из предварительных измерений с известной перемычкой.

4.1.7 Финальная обработка результатов измерений и восстановление (экстракция, извлечение) погонных параметров связанных линий

Финальная обработка результатов измерений с извлечением погонных параметров связанных линий основана на обращении (инверсии) процедуры анализа и начинается с того, что на заданной частоте из матрицы рассеяния (S-параметров) формируется матрица проводимостей Y четырехпортового устройства, соответствующая «чистому» отрезку СЛ:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}.$$

Дальнейший алгоритм восстановления погонных (первичных) параметров состоит из двух основных этапов:

1. Определение модальных параметров СЛ по внешним параметрам четырехпортового устройства. Модальные параметры СЛ синтезируются из матрицы проводимостей отрезка СЛ. Известны сингулярные разложения матриц-клеток Y_{aa} , Y_{ab} составляющих матрицу проводимостей многопроводных СЛ:

$$Y_{aa} = I_m \{ \text{cth } \gamma l \} U_m^{-1}; \quad Y_{ab} = -I_m \{ \text{csch } \gamma l \} U_m^{-1}, \quad (4.1)$$

где U_m – матрица модальных напряжений размером $N \times N$;

I_m – матрица модальных токов размером $N \times N$;

$\{\text{cth } \gamma l\}, \{\text{csch } \gamma l\}$ – матричные функции от диагональной матрицы постоянных распространения нормальных типов волн $\{\gamma\}$ размером $N \times N$;

l – длина отрезка связанных линий;

N – количество связанных линий ($N=2$).

На основе этих разложений (1) становится возможным определение матриц модальных параметров СЛ $U_m, I_m, \{\gamma\}$. Из соотношения

$$A_{aa} = -Y_{ab}^{-1} Y_{aa} = U_m \{\text{ch } \gamma l\} U_m^{-1} = U_m \{\lambda\} U_m^{-1} \quad (4.2)$$

решением алгебраической проблемы собственных значений находятся собственные векторы U_m и собственные значения λ_i матрицы A_{aa} . Отсюда выражение для постоянных распространения γ_i запишется так

$$\gamma_i = \text{Arch } \lambda_i / l = [\ln(\lambda_i + \mu_i)] / l, \quad (4.3)$$

$$\text{где } \lambda_i = \text{ch } \gamma_i l, \quad \mu_i = \pm \sqrt{\lambda_i^2 - 1} = \text{sh } \lambda_i l, \quad (i=1, \dots, N).$$

Из собственных векторов U_m матрицы A_{aa} составляется матрица модальных напряжений U_m . Матрица модальных токов I_m находится перемножением следующих матриц $I_m = -Y_{ab} U_m \{\mu\}$. В исследуемом случае двух связанных линий на основе этих соотношений становится возможным записать аналитически замкнутые выражения для каждого элемента матрицы модальных параметров:

$$\{\gamma\} = \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 \\ 0 & \gamma_2 \end{bmatrix}; \quad U_m = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a & b \end{bmatrix}; \quad I_m = \begin{bmatrix} c & d \\ -c/b & -d/a \end{bmatrix}; \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{1,2} &= [\ln(\lambda_{1,2} + \mu_{1,2})] / l; & a &= (\lambda_1 - a_{11}) / a_{12}; & c &= -\mu_1 (y_{13} + a y_{14}) / \rho; \\ & & b &= (\lambda_2 - a_{11}) / a_{12}; & d &= -\mu_2 (y_{13} + b y_{14}) / \rho, \end{aligned}$$

где ρ – волновое сопротивление подводящих линий,

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= (a_{11} + a_{22} + K) / 2; & \left\{ \begin{aligned} a_{11} &= (y_{14} y_{12} - y_{11} y_{24}) / \Delta_a; \\ a_{12} &= (y_{14} y_{22} - y_{12} y_{24}) / \Delta_a; \\ a_{21} &= (y_{11} y_{14} - y_{13} y_{12}) / \Delta_a; \\ a_{22} &= (y_{12} y_{14} - y_{13} y_{22}) / \Delta_a; \end{aligned} \right. \\ \lambda_2 &= \lambda_1 - K; \\ \mu_1 &= \pm \sqrt{\lambda_1^2 - 1}; \\ \mu_2 &= \pm \sqrt{\lambda_2^2 - 1}; \\ K &= \sqrt{(a_{11} - a_{22})^2 + 4a_{12} a_{21}}; & \Delta_a &= y_{13} y_{24} - y_{14}^2. \end{aligned}$$

Выбор знака \pm в выражениях для $\mu_{1,2}$ влияет на знаки постоянных распространения $\gamma_{1,2}$. Эти величины должны удовлетворять условиям физической реализуемости $\text{Re } \gamma_{1,2} > 0$, $\text{Im } \gamma_{1,2} > 0$. Можно показать, что при четырех комбинациях знаков \pm в выражениях для $\mu_{1,2}$, а следовательно, и для $\gamma_{1,2}$ всегда существует только одна физически реализуемая комбинация, соответствующая падающим волнам, и указанное затруднение является чисто математическим. Выбор знака никак не влияет на рассчитываемые далее погонные параметры, они всегда вычисляются однозначно.

2. Определение комплексных погонных параметров СЛ через их модальные параметры в матричном виде:

$$Z_l = U_m \{\lambda\} I_m^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{l11} & Z_{l12} \\ Z_{l12} & Z_{l22} \end{bmatrix}; \quad Y_l = I_m \{\lambda\} I_m^{-1} = \begin{bmatrix} Y_{l11} & -Y_{l12} \\ -Y_{l12} & Y_{l22} \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

Элементы матриц погонных параметров Z_l и Y_l записываются:

$$\begin{cases} Z_{l11} = (\gamma_2 c / b - \gamma_1 d / a) / \Delta_z; \\ Z_{l12} = (\gamma_2 c - \gamma_1 d) / \Delta_z; \\ Z_{l22} = (\gamma_2 c b - \gamma_1 d a) / \Delta_z; \end{cases} \quad \begin{cases} Y_{l11} = (\gamma_2 d a - \gamma_1 c b) / \Delta_y; \\ Y_{l12} = (\gamma_1 c - \gamma_2 d) / \Delta_y; \\ Y_{l22} = (\gamma_2 d / a - \gamma_1 c / b) / \Delta_y, \end{cases} \quad (4.6)$$

где $\Delta_y = a - b$; $\Delta_z = \Delta_y c d / (ab)$.

Выделив действительную и мнимую части матриц получаем матрицы погонных сопротивлений R , индуктивностей L , проводимостей G и емкостей C СЛ: $R = \text{Re } Z_l$; $L = \text{Im } Z_l / \omega$; $G = \text{Re } Y_l$; $C = \text{Im } Y_l / \omega$, где ω – круговая частота, на которой производится восстановление.

Алгоритм восстановления погонных параметров имеет компьютерную реализацию.

Заключение

Изложена методика восстановления (экстракции, извлечения) погонных параметров отрезков (секций) связанных линиях по измеренным S-параметрам, которые получены в результате измерения на векторном анализаторе цепей. Методика сопровождается прототипом компьютерной программы, реализующей алгоритм экстракции погонных параметров.

Таблица 4.1 – Измеряемые параметры шероховатости

Термин	Обозначение	Определение
1	2	3
1. Базовая длина	l	Длина базовой линии, используемая для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности
2. Средняя линия профиля	m	Базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, чтобы в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии было минимально
3. Средний шаг неровностей профиля	S_m	Среднее значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины
4. Средний шаг местных выступов профиля	S	Среднее значение шага местных выступов профиля в пределах базовой длины
5. Высота неровностей профиля по десяти точкам	R_z	Сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины $R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pmi} + \sum_{i=1}^5 y_{umi} }{S},$ где y_{pmi} – высота i -го наибольшего выступа профиля; y_{umi} – глубина i -й наибольшей впадины профиля
6. Наибольшая высота профиля	R_{max}	Расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины
7. Отклонение профиля	y	Расстояние между любой точкой профиля и средней линией
8. Среднее арифметическое отклонение профиля	R_a	Среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины

		$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l y dx,$ $Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y ,$ <p>где l – базовая длина; n – число выбранных точек профиля на базовой длине.</p>
--	--	--

4.2.2 Выполнение измерений

После ознакомления с инструкцией по эксплуатации профилометра Profilm3D измерение выполнить в следующей последовательности.

4.2.2.1 Получение изображения

4.2.2.1.1. Фокусировка Profilm3D

Разместить образец на столике и выполнить фокусировку на нем. Это действие выполняется при помощи элементов управления перемещения по оси Z, расположенных под вкладкой «Режим реального времени», или нажатием на кнопку «Автофокусировка».

Как правило, для корректной настройки фокусировки рекомендуется использовать опцию грубой фокусировки (двойные стрелки), а уже потом применять функцию автофокусировки. В качестве альтернативы, фокусировка может быть выполнена при помощи элементов управления как грубой фокусировкой, так и тонкой фокусировкой (одна стрелка). Если фокусировка выполнена должным образом, система интерференционных полос будет отчетливо различима на образце (рисунок 4.2,а).



Рисунок 4.2 – Образец, находящийся в фокусе, но с низкой гладкостью

Если выполняется фокусировка на внутренней части образца, на изображении, в режиме реального времени, могут появиться красные пиксели. Это говорит о том, что происходит перенасыщение спектрометра. Чтобы этого не возникало, необходимо либо активировать опцию «Автоэкспонирования», либо уменьшить интенсивность источника

света при помощи ползунка. Обычно, в целях достижения наилучшего результата, для экспонирования рекомендуется использовать фиксированные значения. Для корректного экспонирования необходимо сначала выполнить фокусировку на образце до тех пор, пока в поле обзора камеры не появится несколько интерференционных полос. Затем необходимо активировать опцию «Автоэкспонирование», если она не была активирована ранее. Необходимо установить интенсивность источника света. Когда в поле зрения камеры не будет отображаться красных пикселей, нужно деактивировать опцию «Автоэкспонирование», чтобы установить необходимое значение для экспонирования. Для образцов с широким динамическим диапазоном может возникнуть необходимость активации опции «Автоэкспонирования» на протяжении всего сканирования. Ширина интерференционных полос служит индикатором текущей гладкости поверхности. Для наклонных поверхностей характерны более узкие интерференционные полосы, для плоских - более широкие. Например, вышеприведенное изображение имеет высокую степень наклона. Для получения более качественного отсканированного изображения, его необходимо отрегулировать при помощи настроек края/наклона.

4.4.2.1.2 Регулировка высоты/наклона

После размещения образца на столике и выполнения фокусировки выровнять предметный столик, чтобы поверхность образца относительно объектива была настолько ровной, насколько это возможно. Для этих целей в Profilm3D имеется механизм регулировки края/наклона, встроенный в предметный столик и состоящий из двух регулировочных ручек, одна из которых расположена на переднем краю столика, другая - на правом. При помощи этих ручек можно поднимать и опускать столик, закрепленный на опорной точке, расположенной по центру. Вращая регулировочные ручки по часовой стрелке, можно опустить соответствующий край столика. Поднять столик можно, вращая эти ручки против часовой стрелки. Наиболее подходящим местом для ровного расположения образца является центр столика, расположенный строго напротив опорной точки.

Необходимо выбрать одну из регулировочных ручек и вращать ее до тех пор, пока интерференционные полосы не выстроятся в строго вертикальном положении. После каждой регулировки необходимо повторно выполнять фокусировку, так как при каждом повороте ручки положение столика относительно объектива изменяется. Если ручка поворачивается по часовой стрелке, фокусировку необходимо выполнить ниже того положения, в котором она была установлена ранее, и против часовой стрелки, если выше.



Рисунок 4.3 – Пример сильно наклоненного образца

На рисунке 4.3 показано корректное положение регулировочной ручки переднего столика. Если интерференционные полосы приняли строго вертикальное или горизонтальное положение и выровнялись по оси, дальнейшей регулировки при помощи данной ручки не требуется. Начните регулировку при помощи следующей ручки, чтобы увеличить ширину интерференционных полос. Фокусировку на образце необходимо выполнять при помощи элементов управления для тонкой фокусировки, уделяя внимание направлению, в котором перемещаются интерференционные полосы, для того чтобы определить направление вращения. Например, если, как указано на рисунке 2.2, интерференционные полосы перемещаются из правой части изображения в левую, то это свидетельствует о том, что правая сторона столика находится выше левой. Чтобы отрегулировать ее, нужно повернуть ручку, расположенную с боковой стороны столика, чтобы поднять правый край и выровнять образец. Так же, как и в случае с первой ручкой, после каждой регулировки, выполненной при помощи второй ручки, необходимо выполнять повторную фокусировку, соблюдая аналогичные инструкции для определения направления фокусировки (по часовой стрелке - ниже, против часовой стрелки - выше).



Рисунок 4.4 – Изображение образца после применения регулировки края/наклона

На рисунке 4.4 изображен образец, сглаженный при помощи регулировки края/наклона. Для гладких, плоских образцов имеется возможность их выравнивания таким образом, что на экране не появляется искажения интерференционных полос, только минимальное (изображение практически черное) или максимальное (изображение практически белое) на всем поле изображения. Для не плоских образцов, таких как сферы, цилиндры, шероховатые поверхности, интерференционные полосы не могут быть строго вертикальными или горизонтальными. В таких случаях для определения направления, в котором следует переместить столик, нужно использовать относительное перемещение по изображению, получаемому с камеры. Когда образец на изображении будет плоским, можно приступать к сканированию. Если область сканирования больше чем поле зрения объектива, для автоматической регулировки сканирования необходимо активировать опцию «Настройки сетки сканирования». В обратном случае, выбрать пункт «Сбор данных»

4.2.2.1.3. Сбор данных

Используется следующая программа для высоты шага SHS-CrOnSi-10 мкм и называется «Высота шага».

Выбрать программу «Высота шага», щелкнув по всплывающей стрелке, находящейся рядом с пунктом «Программа сканирования и анализа». Затем выбрать из списка «Высота шага». При необходимости, просмотреть и отрегулировать настройки сканирования, таким образом, чтобы они совпадали с настройками, указанными ниже, затем нажать «ОК» для подтверждения настроек:

- Измерение: WLI;
- Скорость сканирования: Нормальная;
- Приближение: 4x;
- Удаление: 15 мкм;
- Длина сканирования: 30 мкм;
- Средние значения сканирования: 1;
- Настройки WLI: Центроид;
- Постобработка: Отсутствует.

Для начала сбора данных необходимо нажать «Пуск». По мере выполнения сканирования интерференционные полосы должны перемещаться по образцу. Процесс сканирования можно отслеживать при помощи индикатора, расположенного над окном с изображением. По завершении сканирования откроется новая вкладка с результатами сканирования.

4.2.2.1.4. Настройка сетки сканирования

В некоторых случаях для выполнения измерения может потребоваться область большего размера, чем поле зрения объектива Profilm3D. В таком случае нужно использовать опцию «Сетка», чтобы для анализа или дальнейшего сшивания выбрать более крупную область.

Определить область сканирования при помощи диалогового окна «Параметры сетки», открыть которое можно в пункте «Программа для сканирования и анализа», нажав на кнопку «Редактировать». Затем щелкнуть мышкой по окошку, расположенному напротив опции «Сетка», а потом – по кнопке «Детали». В открывшемся окне нужно ввести необходимый размер для сканирования и процент перекрытия между отдельными отсканированными предложениями. Сшивание нескольких отсканированных отображений: для получения наилучших результатов рекомендуемое перекрытие должно составлять 20% (рисунок 4.5).

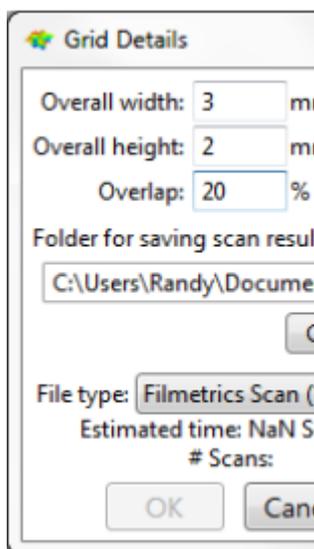


Рисунок 4.5 – Параметры сетки

После ввода значений, программное обеспечение выполнит оценку количества сканирований и времени, необходимого для применения опции «Сетка». В конце нужно выбрать расположение файлов и тип файлов, которые будут использованы для сохраненных сканирований.

По завершении сканирования программное обеспечение будет сохранять файлы в выбранную папку. Можно использовать любой тип файлов. Для программного обеспечения, произведенного сторонними производителями, например, в случае таких как DigitalSurf's MountainsMap, нужно использовать файлы формата .sur. Для сохранения изменений нажать «ОК». Нажать кнопку «Пуск».

Profilm3D начнет наносить сетку, приняв текущее положение в качестве центральной точки итогового расположения сетки.

4.2.2.1.5. Сшивание нескольких сканирований

Для измерения образцов, размер которых превышает область изображения объектива, в Profilm предусмотрена дополнительная функция («Сшивание UPG»), позволяющая сшивать несколько сканирований в одно изображение. Для получения сшитого изображения необходимо следовать инструкциям, приведенным ниже.

1. Получение сканированных изображений: перед сшиванием итогового сканирования необходимо сформировать отдельные части изображения. Это может быть выполнено при помощи опции «Сетка» или при помощи расположения образца на столике и получения нескольких сканирований вручную. При получении данных вручную необходимо оставить некоторое перекрытие между сканируемыми изображениями (рекомендуемое - 20%) для успешного выполнения сшивания.

2. Открыть диалоговое окно «Сшивание»: в Главном меню выбрать «Сшить...».

3. Выбор отсканированных изображений: выбрать отсканированные изображения нажав кнопку «Добавить». Выбрать сразу несколько файлов можно, зажав кнопку Shift и щелкнув по первому и последнему файлу в списке, или зажав кнопку Ctrl и щелкнув по необходимым отсканированным изображениям.

4. Удаление нежелательных отсканированных изображений: некоторые отсканированные изображения могут не понадобиться для сшивания. Например, при сеточном поиске по круглому образцу может обнаружиться, что по углам изображения данные отсутствуют. Такие отсканированные изображения можно удалить при сшивании, нажав правую кнопку мыши на отсканированном изображении в окне «Поверхности для сшивания» и удалив одно изображение или все изображения в конкретной строке или столбце.

5. Настройка порядка сшивания: в зависимости от природы поверхности, изменение последовательности алгоритма сшивания может привести к лучшему итоговому результату. Необходимо выбрать пункт «Автоматически», чтобы программное обеспечение решило, какую процедуру использовать, или выбрать другой параметр сшивания по строкам или столбцам.

6. Активация оптимизации: нажать на соответствующий флажок в поле «Оптимизировать», чтобы программное обеспечение искало наилучшее перекрытие с использованием значения, выбранного в выпадающем списке; если флажок не активирован, будет использоваться стандартная процедура. Также можно выполнить корректировку наклона. Для просмотра итогового сшитого изображения необходимо нажать «Обновить...».

7. Установка обрезки: в поле «Результат» предлагается два варианта вывода данных: полный результат – «Поверхность результата» или обрезка по внутреннему прямоугольнику. При обрезке по внутреннему прямоугольнику программное обеспечение попытается найти наибольшую смежную область в сшитых данных, исключая при этом неизмеренные участки, которые могли образоваться при сшивании.

8. Вывод сшитого отсканированного изображения: для завершения процесса сшивания нажать «ОК». Сшитое отсканированное изображение отображается в новой вкладке и может быть сохранено в виде отдельного файла.

4.2.2.2 Просмотр и анализ изображения

4.2.2.2.1 Управление камерой трехмерного просмотра

По завершении сканирования создается новый трехмерный график. Управление трехмерной моделью выполняется при помощи следующих действий:

1. Для вращения изображения необходимо зажать левую кнопку мыши и перемещать курсор. Камера будет вращаться вокруг текущего положения курсора, обозначенного с помощью метки в окне просмотра трехмерного изображения.

2. Для панорамирования изображения необходимо зажать правую кнопку мыши и перемещать курсор.

3. Для уменьшения или увеличения необходимо использовать колесо мыши: чтобы приблизить - вращать вперед, чтобы отдалить - назад. Изображение увеличивается при наведении мыши на определенный пиксель.

Управление камерой посредством кнопок может быть активировано при помощи диалогового окна «Общие настройки трехмерного изображения», которое можно открыть, выбрав вкладку «Настройки дисплея» в строке «Анализировать». Эти кнопки отображаются в левом нижнем углу трехмерного изображения и могут быть использованы для поворота, панорамирования и масштабирования изображения (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – Кнопки перемещения трехмерного изображения

При нажатии на кнопку «Показать шаг» на трехмерной модели будет отображен текущий выбранный при двухмерном сканировании шаг по высоте, но только в том случае, если была активирована функция «Шаг высоты» или «Срез». При нажатии на кнопку

«Показать плоскость пересечения» будет отображено место, где плоскость высоты трехмерного изображения пересекается с измеренной поверхностью.

Программное обеспечение поддерживает технологию SpaceMouse™ 3D для работы мышью с трехмерными изображениями. В верхнем правом углу трехмерного отсканированного изображения отображается начальный график XYZ для сохранения ориентации при перемещении по образцу. График привязан к переднему левому углу изображения образца, который соответствует нижнему левому углу двухмерного сканирования. Чтобы вернуться к этому представлению, необходимо нажать кнопку «Стандартное поле зрения камеры» для отмены изменений, примененных к трехмерной модели.

В диалоговом окне «Настройки трехмерного освещения» можно настраивать параметры освещения модели. Данные значения могут быть установлены по усмотрению пользователя, при внесении изменений изображение будет изменяться. Для возврата к настройкам по умолчанию (относительно камеры, азимут 0, подъем -45) необходимо нажать на кнопку «Стандартное положение освещения». Относительная интенсивность света регулируется при помощи бегунка «Интенсивность света». По умолчанию интенсивность света составляет 100%.

4.2.2.2.2 Срез

Инструмент «Срез» позволяет просматривать линейные профили без анализа данных. Инструмент «Срез» использует ту же методологию, что и функции «Шаг высоты - линия» и «Шероховатость линии». В середине отсканированного изображения рисуется горизонтальная линия. Необходимо удерживать клавишу мыши и перемещать линию или конечные точки для изменения размера или передвижения. При нажатии на конечные точки, активируется диагональный режим (рисунок 4.7).

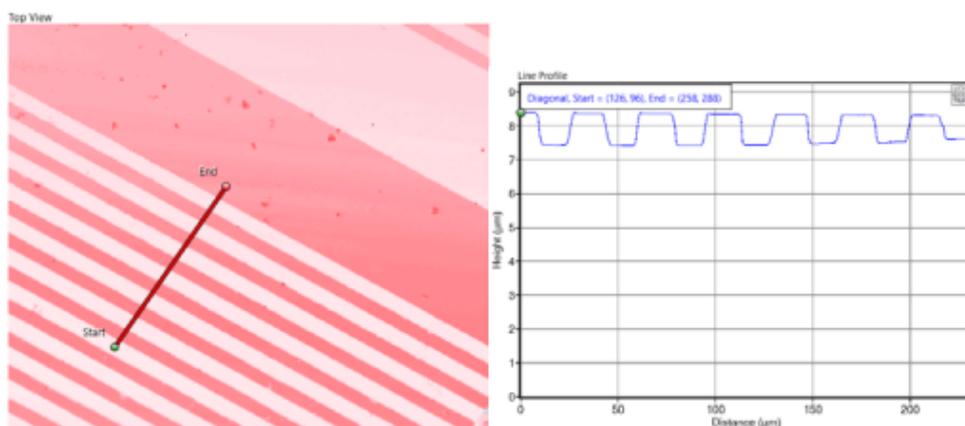


Рисунок 4.7 – Пример среза линейного сегмента в диагональном режиме.

Шкала автоматически настраивается в соответствии с длиной сегмента в диагональном режиме.

Для переключения между другими режимами необходимо нажать стрелку раскрывающегося списка под кнопкой «Срез» или использовать команду клавиатуры для горизонтального (Ctrl+H) или вертикального (Ctrl+V) перемещения. Если плоскость среза проходит через некорректные данные, этот участок линейного профиля будет выделен серым цветом.

4.2.2.2.3 Размеры

4.2.2.2.3.1 Измерение линейных сегментов

Сначала необходимо добавить новую линию в двухмерном режиме, нажав кнопку «Размеры» под вкладкой «Анализ». Откроется новая боковая панель (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Боковая панель

Необходимо нажать на кнопку «Добавить линию», после чего будет добавлен новый линейный сегмент в окне двухмерного сканирования, как показано на рисунке 4.9.

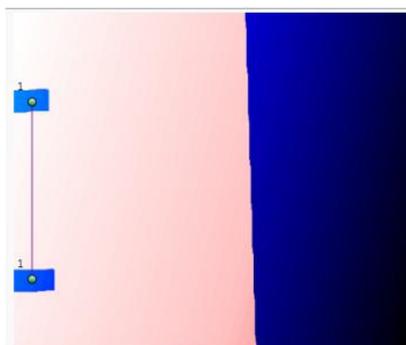


Рисунок 4.9 – Линейный сегмент в двухмерном сканировании

Для измерения более одной характеристики одновременно необходимо нажать кнопку «Добавить линию» еще раз, чтобы нарисовать новый линейный сегмент, как показано на рисунке 4.10.

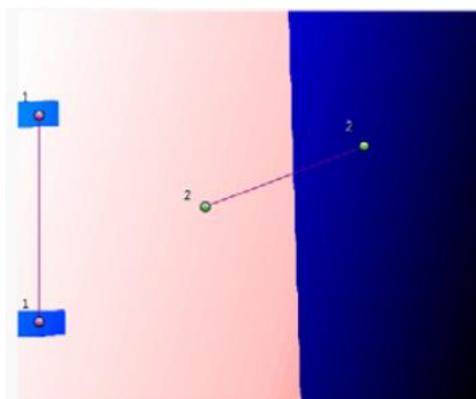


Рисунок 4.10 – Отображение нескольких линейных сегментов одновременно

Чтобы переместить линейный сегмент, необходимо нажать любую из конечных точек, обозначенных соответствующим номером над точками, и перетащить ее в нужное место. Конечные точки активного линейного сегмента выделены зеленым цветом. Невыделенные сегменты отображаются в фиолетовом цвете.

При размещении линейных сегментов результаты линейных измерений отображаются в окне «Измерения размеров» в боковой панели (рисунок 4.11).

Dimension Measurements						
Circles						
Delete Name Diameter (μm)						
Lines						
Delete	Name	Δx (μm)	Δy (μm)	Δz (μm)	Length (μm)	
<input type="checkbox"/>	L1	0	71.03	0.26733	71.03	
<input type="checkbox"/>	L2	110.98	3.55	1.9524	111.04	

Рисунок 4.11 – Таблица измерений размеров

Результаты изменения в положениях x , y , и z , а также общая длина линейного сегмента отображаются в единицах, ранее выбранных в меню «Личные настройки». Скрыть или показать результаты можно нажатием на стрелки управления, которые находятся рядом с полями «Круги» и «Линии» в окне «Измерения размеров». Чтобы удалить линейный сегмент, необходимо выбрать его, нажав кнопку «Удалить активную линию» или красную кнопку «X» рядом с именем сегмента под окном «Измерения размеров».

4.2.2.2.3.2. Круговые измерения

Нажать на кнопку «Размеры», чтобы открыть боковую панель настройки размеров, после чего нажмите «Добавить круг». Будет создан круг в центре двухмерного сканирования. Круг можно перемещать, щелкнув и перетащив его центральную точку, а также изменять его размеры, щелкнув и перетащив его внешнюю точку (рисунок 4.12).

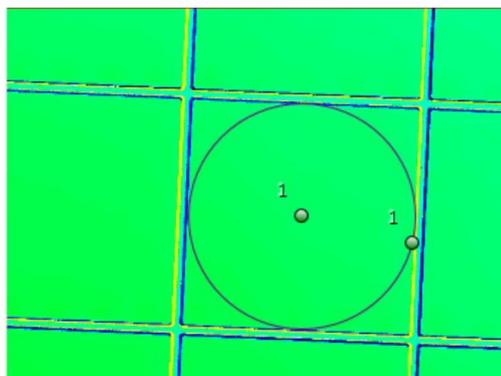


Рисунок 4.12 – Измерение круга в двухмерном сканировании

При повторном нажатии кнопок «Добавить линию» или «Добавить круг» возможно отображение нескольких кругов или линейных сегментов одновременно. Чтобы удалить ненужные данные, необходимо выбрать сегмент или круг, который нужно удалить, затем выбрать «Удалить активную линию» или «Удалить активный круг» или нажать на красную кнопку «X» рядом с именем сегмента под окном «Измерения размеров».

Выбранные линии и круги выделяются зеленым цветом. Диаметр круга отобразится в таблице Измерения размеров (рисунок 4.13).

Dimension Measurements						
Circles						
Delete	Name	Diameter (µm)				
X	C1	37.36				
Lines						
Delete	Name	Δx (µm)	Δy (µm)	Δz (µm)	Length (µm)	
X	L1	0	71.03	0.26733	71.03	

Рисунок 4.13– Таблица измерений размеров

4.2.2.2.4 Шаг высоты

4.2.2.2.4.1 Измерение линии

Измерение высоты шага по линии представляет собой трехэтапный процесс:

1. Определение участка образца, для которого необходимо выполнить измерение.
2. Выбор точки усреднения.
3. Определение положение шага.

Для активации измерения по высоте шага необходимо нажать на кнопку «Высота шага» под вкладкой «Анализ» ленты «Анализировать». Откроется боковая панель, на которой будут отображены три вкладки: «Линия», «Прямоугольник», и «Гистограмма». Необходимо выбрать вкладку «Линия». Пример линейного графика с точками усреднения, расположениями высоты шага и впадинами представлен на рисунке 4.14.

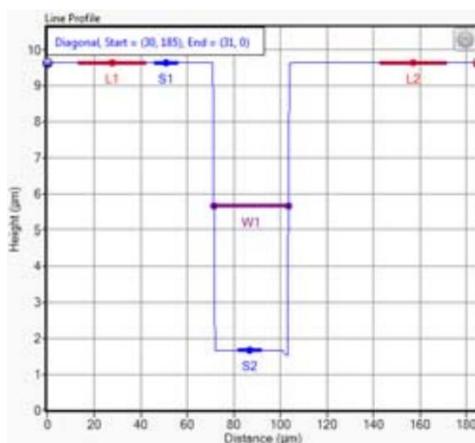


Рисунок 4.14 – Пример линейного графика с точками усреднения, расположениями высоты шага и впадинами

Для выбора области измерения необходимо нажать на кнопку «Вид сверху», расположенную в верхнем левом углу окна сканирования. Текущее выбранное расположение отмечено красной линией, проходящей через образец. По умолчанию эта линия начинается в центре окна сканирования «Вид сверху»; измерения проходят горизонтально вдоль образца. Один из концов линии отмечен зеленой точкой, другой - красной. Чтобы переместить измерительную линию, необходимо щелкнуть в разных местах в верхнем окне или нажать и перетащить красную полосу.

Для перехода в диагональный режим необходимо щелкнуть по обеим точкам, расположенным на концах. При перемещении места измерения нажатием на экране «Вид сверху» отобразится линейный график для данной области в соответствующем окне. Необходимо изменить направление на вертикальное с помощью диалогового окна «Расположение профиля линии» или, нажав сочетание клавиш **Ctrl+V** на клавиатуре. Далее нужно выбрать диагональную опцию, затем переместить начальную и конечную точки для настройки самоопределяемого пути, по которому будут выполняться измерения высоты шага, настроенные таким образом, чтобы соответствовать необходимым элементам.

Масштаб графика изменится, исходя из длины линии. Необходимо усреднить данные используя точки усреднения в функции «Высота шага», затем нажать «Перейти к этапу 2». Если данные уже были усреднены при помощи функций «Выравнивание» или «Сглаживание», расположенных на вкладке «Дополнительные элементы управления для программ», необходимо нажать «Пропустить усреднение и перейти к 3 этапу». Настройка точек усреднения выполняется при помощи их размещения на «Профиле линии», который отображается в нижнем левом углу окна сканирования. Существует две точки, L_1 и L_2 , обозначенные красными вертикальными линиями и окруженные розовыми прямоугольниками. Красная линия обозначает расположение точки усреднения. Прямоугольники по-

казывают область вокруг точки усреднения, которая используется для определения средней высоты. Для определения ширины прямоугольника, необходимо нажать на кнопку «Параметры», расположенную на боковой панели под пунктом Этап 2.

Более широкий диапазон обычно используется для более шероховатых поверхностей. Необходимо переместить точки усреднения, нажав на красную линию и перетащив ее. Далее расположить точки усреднения таким образом, чтобы они находились в одной плоскости поверхности и расстояние между ними было настолько большим, насколько это возможно. После того, как будет выбрано необходимое расположение, необходимо нажать «Применить усреднение и перейти к 3 этапу».

В конце необходимо установить расположение высоты шага. Данная функция работает по аналогии с функцией усреднения, но вместо расположения обеих точек в одной плоскости образца одна точка размещается в нижней части шага, а вторая – в верхней. Чтобы определить ширину точек высоты шага, нужно нажать на кнопку «Параметры».

При активации функции «Измерить ширину элемента» будет выполняться поиск объектов определенных типов (выступов и впадин) для определения их ширины. Если в исследуемой области находится более одного элемента, необходимо использовать среднее значение ширины элемента. Чтобы изменить точку выполнения анализа ширины, необходимо поменять пороговый процент (0 – наименьшее значение, 100 – наибольшее).

