ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ АО «НАУЧНО ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «ИСТОК» им. Шокина»

На правах рукописи

Темнов Александр Михайлович

Front

УДК.621.382.323

ГИБРИДНО-МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СВЧ

Специальность 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано-электроника, приборы на квантовых эффектах

> Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

> > Фрязино 2020 г.

ОГЛА	ВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ		5
ГЛАВА	4 1. ОБЗОР ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СВЧ	33
1.1. F	Іаучные основы интегральных схем СВЧ	33
1.2. (Обзор микрополосковых ГИС и МИС СВЧ	77
1.3. (Сравнение массы и габаритов ГИС и МИС СВЧ	81
1.4. k	Сонцепция гибридно-монолитных интегральных схем СВЧ	83
1.5. k	Слассификация гибридно-монолитных интегральных схем СВЧ	86
1.6. (Оценка надежности ГМИС СВЧ	87
Заключ	нение по главе 1	89
ГЛАВА	4 2. КОНСТРУКЦИЯ ГМИС СВЧ НА САПФИРЕ	90
2.1.	Сравнение микрополосковой и копланарной линий	90
2.2.	Обоснование копланарной конструкции ГМИС СВЧ	96
2.3.	Выбор конструкции пассивных <i>R</i> , <i>L</i> , <i>C</i> элементов	99
2.4.	Сравнение массы и габаритов ГИС и ГМИС СВЧ	105
2.5.	Максимальная рассеиваемая мощность ГМИС СВЧ	106
2.6.	Общие принципы конструирования ГМИС СВЧ	111
Заключение по главе 2		112
ГЛАВА	А З. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГМИС СВЧ	113
3.1.	Изготовление пассивных элементов	113
3.1.1.	Оптимизация режимов напыления пленок SiO ₂ и Ta ₂ O ₅	115
3.1.2.	Выбор материала обкладок МДМ-конденсаторов	120
3.1.3.	Формирование «воздушных» мостов	121
3.1.4.	Выбор материала резистивного слоя	121
3.1.5.	Способ напыления проводящих и резистивных слоев	122
3.2.	Изготовление монолитной сапфировой платы ГМИС СВЧ	124
3.2.1.	Ограничения номиналов элементов R, L, C	127
3.3.	Отбор кристаллов ПТШ по НЧ и СВЧ параметрам	127
3.4.	Сапфировый технологический базис ГМИС СВЧ	128

Заключ	нение по главе 3	132
ГЛАВА	4 4. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ ГМИС СВЧ	133
4.1.	Узкополосный усилитель Х-диапазона частот	133
4.2.	Узкополосный усилитель L-диапазона частот	136
4.2.1.	Узкополосный усилитель дециметрового диапазона	139
4.3.	Широкополосный усилитель с диссипативным согласованием	142
4.4.	Широкополосный усилитель LС диапазона	144
4.5.	Широкополосный усилитель LХ диапазона	146
Заключ	нение по главе 4	149
ГЛАВА	А 5. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ГМИС СВЧ	150
5.1.	Анализ преобразовательных свойств ПТШ	150
5.2.	Балансные преобразователи частоты на ПТШ	155
5.3.	Балансные смесители частоты на ПТШ	158
5.4.	Балансные умножители частоты на ПТШ	160
5.5.	Балансные делители частоты на ПТШ	162
5.6.	Генераторы частоты на ПТШ	164
Заключение по главе 5		
ГЛАВА 6. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ МОЗАИЧНЫЕ ГМИС СВЧ		
6.1.	Узкополосные усилители мощности на ПТШ	168
6.2.	Широкополосные усилители мощности на МИС СВЧ	171
6.3.	Предварительный усилитель мощности (ПУМ) на ПТШ	173
6.4.	Выходные усилители мощности (ВУМ) на GaN ПТШ	177
Заключ	чение по главе б	190
ГЛАВА	4 7. ГМИС СВЧ НА АЛМАЗЕ	191
7.1.	Конструкция ГМИС СВЧ на алмазе	191
7.2.	ГМИС СВЧ-SMD для поверхностного монтажа	196
7.3.	Исследование потерь в МПЛ и КЛЭ линиях на алмазе	197
7.4.	Пассивные элементы ГМИС СВЧ на алмазе	202
7.5.	Технология изготовления ГМИС на алмазе	204

7.5.1.	Исследование параметров алмазных подложек из ПАП	208
7.5.2.	Создание гетеропластин ПАП-Si и отделение ПАП	210
7.5.3.	Выбор метода формирования отверстий в ПАП	215
7.5.4.	Плазмохимическое травление отверстий в ПАП	218
7.5.5.	Металлизация отверстий в ПАП	225
7.6.	Процесс изготовления плат ГМИС СВЧ на ПАП	227
7.7.	Процесс изготовления объемных алмазных крышек из ПАП	231
7.8.	Создание ГМИС СВЧ, в том числе поверхностного монтажа	233
7.9.	Температура канала GaAs, GaN ПТШ на алмазной плате	238
Заключе	гние по главе 7	244
ГЛАВА д	8. ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ ГМИС СВЧ	245
8.1.	Применение ГМИС СВЧ для создания ППМ АФАР	246
8.2.	Создание МИС СВЧ на алмазе	247
Заключе	гние по главе 8	251
ЗАКЛЮ	ЧЕНИЕ	252
СПИСО	К ЛИТЕРАТУРЫ	254
ПРИЛО	ЖЕНИЕ 1. СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	283
ПРИЛО	ЖЕНИЕ 2. ВНЕДРЕНИЕ	286
ПРИЛО	ЖЕНИЕ 3. СПИСОК ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЯ	287
ПРИЛО	ЖЕНИЕ 4. РАЗРАБОТАННЫЕ СТЕНДЫ	293

О, сколько нам открытий чудных Готовят просвещенья дух, И опыт, сын ошибок трудных, И гений, парадоксов друг, И случай, бог изобретатель. А. С. Пушкин

Электрон так же неисчерпаем, как и атом, природа бесконечна, но она бесконечно существует, и вот это-то единственно категорическое, единственно безусловное признание ее существования вне сознания и ощущения человека.

В.И. Ленин

введение

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Повышение обороноспособности России невозможно без создания конкурентоспособных систем радиоэлектронного вооружения мирового уровня с высокими тактико-техническими характеристиками. Высокие СВЧ требования радиоэлектронной аппаратуры обеспечиваются компонентами отечественной электронной компонентной базы СВЧ (ЭКБ CBY) с СВЧ параметрами высокими И надежностью, малыми массогабаритными характеристиками, технико-экономической эффективностью, технологичностью, устойчивостью к воздействию внешних факторов, серийно пригодностью и др. [1-3].

Характерной особенностью этапа развития техники СВЧ конца 70-х и начала 80-х годов была острая потребность в высоконадежной бортовой радиоэлектронной аппаратуре для систем радиоэлектронного вооружения, средств связи и космической техники [4-7].

Для создания такой аппаратуры оказались не пригодны не только волноводные и коаксиальные конструкции, но и традиционные гибридно-интегральные схемы (ГИС) СВЧ, недостатками которых были большие массогабаритные характеристики, высокая трудоёмкость изготовления и стоимость, малые объемы серийного выпуска порядка 10³ шт./год. Возникла актуальная проблема создания СВЧ компонентов сантиметрового диапазона длин волн (усилителей, преобразователей, генераторов и др.), имеющих высокие СВЧ параметры и надежность, малые массогабаритные характеристики и стоимость.

В начале 80-х годов казалось, что традиционные ГИС СВЧ будут быстро заменены малогабаритными монолитными интегральными схемами (МИС) СВЧ на арсенидгаллиевых полевых транзисторах с барьером Шотки (GaAs ПТШ) [8, 9]. Однако переход от ГИС к МИС СВЧ оказался делом не простым – для изготовления МИС СВЧ требовались дорогостоящее технологическое оборудование и сложные технологические процессы, а выход годных был порядка 1 %, поэтому переход к МИС СВЧ оказался технически и экономически целесообразен только при объемах серийного выпуска порядка 10⁶ шт./год. Соответственно преимущественная область применения МИС СВЧ – перспективные РЛС с АФАР [10-12].

Для большинства других систем: традиционных РЛС, бортовых и наземных, средств связи и измерительной техники требовалась большая номенклатура СВЧ компонентов с высокими СВЧ параметрами и надежностью, малыми массогабаритными характеристиками и стоимостью, при объемах серийного выпуска порядка 10⁵ шт./год.

Таким образом, в конце 70-х и начале 80-х годов сложилась ситуация, в которой недостатки, присущие традиционным ГИС СВЧ, не позволяли решить актуальную проблему, а МИС СВЧ были не готовы к ее решению. Поэтому появилась необходимость в поиске новых конструктивно технологических решений для интегральных схем СВЧ, которые могли решить актуальную проблему и удовлетворить требования высоконадежной бортовой радиоэлектронной аппаратуры.

Автором была предложена концепция, обеспечивающая решение актуальной проблемы создания интегральных схем СВЧ нового типа, имеющих высокие СВЧ параметры и надежность, малые массогабаритные характеристики и стоимость. Для реализации предложенной концепции

необходимо было решить комплекс вопросов теоретического, конструктивного и технологического характера.

Автором в 1978 г впервые в отечественной и зарубежной практике, в соответствии с концепцией, были созданы первые интегральные схемы СВЧ нового типа, в которых все пассивные элементы схемы изготавливались монолитно на монолитной диэлектрической плате, а навесными были кристаллы активных элементов, минимизированные по площади. Новый тип интегральных схем СВЧ был назван – гибридно-монолитные интегральные схемы (ГМИС) СВЧ. Первые сообщения о создании аналогичных зарубежных ГМИС СВЧ появились в литературе в 1981 г, где их называли QMIC – Quasi monolithic integrated circuit.

Цель работы – решение проблемы создания гибридно-монолитных интегральных схем СВЧ сантиметрового диапазона длин волн с параметрами и характеристиками, удовлетворяющими требованиям высоконадежной бортовой радиоэлектронной аппаратуры.

Постановка задачи

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- СВЧ 1) разработка концепции создания ГМИС СВЧ высокими c параметрами И надежностью, малыми массогабаритными характеристиками и стоимостью, выработка научных основ, проведение обзора и анализа возможных технических решений интегральных схем на СВЧ компонентах, проведение классификации, выбор активных направлений исследований, оценка надежности;
- 2) выбор конструкции ГМИС СВЧ на монолитной сапфировой плате, содержащей все пассивные (*R*, *L*, *C*) элементы, межсоединения и выводы, обеспечивающей решение проблемы создания ГМИС СВЧ с высокими СВЧ параметрами и надежностью, и улучшенными массогабаритными характеристиками, по сравнению с аналогичными ГИС СВЧ;
- 3) оптимизация процессов нанесения металлических и диэлектрических слоев SiO₂ и Ta₂O₅, для формирования МДМ-конденсаторов, стабильных

резисторов и создание технологического процесса изготовления монолитной сапфировой платы ГМИС СВЧ по групповой планарной технологии и прецизионной литографии, обеспечивающего промышленное производство ГМИС СВЧ;

- создание полнофункционального ряда промышленных усилительных, преобразовательных и генераторных ГМИС СВЧ сантиметрового диапазона длин волн с выходной мощностью до 100 мВт на GaAs ПТШ и МИС СВЧ;
- создание ряда промышленных усилительных ГМИС СВЧ сантиметрового диапазона частот с выходной мощностью до 0.5 Вт на GaAs и МИС СВЧ, а также ГМИС СВЧ с выходной мощностью до 10 Вт на GaN ПТШ;
- 6) выбор конструкции ГМИС СВЧ, в том числе поверхностного монтажа, на пассивной монолитной алмазной плате с металлизированными отверстиями, оптимизация процесса формирования металлизированных отверстий в алмазной плате, создание технологического процесса изготовления монолитной алмазной платы и объемной алмазной крышки по групповой планарной технологии;
- 7) перспективы развития ГМИС СВЧ на алмазе.

Объектом исследования являются – ГМИС СВЧ сантиметрового диапазона длин волн.

Предметом исследования являются конструкция ГМИС СВЧ, технология их изготовления и надежность.

Методики исследований. Для теоретических исследований и расчетов ГМИС применялись программы расчета микроволновых интегральных схем Fagot, ADS, и программа тепловых расчетов. Для экспериментальных исследований использовались стандартные электрические, оптические, физические, химические методы и электронная микроскопия, а также разработанные автором специальные стенды измерения: параметров мощных усилительных ГМИС СВЧ в импульсном режиме; параметров алмазных подложек из ПАП; глубины отверстий в ПАП; сплошного контроля

параметров ГМИС СВЧ поверхностного монтажа. Основные эксперименты проводились в АО «НПП «Исток» им. Шокина» на пилотной линии с размерной обработкой 100 нм, оснащенной современным технологическим и измерительным оборудованием.

Научная новизна. В диссертации впервые получены следующие результаты.

- Предложена и на практике реализована концепция создания ГМИС СВЧ содержащих все элементы сложных пассивных цепей согласования и питания, выполненные в монолитном исполнении, и навесные кристаллы активных компонентов, позволяющая производить ГМИС СВЧ с параметрами сравнимыми с аналогичными ГИС СВЧ, и объемом соизмеримым с МИС СВЧ.
- 2. Предложена и реализована оригинальная конструкция ГМИС СВЧ на основе подвешенной КЛ и монолитной сапфировой платы, содержащей все пассивные (R, L, C) элементы, межсоединения и выводы, обеспечивающая высокие СВЧ параметры и надежность, и улучшение более 3 раз массогабаритных характеристик ПО сравнению c аналогичными ГИС СВЧ.
- 3. Оптимизированы процессы нанесения металлических и диэлектрических слоев SiO₂ и Ta₂O₅, для формирования МДМ-конденсаторов и стабильных резисторов, разработан технологический процесс изготовления пассивной монолитной сапфировой платы ГМИС СВЧ по групповой планарной технологии и прецизионной литографии, создан сапфировый технологический базис для промышленного производства ГМИС СВЧ.
- Создан полнофункциональный ряд промышленных усилительных, преобразовательных и генераторных ГМИС СВЧ диапазона 0.4...20 ГГц с выходной мощностью до 100 мВт на GaAs ПТШ и МИС СВЧ.
- Создан ряд усилительных ГМИС СВЧ мозаичной конструкции, диапазона
 2...20 ГГц с выходной мощностью до 0.6 Вт на GaAs ПТШ и МИС СВЧ, а также ГМИС СВЧ с выходную мощность до 17 Вт на GaN ПТШ.

- 6. Созданы мощные усилительные ГМИС СВЧ, в том числе поверхностного монтажа, разработан технологический процесс изготовления пассивной монолитной алмазной платы с металлизированными отверстиями и объемной алмазной крышки по групповой планарной технологии, оптимизирован процесс плазмохимического травления отверстий.
- Показана перспектива создания ППМ АФАР с архитектурой 3D на ГМИС СВЧ и перспектива создания МИС СВЧ на алмазе.

Научные положения, выносимые на защиту.

- 1. Решение проблемы создания ЭКБ для построения высоконадежной бортовой СВЧ аппаратуры сантиметрового диапазона длин волн достигается реализацией концепции гибридно-монолитных интегральных схем.
- Создание усилительных, преобразовательных и генераторных ГМИС СВЧ диапазона 0.4...20 ГГц обеспечивается оригинальной конструкцией, на основе подвешенной копланарной линии и пассивной монолитной сапфировой платы с навесными кристаллами активных компонентов.
- Оригинальная технология формирования пассированных резисторов и МДМ-конденсаторов с диэлектрическими слоями SiO₂ и Ta₂O₅ обеспечили создание сапфирового технологического базиса для промышленного производства ГМИС СВЧ.
- 4. Создание мощных усилительных ГМИС СВЧ, в том числе поверхностного монтажа, обеспечивается использованием пассивной монолитной алмазной платы с металлизированными отверстиями и объемной алмазной крышки, а также конструкцией и технологией изготовления на основе плазмохимического процесса травления.

Практическая ценность работы

Предложенные ГМИС СВЧ и технология их изготовления обеспечили технологический базис, на котором создаются промышленные ГМИС СВЧ являющиеся неотъемлемой частью отечественной ЭКБ СВЧ. На основе технологического базиса создан полнофункциональный ряд промышленных узкополосных и широкополосных усилительных и преобразовательных ГМИС СВЧ диапазона 0.4...20 ГГц с выходной мощностью до 100 мВт на GaAs ПТШ и МИС СВЧ. Создан ряд промышленных узкополосных и широкополосных усилительных диапазона 2...20 ΓГц С выходной мощностью порядка 0.6 Вт на GaAs ПТШ и МИС СВЧ. Созданы усилительные ГМИС СВЧ мозаичной конструкции диапазона 8...12 ГГц с выходной мощностью 5, 10 и 17 Вт на GaN ПТШ. Созданы усилительные ГМИС СВЧ на алмазе, в том числе поверхностного монтажа, а также контактное устройство для сплошного неразрушающего контроля их параметров. Показана перспектива развития ГМИС СВЧ.

Результаты работы использованы в ряде ОКР, проводимых АО «НПП «Исток» им. Шокина» и другими предприятиями отрасли. Для производства ГМИС СВЧ используются GaAs ПТШ и МИС СВЧ изготавливаемые в АО «НПП «Исток» им. Шокина» на пилотной линии, оснащенной элементами СМИФ технологии (контейнер, шлюз, робот). Созданные ГМИС СВЧ широко внедрены в радиоэлектронную аппаратуру, выпускаемую АО «НПП «Исток» им. Шокина» и другими предприятиями отрасли: АО "КНИРТИ"; АО "ММЗ"; АО "УПКБ "Деталь"; АО "ЦКБА"; ПАО "НПО "Стрела"; АО "РКБ "Глобус"; ОАО "ЦНПО "Ленинец"; АО "Микроволновые системы"; АО "ИЭМЗ "Купол"; АО "ЦНИРТИ им. академика А. И. Берга"; ПАО "Сигнал"; АО "РАТЕП"; АО "Северный пресс"; АО "НИИЭП"; АО "НПП "Салют-25"; АО "Завод "Метеор"; АО "ППО ЭВТ им. В.А. Ревунова"; АО "РИРВ"; АО "Корпорация "Комета"; АО "ВНИИРТ"; АО "Радиоприбор"; АО "Октава"; АО "Промтехкомплект"; ООО "ЦМК-Аэро"; АО "ЗИТЦ".

ГМИС СВЧ составляют основу ЭКБ СВЧ важнейших систем вооружения РЛС, РЭБ, высокоточного оружия космического, воздушного, морского и наземного базирования: С-500, Т-50, Панцирь, Хибины-М, И-50, Тор, СУ-34, 5П20К, 48Я6-К1, Обра-М, 646Л, 646М и др.

На предприятии АО «НПП» Исток им. Шокина» ГМИС СВЧ серийно выпускаются с 1987 г. Создано более 100 типов ГМИС СВЧ различного

функционального назначения. Общий объем выпуска ГМИС СВЧ составляет порядка 100 000 шт./год.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы и отдельные её положения доложены, обсуждены и опубликованы в материалах всероссийских и международных научно-технических конференций:

IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 14-18 June 1993. Atlanta. GA. USA. 1993; «GaAs 2000» Conference proceedings, 2nd-3rd 2000, Paris; "СВЧ - техника и телекоммуникационные October технологии", «КрыМикО», Севастополь, 13-17 сентября 2010; 11-15 сентября 2006; 8-12 сентября 2003; 10-14 сентября 2001; 11-15 сентября 2000: Международная конференция «Современные системы на кристалле», Геленджик. Россия. 10-12 апреля 2009; Международная научно-практическая конференция «Нанотехнологии – производству» Фрязино, Московская область, 6-8 апреля 2010; Научно-техническая конференция «СВЧ-электроника, 75 лет развития» Фрязино, Московской области, 15-16 мая 2018.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы: одна монография, 4 статьи в журналах индексируемых в международных базах данных; 16 статей (3 без соавторов) в ведущих рецензируемых журналах по перечню ВАК РФ; получено 22 патента РФ.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа выполнена на 303 страницах текста, содержит 93 рисунка, 58 таблиц и список литературы из 278 наименований.

Содержание и результаты работы.

Во введении дано обоснование актуальности темы, определены цели и задачи исследований, перечислены основные результаты, выводы и рекомендации, научные положения, выносимые на защиту. Обоснована практическая значимость работы. <u>В первой главе</u> выработаны научные основы, проведен обзор и сравнение гибридно-интегральных схем (ГИС) СВЧ с монолитными интегральными схемами (МИС) СВЧ. Предложена концепция создания интегральных схем СВЧ нового типа, проведена классификация, определены направления исследований и оценена надежность.

В разделе 1.1. даны научные основы интегральных схем СВЧ. Приведены основные параметры длинных линий и полевых СВЧ транзисторов с барьером Шотки (ПТШ). Показано, что однокаскадный усилитель на ПТШ лежит в основе всех усилительных и преобразовательных интегральных схем СВЧ. В зависимости от ширины полосы рабочих частот различают узкополосные усилители, имеющие полосу рабочих частот до 10 % и широкополосные усилители с полосой рабочих частот более 10 %. В узкополосных усилителях ПТШ используются простейшие на одноконтурные схемы согласования, а в широкополосных усилителях широкополосные схемы согласования. По уровню выходной мощности усилители можно разделить на маломощные с выходной мощностью до 100 мВт и мощные с выходной мощностью более 100 мВт.

В разделе 1.2. показано, что в конце 70-х и начале 80-х годов были известны усилительные, преобразовательные и генераторные ГИС и МИС СВЧ сантиметрового диапазона длин волн. Они отличались по уровню выходной мощности (маломощные и мощные), ширине полосы рабочих частот (узкополосные и широкополосные) и конструктивному исполнению. Для их создания в Х-диапазоне частот использовались преимущественно ПТШ. На примере однокаскадного усилителя проведено сравнение конструкции и технологии изготовления, известных ГИС СВЧ.

Достоинства ГИС СВЧ: короткий цикл изготовления пассивных плат, возможность отбора плат и кристаллов ПТШ по НЧ и ВЧ параметрам и внешнему виду, высокая более 400 добротность индуктивных элементов, возможность настройки на максимальные СВЧ параметры, большой порядка 70 % выход годных ГМИС СВЧ. **Недостатки** ГИС СВЧ: малая интеграция элементов на плате (R, L), большие (до 0.25 λ) распределенные индуктивные элементы, большое количество навесных конденсаторов и проволочных соединений, использование нескольких плат, большие массогабаритные характеристики, трудоемкость и стоимость. Как следствие – ГИС СВЧ эффективны при объемах производства порядка 10³ шт./год.

В начала 80-х годов появилось большое количество статей о создании зарубежных МИС СВЧ Х-диапазона частот на GaAs ПТШ. На примере однокаскадного усилителя проведен анализ конструкции и технологии изготовления МИС СВЧ.

Достоинства МИС СВЧ: все активные и сосредоточенные пассивные элементы формируются на одном кристалле монолитно по групповой планарной технологии, геометрические размеры сосредоточенных элементов менее 0.1 λ , проволочных соединений нет, высокая повторяемость параметров, большие объемы производства.

Недостатки МИС СВЧ: длинный (порядка 6 месяцев) технологический цикл изготовления МИС СВЧ, включающий изготовление ПТШ и пассивной части, ограниченная (порядка 10 пФ) емкость МДМ-конденсаторов. Большая часть площади (до 90 %) занята пассивными элементами. Необходимость применения сложного и дорогостоящего технологического оборудования, обеспечивающего высокую повторяемость и воспроизводимость технологических процессов. Малый (порядка 1 %) выход годных кристаллов МИС СВЧ при малых объемах выпуска. Как следствие – МИС СВЧ эффективны при объемах производства порядка 10⁶ шт./год.

В разделе 1.3. на примере однокаскадного усилителя проведено сравнение массогабаритных характеристик ГИС и МИС СВЧ и показано, что МИС СВЧ позволяют уменьшить занимаемую площадь более 50 раз по сравнению с ГИС СВЧ за счет уменьшения ширины МПЛ и применения сосредоточенных индуктивных элементов. При этом добротность индуктивных элементов в МИС СВЧ шириной 10 мкм, при толщине

подложки 100 мкм порядка 30. Добротность индуктивных элементов ГИС СВЧ шириной 500 мкм при толщине подложки 500 мкм порядка 400 и поэтому СВЧ параметры ГИС СВЧ лучше, чем МИС СВЧ.

В разделе 1.4. на основе проведенного обзора и сравнения ГИС и МИС СВЧ показано, что единственным типом интегральных схем СВЧ сантиметрового диапазона частот были микрополосковые ГИС СВЧ, которые массогабаритные имели большие характеристики, трудоемкость изготовления и стоимость. Микрополосковые МИС СВЧ на арсениде галлия только разрабатывались, имели малый процент выхода годных кристаллов и требовали ДЛЯ изготовления дорогостоящего технологического оборудования. Таким образом, сложилась ситуация при которой ГИС СВЧ не могли решить проблему создания интегральных схем СВЧ с высокими СВЧ параметрами и надежностью, малыми массогабаритными характеристиками и стоимостью, а МИС СВЧ были не готовы к ее решению, и требовалось новое конструктивное решение для интегральных схем СВЧ.

Для преодоления недостатков ГИС СВЧ автором была предложена концепция создания гибридно-монолитных интегральных схемам, которые должны были обеспечить:

- 1) Короткий цикл изготовления и СВЧ параметры, сравнимые с ГИС СВЧ;
- Монолитную диэлектрическую плату, содержащую все пассивные (*R*, *L*, *C*) элементы, межсоединения и выводы;
- Возможность отбора плат и кристаллов активных компонентов по параметрам и внешнему виду;
- Высокую более 100 добротность индуктивных элементов, возможность настройки на максимальные СВЧ параметры, большой порядка 70 % выход годных;
- 5) Повышенную надежность за счет интеграции на монолитной диэлектрической плате всех конденсаторов и проволочных соединений;

6) Изготовление монолитной диэлектрической платы по групповой планарной технологии и прецизионной литографии, и большие объемы выпуска, сравнимые с МИС СВЧ.

Концепция ГМИС СВЧ:

- Вся пассивная часть ГМИС СВЧ, содержащая (*R*, *L*, *C*) элементы, межсоединения и выводы, выполняется на монолитной диэлектрической плате ГМИС СВЧ по групповой планарной технологии и прецизионной литографии;
- Навесными на плате ГМИС СВЧ являются только кристаллы активных компонентов, минимизированные по площади.

Предложенная концепция предлагала разделить процесс изготовления МИС СВЧ на два технологических процесса.

- Первый процесс изготовление монолитной диэлектрической платы ГМИС СВЧ, содержащей все пассивные элементы, включая и цепи питания, по групповой планарной технологии и прецизионной литографии, аналогичной МИС СВЧ.
- 2) Второй процесс изготовление навесных кристаллов активных компонентов (диодов, транзисторов и МИС СВЧ), минимизированных по площади. За счет малой площади на одной полупроводниковой пластине изготавливалось большее количество кристаллов, что позволяло повысить до 5...10 раз выход годных активных компонентов.

Платы и кристаллы отбирались по внешнему виду и НЧ, ВЧ и СВЧ параметрам и заведомо годные направлялись на сборку ГМИС СВЧ, поэтому после сборки и подстройки по НЧ и СВЧ параметрам обеспечивался выход годных гибридно-монолитных интегральных схем СВЧ порядка 70 %.

В разделе 1.5. показано, что в настоящее время по предложенной концепции созданы усилительные, преобразовательные и генераторные ГМИС СВЧ сантиметрового диапазона длин волн для высоконадежной бортовой аппаратуры. Была проведена классификация ГМИС СВЧ и определены направления исследования.

В разделе 1.6. показано, что расчет показателей безотказности ГМИС СВЧ выполнен по последовательной схеме надежности (резервирование отсутствует), поэтому отказ (внезапный или параметрический) любого элемента электрической схемы приводит к отказу ГМИС СВЧ. Оценка безотказности последовательной схемы задаётся совокупность N элементов схемы, каждый из которых характеризуется индивидуальным значением интенсивности отказов λ_i , а интенсивность отказов ГМИС СВЧ определяется как сумма интенсивностей отказов отдельных элементов.

Оценка надежности ГМИС СВЧ показала, что самым ненадежным компонентом является навесной ПТШ.

Сравнение показателей надежности ГМИС СВЧ с аналогичными ГИС СВЧ показала, что за счет применения навесных конденсаторов увеличивает интенсивность отказа пассивной части ГИС СВЧ в 9 раз, а наработка до отказа уменьшается приблизительно в 2 раза.

Таким образом, впервые предложена концепция создания ГМИС СВЧ, содержащих все элементы сложных пассивных цепей согласования и питания, выполненные в монолитном исполнении, и навесные кристаллы активных компонентов, которая позволяла производить ГМИС СВЧ с параметрами сравнимыми с аналогичными ГИС СВЧ, и объемом соизмеримым с МИС СВЧ.

Во второй главе проведено сравнение МПЛ и КЛЭ линий и выбрана оригинальная конструкции ГМИС СВЧ на основе копланарной линии и монолитной сапфировой платы, содержащей все пассивные (*R*, *L*, *C*) элементы, межсоединения и выводы. Проведено сравнение массогабаритных характеристик ГИС и ГМИС СВЧ. Разработаны конструктивнотехнологические принципы создания ГМИС СВЧ, оценена рассеиваемая мощность.

В разделе 2.1. проведено сравнение МПЛ, КЛЭ, КЛ линий и показано, что добротность КЛЭ на 50...60 % меньше чем МПЛ. При этом в МПЛ сигнальный и экранный проводники лежат с разных сторон подложки, поэтому включения шунтирующих необходимы для элементов отверстия. В КЛЭ сигнальный металлизированные И заземляюший проводники лежат в одной плоскости, поэтому для включения шунтирующих элементов металлизированные отверстия не нужны. КЛЭ имеет повышенную емкость за счет заземляющих проводников КЛЭ, а общая емкость складывается из двух емкостей: первая между центральным проводником и экраном, а вторая между центральным и заземляющими проводниками. Емкость между центральным проводником и экраном является паразитной емкостью и снижает добротность линии. Для уменьшения паразитной емкости автор предложил приподнять копланарную линию и ввести между экраном и подложкой воздушный зазор. В подвешенной КЛ паразитная емкость разбивается на две последовательно включенные емкости, одна из которых определяется диэлектрической проницаемостью подложки, а вторая воздушная. При этом общая емкость становится меньше наименьшей, а параметры КЛ слабо зависят от толщины подложки. Сравнивались волновое сопротивление, резонансная частота и добротность разомкнутых на конце отрезков МПЛ и КЛ длиной 3 мм ($\lambda/4$) на подложках поликора, сапфира и GaAs.

Сравнение показало, что добротность подвешенной КЛ с шириной проводника 50 мкм на сапфире выше на 30 % добротности МПЛ с шириной проводника 70 мкм на арсениде галлия. Поэтому для ГМИС СВЧ была выбрана подвешенная КЛ. Наличие воздушного зазора в подвешенной КЛ линии обеспечило слабую чувствительность параметров КЛ от толщины подложки и позволило использовать подложки толщиной 0.2...0.4 мм.

Подключение КЛ к измерительной установке было проблемой из-за устройств. Поэтому отсутствия контактных для экспериментального СВЧ потерь автором была исследования предложена конструкция интегральной схемы СВЧ, содержащей керамическую поликоровую рамку с микрополосковыми выводами и плату с КЛ, которая послужила основой для создания ГМИС СВЧ. Керамическая рамка с МПЛ выводами определяет

верхний предел рабочего диапазона частот. Для подложки поликора толщиной 0.5 мм критическая частота порядка 23 ГГц.

В разделе 2.2. предложено оригинальное конструктивное решение ГМИС СВЧ на основе подвешенной КЛ и монолитной сапфировой платы.