Опция «Материалы» позволяет активировать функцию несхожих материалов, применяемую для устранения ошибок при измерении высоты шага, возникающих вследствие сдвигов фаз в отражательной способности различных материалов. Эта функция полезна, если, например, выполняются измерения образца из стекла, покрытого металлической пленкой, к примеру алюминиевой. Из-за фазового сдвига, возникающего вследствие различной отражающей способности поверхностей, программное обеспечение может некорректно расположить верхнюю часть шага относительно образца. Активирование функции «Несхожие материалы» позволяет устранить данную проблему при помощи расчета точного значения высоты шага. При применении данной функции необходимо убедиться в том, что точка высоты шага соответствует материалу. Относительно примера, указанного выше, для точки S_1 должен быть выбран параметр «алюминий» для верхней части шага, а для точки S_2 должен быть выбран параметр «диэлектрик», наиболее подходящий для стеклянных образцов. После того, как обе точки будут установлены в необходимых положениях, необходимо нажать «Завершить» для отображения результатов измерения высоты шага и впадины, если данная функция была активирована.

4.2.2.2.4.2 Измерение прямоугольника

Инструмент «Прямоугольник» используется для измерения средней высоты шага в заданной пользователем области, а не в одной точке. Нужно нажать на кнопку «Высота шага», чтобы открыть боковую панель, а затем на вкладку «Прямоугольники».

Программное обеспечение обнаружит местоположение шага, выделенного белой и красной пунктирной линией, проведенной при двухмерном сканировании (рисунок 4.15).

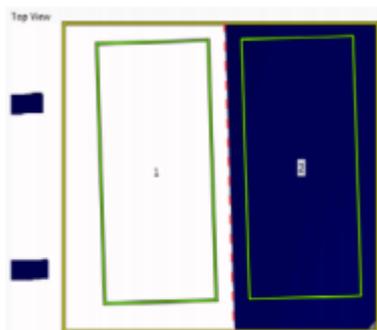


Рисунок 4.15 – Пример измерения прямоугольника

Если программное обеспечение определяет линию неправильно, необходимо изменить анализируемую область, щелкнув и перетащив контуры желтого окна. Необходимо максимально увеличить границы окна, определяя при этом правильное расположение шагов. Выполнение данного шага предоставит максимальный объем данных для анализа, что пригодится в дальнейшем. Далее нужно щелкнуть по кнопке «Далее», расположенной на боковой панели, появятся два окна, обозначенные цифрами 1 и 2 соответственно. При необходимости данные окна могут быть перемещены и изменены внутри определенной области. Поскольку данные окна одинаковы, любое изменение, внесенное в одном окне, немедленно отражается в другом. Окна не могут быть больше размера пространства, определенного пунктирной линией и внешними краями, поэтому на предыдущем шаге рекомендуется создать наибольшую область. Сканирование также можно выровнять, используя области прямоугольников. Необходимо нажать «Параметры», чтобы открыть диалоговое окно «Параметры высоты шага прямоугольника». Далее необходимо установить флажок для включения выравнивания поверхности, используя прямоугольник в качестве опорной поверхности. В данном диалоговом окне также доступны разнородные материалы.

По завершении значение для средней высоты шага отобразится в поле «Итоговая высота шага».

4.2.2.2.4.3 Измерение гистограммы

Режим высоты шага гистограммы может использоваться для измерения множества различных образцов, например, с несколькими высотами шага или с образцами, которые не имеют четко определенного края шага. Несмотря на то, что этот инструмент универсален, он является самым сложным из трех методов высоты шага. Чтобы активировать режим гистограммы необходимо щелкнуть по кнопке «Высота шага», расположенной ниже пункта «Анализ» строки «Анализировать», откроется боковая панель с указанием высоты шага. Чтобы начать, нужно нажать на «Гистограмма». После выбора программа представит гистограмму для текущего сканирования (рисунок 4.16).

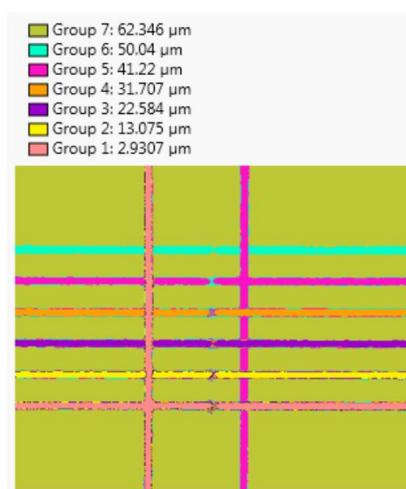


Рисунок 4.16– Гистограмма для текущего сканирования

На данном графике показано распределение точек среди данных по высоте.

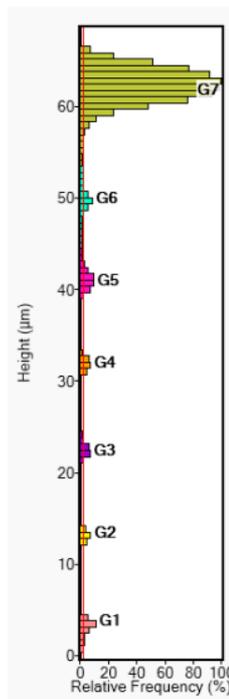


Рисунок 4.17 – Пользовательская калибровка установки для резки

Пример на рисунке 4.17 – пользовательская калибровка установки для резки. При проникновении в образец, большинство точек опускаются до уровня 60 микрон (верхняя часть образца) с небольшими группами, равными 10 микрон. Первой из этих настроек является «Минимальная относительная частота», которая выделена вертикальной строкой красного цвета. Чтобы значение высоты было идентифицировано как область гистограммы, оно должно достичь указанного минимального уровня. Необходимо установить данное значение, введя число в текстовое поле или перетащив красную строку.

Далее указано «Количество ячеек», которое определяет, сколько гистограммных групп находится на графике. Большое число может использоваться для более точного ввода в секциях с более быстро меняющимися высотами, в то время как меньшее количество предназначено для скрытия шума от более грубых поверхностей. При вводе любого значения свыше 160 программа вернется к непрерывному режиму с максимальным разрешением. «Изменение минимальной высоты» предназначено для изменения ширины групп гистограмм. Чем выше значение, тем область гистограммы должна быть больше для того, чтобы стать группой. Используя пример слева, изменение в 1% дает результаты, показанные на рисунке 2.17. Увеличение этого значения до 5% исключает каждую группу, за исключением G1, G5 и G7, а при увеличении до 10% останется только G7. При разделении и определении областей каждая из них будет помечена разными цветами как на гистограмме, так и на двухмерном графике внутри гистограммы. Это облегчит просмотр изменений

по мере их применения. Если области определены, будет доступно множество различных точек данных.

Первым будет предоставлен список средних высот для каждого уровня относительно текущей выбранной исходной точки. Под двухмерным графиком будут расположены две таблицы. В первой таблице будут указаны средние высоты для каждой группы по сравнению со всеми другими доступными группами.

Во второй таблице будет перечислена основная информация о каждом из слоев: средняя, минимальная и максимальная высота поверхности, азимут и наклон плоскости поверхности. Данные из этих таблиц могут быть скопированы в другие программы при помощи нажатия правой кнопки мыши.

4.2.2.5 Шероховатость области

Чтобы активировать данную опцию, необходимо щелкнуть по кнопке «Шероховатость области» в пункте «Анализ», расположенном на вкладке «Анализировать». После нажатия откроется боковая панель «Шероховатость области», которая будет содержать элементы управления для этой функции. Сначала определите область для измерения шероховатости. Доступно две опции: «Целое изображение» или «Ограниченная часть». При выборе опции «Ограниченная часть» желтое окно в «Вид сверху» будет отображать анализируемую в данный момент область. Данное окно можно перетащить, щелкнув на его центр и переместив его, также можно изменить размер данного окна, щелкнув по одному из его краев или углов и переместив их. После того, как область будет определена, будут отображены значения для нескольких различных параметров, которые перечислены ниже. При измерении шероховатости рекомендуется сначала выровнять поверхность с помощью инструментов «Выравнивание» или «Сглаживание», применить «Фильтр», а затем выполнить анализ шероховатости. Необходимо выбрать какие из параметров будут отображены, щелкнув по кнопке «Настройки», расположенной на боковой панели. В диалоговом окне «Параметры области шероховатости» необходимо установить флажок, чтобы включить или отключить нужные параметры. Чтобы отключить или включить все параметры, нужно установить флажок рядом с опцией «Все параметры». Данные измерения могут быть скопированы при помощи выбора как отдельных строк, так и таблицы целиком. Чтобы выбрать несколько строк, нужно нажать клавишу мыши и, удерживая ее, выбрать необходимый диапазон; удерживая клавишу Ctrl, выбрать отдельные строки, или удерживать нажатой клавишу Shift, чтобы выбрать все строки подряд. Нужно щелкнуть правой кнопкой

мышью по любому месту таблицы «Шероховатость области», чтобы открыть всплывающее меню и выбрать необходимую опцию.

4.2.2.2.6 Шероховатость линии

Подобно параметрам двухмерного анализа, данную функцию необходимо активировать, нажав кнопку «Шероховатость линии» в разделе «Анализ» ленты «Анализировать». Откроется боковая панель «Шероховатость линии». Программа нарисует линию по изображению «Вид сверху», указывая, что в данный момент вычисляется местоположение данных сканирования. По умолчанию данная линия будет расположена горизонтально по центру отсканированного изображения. Для чередования горизонтальных, вертикальных или диагональных сегментов линии, необходимо использовать переключатели в разделе «Расположение профиля» на боковой панели или переключаться между горизонтальным и вертикальным сегментом, используя команды Ctrl + H и Ctrl + V соответственно. При нажатии на центр линии, ее можно при необходимости переместить по оси x или y, а при нажатии на конечные точки, она переключится в диагональный режим. Кнопка «Настройка» работает так же, как и в инструменте «Шероховатость области», при этом флажки используются для выбора отображаемых параметров. Кроме того, опция «Настройки параметров профиля» влияют на расчет результирующих значений. Первым необходимо использовать метод «Фильтрация»; по Гауссу, метод полиномиальной кривой ($\beta = 0,625242$) и метод полиномиальной кривой ($\beta = 0$). Затем установить значения для отсечки длины волны, которая будет использоваться для фильтра. Доступные значения будут рассчитываться на основе загруженного сканирования (таблица 2.1). Правильное значение будет зависеть от требований, однако таблица, взятая из ASME B46.1 2D, может дать приблизительную ориентировку в зависимости от ожидаемой шероховатости поверхности.

Таблица 4.1. Доступные значения шероховатости и отсечки

Шероховатость				Отсечка
Rz (мкм)	Ra (мкм)	Rz (мкдм)	Ra (мкдм)	λ_c (мкм)
< 0,025 - 0,1	.0,006 - 0,02	.1 - 3,9	>0,24 - 0,79	80
0,1 - 0,5	0.02 - .1	3,9 - 19,7	0,79 - 3,9	250
.5 - 10	.1 - 2	19,7 - 393,7	3,9 - 78,7	800
10 - 50	2 - 10	393,7 - 1969	78,7 - 393,7	2500
50-200	10-80	1968,5 - 7874	393,7 - 3149,6	8000

На последнем этапе необходимо установить «Количество образцов» для использования. По умолчанию это значение будет установлено на «Максимальное количество образцов», но может быть изменено на определенное пользователем значение.

Используемое число относится к числу сегментов, на которые будет разбита выбранная линия, в зависимости от выбранной длины отсечки. При активации параметра «Пользовательское значение» будет использоваться меньшее число или максимально доступное количество выборок. Данные могут быть скопированы как при помощи выбора отдельных строк, нескольких строк или целой таблицы, для этого необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши по таблице.

4.2.2.2.7 Коэффициент плотности

Кривая коэффициента плотности является интегралом функции распределения амплитуды, используемой для количественного определения отношения материала к воздуху на сканируемой поверхности. Это свойство имеет несколько различных названий: Кривая Эббота-Файрстоуна; Кривая Эббота; Кривая опорной поверхности; Кривая коэффициента использования материала. Все эти названия обозначают одно и то же значение. Необходимо представить, что оно по диагонали проходит через сканирование на заданной глубине. Каким будет отношение материала к воздуху? Например, на рисунке 4.18 синяя линия указывает плоскость глубины, равную 0 мкм. Плоскость, изображенная на данной высоте, состоит из 100 процентов воздуха, так как на этой высоте нет материала.

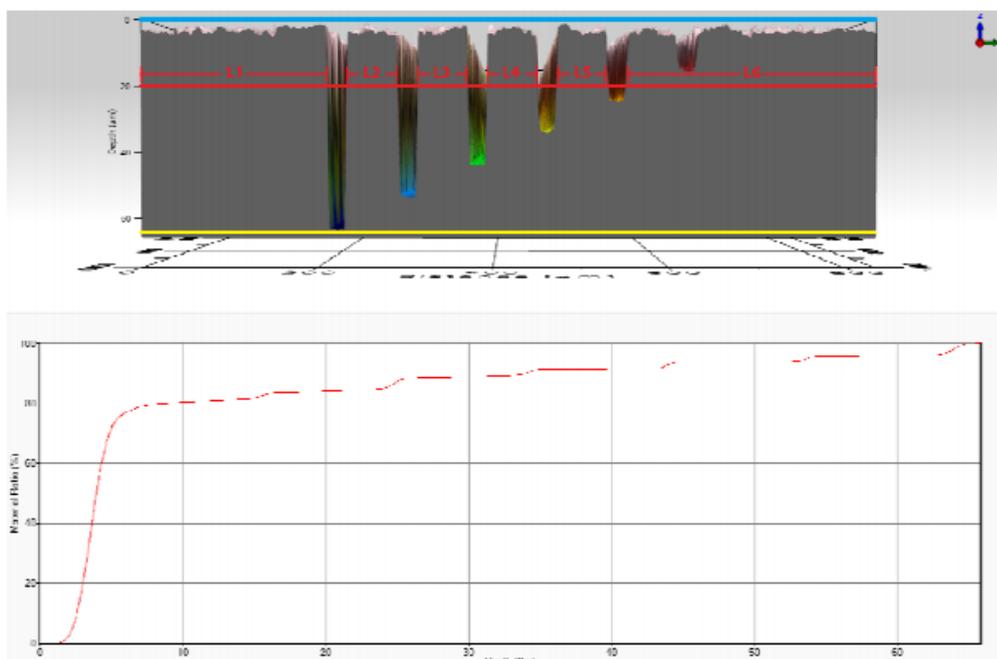


Рисунок 4.18– Пример кривой коэффициента плотности: Оценка качества установки для резки

Однако плоскость, расположенная на глубине 20 мкм и отображенная красной линией, состоит из смеси материала и воздуха. Чтобы вычислить это отношение, необходимо взять сумму длин материала ($L_1, L_2, L_3 \dots$) и разделить её на общую длину сканирова-

ния. На данной глубине оно достигает примерно 84%. Чем глубже, тем больше отношение приближается к 100%, и в этом случае оно происходит примерно в 66 мкм от нижнего разреза (желтая линия).

Помимо кривой коэффициента плотности данная функция также может отображать функцию гистограммы. Ниже на рисунке 4.19 приведен пример гистограммы из одного и того же сканирования.

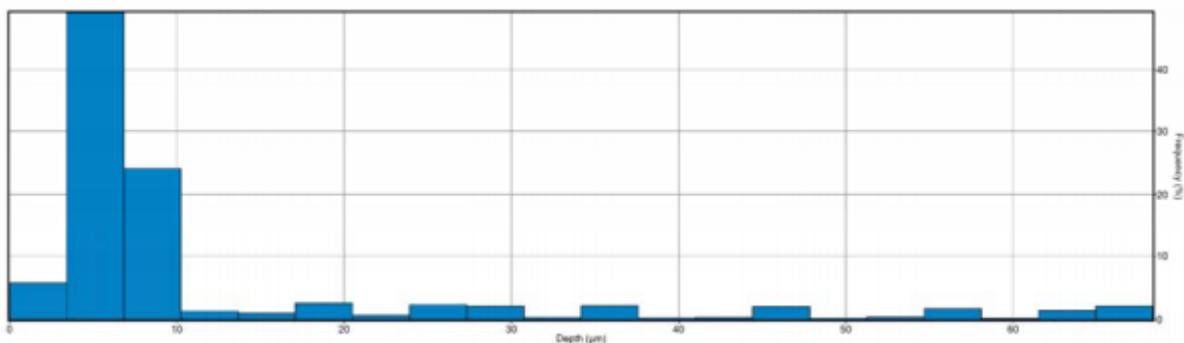


Рисунок 4.19 Пример гистограммы сканирования

В качестве функции выбранной шкалы z гистограмма показывает, сколько точек попадает в заданный диапазон толщины. Ширину диапазонов (ячеек) можно контролировать, нажав на раскрывающееся меню на кнопке «Коэффициент сдвига» и выбрав опцию «Настройки» (рисунок 4.20).

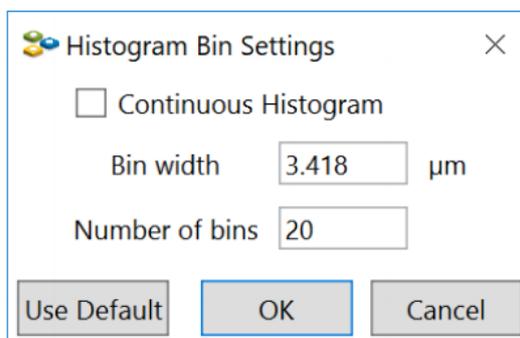


Рисунок 4.20– Настройки гистограммы

Значения могут вводиться с помощью заданной ширины или количества ячеек. При внесении изменений в любое значение будут также обновляться другие значения (например, для всего диапазона 10 мкм изменение количества ячеек от 2 до 5 изменит ширину ячейки с 5 мкм до 2 мкм). При выборе значения «Использовать по умолчанию» будет установлено 20 ячеек. При использовании непрерывной гистограммы будет установлено 512 ячеек. Ячейки могут быть расположены горизонтально (значения высоты по оси Y, частоты).

та по оси X) или вертикально (как показано выше с высотой по оси X, частотой по оси Y). Для переключения между ними щелкните правой кнопкой мыши на окне графика и выберите из появившегося выпадающего меню.

4.2.2.2.8 Объем

В программе Profilm «Объем» – это измерение материала выше наиболее оптимальной плоскости (углублений) и ниже оптимальной плоскости поверхности (отверстия) в пределах определенного многоугольника. Необходимо нажать на изображение «Вид сверху» и добавить минимум 3 вершины для создания нового многоугольника. Чтобы удалить все вершины, нужно выбрать опцию «Удалить все вершины», или «Удалить последнюю вершину», чтобы удалить последнюю добавленную вершину. Далее необходимо нажать «Готово», чтобы нарисовать плоскость. При этом отображаются общий объем всех углублений и отверстий относительно плоскости (рисунок 4.21).

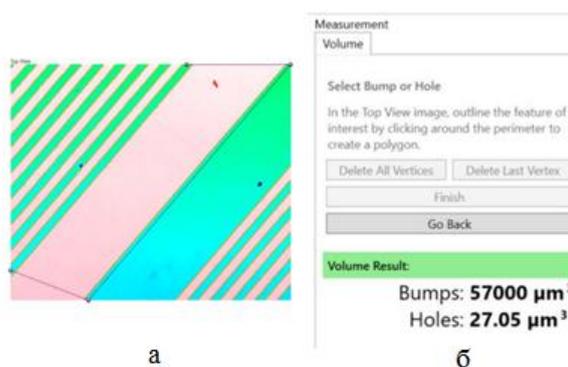


Рисунок 4.21– (а) Вершины, помещенные на изображение «Вид сверху»; (б) Результат измерения объема

Чтобы изменить форму многоугольника необходимо нажать и потянуть любую вершину, или нажать «Назад», чтобы добавить или удалить дополнительные вершины.

4.2.2.2.9 Частицы/Зерна

Определяет и характеризует функции выше или ниже заданной высоты. Необходимо выбрать Частицы/зерна на ленте «Анализ», чтобы открыть боковую панель с элементами управления (рисунок 4.22).

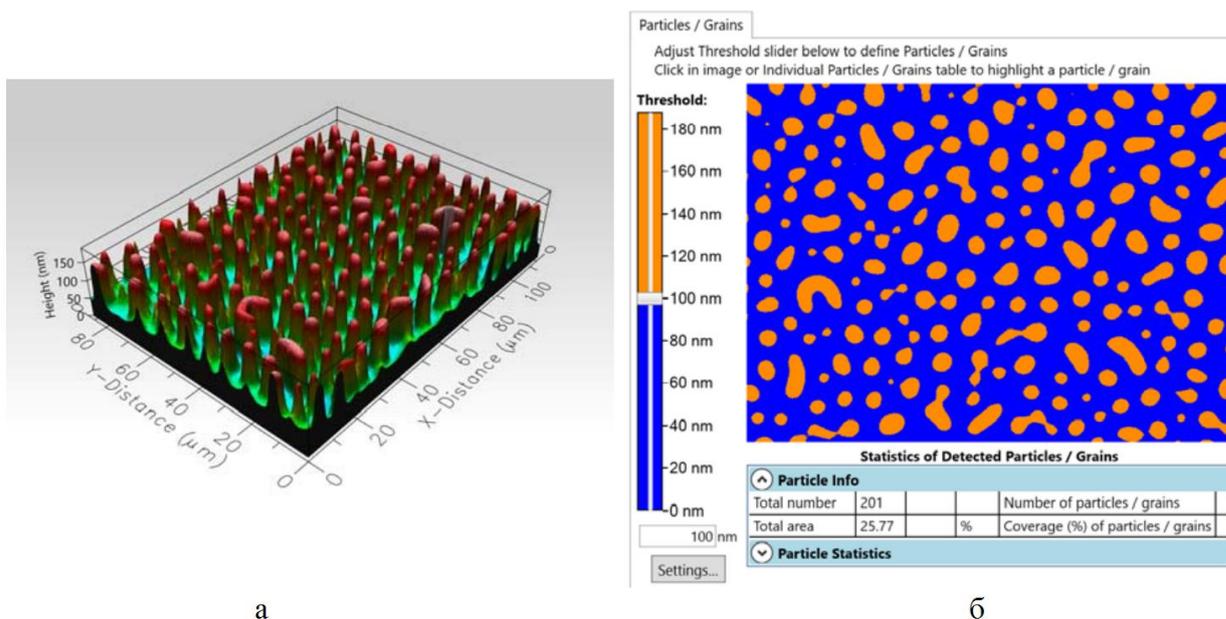


Рисунок 4.22– (а) Пример несмешивающейся полимерной смеси; (б) пример кривой «Частицы/зерна» для изображения слева, порог 100 нм

На боковой панели отображается двухмерная версия изображения в оранжевом и синем цветах. Цвет области определяется тем, находится ли область выше (оранжевая) или ниже (синяя) высоты плоскости, заданной пороговым значением. Необходимо отрегулировать это значение, щелкнув по ползунку и перетаскив его или введя число в текстовое поле. При внесении изменений изображение будет обновляться. Кнопка «Настройки» открывает диалоговое окно «Настройки параметров частиц/зерен» (рисунок 4.23).

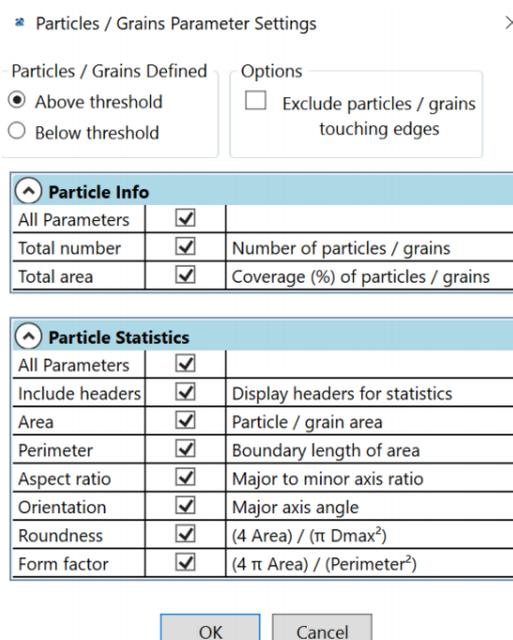


Рисунок 4.23 – Настройки параметров частиц/зерен

Например, на рисунке 4.24 указаны значения для трехмерного изображения, которое было показано до этого. «Информация о частицах» показывает, что для плоскости, изображенной при 100 нм (пороговое значение), 201 частица составляет 25,77% от общей площади поверхности. «Статистика частиц» опровергает это, вычисляя значения для параметров «Область», «Периметр», «Соотношение значений», «Положение», «Округлость» и «Коэффициент формы» этих частиц. Также включены определения каждого из этих значений. Необходимо выбрать анализ функции выше или ниже порогового значения, и должны ли частицы/зерна, касающиеся края изображения, быть включены для анализа. Нужно выбрать, какие параметры необходимо отобразить в таблицах «Информация о частицах» и «Статистика частиц», если таковые имеются. В диалоговом окне под двухмерным изображением расположены три таблицы: «Информация о частицах», «Статистика частиц» и «Отдельные частицы/зерна». Информация и статистика предоставляют суммарные значения для каждой анализируемой функции на основе выбранных параметров, в то время как отдельные значения относятся к конкретным функциям. Например, на рисунке 2.25 указаны значения для трехмерного изображения, которое было показано до этого. «Информация о частицах» показывает значения для плоскости, изображенной при 100 нм (пороговое значение). 201 частица составляет 25,77% от общей площади поверхности. «Статистика частиц» опровергает это, вычисляя значения для параметров «Область», «Периметр», «Соотношение значений», «Положение», «Округлость» и «Коэффициент формы» этих частиц. Также включены определения каждого из этих значений.

Particle Info					
Total number	201			Number of particles / grains	
Total area	25.77		%	Coverage (%) of particles / grains	
Particle Statistics					
Parameter	Mean	Stdev	Units	Description	
Area	12.45	9.663	μm^2	Particle / grain area	
Perimeter	13.04	7.06	μm	Boundary length of area	
Aspect ratio	1.539	0.7769		Major to minor axis ratio	
Orientation	11.67	47.64	$^\circ$	Major axis angle	
Roundness	0.6467	0.1694		$(4 \text{ Area}) / (\pi \text{ Dmax}^2)$	
Form factor	0.9305	0.5629		$(4 \pi \text{ Area}) / (\text{Perimeter}^2)$	

Рисунок 4.24 – «Информация о частицах» и «Статистика частиц» для несмешивающейся полимерной смеси

«Отдельные частицы/зерна» отображают значения для каждой уникальной функции изображения. Необходимо щелкнуть по частице на двухмерном изображении, чтобы выделить ее на изображении (будет отмечена бирюзовым цветом) и в таблице (будет отмечена желтым цветом), или наоборот. Чтобы выбрать несколько функций, необходимо

удерживать клавишу Ctrl и нажать на необходимые функции. Чтобы скопировать данные в буфер обмена, нужно щелкнуть правой кнопкой мыши по таблице. Во всплывающем окне можно выполнить копирование выбранных данных или всей таблицы (рисунок 4.25).

ID	Area (μm^2)	Perimeter (μm)	Aspect ratio	Orientation ($^\circ$)	Roundness	Form factor
1	7.614	11.32	1.351	-7.59	0.6432	0.7467
2	14.82	15.81	1.434	82.08	0.6454	0.7455
3	1.336	4.6	2.102	2.308	0.438	0.795
4	22.28	17.9	1.173	-72.98	0.72	0.8741
5	2.362	5.89	1.087	84.09	0.7115	0.8569

Рисунок 4.25 – Первые пять результатов «Отдельные частицы/зерна» из несмешиваемой полимерной смеси.

4.2.3 Определение параметров анализа

4.2.3.1 Параметры области шероховатости

Программа Profilm способна измерять десять различных параметров области шероховатости, каждый из которых детально описывается ниже.

«Среднее значение» - средняя абсолютная высота поверхности образца в анализируемой области.

«Максимальное значение» - наибольшая абсолютная высота в выбранной области. Максимальное значение отличается от S_p (высоты пика), которая обозначает наивысшую точку от средней плоскости области образца.

«Минимальное значение» - наибольшая абсолютная глубина в выбранной области. Максимальное значение отличается от глубины, которая обозначает наивысшую точку от средней плоскости в области образца.

«Диапазон значений» - разница между максимальным и минимальным значениями

« S_p - Высота пика» - наибольшее значение высоты пика от средней плоскости в области образца.

$$S_p = \text{MAX} \left(z(x_i, y_j) \right), \quad (4.7)$$

« S_v - Глубина впадины» - наибольшее значение глубины впадины от средней плоскости в области образца.

$$S_v = \text{MIN} \left(z(x_i, y_j) \right), \quad (4.8)$$

S_z - Десятиточечная высота. Среднее расстояние между 5 наивысшими пиками и 5 наиболее глубокими впадинами. Область образца 3×3 учитывается для определения пиков и впадин. Числовое выражение данного алгоритма представлено ниже.

$$S_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |z_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |z_{vi}|}{5}, \quad (4.9)$$

где Z_{pi} и Z_{vi} ($i=1,2,3,4,5$) - пять наивысших пиков и пять самых глубоких впадин.

« S_a - Среднее значение шероховатости» - наиболее важный параметр шероховатости поверхности. Это среднее арифметическое значение абсолютного расстояния точек поверхности от средней плоскости. Числовое выражение данного алгоритма представлено ниже.

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |z|(x_i, y_j), \quad (4.10)$$

где M – количество колонок на поверхности и N – количество рядов на поверхности.

« S_q - Среднеквадратичное отклонение неровностей» - среднеквадратичное значение отклонений поверхности от средней плоскости в области образца. Числовое выражение данного алгоритма представлено ниже.

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^2(x_i, y_j)}, \quad (4.11)$$

где M - количество колонок на поверхности и N - количество рядов на поверхности. « S_q » - это общий и часто используемый параметр. В области статистики - это стандартное отклонение для образца.

S_{sk} – коэффициент асимметрии. Коэффициент асимметрии измеряет симметрию изменения поверхности относительно средней плоскости. Гауссова поверхность с симметричной формой распределения высоты имеет коэффициент асимметрии «0». Выровненная поверхность с преобладанием плато и глубокими впадинами имеет тенденцию к отрицательной асимметрии, в то время как поверхность, состоящая из непропорционального количества пиков, будет иметь положительную асимметрию. Цифровое представление этого параметра показано ниже.

$$S_{sk} = \frac{1}{MNS_q^3} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^3(x_i, y_j), \quad (4.12)$$

где M - количество колонок на поверхности и N - количество рядов на поверхности.

Коэффициент эксцесса S_{ku} – мера пиковости и заостренности поверхности. Цифровое представление этого параметра показано ниже.

$$S_{ku} = \frac{1}{MNS_q^4} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^4(x_i, y_j), \quad (4.13)$$

Гауссова поверхность имеет значение коэффициента эксцесса 3. Поверхность с распределением в центральной части имеет значение коэффициента эксцесса более 3. Поверхность с распределением по всей площади имеет значение коэффициента эксцесса менее 3. Используя комбинацию коэффициента асимметрии и коэффициента эксцесса, можно идентифицировать выровненные поверхности с относительно плоской вершиной, но при этом с глубокими впадинами.

4.2.4 Режимы сканирования

4.2.4.1 WLI – интерферометрия белого света

Интерферометрия белого света («WLI») - это режим сканирования, который использует белый свет и движение, перпендикулярное поверхности образца, для определения точного положения образца. Белый свет направляется от источника через специальный объектив интерферометра (интерферометр Миро или интерферометр Михельсона, используемый программой Profilm3D), который разделяет свет на два пучка, один из которых направляется на поверхность сканируемого образца, а второй - на опорное зеркало. Пучки света, возвращаясь на датчик с поверхности образца и опорного зеркала, вновь соединяются, но уже с изменением фазы. В результате сдвига фазы свет интерферирует сам с собой, в результате чего появляется характерное свечение и темные интерференционные полосы (интерференционная картина) на изображении. При точной настройке интерферометра точка наибольшего контраста между данными полосами соответствует наилучшей фокусировке. При движении сканирующего объектива вверх и вниз по поверхности образца интерференционные полосы перемещаются вместе с фокальной плоскостью, показывая таким образом расстояние до линз. На основе данных о перемещении интерференционных полос с фокальной плоскостью, высокоточной работы системы перемещения по оси z, датчика изображения, а также расширенного пакета программ, мы создаем трехмерные сканеры для Profilm3D.

4.2.4.2 PSI – интерферометрия сдвига фазы

Режим сканирования «PSI» (интерферометрия сдвига фазы) похож на режим «WLI», однако несколько их ключевых отличий позволяют проводить более точные измерения. Первым важным отличием является то, что режим «PSI» применяется на более уз-

ком диапазоне длины волны. Это достигается в программе Profilm3D благодаря оптическому фильтру, размещаемому на световом пути. В результате расширяется поверхность коррелограммы, определяемой на основе интерференционных полос. Следующим важным отличием является необходимость более высокого уровня гладкости поверхности образца для интерферометрии сдвига фазы. Это связано со способом получения данных. При сканировании программа выводит изображение с некоторыми фиксированными интервалами, определяя высоту каждого пикселя в ряде кадров. В режиме сканирования «WLI» выбираются наилучшие значения интенсивности для каждого пикселя в различных кадрах, таким образом, для одного пикселя может использоваться значение из кадров, полученных в начале сканирования, в то время как для другого пикселя будет использоваться кадр, полученный в середине процесса сканирования. Режим «PSI», напротив, сначала завершит сканирование, а затем также подберет определенный ряд кадров для каждого пикселя. В режиме сканирования «WLI» возможно наложение различных групп кадров друг на друга, приводящее к снижению точности измерений, что практически исключается при анализе «PSI». Несмотря на высокую точность данного режима, его эффективность снижается при обработке более широкого диапазона, поэтому режим «PSI» больше подходит для изображений с менее значительными изменениями высоты поверхности. Также он более чувствителен к поворотам/наклонам образца, поэтому необходимо аккуратно выравнивать образец на столике.