В этой конструкции, все сосредоточенные пассивные элементы и заземляющая металлизация, а также кристалл ПТШ расположены на одной сапфировой Существенную стороне платы. часть платы занимает заземляющая металлизация. Нижние обкладки блокировочных располагаются под металлизацией, а конденсаторов разделительные конденсаторы, резисторы, индуктивности и выводы формируются в окнах, вскрытых в металлизации. Расположение всех элементов ГМИС СВЧ на одной стороне отсутствие металлизированных платы. отверстий И металлизации обратной стороны, позволяет для изготовления сапфировой платы использовать все возможности современной групповой планарной технологии и прецизионной литографии. Периферийная часть сапфировой платы служит для обращенного монтажа в корпус, которым является керамическая рамка с микрополосковыми выводами. Керамическая рамка совместно с платой создают внутренний объем, который герметизирован сапфировой крышкой, а для отвода тепла ГМИС СВЧ установлена на металлическое основание, имеющее полость с воздушным зазором между платой и основанием. Для установки в модуль СВЧ предложены две конструкции ГМИС СВЧ – одна под винт, другая под пайку.

Приведена электрическая схема однокаскадной усилительной ГМИС СВЧ и показано, что при воздействии на выводы ГМИС СВЧ статического электричества и скачков напряжения приводят к выходу ПТШ из строя. Поэтому в практической схеме затворы ПТШ соединены с землей через малое сопротивление, а напряжение питания на ГМИС СВЧ подается через последовательный балластный резистор и шунтирующий стабилитрон. Блокировочный конденсатор в цепочке автосмещения ограничивает диапазон рабочих частот снизу и при емкости конденсатора 10 пФ нижняя рабочая

частота ГМИС СВЧ должна быть выше 3 ГГц, а при емкости конденсатора 100 пФ выше 0.3 ГГц.

В разделе 2.3. выбраны конструкции тонкопленочных пассивных *R*, *L*, *C* элементов ГМИС СВЧ и показано, что они должны обеспечить: планарность конструкции; малую занимаемую площадь; технологичность; малые потери на СВЧ; стабильность параметров; стойкость к воздействию повышенной температуре, в том числе термокомпрессии при 300...330 °C:

- *резисторы* танталовые, защищенные пленкой диэлектрика от окисления материала резистора в атмосфере;
- МДМ-конденсаторы двухобкладочные с обкладками из материала с высокой электропроводностью и диэлектрическим слоем, имеющим большую порядка 400 пФ/мм² удельную емкость и малый порядка 0.001 tgδ, с воздушными «мостами» по линии пересечения верхней обкладки с нижней для повышения пробивного напряжения;
- индуктивности высокодобротные сосредоточенные элементы преимущественно спиральные с площадью поперечного сечения проводника, выбранного с учетом скин-эффекта и электромиграции.

В разделе 2.4. проведен расчет массогабаритных характеристик ГМИС СВЧ. Сравнительный расчет занимаемой площади и массогабаритных характеристик ГИС и ГМИС СВЧ показал, что ГМИС СВЧ позволяют более 3 раз уменьшить площадь, занимаемую ГИС СВЧ, благодаря интеграции всех сосредоточенных пассивных (*R*, *L*, *C*) элементов на монолитной сапфировой плате. При этом за счет высокой добротности индуктивных элементов СВЧ параметры ГМИС СВЧ будут сравнимы с ГИС СВЧ.

В разделе 2.5. оценена максимальная рассеиваемая мощность ГМИС СВЧ.

Расчет выделяемой тепловой мощности проводился с помощью программы теплового расчета. При этом на монолитную сапфировую плату устанавливались кристаллы GaAs ПТШ в количестве 1...7 кристаллов, рассчитывалась выделяемая мощность и перегрев канала ПТШ в диапазоне

рабочих температур -60...+85 °С. Тепловой расчет показал, что для ГМИС СВЧ максимальная рассеиваемая мощность порядка 1 Вт.

В разделе 2.6. сформулированы конструктивно-технологические принципы создания ГМИС СВЧ:

- 1) Все пассивные сосредоточенные тонкопленочные элементы и кристаллы ПТШ располагаются на одной стороне сапфировой платы;
- Вся поверхность сапфировой платы металлизируется и является единой заземляющей плоскостью;
- Металлизация двухуровневая с диэлектрическими слоями SiO₂ и Ta₂O₅, при этом на первом уровне располагаются резисторы и нижние обкладки блокировочных конденсаторов;
- 4) Индуктивные и резистивные элементы, а также разделительные конденсаторы формируются в окнах, вскрытых металлизации;
- 5) Верхние обкладки конденсаторов и построечных элементы в ГМИС СВЧ соединяются со схемой «воздушными» мостами;
- 6) Для монтажа ГМИС СВЧ в корпус используется «обращенный монтаж»;
- 7) Максимальная рассеиваемая мощность порядка 1 Вт.

Впервые предложено оригинальное конструктивное решение для ГМИС СВЧ на основе КЛ, позволившее «заземляющую» металлизацию, все сосредоточенные пассивные элементы и кристаллы ПТШ расположить на одной монолитной сапфировой плате, не имеющей отверстий и металлизации обратной стороны и обеспечившее уменьшение более 3 раз массогабаритных характеристик по сравнению с аналогичными ГИС СВЧ.

<u>В третьей главе</u> оптимизированы процессы нанесения металлических и диэлектрических слоев SiO₂ и Ta₂O₅ для формирования МДМ-конденсаторов, стабильных резисторов и разработан технологический процесс изготовления пассивной части ГМИС СВЧ на монолитной сапфировой плате по групповой планарной технологии и прецизионной литографии. Создан сапфировый технологический базис для промышленного производства ГМИС СВЧ.

В разделе 3.1. показано, что ключевой задачей в технологии изготовления ГМИС СВЧ является формирование МДМ-конденсаторов с выходом годных более 90 %. Показано, что подложки поликора имеют большую шероховатость (Ra = 40 нм, Rz = 200 нм) и глубокие поры, не позволяющие изготавливать МДМ-конденсаторы. Арсенид галлия – дорогой, хрупкий, не технологичный. Наиболее подходящим оказался синтетический сапфир, имеющий шероховатость (Ra = 10 нм, Rz = 50 нм) и не имеющий технологичный и менее дорогой. Выбор материала пор, прочный, диэлектрического слоя в сильной степени влияет на потери, которые характеризуются tgδ И процент выхода годных тонкопленочных конденсаторов. Проведенное исследование пленок SiO_2 и T_2O_5 показало, что ВЧ-распылением, tgδ пленки. полученные имеют лучше 0.001. помощью Оптимизированы c метода планирования эксперимента технологические режимы напыления слоев SiO₂ и Ta₂O₅. Найдены математические уравнения, описывающие технологический процесс.

Решение математических уравнений позволило найти оптимальные технологические режимы ВЧ-напыления слоев SiO₂ и Ta₂O₅.

Исследовано влияния материала обкладок (медь, золото, алюминий) на параметры и выход годных МДМ конденсаторов и показано, что алюминий дает наибольший (более 90 %) выход годных. Поэтому базовым материалом нижней металлизации выбран алюминий, а верхней металлизации система алюминий-никель-золото.

Показано, что наибольшая вероятность выхода МДМ-конденсатора из строя – пробой по линии пресечения верхней обкладки с нижней обкладкой и для предотвращения пробоя целесообразно формировать «воздушный» мост. Предложена технология формирования «воздушного» моста с использование полоски фоторезиста с округлением краев резистивной маски при повышенной температуре задубливания.

Показано, что в процессе нанесения диэлектрических пленок SiO₂ и Ta₂O₅ наблюдалось значительное (более 20 %) повышение сопротивления

хромовых и титановых резисторов, а наименьшее повышение сопротивления наблюдалось у танталовых резисторов.

Показано, что наиболее чистые пленки получаются электроннолучевым испарением, которое выбрано базовым способом напыления проводящих и резистивных слоев в ГМИС СВЧ.

В разделе 3.2. создан технологический процесс изготовления пассивной части ГМИС СВЧ на монолитной сапфировой плате. Монолитные сапфировые платы изготавливались по групповой планарной технологии и прецизионной литографии на подложках диаметром 60 или 76 мм. Для разделения пластин на платы использовался лазерный скрайбер ЭМ-210. Разделенные монолитные сапфировые платы ГМИС СВЧ отбирались по внешнему виду, НЧ, ВЧ параметрам.

Технологический процесс обеспечивает выход годных сапфировых плат ГМИС СВЧ порядка 50 % и позволяет формировать тонкопленочные резисторы 10...10 000 Ом; индуктивности 0.02...20 мм; конденсаторы емкостью 0.1...100 пФ. Удельная емкость диэлектрической пленки SiO₂ – 100 пФ/мм², пленки Ta₂O₅ – 400 пФ/мм², а *tg* δ лучше 0.001.

В разделе 3.3. показано, что низкочастотные параметры ПТШ (крутизна, ток насыщения, напряжение отсечки и т.д.) и СВЧ параметры (усиление, выходная мощность, КПД и т.д.) имеют существенный разброс, поэтому кристаллы ПТШ отбирались по НЧ, ВЧ и СВЧ параметрам и внешнему виду и только годные устанавливаются на плату ГМИС СВЧ.

В разделе 3.4. показаны методы настройки ГМИС СВЧ по постоянному току и СВЧ параметрам с помощью подстраиваемых *R*, *L*, *C* элементов. Показано, что с учетом отбора монолитных сапфировых плат, кристаллов ПТШ и настройки выход годных ГМИС СВЧ более 70 %.

Копланарная конструкция монолитной сапфировой платы позволила изготавливать ее по групповой планарной технологии и прецизионной литографии, обеспечивающей высокую повторяемость параметров ГМИС СВЧ, малую трудоёмкость изготовления и стоимость. Одинаковая

конструкция ГМИС СВЧ и созданный сапфировый технологический базис, позволили изготавливать ГМИС СВЧ большой номенклатуры и различного функционального назначения на ограниченном количестве измерительного и испытательного оборудования.

<u>В четвертой главе</u> на основе оригинальной конструкции и созданного сапфирового технологического базиса в соответствии с концепцией и классификацией созданы маломощные узкополосные и широкополосные усилительные ГМИС СВЧ.

В разделе 4.1. При создании первой промышленной ГМИС СВЧ – узкополосного малошумящего усилителя Х-диапазона частот решено было отказаться от традиционного подхода, соединения двух однокаскадных усилителей в двухкаскадный усилитель, и поэтому схемное решение и расчет проводился для двухкаскадного усилителя на GaAs ПТШ. ГМИС СВЧ – двухкаскадный усилитель диапазона 8.5...9 ГГц имел коэффициент усиления более 15 дБ и коэффициент шума менее 3.5 дБ. В настоящее время диапазон рабочих частот узкополосных усилителей расширен до 7...14.6 ГГц и создан ряд промышленных ГМИС СВЧ с выходной мощностью порядка 10 мВт.

В разделе 4.2. Создана ГМИС СВЧ узкополосного двухкаскадного усилителя L-диапазона частот с последовательным питанием ПТШ, что связано с низкой рабочей частотой ГМИС СВЧ и необходимостью достижения малого коэффициента шума за счет применения ПТШ с увеличенной шириной затвора и большим рабочим током порядка 30 мА. ГМИС СВЧ в диапазоне 1.2...1.5 ГГц имела коэффициент усиления более 20 дБ и коэффициент шума менее 2 дБ. В настоящее время диапазон рабочих частот расширен до 1.2...1.7 ГГц и создан ряд промышленных узкополосных ГМИС СВЧ с выходной мощностью порядка 25 мВт.

Питание ГМИС СВЧ осуществлялось от источника положительной полярности с напряжением 5...9 В и подавалось через последовательный резистор и шунтирующий стабилитрон, а затворы ПТШ соединялись с землей через малое сопротивление для предотвращения выхода ПТШ из

строя при воздействии на выводы ГМИС СВЧ статического электричества и скачков источника питания.

В разделе 4.3. показано, что ПТШ имеют большие потенциальные расширению возможности ПО частотного диапазона. Для создания усилителей наиболее широкополосных оптимальной была схема С диссипативными согласующе-выравнивающими цепями, которые с одной стороны позволяют расширить полосу рабочих частот усилителя, а с другой уменьшают коэффициент усиления и увеличивают коэффициент шума.

Создана ГМИС СВЧ широкополосного трехкаскадного усилителя с диссипативными согласующе-выравнивающими цепями, которая в диапазоне 1...8.5 ГГц имела коэффициент усиления более 14 дБ и коэффициент шума менее 6.5 дБ.

В разделе 4.4. показано, что создана ГМИС СВЧ двухкаскадного усилителя диапазона 0.4...4.5 ГГц, имеющего коэффициент усиления более 10 дБ, коэффициент шума менее 5 дБ и выходную мощность более 15 мВт. В настоящее время диапазон рабочих частот усилителя расширен до 18 ГГц и создан ряд промышленных широкополосных усилительных ГМИС СВЧ.

В разделе 4.5. показано, что широкополосные усилительные ГМИС СВЧ создаются также по схеме с распределенным усилением (усилитель бегущей волны – УБВ) на основе МИС СВЧ. Создана ГМИС СВЧ широкополосного усилителя диапазона 1...12 ГГц, имеющего коэффициент усиления более 5 дБ, коэффициент шума менее 8 дБ и выходную мощность более 5 мВт. В настоящее время выходная мощность усилителя повышена до 25 мВт и создан ряд промышленных широкополосных ГМИС СВЧ.

На основе оригинальной конструкции и сапфирового технологического базиса был создан ряд промышленных маломощных узкополосных и широкополосных усилительных ГМИС СВЧ диапазона 0.4...20 ГГц с выходной мощностью менее 100 мВт на GaAs ПТШ.

<u>В пятой главе</u> на основе оригинальной конструкции и созданного сапфирового технологического базиса в соответствии с концепцией и

классификацией созданы маломощные преобразовательные и генераторные ГМИС СВЧ.

В разделе 5.1. показано, что преобразователи частоты строятся на однозатворных ПТШ и двухзатворных ПТШ (полевых тетродах). Проходная характеристика однозатворного ПТШ имеет слабо выраженную нелинейность. Поэтому преобразователи на однозатворных ПТШ имеют невысокую эффективность и работают с потерями. Преобразователи частоты на двухзатворных ПТШ (полевых тетродах) работают на линейном участке ВАХ и позволяют получить усиление сигнала преобразованной частоты. Показано, что для подавления частот сигнала и накачки необходимы балансные преобразователя частоты.

В разделе 5.2. при создании балансных преобразователей частоты возникла проблема получения двух сигналов, сдвинутых по фазе на 180°, на малой площади ГМИС СВЧ. Для решения проблемы была предложена схема балансного преобразователя частоты на однозатворном ПТШ на основе двух каскадов с разделенной нагрузкой и выходным усилителем. Была создана специальная МИС СВЧ аналогового балансного преобразователя частоты На основе МИС АБПЧ была создана ГМИС СВЧ (АБПЧ) на ПТШ. балансного преобразователя частоты. ГМИС СВЧ имела три СВЧ вывода: первый для входного сигнала, второй для накачки и третий для выхода преобразованной частоты. ГМИС СВЧ балансного преобразователя на преобразованной частоте 2...14 ГГц при частоте сигнала 2...12 ГГц и частоте накачки 0.2...2 ГГц, и мощности накачки менее 15 мВт обеспечивала потери преобразования порядка -3 дБ. В настоящее время диапазон рабочих частот балансного преобразователя частоты расширен до 17 ГГц и создан ряд промышленных ГМИС СВЧ преобразователей частоты.

В разделе 5.3. на основе МИС АБПЧ создана ГМИС СВЧ балансного смесителя частоты, которая на промежуточной частоте 0.01...2 ГГц, при частоте сигнала 2...12 ГГц, частоте гетеродина 2...12 ГГц, имеет потери преобразования менее 3 дБ. В настоящее время диапазон рабочих частот

балансного смесителя частоты расширен до 18 ГГц и создан ряд промышленных ГМИС СВЧ смесителей частоты.

В разделе 5.4. на основе МИС АБПЧ создана ГМИС СВЧ балансного умножителя частоты, которая умножает на 2 частоту входного сигнала 4...4.5 ГГц и на частоте выходного сигнала 8...9 ГГц имела потери преобразования 0 дБ. В настоящее время диапазон рабочих частот балансного умножителя частоты расширен до 18 ГГц и создан ряд промышленных ГМИС СВЧ умножителей частоты.