4.2.4.3 Комбинированное сканирование WLI/PSI

«Комбинированный режим сканирования «WLI/PSI» используется для увеличения верхней границы диапазона значений для режима «PSI» с трех микрон до десяти. Это достигается за счет учета совпадающих данных режимов «WLI» и «PSI» в одном положении и с использованием одинаковых настроек. Затем запускается режим сканирования «PSI» на основе данных высоты, определенных режимом «WLI».

4.2.4.4 Повышение отношения "сигнал-шум"

Функция «Повышение отношения "сигнал-шум"» использует методы подавления шума данных измеряемой коррелограммы перед сканированием. Данная функция повышает качество сканирования на менее ровных поверхностях, увеличивая тем самым время сканирования. Контроль функции «Повышения отношения "сигнал-шум"» осуществляется с помощью «Порогового значения». Данное значение выражает процентное отношение определенной амплитуды поверхности коррелограммы к общему диапазону измерения.

Если определенная амплитуда коррелограммы ниже выбранного значения, высота данного пикселя будет отмечена как недопустимая.

Список использованных источников

ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 6 с.

4.3 Методика измерения относительной диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь для фольгированных ламинатов в СВЧ диапазоне с помощью диэлектрического резонатора с разделенным стержнем

Данная методика разработана в связи с поставкой фольгированных материалов и подложек с параметрами, часто не подтверждаемыми после изготовления образцов. Услуга на основе этой методики вполне востребована как сопутствующая проектированию устройств для получения более достоверных данных о диэлектрической проницаемости. Полный текст методики с листом утверждения приведен в отчетной документации. Далее приведено содержание с рубрикацией раздела по оригиналу.

Введение

В настоящей методике описывается метод определения относительной диэлектрической проницаемости (ϵ_r) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan\delta$) (в англоязычных источниках применяется терминология dielectric constant (Dk) и dissipation factor (Df) соответственно) для фольгированного ламината в СВЧ диапазоне (1,1 ГГц – 20 ГГц) при помощи диэлектрического резонатора с разделенным стержнем (ДРРС).

Данная методика применима к фольгированным ламинатам, керамическим подложкам и другим диэлектрическим материалам, применяемым в радиоэлектронной промышленности.

Требования к исследуемым образцам

Размер образца

Размер исследуемого образца должен быть больше, чем внутренний диаметр D металлического корпуса ДРРС, максимальная толщина образца не должна превышать толщины щели в металлическом корпусе h_g (см. рисунок. 4.26).

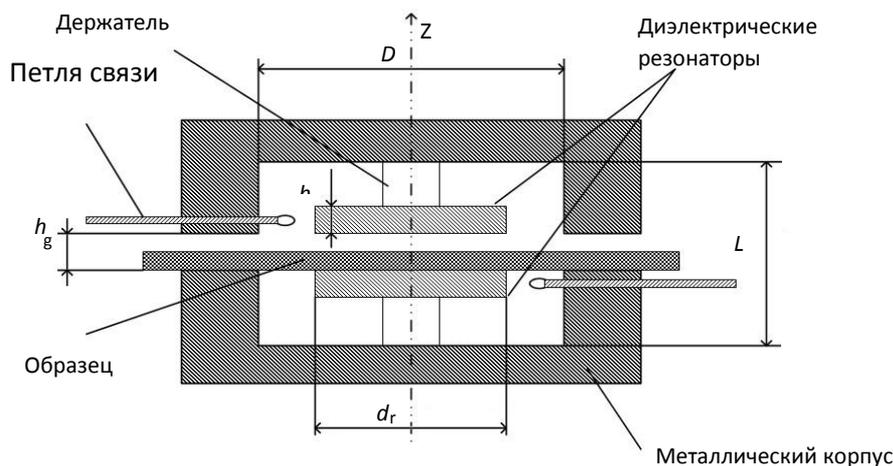


Рисунок. 4.26 – Схема измерительной оснастки ДРПС

где h_g – расстояние между металлическим корпусом и оснасткой;

D – внутренний диаметр металлического корпуса;

L – внутренняя высота металлического корпуса;

d_r – диаметр диэлектрического резонатора;

h_r – толщина диэлектрического резонатора.

Под каждый вид ДРПС требуется не менее трех образцов для проведения измерений при комнатной температуре и один образец для измерений в диапазоне температур. В таблице 4.2 представлены размеры образцов для имеющихся резонаторов

Таблица 4.2 – Размеры образцов

Рабочая частота ДРПС, ГГц	Рекомендуемые размеры образца, мм	Максимальная толщина образца, мм
1,1	150 × 150	6,0
3	80 × 80	3,0
5 - 6	80 × 80	2,0
9 - 10	80 × 80	0,9
13 - 16	50 × 35	0,6
18 - 20	15 × 15	0,5

Также возможно использование образцов с размерами, отличными от приведенных в таблице 1 (размер исследуемого образца должен быть больше чем внутренний диаметр D , см. табл. 2). Например, образец размером 130×130 мм может использоваться для ДРПС с частотой 1,1 ГГц.

Подготовка исследуемых образцов

Для исследуемых образцов из фольгированных ламинатов все медные покрытия должны быть удалены путем травления. Поверхность должна быть тщательно очищена.

Маркировка исследуемых образцов

Каждый образец может быть промаркирован в верхнем левом углу с помощью карандаша или любым другим способом, не нарушающим целостность исследуемого материала.

Толщина исследуемых образцов

В пределах ограничений конкретной измерительной оснастки при выборе образцов с большей толщиной можно получить меньшую погрешность измерений. Тонкие образцы могут быть сложены стопкой (друг на друга) для достижения минимальной толщины в 0,4 мм, необходимой для хорошей точности измерений.

Примечание: Воздушный промежуток между измеряемым образцом и оснасткой не влияет на результат измерений.

Требования к измерительному оборудованию

Общие сведения

На рисунке 4.27 показаны схемы измерительных стандов для проведения исследований.

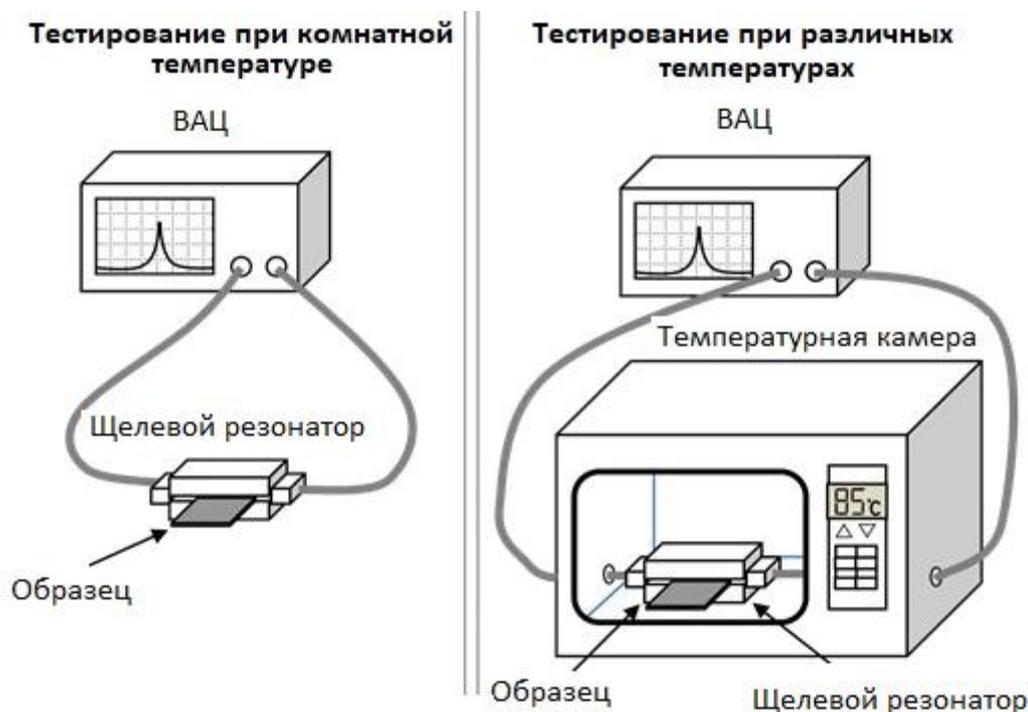


Рисунок 4.27 – Схема измерительных стандов

Требования к векторному анализатору цепей

Векторный анализатор цепей (ВАЦ) должен обладать следующими параметрами:

- а) Частотный диапазон ВАЦ: от 500 МГц до 20 ГГц.
- б) Динамический диапазон ВАЦ должен быть более 60 дБ.

Проведение измерений

Подготовка к измерениям

Все образцы должны быть выдержаны при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(50 \pm 5)\%$ не менее 24 часов до начала измерений. Однако, если образец недавно был подвергнут травлению или чрезмерному воздействию влаги, то его следует высушить в сушильном шкафу с циркуляцией воздуха в течение 2 часов при температуре 105 ± 5 °С, затем выдержать в условиях, упомянутых выше.

Измерение относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь при комнатной температуре

Условия проведения измерений

Температура для проведения измерений при комнатной температуре должна быть в пределах $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$. Перепад температур в ходе проведения измерений не должен превышать 1°C .

Подготовка к измерениям

Необходимо прогреть ВАЦ в течение 30 мин для стабилизации внутренних процессов.

Подготовка измерительной оснастки

Необходимо выбрать нужный ДРРС в соответствии с требуемой частотой для измерений. Размеры и толщина образца должны удовлетворять требованиям, приведенным в таблице 1. Например, если частота для проведения измерений 10 ГГц, то измерительная оснастка ДРРС должна быть выбрана с рабочей частотой 10 ГГц. Рекомендуемый размер образца для данного ДРРС 80 мм × 80 мм, при этом максимальная толщина образца не должна превышать 0,9 мм.

Подключение ВАЦ

Подключите измерительную оснастку ДРРС к ВАЦ. При этом положение измерительной оснастки должно быть горизонтальным.

Установка параметров ВАЦ

Установите настройки ВАЦ в соответствии с инструкцией производителя и рабочей частотой ДРРС.

Измерение резонансной частоты и собственной добротности резонатора

Провести измерение значения резонансной частоты (f_0) и собственной добротности резонатора без образца (Q_0).

Уровень резонансного пика должен находиться между -40 dB и -45 dB; выполнения данного условия можно добиться, регулируя положение петель связи, они должны располагаться симметрично.

При измерении добротности частотный диапазон ВАЦ должен быть выставлен таким образом, чтобы он составлял 110-200% от полной ширины резонансной кривой на уровне половины максимума.

Измерение толщины образца

Провести измерение толщины образца при помощи микрометра, занести результаты измерений в протокол в графу для величины h .

Установка исследуемого образца

Установить исследуемый образец в измерительную оснастку. Сторона образца с маркировкой должна быть обращена вверх, край этой стороны должен быть выровнен с краем крепления измерительной оснастки.

Измерение частоты и добротности с образцом

Провести измерение резонансной частоты (f_s) и добротности резонатора (Q_s) вместе с образцом.

Сравнение результатов

На рисунке 4.28 представлен примерный вид графиков измерения резонансной частоты с образцом и без образца.

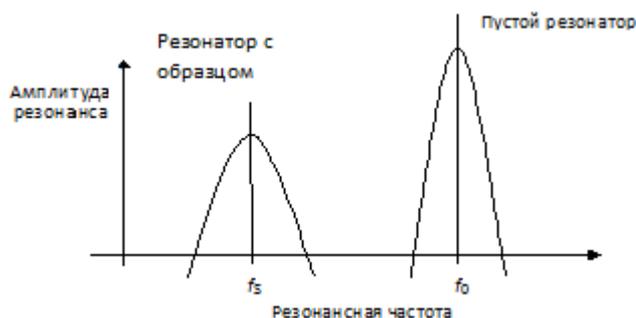


Рисунок 4.28 – Графики измерения резонансной частоты с образцом и без

Расчет значений

Для вычисления относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь при комнатной температуре рекомендуется использовать программное обеспечение, предоставляемое поставщиком оборудования.

Относительная диэлектрическая проницаемость.

Относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ_r) вычисляется согласно уравнению (1).

$$\epsilon_r = 1 + \frac{f_0 - f_s}{hf_0 K_\epsilon(\epsilon_r, h)}, \quad (4.14)$$

где

ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость;

h – толщина исследуемого образца в мм;

f_0 – резонансная частота пустого резонатора;

f_s – резонансная частота резонатора с диэлектрическим образцом;

$K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ – функция переменных ϵ_r и h . Для ее определения необходимо знать физические параметры каждого резонатора (размер, диэлектрическая проницаемость ϵ_r). $K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ предварительно вычисляется и заносится в таблицу с помощью метода электромагнитного моделирования Релея-Ритца. В формулу 1 необходимо подставить резонансную частоту пустого резонатора (f_0), резонансную частоту резонатора с образцом (f_s) и толщину образца (h). Подставьте произвольное значение относительной диэлектрической проницаемости образца, далее воспользуйтесь аппроксимационным алгоритмом. После нескольких итераций завершите вычисление, когда относительная погрешность двух последних измеренных относительных диэлектрических проницаемостей не будет превышать 0,1 %. Последнее значение диэлектрической проницаемости, полученное после итераций и будет диэлектрической проницаемостью образца. Дополнительная информация представлена в Приложении В.

Тангенс угла диэлектрических потерь.

Тангенс угла диэлектрических потерь вычисляется согласно формуле (2).

$$\tan\delta = \frac{(Q_s^{-1} - Q_{DR}^{-1} - Q_c^{-1})}{p_{es}}, \quad (4.15)$$

где

$\tan\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;

Q_s – ненагруженная добротность резонатора вместе с образцом;

Q_c – добротность резонатора с образцом обусловленная потерями в металле;

Q_{DR} – добротность резонатора с образцом, обусловленная диэлектрическими потерями;

p_{es} Коэффициент заполнения электромагнитной энергии образца. После определения физических параметров резонатора коэффициент заполнения электромагнитной энергии p_{es} может быть определен ЭМ моделированием. Для фиксированного объемного резонатора, p_{es} является постоянной величиной. Дополнительная информация представлена в Приложении В.

Смена образцов

Провести измерение двух оставшихся образцов.

Изменение рабочей частоты проведения исследований

Если выбрана другая рабочая частота, то необходимо заменить резонатор в соответствии с требуемой частотой.

Измерение относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь в диапазоне температур

Условия проведения измерений

Температура окружающей среды должны быть (23 ± 2) °С. Перепад температур в ходе проведения измерений не должен превышать 1 °С.

Подготовка к измерениям

Необходимо прогреть ВАЦ в течении 30 мин для стабилизации внутренних процессов.

Подготовка измерительной оснастки

Необходимо выбрать нужный ДРРС в соответствии с требуемой рабочей частотой. Размеры и толщина образца должны удовлетворять требованиям, приведенным в таблице 1. Например, если частота для проведения измерений 10 ГГц, то измерительная оснастка ДРРС должна быть выбрана с рабочей частотой 10 ГГц. Рекомендуемый размер образца для данного ДРРС 80 мм × 80 мм, при этом максимальная толщина образца не должна превышать 0,9 мм.

Подключение ВАЦ

Подключите измерительную оснастку ДРРС к ВАЦ. При этом положение измерительной оснастки должно быть горизонтальным.

Установка параметров ВАЦ

Установите настройки ВАЦ в соответствии с инструкцией производителя и рабочей частотой ДРРС.

Настройка климатической камеры

Установите рабочую температуру в климатической камере. Удерживайте заданную температуру по меньшей мере 15 мин после достижения заданного значения (T).

Измерение резонансной частоты и собственной добротности резонатора

Измерьте резонансную частоту $f_0(T)$ и добротность $Q_0(T)$ резонатора без образца.

Уровень резонансного пика должен находиться между -40 dB и -45 dB; данного условия можно добиться, регулируя положение петель связи, они должны располагаться симметрично.

При измерении добротности частотный диапазон ВАЦ должен быть отрегулирован таким образом, чтобы он составлял 110-200% от полной ширины на половине максимума резонансной кривой.

Измерение толщины образца

Провести измерение толщины образца при помощи микрометра, занести результаты измерений в протокол в графу для величины h .

Установка исследуемого образца

Климатическая камера должна быть настроена на комнатную температуру. Вставьте измеряемый образец в измерительную оснастку. Сторона образца с маркировкой должна быть обращена вверх, край верхней стороны должен быть выровнен с краем крепления испытательной установки.

Измерение частоты и добротности с образцом

Выполнить пункт 1.4.3.6. Измерить резонансную частоту $f_s(T)$ и добротность $Q_s(T)$ резонатора с образцом при температуре T .

При измерении добротности частотный диапазон ВАЦ должен быть отрегулирован таким образом, чтобы он составлял 110-200% от полной ширины на половине максимума резонансной кривой.

Расчет значений

Вычислите относительную диэлектрическую проницаемость $Dk(T)$ и тангенса угла потерь $Df(T)$ при температуре T согласно пункту 1.4.2.11.

Дополнения

При анализе образцов при другой температуре повторите шаги 1.4.3.6 – 1.4.3.11.

Расчет температурного коэффициента

Температурный коэффициент относительной диэлектрической проницаемости и температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь.

Относительная диэлектрическая проницаемость.

Температурный коэффициент относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r ($TC\epsilon_r$) отображает скорость изменения относительной диэлектрической проницаемости

при изменении температуры. $TC\varepsilon_r$ измеряется в $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Как правило, относительная диэлектрическая проницаемость при комнатной (основной) температуре T_{ref} в 23°C используется в качестве основного значения относительной диэлектрической проницаемости $Dk(T_{\text{ref}})$. Для температуры T , $TC\varepsilon_r$ должна быть вычислена согласно уравнению (3).

$$TC\varepsilon_r = \frac{Dk(T) - Dk(T_{\text{ref}})}{(T - T_{\text{ref}}) * Dk(T_{\text{ref}})}, \quad (4.16)$$

где

$TC\varepsilon_r$ Температурный коэффициент ε_r , $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;

T Заданная температура, в $^{\circ}\text{C}$;

T_{ref} Комнатная температура (основная), в $^{\circ}\text{C}$;

$Dk(T)$ Относительная диэлектрическая проницаемость при температуре T

$Dk(T_{\text{ref}})$ Относительная диэлектрическая проницаемость при температуре T_{ref} .

Тангенс угла диэлектрических потерь

Температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь ($TC \tan\delta$) описывает скорость изменения тангенса угла диэлектрических потерь в зависимости от температуры (с увеличением или уменьшением на 1°C). $TC \tan\delta$ измеряется в $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Как правило, тангенс угла диэлектрических потерь образца при комнатной (основной) температуре $T_{\text{ref}} = 23^{\circ}\text{C}$ используется в качестве основного значения тангенса угла диэлектрических потерь $Df(T_{\text{ref}})$. При температуре T , $TC \tan\delta$ вычисляется по формуле (4).

$$TC \tan\delta = \frac{Df(T) - Df(T_{\text{ref}})}{(T - T_{\text{ref}}) * Df(T_{\text{ref}})}, \quad (4.17)$$

где

$TC \tan\delta$ – Температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь, ppm/ $^{\circ}\text{C}$;

T – Заданная температура, $^{\circ}\text{C}$;

T_{ref} – Комнатная (основная) температура, $^{\circ}\text{C}$;

$Df(T)$ – Тангенс угла диэлектрических потерь при температуре T ;

$Df(T_{\text{ref}})$ – Тангенс угла диэлектрических потерь при температуре T_{ref} .

Изменение рабочей частоты проведения исследований

Если требуется провести измерения на другой рабочей частоте, то необходимо заменить резонатор в соответствии с требуемой частотой.

Составление протоколов испытаний

При проведении измерений для комнатной температуры

В протоколе испытаний при проведении измерений при комнатной температуре необходимо привести следующую информацию:

- а) Указать соответствующие условия окружающей среды при которых проводятся измерения (температура, влажность);
- б) Указать частоту, при которой проводились измерения;
- в) Привести средние значения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь на тестируемой частоте;
- г) Описать подготовку образцов к эксперименту;
- д) Указать возможные отклонение от нормы при проведении измерений.

При проведении измерений в диапазоне температур

В протоколе испытаний при проведении измерений необходимо отразить следующую информацию:

- а) Указать рабочую и комнатную (основную) температуры (T), (T_{ref});
- б) Указать рабочую частоту;
- в) Значения $Dk(T)$ и $Df(T)$ при рабочей температуре (T);
- г) Указать значения величин $TC\epsilon_r$ и $TC \tan\delta$;
- д) Указать значения $Dk(T_{\text{ref}})$ и $Df(T_{\text{ref}})$;
- е) Если необходимо провести эксперимент при более чем одной рабочей температуре, то необходимо получить диаграмму кривых для относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь в соответствии с изменением температуры;
- ж) Описать подготовку образцов к эксперименту;
- з) Отметить возможные отклонения от нормы при проведении измерений.

Дополнительная информация

Анализ погрешностей

Погрешность измерения диэлектрических параметров образца толщиной h может быть определена из следующих соотношений:

Погрешность измерения относительной диэлектрической проницаемости: $\Delta\epsilon/\epsilon = \pm(0,0015+\Delta h/h)$.

Погрешность измерения тангенса удельных потерь: $\Delta\tan\delta = \pm 2 \times 10^{-5}$ или $\pm 0,03 \tan\delta$.

Техническое обслуживание

Необходимо регулярно очищать от грязи и пыли разъемы, тестируемые образцы и измерительный стенд.

Дополнительные рекомендации

Для предотвращения повреждений измерительной оснастки при проведении экспериментов в диапазоне температур необходимо регулярно верифицировать измерительный стенд при помощи стандартного образца. В качестве стандартного образца может быть использован монокристалл кварца толщиной 0,4 мм.

Отклонение между измеренным значением относительной диэлектрической проницаемости испытуемого образца и номинальным значением для стандартного образца должно быть в пределах $\pm 0,7\%$, значение для отклонения тангенса угла диэлектрических потерь должно быть в пределах $\pm 2 \times 10^{-5}$.

Измерительная оснастка и полученные результаты. Дополнительная информация

Примеры измерительной оснастки и получаемых результатов измерений приведены в Приложении А.

$K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ и p_{es} . Дополнительная информация

Дополнительная информация о величинах $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ и p_{es} представлена в Приложении Б.

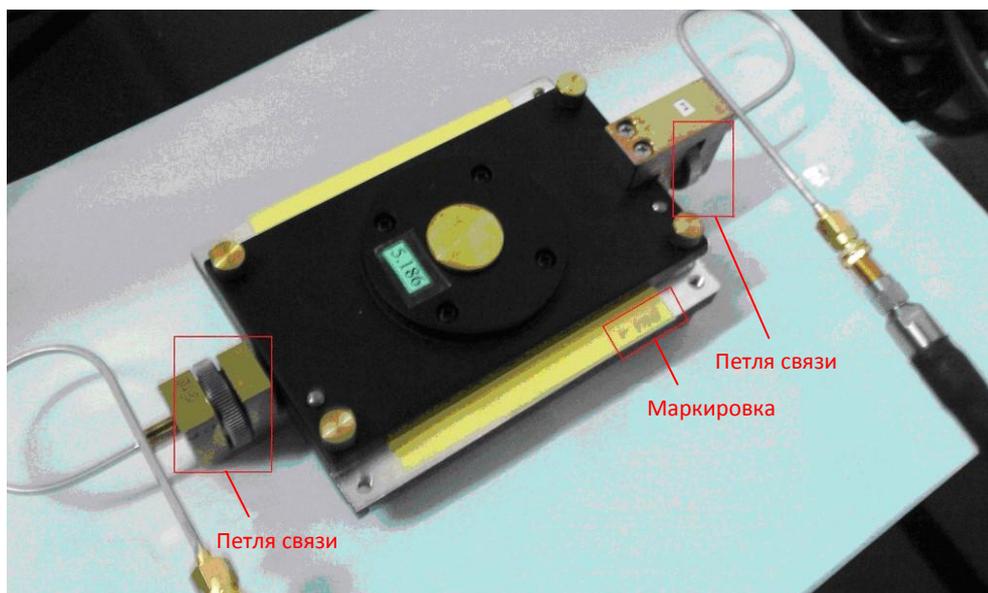
Приложение А (информационное)

Примеры измерительной оснастки и результатов измерений

А.1 Пример измерительной оснастки

На рисунке А.1 представлен внешний вид измерительной оснастки ДРРС для частоты 5 ГГц. Для соединения коаксиального кабеля ВАЦ и измерительной оснастки резонатора используется переходник типа female-to-female 3,5 мм.

Для регулировки значения коэффициента связи измерительная оснастка ДРРС оснащена двумя петлями связи. Максимальная толщина образца в данном эксперименте составляет 2 мм.



IEC

Рисунок А.1 – Измерительная оснастка

А.2 Результаты измерений. Пример

На рисунках А.2 – А.3 представлены типовые результаты измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в СВЧ диапазоне (от 1,1 ГГц до 19 ГГц) для фольгированного СВЧ ламината со значением относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_r = 3,8$. На рисунке А.4 приведены графики значений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь при различных температурах ($-125\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $110\text{ }^{\circ}\text{C}$) для данного материала.

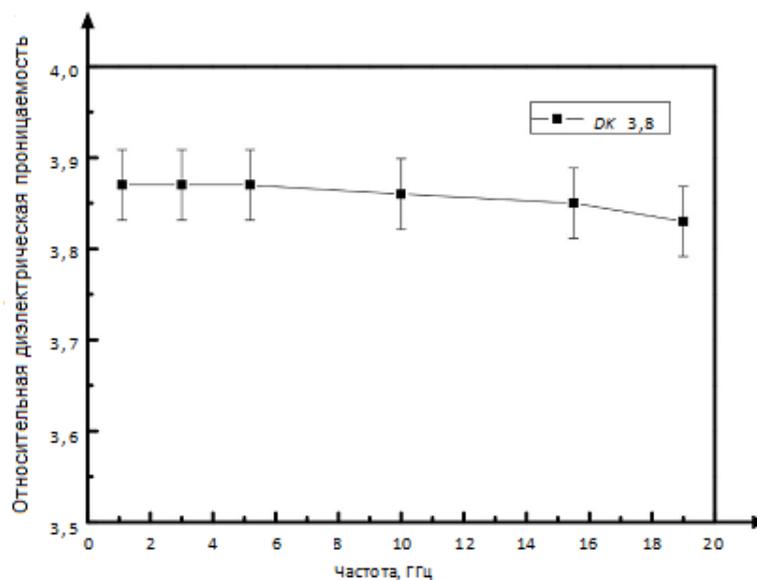


Рисунок А.2 – Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от частоты (ламинат, Dk 3,8 и толщиной 0,51 мм)

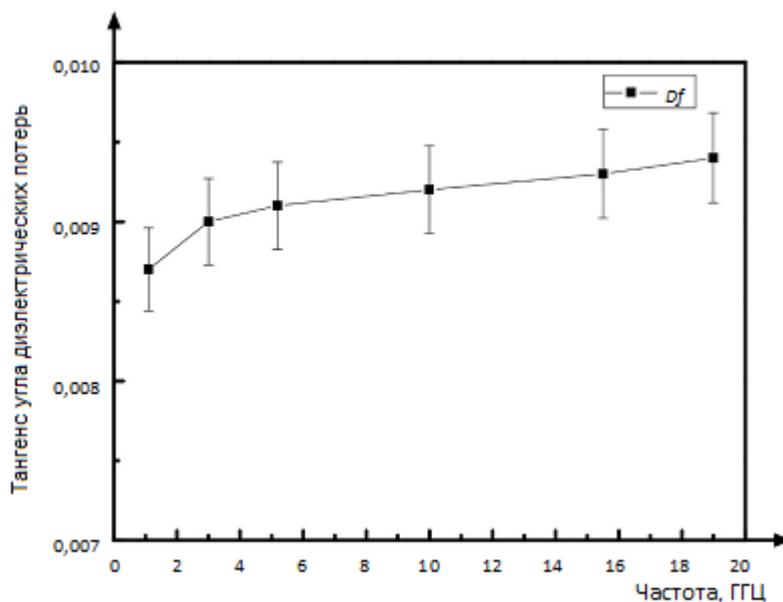


Рисунок А.3 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь в зависимости от частоты (Ламинат, D_k 3,8 с толщиной 0,51 мм)

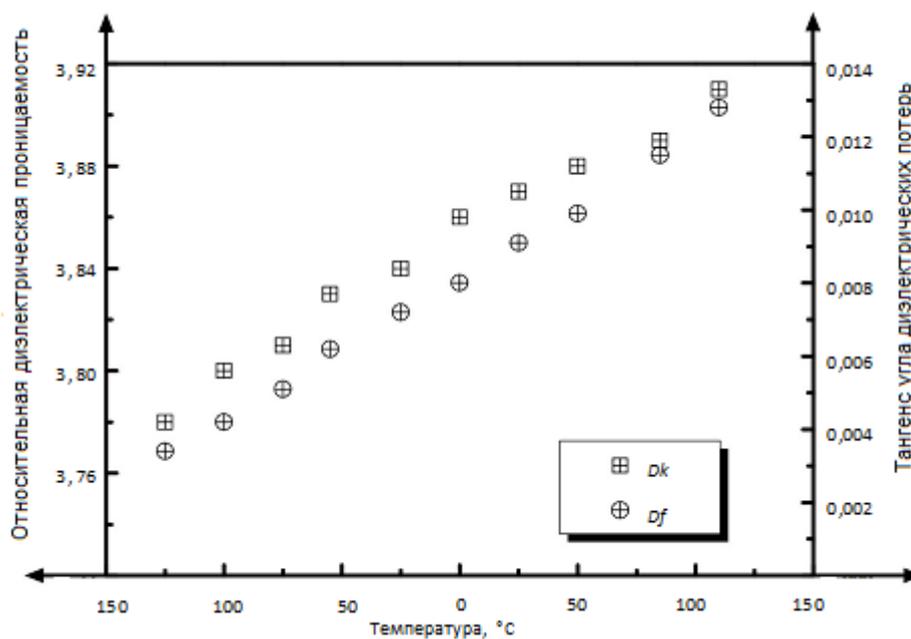


Рисунок А.4 – Зависимость относительной диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры (Ламинат, D_k 3,8 с толщиной 0,51 мм)

Приложение Б (информационное)

Дополнительные сведения о параметрах $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ и res

Значение $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ для измерительной оснастки с заданными значениями ε_r и h определяется согласно формуле В1.

$$K_\varepsilon(\varepsilon_r, h) = \frac{f_0 - f_s}{(\varepsilon_r - 1)hf_0}, \quad (\text{Б. 1})$$

Значение функции $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ вычисляется отдельно для каждой конкретной измерительной оснастки ДРРС. Точные резонансные частоты и результирующие значения $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ вычисляются согласно значениям ε_r и h и заносятся в таблицу. Для других значений ε_r и h , значение $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ может быть получено интерполяционным методом. Начальное значение $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ может быть выведено из уравнения 1 для заданных значений h и $\varepsilon_r = 1$. Значения $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ соответствующие последующим значениям ε_r могут быть найдены путем итерационной процедуры. Т.к. $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ – медленно изменяющаяся функция переменных ε_r и h , итерации, использующие уравнение (1) имеют быструю сходимость. Значение $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ в зависимости от ε_r и h для 10 ГГц представлены на рисунке Б.1.

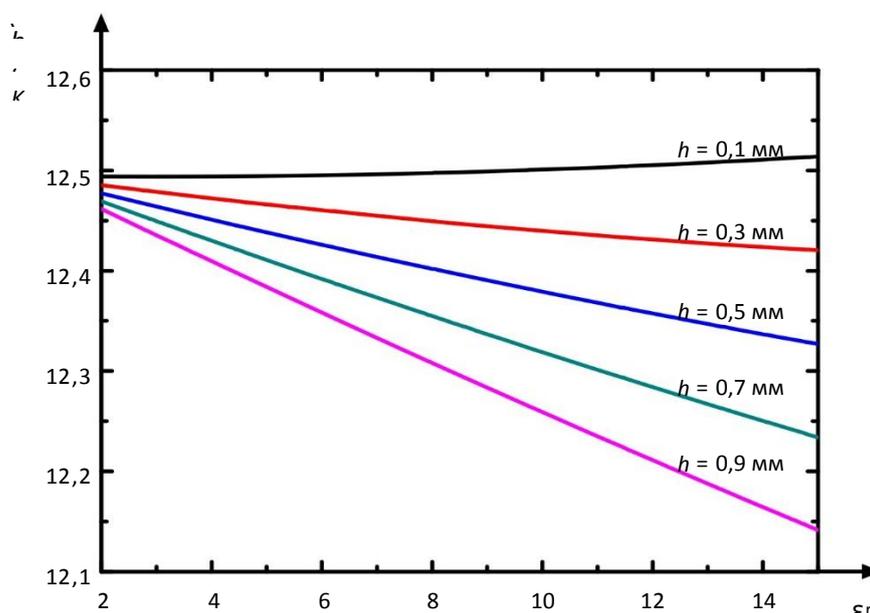


Рисунок Б.1 – Значения $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ в зависимости от относительной диэлектрической проницаемости и толщины образца

Для заданной резонансной структуры значение p_{es} для фиксированных величин ϵ'_r и h может быть вычислено по формуле (Б.2):

$$p_{es} = h\epsilon'_r * K_1(\epsilon'_r, h), \quad (Б.2)$$

где ϵ'_r – относительная диэлектрическая проницаемость;

h – толщина образца, мм;

$K_1(\epsilon'_r, h)$ – функция переменных ϵ'_r и h .

Метод Рэлея-Ритца позволяет вычислить значение p_{es} для заданной резонансной структуры. Множество значений p_{es} может быть вычислено для ряда значений h и ϵ'_r .

На рисунках Б2-Б3 показано распределение E- компоненты ЭМ поля для 10 ГГц пустого (без образца) ДРРС с параметрами $D = 16,5$ мм, $L = 9$ мм, $d_r = 8$ мм, $h_r = 1$ мм, $h_g = 1$ мм и относительной диэлектрической проницаемостью = 3.8.