В разделе 5.5. на основе МИС АБПЧ (по схеме Миллера) создана ГМИС СВЧ балансного делителя частоты, которая делит на 2 частоту входного сигнала 6...8 ГГц и на частоте выходного сигнала 3...4 ГГц имела потери преобразования порядка -3 дБ. В настоящее время диапазон рабочих частот балансного делителя частоты расширен до 12 ГГц и создан ряд промышленных ГМИС СВЧ делителей частоты.

В разделе 5.6. по схеме Шембеля (емкостная трех точка) созданы генераторные ГМИС СВЧ, которые на несущей частоте 4.5...12 ГГц имели выходную мощность более 25 мВт, при этом фазовые шумы -90 дБ/Гц на частоте 10 кГц от несущей. В настоящее время фазовые шумы генератора частоты уменьшены до -105 дБ/Гц, а выходная мощность увеличена и создан ряд промышленных ГМИС СВЧ генераторов частоты.

На основе оригинальной конструкции и сапфирового технологического базиса был создан ряд промышленных маломощных преобразовательных и генераторных ГМИС СВЧ диапазона до 18 ГГц с выходной мощностью менее 100 мВт на GaAs ПТШ.

В шестой главе на основе сапфирового технологического базиса в соответствии с классификацией созданы узкополосные и широкополосные мощные ГМИС СВЧ мозаичной конструкции. Показано, что для повышения выходной мощности, необходимо было улучшить отвод тепла, и в первую очередь от ПТШ. Для этого пришлось пассивную плату ГМИС СВЧ

разделить на несколько плат и перейти к мозаичной конструкции аналогичной мозаичной конструкции ГИС СВЧ.

В разделе 6.1. созданы узкополосные ГМИС СВЧ мозаичной конструкции на сапфировых платах, которые в диапазоне 14.4...14.7 ГГц имели усиление более 6 дБ и выходную мощность порядка 50 мВт. В настоящее время диапазон рабочих частот усилителя расширен до 7...20.5 ГГц и создан ряд промышленных узкополосных ГМИС СВЧ мозаичной конструкции с выходной мощностью более 250 мВт на GaAs ПТШ.

В разделе 6.2. Созданы широкополосные ГМИС СВЧ мозаичной конструкции, которые в диапазоне 2...18 ГГц имели коэффициент усиления более 6 дБ и выходную мощность порядка 10 мВт. В настоящее время повышены коэффициент усиления до 12 дБ и выходная мощность до 50 мВт и создан ряд промышленных широкополосных ГМИС СВЧ мозаичной конструкции.

В разделе 6.3. для уменьшения массы и габаритов созданы ГМИС СВЧ мозаичной конструкции на алмазном основании и арсенидгаллиевых платах. ГМИС СВЧ – предварительный усилитель мощности (ПУМ) в диапазоне 9...10 ГГц имел коэффициент усиления более 13 дБ и выходную мощность более 0.5 Вт. В настоящее время диапазон рабочих частот расширен, повышены коэффициент усиления и выходная мощность и создан ряд промышленных ГМИС СВЧ с выходной мощностью более 0.6 Вт на GaAs ПТШ и МИС.

В разделе 6.4. На основе мозаичной конструкции и технологии изготовления создан ряд промышленных мощных усилительных (узкополосных и широкополосных) ГМИС СВЧ диапазона 2...18 ГГц с выходной мощностью до 0.6 Вт на GaAs ПТШ, и ряд мощных узкополосных усилительных ГМИС СВЧ с выходной мощностью до 17 Вт на GaN ПТШ.

Мозаичная конструкция и технология изготовления ГМИС СВЧ нашла применение на других предприятиях отрасли.

В седьмой главе показано, что общим недостатком мозаичной конструкции ГИС и ГМИС СВЧ является низкая теплопроводность платы не позволяющая размещать на плате кристаллы мощных ПТШ и МИС СВЧ.

В разделе 7.1. показано, что впервые в отечественной и зарубежной практике автором в 2012 г были предложены и созданы мощные ГМИС СВЧ, на монолитной алмазной плате из поликристаллической алмазной пленки – ПАП, имеющей: теплопроводность – более 1000 Вт/м·К и относительную диэлектрическую проницаемость – 5,7 ед. Зарубежное название ПАП (NCA – нано кристаллический алмаз). Сообщений о создании за рубежом аналогичных ГМИС СВЧ на одной алмазной плате пока не появились.

В разделе 7.2. показано, что впервые в отечественной и зарубежной практике автором в 2016 г предложена и создана оригинальная конструкция ГМИС СВЧ-SMD для поверхностного монтажа на печатную плату.

ГМИС СВЧ-SMD состоит из диэлектрического алмазного основания и объемной алмазной крышки. Отличительной особенностью ГМИС СВЧ-SMD является локальная металлизация на обратной стороне основания.

Конструкция ГМИС СВЧ-SMD является самосогласованной в диапазоне температур т.к. алмазное основание и объемная алмазная крышка изготавливаются из одинакового материала.

В разделе 7.3. теоретически и практически исследованы потери в МПЛ и КЛЭ на алмазной подложке из ПАП и было показано, что потери в ПАП меньше, чем в аналогичной микрополосковой линии на арсениде галлия.

В разделе 7.4. показано, что основными пассивными элементами ГМИС нового поколения являются резистивные, индуктивные и емкостные (*R*, *L*, *C*) элементы, МПЛ и КЛЭ линии, выводы. Поэтому выбирая их конструкции, использован опыт создания ГМИС СВЧ на сапфире. Особое внимание уделено конденсаторам, которые в усилителях мощности должны работать при повышенном напряжении и занимать малую площадь. Показано, что оптимальными для ГМИС СВЧ на алмазе являются многослойные *3D* конструкции конденсаторов.

В разделе 7.5. обоснован выбор материала подложки для ГМИС СВЧ, а именно поликристаллической алмазной пленка – ПАП, выращиваемой на поверхности жертвенного кремния из газовой фазы водорода и метана методом СVD в СВЧ плазме в виде гетеропластины ПАП-Si.

Согласованы требования технического задания на разработку и поставку гетеропластин ПАП-Si диаметром 57 мм и 50 мм. Показано, что гетеропластины ПАП-Si очень напряжены из-за разного теплового коэффициента линейного расширения – ТКЛР (10⁻⁶/°К), который для алмаза равен 1, а для кремния равен 5. Предложен технологический процесс разделения гетеропластины ПАП-Si и отделения целой пластины ПАП.

Стержневой задачей технологии изготовления ГМИС СВЧ на алмазе было формирование отверстий в алмазной подложке из ПАП по групповой планарной технологии. Исследованы методы: лазерного фрезерования, темплат метод и методом плазмохимического травления отверстий в ПАП и базовым выбран метод плазмохимического травления. Оптимизирован методом математического планирования эксперимента технологический процесс реактивного ионного травления отверстий в ПАП и найдено математическое уравнение, описывающие технологический процесс.

Найдены оптимальные технологические режимы травления отверстий в ПАП, обеспечивающие в плазме Ar, O₂, SF₆ скорость травления 1.1 мкм/мин.

Показано, что отверстия в ПАП имеют практически вертикальные стенки, для металлизации которых предложена и создана отечественная установка вакуумного напыления слоев хрома и меди из испарителей диаметром 100 мм с подогревом с помощью электронной пушки (U = 10 кB, P = 2.5 кBт). Скорость напыления меди порядка 5...6 мкм/мин, а расстояние до подложки 150 мм.

В разделе 7.6. описан технологический процесс изготовления плат ГМИС СВЧ на ПАП. Технологический процесс изготовления монолитных алмазных плат ГМИС СВЧ частично совпадает с базовым технологическим процессом изготовления сапфировых плат ГМИС СВЧ: танталовые резисторы; алюминиевая металлизация обкладок конденсаторов; прямая литография. Основное отличие – металлизированные отверстия в алмазной плате ГМИС СВЧ и верхняя металлизация титан-медь-никель-золото. Пассивные монолитные алмазные платы ГМИС СВЧ изготавливаются по групповой планарной технологии на подложках диаметром 50...57 мм.

Процесс изготовления основания ГМИС СВЧ-SMD из ПАП соответствует процессу изготовления алмазной платы ГМИС СВЧ с локальной металлизацией на наружной стороне основания.

В разделе 7.7. описан технологический процесс изготовления объемных алмазных крышек ГМИС СВЧ из ПАП на основе темплат метода, позволяющий в одном технологическом процессе изготавливать по групповой технологии крышки размерами 5×5 мм, 4×4 мм, 3×3 мм, 2×2 мм. Для разделения объемных алмазных крышек использовалась установка лазерного фрезерования.

В разделе 7.8. созданы ГМИС СВЧ на алмазе – однокаскадные усилители мощности Х-диапазона с выходной мощностью 5 Вт на GaN ПТШ, и ряд ГМИС СВЧ поверхностного монтажа диапазона 0.05...6.2 ГГц на МИС СВЧ. Для проведения сплошного неразрушающего контроля параметров ГМИС СВЧ поверхностного монтажа создано контактное устройство.

В разделе 7.9. исследовано влияние алмазной платы на температуру канала мощных GaAs, GaN ПТШ. Показано, что алмазная плата дает слабое охлаждение канала ПТШ при толщине клеевого слоя 10 мкм и теплопроводности 30 Вт/(м·К), однако при повышении толщины клеевого слоя наблюдается повышение температуры канала ПТШ.

Созданы оригинальные конструкции ГМИС СВЧ, в том числе поверхностного монтажа. Разработана технология изготовления монолитной алмазной платы с металлизированными отверстиями и объемной алмазной крышки на основе плазмохимического процесса травления отверстий.

<u>В восьмой главе</u> показана перспектива развития ГМИС СВЧ.

Показано, что для обеспечения производства ГИС, ГМИС и модулей СВЧ разработаны собственные GaAs ПТШ и МИС СВЧ, а для промышленного производства GaAs ПТШ, МИС СВЧ и пассивных плат ГМИС СВЧ создана пилотная линия.

В разделе 8.1. показано, что в зарубежных и отечественных ППМ АФАР с архитектурой 2D используется объединительная плата из многослойной керамики LTCC, имеющая малую теплопроводность порядка 20 Вт/м·К. Показано, что мировая тенденция развития ППМ АФАР – движение от модулей с архитектурой 2D к модулям с архитектурой 3D. Предложена конструкция ППМ АФАР с архитектурой 3D на ГМИС СВЧ на ГМИС СВЧ Показано, что использование алмазе. В качестве ППМ AΦAP c объединительной алмазной платы позволит создать архитектурой 3D и улучшить более 10 раз массогабаритные характеристики по сравнению с конструкциями ППМ АФАР архитектурой 2D.

В разделе 8.2. на основе анализа зарубежных и отечественных конструкций показана перспектива создания МИС СВЧ на алмазе. Предложен путь реализации Si, GaN транзисторов и МИС СВЧ на гетеропластине ПАП-Si, содержащей монокристаллические локальные мезаструктуры (кристаллы Si) кремния, имплантированные в объем ПАП.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СВЧ

В данной главе выработаны научные основы, проведен обзор и сравнение гибридно-интегральных схем (ГИС) СВЧ с монолитными интегральными схемами (МИС) СВЧ. Предложена концепция создания интегральных схем СВЧ нового типа, проведена классификация, определены направления исследований и оценена надежность.

1.1. Научные основы интегральных схем СВЧ

Длинные линии используются для передачи энергии электромагнитных колебаний от генератора (источника сигнала) к нагрузке (приемнику) [13]. Линия, физическая длина которой соизмерима с длиной распространяющихся колебаний, волны электромагнитных считается длинной линией. Линия рассматривается как цепная схема с бесконечно большим числом звеньев, электрические параметры которых бесконечно малы. Напряжение и ток в линии являются функцией двух независимых пространственной координаты определяющей переменных: xместо наблюдения, и времени t, определяющего место наблюдения (рис.1).



Рис. 1. Элементарный участок цепи с равномерно распределенными параметрами

Выделим элементарный участок линии длиной Δx находящийся на расстоянии *x* от начала. Пользуясь погонными параметрами *R*п, *L*п, *G*п, *C*п отнесенными к единице длины, представим элементарный участок линии в

виде последовательно включенных сопротивления $R\Delta x$ и индуктивности $L\Delta x$, и параллельно включенных $G\Delta x$ и емкости $C\Delta x$.

Обозначим: напряжение – U между нижним и верхним проводами в точке x; ΔU – приращение напряжения на участке x; ток – I в точке x; ΔI приращение тока на участке Δx .

Уравнения для приращений напряжения и тока на элементе длины Δx запишутся следующим образом.

$$-\Delta U = \left(RI + L\frac{dI}{dt}\right)\Delta x , \qquad (1)$$

$$-\Delta I = \left(G(U + \Delta U) + C\frac{d(U + \Delta U)}{dt}\right)\Delta x , \qquad (2)$$

Ввиду наличия двух независимых переменных (*x* и *t*) уравнения записываются в частных производных. По мере стремления Δx к нулю степень точности этих уравнений повышается, при этом величина второго порядка малости уравнения (2): $(G\Delta U + C \frac{d(\Delta U)}{dt})\Delta x$ может быть опущена. Разделив обе части уравнений (1) и (2) на Δx и перейдя к пределу $\Delta x = 0$, получим дифференциальные уравнения линии.

$$-\frac{\partial U}{\partial x} = RI + L\frac{\partial I}{\partial t},$$

$$-\frac{\partial I}{\partial x} = GU + C\frac{\partial U}{\partial t},$$
(3)

Эти уравнения в литературе называют телеграфные уравнения.

Решение телеграфных уравнений дает функциональные зависимости напряжения и тока от переменных *x* и *t*.

При периодическом режиме под воздействием приложенного к линии гармонического напряжения в любой точке линии напряжение и ток изменяются гармонически с частотой источника.

Комплексные действующие значения напряжения и тока на расстоянии x от начала координат обозначим U = U(x) и I = I(x).

Применяя комплексную форму записи, получаем на основе (3) телеграфные уравнения.

$$-\frac{dU}{dx} = I(R + j\omega L) , \qquad (4)$$
$$-\frac{dI}{dx} = U(G + j\omega C) ,$$

Ввиду того, что комплексные величины U и I не зависят от t и являются только функциями x, при переходе от уравнений (3) к (4) частные производные по x заменены обыкновенными.

Исключив из системы уравнений ток *I*, получаем уравнение относительно *U*, а исключив из системы уравнений напряжение *U*, получаем уравнение относительно *I*.

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C)U, \qquad (5)$$
$$\frac{d^2 I}{dx^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C)I,$$

Квадратный корень из комплексного множителя при *U* и *I* обозначим *γ* и назовем коэффициентом распространения.

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta , \qquad (6)$$

С учетом этого уравнения (5) можно записать в следующем виде.

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = \gamma^2 U , \qquad (7)$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = \gamma^2 I ,$$

Получились одинаковые однородные линейные дифференциальные уравнения второго порядка.

Решение первого из них имеет вид.

$$U = A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x} , \qquad (8)$$

где *A*₁ и *A*₂ – амплитуды напряжений.

Ток проще всего находится подстановкой (8) в уравнение (4).

$$I = \frac{1}{(R+j\omega L)} (A_1 \gamma e^{-\gamma x} - A_2 \gamma e^{\gamma x}) =$$

$$= \frac{\sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}}{(R+j\omega L)} (A_1 e^{-\gamma x} - A_2 e^{\gamma x}) = \frac{A_1 e^{-\gamma x} - A_2 e^{\gamma x}}{\sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}},$$
(9)

Обозначим $Z_B = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$ – волновое сопротивление линии. Получим $I = \frac{1}{Z_B} (A_1 e^{-\gamma x} - A_2 e^{\gamma x})$.

Подставим $\gamma = \alpha + j\beta$ в уравнения тока и напряжения, и получим.

$$U = A_1 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} + A_2 e^{\alpha x} e^{j\beta x} , \qquad (10)$$
$$I = \frac{1}{Z_B} \left(A_1 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} - A_2 e^{\alpha x} e^{j\beta x} \right) ,$$

Мгновенное значение напряжения в точке *x* равно мнимой части выражения $\sqrt{2Ue^{-j\omega t}}$.

$$U(x,t) = Im(\sqrt{2} \times A_1 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} e^{-j\omega t} + \sqrt{2} \times A_2 e^{\alpha x} e^{j\beta x} e^{j\omega t}) = (11)$$

$$\sqrt{2}|A_1|e^{-\alpha x} \times \sin(\omega t + \varphi_1 - \beta x) + \sqrt{2}|A_2|e^{\alpha x} \times \sin(\omega t + \varphi_2 + \beta x),$$

Величины φ_1 и φ_2 – аргументы комплексных величин A_1 и A_2 .