На рисунке Б.4 приведены значения p_{es} в зависимости от значений относительной диэлектрической проницаемости для образцов разной толщины.

В таблице Б.1. приведены параметры 10 ГГц ДРРС с различными образцами.

Таблица Б.1 – Результаты измерений характеристик различных материалов, полученные при использовании 10 ГГц ДРРС

Dk	Df	Толщина, мм	p_{es}	$K_\epsilon (\epsilon_r, h)$	Q_c	Q_{DR}	Материал
2,05	0,0003	0,3	$8,3 \times 10^{-4}$	12,477	$> 10^5$	16 000	PTFE
3,0	0,0030	0,3	$1,2 \times 10^{-3}$	12,412	$> 10^5$	16 000	Low-Dk FR4
3,8	0,0090	0,3	3×10^{-3}	12,364	$> 10^5$	16 000	Low-loss FR4
4,5	0,0150	0,3	$4,2 \times 10^{-3}$	12,332	$> 10^5$	16 000	Halogen-free FR4

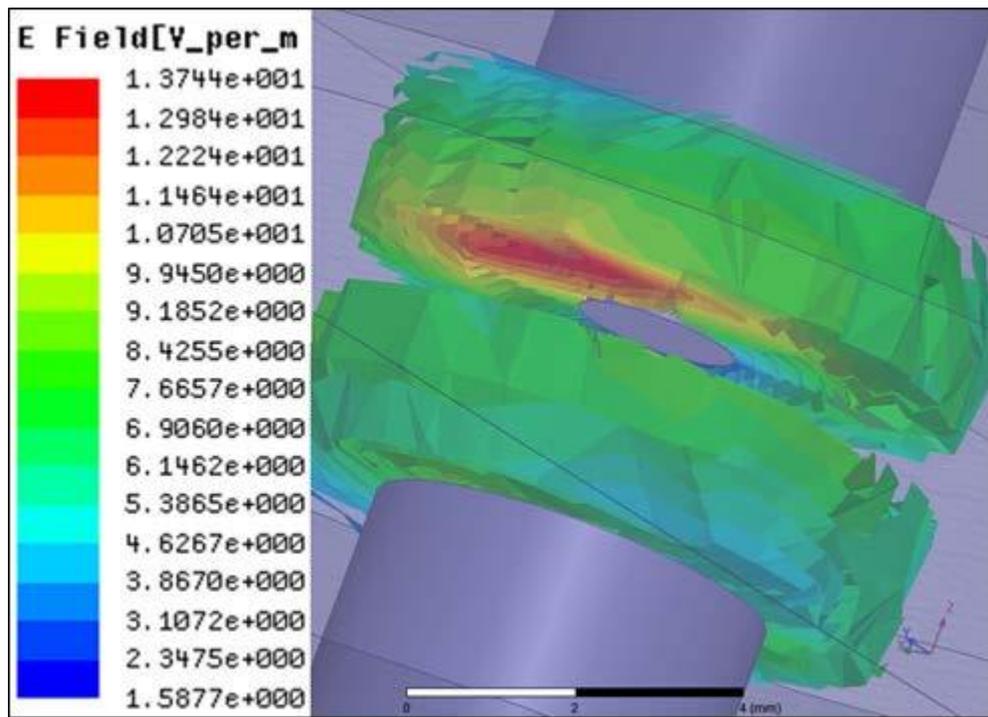


Рисунок Б.2 – Распределение электрического поля в ДРРС (вид сбоку)

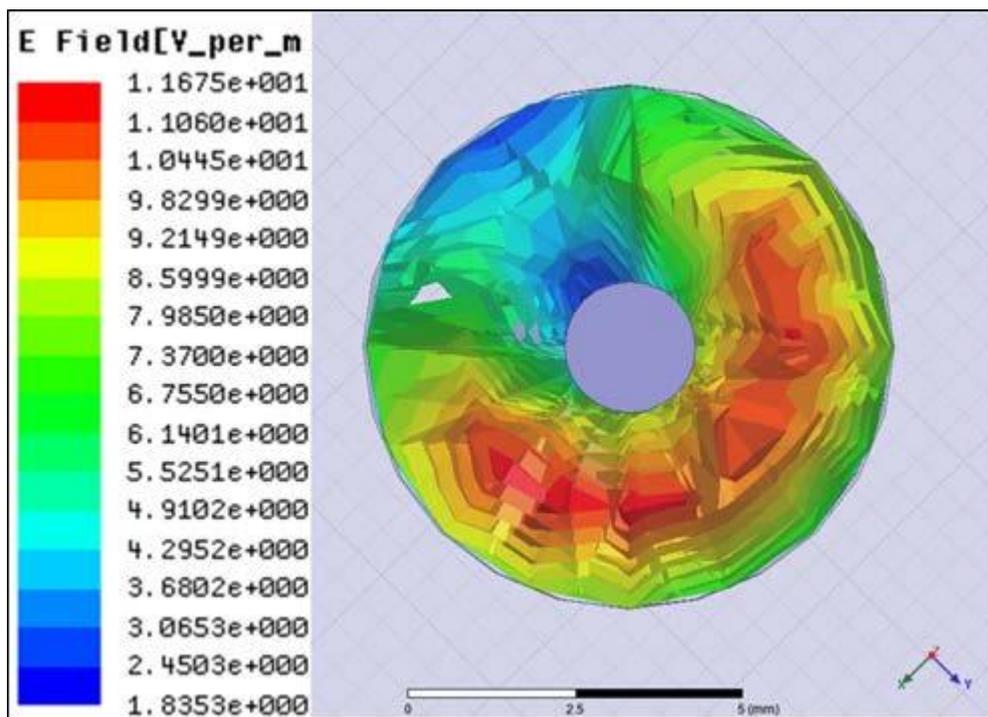


Рисунок Б.3 – Распределение электрического поля в ДРРС (вид сверху)

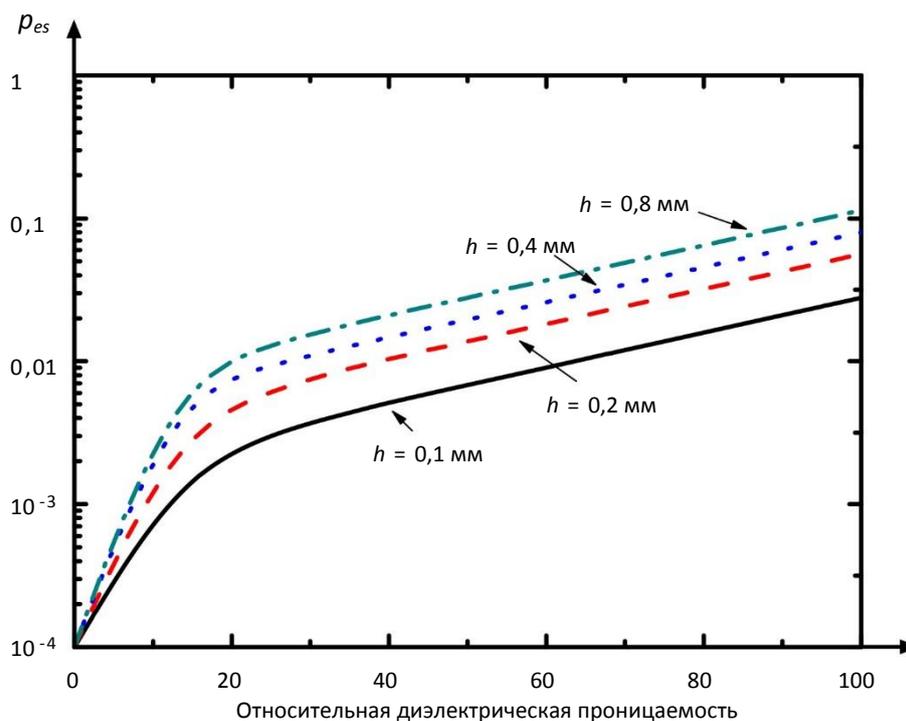


Рисунок Б.4 – Зависимость ρ_{es} от относительной диэлектрической проницаемости для образцов разной толщины

Список литературы

- [1] Nishikawa, T.; Wakino, K.; Tanaka, H.; Ishikawa, Y., "Dielectric Resonator Method for Nondestructive Measurement of Complex Permittivity of Microwave Dielectric Substrates," Microwave Conference, 1990. 20th European, vol.1, pp.501-506, 1990
- [2] Mazierska, J.; Krupka, J.; Jacob, M.V.; Ledenyov, D., "Complex permittivity measurements at variable temperatures of low loss dielectric substrates employing split post and single post dielectric resonators," Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International, vol.3, pp.1825-1828, 2004
- [3] Mazierska, J.; Jacob, Mohan V.; Haring, A.; Krupka, J.; Barnwell, P.; Sims, T., "Measurements of loss tangent and relative permittivity of LTCC ceramics at varying temperatures and frequencies," Journal of the European Ceramic Society, vol. 23, issue 14, pp.2611–2615, 2003
- [4] Krupka, J.; Clarke, R.N.; Rochard, O.C.; Gregory, A.P., "Split post dielectric resonator technique for precise measurements of laminar dielectric specimens-measurement uncertainties," Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2000. MIKON-2000. 13th International Conference, vol.1, pp.305-308, 2000
- [5] Krupka, J.; Gregory, A.P.; Rochard, O.C.; Clarke, R.N.; Riddle, B.; Baker-Jarvis, J., "Uncertainty of complex permittivity measurements by split-post dielectric resonator technique," Journal of the European Ceramic Society, vol. 21, issue 15, pp.2673-2676, 2001
- [6] Krupka, J.; Geyer, R. G.; Baker-Jarvis, J.; Ceremuga, J., "Measurements of the complex permittivity of microwave circuit board substrates using split dielectric resonator and reentrant cavity techniques," Seventh International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, (Conf. Publ. No. 430), pp. 21-24, 1996

4.4 Методика проведения измерений на оптическом микроскопе Leica INM 100 UV

Рубрикация подразделов сохранены по оригиналу методики.

Термины и определения

Микроскоп Leica INM 100 – это полуавтоматический оптический микроскоп высокого разрешения. Он оснащен моторизированной высокопарацентрической головкой для объективов на шесть посадочных мест с резьбой M32. Микроскоп оснащен тринокулярным тубусом с изменяемым углом наблюдения от 00 до 350 и широкопольными окулярами. Система фокусировки с изменяемой чувствительностью обеспечивает быструю грубую и тонкую настройку на фокус, оптимизированную для конфокального контраста. Модульная концепция микроскопа предусматривает использование теле- и микро-фотооборудования.

Назначение и область применения методики

1. Настоящий документ устанавливает методику измерений линейных размеров элементов топологии на полупроводниковой пластине или фотошаблоне.

2. Измерения выполняются в нормальных условиях в соответствии с ГОСТ 8.395-80.

2 Общие положения

Цель измерения

Целью измерений является определение линейных размеров элементов топологии на полупроводниковой пластине или фотошаблоне.

Перечень документов, на основании которых проводятся измерения.

- Настоящая методика измерений;
- ГОСТ 8.395-80 «Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования»;
- ГОСТ Р 8.568-97 «Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения»;
- ГОСТ Р 12.1.019-2009 «ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты»;
- ГОСТ 12.3.019-80 «Система стандартов безопасности труда. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности»;
- ГОСТ 12.2.091-2002 (МЭК 61010-1:1990) «Безопасность электрических контрольно-измерительных приборов и лабораторного оборудования»;
- ГОСТ 12.2.007.0-75 «Изделия электротехнические. Общие требования безопасности»;
- ГОСТ 12.4.011-89 «Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация»;
- ГОСТ 12.0.004-90 «Система стандартов безопасности труда. Организация обучения безопасности труда. Общие положения»;
- ГОСТ 12.0.005-84 «Система стандартов безопасности труда. Метрологическое обеспечение в области безопасности труда. Основные положения».

Место проведения измерений

Измерения проводятся на базе:

- Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)», г. Томск.

Условия и порядок измерений

Проведение измерений по настоящей методике осуществляется в условиях, описанных ниже. В соответствии с рекомендациями 20.57.406-81 измерения проводятся при нормальных климатических условиях:

- температура окружающей среды от 22° С;
- относительная влажность от 40% до 45 %;
- атмосферное давление от 86 до 106 кПа (от 630 до 800 мм. рт. ст.).

Переменное напряжение первичного источника электропитания 220 В ±10%, 50/60 Гц и 380±20 В, 3-фазное, 50±0,5 Гц.

Критерии начала и прекращения измерений

Критерии начала измерений, состав предоставляемых образцов, их комплектность и техническое состояние описаны в соответствующих разделах методики измерений.

Критерии прекращения измерений:

- несоответствие образцов типономинала образца заданному;
- выход из строя образца в процессе проведения измерений;
- механические повреждения образца;
- отклонение условий проведения испытаний от нормальных, заданных настоящей методикой;
- иные нештатные ситуации, способные повлиять на результаты измерений.

Условия перерыва в измерениях

Допускаются перерывы в измерениях, если это не приводит к нарушению требований настоящей методикой, не нарушает технических свойств образцов.

Условия хранения образцов в течение проведения измерений

Требования к хранению образцов не предъявляются.

Безопасность проведения измерений

1. При выполнении измерений соблюдают требования ГОСТ Р 12.1.019-2009 «ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты» и ГОСТ 12.3.019-80 «Система стандартов безопасности труда. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности».

2. Средства измерений должны удовлетворять требованиям безопасности по ГОСТ 22261-94 и ГОСТ Р 51350–99.

3. Электрические приборы должны быть заземлены в соответствии с ГОСТ 12.1.030-81.

Порядок взаимодействия организаций, участвующих в измерениях

Устанавливается в соответствии с действующей нормативно-правовой базой.

Допуск к проведению измерений

К проведению измерений допускаются лица, обладающие соответствующей квалификацией, изучившие техническое описание приборов, методику измерений, ознакомленные с техникой безопасности при проведении измерений.

Дополнительные требования к составу комиссии устанавливаются Главным конструктором, или заказчиком при необходимости.

Требования к показателям точности измерений

1. Пределы допускаемой относительной погрешности по данной методике измерений зависят от выбранных средств измерений и диапазонов измерений.

2. Методика определения погрешностей представлена в разделе 12.

Подготовка к выполнению измерений

1. Включить источник питания.

2. На рабочем РС открыть приложение Leica.

3. Открыть окуляры, сняв защитные чехлы.

4. Перевести рабочий стол микроскопа в правый нижний угол.

Порядок выполнения измерений

1. Положить на рабочий стол полупроводниковую пластину или фотошаблон.

2. Перевести рабочий стол микроскопа в положение, соответствующее расположению измеряемого элемента под объективом микроскопа.

3. Выполнить фокусировку изображения на топологическом элементе.

4. Выбрать объектив, соответствующий необходимому увеличению.

5. Выполнить точную фокусировку изображения на топологическом элементе.

6. В приложении Leica на рабочем РС выбрать увеличение, соответствующее выбранному объективу.

7. Зафиксировать изображение и произвести измерение размера необходимого топологического элемента по пункту 8.

8. Для выполнения измерения следующего измерения или завершения выполнения измерений, выполнить фокусировку на объективе с минимальным увеличением.

Обработка результатов измерений

1. Выбор границ

На рисунке 4.29 представлен вид идеальных границ элемента и границы с эффектом рассеивания света.



Рисунок 4.29 – Рисунок с границами элемента

Параметры, влияющие на результат:

1. Цифровое увеличение – увеличение масштаба изображения на компьютере.
2. Яркость света.
3. Границы.

Так как на границах резиста свет рассеивался, и затруднительно становилось определить верную границу, то рекомендуется выбирать 3 позиции границ: внутренняя, средняя и внешняя. Внутренняя и внешняя граница представляют собой видимые очертания границ. Средняя граница – это расстояние между серединами размытых границ.

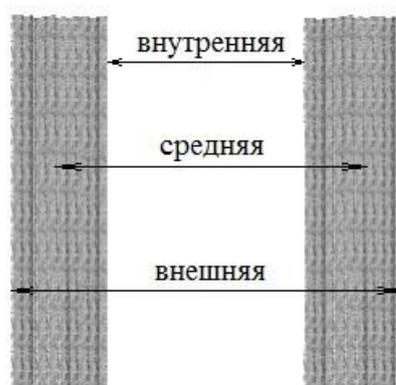


Рисунок 4.30 – Позиции измерения размеров на границах элемента

2. Рекомендации по выбору параметров измерений

1) Измерения в фоторезисте

Для проведения измерений элементов топологии, реализованные в фоторезисте оптимальными значениями яркости света и цифрового увеличения считаются: цифровое увеличение - 3, яркость света - 50 ms, измерения проводить по средней границе. При данных параметрах измерения погрешность измерений не превышает 150 нм.

2) Измерения в металле

Для проведения измерений элементов топологии, реализованные в металле оптимальными значениями яркости света и цифрового увеличения считаются: цифровое увеличение - 4, яркость света - 70 ms, измерения проводит по внешней границе. При данных параметрах измерения погрешность измерений не превышает 150 нм.

5 Подготовка и проведение семинара по измерениям

Основанием для проведения семинара с участием представителей предприятий, являющихся мировыми лидерами, явилось выполнение работ по п. 1.5. плана-графика проекта. Подготовка семинара по измерениям проводилась в рамках организации Международной конференции «Электронные средства и системы управления», проведенной 21-22 ноября 2019 г. Тематика семинара была выбрана по запросам нескольких коллективов, тематика НИР которых, в том числе как пользователей ЦКП «Импульс», сформулирована так: «Основы тестирования устройств радиофотоники». ТУСУР имеет долгосрочные договоренности с фирмой Keysight. На рис. 5.1 приведена фотография участников семинара, а на рисунке 5.2 – первый слайд презентации, сделанной Роциным Константином, инженером технической поддержки Keysight. Полная презентация передана всем участникам семинара и приведена в отчетных документах проекта.

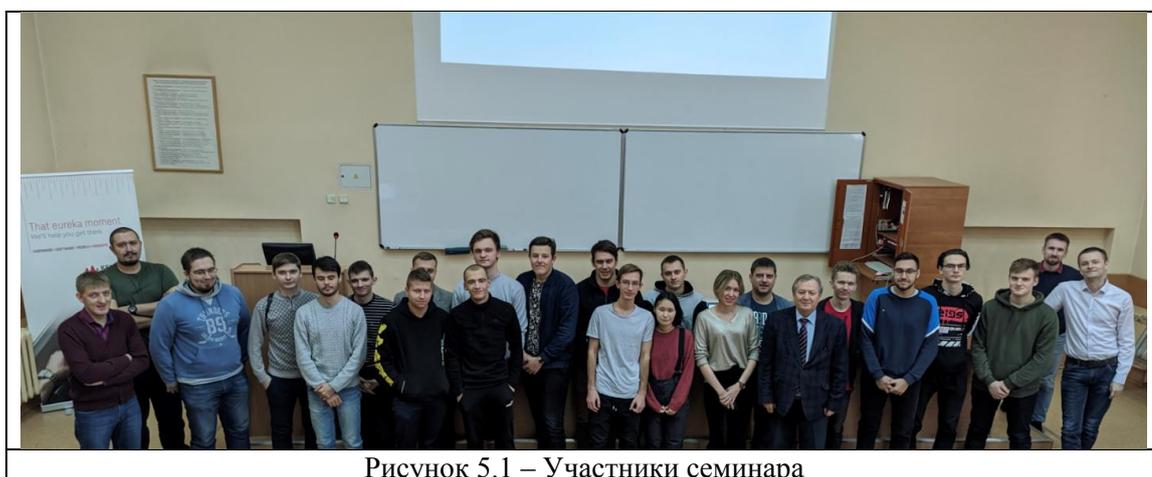


Рисунок 5.1 – Участники семинара



Рисунок 5.2 – Первый слайд презентации

Семинар «Тестирование устройств радиофотоники» от компании Keysight

Проведение семинара было анонсировано в программе пятнадцатой международной научно-практической конференции «электронные средства и системы управления», представленной в отчетной документации к проекту. В программе было объявлено:

Technologies

21 ноября (ЧТ), 10:00 – 13:00, 428 ауд. гл. корпуса ТУСУРа

В рамках семинара будут рассмотрены следующие вопросы:

- Основы тестирования устройств радиофотоники.
- Решения компании Keysight technologies по тестированию устройств радиофотоники;
- Комплексное тестирование оптических линий связи на этапе разработки.

В семинаре приняло очное участие 23 человека.

6 Составление перечня вспомогательного оборудования и аксессуаров для формирования рабочих мест на базе закупаемого научного оборудования

Данный раздел отражает выполнение работ по п. 1.6 плана-графика проекта, финансирование которых осуществлялось за счет собственных средств из внебюджетных источников.

Функционирование ЦКП «Импульс» в учебном университете накладывает определенные условия на состав оборудования. Большинство позиций оборудования по причинам его сложности и дороговизны недоступны для студентов и преподавателей до момента их полной подготовки к измерениям и получения допуска. Поэтому процесс подготовки происходит на менее сложном оборудовании, которое было названо «вспомогательным». Это вспомогательное оборудование необходимо еще по одной причине, связанной с докомплектацией рабочего места в самом ЦКП, например, средствами вычислений, системами питания, интерфейсным оборудованием, наконец, мебелью для размещения помощников или учеников. Необходимость и возможность покупки вспомогательного оборудования связана с дополнительным финансированием проектов. Источником такого финансирования в ТУСУРе являются хозяйственные договора по гражданской тематике. Наибольшие средства этого сегмента в 2019 г. Поступили от АО «НПФ «Микран» – 48 млн. руб. В совокупности с другими источниками это создало возможность профинансировать все работы по Плану-графику проекта. Сведения о внебюджетном финансировании приведены в отчетных документах. Перечень вспомогательного оборудования составлялся в коллективах кафедр и лабораторий, целевые устремления которых были направлены на выполнение НИР, пополнение оборудования учебно-научных лабораторий. Руководителю ЦКП «Импульс» ректором был поручен контроль за расходованием внебюджетных поступлений в связи с обеспечением видов измерений как в ЦКП, так в подразделениях. Этот контроль носил чаще всего консультативный характер, если сюда не попадали прямые функции выполнения НИР по заказам предприятия. Был составлен перечень вспомогательного оборудования, приведенный в таблице 6.1.

Таблица 6.1– Перечень вспомогательного оборудования

№	Тип оборудования	Стоимость, руб.
1.	Радиолокационный измерительный комплекс «Река»	620 338,98
2.	Оборудование коммуникационное сетевое (коммутатор, модуль, маршрутизатор)	6 388 110,00
3.	Оборудование коммуникационное сетевое (ИБП, коммутатор, модуль, сервер и др.)	3 848 163,00
4.	Микроскоп, 3D принтер, весы лабораторные и др.	755 785,00
5.	Осциллограф цифровой	665 000,00
6.	Измерительная установка цифровых быстродействующих устройств	1 598 00,00

Продолжение таблицы 6.1

7.	Модуль памяти, системные платы, процессор и др.	699 400,00
8.	Ноутбук	56 357,00
9.	Генератор сигналов	788 321,00
10.	Комплектующие для электронного микроскопа (привод оси, пикоамперметр, блок управления и др.)	3 187 684,00
11.	Комплектующие для электронного микроскопа (катод, кольцо уплотнительное и др.)	1 679 480,00
12.	Комплектующие для электронного микроскопа (апертура для микроскопа)	12 616,00
	Итого по договору 25/634	20 299 954,98
13.	Генератор сигналов, цифровой осциллограф, набор для измерения мощности и энергии и др	1 732 084,00
14.	Анализатор цепей, кабель и др.	704 300,00
15.	Оптоволоконный комплекс	821 465,00
16.	Гелий-неоновый лазер	313 425,00
17.	Аппарат сварочный	457 770,81
18.	Микроскоп биологический лабораторный с системой видеодокументирования	552 360,00
19.	Электроизмерительное оборудование (пикоамперметр, мультиметр и др.)	734 309,00
20.	Осциллограф, анализатор сигналов, измерительное устройство	1 167 700,00
	Итого по договору 25/732	6 483 413,81

Оборудование СВЧ снабжается достаточно дорогими аксессуарами, в основном это соединители коаксиальные, волноводные, коаксиально-полосковые, различные переходы, кабельные сборки. Поэтому в дополнение к указанным затратам в таблице 6.1 на цели обновления аксессуаров и материалов израсходовано более 9 млн. руб.

7 Закупка вспомогательного оборудования и аксессуаров

Раздел отражает содержание работ по п. 1.7 плана-графика по проекту. По представленному списку проведены закупочные конкурсные процедуры и приобретено оборудование, существенно пополнившее возможности компьютерной сети ТУСУРа и мощности измерений в подразделениях, сотрудничающих с ЦКП «Импульс». Использование закупленного оборудования, комплексирование его с имеющимся парком приборов и технологических установок, позволило в 2019 выполнить взятые научными подразделениями ТУСУРа обязательства перед заказчиками по обеспечению качества и объема работ.

Кроме оборудования, функционирование ЦКП обеспечивалось расходными материалами, полупроводниковыми пластинами и т.п. В таблице 7.1 показаны расходы участка СВЧ измерений в 2019 г., в том числе и за период выполнения 1 этапа проекта по дооснащению ЦКП. Все оплаты произведены по хозяйственным договорам.

Наименование	Сумма, руб.	Документ (накладная/упд)	Поставщик
Дымоуловитель для паяльных работ (вытяжка для паяльника) и антистатические лабораторные стулья	83 524,00	28.01.2019 №9	ООО "Альфа Инструментс"
Корпуса для микросхем	13 440,00	20.02.2019 № 72	АО "НИИПП"
Зонды для измерений	40 620,00	10.10.2018 № 139	АО "НИИПП"
Коаксиальные проводники	85 045,13	29.03.2019 № 12	ООО "ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ"
Мебель лабораторная: подкатная стойка, стол компьютерный (антистатический), шкаф шумоизоляционный	59 104,00	14.05.2019 № 32	ООО "Альфа Инструментс"
Зонды для измерений	29 952,00	13.08.2019 № 573	АО "НИИПП"
Коаксиальные проводники	91 803,20	11.10.2019 № 57	ООО "ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ"
Заказные интегральные схемы	5 300 000,00	05.12.19 № 73	ООО "ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ"
Итого	5 703 488,33		

Содержание оборудования ЦКП требует проведения регламентных работ, замены вырабатывающих свой срок деталей и аксессуаров. Один из наиболее острых вопросов для ЦКП – сохранение в рабочем состоянии электронного литографа Raith 150 Two. Проведенные сервисные работы выявили ряд естественно возникших дефектов, устранение которых приведет к восстановлению исходных технических параметров при условии участия в этом процессе сервис-инженеров фирмы Raith. Из внебюджетных средств на эти цели закуплены комплектующие (поз. 11, 12 таблицы 6.1), составлен план работ. Приобретенные запасные части будут использованы для устранения следующих неисправностей:

1. Нестабильность значения тока луча во времени (планируемая дата замены февраль 2020 г.):

- апертура для микроскопа 40 мкм анодная, 348520-0084-001- 1шт.,
- катод, 00000-0302-460-1шт,
- контакты катода для электронного микроскопа, 349520-0071-000- 1шт.,
- винт для анода электронного микроскопа (8 шт/уп), 348520-0304-300- 1 шт.,
- кольцо уплотнительное для микроскопа, 348520-0609-000- 2 шт.,
- кольцо уплотнительное для микроскопа, 000000-0546-290- 2шт.,
- диафрагма для электронного микроскопа, 348520-0097-001- 1шт.
- пикоамперметр Keithley 6485 для RAITH, 11472- 1 шт.

2. Низкая скорость движения столика, держателя пластин и образцов, по вертикальной оси Z, а также его прерывистое движения по осям X и Y. Периодическое появление посторонних звуков при движении столика по оси Z (планируемая дата замены февраль 2020 г.):

- привод оси Z для RAITH, 17586- 1 шт.,
- привод оси XY для RAITH Voyager, -1 шт.
- блок управления для RAITH, 24011-1шт.

3. Нестабильность показаний вакуума в рабочей камере электронного микроскопа (планируемая дата замены март 2020 г.):

- высоковакуумный датчик IKR 251 DN25 для электронного микроскопа, 340002-0078-000-1 шт.
- блок питания турбомолекулярного насоса Agilent 304 FS, 000000-0568-494-1шт.
- турбомолекулярный насос Agilent 304 FS для электронного микроскопа-1 шт.

4. *Высокое значение температуры воды, охлаждающей двигатель турбомолекулярного насоса, высоковольтную колонну и силовые транзисторы на электронной плате (дата замены декабрь 2019 г.):*

- блок охлаждения для электронного микроскопа - 1 шт.

5. *Отсутствие надёжной фиксации крышки загрузочного шлюза в открытом положении при загрузке/выгрузке столика в камеру электронного микроскопа (планируемая дата замены февраль 2019 г.):*

- пневматический демпфер крышки шлюза для RAITH, 24026- 4шт.

6. *Отсутствие четкости изображения и баланса яркости/контрастности, отсутствие (дата замены декабрь 2019 г.):*

- блок формирования лазерного луча для RAITH, 24025 - 1 шт.

В сложившейся ситуации на основании приказа ректора №1149 от 27.12.2019 г. о реорганизации ЦКП «Импульс» принято решение о временном выводе из состава ЦКП электронного микроскопа Zeiss Supra 55 с функцией электронного литографа. После проведения работ по замене изношенных узлов, тестирования и сертификации литографа представителем компании Raith он будет введен в строй. На период неисправности литографа работы по изготовлению фотошаблонов будут выполняться по договору 46/19 с АО «НПФ «Микран» на лазерном литографе Heidelberg DWL2000.

8 Разработка технической документации на стенды

Настоящий раздел подготовлен в соответствии с п.1.8 плана-графика проекта.

В период этапа 1 была завершена ранее начатая разработка стенда для измерения импульсных и частотных характеристик сверхширокополосных объектов. Для этой цели было использовано оборудование ЦКП «Нелинейный рефлектометр». Решалась задача разработки структурной схемы измерений, которая позволит определять одновременно и частотные и импульсные характеристики устройств. В результате проведенных патентных исследований принято решение подготовить заявку на полезную модель. Приведем ее описание, раскрывающее принцип работы стенда, который будет предлагаться пользователям ЦКП «Импульс» при запросе на проведение соответствующих упомянутому виду измерений (исследований).

Стенд относится к области радиотехники, в частности, к измерительным приборам и предназначен для определения импульсных характеристик, полных комплексных сопротивлений, коэффициентов стоячей волны различных объектов – сверхширокополосных антенн, трактов передачи разного типа, и может быть использован при построении антенно-согласующих устройств.

В работе [204] рассмотрены некоторые способы построения устройств для обнаружения неоднородностей в сверхширокополосном тракте передачи на основе рефлектометров. Основными элементами этих устройств являются генератор зондирующих (измерительных) импульсов, широкополосный стробоскопический смеситель, стробоскопический осциллограф, к которым подключается объект измерения. Из-за того, что они могут определить только полное импульсное напряжение на входе объекта измерения, они не могут измерить, например, комплексное сопротивление тракта, так как, в основном, они являются индикаторными устройствами и не предназначены для измерений коэффициента стоячей волны, импульсных характеристик что является их недостатком.

Известен измеритель параметров двухполюсников по патенту РФ № 2247398 на изобретение. Измеритель параметров двухполюсников, содержащий генератор прямоугольных импульсов, первый выход которого подключен к ветви, состоящей из последовательно соединенных двухполюсника объекта измерения и двухполюсника регулируемых элементов, каждый из этих двухполюсников содержит параллельно соединенные резистор и конденсатор, инвертирующий усилитель, выход которого соединен с первым входом двухвходового аналогового сумматора, второй вход его подключен к первому выходу генератора прямоугольных импульсов, разделительный конденсатор, включенный между выходом аналогового сумматора и первым входом нуль-индикатора, второй вход

нуль-индикатора - вход синхронизации соединен со вторым выходом генератора прямоугольных импульсов - выходом синхронизации, отличающийся тем, что вход инвертирующего усилителя соединен с общим выводом двухполюсника объекта измерения и двухполюсника регулируемых элементов.

К недостаткам устройства можно отнести то, что измеритель не может работать в области СВЧ. Кроме того, для измерения параметров двухполюсника требуется проведение нескольких измерений, уравнивание моста сопровождается переходными процессами, что значительно увеличивает время измерения, что также является его недостатком.

Известно устройство для измерения полного комплексного сопротивления антенн по патенту РФ № 136896 на полезную модель, содержащее первый, второй, третий, четвертый и пятый детекторы и буферные каскады по числу детекторов, при этом выходы буферных каскадов подключены к входам одноименных детекторов, выходы которых соединены с соответствующими входами аналого-цифрового порта микроконтроллера, первый последовательный порт которого является портом управления, при этом вторые входы первого и второго буферных каскадов заземлены, отличающееся тем, что введены высокочастотный датчик, а также первая и вторая согласующие цепи и первый и второй отрезки длинных линий, при этом первые входы первого и второго буферных каскадов подключены к первому и второму выводам высокочастотного датчика, вход и выход которого являются радиочастотным входом и выходом устройства, первый конец первого отрезка длинной линии подключен ко входу второй согласующей цепи, первому входу третьего буферного каскада и выходу первого буферного каскада, а первый конец второго отрезка длинной линии соединен со входом первой согласующей цепи, вторым входом третьего буферного каскада и выходом второго буферного каскада, при этом первые входы пятого и четвертого буферных каскадов подключены соответственно ко вторым концам первого и второго отрезков длинных линий, а вторые входы упомянутых буферных каскадов соединены соответственно с выходами первой и второй согласующих цепей.

Недостатком данного технического решения является узкополосность и, как следствие, невозможность определения импульсных характеристик.