Таким образом, мгновенное значение напряжения в любой точке линии слагается из двух функций. Если считать момент времени *t* фиксированным и рассматривать изменение мгновенного напряжения вдоль линии от координаты *x*, то получим затухающую гармоническую волну напряжения, амплитуда, которой убывает с ростом координаты *x*, т.е. по мере удаления от начала линии к концу.

Величина *α* – коэффициент затухания, характеризует изменение амплитуды волны на единицу длины линии; величина *β* – коэффициент фазы, характеризует изменение фазы на единицу длины линии.

Убывание амплитуды волны обуславливается потерями в линии, а изменение фазы конечной скоростью распространения электромагнитных волн. Коэффициенты α и β входят в комплексный параметр $\gamma = \alpha + j\beta$, который характеризует распространение волны напряжения и тока в линии.

Расстояние между двумя точками линии, в которых фазы рассматриваемой слагающей напряжения различаются на 2π , обозначается λ и называется длиной волны напряжения.
$$(\omega t + \varphi_1 - \beta x) - (\omega t + \varphi_1 - \beta (x + \lambda)) = 2\pi$$
 (12)
Откуда длина волны $\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$, а коэффициент фазы $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Электромагнитная волна, перемещающаяся от начала линии к концу носит название прямой (падающей) волной. Скорость перемещения падающей волны вдоль линии называется фазовой скоростью волны – v_{γ} , которая определяется как скорость перемещения точки, фаза колебания в которой остается постоянной.

Это условие записывается для прямой волны в виде.

$$\omega t + \varphi_1 - \beta x = const$$
, тогда $\frac{d}{dt}(\omega t + \varphi_1 - \beta x) = 0$. (13)
Следовательно фазовая скорость будет $\frac{dx}{dt} = v_{\gamma} = \frac{\omega}{\beta}$,

Аналогичное исследование второго слагаемого выражения (11) показывает, что для произвольного момента времени она представляет синусоидальную волну, амплитуда которой $\sqrt{2}|A_2|e^{\alpha x}$ взрастает с увеличением координаты *x*, т.е. по мере удаления от начала линии к ее концу. Электромагнитная волна, которая перемещается от конца линии к ее началу, называется обратной (отраженной) волной.

Итак, мгновенное напряжение можно рассматривать как сумму двух волн, движущихся в противоположных направлениях, причем каждая затухает в направлении движения.

На основании (12) и (13) можно записать.

$$\beta = \frac{\omega}{\nu_{\gamma}} = \frac{2f\pi}{\nu_{\gamma}} = \frac{2\pi}{\lambda}, \lambda = \frac{\nu_{\gamma}}{f} = \nu_{\gamma}T, где: T - период,$$
(14)
при этом $\nu_{\gamma} = \lambda f.$

За время равное периоду, как падающая, так и отраженная волна перемещаются на расстояние равное длине волны.

Возвращаясь к уравнениям (8) и (9) и запишем прямую и обратную волну в комплексной форме.

$$U = U_{\pi} + U_o , \qquad (15)$$

$$I = (U_{\Pi}/Z_B) + (U_o/Z_B) = I_{\Pi} - I_o$$
,
где: $U_{\Pi} = A_1 e^{-\gamma x}$, $U_o = A_2 e^{\gamma x}$,

Напряжение и ток прямой и обратной волн связаны законом Ома.

$$U_{\rm n}/I_{\rm n} = U_o/I_o = Z_B \tag{16}$$

Это соотношение объясняет смысл названия Z_B – волновое сопротивление. Амплитуды напряжений A_1 и A_2 входящие в уравнения (8) и (9) находятся в зависимости от напряжения и тока в начале линии (граничные условия), если они заданы.

При
$$x = 0$$
, $U(0) = U_1 = A_1 + A_2$, (17)
 $Z_B I(0) = Z_B I_1 = A_1 - A_2$,
откуда: $A_1 = \frac{U_1 + Z_B I_1}{2}$, $A_2 = \frac{U_1 - Z_B I_1}{2}$,

Введем понятие коэффициента отражения волны в начале линии.

$$\Gamma_1 = \frac{U_o(0)}{U_{\Pi}(0)} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{U_1 - Z_B I_1}{U_1 + Z_B I_1} = \frac{Z_1 - Z_B}{Z_1 + Z_B},$$
(18)

где: $Z_1 = U_1/I_1$ – входное сопротивление линии.

Аналогично, если заданы граничные условия в конце линии, то удобнее отсчитывать расстояние от конца линии, приняв координату (l - x). Заменяя в уравнениях (8) и (9) координату x на (l - x) и используя заданные граничные условия: $U(l) = U_2$; $I(l) = I_2$, получаем для A_1 и A_2 следующие выражения.

При
$$x = l$$
, $U(l) = U_2 = A_1 + A_2$, (19)
 $Z_B I(l) = Z_B I_2 = A_1 + A_2$,
 $A_1 = \frac{U_2 + Z_B I_2}{2} e^{\gamma l}$, $A_2 = \frac{U_2 - Z_B I_2}{2} e^{-\gamma l}$,

аналогично предыдущему: $\Gamma_2 = \frac{U_o(l)}{U_{\Pi}(l)} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{Z_2 - Z_B}{Z_2 + Z_B}$,

где: $Z_2 = U_2/I_2$ – сопротивление на конце линии.

Таким образом, коэффициент отражения Г равен отношению напряжений отраженной и падающей волн.

По линии передается энергия электромагнитной волны, потому квадрат коэффициента отражения $\Gamma^2 = U_o^2/U_n^2$ дает отношение мощностей

отраженной и падающей волн. При коэффициенте отражения не равном нулю $\Gamma \neq 0$ в линии устанавливается режим стоячих волн, и образуются узлы и пучности, т.е. точки, в которых напряжения и токи максимальны. Узлы напряжения совпадают с пучностями тока, а пучности напряжения совпадают с узлами тока. В пучности напряжение достигает максимальной величины U_{max} , а ток минимальной, а в узле напряжение достигает минимальной U_{min} величины, а ток максимальной. Отношение напряжения в пучности напряжения к напряжению в узле называется коэффициентом стоячей волны напряжения и обозначается КСВН = $\frac{U_{max}}{U_{min}}$.

Если КСВН = 1, то в линии нет стоячих волн, при КСВН > 1 в линии есть стоячие волны, при этом связь между КСВН = $\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}$.

Если сопротивление $Z_{\rm H} = Z_{\rm R}$ равно нагрузки волновому сопротивлению линии, то коэффициент отражения в линии равен $\Gamma = 0$, а КСВН = 1. При этом в линии имеется только одна прямая волна, а обратная волна отсутствует. Это важное свойство реализуется в линиях связи, отражения в которых не желательны потому, что отражения связаны с потерей энергии в сопротивлении *R* и проводимости *G*. При этом если сопротивление источника питающего линию не равно волновому сопротивлению линии, то отраженная волна, достигшая начала линии, претерпевает повторное отражение и идет дополнительная потеря энергии. Происходящая вследствие этого потеря энергии снижает общий КПД линии передачи. Поэтому для передачи по линии электромагнитной энергии без потерь необходимо выполнить условие $Z_{\Gamma} = Z_B = Z_{H}$.

При согласовании нагрузки с линией, выражения (19) упрощаются, с учетом того, что $Z_B I_2 = U_2$.

$$U = U_2 e^{\gamma x} ; I = I_2 e^{\gamma x} , \qquad (20)$$

Эти выражения показывают, что при перемещении точки наблюдения вдоль линии, нагруженной согласовано на конце в направлении от конца к началу линии, модуль напряжения возрастает в $e^{\alpha x}$ раз, а фаза – на βx

радиан. Выражения (20) показывают, что при согласованной нагрузке геометрическим местом конца вектора напряжения *U* является логарифмическая спираль.

Характеристическими параметрами линии являются коэффициент затухания α и коэффициент фазы β и волновое сопротивление Z_B , которые в свою очередь выражаются через параметры линии и частоту.

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \sqrt{RG - \omega^2 LC + j\omega (LG + CR)} = \alpha + j\beta$$
, (21)
из выражения следует, что:

$$a^2 + j2\alpha\beta - \beta^2 = RG - \omega^2 LC + j\omega(LG + CR),$$
 откуда:
 $a^2 - \beta^2 = RG - \omega^2 LC$; $2\alpha\beta = \omega LG + \omega CR$,

Совместное решение этих уравнений дает значения α и β .

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right) \left(RG - \omega^2 LC + (R^2 + \omega^2 L^2) (G^2 + \omega^2 C^2) \right)}, \\ \beta &= \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right) \left(\omega^2 LC - RG + (R^2 + \omega^2 L^2) (G^2 + \omega^2 C^2) \right)}, \end{aligned}$$

Полученные выражения показывают, что α и β в общем случае зависят от частоты. При этом коэффициент затухания изменяется в ограниченных пределах, а коэффициент фазы растет с частотой. Выражения (21) не удобны для практического использования ввиду их громоздкости.

Сопротивление *R* мало по сравнению с ωL , а проводимость *G* ничтожно мала по сравнению с ωC , поэтому при допущении ($\omega L \gg R$) и ($\omega C \gg G$) получаем.

$$\alpha \approx \left(\frac{R}{2}\right) \sqrt{\frac{C}{L}} + \left(\frac{G}{2}\right) \sqrt{\frac{L}{c}}; \quad \beta = \omega \sqrt{LC} .$$
⁽²²⁾

Эти формулы представляют собой пределы, к которым стремятся коэффициент затухания и коэффициент фазы с ростом частоты.

Фазовая скорость это предельная фазовая скорость при большой частоте $v_{\gamma} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c^2}{\epsilon \mu} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$. При этом $\sqrt{LC} = \frac{\sqrt{\epsilon \mu}}{c}$, где с – скорость света; ϵ и μ диэлектрическая и магнитная проницаемость среды.

При нулевой частоте $\alpha = \sqrt{RG}$; $\beta = 0$, волновое сопротивление линии будет $Z_B = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} = \sqrt{\frac{R}{G}}$, а при $\omega = \infty$, $Z_B = \sqrt{\frac{L}{C}}$.

Запишем уравнения (20) с помощью гиперболических функций.

$$U = U_2 e^{\gamma x} = U_2 \cosh(\gamma x) + Z_B I_2 \sinh(\gamma x) ; \qquad (23)$$
$$I = I_2 e^{\gamma x} = I_2 \cosh(\gamma x) + \left(\frac{1}{Z_B}\right) U_2 \sinh(\gamma x) ,$$

В линии без потерь уравнения длинной линии (24) с гиперболическими функциями преобразуются в тригонометрические функции.

$$U = U_2 \cos(\beta x) + Z_B I_2 \sin(\beta x); \qquad (24)$$
$$I = I_2 \cos(\beta x) + \left(\frac{1}{Z_B}\right) U_2 \sin(\beta x),$$

В линии без потерь: $\alpha = 0$; $\beta = \omega \sqrt{LC}$; $\nu_{\gamma} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. При этом отношение мгновенных значений напряжения и тока в любой точке линии равно.

$$\frac{U}{I} = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = Z_B$$
, откуда $\left(\frac{Li^2}{2}\right) = \left(\frac{Cu^2}{2}\right)$, при этом $W = \left(\frac{Li^2}{2}\right) + \left(\frac{Cu^2}{2}\right)$, (25)

Следовательно, на любом отрезке линии без искажений, нагруженной согласованно, в каждый момент времени энергия магнитного поля равна энергии электрического поля. По линии передается электромагнитная волна с энергий *W* равная сумме энергий магнитного и электрического поля, а напряжения и токи являются следствием передачи энергии *W*.

Найдем входное сопротивление отрезка линии без потерь длиной l. Для этого запишем уравнение (25) при x = l.

$$U = U_2 \cos(\beta l) + Z_B I_2 \sin(\beta l); \qquad (26)$$
$$I = I_2 \cos(\beta l) + \left(\frac{1}{Z_B}\right) U_2 \sin(\beta l),$$

Разделим напряжение на ток и обозначим $Z_{BX} = U/I$ и $Z_{H} = U_2/I_2$. $Z_{BX} = \frac{U}{I} = \frac{U_2 \cos(\beta l) + Z_B I_2 \sin(\beta l)}{I_2 \cos(\beta l) + (\frac{1}{Z_B})U_2 \sin(\beta l)} = \frac{U_2 + Z_B I_2 \tan(\beta l)}{I_2 + (\frac{1}{Z_B})U_2 \tan(\beta l)} = Z_B \left(\frac{Z_H + Z_B \tan(\beta l)}{Z_B + Z_H \tan(\beta l)}\right);$ $\beta = \frac{2\pi}{\lambda};$ и тогда $Z_{BX} = Z_B \left(\frac{Z_H + Z_B \tan(\frac{2\pi}{\lambda}l)}{Z_B + Z_H \tan(\frac{2\pi}{\lambda}l)}\right)$, где l длина линии. Таким образом, входное сопротивление линии зависит от длины линии, при этом сопротивление нагрузки трансформируется во входное сопротивление линии и поэтому линия может использоваться в качестве согласующего устройства между генератором и нагрузкой если $Z_{\Gamma} \neq Z_{H}$. Если сопротивление Z_{H} активно, то входное сопротивление линии длиной $l = \frac{\lambda}{4}$ также активно, при этом для согласования волновое сопротивление линии Z_{B} выбирается равным среднему геометрическому двух согласуемых сопротивлений генератора и нагрузки.

$$Z_B = \sqrt{Z_{\rm r} Z_{\rm H}} \,, \tag{27}$$

В случае короткого замыкания линии входное сопротивление линии без потерь длиной $l < \frac{\lambda}{4}$, имеет индуктивный характер, а в случае холостого хода линии входное сопротивление линии без потерь длиной $l < \frac{\lambda}{4}$, имеет емкостной характер. При холостом ходе линии длиной $l = \frac{\lambda}{4}$ наступает резонанс напряжений и входное сопротивление линии $Z_{\rm BX} \approx 0$, а линия ведет себя как последовательный колебательный контур, а при коротком замыкании линии длиной $l = \frac{\lambda}{4}$ наступает резонанс токов и входное сопротивление линии $Z_{\rm BX} \approx \infty$, а линия ведет себя как параллельный колебательный контур. На рис. 1 показаны эквивалентные схемы отрезков линии с потерями длиной $l = \frac{\lambda}{4}$ соответствующие последовательному и параллельному колебательному контуру.



Рис. 2. Эквивалентная схема отрезка линии длиной $l = \frac{\lambda}{4}$ разомкнутого на конце (*a*); замкнутого на конце (*б*)

Отрезок линии длиной $l = \frac{\lambda}{4}$ разомкнутый на конце (рис. 1 а) рассматривается как последовательный колебательный контур, в котором при резонансе возникает резонанс напряжений, а ток контура достигает своего максимального значения.

Запишем уравнение для последовательного контура (рис. 1 а), как сумму падений напряжений на участках цепи. При допущении ($\omega L \gg R$) и ($\omega C \gg G$), сопротивление R мало по сравнению с ωL , а проводимость G ничтожно мала по сравнению с ωC .

$$U = I\left(R + j\left(\omega L - \left(\frac{1}{\omega C}\right)\right)\right),$$
при резонансе $\omega L = \left(\frac{1}{\omega C}\right).$ (28)

Входное сопротивление последовательного контура $Z_{BX} = \frac{U}{I} = R$, равно сопротивлению потерь в линии, при условии, что потери в диэлектрике малы *R* определяется омическими потерями линии.

Из выражения $\omega L = \left(\frac{1}{\omega C}\right)$ найдем резонансную частоту последовательного резонансного контура $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

В контуре без потерь $Z_B = \sqrt{\frac{\omega L}{\omega c}}$, при резонансе $Z_B = \omega L = \frac{1}{\omega c} = \sqrt{\frac{L}{c}}$, а добротность контура $Q = \frac{Z_B}{R} = \frac{\left(\sqrt{\frac{L}{c}}\right)}{R}$.