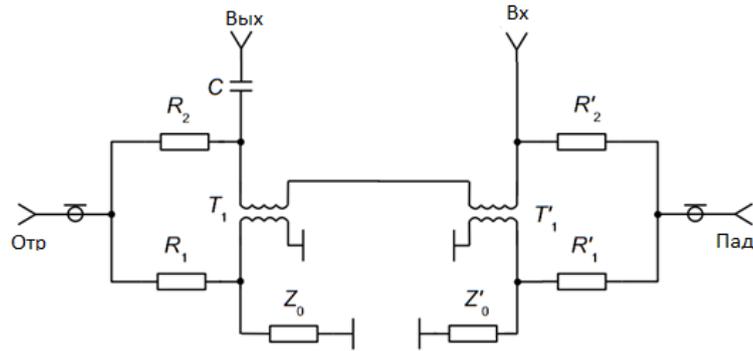
Наиболее близким к заявленному техническому решению является устройство оценки количественных и статистических характеристик внутренних неоднородностей электрических кабелей, по патенту РФ № 97831 на полезную модель, содержащее генератор зондирующих импульсов и устройство согласования, выходом связанное с приемником, содержащим усилитель и АЦП, вычислительный блок, содержащий процессор, со-

единенный входом/выходом с блоком памяти, причем соответствующими входом и выходом вычислительный блок связан соответственно с выходом и соответствующими входами приемника и входом блока индикации, отличающееся тем, что оно содержит блок подключения, выполненный, по меньшей мере, с двумя отдельными входами/выходами со стороны кабеля, которыми являются соответствующими входами/выходами упомянутого устройства согласования, входящего в блок подключения, содержащий также дифференциальную систему, входом соединенную с выходом генератора зондирующих импульсов, а входом/выходом - с выходом/входом устройства согласования, в приемник введен блок памяти рефлектограмм, соответствующим входом соединенный с выходом АЦП, соответствующим входом соединенного с выходом усилителя, вычислительный блок дополнительно содержит последовательно соединенные корректор искажений, амплитудный корректор, блок статистической обработки, соответствующие входы/выходы которого подключены к выходам/входам коррелятора и процессора, управляющий выход которого соединен с управляющими входами амплитудного корректора, корректора искажений, блока памяти рефлектограмм и усилителя приемника, генератора зондирующих импульсов и устройства согласования блока подключения, причем выход дифференциальной системы и соответствующий выход устройства согласования блока подключения подключены к соответствующим входам усилителя, являющимся входами приемника, выход блока памяти рефлектограмм, являющийся выходом приемника, подключен ко входу вычислительного блока, которым является вход корректора искажений, а выход вычислительного блока, которым является выход блока статистической обработки, подключен ко входу блока индикации. Здесь дифференциальная система выделяет отраженный сигнал, а за амплитуду падающего сигнала принимается половина амплитуды зондирующего сигнала в режиме холостого хода. По ним компьютер вычисляет характеристики неоднородностей.

Недостатком данного технического решения является низкая точность, невозможность определения импульсных характеристик и невозможность работы в области СВЧ.

Целью предлагаемого решения является увеличение точности измерений импульсных и частотных характеристик сверхширокополосных объектов типа антенн ШПС и трактов передачи разных типов в сверхширокой полосе частот, включая СВЧ.

Поставленная цель достигается тем, что заявляемый стенд включает в себя сверхширокополосный двойной направленный мост, описанный в [205], схема которого показана на рисунке 8.1.



- Вх – порт для подключения генератора зондирующих импульсов;
- Пад – порт выхода падающего сигнала;
- Отр – порт выхода отраженного сигнала;
- Вых – порт для подключения сверхширокополосного объекта.

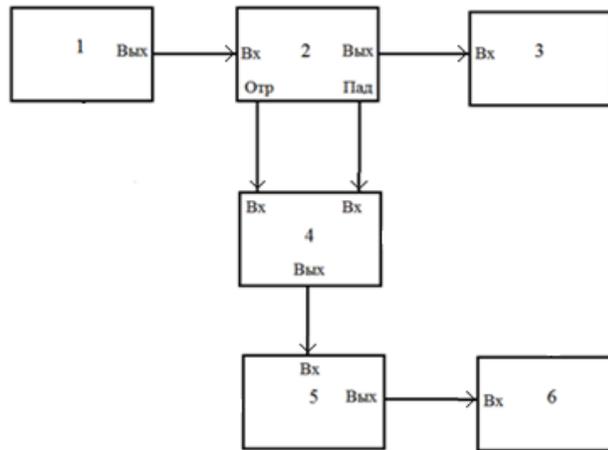
Рисунок 8.1 – Схема сверхширокополосного двойного направленного моста

Сверхширокополосный двойной направленный мост работает следующим образом. При подаче импульса от генератора зондирующих импульсов на порт Вх его часть, пропорциональная напряжению падающей волны ответвляется в порт Отр. Проходя далее по устройству, импульс достигает порта Вых, частично или полностью отражается от исследуемого объекта и поступает на порт Отр в виде отраженного сигнала. Величина и форма отраженного сигнала определяется параметрами исследуемого объекта, подключенного к порту Вых. В качестве исследуемого объекта могут быть различные сверхширокополосных объектов типа антенн и трактов передачи разных типов.

Главное преимущество такого устройства на основе направленных мостов в сравнении с устройствами на связанных линиях передачи заключается в сверхширокополосности за счет способности работать в низкочастотном диапазоне при малых размерах и массе.

Структурная схема стенда представлена на рисунке 8.2 и включает в себя генератор зондирующих импульсов 1, сверхширокополосный двойной направленный мост 2, исследуемый объект 3, коммутатор 4, осциллограф 5 и компьютер 6.

Стенд работает следующим образом. Генератор 1 формирует зондирующий импульс заданной амплитуды и длительности. Коммутатор 4 в переключен в режим измерения падающего/отраженного сигнала. Сверхширокополосный двойной направленный мост 2 выделяет падающий и отраженные сигналы и через коммутатор 4 подает падающий/отраженный сигнал на осциллограф 5 который в цифровом виде передает измеренный падающий/отраженный импульс на компьютер 6, который его записывает.



1. Генератор зондирующих импульсов
2. Сверхширокополосный двойной направленный мост
3. Сверхширокополосный объект
4. Коммутатор
5. Осциллограф
6. Компьютер

Рисунок 8.2 – Структурная схема стенда

Компьютер 6, используя, например, дискретное преобразование Фурье, по полученным импульсным сигналам вычисляет полные комплексные сопротивления, коэффициенты стоячей волны и другие параметры измеряемого сверхширокополосного объекта.

Для подтверждения изложенных возможностей стенда выполнены экспериментальные исследования на экспериментальной установке для исследования импульсных характеристик углеродных антенн, схема которой соответствует схеме стенда (рисунок 8.2). Схема установки приведена на рис. 8.3. В данной схеме используется импульс в виде ступеньки, который формируется в блоке цифрового осциллографа Tektronix 1180B.

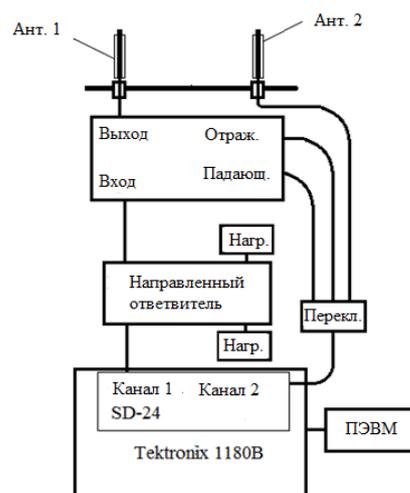


Рисунок 8.3 – Схема установки для исследования импульсных характеристик углеродных антенн

Вид подаваемого на вход направленного ответвителя на связанных линиях импульса показан на рис. 8.4.

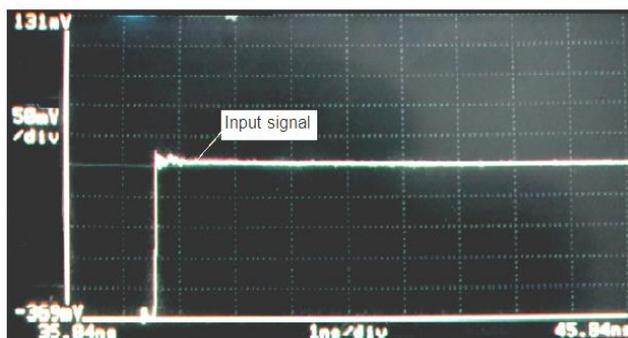


Рисунок 8.4 – Зондирующий сигнал $U_1(t)$ на выходе блока формирования импульса SD24

Для формирования тестирующего импульса дополнительно к схеме заявляемого стенда был использован направленный ответвитель на связанных линиях. В результате того, что направленный ответвитель дифференцирует импульс в виде ступеньки, на его выходе получается импульс, показанный на рис. 8.5.

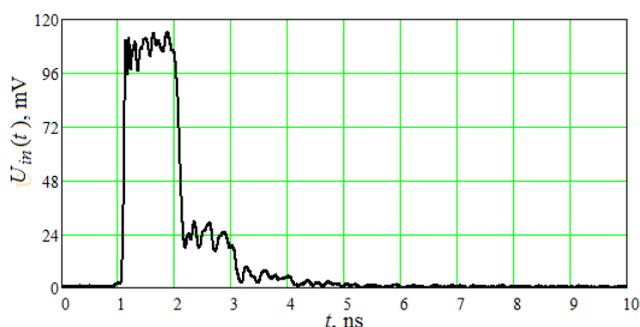


Рисунок 8.5 – Зависимость напряжения падающего сигнала от времени на выходе направленного ответвителя

В приведенном примере направленный ответвитель на связанных линиях используется для формирования исходного импульса, подаваемого на испытуемое устройство. При использовании его вместо двойного моста получим дифференцирование тестового импульса. При этом станет невозможной заявленная функция стенда измерения импульсных и частотных характеристик сверхширокополосных объектов. Отсюда следует, что применение двойного моста (см. рисунок 8.1) вместо традиционного направленного ответвителя в известных схемах измерений векторных анализаторов цепей обеспечивает измерение одновременно в импульсном режиме и в частотном диапазоне. Это принципиальное отличие заявляемого стенда от хорошо известных решений Anritsu и других производителей векторных анализаторов цепей.

Поясним далее работу заявляемого стенда на приводимом примере. Осциллограф Tektronix 1180B с генераторным агрегатом и приемником SD-24 служил базовым регистратором. На выходе канала 1 SD-24 формирует зондирующий импульс в виде ступеньки с фронтом около 150 пс (рисунок 8.5). Импульс поступает на широкополосный направленный ответвитель на связанных полосковых линиях с переходным затуханием 3 дБ. На выходе направленного ответвителя мы получаем однополярный сигнал длительностью 1 нс. Этот импульс подается на вход широкополосного направленного моста и при затухании на 5 дБ он поступает на выход моста. Выход моста нагружен на входное сопротивление объекта измерений (в примере – передающая антенна). В этом канале одновременно распространяются две волны: падающая и отраженная от передающей антенны волна. Это усложняет анализ волнового процесса, поэтому для выполнения функции разделения падающей и отраженной волн используется двойной направленный мост (рисунок 8.2). Мост не дифференцирует подаваемый импульсный сигнал, на его выход поступает исходный сигнал в виде импульса такой же формы, что важно для сравнения импульса, подаваемого на вход испытуемого устройства, с импульсом, прошедшим через испытуемое устройство, а также с отраженным импульсом от входа испытуемого устройства. Получаемые таким образом импульсы позволяют определить полный набор параметров рассеяния исследуемого устройства с помощью преобразования Фурье. Для этого разработаны программы, загружаемые в ЭВМ.

Проиллюстрируем это на приводимом примере. Импульс (рис. 8.5) возбуждает вынужденные и свободные колебания в антенне 1. На рисунке 8.6 показан спектр исходного импульса (рисунок 8.6). Спектральный анализ сигналов проводился с использованием прямого преобразования Фурье.

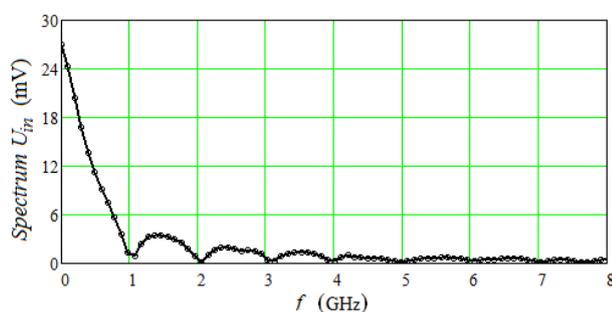


Рисунок 8.6 – Спектральная характеристика тестирующего сигнала (рис. 3) на выходе двойного моста

Проведены измерения импульсных характеристик антенн 1 и 2 при передаче импульсного сигнала из антенны 1 в антенну 2 с различными основаниями: с алюминиевой пластиной и пластиной из углеродных тканей. На рисунке 8.7 показана зависимость напряжения на второй антенне для обоих указанных опций.

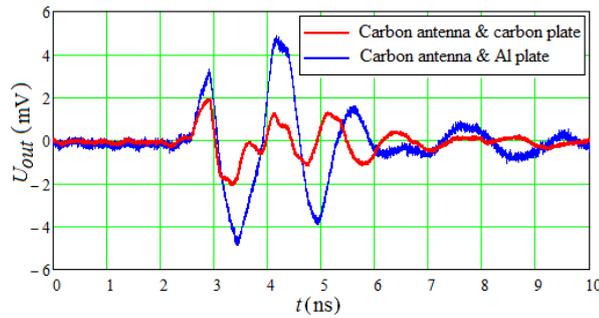


Рисунок 8.7 – Сигнал в антенне 2, установленной на основании из алюминия и покрытого дополнительно углеродной тканью

Спектральный анализ сигналов (рисунок 8.7) проводился с использованием прямого преобразования Фурье. Результаты представлены на рис. 8.8 в виде огибающих спектральных компонентов. Исходя из этого был определен коэффициент передачи между двумя антеннами $|S_{21}(f)|$. На рис. 8.9 показаны зависимости $|S_{21}(f)|$ в полосе частот, полученные при возбуждении антенны 1 прямоугольным импульсом (рисунок 8.5). Сравнение зависимостей показывает, что применение углеродной ткани увеличивает затухание на 3,5 дБ на резонансной частоте антенны.

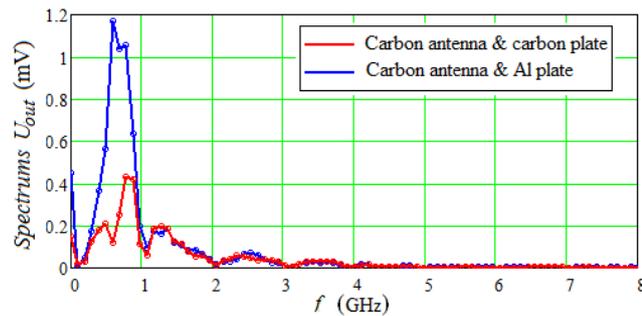


Рисунок 8.8 – Спектральные компоненты сигналов, полученных антенной 2

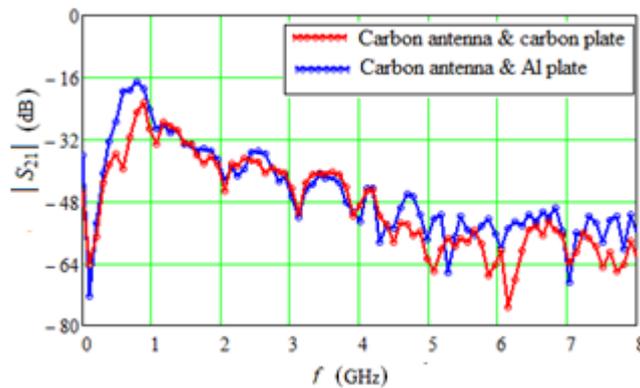


Рисунок 8.9 – Зависимость от частоты коэффициента передачи $|S_{21}(f)|$, между двумя антеннами

Используя отраженный импульс от входа антенны 1, проведя вычисления, получаем частотную зависимость коэффициента возвратных потерь $|S_{11}(f)|$ (рис. 8.10).

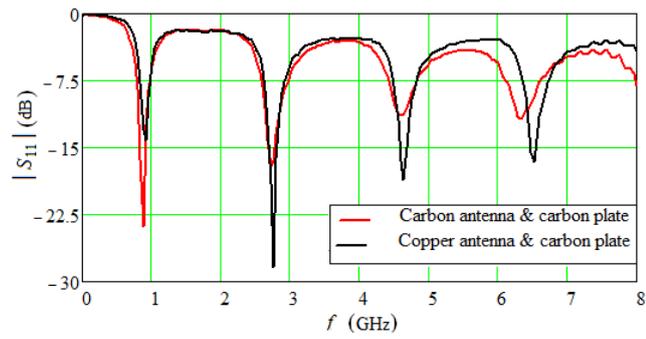


Рисунок 8.10 – Частотная зависимость возвратных потерь $|S_{11}(f)|$ антенны 1

Таким образом, доказано основное принципиальное отличие заявляемого стенда по отношению к противопоставленному анализатору векторных параметров цепей, которое состоит в возможности измерения параметров при импульсном воздействии. При этом определяются также частотные зависимости параметров рассеяния.

9 Проведение экспериментальных работ по измерению параметров СВЧ устройств

Данный раздел содержит сведения о результатах, полученных в ходе выполнения работ по п. 1.9 плана-графика по проекту.

В разделе 3 дано описание нескольких экспериментальных работ по измерению параметров СВЧ устройств с применением оборудования ЦКП «Импульс». Сведения об экспериментальных работах с начала действия Соглашения по данному проекту опубликованы в материалах Международной конференции «Электронные средства и системы управления» [206]. Неполный перечень докладов, опубликованных в материалах конференции по теме раздела и содержащих ссылку на использование оборудования ЦКП:

1) А.В. Христенко, А.С. Аникин. Характеристики обнаружения малоразмерного БПЛА в наземном стационарном фоновом радиолокаторе сантиметрового диапазона // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XV Международной научно-практической конференции (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2019. – С. 13-17.

2) М.Е. Ровкин. Разработка, исследование и испытание бортовой аппаратуры РЛС с синтезированной апертурой для дистанционного зондирования Земли L- и X-диапазонов // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XV Международной научно-практической конференции (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2019. – С. 20-25.

3) А.С. Коряковцев, А.А. Коколов, Д.А. Конкин, Ф.И. Шеерман, Ю.С. Жидик. Разработка и экспериментальное исследование интегрального оптического приемника на основе 0,25 мкм SiGe-БиКМОП-технологии для линий передачи со скоростью 25 Гб/с // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XV Международной научно-практической конференции (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2019. – С. 53-56.

4) Н.В. Голенева, Л.И. Бабак, П.В. Панасенко, А.В. Волосов, А.А. Коколов, М.В. Черкашин, Ф.И. Шеерман. Исследование влияния заземленного экрана и дополнительных диэлектрических слоев на СВЧ-характеристики микросхем с 3D-интеграцией // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XV Международной научно-практической конференции (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2019. – С. 56-59.

Ниже приведены некоторые из докладов, в которых представлены результаты авторов, сославшихся на применение оборудования ЦКП.

УДК 621.375.9

А.С. Коряковцев, А.А. Коколов, Д.А. Конкин, Ф.И. Шеерман, Ю.С. Жидик

Разработка и экспериментальное исследование интегрального оптического приемника на основе 0,25 мкм SiGe-БиКМОП-технологии для линий передачи со скоростью 25 Гб/с

Представлены результаты разработки и экспериментального исследования интегрального оптического приемника на основе 0,25 мкм SiGe-БиКМОП-технологии. Разработанный оптический приемник обладает следующими характеристиками: полоса частот DC – 20 ГГц, коэффициент трансимпедансного усиления ТИУ $Z_T = 60\text{--}62$ дБ-Ω, коэффициент отражения по выходу не менее –15 дБ, потребляемый ток составляет 50 мА при напряжении питания 2,5 и 3,3 В, размер микросхемы $1,45 \times 0,86$ мм² с учетом контактных площадок. Результаты экспериментального исследования интегрального оптического приемника показывают его работоспособность при скорости передачи до 25 Гб/с.

Ключевые слова: кремниевая фотоника, трансимпедансный усилитель, фотодиод, SiGe-БиКМОП.

Повышенное внимание к разработке систем высокоскоростной передачи данных обусловлено, в частности, увеличением объема передаваемых данных в сети Интернет, модернизацией стандартов передачи данных IEEE до 100, 400 Гб/с и т.д. Увеличение скорости связи может быть достигнуто при помощи технологий спектрального уплотнения каналов (WDM), а также применения многоуровневой импульсной модуляции (например, PAM-4). Новые стандарты связи стремятся использовать дополнительные способы увеличения пропускной способности, такие как использование поляризации, применение более сложной модуляции (QPSK, QAM и т.п.) [1–3]. При этом актуальным вопросом является увеличение полосы пропускания отдельного канала, которое может быть достигнуто за счет использования более высокочастотной технологии электрооптического/оптоэлектронного преобразования.

В настоящее время указанные средства строятся, как правило, на основе традиционного подхода с применением дискретных компонентов – LiNbO₃-модуляторов, A₃B₅-усилителей, фотодиодов и т.п. Несмотря на то, что такой подход позволяет получить отличную линейность и большую полосу пропускания, при необходимости использования в системе большого количества каналов, например, для коммуникации данных в датацентрах, он становится объемным, энергозатратным и дорогим [3]. В связи с этим в настоящее время активно развивается другой подход, состоящий в создании и применении оптоэлектронных устройств и систем на базе кремниевой фотоники [4, 5]. Применение технологий кремниевой фотоники позволяет значительно улучшить массогабаритные характеристики, уменьшить стоимость, энергопотребление оптоэлектронных изделий и т.п.

Интеграция оптоэлектронных устройств (фотодиод, модулятор, оптический волновод) совместно с СВЧ-электронными, а в перспективе и с цифровыми устройствами в рамках одного технологического процесса позволяет увеличить рабочие частоты и эффективность. Такой подход уже позволил повысить скорость передачи одного канала вплоть до

54 Гб/с [6]. Это достигается во многом благодаря отсутствию паразитных параметров проволочных межсоединений и более короткому пути от оптоэлектронных устройств до микросистемных.

Одним из важнейших блоков в системах передачи данных является трансимпедансный усилитель (ТИУ), который преобразует ток фотодиода (ФД) в выходное напряжение и усиливает полезный сигнал. Модуль отношения выходного напряжения к входному току (V_O/I_{IN}) называется коэффициентом трансимпедансного усиления и имеет размерность Ω или дБ-Ω.

Целью данной работы является разработка и экспериментальное исследование ИС оптического приемника с полосой до 20 ГГц на основе монолитной 0,25 мкм SiGe-BiCMOS-технологии для применения в линиях связи со скоростью передачи до 25 Гб/с.

Структурная схема оптического приемника и технические требования

Монолитный интегральный оптический приёмник состоит из элемента ввода оптического излучения, представляющего дифракционную решетку, оптического волновода, фотодиода с цепью смещения и трансимпедансного усилителя (рис. 1).

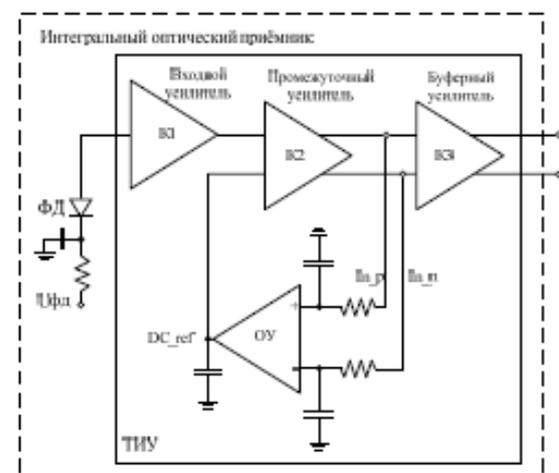


Рис. 1. Структурная ИС оптического приемника

ТИУ состоит из трех каскадов: входной каскад преобразует ток ФД в напряжение, промежуточный каскад усиливает сигнал и преобразует его в дифференциальный, выходной буфер обеспечивает требуемую выходную мощность и согласование с 50-омным трактом. В ТИУ также встроена обратная связь для компенсации смещения постоянного тока от ФД и предотвращения разбаланса плеч промежуточного дифференциального усилителя.

Поскольку разработанный радиопотонный приемник предназначен для систем связи с детектированием сигнала, на выходе ФД генерируется постоянный ток, который изменяет рабочую точку входного каскада, что, в свою очередь, изменяет смещения следующих каскадов. Этот факт приводит к ограничению каскада усиления и дисбалансу в выходном дифференциальном усилителе.

Значения напряжений на выходах промежуточного каскада поступает на фильтр нижних частот R_1-C_1 . Затем операционный усилитель (OpAmp) сравнивает значения выходного напряжения. Результирующий сигнал ошибки, генерируемый OpAmp, регулирует напряжение на одном из входов промежуточного каскада. Кроме того, этот контур постоянного тока выполняет компенсацию возможного дисбаланса между двумя дифференциальными трактами сигнала из-за температуры, изменения технического процесса и т.д. Операционный усилитель реализован на КМОП-транзисторах.

Экспериментальное исследование

Топология кристалла разработана с помощью программного обеспечения Cadence. Затем компанией ИНР (Германия) была изготовлена микросхема оптического приемника, микрофотография которого представлена на рис. 2. Размеры чипа вместе с контактными площадками 1460×850 мкм².

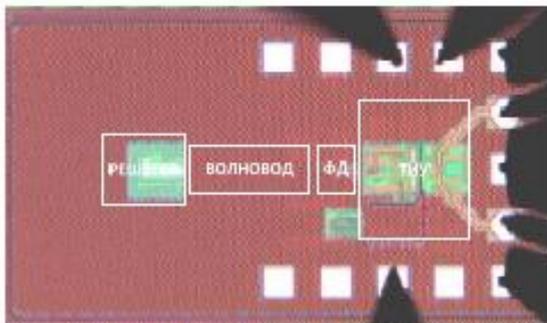


Рис. 2. Микрофотография ИС оптического приёмника

Световой поток (длина волны 1550 нм) перед тем как возбудить фотодиод, падает на чувствительную решётку и проходит кремниевый волновод, затем уже происходит генерация тока в фотодиоде. Выходной сигнал снимается дифференциальным зондом (GSGSG с шагом 150 мкм). Поддача питания осуществляется через DC-зонды.

Измерения проводились путём подачи на вход ИОП оптического сигнала, содержащего две частоты f_1 и f_2 такими, чтобы разность частот $f_1 - f_2$ между ними попадала в полосу пропускания приёмника. В

результате детектирования двухтонового сигнала на ФД возникает частота биений $f_1 - f_2$, которую фиксирует анализатор спектра. Данный метод называется методом оптического гетеродинамирования. Для достижения максимальной эффективности ввода оптического сигнала используются специальные микропозиционеры под нормальным углом 10–14°. Измерительная установка с зондирующей станцией, оптическим генератором, векторным анализатором и анализатором спектра показана на рис. 3. На ИОП подается несколько напряжений питания 3,3 и 2,5 В, а также напряжение смещения на ФД. Общий ток потребления составляет 50 мА.

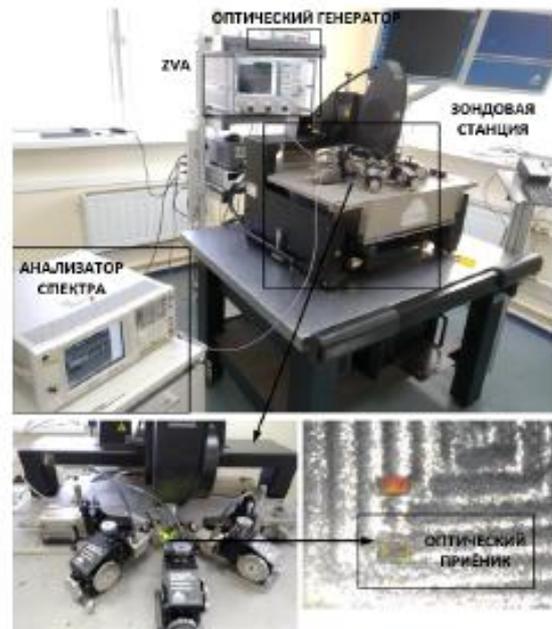


Рис. 3. Фотография измерительного стенда

Нормированный коэффициент преобразования интегрального оптического приёмника представлен на рис. 4. Полоса пропускания приёмника составила 22 ГГц, что согласуется с результатами моделирования [6].

Нормированный коэффициент преобразования ИОП, дБ

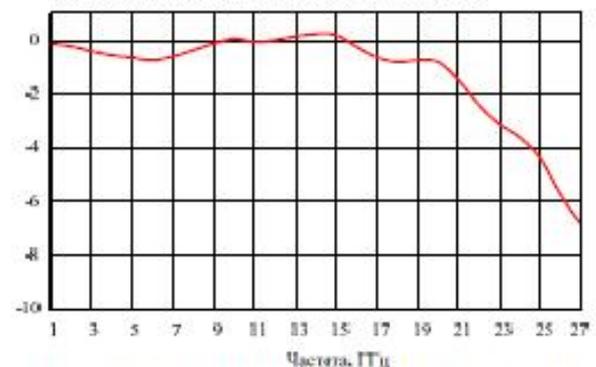


Рис. 4. Нормированный коэффициент преобразования ИС ИОП

Коэффициент отражения по выходу приёмника измерялся на пластине с помощью 4-портового век-

торного анализатора цепей ZVA40 до 40 ГГц (рис. 5). Согласование с 50-омной нагрузкой на обоих портах ($|S_{22}|$ и $|S_{33}|$) не хуже -15 дБ до 30 ГГц.

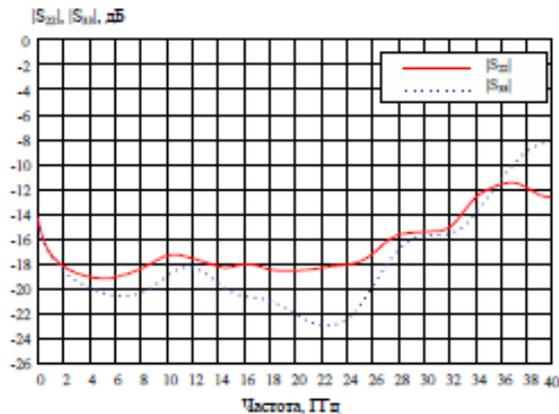


Рис. 5. Измеренный коэффициент отражения по выводу оптического приёмника

Измерения ИОП на печатной плате

Для проведения дальнейших измерений характеристик радиофотонного тракта была разработана печатная плата на материале Rogers 4350B (рис. 6). Кристалл ИОП был наклеен на печатную плату токопроводящим клеем и разварен непосредственно на контактные проводящие дорожки печатной платы (рис. 7). Для модуляции оптического сигнала при эксперименте был использован электрооптический (ЭО) модулятор с полосой до 10–12 ГГц марки Lucent 2623NA.

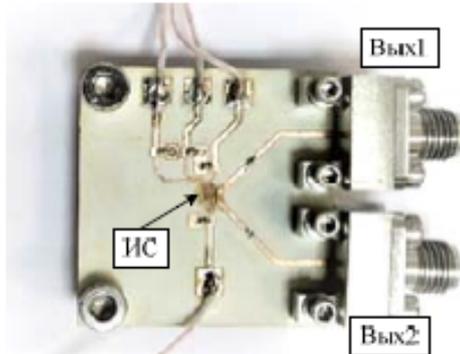


Рис. 6. Фотография тестовой платы для оптического приёмника

Сигнал с выхода лазерного диода модулируется СВЧ-сигналом, поступающим с выхода векторного анализатора цепей ZVA40. Затем модулированный сигнал, проходя оптическое волокно, попадает на входную дифракционную решётку ИС ИОП, результат снимается с одного из дифференциальных каналов и поступает на вход векторного анализатора цепей. При этом второй канал должен быть нагружен на 50 Ом. Дополнительно после ЭО-модулятора использовался контроллер поляризации оптического сигнала для обеспечения эффективного ввода излучения в приёмник. Анализатор цепей был предварительно откалиброван в плоскости измерительных СВЧ-кабелей.

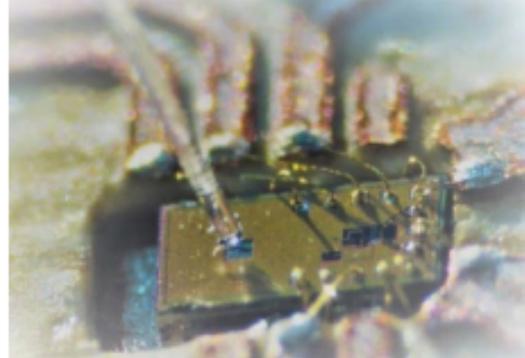


Рис. 7. Фотография кристалла ИОП на печатной плате с подведённым оптическим волокном

На рис. 8 представлены измеренные характеристики приёмного тракта, а именно коэффициент преобразования, коэффициент отражения электрооптического модулятора, коэффициент отражения по выводу оптического приёмника. Мощность оптического сигнала с выхода лазерного диода составляла $+16$ дБм, на выходе модулятора $+3$ дБм, таким образом, потери электрооптического преобразования составили 13 дБ.

Как можно заметить из рис. 8, наклон кривой коэффициента передачи радиофотонного тракта составляет порядка 10 дБ в диапазоне частот 1–20 ГГц. Данный наклон в основном обусловлен АЧХ оптического модулятора. Согласно измеренному коэффициенту отражения электрооптического модулятора, его частотный диапазон составляет 12–13 ГГц. Потери на ввод и вывод оптического сигнала, связанные с позиционированием оптического волокна, а также потери СВЧ-сигнала с конструктивными особенностями печатной платы составляют порядка 5–10 дБ и также имеют частотно-зависимый характер. Таким образом, коэффициент передачи радиофотонного тракта с применением ИОП составляет $-13 \dots -24$ дБ в диапазоне частот 1–20 ГГц.

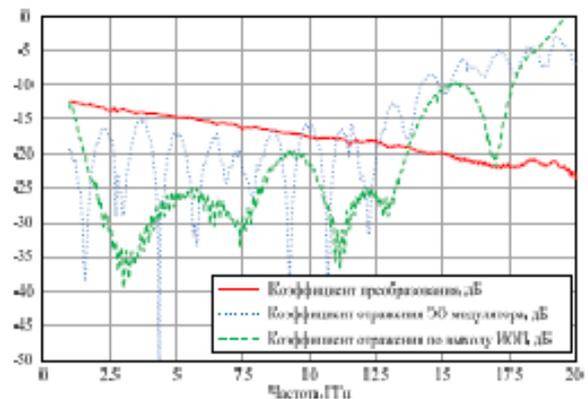


Рис. 8. Измеренные коэффициенты передачи приёмного тракта, коэффициент отражения электрооптического модулятора, коэффициент отражения по выводу оптического приёмника

В таблице приведены сводные характеристики ИОП, полученные в результате ЭМ-моделирования и экспериментального исследования.

Характеристики ИС оптического приемника		
Характеристика ИОП	ЭМ-анализ	Эксперимент
Полоса частот, ГГц		> 20
Согласование по выходу, дБ		≤ -10
Коэффициент передачи ТИУ, дБ	22–24	21–22*
Трансмпедансный коэффициент усиления ТИУ, дБΩ	>60	>60*
Технология	250нм SiGe BiCMOS	
$P_{max, \text{эф}}$ с каждого канала, дБм	<-8	-
Групповое время задержки, пс	30+/-2	-
Размер, мм ²	0,85×1,46	
Потребление, мВт	160	

* При учете потерь в ЭО-модуляторе

Заключение

В статье представлены разработка и экспериментальное исследование ИС оптического приемника диапазона DC-20 ГГц на основе 0,25 мкм SiGe-BiCMOS-технологии. Разработанный оптический приемник обладает следующими характеристиками: полоса частот DC 20 ГГц, коэффициент трансмпедансного усиления ТИУ $Z_T = 60-62$ дБ·Ω, коэффициент отражения по выходу не менее -15 дБ, потребляемый ток составляет 50 мА при напряжениях питания 2,5 и 3,3 В, размер микросхемы 1,45×0,86 мм² с учетом контактных площадок.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ. Уникальный идентификатор 8.4029.2017/4.6.

Экспериментальные исследования выполнены с применением оборудования ЦКП «Импульс», соглашение № 075-15-2019-1644, ID RFMEFI62119X0029.

Литература

1. Rito P. et al. A Monolithically Integrated Segmented Linear Driver and Modulator in EPIC 0.25-μm SiGe-C-

BiCMOS-Platform // IEEE Trans. Microwave Theory & Tech. – December 2016. – Vol. 64, No. 12. – P. 4561–4572.

2. Eissa M.H. et al. A Wideband Monolithically Integrated Photonic Receiver in 0.25-μm SiGe-C-BiCMOS-Technology / ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference, October 2016.

3. Koryakovtsev A.S., Kokolov A.A., Sheyerman F.I., Babak L.I. Design of Integrated Photonic Receiver with 20 GHz Bandwidth Based on 0.25 μm SiGe-BiCMOS-Technology: in Proc. EWDTs, November 2018.

4. Razavi B. Design of Integrated Circuits for Optical Communications. 2nd ed. – New York: J. Wiley & Sons, 2012.

5. Assefa S. et al. Integration of silicon photonics in bulk CMOS // 2012 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). – March 2013.

Коряковцев Артем Сергеевич

М.н.с. ЛИКС ТУСУРа

Эл. почта: tintartyom@mail.ru

Коколов Андрей Александрович

Канд. техн. наук, с.н.с. ЛИКС, доцент каф. КСУП ТУСУРа

Эл. почта: kokolovaa@gmail.com

Конкин Дмитрий Анатольевич

Науч. сотр. ЛИКС, ст. преподаватель РСС ТУСУРа

Эл. почта: konkinda@inbox.ru

Шеерман Фелор Иванович

Канд. техн. наук, зав. лаб. ЛИКС, доцент каф. КСУП ТУСУРа

Эл. почта: fish@kcup.tusur.ru

Жидик Юрий Сергеевич

М.н.с. ЛИКС, аспирант каф. ФЭ ТУСУРа

Эл. почта: konkinda@inbox.ru

УДК 621.372

Н.В. Голенева, Л.И. Бабак, П.В. Панасенко, А.В. Волосов,
А.А. Коколов, М.В. Черкашин, Ф.И. Шеерман

Исследование влияния заземленного экрана и дополнительных диэлектрических слоев на СВЧ-характеристики микросхем с 3D-интеграцией

В настоящее время проводится активная разработка и моделирование микроэлектронных схем СВЧ-диапазона на подложках GaAs. Проведена оценка влияния дополнительных диэлектрических слоев и слоев металлизации на СВЧ-характеристики микрополосковой (МПЛ) и копланарной (КПЛ) линий передачи, а также симметрирующего трансформатора (СТ) и полосового фильтра (ПФ) на базе МПЛ.

Ключевые слова: СВЧ МИС, металлизация, ВСВ, МПЛ, КПЛ.

Одним из ключевых направлений в современной микроэлектронике является 3D-интеграция различных чипов, изготовленных по кремниевым и АЗВ5-технологиям. Потенциальные преимущества 3D-интеграции включают в себя многофункцио-

нальность, повышение производительности, снижение энергопотребления, миниатюризацию, удешевление и повышение надежности. Однако, несмотря на очевидные преимущества такой конструкции, до сих пор не оценено влияние соседних чипов, а также

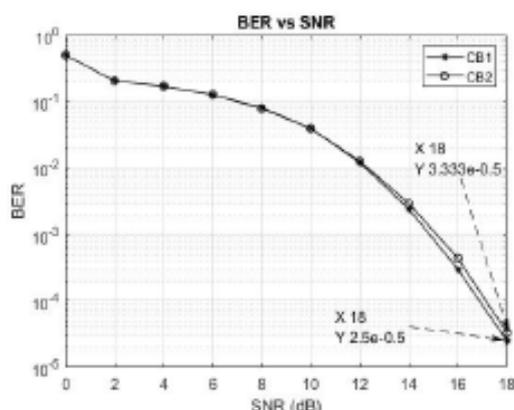


Рис. 4. Графики зависимости BER от SBR первой кодовой книги (CB1) и второй кодовой книги (CB2)

Литература

1. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends / L. Dai, B. Wang, Y. Yuan et al. // *IEEE Communications Magazine*. – 2015. – Vol. 53. – № 9. – P. 74–81.
2. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project / A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun et al. // *IEEE Communications Magazine*. – 2014. – Vol. 52. – № 5. – P. 26–35.
3. Покаместов Д.А. Концепция физического уровня систем связи пятого поколения / Д.А. Покаместов,

Я.В. Крюков, Е.В. Рогожников и др. // *Изв. высш. учеб. завед. Радиоэлектроника*. – 2017. – Т. 60, № 7. – С. 367–382.

4. Altera Innovate Asia. Presentation «1st 5G Algorithm Innovation Competition-ENV1.0-SCMA» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.innovateasia.com/5g/images/pdf/1st%205G%20Algorithm%20Innovation%20Competition-ENV1.0%20-%20SCMA.pdf> (дата обращения: 09.05.2019).

5. Покаместов Д.А. Формирование сигнальных конструкций для систем связи с множественным доступом на основе разреженных кодов: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2017. – 158 с.

6. A Low Complexity Detection Algorithm for Fixed Up-Link SCMA System in Mission Critical Scenario/ Min Lia, Linfang Wang, Qing Guo, Xuemai Gu and Wei Xiang // *IEEE Internet of things Journal* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7752620> (дата обращения: 7.06.2019).

Кондрашов Данила Александрович
Магистрант каф. ТОР РТФ ТУСУРа
Эл. почта: kondrashoffgoto@yandex.ru

Мищенко Евгений Владимирович
Магистрант каф. ТОР РТФ ТУСУРа
Эл. почта: Mishchenko-evgeni@mail.ru

Покаместов Дмитрий Алексеевич
Канд. техн. наук, доцент каф. ТОР РТФ ТУСУРа
Эл. почта: dmaltomsk@mail.ru

Сиренко Павел Станиславович
Институт неразрушающего контроля НИ ТПУ
Эл. почта: paul.sirenko@yandex.ru

УДК 621.396.41

М.Е. Ровкин

Разработка, исследование и испытание бортовой аппаратуры РЛС с синтезированной апертурой для дистанционного зондирования Земли L- и X-диапазонов

Определены требования к аппаратуре двухдиапазонной РСА L- и X-диапазонов, реализующей повышенное пространственное разрешение за счёт расширения спектра зондирующего сигнала. Описаны техническое решение основных составных частей бортовой аппаратуры, результаты стендовых испытаний макета такой малогабаритной РСА для дистанционного зондирования Земли, подготовленного к лётным испытаниям, и предварительные результаты этих испытаний.

Ключевые слова: шаблон, компонент, форматирование, стиль, оформление в определённом стиле.

Расширение участка X-диапазона длин волн (3-см диапазона), разрешенного для использования авиационными системами дистанционного зондирования с синтезированной апертурой с 600 до 1200 МГц, дало мощный импульс для модернизации и разработки новых РЛС с синтезированной апертурой (РСА), традиционно использующих этот частотный

диапазон, поскольку основным трендом в развитии таких систем является повышение их информативности, определяемой, в основном, их пространственным разрешением [1]. Примером движения в указанном направлении является дальнейшая реализация концепции авиационной РСА, развитой в последние годы в НИИ точных приборов (НИИ ТП,

г. Москва), являющиеся в настоящее время одним из основных обладателей компетенций в технологии РСА в России, уже реализованной в экспериментальной многодиапазонной РСА «Компакт» [2]. Первый шаг в разработке новой системы делается в рамках университетского проекта, выполняемого Томским государственным университетом систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР, г. Томск) совместно с НИИ ТП как соисполнителем и АО «Научно-производственная фирма «Микран» как индустриальным партнером.

Главной целью проекта является последовательное создание двух прототипов 2-диапазонной РСА дистанционного зондирования и проведение для каждого из них последующих летных испытаний. Существенное расширение (приблизительно до 1000 МГц в X- и до 400 МГц в L-диапазоне) спектра зондирующего сигнала заставило разработать заново все основные элементы РСА обоих диапазонов: широкополосные антенные системы и СВЧ-тракты приема и передачи, включая выходные усилители мощности передатчиков, многократно более мощные цифровые тракты формирования сигнала излучения и обработки РЛ-отклика. Кроме того, потребуется пропорциональное (двухкратное) увеличение пространственного разрешения в направлении синтезирования, что, в свою очередь, потребует двукратного расширения главного лепестка ДН по азимуту обеих антенн РСА. Для компенсации неизбежного снижения энергетического потенциала РЛС, вызванного снижением чувствительности ее приемного тракта (из-за расширения их полосы пропускания) и снижения коэффициентов усиления антенн излучения-приема (из-за расширения ширины их ДН), необходимо увеличить мощность сигнала излучения.

Наряду с расширением частотного спектра и увеличением мощности сигнала излучения РСА (характеризуемого типовым значением импульсной мощности излучения 250 Вт при скважности и длительности радиоимпульса 60 мкс) решалась противоречивая к вышеупомянутым задача снижения габаритов и массы бортовой аппаратуры. В статье рассмотрены основные технические решения узлов и их характеристики, достигнутые по результатам разработки первого макета РСА.

Антенная система

Антенная система РСА раздельная по диапазонам: для каждого диапазона используются свои антенны. Для первых летных испытаний были разработаны и изготовлены две антенны L-диапазона и одна антенна X-диапазона.

Антенны L-диапазона

Обе антенны этого диапазона имеют одинаковую конструкцию – это прямоугольные шестиэлементные антенные решетки, состоящие из двух рядов по 3 элемента в каждом. Их отличие заключается в поляризации, определяемой ориентацией антенных элементов ФАР. Конструкция антенн показана на рис. 1.

Тип антенного элемента в обеих антеннах – микрополосковая рамка, которая обеспечивает широкую относительную полосу рабочих частот (40% от центральной несущей частоты). Результаты измерений характеристик антенны (включая полученные в безжовой камере) сведены в табл. 1.

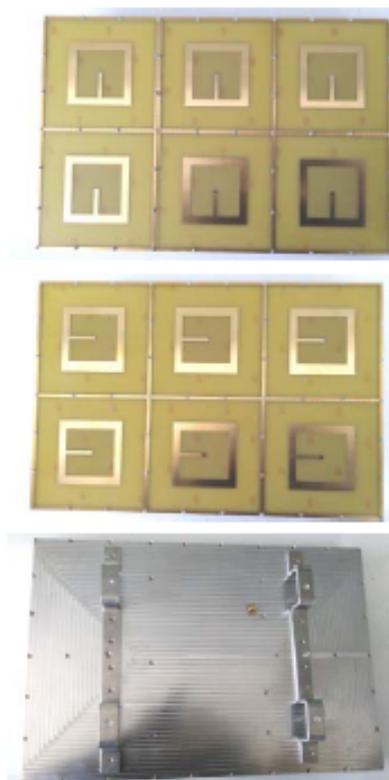


Рис. 1. Конструкция антенны L-диапазона: внешний вид (сверху вниз): апертура антенны вертикальной поляризации, апертура антенны горизонтальной поляризации, обратная сторона обеих антенн с элементами крепления

Таблица 1
Измеренные в безжовой камере технические характеристики антенны L-диапазона

Параметр, единица измерения	Измеренное значение	
	Антенна вертикальной поляризации	Антенна горизонтальной поляризации
Диапазон рабочих частот, МГц	1010–1510	
КСВН	< 1,57	< 1,61
Ширина главного лепестка ДН в E-плоскости (в H-плоскости), °	24 – 32,7 (37,2 – 34,8)	34,9 – 49,6 (25,8 – 33,2)
Уровень боковых лепестков в E-плоскости (H-плоскости), дБ	< -11,7 (< -18)	< -11 (< -11,9)
Cross-polarization level, дБ	< -18,2	< -18,2
Усиление, дБ	> 11,9	> 11,4
Габаритные размеры, мм	400 × 270 × 70	400 × 270 × 70
Масса, кг	3	3

Основным разработчиком этих антенн был дипломированный инженер М.А. Плотников (НИИ систем электрической связи ТУСУРа).

Антенна X-диапазона

Разработанная и изготовленная зеркальная антенна X-диапазона имела горизонтальную поляризацию и массу 650 г (рис. 2). Результаты измерений характеристик антенны сведены в табл. 2. Основным разработчиком антенны X-диапазона также был М.А. Плотников.



Рис. 2. Конструкция антенны X-диапазона: вид со стороны апертуры (вверху), вид с обратной стороны (внизу)

Таблица 2
Измеренные значения достигнутых технических характеристик антенны X-диапазона

Параметр, ед. измерения	Измеренное значение
Диапазон рабочих частот, МГц	9300–10300
КСВН	< 1,35
Ширина главного лепестка ДН в Е-плоскости (в Н-плоскости), °	7,3 – 8 (14,4 – 15,3)
Уровень боковых лепестков в Е-плоскости (Н-плоскости), дБ	< -15,8 (< -13,4)
Уровень кроссполаризации, дБ	< -22,8
Усиление, дБ	> 20
Габаритные размеры, мм	300 × 200 × 150
Масса, г	650

Усилители мощности

Построение мощного выходного усилителя для обоих диапазонов является сложной технической задачей. Эти узлы являются самыми критичными

для характеристик любой РЛС и определяют массогабаритные показатели приемопередатчиков обоих диапазонов РСА. Достижение целевых габаритов и массы при заданных характеристиках линейности стало возможным за счёт использования современных GaN-транзисторов.

Линейный усилитель X-диапазона имеет блочно-модульную конструкцию, подробно описанную в [3] (рис. 3).

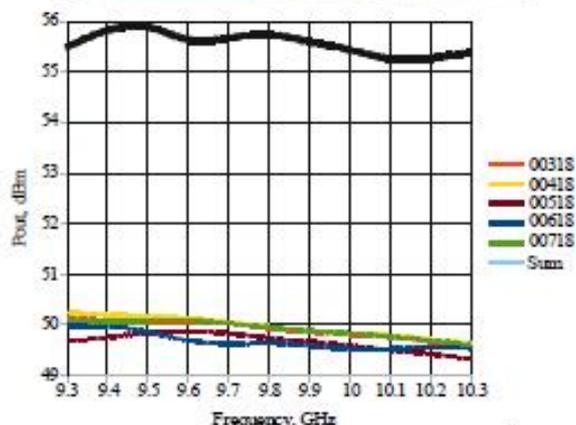


Рис. 3. Усилитель мощности X-диапазона: внешний вид с элементами волноводного фидерного тракта (вверху) и частотная зависимость выходной мощности субмодулей и всего усилителя в диапазоне рабочих частот (внизу)

Усилитель X-диапазона обеспечивает импульсную выходную мощность не менее 300 Вт в частотном диапазоне 1 ГГц при 3дБ-компрессии, что подтверждает частотная зависимость его выходной мощности, показанная на рис. 3 (внизу). На рис. 3 (вверху) показан внешний вид этого усилителя.

Усилитель был выполнен по классической ГИС-технологии с использованием мощных микросборок производства КНР. Основным разработчиком этого усилителя был дипломированный инженер А.В. Шабаш.

Выходной каскад передатчика L-диапазона был выполнен на одном мощном GaN-транзисторе, работающем в классе А и обеспечивал мощность 270 Вт в импульсе в диапазоне частот 400 МГц при общей неравномерности 1,5 дБ. На рис. 4 показаны особенности конструкции этого усилителя и частотная зависимость его выходной мощности в крайних точках термоцикла (при температурах -50 и $+50$ °С).

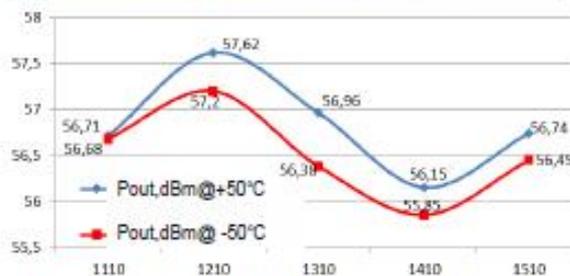


Рис. 4. Усилитель мощности L-диапазона (снизу вверх): внешний вид предварительных каскадов, выходной каскад и частотные характеристики выходной мощности при стандартном термочикле

Усилитель мощности L-диапазона был разработан группой инженеров под руководством ведущего инженера М.В. Дугина (НИИ СЭС ТУСУРа).

Приёмно-передающие конверторы и общая компоновка приёмопередатчиков

В приёмопередатчиках обоих диапазонов была использована одинаковая схема частотообразования с прямыми квадратурными модуляцией при формировании сигнала излучения и демодуляцией при приёме радиолокационного отклика непосредственно на СВЧ-несущей. Особенности конструкции приёмопередатчиков были описаны ранее в [4]. Полученный в обоих диапазонах сравнительно большой коэффициент шума приёмных трактов (5 дБ) был вызван потерями во входных защитных устройствах радиолокационных приёмников, работающих при высоких уровнях мощности сигнала утечки при работе РЛС на излучение, что, в свою очередь обусловлено характеристиками согласования приёмно-передающей антенны в расширенном диапазоне рабочих частот. Важной особенностью приёмных трактов является возможность регулировки коэффициента усиления в сторону увеличения относитель-

но оптимального (минимально возможного при заданном коэффициенте шума тракта) значения на величину до 30 дБ, что важно для дистанционного зондирования в широком диапазоне радиолокационной отражаемости естественных и антропогенных земных покровов.

Приемопередатчики были сконструированы в стандартных 19-дюймовых корпусах высотой 2U (L-диапазон) и 3U (X-диапазон) (рис. 5).



Рис. 5. Внешний вид приёмопередатчика L-диапазона

Финальную (общую) компоновку конверторов обоих диапазонов сделал дипломированный инженер А.Ю. Рыжов (НИИ СЭС ТУСУР) при сопровождении главного специалиста А.Н. Гусева (АО «НПФ «Микран»). Общая компоновка приёмопередатчиков (пример показан на рис. 4) была выполнена ведущим инженером Д.Н. Мысыком (НИИ СЭС ТУСУРа).

Уже на первом макетном образце были достигнуты весовые показатели 10 кг (L-диапазон) и 14 кг (X-диапазон) соответственно, что суммарно соответствует ограничению (по 12 кг для каждого из приёмопередатчиков), заданному в головном ТЗ на проект.

Цифровое формирование и обработка широкополосных сигналов в новой РСА

Как уже упоминалось выше, ВЧ-тракт РСА был выполнен по схеме с прямым преобразованием частоты [4] с квадратурными модулятором в тракте передачи и демодулятором в тракте приема. Такая схема позволяет реализовать наиболее широкую полосу частот цифровой обработки при всегда ограниченной полосе обработки АЦП и ЦАП. При такой схеме построения сложные СВЧ-сигналы излучения и РЛ-отклика полностью характеризуются парами квадратурных компонент, сформированных ЦАП и АЦП соответственно. Цифровой радиотракт новой РСА, концепция которого была разработана специалистами НИИ ТП и описана ранее в [5], структурно и конструктивно объединен с бортовыми управляющими ЭВМ (рис. 6), построенными на базе высокоскоростных узлов цифровой обработки сигналов (ЦОС), разработанными изготовленными и запрограммированными специалистами АО «Инструментальные системы» (г. Москва) специально для нашего проекта (рис. 7). Реализованное техническое ре-

шение позволяет формировать и осуществлять когерентный согласованный прием радиосигналов со спектрами шириной 1 ГГц.



Рис. 6. Внешний вид бортовой ЭВМ с установленными модулями цифровой обработки сигналов

Частота квантования ЦА и АЦ преобразователей составляла 1400 МГц. Предварительная обработка была реализована на паре мощных FPGA Kintex7. Первая FPGA работала на передачу (совместно с ЦАП), вторая FPGA работала на прием (совместно с АЦП). Входной и выходной цифровые потоки, описывающие отсчеты квадратурных компонент комплексных ВЧ РЛ-сигналов линии интерфейса РСIEх через коммутатор РСIEх, поступали в цифровой конвольвер, реализованный на паре БИС восьмидесятипроцессорных ЦОС TMS6768 производства Texas Instruments. Как FPGA, так и процессоры ЦОС были оснащены внешней памятью объемом 256 МБайт на каждый узел.



Рис. 7. Внешний вид модернизированных модулей цифровой обработки радиолокационных сигналов (вверху) и нового тыльного модуля (внизу), разработанных для новой PCA

Такая схема ЦОС позволила снизить объем хранимых данных дистанционного зондирования из-за того, что интервал дальностей радиолокационного отклика, обрабатываемый конвольвером, был заметно меньше максимальной однозначной дальности цикла излучения-приема. Длительность обрабатываемого отклика близка к длительности зондирующего радиопульса, а его скважность всегда не менее 20. Поэтому средняя скорость выходного цифрового потока снижается, что позволяет использовать для сохранения данных типовые твердотельные диски (старшие их модели).



Рис. 8. Приемопередатчики и бортовые управляющие ЭВМ обоих диапазонов (вверху) и антенна X-диапазона (внизу) на борту летающей лаборатории



Рис. 9. Летающая лаборатория Ил-18Д б/н 75713 перед первым пробным вылетом. Утро 28 июня 2019. Аэродром г. Ухта

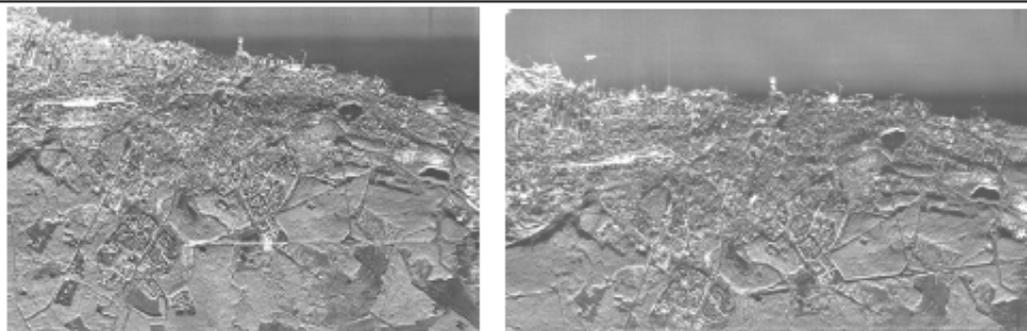


Рис. 10. Примеры радиолокационных изображений, построенных по сфокусированным радиолограммам, построенным по результатам авиационного дистанционного зондирования в L- (верхнее фото) и X-диапазоне (нижнее фото) 01.07.2019 г. в окрестностях Петрозаводска с борта летающей лаборатории ИЛ-18Д б/н 75713 аппаратурой макета №1 РСА ДЗЗ

Бортовая аппаратура в ходе первых летных испытаний

Предварительно многократно проверенная на наземных испытательных стендах бортовая аппаратура в конце июня 2019 г. была установлена (рис. 8) на борт летающей лаборатории Ил-18Д б/н 75713 (рис. 9).

В ходе первых летных испытаний было выполнено 3 полета общей продолжительностью около 9 летных часов. Полеты выполнялись в окрестностях г. Ухта, на трассе перелета Ухта – Петрозаводск и в окрестностях г. Петрозаводска.

С помощью макета РСА был получен обширный по объему, режимам полета и характеристикам зондируемых объектов экспериментальный материал.

На рис. 10 приведены примеры РЛ изображений г. Петрозаводска, построенные по сфокусированным радиолограммам, сжатым из зарегистрированных в ходе третьего испытательного полета (1.07.2019 г.) данным дистанционного зондирования.

Испытания проводили специалисты НИИ ТП РВ. Ермаков и М.Ю. Достовалов, из ТУСУРа – М.С. Самулев и М.Е. Ровкин.

Выводы

Первая половина пути, направленная на создание прототипа РСА высокого разрешения, выполнена. Получены первые результаты и можно сделать выводы:

1. Разработанная аппаратура была испытана в реальных условиях и реальном применении. Основные устройства подтвердили свою работоспособность.

2. Большинство ранее измеренных технических характеристик было подтверждено экспериментально в широком (но не полном) наборе режимов полета (высота полета и зондирования не превышала 3600 м). Основным результатом в том, что полученное пространственное разрешение в испытанных режимах близко к расчетным значениям.

3. Выявлены особенности работы аппаратуры, которые следует учесть при разработке макета №2 двухдиапазонной РСА ДЗЗ.

4. Концепция разработанной РСА работоспособна и потенциально масштабируема в фокусе видимых трендов современных цифровых и СВЧ-технологий.

Автор благодарит специалистов НИИ ТП Т.Г. Мушинца и Р.В. Ермакова за полезные обсуждения.

Исследования и публикации были поддержаны Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения 14.577.21.0279 от 26.09.2017, идентификатор RFMEFI57717X0279.

Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Импульс» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по соглашению 075-15-2019-1644, идентификатор проекта RFMEFI62119X0029.

Литература

1. Vnotchenko S.L., Moussiniant T.G., Ermakov R.V., Rovkin M.E. Modern Tendencies in the Development of Airborne Synthesized Aperture Radars for Remote Sensing of the Earth: XIV Int. Sci.-Tech. Conf. on Act. Prob. of Electr. Instr. Eng. (APEIE). – 2018. – 1 pt. – 439 p. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545651
2. Vnotchenko S.L., Dostovalov M.Yu., Dyakov A.V. et al. Aviation four-band radar complex «COMPACT» – features, results and development prospects / Rad. Inv. of Nat. Env. St. P., 2013. Proc. of XXVIII Rus. Symp. – 2013. – 1 pt. – Vol. 34 (in Rus.).
3. Shabash A.V., Komendantenko A.V., Rovkin M.E. Modular Power Amplifier for Transmitter of X-band Aircraft High Resolution SAR for Earth Remote Sensing: 2019 U. Symp. on B. Eng., Re. and Inf. Tech. (USBEREIT), Yekaterinburg, Russia 25–26 Apr. 2019. DOI: 10.1109/USBEREIT.2019.8736590
4. Gusev A.N., Ryzhov A.V., Samulev M.S., Rovkin M.E. Transmit-receive path with extended frequency bandwidth for high-resolution aviation SAR: Proc. of 28-th Int. Conf. MW and Telecom. Tech. (CriMiCo'2018). Sevastopol, 9–15 Sep. 2018. – Moscow, Minsk, Sevastopol. – C. 1749 (in Rus.).
5. Dyakov I.V., Ermakov R.V. Digital path of formation and processing of the signal for new generation SAR: Proc. of 28th Int. Conf. MW and Telecom. Tech. (CriMiCo'2018) Sevastopol, 9–15 Sep. 2018. – Moscow, Minsk, Sevastopol. – C. 1755 (in Rus.).

Ровкин Михаил Евгеньевич
Канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
НИИ систем электросвязи (НИИ СЭС) ТУСУРа
Эл. почта: mikhail.rovkin@tusur.ru

го спектра применения система может стать связывающим элементом нынешнего состояния и новой цифровой экономики, поскольку будучи частью рынка Сэйфнет комплекс может быть использован в развитии других рынков НТИ: Технет, Хелснет, Эду-нет и напрямую влияет на сквозные технологии НТИ.

Литература

1. Сэйфнет – национальная технологическая инициатива [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nti2035.ru/markets/safenet>, свободный (дата обращения: 10.09.2019).
2. Российский рынок систем безопасности 2017–2022. Оценка и прогнозы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://lib.secuteck.ru/articles2/ohr_sys/rossiyskiy-rynok-sistem-bezopasnosti-otsenka-i-prognozy, свободный (дата обращения: 10.09.2019).
3. В России в 2018 году при пожарах погибло более 300 детей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/obschestvo/5807450>, свободный (дата обращения: 10.09.2019).

4. Статистика и аналитика. ГУ МВД по Красноярскому краю [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://24.kp-blaew.kp-plai/slujba/Statistika_i_analitika, свободный (дата обращения: 10.09.2019).

5. LattePanda 2Gb/32Gb [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.latterpanda.com/products/1.html>, свободный (дата обращения: 10.09.2019).

6. Интернет вещей, IoT, M2M [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.tadviser.ru/index.php/ Статья: Интернет_вещей_IoT_M2M_(мировой_рынок), свободный (дата обращения: 10.09.2019).

Калашникова Ольга Викторовна
Магистрант Сибирского федерального университета (СФУ)
Эл. почта: kalashqk@gmail.com

УДК 621.372

Г.А. Малютин

Экспериментальные характеристики расщепленных полосковых линий

Рассмотрены расщепленные полосковые линии (РСПЛ), образованные разделением полоскового проводника на две части продольной прорезью. Экспериментально исследованы частотные характеристики различных схем включения частей РСПЛ и введенной дополнительной управляющей полоски, имеющей сильную электромагнитную связь с частями РСПЛ.

Ключевые слова: РСПЛ, электромагнитная связь.

Проектирование СВЧ-устройств различного функционального назначения существенно упрощается, если есть возможность применить эквивалент полосковых линий с изменяемыми параметрами. Можно выделить два основных приема изменения параметров полосковых линий передачи. Первый прием состоит в управлении параметрами диэлектрической [1–5], магнитной или магнито-диэлектрической среды. Вторым вариантом управления реализуется внесением сосредоточенных неоднородностей, приводящих к изменению параметров в определенной полосе частот, поскольку при этом неизбежно образуются резонансные колебания и получается селективная цепь [3]. В качестве сосредоточенных управляемых неоднородностей используются емкости сегнетоэлектрических конденсаторов, варикапов. Сами передающие линии при включении в них сосредоточенных элементов не изменяют свои параметры, а эффект регулирования параметров схемы образуется вследствие наложения падающих и отраженных от неоднородностей волн.

В работе [6] было показано изменение параметров в управляемых секциях связанных полосковых линий, получены выражения для расчета частотных

характеристик управляемых секций при вариации сопротивления регулирующего элемента. При этом секция рассматривается как полосковая линия с изменяемым характеристическим сопротивлением и изменяемым коэффициентом распространения, если диэлектрическое заполнение структуры неоднородно в поперечном сечении.

В настоящей работе рассматриваются расщепленные полосковые линии (РСПЛ), которые образуются разделением токонесущего проводника продольной прорезью на две равные части. Была поставлена задача исследования частотных свойств РСПЛ при введении дополнительной полосковой проводника.

Частотные характеристики звеньев РСПЛ

Проведены экспериментальные исследования нескольких схем включения проводников РСПЛ, показанных на рис. 1–5. Эквивалентные схемы показанных звеньев включают полоски 1 и 2, нагрузки на входе и выходе Z_{H1} , Z_{H2} и источник ЭДС E . В схемы рис. 2, 3, 5 и 6 введены дополнительные полоски 3, имеющие сильную электромагнитную связь с полосками 1 и 2.