Отрезок линии длиной $l = \frac{\lambda}{4}$ замкнутый на конце (рис. 1 б) рассматривается как параллельный колебательный контур, в котором при резонансе возникает резонанс токов, а напряжение на контуре достигает своего максимального значения. Для создания параллельного колебательного контура преобразуем последовательное соединение элементов R и L в параллельное соединение, т.е. последовательное комплексное сопротивление $Z = R + j\omega L$ преобразуем в параллельную комплексную проводимость.

$$Y = G - jB = \frac{R - j(\omega L)}{R^2 + (\omega L)^2} = \left(\frac{R}{(\omega L)^2}\right) - j\left(\frac{1}{\omega L}\right),\tag{29}$$

при условии, что $R \ll \omega L$, и $R^2 = 0$.

С учетом (29) запишем уравнение для параллельного контура (рис. 1 б), как сумму токов в ветвях контура. При допущении ($\omega L \gg R$) и ($\omega C \gg G$), сопротивление *R* мало по сравнению с ωL , а проводимость *G* ничтожно мала по сравнению с ωC , поэтому.

$$I = U\left(\left(\frac{R}{(\omega L)^2}\right) + j\left((\omega C) - \left(\frac{1}{\omega L}\right)\right)\right),$$
при резонансе $\left(\omega C = \left(\frac{1}{\omega L}\right)\right).$ (30)

Из выражения $\left(\omega C = \left(\frac{1}{\omega L}\right)\right)$ найдем резонансную частоту параллельного контура $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Резонансные частоты последовательного и параллельного контура одинаковы при одинаковых значениях элементов *L* и *C*.

Соответственно
$$Z_B = \omega L = \frac{1}{\omega c} = \sqrt{\frac{L}{c}}$$
, а добротность контура $Q = \frac{Z_B}{R} = \frac{\left(\sqrt{\frac{L}{c}}\right)}{R}$.

Входное сопротивление параллельного контура.

$$Z_{\rm BX} = \frac{(\omega L)^2}{R} = \frac{Z_B^2}{R} = Z_B Q \ .$$

Отрезки длинной линии обладают трансформирующими и резонансными свойствами и их можно использовать для трансформации сопротивлений и создания последовательного и параллельного колебательного контура с высокой добротностью.

Выражение (22) не следует понимать, что *α* не зависит от частоты. Омическое сопротивление *R* рассчитывается исходя из удельного сопротивления материала слоя и геометрических размеров линии.

$$R = \left(\rho \frac{l}{s}\right) \,, \tag{31}$$

Где: *R* – омическое сопротивление индуктивного проводника, Ом;

ρ – удельное сопротивление проводника, Ом×м; *l* – длина индуктивного проводника, м; *s* – площадь поперечного сечения проводника, м².
 В качестве материала проводника длинной линии целесообразно выбирать металлы, имеющие малое удельное сопротивление (табл. 1).

Таблица 1

N⁰	Материал	Удельное	Удельная
п.п.	проводника	сопротивление,	проводимость,
		мкОм×м	Siemens/M
1.	Серебро	0.015	6.6×10^{7}
2.	Медь	0.017	5.8×10^{7}
3.	Золото	0.023	4.3×10^{7}
4.	Алюминий	0.026	3.8×10^{7}
5.	Никель	0.068	1.4×10^{7}

На высоких частотах начинает сказываться скин-эффект, который уменьшает площадь проводника, заставляя весь ток протекать по поверхности проводника в пределах 3...4 скин-слоев.

Глубина скин-слоя Δ – расстояние, при прохождении которого волной напряженность ее поля в проводнике уменьшается в *е* раз (2,718 раза). Для расчёта глубины скин-слоя в металле используется следующая формула [14].

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \mu_0 \, \sigma}}\,,\tag{32}$$

Где: Δ – глубина скин-слоя, м; f – частота, Гц; μ – относительная магнитная проницаемость, близка к единице для пара- и диамагнетиков; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума равна $4\pi 10^{-7}$ Гн/м; σ – удельная проводимость металла, Siemens/м.

Для уменьшения потерь на СВЧ целесообразно выбирать материалы проводников с высокой электропроводностью.

Для уменьшения потерь на СВЧ толщина металлизации проводников длинной линии должна быть порядка 3...4 скин-слоя.

Толщина одного скин-слоя на частотах 1 ГГц, 10 ГГц и 100 ГГц приведена в табл. 2.

Таблица 2

№ п.п.	Материал	Удельная	Частота, ГГц		
	проводника	проводимость,	1	10	100
		Siemens/м	Толц	цина скин-сл	юя, мкм
1.	Серебро	6.6×10^{7}	1.96	0.62	0.19
2.	Медь	5.8×10^{7}	2.08	0.66	0.21
3.	Золото	4.3×10^{7}	2.43	0.77	0.24
4.	Алюминий	3.8×10^{7}	2.59	0.82	0.26
5.	Никель	1.4×10^{7}	4.23	1.34	0.42

Основные параметры и формулы, описывающие отрезки длинной линии, которые могут быть применены для расчета двухпроводной, коаксиальной, микрополосковой (МПЛ) и копланарной (КЛ) линий.

Отрезки МПЛ и КЛ линий используются для создания маломощных и мощных интегральных схем СВЧ, в которых с повышением степени интеграции и выходной мощности интегральных схем СВЧ, уменьшением поперечного сечения проводников повышается плотность тока в проводниках и появляется проблема электромиграционной стойкости проводников. Эффект электромиграции влияет на надёжность работы интегральных схем.

В конце 60-х годов Блэк вывел эмпирический закон времени жизни проводников MTTF (Mean Time to Failure – среднее время до отказа), который также учитывает и явление электромиграции [15-18].

$$MTTF = A(J^{-n})e^{\frac{Ea}{kT}}$$
(33)

где: А – константа, основанная на свойствах материала; *J* – плотность тока через проводник; *E*a – энергия возбуждения иона (0.7 эВ для алюминия); *k* – постоянная Больцмана; *T* – температура; n – эмпирический коэффициент, согласно Блэку обычно принимаемый равным двум.

Из этого уравнения вытекает, что время жизни проводника зависит от его геометрических размеров, частоты, плотности тока, и температуры их значения для различных материалов приведены в табл. 3.

Таблица 3

№ п.п.	Материал	Удельная	Удельная	Температура
	проводника	проводимость,	теплопроводность,	плавления, °С
		Siemens/м	Вт∕м∙°С	
1.	Серебро	6.6×10^{7}	453	960
2.	Медь	5.8×10^7	406	1083
3.	Золото	4.3×10^{7}	312	1063
4.	Алюминий	3.8×10^7	218	660
5.	Никель	1.4×10^{7}	75	1453

Традиционным материалом проводников современной микроэлектроники является алюминий. Однако чистая медь выдерживает в 5 раз большую плотность тока по сравнению с алюминием при равных требованиях к надёжности работы интегральной схемы. Это связано с тем, что меды обладает лучшей проводимостью и теплопроводностью, а также более высокой температурой плавления. Современные интегральные схемы крайне редко выходят из строя по причине электромиграции. Потому, что производители имеют в своем распоряжении САПР, поддерживающий анализ топологии с точки зрения электромиграции. Все современные интегральные схемы спроектированы с учётом требований по электромиграции 100 000 часов при максимальной допустимой для схемы частоте и температуре. Дизайн центр НПК-4 предприятия АО «НПП «Исток» им. Шокина» имеет в своем распоряжении САПР, в котором на основе зарубежного и отечественного опыта установлены нормы на предельные плотности тока в проводниках, изготовленных из различных материалов табл. 4.

№ п.п.	Материал проводника	Удельная плотность тока,	
		мА/мкм ²	
1.	Медь	12	
2.	Золото	12	
3.	Алюминий	0.10.2	

Таким образом, для МПЛ и КЛ линий необходимо выбирать толщину проводника с учетом скин-эффекта, а ширину проводника с учетом электромиграции.

Для расчета параметров отрезка любой линии длиной $l = \frac{\lambda}{4}$ необходимо знать погонные параметры линии *R*, *L*, *C*.

Для отрезка линии без потерь волновое сопротивление линии

$$Z_B = \sqrt{(\omega L) \times (\frac{1}{\omega C})}$$
, при резонансе $Z_B = \omega L = \frac{1}{\omega C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$.
Добротность отрезка линии $Q = \frac{Z_B}{R} = \frac{(\sqrt{\frac{L}{C}})}{R}$, затухание $1/Q$.
Угловая (круговая) частота $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, при этом $\omega = 2\pi f$.

Резонансная частота $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Для расчета входного сопротивления отрезка линии длиной *l*

$$Z_{\rm BX} = Z_B \left(\frac{Z_{\rm H} + Z_B \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda}l\right)}{Z_B + Z_{\rm H} \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda}l\right)} \right)$$
 необходимо знать длину волны λ в линии.

Скорость волны в пустоте равна $c = f\lambda$. Тогда длина волны в пустоте равна $\lambda_B = \frac{c}{f}$.

Скорость волны в линии замедляется и соответственно уменьшается длина волны $\lambda = \frac{\lambda_B}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon\mu}}$, где: с – скорость волны в пустоте 3 × 10⁸ м/сек; f – рабочая частота; ε и μ диэлектрическая и магнитная проницаемость среды. $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ – коэффициент замедления, при $\mu \approx 1$ получим $n = \sqrt{\epsilon} = \frac{c}{f\lambda}$.

Для того, чтобы найти коэффициент замедления необходимо измерить резонансную частоту разомкнутого отрезка линии длиной $l = \frac{\lambda}{4}$. По известной резонансной частоте f и длине отрезка l можно найти коэффициент замедления $n = \sqrt{\varepsilon} = \frac{c}{f\lambda} = \frac{c}{f(4l)}$ и соответственно длину волны в линии $\lambda = \frac{\lambda_B}{\sqrt{\varepsilon_H}} = \frac{c}{f_{\lambda}/\varepsilon_H}$.

Полевые СВЧ транзисторы с барьером Шотки (ПТШ) являются планарными тонкопленочными элементами. Преимущественно для их изготовления используется эпитаксиальная пленка арсенид галлия (GaAs) с низкой концентрацией примеси, выращенная на поверхности полуизолирующей монокристаллической полупроводниковой подложки GaAs Наряду с GaAs в последние годы используется пленка нитрида (GaN) поверхности полуизолирующей монокристаллической выращенная на полупроводниковой подложки из карбида кремния (SiC). Эпитаксиальная пленка имеет толщину порядка десятых долей микрона. Для создания транзистора эпитаксиальная пленка разделяется на мезаструктуры, т.е. проводящие элементы на поверхности подложки. На поверхности каждой мезаструктуры изготавливаются ПТШ в виде планарной структуры, содержащей три электрода исток, затвор и сток, при этом электроды исток и сток, омические контакты расположены на краях эпитаксиальной пленки, а электрод затвора барьер Шотки между ними. При донорном легировании эпитаксиальной пленки основными носителями заряда в эпитаксиальной пленке являются электроны. Между электродами исток и сток возникает проводящий канал и при подаче положительного напряжения на сток в появляется ток, который называется Между канале током стока. металлическим затвором и эпитаксиальной пленкой за счет контакта металлполупроводник образуется объемный заряд, т.к. работа выхода электронов из металла выше, чем работа выхода и полупроводника. Объемный заряд направлен вглубь эпитаксиальной пленки и поэтому уменьшает толщину канала при нулевом напряжении на затворе относительно истока. При

подаче управляющего напряжения на затвор относительно истока становится возможным управлять током канала. При подаче отрицательного напряжения ток канала уменьшается, а при подаче положительного напряжения ток Перенос канала увеличивается. заряда В полевых транзисторах осуществляется посредством движения электронов от истока к стоку под действием положительного электрического поля. При воздействии на сток отрицательного электрического поля ток в канале меняет направление, поэтому полевые транзисторы являются униполярными. Изменение напряжения на затворе приводит к соответствующему изменению тока канала. На рис. 3 показаны вольт-амперные характеристики полевого транзистора.



Рис. 3. Выходные вольт-амперные характеристики ПТШ: малошумящего на GaAs (*a*); мощного на GaN (*б*)

Выходные вольт-амперные характеристики малошумящего GaAs ПТШ (рис. 3а) показывают зависимость тока стока I_c от напряжения на стоке U_c , а также от напряжения на затворе U_g . Наибольший ток стока достигается при напряжении на затворе $U_g = 0$, а при напряжении на затворе $U_g < 0$ ток стока падает. В начале характеристики ток стока изменяется линейно, а по мере нарастания становится нелинейным и насыщается. Ток стока в точке перегиба называется током насыщения *Iнаc*, а напряжение называется напряжение и *Uhac*, которое в малошумящих GaAs ПТШ составляет менее 1 В.

Максимальная величина тока стока определяется проводимостью канала.

$$\sigma = N_d e \mu \,, \tag{34}$$

Где: *σ* – проводимость канала, *N_d* – концентрация доноров; *е* – заряд электрона; *μ* – подвижностью носителей в канале.

Если электрическое поле E имеет относительно низкую напряженность, то скорость дрейфа v будет пропорциональна напряженности электрического поля.

$$v = \mu E , \qquad (35)$$

Повышение напряжения на стоке после точки насыщения ведет к слабому росту тока стока, т.к. скорость начинает уменьшаться из-за сильного взаимодействия носителей заряда с кристаллической решеткой и примесями, и соответственно уменьшения подвижности.

При дальнейшем увеличении напряженности электрического поля носители заряда приобретают достаточную энергию, чтобы за счет ударной ионизации образовались новые пары электрон-дырка и росту ток стока за счет лавинного пробоя. Напряжение, при котором наблюдается лавинный пробой, называется пробивным напряжением *Unp*. Повышение напряжения на стоке выше пробивного приводит к выходу ПТШ из строя.

Изменение напряжения на затворе приводит к соответствующему изменению тока канала, т.е. полевой транзистор является генератором тока управляемый напряжением. Отношение приращения тока стока к приращению напряжения на затворе называется крутизной транзистора.

$$S_m = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{gs}}$$
, при напряжении $U_{gs} = const$. (36)

При увеличении отрицательного напряжения на затворе на ΔU_{gs} ток стока уменьшается не пропорционально, крутизна падает т.к. влияние затвора уменьшается. Отрицательное напряжение на затворе, при котором ток стока уменьшается до нуля, называется напряжением отсечки Up.

Выходные вольт-амперные характеристики мощного GaN ПТШ (рис. 3б) показывают зависимость тока стока (канала) от напряжения на стоке, а также

от напряжения на затворе. Мощные ПТШ имеют большие рабочие токи, и пробивные напряжения, и напряжение насыщения порядка 10 В.

ПТШ имеют максимально допустимую рассеиваемую мощность.

$$P_d = U_c \times I_c = const \tag{37}$$

Превышение допустимой рассеиваемой мощности приводит к выходу ПТШ из строя.

При подведении к затвору переменного напряжения происходит изменение толщины канала и возможно усиление мощности сигнала за счет мощности источника постоянного напряжения.

Поперечный разрез полевого транзистора и его эквивалентная схема показана на рис. 4.



Рис. 4. Поперечный разрез полевого транзистора (а),

эквивалентная схема полевого транзистора (б)

Полевой транзистор (рис. 4a) характеризуется конструктивными параметрами: W_g – ширина затвора; L_g – длина затвора; L_{u3} – расстояние исток затвор; L_{3c} – расстояние затвор сток; длина канала ($L_{u3} + L_g + L_{3c}$).

Ток стока определяется конструктивными параметрами ПТШ и проводимостью канала.

$$I_c = eN_d \mu E(a-Q)W_g = eN_d \nu(a-Q)W_g$$
(38)

Где: *Q* – толщина объемного заряда; *а* – толщина эпитаксиального слоя.

Ширина затвора определяет частотные свойства ПТШ. Для нормальной работы ПТШ необходимо, чтобы ширина затвора была меньше $W_g < \lambda/10$. Это условие выполняется для малошумящих транзисторов см. диапазона волн имеющих ширину затвора 50...300 мкм.

Для создания мощных ПТШ требуются широкие затворы и поэтому мощные транзисторы получают путем суммирования транзисторов с шириной затвора 50...300 мкм. При суммировании ток стока возрастает и определяется общей шириной ПТШ.

Для эпитаксиальных транзисторов удельный ток стока составляет порядка 300 мА на один миллиметр ширины затвора.

Для современных гетероэпитаксиальных транзисторов удельный ток стока составляет порядка 600 мА на один миллиметр ширины затвора.

Эквивалентная схема (рис. 4б) включает пассивные элементы и активную часть, расположенную под затвором и обозначенную пунктиром: емкость затвор исток – Cgs; емкость затвор сток – Cgc; пролетное время – τ ; генератор тока с максимальной крутизной – Sm; дифференциальное сопротивление канала – Rd.

Сопротивления *Rg*, *Rs*, *Rc* не входят в активную часть полевого транзистора и являются паразитными элементами, ухудшающими его частотные свойства.

Объемный заряд под затвором это барьерная емкость затвор исток *Cgs* включенная последовательно с паразитными сопротивлениями металлизации затвора *Rg* и омического контакта истока *Rs*.

Для переключения барьерной емкости *Cgs* необходима входная мощность, которая определяет напряжение на затворе. С повышением частоты напряжение на затворе уменьшаться т.к. уменьшается емкостное сопротивление $1/\omega C_{gs}$ и большая часть мощности тратится на резисторах затвора *Rg* и истока *Rs*.

В работах [19-24] приведены основные аналитические выражения, описывающие полевой транзистор с барьером Шотки.

Максимальная частота полевого транзистора определяется длиной затвора *Lg* и скоростью движения электронов в канале *Vp* [25].

$$\omega_{max} \sim \left(\frac{Vp}{Lg}\right),\tag{39}$$

Где: ω_{max} – граничная частота, v_p – пиковая скорость электронов.

Поскольку максимальная скорость движения электронов в канале ограничена, граничная частота ПТШ в основном зависит от длины затвора.

Максимальная частота определяет усилительные и шумовые свойства полевого транзистора.

$$Ky \sim \left(\frac{\omega_{max}}{\omega}\right)^2$$
 (40)

$$K_{\rm III} \sim 1 + 2\left(\frac{\omega}{\omega_{max}}\right),\tag{41}$$

Где: *ω* – рабочая частота.

Максимальная частота ПТШ зависит от крутизны, емкости затвора и сопротивления затвора.

$$\omega_{max} \sim \left(\frac{S}{2Cgs\sqrt{Ri+Rg+Rs}}\right),\tag{42}$$

Где: $S = Sm \times e^{-j\omega\tau}$ – крутизна.

С ростом частоты время пролета τ носителей от истока к стоку становится соизмеримым с периодом СВЧ колебаний, что приводит к запаздыванию выходного тока относительно выходного.

Для повышения граничной частоты необходимо увеличивать крутизну транзистора, уменьшать емкость затвор-исток и сопротивление металлизации затвора транзистора.

Требование уменьшения длины затвора при одновременном уменьшении сопротивления металлизации затвора является противоречивым. Для решения этого противоречия в современных транзисторах используется Т-образный (грибообразный) затвор. Особенностью Т-образного затвора является тонкая ножка и широкая толстая шляпка. При этом ножка затвора обеспечивает малую длину затвора *Lg* и малую емкость затвор-исток *Cgs*, а

широкая толстая шляпка обеспечивает малое сопротивление металлизации затвора *Rg*.

В лучших образцах зарубежных и отечественных GaAs ПТШ длина затвора составляет порядка 0.1 мкм, а рабочая частота до 100 ГГц.

Выходная мощность ПТШ зависит от тока стока и напряжения стокзатвор [26].

$$P = \frac{1}{8}Ic(Uc - Uhac), \qquad (43)$$

Где: *Ic* – максимальный ток стока, *Uc* – напряжение сток исток, *Uнac* – напряжение насыщения. При этом напряжение стока *Uc* ограничивается пробивным напряжением затвор-сток *Uзc* и определяется следующим выражением.

$$Uc < \frac{1}{2}(U3c - Up + Uhac),$$
 (44)

Где: *U*зс – пробивное напряжение затвор-сток; *Up* – напряжение отсечки тока стока.

Коэффициент усиления транзистора по мощности определяется отношением выходной мощности к входной мощности.

$$Kp = P_{\rm Bbix}/P_{\rm Bx}, \qquad (45)$$

Где: *Р*вых – выходная мощность транзистора, *Р*вх – входная мощность транзистора.

Коэффициент полезного действия – *КПД* транзистора по добавленной мощности определяется отношением выходной мощности к потребляемой мощности за вычетом входной мощности и выражается в процентах.

$$K\Pi Д = 100(Pвых - Pвх)/Pпот,$$
 (46)

Где: Рпот – потребляемая мощность.

Анализ вольт-амперных характеристик арсенидгаллиевых ПТШ и полученных выражений показывает, что для повышения выходной мощности и КПД целесообразно использовать ПТШ с большим напряжением Uc, большими током Ic и малым напряжением Uнac.

Отбор кристаллов ПТШ по СВЧ параметрам достаточно трудоемкая операция, поэтому необходимо было найти пути предварительного отбора низкочастотным параметрам. Исследования транзисторов ПО причин частотных ограничений показывают, что максимальная частота генерации, являющаяся показателем качества транзистора, прямо пропорциональна крутизне S и обратно пропорциональна емкости затвор исток Cgs, потерям на сопротивлениях истока Rs и металлизации затвора Rg. Важнейшим геометрическим параметром, влияющим на граничную частоту, является длина затвора *Lg*, поэтому было предложено проводить отбор транзисторов по следующей системе низкочастотных параметров: Smax – максимальная крутизна; Cgs – емкость затвор-исток; Rg – сопротивление металлизации затвора; R_s – сопротивление истока; L_g – длина затвора.

Анализ этих параметров показал, что: крутизна *Smax* измеряется достаточно легко по BAX транзистора; емкость затвор-исток *Cgs* можно измерить с помощью измерителя емкости; сопротивление металлизации затвора *Rg* легко измерить для транзистора с двумя контактными площадками; сопротивление истока *Rs* и стока *Rc* можно оценить по наклону BAX до области насыщения тока стока.

$$Rs + Rc \approx U \mu ac/I \mu ac \tag{47}$$

Особую сложность представляет измерение длины затвора Lg, при этом малая длина Lg требует измерений длины затвора под электронным микроскопом, при этом для измерения длины Т-образного затвор необходимо делать скол, а это требует разрушения пластины. Разрушающий метод неприемлем для производства. Известно, что емкость затвор-исток Cgs является сложной функцией, зависящей от параметров материала арсенида галлия, длины затвора Lg, а также от напряжения отсечки Up. Поэтому для транзисторов с одинаковой геометрией и параметрами исходного материала можно ограничиться измерением Cgs при нулевом напряжении на затворе. Для мощных транзисторов крайне важными параметрами являются пробивные напряжения затвор-исток U3u и затвор-сток U3c.

Для предварительного отбора транзисторов выбрана следующая система

низкочастотных параметров: *Smax* – максимальная крутизна; *Cgs* – емкость затвористок; *Rg* – сопротивление металлизации затвора; *Iнас* – ток стока насыщения; *Uнас* – напряжение насыщения; *Up* – напряжение отсечки тока стока; *Uзс* – напряжение пробоя затвор-исток; *Uзи* – напряжение пробоя затвор-сток. Кроме того контролируется ток утечки через подложку и обратный ток затвора.

ПТШ как четырехполюсник для описания, которого в линии с волновым

сопротивлением 50 Ом используются стандартные S-параметры [27].

$$\begin{bmatrix} U_{1 \text{ orp}} \\ U_{2 \text{ orp}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1 \text{ nad}} \\ U_{2 \text{ nad}} \end{bmatrix},$$
(48)

Для четырехполюсника, при двухстороннем согласовании линии:

S₁₁ – коэффициент отражения на входе четырехполюсника;

S₂₂ – коэффициент отражения на выходе четырехполюсника;

 S_{21} – коэффициент прямой передачи; S_{12} – коэффициент обратной передачи.

Коэффициент усиления: $G = \left| \frac{S_{21}}{S_{12}} \right| \left(K - \sqrt{K^2 - 1} \right),$ (49)

Коэффициент устойчивости: $K = \frac{1+|\Delta^2|-|S_{11}|^2-|S_{22}|^2}{2|S_{11}||S_{22}|},$ (50)

Где: $\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$.

Коэффициент устойчивости $K \ge 1$ всегда должен быть больше или равен 1.

При *K* < 1 входное и выходное сопротивления ПТШ отрицательные и согласование становится невозможным.

СВЧ усилители на ПТШ

Однокаскадный усилитель на ПТШ лежит в основе всех усилительных и преобразовательных интегральных схем СВЧ.

В зависимости от ширины полосы рабочих частот различают узкополосные усилители имеющие полосу рабочих частот до 10 % и широкополосные усилители с полосой рабочих частот более 10 %.

В узкополосных усилителях на ПТШ используются простейшие одноконтурные схемы согласования, а в широкополосных усилителях широкополосные схемы согласования.

По уровню выходной мощности усилители можно разделить на

маломощные с выходной мощностью до 100 мВт и мощные с выходной мощностью более 100 мВт.

Для получения от усилительного каскада на ПТШ требуемых характеристик: усиления, полосы рабочих частот, равномерности коэффициента усиления, КСВН, выходной мощности и т.д. необходимо обеспечить определенные оптимальные проводимости генератора и нагрузки на входе и выходе транзисторного каскада, которые в дальнейшем будем называть оптимальными нагрузками. Задача нахождения оптимальных нагрузок является важнейшей как при расчете транзисторных каскадов, так и сложных схем на ПТШ. В настоящее время известно несколько путей определения оптимальных нагрузок полевых транзисторов.

- Теоретический путь [28] позволяет по известным электрофизическим параметрам исходного материала (арсенид галлия) и топологии транзистора рассчитать параметры эквивалентной схемы, а по ним – оптимальные нагрузки. Однако параметры исходного материала могут сильно меняться и этот путь приближенный.
- 2) Экспериментально-теоретический путь, разработанный под руководством д.т.н. А.С. Тагера позволяет по измеренным низкочастотным параметрам ПТШ и его топологии рассчитать параметры эквивалентной схемы, а по ним оптимальные нагрузки, но требует уточнения путем измерения параметров ПТШ на СВЧ.
- Экспериментальный путь [29] позволяет непосредственно измерить параметры эквивалентной схемы на относительно низких частотах и по ним рассчитать оптимальные нагрузки.
- Практический путь позволяет непосредственно измерить S-параметры и оптимальные нагрузки на СВЧ, и обеспечивает наибольшую достоверность определения оптимальных нагрузок ПТШ.

Для практического измерения оптимальных нагрузок ПТШ в настоящее время используется установка одновременного измерения S-параметров, выходной мощности и оптимальных нагрузок (load-pull), а именно векторный анализатор цепей PNA-X N5247 измеритель S-параметров и оптимальных нагрузок на входе и выходе четырехполюсников в диапазоне частот до 67 ГГц. При этом для каждого режима работы ПТШ (минимального коэффициента шума, максимальной выходной мощности, максимального КПД, и др.) определяются свои оптимальные нагрузки.

На основе измеренных малосигнальных S-параметров транзистора и параметров транзистора в режиме большого сигнала создаются малошумящая и нелинейная модель транзистора. Эти модели транзисторов в АО «НПП «Исток им. Шокина» разрабатываются под руководством А.Б. Пашковского [30-39].

Узкополосные маломощные СВЧ усилители на ПТШ

Для создания узкополосных усилителей на ПТШ необходимо по известным значениям оптимальных нагрузок рассчитать и синтезировать оптимальные согласующие цепи на входе и выходе ПТШ, обеспечивающие согласование с генератором и нагрузкой. Учитывая, что входной и выходной импеданс малошумящих ПТШ в сантиметровом диапазоне длин волн носит ёмкостный характер, отрезки линий длиной менее $l < \lambda/4$ можно использовать для синтеза оптимальных нагрузкой.

Для упрощения целесообразно проводить расчет усилителя на ПТШ сначала на идеальных сосредоточенных элементах, а затем синтезировать согласующие сосредоточенные элементы в отрезки линий. Зная входной и выходной импеданс транзистора $Z\mathbf{T} = (R\mathbf{T} - jX\mathbf{T})$ можно оценить добротность входа и выхода ПТШ, как $Q_T = \frac{X_T}{R_T}$. Для малошумящих ПТШ на частоте 10 ГГц добротность входа менее 10, а добротность выхода менее 3. Для получения от усилительного каскада параметров сравнимых с параметрами ПТШ необходимо, чтобы добротность согласующих элементов была выше добротности ПТШ, т.е. порядка 100.

59

На рис. 5 показаны два типа согласующе-трансформирующих цепей, синтезирующих оптимальные нагрузки на входе и выходе усилительного каскада на ПТШ.



Рис. 5. Согласующе-трансформирующие цепи, синтезирующие оптимальные нагрузки на входе и выходе усилительного каскада соответственно: первый тип (*a*) и (*б*); второй тип (*в*) и (*г*); третий тип (*д*) и (*е*)

Рассчитаем значения согласующих элементов по известным значениям оптимальных нагрузок. Импеданс нагрузок комплексно сопряжен с импедансом транзистора ZT = (RT - jXT). Сопротивление генератора $R\Gamma = RH = 50$ Ом, проводимость $G\Gamma = 1/50$.

Первый тип (рис. 5 а, в). Пересчитаем параллельное соединение Rг и L1 в последовательное $Z = R + jX_L$ и получим.

$$R = \left(\frac{G\Gamma}{G\Gamma^{2} + \left(\frac{1}{\omega L1}\right)^{2}}\right), \qquad X_{L} = \left(\frac{\frac{1}{\omega L1}}{G\Gamma^{2} + \left(\frac{1}{\omega L1}\right)^{2}}\right), \tag{51}$$

При комплексно-сопряженном согласовании $R_T = R$, $\omega L2 = X_{BX} - X_L$ получим.

$$R_{\rm T} = \left(\frac{G_{\rm \Gamma}}{G_{\rm \Gamma}^2 + \left(\frac{1}{\omega L1}\right)^2}\right), \qquad \omega L2 = \left(X_{\rm T} - \frac{\frac{1}{\omega L1}}{G_{\rm \Gamma}^2 + \left(\frac{1}{\omega L1}\right)^2}\right), \tag{52}$$

Разрешим уравнение относительно $\omega L1$ и $\omega L2$ получим.

$$\frac{1}{\omega L1} = \left(\sqrt{\frac{G\Gamma}{R_{\rm T}} - G\Gamma^2}\right), \qquad \omega L2 = \left(X_{\rm BX} - \sqrt{\frac{R_{\rm T}}{G_{\rm T}} - R_{\rm T}^2}\right),\tag{53}$$

Найдем значения элементов, синтезирующих оптимальную нагрузку на входе транзистора.

$$L1 = \left(\frac{1}{\left(\sqrt{\frac{G\Gamma}{R_{\rm T}} - G\Gamma^2}\right) \times \omega}\right), \qquad L2 = \left(\frac{X_{\rm BX} - \left(\sqrt{\frac{R_{\rm T}}{G_{\rm \Gamma}} - R_{\rm T}^2}\right)}{\omega}\right), \tag{54}$$

Для выходной цепи аналогично находим значение элементов L3, L4

Второй тип (рис. 5 в, г). Zт = (Rт – jXт).