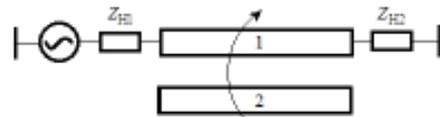


Рис. 1. Отрезок расщепленной полосковой линии, в которой вторая полоска находится в режиме холостого хода

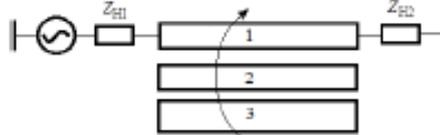


Рис. 2. Отрезок расщепленной полосковой линии с введенной полоской 3, имеющей сильную электромагнитную связь с полосками 1 и 2

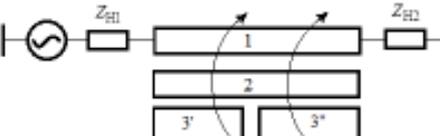


Рис. 3. Отрезок расщепленной полосковой линии, введена полоска 3, имеющая сильную электромагнитную связь с полосками 1 и 2 и разделенная поперечной прорезью на 2 части – 3' и 3''

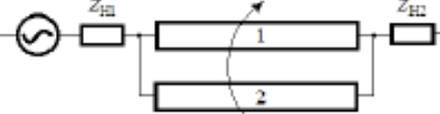


Рис. 4. Отрезок расщепленной полосковой линии, полоски 1 и 2 соединены параллельно

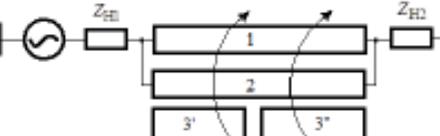


Рис. 5. Отрезок расщепленной полосковой линии, полоски соединены параллельно и введена третья полоска, связанная с первой и второй полосками

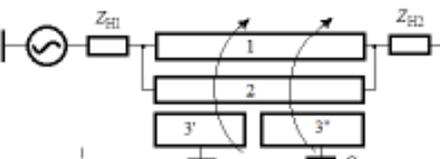


Рис. 6. Отрезок расщепленной полосковой линии с подстройкой параметров сосредоточенными элементами с емкостью C_p

Полоски 1 и 2 на схемах представляют собой две связанные линии, в которых распространяются квази-Т-волны синфазного и противофазного типа [7], несмотря на то, что их возбуждение в точке включения ЭДС близко к синфазному (четному). В общем случае эти волны имеют разные фазовые скорости, поэтому в отрезке РСПЛ наблюдается интерференция падающих и отраженных волн.

Был изготовлен макет РСПЛ с размерами поперечного сечения РСПЛ, показанными на рис. 7. Взяты следующие размеры: $W = 1,1$ мм, $D = 1$ мм, $h = 1,5$ мм, $A = 10$ мм, $B = 4$ мм, $\epsilon_1 = 4,5$, $\epsilon_2 = 1,0$. Расчет матриц погонных емкостей C и индуктивно-

стей L методом сеток [8] дал такие значения элементов C и L : $C_{11} = C_{22} = 90,497$ пФ/м, $C_{12} = C_{21} = -4,545$ пФ/м, $L_{11} = L_{22} = 0,375$ мкГн/м, $L_{12} = L_{21} = 0,107$ мкГн/м.

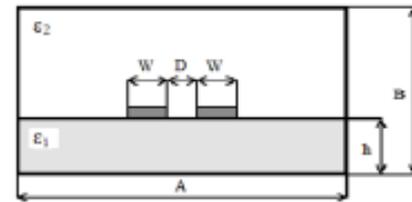


Рис. 7. Конструкция поперечного сечения РСПЛ (полоски 1 и 2)

На рис. 8 показаны теоретически [9] и экспериментально полученные в данной работе зависимости вносимых и возвратных потерь схемы рис. 1 от отношения длины отрезка к длине волны воздействующего сигнала в свободном пространстве. Зависимости S_{11} и S_{21} от l/λ показывают, что в ограниченном частотном диапазоне отрезок РСПЛ по схеме рис. 1 согласуется по уровню возвратных потерь -10 дБ и вносит потери меньше 1 дБ.

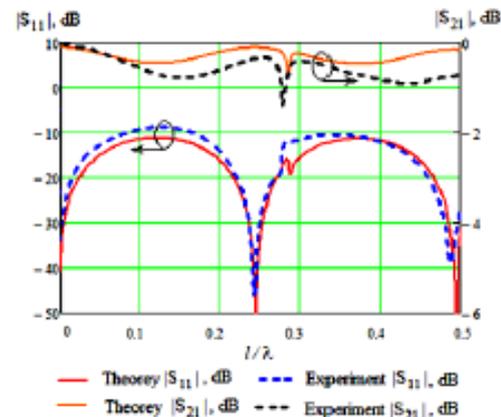


Рис. 8. Теоретические и экспериментальные зависимости вносимых и возвратных потерь отрезка РСПЛ (см. схему на рис. 1) от отношения длины отрезка к длине волны воздействующего сигнала в свободном пространстве

Был проведен эксперимент по улучшению характеристик звена по рис. 1 путем введения дополнительной полоски 3 (см. рис. 2), имеющей лицевую связь с полосками 1 и 2. Конструкция поперечного сечения полосковой структуры показана на рис. 9. Измерено влияние на вносимые потери введенной полоски 3 (см. схему на рис. 2) и ее разделение на две части поперечной прорезью (см. схему на рис. 3). Результаты измерений показаны на рис. 10. Сравнение зависимостей $S_{21}(l/\lambda)$ показывает уменьшение вносимых потерь вследствие введения полоски 3 и ее сегментации.

Расчет и экспериментальные измерения схемы (см. рис. 4) показали, что частотная характеристика отрезка РСПЛ при параллельном включении полосок 1 и 2 имеет ярко выраженные резонансы при отношении длины отрезка l к длине волны λ воздействующего сигнала в свободном пространстве при $l/\lambda = 0,13$ и $l/\lambda = 0,40$ в диапазоне изменения

$l/\lambda = 0...0,5$ (рис. 11). Данный результат оказался неожиданным, так как полоски 1 и 2 на схеме возбуждаются синфазно в точке включения источника сигнала, а связь между ними достаточно мала. Рисунок 11 иллюстрирует изменение частотной зависимости вносимых и возвратных потерь при переходе от полосковой структуры рис. 1 (эксперимент 1) к структуре рис. 9 и схеме включения проводников (см. рис. 5, эксперимент 2). Мы наблюдаем исчезновение резонансов и значительное уменьшение возвратных потерь.

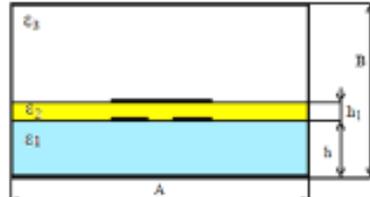


Рис. 9. Поперечное сечение РСПЛ с дополнительной полоской

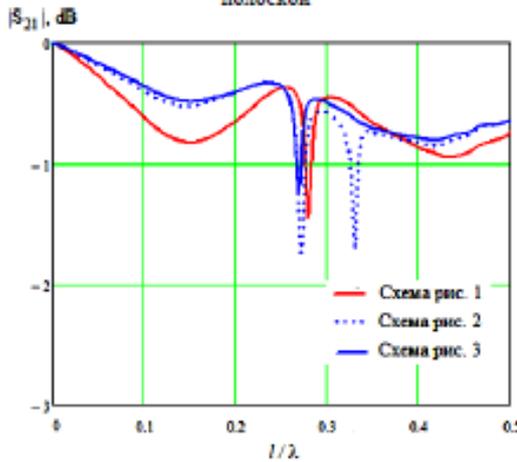


Рис. 10. Экспериментальные зависимости вносимых потерь отрезка расщепленной полосковой линии (см. схемы включения на рис. 1–3) от отношения длины отрезка к длине волны воздействующего сигнала в свободном пространстве

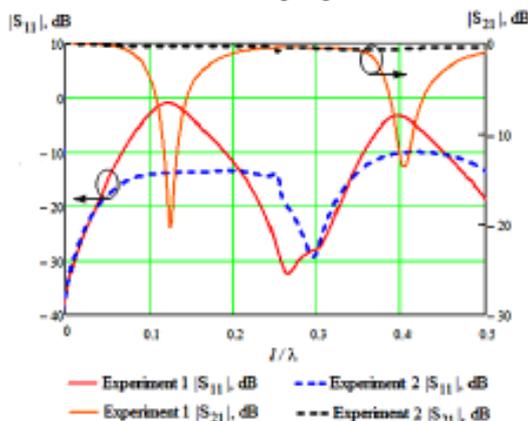


Рис. 11. Экспериментальные зависимости вносимых и возвратных потерь отрезка РСПЛ (см. схему включения рис. 4 – эксперимент 1, рис. 5 – эксперимент 2) от отношения длины отрезка к длине волны воздействующего сигнала в свободном пространстве

Рисунок 12 отражает зависимость вносимого фазового сдвига для схем рис. 4 и 5. Следует отметить, что фазовый сдвиг $\arg(S_{21}) \rightarrow 90^\circ$ при $l/\lambda \rightarrow 0$ в отличие от равенства фазового сдвига нулю при $l/\lambda \rightarrow 0$ в одиночной полосковой линии с Т-волной.

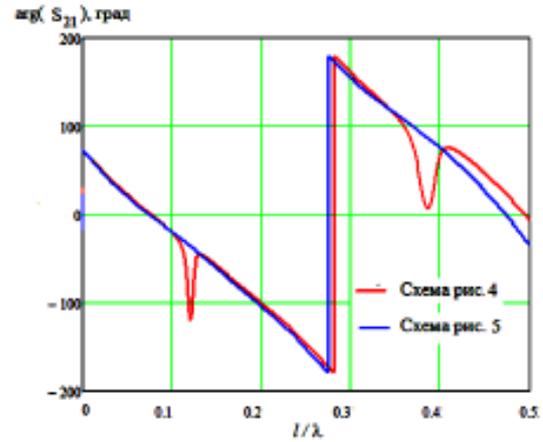


Рис. 12. Зависимость вносимого фазового сдвига отрезка РСПЛ

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что в установленном ограниченном диапазоне отношения длины к длине волны воздействующего сигнала в свободном пространстве l/λ имеют достаточно низкие вносимые потери (примерно 0,5 дБ). При этом в звеньях со схемой включения полосок по рис. 1–3 присутствует полоска 2, полностью развязанная по постоянному току с полоской 1, но участвует в передаче мощности СВЧ-колебаний.

Целесообразно применение отрезков РСПЛ в устройствах, в которых необходим эквивалент линии передачи с изменяемым характеристическим сопротивлением, например в трансформаторах импеданса. Рассмотренные варианты звеньев на основе полосковой структуры с дополнительной полоской (см. рис. 9), как это видно из сопоставления частотных характеристик (см. рис. 11), представляют эквивалент связанных линий с изменяемым коэффициентом связи по электрическому полю (по емкости), что может быть полезным свойством при проектировании направленных ответвителей и фильтров различных типов.

Заключение

Экспериментально исследованы конструкции расщепленных полосковых линий, позволяющие проектировать различные устройства на основе эквивалента линий передачи с изменяемыми характеристическим сопротивлением и коэффициентом связи между линиями.

Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Импульс» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по соглашению 075-15-2019-1644, идентификатор проекта RFMEFI62119X0029.

Литература

1. Belyaev B.A. Physical principles of the design of electrically controllable microstrip devices / B.A. Belyaev, A.A. Leksikov, V.F. Shabanov, A.M. Serzhantov // Russian Physics Journal. – 2008. – Vol. 51, № 9. – P. 919–929.
2. Serzhantov A.M., Lemberg K.V. Investigation of a liquid crystal tunable phase shifter / 20th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology. – Sevastopol, Crimea, 2010. – P. 702–703.
3. Pleskachev V.V., Vendik I.B. Tunable microwave filters based on ferroelectric capacitors // 13th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, 2003. CriMiCo-2003. – 2003. – P. 468–470.
4. Makoto Tsutsumi, Kensuke Okubo. Effect of stubs on ferrite microstrip line magnetized to wave propagation // Asia Pacific Microwave Conference. – 2009. – P. 1234–1237.
5. Moussavou A.-G., Sauleau, R., Mahdjoubi, K. et al. Study of planar transmission lines printed on a ferroelectric thin film: Optimum tunability and figure of merit // 2006 First European Conference on Antennas and Propagation. DOI:10.1109/eucap.2006.4585018

6. Vorob'ev P.A., Malyutin N.D., Federov V.N. Quasi-T-waves in devices using coupled strip lines with unbalanced electromagnetic coupling // Radio Engineering and Electronic Physics. – 1982. – Vol. 27, № 9. – P. 38–44.

7. Zysman G.I., Jonson A.K. Coupled transmission line networks in an inhomogeneous dielectric medium // IEEE Trans. on MTT. – 1969. – Vol. MTT-17, № 10. – P. 753–759.

8. Vincent F. Fusco. Microwave circuits. Analysis and Computer Design. – Prentice-Hall International (UK) Ltd, 1987.

9. Малютин Н.Д., Малютин А.Н., Федоров В.Н. Расщепленные полосковые линии с подстраиваемыми параметрами и устройства на их основе: матер. 29-й Международн. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 8–12 сентября 2019 г. – Севастополь. В печати.

Малютин Георгий Александрович
Студент каф. КУДР ТУСУРа
Эл. почта: m.mageorge@yandex.ru

УДК 53.043

С.Г. Еханин, Ю.Э. Орлова, Д.Ю. Попов

Исследование взаимного влияния запутанных электронных состояний в ионных ловушках кристаллов NaCl

Эксперименты были выполнены с несколькими пространственно разделенными частями (чипами) кристалла NaCl. Чипы из искусственно выращенного нелегированного кристалла хлорида натрия были облучены гамма-излучением на медицинской кобальтовой пушке одновременно и совместно с целью создания запутанных электронных состояний в ионных ловушках (центрах окрашивания). Производилось фотостимулированное обесцвечивание master-образца, удаленного на 5 м от двух slave-образцов (запутанных с первым), у которых измерялись электропроводность и спектр поглощения. Показано, что воздействие света и электрического поля совместно на два дистанционно разнесенных образца кристалла NaCl, содержащего запутанные электронные состояния, вследствие взаимного их влияния, вызывает суммарный отклик в третьем образце.

Ключевые слова: квантовое запутывание, переключение запутанного состояния, центры окраски, наведенная электропроводность, фотостимулированное обесцвечивание, квантовые телекоммуникации.

Эксперименты по квантовой запутанности в твердых телах, описываемые в статье [1], были выполнены с пространственно разделенными запутанными PLD-кристаллами (кристаллами для термолюминесцентной дозиметрии), находящимися в Батон-Руж, Луизиана (США), и Живарлэ (Франция) на расстоянии 8182 км.

В работах [2, 3] была использована идея квантовой запутанности электронных состояний в ионных ловушках щелочно-галогидных кристаллов, как и в статье [1], но вместо метода термообесцвечивания использовались методы термообесцвечивания и термостимулированных токов.

Данная работа является продолжением исследований [2, 3] с использованием электронных ловушек в кристалле NaCl (одном из представителей щелочно-галогидных кристаллов) при реализации переключения запутывания частиц в гамма-лучах так же, как и в [1]. В статьях [2, 3] каждый метод

реализовывался отдельно, так как вызывало опасение наличие факта взаимного влияния master- и slave-образцов друг на друга. Представляет значительный научный интерес одновременная реализация этих двух методов.

Методика исследования

Три образца размерами 30×20×5 мм выкальзывались из одного монокристаллического слитка кристалла NaCl.

Перед экспериментами образцы подвергались экспонированию под гамма-излучением кобальтовой пушки в лаборатории НИИПП г. Томска. Суммарная доза, полученная каждым образцом, равна 10^5 рад.

Известно, что под воздействием гамма-излучения в кристалле NaCl возникают радиационные дефекты, представляющие собой нарушения в ионной и электронной подсистемах кристаллической решетки [2, 3], в результате чего в кристалле возникают электронные центры окраски. Эти центры придают

10 Значения показателей результатов использования гранта

10.1 Удельный вес лабораторного и аналитического оборудования в возрасте до 5 лет в общей стоимости лабораторного и аналитического оборудования центра коллективного пользования научным оборудованием

Плановый показатель 66%, достигнутое значение показателя по состоянию на отчетную дату 68,2%. Показатель обеспечивается приобретением оборудования на сумму 89367,541 тыс. руб. Согласно приказу ректора и исходя из целевых функций ЦКП в 2020 году предстоит выполнить обновление оборудования не только за счет средств гранта, но и за счет введения в состав приборов, приобретаемых из внебюджетных источников. Это объясняется старением оборудования, закупленного ранее 2014 г. Разумеется, что руководство ЦКП исходит не только из соответствия формального признака возраста, а в том числе из потребностей освоения новых видов измерений и развития технологического сектора.

10.2 Число организаций-пользователей научным оборудованием центра коллективного пользования научным оборудованием

Плановый показатель 17, число организаций-пользователей составило 19 по заключенным договорам. Оказанные услуги в 2019 г. подтверждены 17 двухсторонними актами сдачи-приемки. Два договора активированы 2020 г. по причине невозможности провести закупку материалов для выполнения договоров № 41/19 с НИ ТГУ и № 28/19 с ООО «Лаборатория 23» в самом конце года. Показатель выполнен в результате взаимодействия с внешними заказчиками услуг, которые в большинстве представляют малый инновационный бизнес. При этом следует отметить и нагрузку на обеспечение внутренних работ по ФЦП, хозяйственным договорам и госзаданиям (проектная часть). В конце 2019 года стал известен состав лабораторий, возглавляемых молодыми учеными (таблица 10.1).

Таблица 10.1 – Лаборатории ТУСУРа, возглавляемые молодыми учеными

Название заявки	Название лаборатории	Руководитель	Объем финансирования, тыс. руб.
Персонализированные методы съема, обработки медицинских сигналов и управления ими, в частности, при лечении и реабилитации после лечения онкологических заболеваний	Лаборатория съема, анализа и управления биологическими сигналами	Костюченко Евгений Юрьевич	16 801
Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости	Научно-исследовательская лаборатория фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости (НИЛ ФИЭМС)	Заболоцкий Александр Михайлович	23 3367

Продолжение таблицы 10.1

Теоретические и экспериментальные исследования сверхширокополосных опто-электронных устройств волоконно-оптических систем передачи информации и радиофотоники на основе фотонных интегральных схем собственной разработки	Лаборатория интегральной оптики и радиофотоники	Ерофеев Е.В. Жидик Юрий Сергеевич	23 324
---	---	--------------------------------------	--------

В настоящее время плодотворное сотрудничество налажено с лабораториями «Фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости (НИЛ ФИЭМС)» и «Интегральной оптики и радиофотоники», т.к. исследования их руководителей и членов коллектива совпадают с направлениями НОЦ (СВЧ измерения, радиофотоника, импульсные измерения). Перспективно технологическое направление ЦКП для лаборатории интегральной оптики и радиофотоники. С лабораторией съёма, анализа и управления биологическими сигналами предстоит изучение общих потребностей и возможностей. Представляется, что направление ЦКП по аддитивным технологиям и разработке изделий медицинского применения будут полезны для лаборатории Костюченко Е.Ю.

10.3 Доля исследователей в возрасте до 39 лет в общей численности исследователей, выполняющих работы с использованием оборудования ЦКП

Плановый показатель 40% превышен, составляет 65%, что стало возможным в результате привлечения к работам молодых сотрудников, аспирантов и студентов, совмещающих учебу и работу в лабораториях. Этому способствует поддержка руководства ТУ-СУРа технологии группового проектного обучения, возведенной в ранг учебной дисциплины.

10.4 Объем привлеченных внебюджетных средств

Плановый показатель 45 млн. руб. обеспечен в полном объеме и это позволило выполнить работы по Плану-графику:

1.6. Составление перечня вспомогательного оборудования и аксессуаров для формирования рабочих мест на базе закупаемого научного оборудования.

1.7 Закупка вспомогательного оборудования и аксессуаров.

1.8. Разработка технической документации на стенды.

1.9. Проведение экспериментальных работ по измерению параметров СВЧ устройств.

10.5 Выполнение п.2.11 Технического задания «Увеличение доли внешних заказов услуг и работ ЦКП»

В 2018 г. согласно отчету о работе ЦКП «Импульс» (Приложение 1) были достигнуты следующие показатели: количество организаций-пользователей – 9.

В 2019 г. количество организаций-пользователей составило 17.

Таким образом, по данному показателю рост составил 88%, что объясняется повышением интереса внешних пользователей, в основном малых инновационных предприятий, к предложениям на выполнение услуг и работ с использованием оборудования ЦКП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительная подготовка и проводимая работа в ЦКП «Импульс» в течение ноября-декабря 2019 г. позволили выполнить все мероприятия по плану-графику и решить задачи, предусмотренные Техническим заданием по проекту. Основные результаты развития ЦКП «Импульс»:

1) Проведен анализ актуальных направлений исследований, в результате чего выделены и поддержаны организационно и финансово следующие из них:

а) четырехпортовые измерения в СВЧ диапазоне до 67 ГГц с возможностью осциллографирования и обработки сигналов в реальном времени;

б) развитие плазмохимических методов в интегральной технологии для электроники и медицины применительно к ЦКП;

в) освоение аддитивных технологий;

г) создание новых материалов для печатной электроники и других целей;

д) проведена учеба по методам измерений на оборудовании мирового уровня.

2) Решена основная задача первого этапа – закуплено новое оборудование и начато его освоение и подготовка к запуску в постоянную эксплуатацию.

3) Пополнена библиотека методик измерений, необходимая для работы на сложном оборудовании, а также для обучения персонала.

Выполнение этапа 1 обеспечивает надежную основу для продолжения работ на втором этапе 2020 года.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Верба В.С. Разработка перспективных бортовых рлс: возможности и ограничения // Радиотехника, 2019. Т. 83. № 5-1. – С. 11-24. DOI: 10.18127/j00338486-201905(I)-03.
2. Тихвинский В.О. 5G World Summit - 2014: Курс прежний - ОТ 4G К 5G // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 7. С. 95-96.
3. Андронов, Е.В. Теоретический аппарат измерений на СВЧ / Е.В. Андронов, Г.Н. Глазов. Методы измерений на СВЧ. Т.1. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. – 804 с.
4. A Universal Microwave Photonic Receiving Channel. V. V. Valueva, Yu. V. Gulyaevb, S. M. Kontorova, V. V. Kulagina, D. A. Prokhorova, and V. A. Cherepeninb. Journal of Communications Technology and Electronics, 2018, Vol. 63, No. 9, pp. 1080–1088. DOI: 10.1134/S1064226918090218.
Универсальный радиофотонный приемный канал микроволнового диапазона / Валуев В.В., Гуляев Ю.В., Конторов С.М., Кулагин В.В., Прохоров Д.А., Черепенин В.А. // Радиотехника и электроника, 2018, Т. 63, № 9. – С. 1020-1028. DOI: 10.1134/S0033849418090218.
5. Лучинин В. Национальные технологические приоритеты. Алмазная экстремальная электроника // Наноиндустрия, 2018. Т. 11. № 2 (81). – С. 156-169. DOI: 10.22184/1993-8578.2018.81.2.156.169.
6. Общая дискуссия по приоритету: выступления академиков РАН И.И. Дедова, Г.Т. Сухих, Е.Л. Чойнзонова, Ю.В. Гуляева. / Дедов И.И., Сухих Г.Т., Чойнзонов Е.Л., Гуляев Ю.В. Вестник Российской академии наук, 2019. – Т. 89. № 5. – С. 485-486. DOI: 10.31857/S0869-5873895485-486.
7. Красников Г.Я., Тельминов О.А. Семинар "Исследования в области спинтроники и перспективы создания элементной базы на ее основе" // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2018. Т. 10. № 3. – С. 425-426. DOI: 10.17725/rensit.2018.10.425.
8. Лоцилов А.Г., Семенов Э.В., Малютин Н.Д.. Цифровой измерительный комплекс для измерения частотных и импульсных характеристик четырехполюсников // Известия Томского политехнического университета, 2006 – Том 309. – № 8. – Томск: Издательство ТПУ. – С. 37 – 42.

9. Векторный импульсный измеритель характеристик цепей и проводных систем / А.А. Бомбизов, А.А. Ладур, А.Г. Лоцилов и др. // Приборы. – 2007. – № 9. – С. 28–31.
10. Semyonov, E.V., Loschilov, A.G., Malyutin, N.D., Fedorov, V.N., Artishchev, S.A. Reflectometers and vector network analyzers for measuring nonlinear distortions of ultra-wideband and baseband pulse signals. 2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering, ISFEE 2016; University Politehnica of Bucharest; Romania; 30 June 2016 through 2 July 2016. **DOI:** 10.1109/ISFEE.2016.7803221.
11. Semyonov E. V. Baseband pulse nonlinear measurements and modeling: possibility and applications. Proceedings of the 29th International Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2019), Sevastopol, Russian Federation, September 8-14, 2019.
12. Пат. 2227921 РФ, МПК7 G01R23/16, G01S13/00. Способ исследования нелинейных свойств объекта / Э.В. Семёнов (РФ). - № 2002123629; заявл. 04.09.2002; опубл. 27.04.2004; Бюл. – № 12 (III ч.) – 1 с.
13. Семенов Э.В. Нелинейная рефлектометрия с применением видеоимпульсных тестовых сигналов // Известия Том. политех. ун-та. – 2006. – Т. 309, № 3. – С. 153–155.
14. Семенов Э.В. Использование разности сверток тестовых сигналов и откликов объекта для исследования нелинейности преобразования сверхширокополосных сигналов / Э.В. Семенов, А.В. Семенов // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52, № 4. – С. 480–485.
15. Средства измерений характеристик нелинейности преобразования сверхширокополосных импульсных сигналов в СВЧ диапазоне / А.Г. Лоцилов, Э.В. Семёнов, А.П. Павлов, Н.Д. Малютин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (Крымико'2010): матер. 20-й Междунар. конф., Севастополь, Украина, 13–17 сентября 2010 г. – Севастополь: Вебер, 2010. – Т. 2. – С. 977–978.
16. Лоцилов А.Г. Экспериментальная установка для исследования характеристик нелинейности СВЧ-цепей в режиме сверхширокополосного импульсного воздействия / А.Г. Лоцилов, Э.В. Семёнов, Н.Д. Малютин // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2(22), ч. 1. – С. 161–165.
17. Разработка устройств обработки сверхширокополосных импульсных сигналов для исследования нелинейных свойств объектов методом нелинейной рефлектометрии / А.Г. Лоцилов, Э.В. Семёнов, Н.Д. Малютин, А.О. Мисюнас, А.А. Ильин // Доклады ТУ-СУРА, 2010, № 2 (22), часть 1. – С. 166-170.

18. Приоритеты научно-технологического развития [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fcpir.ru/business/priority-nauchno-tehnologicheskogo-razvitiya/>, свободный (дата обращения: 05.01.2020).
19. Келдыш Л. В. О влиянии сильного электрического поля на оптические характеристики непроводящих кристаллов // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 1957. Т. 33. С. 994–1003.
20. Miller D. Electric field dependence of optical absorption near the band gap of quantum-well structures / D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen et al. // Phys. Rev. B. – 1985. – Vol. 32. – P. 1043–1060.
21. Shen H. Franz–Keldysh oscillations in modulation spectroscopy // Journal of Applied Physics. – 1995. – Vol. 78. – P. 2151–2176
22. Воронов, С.А. Свойства материалов для оптических элементов приемников инфракрасного излучения. // Радиоэлектроника. – 1997. – Т.40. – № 5. – с.19-30.
23. Пожела Ю. Подвижность и рассеяние электронов на полярных оптических фонах в гетероструктурных квантовых ямах / Пожела Ю., Пожела К., В. Юцене // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34. –С. 1053–1057
24. Murtagh M. E., Kelly P. V., Chouaib H. et al. Optical Inspection Apparatus and Method. 2008. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.faqs.org/patents/app/20080218741>, свободный (дата обращения: 10.12.2019)
25. Арыков В.С. Основы элементной базы ВОЛС в СВЧ-электронике / В.С. Арыков, П.Е. Троян, И.В. Кулинич // Электронные средства и системы управления-2017. – г.Томск – 2017.
26. Zhang P. Highly Linear, Broadband Optical Modulator Based on Electro-optic Polymer /Xingyu Zhang, Beomsuk Lee, Che-yun Lin, Alan X. Wang, Amir Hosseini // IEEE Photonics Journal. – Vol. 4, Issue 6. – Dec. 2012. – pp.2214-2228.
27. Baier M. Fully Integrated Serial Dual-Polarization Electro-absorption Modulator PIC in InP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ecio-conference.org/wp252content/uploads/2017/03/ECIO_2017_T6.3.pdf, свободный (дата обращения 19.11.19).
28. Klamkin J. Photonic Integrated Circuit Tutorial [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://7pennies.com/downloads/PIC_Training_NYC_Klamkin_FINAL.pdf, свободный (дата обращения 01.12.19)
29. Nicholes See S. Novel application of quantum-well intermixing implant buffer layer to enable high-density photonic integrated circuits in InP// IPRM-2009. – WB1.2. – May, 2009.

30. Lawniczuk K. Value chain for photonic ASICs prototyping // Photonic Conference. – Oct. 2015
31. Пат. 2248022 Российская Федерация, МПК7 G02B6/34, G02F1/03. Оптический элемент, способ управления его спектральной характеристикой, система оптических элементов и способ управления этой системой / Петров М.П., Шамрай А.В., Ильичев И.В., Козлов А.С.; заявитель и патентообладатель Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. – № 2003108113/28; заявл. 24.03.2003; опубл. 10.03.05, Бюл. № 7.
32. Khan A. Design and simulation of optical waveguide for electro-optic modulator / Khan A., Mehra R. //Advances in Engineering and Technology Research (ICAETR), 2014 International Conference on. – 2014. –pp.1-5.
33. Wei W. A modularization design of microwave electrode in electro-optic modulators //Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 2005. MAPE 2005. IEEE International Symposium on. – 2005. – Vol. 2. – pp.867-870.
34. Anwar N. An accurate model for a LiNbO electro-optic modulator // High Performance Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications Workshop, 1996. EDMO. –1996. – pp. 56-61.
35. Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2014–2019 White Paper [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/Cloud_Index_White_Paper.html, свободный (дата обращения 17.11.19).
36. Chen H. Development of an 80 Gbit/s InP-based Mach-Zehnder Modulator. Dissertation. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.628.5856&rep=rep1&type=pdf>, свободный (дата обращения 15.11.19).
37. Kong S. Fabrication and Experimental Characterization of Multiple Quantum Well Semiconductor Laser Amplifier with Integrated Saturable Absorber [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://discovery.ucl.ac.uk/1446375/1/U594090.pdf>, свободный (дата обращения 11.11.19).
38. Hagn G. Electro-optic effects and their application in indium phosphide waveguide devices for fibre optic access networks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/146406/eth-25362-02.pdf>, свободный (дата обращения 18.12.17)
39. Zhang S. Traveling-wave Electroabsorption Modulators [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download? doi=10.1.1.136.3192&rep=](http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.136.3192&rep=)

rep1&type=pdf, свободный (дата обращения 18.11.19).

40. Trajkovic M. First comparison of InGaAsP and InGaAlAs electroabsorption modulator in COBRA generic platform / M. Trajkovic, F.A. Lemaitre, H. Debregeas, K.A. Williams, X.J.M. Leijtens // 19th European Conference on Integrated Optics. - 2017. - pp.1-2.

41. Wang Hui-Tao Optimization of 1.3- μm InGaAsP/InP Electro-Absorption Modulator // Chin. Phys. Lett. - Vol. 32, No. 8. – 2015.

42. Yip R. Y.-F. Strain and relaxation effects in InAsP/InP multiple quantum well optical modulator devices grown by metal-organic vapor phase epitaxy / R. Y.-F. Yip, A. Aït-Ouali, A. Bensaada, P. Desjardins, M. Beaudoin, L. Isnard, J. L. Brebner, J. F. Currie, and R. A. Masut // Journal of Applied Physics. – Vol. 81, No. 4. – 1996.

43. Li Y. High Linearity InP-Based Phase Modulators Using a Shallow Quantum-Well Design /Yifei Li, Renyuan Wang, Ashish Bhardwaj, Sasa Ristic, and John Bowers // IEEE Photonics Technology Letters. - Vol. 22, No. 18. - 2010.

44. Yamada E. Compact Low-power-consumption Optical Modulator / Eiichi Yamada, Ken Tsuzuki, Nobuhiro Kikuchi, and Hiroshi Yasaka // NTT Technical Review. – Vol.3, No.3. – Mar. 2005.

45. Bugajski M. Concentration-dependent absorption and photoluminescence of n-type InP / M. Bugajski and W. Lewandowski // J. Appl. Phys. – Vol.57, No.2 – 1985.

46. Maat R. InP-based integrated MZI switches for optical communication [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:70d47e61-c60e-4655-859e-c9de19fa664/datastream/OBJ>, свободный (дата обращения 12.11.19).

47. Klein H. Integrated InP Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit/s Ethernet applications using QPSK modulation. Dissertation. [Электронный ресурс]. – режим доступа: https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/2895/1/Dokument_10.pdf, свободный (дата обращения 05.12.19)

48. Blum R. Optical transceiver trends for data center applications – How much photonic integration do we need? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.oclaro.com/wp-content/uploads/2015/05/Robert-Blum-Photonic-Integration-042315.pdf>, свободный (дата обращения 19.11.19).

49. Adachi S. Refractive indices of III–V compounds: Key properties of InGaAsP relevant to device design // J. Appl. Phys. – Vol. 53, No.8 – 1982.

50. O'Brien P. Packaging of integrated photonic devices; applications, user foundry services & design rules [Электронный ресурс]. – Режим

доступа:https://www.enas.fraunhofer.de/content/dam/enas/de/documents/Downloads/Chemnitz%20Seminare/Seminar_22_SP_2015/Packaging%20of%20Integrated%20Photonic%20Devices.pdf, свободный (дата обращения 20.11.19)

51. Pavesi L. Silicon photonics III Systems and Applications // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2016. – pp.524

52. Официальный сайт компании Kyocera [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://global.kyocera.com/prdct/semicon/semi/fo/pkg.html#100Gbps>, свободный (дата обращения 20.11.19).

53. Bernabe S. Packaging challenges for next generation Photonics modules [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ectc.net/files/64/3%20Tuesday%20PM%20Si%20Photonics%20Session/2%20ECTC%202014%20Si%20Photonics%20Panel%20Session%20-%20Stephane%20BERNABE.pdf>, свободный (дата обращения 19.12.19)

54. Painchaud Y. Silicon-based packaged products and solutions / Y. Painchaud, M. Poulin, M. Pelletier, F. Pelletier, C. Latrasse, G. Robidoux, S. Savard, J.-F. Gagnй, V. Trudel, M.-J. Picard, P. Poulin, P. Sirois, F. D'Amours, D. Asselin, S. Paquet, C. Paquet, M. Cyr, M. Guy // Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XVIII. – 2014.

55. Bottoms B. Photonic System Packaging Roadmap – 2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://photonicsmanufacturing.org>, свободный (дата обращения 19.12.19).

56. Tiku S. III-V integrated circuit fabrication technology / S. Tiku, D. Biswas. – Boca Raton: CRC Press Taylor&Fancis Group, 2016. – 550 p.

57. Бланк Т. В. Механизмы протекания тока в омических контактах металл-полупроводник / Т. В. Бланк, Ю. А. Гольдберг // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41. – Вып. 11. – С. 1281–1308.

58. Sanada T. Ohmic contact to p-GaAs with Au/Zn/Au structure / T. Sanada, O. Wada // Jpn. J. Appl. Phys. – 1980. – Vol. 19. – no. 8. – P. L491–L494.

59. Lothian J. R. Ti/Pt/Au Schottky contacts on HEMTs / J. R. Lothian, F. Ren, J. M. Kuo, J. S. Weiner, Y. K. Chen. // Solid State Electron. – 1997. – Vol. 41. – no. 5. – P. 673–675.

60. Baca A. G. Fabrication of GaAs devices / A. G. Baca, C. I. H. Ashby. – Bodmin: MPG Books Limited, 2005. – 351 p.

61. Dilley J. W. L. A manufacturable multi-level interconnect process using two layers of 4.5 μm -thick plated gold / J. W. L. Dilley, S. K. Hall // CS MANTECH Conference. – 2000. – P. [1–3].

62. Clausen M. C. Advanced manufacturing techniques for next generation power FET technology / M. C. Clausen, J. McMonagle // 13th GAAS Symposium. – 2005. – P. 429–432.
63. Chang C. Y. GaAs high-speed devices: physics, technology, and circuit applications / C. Y. Chang, F. Kai. – New York et al.: John Wiley & Sons, Inc, 1994. – 613 p.
64. Yota J. Photodefinable polybenzoxazole interlevel dielectric for GaAs HBT applications / J. Yota, H. Ly, D. Barone, M. Sun, R. Ramanathan // CS MANTECH Conference. – 2008. – P. [1–4].
65. Knoedler H. Cross-functional optimization of backside metal adhesion to GaAs / H. Knoedler, A. Aleman, E. Babcock, P. Bal, S. Canale, B. Darley, N. Ebrahimi, et al. // CS MANTECH Conference. – 2005. – P. [1–4].
66. Bardolaza H.R. Temperature dependence of THz emission and junction electric field of GaAs–AlGaAs modulation-doped heterostructures with different i-AlGaAs spacer layer thicknesses / Bardolaza H.R., Vasquez J.D.E., Bacaoco M.Y., De los Reyes A.E., Lopez L.P. Jr., Somintac A.S., Salvador A.A., Estacio E.S., Sarmago R.V. // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2018. – V.29, №10. – P. 8760-8766.
67. Арендоренко А.А. Тенденции развития эпитаксиальной технологии нитридных соединений / Арендоренко А.А., Орешкин В.А., Свешников Ю.Н., Цыпленков И.Н. // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2015. – Т.18, №1. – С. 5-15.
68. Lee M.L. Schottky barrier heights of metal contacts to n-type gallium nitride with low-temperature-grown cap layer / Lee M.L., Sheu J.K., Lin S.W. // Applied Physics Letters – 2006. – V.88, №3. – P. 032103.
69. Brudnyi V.N. Electrophysical and Physical-Chemical Properties of Ohmic Contacts to III-N Compounds / Brudnyi V.N., Vilisova M.D., Velikovskii L.E., Sim P.E., Brudnyi P.A. // Russian Physics Journal. – 2018. – V.61, №8. – P. 1450-1456.
70. Schwierz F. Modern Microwave Transistors: Theory, Design, and Performance / Schwierz F., Liou J.J. – New Jersey: Willey-Interscience, 2003. – 486 p.
71. Александров Р. Монолитные интегральные схемы СВЧ: Взгляд изнутри / Александров Р. // Компоненты и технологии. – 2005. – №9. – С. 174-182.
72. Selvanathan D. Comparative study of Ti/Al/Mo/Au, Mo/Al/Mo/Au, and V/Al/Mo/Au ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures / Selvanathan D., Mohammed F.M., Tesfayesus A., Adesida I. // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2004. – V. 22, №5. – P. 2409-2417.

73. Washio K., Ohue E., Shimamoto H., Oda K., and Hayami, R. (2000). "A 0.2-mm, 180 GHz-ft, 6.71ps-ECL SOI/HRS self-aligned SEG SiGe HBT/CMOS technology for microwave and high-speed digital applications," in Proceedings of the IEDM Technical Digest, IEEE, 741–744.
74. Rücker H., Heinemann B., Barth R., Bolze D., Drews J., Fursenko O., et al. (2004). "Integration of High-Performance SiGe:C HBTs with Thin-Film SOI CMOS", in Proceedings of the IEDM Technical, IEEE, 239–242.
75. Avenier G., Schwartzmann T., Chevalier P., Vandelle B., Rubaldo L., Dutartre Boissonnet L., et al. (2005). "A self-aligned vertical HBT for thin SOI SiGeC BiCMOS," in Proceedings of the Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, 2005, (Santa Barbara, CA: IEEE), 128–131.
76. Bock J., Schäfer H., Aufinger K., Stengl R., Boguth S., Schreiter R., et al. (2004). "SiGe bipolar technology for automotive radar applications," in BCTM Proceedings (Montreal, QC: IEEE), 84–87.
77. Avenier G., Diop M., Chevalier P., Troillard G., Loubet N., Bouvier J., et al. (2009). 0.13 mm SiGe BiCMOS technology fully dedicated to mm-wave applications. IEEE J. Solid State Circuits 44, 2312–2321.
78. Chevalier P., Meister T. F., Heinemann B., Van Huylenbroeck S., Liebl W., Fox A., et al. (2011). "Towards THz SiGe HBTs", in BCTM Proceedings (Atlanta, GA: IEEE), 57–65.
79. Orner B. A., Liu Q. Z., Rainey B., Stricker A., Geiss P., Gray P., et al. (2003). "A 0.13 mm BiCMOS technology featuring a 200/280 GHz (fT=fmax) SiGe HBT," in Proceedings of the BCTM, IEEE, 203–206.
80. Preisler E., et al. (2011). "A millimeter-wave capable SiGe BiCMOS process with 270 GHz fmax HBTs designed for high volume manufacturing," in BCTM Proceedings, 74–77.
81. Knoll D., Heinemann B., Barth R., Blum K., Borngraber J., Drews J., Ehwald K.-E., et al. (2004). "A modular, low-cost SiGe:C BiCMOS process featuring high-fT and high-BVCEO transistors," in Proceedings BCTM, (Montreal, QC: IEEE), 241–244.
82. Donkers J. J. T. M., Kramer M. C. J. C. M., Van Huylenbroeck S., Cho L. J., Meunier-Beillard P., Sibaja-Hernandez A., et al. (2007). "A novel fully self-aligned SiGe:C HBT architecture featuring a single-step epitaxial collector-base process", in Proceedings of the IEDM Technical Digest (Washington, DC: IEEE), 655–658.
83. 60nm gate-length Si/SiGe HEMT / A. Kasamatsu, K. Kasai, K. Hikosaka, T. Matsui, T. Mimura // Applied Surface Science, 2004, № 224, pp. 382–385.

84. High performance 100 nm T-gate strained Si/Si_{0.6}Ge_{0.4} n-MODFET / F. Aniel, M. Enciso-Aguilar, L. Giguere, P. Crozat, R. Adde, T. Mack, U. Seiler, Th. Hackbarth, H.J. Herzog, U. König, B. Raynor // *Solid-State Electronics*, 2003, vol. 47, no. 2, pp. 283–289.
85. RF Modeling of Large Gate-Width Multi-Finger Si/SiGe Power MODFETs / H.-C. Yuan, N. Jiang, Z. Ma, E. T. Croke // *ECS Transactions*, 2006, № 3. part. 7, pp. 981–987.
86. High Performance 0.1 μm Gate-Length P-Type SiGe MODFET's and MOS-MODFET's / W. Lu, A. Kuliev, S. J. Koester, X.-W. Wang, J. O. Chu, T.-P. Ma, I. Adesida // *IEEE Transactions on electron devices*, 2000, vol. 47, no. 8, pp. 1645–1652.
87. Lee, Y.C. *MEMS Packaging* / Y.C Lee, Y.T. Cheng, R. Ramadoss. – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2018. – 348 с.
88. Judy J.W. *Microelectromechanical Systems: Fabrication, Design and Applications* / J.W. Judy // *Smart Materials and Structures*, – 2001. – №3. – С. 1115-1134.
89. White, R.M. A Sensor Classification Scheme / R.M. White // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, – 1987. №2. – С. 124-126.5
90. Гуртов, В.А. *Микроэлектромеханические системы* / В.А. Гуртов, М.А. Беляев, А.Г. Бакшеева – Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2016. – 171 с.
91. P.Rai-Choklhury Handbook. *Microlithography, Micromaching, and Microfabrication* //v.2., SPIE, (1997), pp.302-303.
92. Ehrfeld W., Hessel V., Lowe H., Schulz Ch., Weber L. Material of LIGA technology // *Microsystem Technologies*.– 1999.– №5.– pp.105-112.
93. Junwen Liu Qing-An Huang, Jintang Shang, Jintang Tang *Micromachining of Pyrex7740 glass and their applications to wafer-level hermetic packaging of MEMS devices*// *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2010 IEEE
94. Franz Laermer, Kai Kolari *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies (Second Edition)*, 2015, P. 444-469
95. Najafi, K. *Micropackaging Technologies for Integrated Microsystems : Applications to MEMS and MOEMS* / K. Najafi // *SPIE Micromachining and Microfabrication Symposium*, 2003. – №4. – С. 1-19.
96. Kim, S.A. *Fabrication and Characterization of a Low-Temperature Hermetic MEMS Package Bonded by a Closed Loop AuSn Solder-Line* / S.A. Kim, Y.H. Sen, Y.H. Cho, G.H. Kim // *IEEE MEMS Conference Proceedings*, 2003. – pp. 614-617.
97. Harpster, T.J. *Field-assisted bonding of glass to Si-Au eutectic solder for packaging applications* // *IEEE MEMS Conference Proceedings*, 2003. – С. 630-633.
98. Viorel Dragoi, “From magic to technology: materials integration by wafer bond-

ing,” Proc. of SPIE, Vol. 6123, 2006, pp. 1-15.

99. Gilleo, K. MEMS/MOEMS Packaging: Concepts, Designs, Materials and Processes / K. Gilleo. – New York, NY: McGraw-Hill, 2005. – 416 c.

100. S. Takyu, T. Kurosawa, N. Shimizu, and S. Harada, “Novel Wafer Dicing and Chip Thinning Technologies Realizing High Chip Strength,” Materials Research Society Symposium Proceedings, vol. 970, pp. 0970, 2007.

101. Gooch, R. Wafer-level vacuum packaging for MEMS / R. Gooch, T. Schimert // Journal of Vacuum Science and Technology, 1999. – №4. – P. 2295-2299.

102. Chen, M.X. Reliability of anodically bonded silicon-glass packages / M.X. Chen, X.J. Yi, Z.Y. Gan, S. Liu // Sensors and Actuators, 2005. – №4. – P. 291-295.

103. Bhusari, D. Fabrication of air-channel structures for microfluidic, microelectromechanical, and microelectronic applications / D. Bhusari, H.A. Reed, M. Wedlake, A.M. Padovani, // J. Microelectromech. Syst. – 2001. – C.400-408.

104. Schlesinger, M. Modern Electroplating / – John Wiley & Sons, 2010. – 737c.

105. Sobia Bushra Investigation of Wafer Level Au-Si Eutectic Bonding of Shape Memory Alloy (SMA) with Silicon. – 2011

106. Yang, H.A. Localized induction heating solder bonding for wafer level MEMS packaging / H.A. Yang, M. Wu, W. Fang // Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005. – № 6, C. 394-399.

107. Rendina, I. Porous silicon-based optical biosensors and biochips / I. Rendina, I. Rea, L. Rotiroti, L.D. Stefano // Physica E, 2007. – №9. – C. 188-192.

108. Zhang, Q. Thin-film encapsulation technology for above-IC MEMS wafer-level packaging / Q. Zhang, P.V. Cicek, F. Nabki, M. El-Gamal // Electronic Components & Technology Conference. 2014. – C. 23-33.

109. Nabki, F. Low-stress CMOS-compatible silicon carbide surface-micromachining technology –Part I: Process development and characterization / F. Nabki, T.A. Dusatko, S. Vengallatore, M. N. El-Gamal // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2011. – №3. – C. 720-729.

110. Rajaraman, V. Robust wafer-level thin-film encapsulation of microstructures using low stress PECVD silicon carbide / V. Rajaraman // IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems. – 2009. – C. 140-143

111. Guo, B. Poly-SiGe-based MEMS thin-film encapsulation / B. Guo // J. Microelectromech. Syst. – 2012. – C. 110-120.

112. Verheijden G.J.A.M. Wafer-level encapsulation technology for MEMS devices

using an HF permeable PECVD SiOC capping layer / G.J.A.M. Verheijden, G.E.J. Koops, K.L. Phan // 21st IEEE Int. Conf. on Micro Electro. – 2008. – С. 798-801.

113. Lee B.K. Use of nanoporous columnar thin film in the wafer-level packaging of MEMS devices / B.K. Lee, D.H. Choi // J. Micromech. Microeng. – 2010. – С. 20-29.

114. He R.H. On-wafer monolithic encapsulation by surface micromachining with porous polysilicon shell // J. Microelectromech. Syst. – 2007. – С. 462-472.

115. Joseph P.J. Wafer-level packaging of micromechanical resonators / P.J. Joseph, P. Monajemi, F. Ayazi P.A. Kohl // IEEE Trans. Adv. Packag. – 2007. – С. 19-26.

116. Shackelford J.F. CRC materials science and engineering handbook, Third edition / J.F. Shackelford, W. Alexander. – CRC Press. – 2000. – 1980 с.

117. Oberhammer J. Novel RF MEMS switch and packaging concepts: Doctoral thesis: Engineering and Technology. – Stockholm, 2004. – 154 p.

118. Электронный справочник Режим доступа: https://ru.qwertyu.wiki/wiki/Von_Mises_yield_criterion (дата обращения: 20.02.2017)

119. Электронный справочник. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sniprf.ru/razdel-2/2-01-07-85> (дата обращения: 10.02.2017)

120. Электронный справочник. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://help.solidworks.com/2013/Russian/SolidWorks/cworks/r_Maximum_von_Mises_Stress_Criterion.htm (дата обращения: 20.11.2019)

121. Лагош А.В. Карбидокремниевые микромеханические ключи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://etu.ru/assets/files/nauka/dissertacii/2017/lagosh/lagosh-dissertaciya.pdf> (дата обращения: 21.11.2019).

122. RF MEMS switches with SiC microbridges for improved reliability / Scardelletti M. C., Zorman C. A., Oldham D. R. // 2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2008. – P. 1-4.

123. Group III nitride and SiC based MEMS and NEMS: materials properties, technology and applications / Cimalla V., Pezoldt J., Ambacher O. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2007. – Vol. 40(20). – P. 6386.

124. Wijesundara M., Azevedo R. Silicon carbide microsystems for harsh environments. – Springer Science & Business Media, 2011. – 247 p.

125. Amorphous SiC as a structural layer in microbridge-based RF MEMS switches for use in software-defined radio / Parro R. J. [et al.] // Solid-State Electronics. – 2008. – Vol. 52(10). – P. 1647-1651.

126. Асташенкова О. Н. Физико-технологические основы управления механиче-

скими напряжениями в тонкоплёночных композициях микромеханики: автореф. дис. ...канд. тех. наук: 05.27.01. – СПб., 2015. – 18 с.

127. Коноплев Б. Г., Лысенко И. Е. Компоненты микросистемной техники : учеб. пособие. Таганрог : Изд-во ГТИ ЮФУ, 2009. Ч. 1. 117 с.

128. Лысенко И. Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники : учеб. пособие. Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2005. 62 с.

129. Белов Л., Житникова М. Микроэлектромеханические компоненты радиочастотного диапазона // Электроника НТБ. 2006. Вып. 8. URL:<http://www.electronics.ru/issue/2006/8/3> (дата обращения: 15.11.2019).

130. Ричардс Р., Лос Сантос Г. де. MEMS-устройства для СВЧ-приложений: новая волна. Ч. 2 / пер. А. Федянович. URL: <http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200201/3.html> (дата обращения: 13.11.2019).

131. Доценко В.В., Малютин Н.Д. Исследования, методы проектирования, разработка технологий электронной компонентной базы, радиолокационной и измерительной аппаратуры СВЧ на пути перехода к цифровому производству / Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2017. № 1–2. С. 221–229.

132. Доценко В.В., Малютин Н.Д. Разработки аппаратуры радиолокации, приборостроения и электронной компонентной базы СВЧ: основные результаты выполнения комплексных проектов НИИ Систем электрической связи и АО «НПФ «Микран» // Доклады ТУСУР, 2017, том 20, № 3. – С. 79– 85.

133. Pandey A.K. Design of a Transceiver System at C-Band based on MultiTechnology // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2013. – Vol. 3 (4). – P. 697-703.

134. Boles B.T, Carlson D., Ramnath S. Monolithic Semiconductor Technologies for Low Cost Phased Array Radar // Microwave Product Digest Magazine. – 2011 (Feb.).

135. Gharibdoust K., et al. A Fully Integrated 0.18- μm CMOS Transceiver Chip for X-Band Phased-Array Systems // IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. – Vol. 60. – July 2012. – P. 2192–2202.

136. Weedon W. H. Phased Array Digital Beamforming Hardware Development at Applied Radar // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, October 12–15, 2010.–P. 854–859.

137. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds // Nat. Photonics, 2007, vol. 1(6), pp. 319–330.

138. Seeds A. Microwave photonics // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, 2002, vol. 50(3), pp. 877–887.
139. Seeds A. J., Williams K. J. Microwave photonics // *J. Lightw. Technol.*, 2006, vol. 24(12), pp. 4628–4641.
140. Yao J. Microwave photonics // *J. Lightwave Technol.*, 2009, vol. 27(3), pp. 314–335
141. Cox C. H. *Analog Optical Links: Theory and Practice* // Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
142. Cox C., Ackerman E., Helkey R., Betts G. Techniques and performance of intensity-modulation, direct-detection analog optical links // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, 1997, vol. 45(8), pp. 1375–1383.
143. Cox C., Ackerman E., Betts G., Prince J. Limits on the performance of RF-over-fiber links. And their impact on device design // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, 2006, vol. 54(2), pp. 906–920.
144. Roman J. et al. Fiber-optic remoting of an ultrahigh dynamic range radar // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.*, 1998, vol. 46(12), pp. 48–54.
145. Montebugnoli S. et al. Large antenna array remoting using radio-over-fiber techniques for radio astronomical application // *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2005, vol. 46(1), pp. 48-54.
146. Lim C. et al. Fiber-wireless networks and subsystem technologies // *J. Lightwave Technol.*, 2010, vol. 28(4), pp. 390–405.
147. Yao J. Microwave photonics: arbitrary waveform generation // *Nat. Photonics*, 2010, vol. 4(2), pp. 79–80.
148. Yao J. Photonic generation of microwave arbitrary waveforms // *Opt. Commun*, 2011, vol. 284(15), pp. 3723 – 3736.
149. Jacobs E. et al. RF-over-fiber and Optical Processing for Navy Applications // *Proceedings of the Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Anaheim, CA, USA, 2007.
150. Gasulla I. et al. Recent breakthroughs in microwave photonics // *IEEE Photonics J.*, 2011, vol. 3(2), pp. 311–315.
151. Capmany J. et al. Microwave photonics: Harnessing slow light // *Nat. Photonics*, 2011, vol. 5(12), pp. 731-733.
152. Woodward T. et al. Systems perspectives on optically-assisted RF signal processing using silicon photonics // *Proceedings of the IEEE Topical Meeting on Microwave Pho-*

tonics (MWP 2011), Singapore, 2011, pp. 377–380.

153. Coldren L. Photonic integrated circuits for microwave photonics // Proceedings of the IEEE Topical Meeting on Microwave Photonics., 2010, pp. 1-4.

154. Jalali B. et al. Silicon photonics // IEEE Microwave Magazine, 2006, vol. 7(3), pp. 58–68

155. Soref R. The past, present and future of silicon photonics // IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 2006, vol. 12(6), pp. 1678–1687.

156. Jalali B. Silicon photonics // J. Lightw. Technol., 2006, vol. 24(12), pp. 4600–4615.

157. Liang D., Bowers J. Photonic integration: Si or InP substrates? // Electron. Lett., 2009, vol. 45(12), pp. 578–581.

158. Coldren L. et al. High performance InP-based photonic ICs—A tutorial // J. Lightw. Technol., 2011, vol. 29(4), pp. 554–570.

159. Smit M. et al. Moore's law in photonics // Laser & Photonics Reviews, 2012, vol. 6(1), pp. 1–13.

160. Dumon P. et al. Towards foundry approach for silicon photonics: silicon photonics platform ePIXfab // Electron. Lett., 2009, vol. 45(12), pp. 581–582.

161. Leijtens X. JePPIX: the platform for InP-based photonics // IET Optoelectronics, 2011, vol. 5(5), pp. 202–206.

162. Hochberg et al. Towards fabless silicon photonics // Nat. Photonics, 2010, vol. 4(8), pp. 492–494.

163. U. Khan, Y. Xing, Y. Ye, W. Bogaerts, Photonic integrated circuits design in a foundry+fabless ecosystem, Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (invited), 25(5), p.paper 8201014 doi:10.1109/JSTQE.2019.2918949 (2019).

164. A. Katumba, Xin Yin, Joni Dambre, P. Bienstman, A Neuromorphic Silicon Photonics Nonlinear Equalizer for Optical Communication with Intensity Modulation and Direct-Detection, Journal of Lightwave Technologies, 37(10), p.2232-2239 doi:10.1109/JLT.2019.2900568 (2019).

165. Z. Tang, J. Zhang, S. Pan, G. Roelkens, D. Van Thourhout, RoF System based on a III-V-on-Silicon Transceiver with a Transfer-Printed PD, IEEE Photonics Technology Letters, 31(13), p.1045 - 1048 doi:10.1109/LPT.2019.2917269 (2019).

166. Kokolov A.A., Konkin D.A., Koryakovtsev A.S., Sheyerman F.I., Babak L.I. Microwave Photonic ICs for 25 Gb/s Optical Link Based On SiGe BiCMOS Technology // Symmetry 2019, Vol. 11, No. 12, article number 1453, <https://doi.org/10.3390/sym11121453>.

167. Kokolov A.A., Koryakovtsev A.S., Sheyerman F.I., Babak L.I. Differential Transimpedance Amplifier for 25 Gb/s Optical Links in a 0.25 μm SiGe BiCMOS technology // SIBIRCON 2019, 23-24 October, Tomsk, 2019.
168. Коколов А.А., Коряковцев А.С., Бабак Л.И., Шеерман Ф.И., Конкин Д.А., Светличный Ю.А. Дифференциальный трансимпедансный усилитель DC-20 ГГц на основе SiGe BiCMOS технологии для интегрального оптического приемника // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Том 1, №1. – С. 218-223.
169. WGMODES – Photonics Research Laboratory. URL: <http://www.photonics.umd.edu/software/wgmodes/> (Дата обращения: 20.12.2019).
170. MODE Solutions – Waveguide Mode Solver and Propagation Simulator. URL: <http://www.lumerical.com/mode> (Дата обращения: 20.12.2019).
171. Luxtera Company. URL: <http://www.luxtera.com/> (Дата обращения: 20.12.2019).
172. IPKISS. URL: <http://www.ipkiss.org> (Дата обращения: 20.12.2019).
173. PhoeniX Software – Solutions for micro and nano technologies. URL: <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/pic-design-suite.html?submenu=dk&prdgrpID=15> (Дата обращения: 20.12.2019).
174. Семикина, Т.В. Оксидная электроника как одно из направлений прозрачной электроники / Т.В. Семикина, В.Н. Комащенко, Л.Н. Шмырева // Электроника и связь – 2010. - №3. – С. 20–28.
175. Использование прозрачной проводящей плёнки для сенсорной панели. Отчет – 2013 // Informa Tech. – 2014. Режим доступа: www.displaybank.com/_eng/research/report_view.html?id=608&cate=7.
176. Wager, J.F. Transparent electronics / J.F. Wager, D.A. Keszler, R.E. Presley. - New York: Springer, 2008. – 212 p.
177. Morgan, D.V. Annealing Effects on Opto-Electronic Properties of Sputtered and Thermally Evaporated Indium-Tin-Oxide Films / D. V. Morgan, Y. H. Aliyu. R. W. Bunco, A. Salehi // Thin Solid Films. – 1998. – V.312. – P. 268.
178. Bogdanov, M.V. Effect of ITO spreading layer on performance of blue light-emitting diodes / M.V. Bogdanov, K.A. Bulashevich, O.V. Khokhlev, I.Yu. Evstratov, M.S. Ramm, S.Yu. Karpov // Phys. stat. solid. – 2010. – № 7–8. – P. 2127.
179. Bellitto, V.J. Transition from the above mentioned gap states RL Henry / V.J. Bellitto, B.D. Thoms, D.D. Koleske, A.E. Wickenden. // Surface Science. – 1999. – 80. – P.430.
180. Warschakow, O. Interstitial oxygen in tin-doped indium oxide transparent conduc-

tors / O. Warschakow, Lj. Miljacic, D.E. Ellis, G.B. Gonzalez, T.O. Mason // Journal of the American Ceramic Society – 2006. – 89. – P. 616–619.

181. Saadeddin, I. Preparation and characterization of new transparent conducting oxides based on SnO₂ and In₂O₃: ceramics and thin films: Ph.D thesis in the field of material science / Iyad Saadeddin. – An-Najah National University, Palestine, 2007. – 191p.

182. Pokaipisit, A. Influence of annealing temperature on the properties of ITO films prepared by electron beam evaporation and ion-assisted deposition / A. Pokaipisit, M. Horprathum, P. Limsuwan // Kasetsart J. (Nat. Sci.). – 2008. – № 42. – P. 362.

183. Жидик Ю.С., Чистоедова А.А., Жидик Е.В., Данилина Т.И. Влияние электронно-ионной бомбардировки на процесс формирования и свойства пленок сложного состава ионно-плазменным методом // Материалы 13-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом», 30 сентября - 3 октября 2019 г. Минск, Беларусь, с. 446 – 449.

184. Y S Zhidik, T I Danilina, A A Chistoedova, E V Zhidik, L R Bitner / Influence of gas discharge plasma on forming process and properties of complex films // Journal of Physics: Conference Series. – 2019, V. 1393. – p. 1-5. [doi:10.1088/1742-6596/1393/1/012154]

185. Получение пленок оксидов металлов Sn, In, Zn методом ионно-плазменного распыления и их свойства // Труды Кольского научного центра РАН. – 2019, №1 вып.3. – С. 93-98. [DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.1.93-98]

186. Жидик Ю.С., Троян П.Е., Козик В.В. Особенности технологии синтеза прозрачных проводящих оксидных пленок // Сборник материалов Международной научной конференции «Полифункциональные химические материалы и технологии», 22 – 25 мая 2019 г., Томск, Том 1, с. 54 – 56.

187. Жидик Ю.С., Троян П.Е., Козик В.В., Козюхин С.А., Заболотская А.В., Кузнецова С.А. Исследование влияния высокотемпературного отжига пленок ITO на их электрофизические свойства // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2020, №1. (в печати).

188. Жидик Ю.С., Чистоедова А.А., Жидик Е.В., Данилина Т.И. Исследование влияния высокотемпературного отжига пленок ITO на их электрофизические свойства // Материалы 13-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом», 30 сентября - 3 октября 2019 г. Минск, Беларусь, с. 386-389

189. Чистоедова А.А., Жидик Ю.С. Наноразмерные пленки ITO для химических сенсоров // Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (ЭССУ-2019), 20 – 22 ноября 2019 г.,

Томск, 2019. (в печати).

190. Исследование возможностей применения аддитивной технологии формирования пленок органических и неорганических материалов электроники / В.И. Туев, Н. Д. Малютин, А. Г. Лощилов и др. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – №4 (38). – С. 52–62.

191. Fully Printed Stretchable Thin-Film Transistors and Integrated Logic Circuits / Le Cai, Suoming Zhang, Jinshui Miao, Zhibin Yu, Chuan Wang // ACS Nano. – 2016. – PP. 11459–11468: DOI:10.1021/acsnano.6b07190

192. Органическая и печатная электроника – новая ветвь развития [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tech-e.ru/2011_5_42.php (дата обращения: 3.05.2018).

193. Каплеструйные принтеры с непрерывной подачей чернил (CIJ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.linxglobal.com/ru/технологические-руководства/cij/> (дата обращения: 3.05.2018).

194. Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review / Saleem Khan, Leandro Lorenzelli, Member, IEEE, Ravinder Dahiya, Senior Member, IEEE // Article in IEEE Sensors Journal, December 2014 – Vol. 64 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://vk.com/doc24474925_462016109?hash=dfe9b71768fc33bb6d&dl=fe27d479745a4be074 (дата обращения: 3.05.2018).

195. Микрополосковая линия, изготовленная методом плоттерной печати чернилами, содержащими наночастицы серебра. Ее частотные и импульсные характеристики / А. Е. Здрок, Д. В. Шерстюк, А. М. Умаров, С. А. Артищев, А. Г. Лощилов, Н. Д. Малютин // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век, изд-во «Радиотехника», г. Москва, 2016 г.– С. 3–8.

196. Влияние состава активирующих растворов на качество металлического покрытия АБС-пластика / С.С. Попова, И.Ю. Гоц, С.М. Закирова, Л.А. Рахметулина // Вестник СГТУ.– 2012.– № 3 (67).– С. 86–91.

197. Kumar Raja. A review on Chemical Processes for Plastics substrates used in engineering industries/ Kumar Raja// International Journal of ChemTech Research.– 2016.– №07(9).– С. 354–365.

198. Erik G. Geterud. Lightweight Waveguide and Antenna Components Using Plating on Plastics/ Erik G. Geterud, Pontus Bergmark, Jian Yang // 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP).– 2013.– С. 1812–1815.

199. A Comparative Study on Electroplating of FDM Parts / Azhar Equbal, Md. Israr

Equbal, Anoop Kumar Sood, Md. Asif Equbal // International Journal of Technology.– 2017.– С. 930–938.

200. Shaker Alkaraki. Performance Comparison of Simple and Low Cost Metallization Techniques for 3D Printed Antennas at 10 GHz and 30 GHz / Shaker Alkaraki, Yue Gao, Max Munoz Torrico, Samuel Stremsdoerfer, Edouard Gayets² and Clive Parini// IEEE Access .–2018.

201. Как мы напечатали антенну [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://3dtoday.ru/blogs/ilyavyazigin/3d-antenna/> (дата обращения: 27.05.19).

202. Влияние состава активирующих растворов на качество металлического покрытия АБС-пластика/ С.С. Попова, И.Ю. Гоц, С.М. Закирова, Л.А. Рахметулина// Вестник СГТУ.– 2012.– № 3 (67). С. 86–91

203. Прототипирование СВЧ-устройств с заданными электродинамическими характеристиками по технологии аддитивной 3D-печати/ С.В. Харалгин, Г.В. Куликов, А.Б. Котельников, М.В. Снастин, Е.М. Добычина// современные радиотехнические и телекоммуникационные системы.–2019.–7.–№1.–С. 80–101.

204. Глебович Г.В. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов. М.: Радио и связь, 1984.

205. Федоров В. Н. , Дроботун Н. Б., Михеев Ф. А., Малютин Н. Д. Устройство разделения падающих и отраженных импульсных сигналов нано и пикосекундной длительности // ж. Приборы и техника эксперимента, 2017, № 1, с. 64-67.

206. Электронные средства и системы управления: материалы докладов XV Международной научно-практической конференции (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. – Ч. 12. – Томск: В-Спектр, 2019. – 222 с. Electronic Devices and Control Systems: XV International Scientific-practical Conference (November 20–22, 2019). – Part 1. – Tomsk: V-Spektr, 2019. – 222 p. ISBN 978-5-91191-426-4. ISBN 978-5-91191-427-1 (Ч. 1). ISBN 978-5-91191-428-8 (Ч. 2).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Основная форма отчетности ЦКП «Импульс» за 2018 г.

Форма 13

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Аппаратно-программные средства измерений и контроля параметров сверхширокополосных ВЧ и СВЧ устройств импульсными методами

УТВЕРЖДАЮ

ректор

(должность руководителя организации)

Шелупанов А.А.

(подпись)

22.08.2019



Основные сведения о деятельности ЦКП в 2018 году

1. Балансовая стоимость оборудования ЦКП, млн. рублей:	148.5344
2. Количество единиц оборудования ЦКП стоимостью от 1 млн рублей, ед.:	18
3. Штатная численность сотрудников ЦКП (без совместителей), чел.:	4
4. Общий объем выполненных работ (оказанных услуг), млн. рублей: в том числе в интересах третьих лиц:	69.6820 69.3400
5. Фактическая загрузка оборудования ЦКП, %:	72.80
6. Фактическая загрузка оборудования ЦКП в интересах третьих лиц, %:	55.54
7. Количество организаций-пользователей, ед.:	9

Руководитель ЦКП

 (Малютин Н.Д.)

Главный бухгалтер организации

 (Домнина М.А.)

22.08.2019

Аппаратно-программные средства измерений и контроля параметров сверхширокополосных ВЧ и СВЧ устройств импульсными методами (код отчета: 612830), Форма 13

1 из 1