Пересчитаем параллельное соединение $R\Gamma$ и C1 в последовательное Z = R - jXc и получим.

$$R = \left(\frac{G\Gamma}{G\Gamma^2 + (\omega C1)^2}\right), \qquad Xc = \left(\frac{\omega C1}{G\Gamma^2 + (\omega C1)^2}\right), \tag{55}$$

При комплексно-сопряженном согласовании $R_T = R$, $\omega Ll = Xc + XT$ получим.

$$R_{\rm T} = \left(\frac{G_{\rm \Gamma}}{G_{\rm \Gamma}^2 + (\omega C1)^2}\right), \qquad \omega L c_{\rm T} = \left(\frac{\omega C1}{G_{\rm \Gamma}^2 + (\omega C1)^2} + X_{\rm T}\right), \tag{56}$$

Разрешив уравнение относительно $\omega C1$ и $\omega L1$ получим.

$$\omega C1 = \left(\sqrt{\frac{G\Gamma}{RT} - G\Gamma^2}\right), \qquad \omega L1 = \left(XT + \sqrt{\frac{RT}{G\Gamma} - RT^2}\right), \tag{57}$$

Найдем значения элементов, синтезирующих оптимальную нагрузку на входе транзистора.

$$C1 = \left(\frac{\sqrt{\frac{G\Gamma}{RBx} - G\Gamma^2}}{\omega}\right), \qquad L1 = \left(\frac{\left(\sqrt{\frac{RBx}{G\Gamma} - RBx^2}\right) + XBx}{\omega}\right), \tag{58}$$

Для выходной цепи аналогично находим значение элементов L2, C2.

Третий тип (рис. 5 д, е). Пересчитаем последовательное соединение Rг и C1 в параллельное $Y = G + jB_c$ и получим проводимости.

$$G = \left(\frac{Rr}{Rr^2 + \left(\frac{1}{\omega C1}\right)^2}\right), \qquad Bc = \left(\frac{\frac{1}{\omega C1}}{Rr^2 + \left(\frac{1}{\omega C1}\right)^2}\right), \tag{59}$$

Преобразуем входное сопротивление во входную проводимость YT = 1/ZT, получим YT = GT + jBT. При комплексно-сопряженном согласовании G = GT; $(1/\omega L1) = BT + Bc$.

$$G_{\rm T} = \left(\frac{R_{\rm \Gamma}}{R_{\rm \Gamma}^2 + \left(\frac{1}{\omega C1}\right)^2}\right), \qquad \frac{1}{\omega L1} = \left(B_{\rm T} + \frac{\frac{1}{\omega C1}}{R_{\rm \Gamma}^2 + \left(\frac{1}{\omega C1}\right)^2}\right), \tag{60}$$

Разрешив эти уравнения относительно $\omega C1$ и $\omega L1$ получим.

$$\frac{1}{\omega C1} = \left(\sqrt{\left(\frac{Rr}{G_{\rm T}}\right) - Rr^2}\right), \qquad \frac{1}{\omega L1} = \left(B_{\rm T} + \sqrt{\left(\frac{G_{\rm T}}{R}\right) - Gr^2}\right),\tag{61}$$

Найдем интересующие нас значения элементов, синтезирующих оптимальную нагрузку.

$$C1 = \left(\frac{1}{\omega \times \sqrt{\left(\frac{Rr}{GT}\right) - Rr^2}}\right), \qquad L1 = \left(\frac{1}{\omega \times \left(BT + \sqrt{\left(\frac{GT}{R}\right) - GT^2}\right)}\right), \tag{62}$$

Для выходной цепи аналогично находим значение элементов L2, C2.

Несмотря на то, что все схемы равнозначны и позволяют синтезировать оптимальные нагрузки, в малошумящих усилителях на ПТШ используется

преимущественно схема (рис. 5 а, б). Она позволяет соединить затвор ПТШ с землей через индуктивность, что обеспечивает отсечку низких частот и устойчивость усилительного каскада, и не требует дросселя для подачи питания на сток ПТШ.

Вторая схема (рис. 5 в, г) используется преимущественно для создания мощных усилителей на ПТШ, она не имеет шунтирующей индуктивности и для её использования необходим дополнительный дроссель.

Третья схема (рис.5 д, е) имеет малую емкость конденсатора *C*1 порядка 0.5 пФ и ее реализация затруднительна.

На рис. 6 приведена электрическая схема однокаскадного узкополосного малошумящего усилителя на ПТШ.



Рис. 6. Электрическая схема усилительного каскада на ПТШ

Режим работы ПТШ – Т обеспечивается цепочкой автосмещения в истоковой цепи ПТШ, состоящей из резистора *R1* и блокировочного конденсатора Сбл1. Величина блокировочного конденсатора Сбл1 существенно влияет на его коэффициент шума и ограничивает нижнюю рабочую частоту усилительного каскада. При Сбл1 равной 10 пФ нижняя рабочая частота должна быть более 3 ГГц, а при Сбл1 равной 100 пФ более 0.3 ГГц. Рабочую частоту усилительного каскада сверху ограничивают параметры ПТШ. Во входной цепи ПТШ установлена согласующе-L2трансформирующая цепь, состоящая индуктивностей L1ИЗ И соединяющая затвор ПТШ с источником сигнала по переменному току и с

землей по постоянному току. В выходной цепи ПТШ установлена согласующе-трансформирующая цепь, состоящая из индуктивностей L3 и L4 соединяющая сток ПТШ с нагрузкой по переменному току и с источником питания по постоянному току. Для блокировки источника питания по переменному току установлен блокировочный конденсатор $C \delta n^2$, а для развязки нагрузки и ПТШ по постоянному току установлен развязывающий конденсатор Cp1.

Основными параметрами малошумящего усилителя являются коэффициент шума и коэффициент усиления, поэтому для создания малошумящего усилителя необходимо выбирать ПТШ с наименьшим коэффициентом шума и наибольшим коэффициентом усиления на рабочей частоте.

Известно, что шумы усилителя складываются из теплового шума резистора подключенного на входе усилителя и шума усилителя [40, 41]. Мощность теплового шума резистора определяется выражением.

$$P = (kTB), \tag{63}$$

Где: P – мощность шума резистора; k – постоянная Больцмана (1.38×10⁻²³ Дж/К); T – абсолютная температура (К); B – полоса рабочих частот (Гц).

Расширение полосы рабочих частот приводит к увеличению мощности теплового шума. Если резистор подключен на вход усилителя, мощность шума на выходе усилителя увеличится на коэффициент усиления и добавится шум, вносимый самим усилителем.

$$Pa = ((kTBG) + Na), \tag{64}$$

Где: *G* – коэффициент усиления усилителя, *Na* – шумы, генерируемые в самом усилителе.

Коэффициент шума усилителя безразмерная величина равная отношению мощностей.

$$F = \left(\frac{(kTBG) + Na}{kTBG}\right), \qquad NF = (10\log(F)), \tag{65}$$

Коэффициент шума многокаскадных усилителей складывается из шумов отдельных каскадов с учетом их коэффициента усиления.

$$F = \left(F_1 + \left(\frac{(F_2 - 1)}{G_1}\right) + \left(\frac{(F_3 - 1)}{G_1 \times G_2}\right) + \cdots\right),\tag{66}$$

Коэффициент шума и коэффициент усиления первого каскада, в конечном счете, определяют параметры всего усилителя.

Выбрав ПТШ необходимо определить оптимальные режимы по постоянному току и напряжению питания, и измерить оптимальные нагрузки на его входе и выходе обеспечивающие минимальный коэффициент шума при наибольшем коэффициенте усиления.

После этого рассчитываются и синтезируются оптимальные нагрузки, на идеальных сосредоточенных (*L*, *C*) элементах без потерь, и проводится расчет малошумящего усилителя на ПТШ. По результатам расчета оцениваются параметры малошумящего усилителя и в первую очередь коэффициент шума, коэффициент усиления, устойчивость, КСВН входа и выхода, полоса рабочих частот, выходная мощность, КПД, верхняя граница линейности и точка пересечения интермодуляционных составляющих третьего порядка. Измерения СВЧ параметров усилителя проводят в соответствии с ГОСТ [42, 43].

Затем начиная с входной цепи ПТШ, вместо каждого сосредоточенного элемента синтезируется соответствующий распределенный элемент в виде отрезка линии длиной менее $l < \lambda/4$ и проверяется влияние элемента на параметры усилителя, и в первую очередь на коэффициент шума. Каждый распределенный элемент имеет потери, которые приводят к повышению коэффициента шума, поэтому целесообразно использовать элемент с большой добротностью.

После подтверждения всех параметров малошумящего СВЧ усилителя на ПТШ приступают к топологическому синтезу пассивной части интегральной схемы СВЧ на плате. При этом все пассивные тонкопленочные элементы располагаются на поверхности одной диэлектрической платы в виде ЕМ-структуры, синтезирующей оптимальные нагрузки на входе и выходе ПТШ. Расчет ЕМ-структуры, проводится с помощью программы расчета микроволновых схем позволяющей включить процесс проектирования интегральных схем СВЧ в единую программу САПР, при этом пассивная часть схемы рассчитывается с учетом взаимного влияния элементов расположенных на поверхности платы (кристалла) и влияния экрана.

Усилительные каскады на GaAs ПТШ «Пенс-4» и «Пенс-6» [44, 45] на частоте 10 ГГц имеют коэффициент усиления усилителей порядка 7...8 дБ, а коэффициент шума порядка 2...3 дБ. При этом небольшие изменения тока стока и напряжения на стоке не приводят к заметному ухудшению коэффициента шума усилительного каскада, а коэффициент усиления меняется более существенно. Для GaAs ПТШ «Пенс-4» и «Пенс-6» с шириной затвора 200...300 мкм, крутизна изменения коэффициента усиления составляет порядка 1.4...1.9 дБ/В, а коэффициент шума 0.5...0.7 дБ/мА. Для обеспечения стабильного усиления каскада необходимо строго поддерживать рабочие режимы ПТШ, при этом для первого каскада рабочие режимы целесообразно выбирать В соответствующей точке минимальному коэффициенту шума: ток стока 15...20 % от тока стока насыщения, а напряжение на стоке на 1...2 вольта выше напряжения насыщения.

Рабочие режимы последующих каскадов усилителя целесообразно выбирать исходя из требований выходной мощности и обеспечения необходимого динамического диапазона.

Современные GaAs ПТШ имеют на частоте 18 ГГц, коэффициент усиления более 10 дБ, а коэффициент усиления менее 1 дБ. Для сохранения устойчивости усилителя и особенно многокаскадного усилителя целесообразно, чтобы усиление на один каскад было менее 10 дБ.

С увеличением температуры в диапазоне температур -60...+85°С коэффициент усиления усилительного каскада на ПТШ падает на 0.15 дБ на каждые 10 °С, а коэффициент шум увеличивается на 0.1 дБ на каждые 10 °С.

Усилительный каскад на ПТШ чувствителен к воздействию статического электричества и при воздействии статического потенциала наблюдается пробой между электродами затвор-исток и затвор-сток. Целесообразно соединять затвор ПТШ с землей через малое сопротивление и снижать уровень статического потенциала [46-49].

Усилительный каскад на ПТШ чувствителен к скачкам напряжения в момент включения и выключения источника питания, при этом наблюдается пробой между электродами затвор-исток и затвор-сток и ПТШ выходит из строя. Целесообразно параллельно источнику питания включать защитный стабилитрон и защищать его последовательным балластным резистором.

Узкополосные мощные СВЧ усилители на ПТШ

Основными параметрами мощного усилителя на ПТШ являются коэффициент усиления, выходная мощность и КПД, поэтому для создания усилителя мощности необходимо выбирать ПТШ с наибольшим усилением и КПД и требуемой мощностью на рабочей частоте. Мощность ПТШ определяется шириной затвора W_g , а ширина затвора определяет емкость затвор-исток C_{gs} , которая определяет максимальную рабочую частоту. ПТШ с большой шириной затвора будут иметь повышенную емкость затвор-исток, уменьшенную максимальную рабочую частоту, усиление и КПД.

Современные GaAs ПТШ имеют на частоте 10 ГГц выходную удельную мощность порядка 1 Вт/мм ширины затвора, а GaN ПТШ имеют на частоте 10 ГГц выходную удельную мощность порядка 4 Вт/мм ширины затвора.

Для получения высокого КПД усилителя мощности необходимо полностью использовать вольт-амперные характеристики ПТШ и для этого строится нагрузочная характеристика, которая представляет собой прямую линию соединяющую точку максимального тока стока *I* нас , при напряжении *U* нас и точку максимально допустимого напряжения на стоке *U* с.

При этом режиме работы ПТШ (рабочая точка – РТ) выбирается в середине нагрузочной прямой соответствующей $I_{c \text{ нас}}/2$ и $U_{c \text{ маx}}/2$. Этот

67

режим работы ПТШ называется режимом (класса A) и характеризуется углом отсечки 180°. При этом нагрузочная прямая не должна превышать максимально допустимую $P_d = U_c \times I_c = const$ рассеиваемую мощность.

Режим (класса А) обеспечивает наилучшие параметры усилительного каскада на ПТШ: большой коэффициент усиления, выходную мощность, малые искажения, но имеет ограниченный КПД.

Для повышения КПД используют режим работы (класс AB) в котором рабочая точка ПТШ выбирается при напряжении на стоке $U_{c \text{ мах}}/2$ и малых токах стока соответствующих 0.2...0.3 ($I_{c \text{ нас}}$) и характеризуется углом отсечки порядка 120°. В режиме работы (класс AB): коэффициент усиления уменьшается, повышается КПД, но появляются гармоники сигнала.

Для дальнейшего повышения КПД используют режим работы (класс В) в котором рабочая точка ПТШ выбирается при напряжении на стоке $U_{c \text{ мах}}/2$ и токе стока $I_{c \text{ нас}} = 0$ и характеризуется углом отсечки 90°. В режиме работы (класс В): коэффициент усиления уменьшается на 3 дБ, высокий КПД, но большие гармоники сигнала.

Учитывая, что ПТШ не имеют существенных запасов по усилению и от усилителя на ПТШ требуется получение малых искажений целесообразно выбрать режим работы (класс AB). Выбрав ПТШ, а также значения тока и напряжения стока в рабочей точке измеряют параметры оптимальных нагрузок на входе и выходе ПТШ для получения наибольшего КПД.

По известным значениям оптимальных нагрузок рассчитывают согласующие цепи на входе и выходе ПТШ, обеспечивающие согласование с генератором и нагрузкой. Для упрощения целесообразно проводить расчет мощного усилителя на ПТШ сначала на идеальных сосредоточенных элементах, а затем синтезировать согласующие сосредоточенные элементы в отрезки линий. После этого рассчитываются и синтезируются оптимальные нагрузки, на идеальных сосредоточенных (L, C) элементах без потерь, и проводится расчет мощного усилителя на ПТШ. По результатам расчета мощного усилителя и В оцениваются параметры первую очередь

коэффициент усиления, выходная мощность и КПД, устойчивость, КСВН входа и выхода, и искажения. Затем сосредоточенные элементы заменяются распределенными элементами и после подтверждения всех параметров мощного СВЧ усилителя на ПТШ приступают к топологическому синтезу пассивной части интегральной схемы СВЧ на плате. При этом все пассивные тонкопленочные элементы располагаются на поверхности одной диэлектрической платы в виде ЕМ-структуры, синтезирующей оптимальные нагрузки на входе и выходе ПТШ. Расчет ЕМ-структуры, проводится с помощью программы расчета микроволновых схем позволяющей включить процесс проектирования интегральных схем СВЧ в единую программу САПР, при этом пассивная часть схемы рассчитывается с учетом взаимного влияния элементов расположенных на поверхности платы (кристалла) и влияния экрана.

Широкополосные СВЧ усилители на ПТШ

ПТШ работают в широком диапазоне частот и имеют большие потенциальные возможности для создания широкополосных усилителей. Усилители С реактивными согласующе-выравнивающими цепями усилителей используются создания широкополосных с для многоконтурными схемами согласования на основе низкочастотных [50] либо полосно-пропускающих фильтров [51]. Электрические схемы усилителей приведены на рис. 7 [52].



Рис. 7. Электрические схемы усилителей с реактивными согласующе-

выравнивающими цепями: низкочастотные (a); полосовые (δ)

Такие усилители позволяют получить мгновенную полосу до одной октавы, ограничения по полосе связаны с тем, что входное и выходное

сопротивления ПТШ не могут быть согласованы в произвольно широком диапазоне частот. Входное и выходное сопротивления ПТШ в рабочей полосе частот носят емкостный характер. При согласовании параллельно соединенных сопротивления R и емкости C в полосе частот $\Delta \omega$ справедливо неравенство [53].

$$\ln\left(\frac{1}{|\Gamma \max|}\right) \le \left(\frac{\pi}{\Delta\omega RC}\right),\tag{67}$$

Где: Гтах - максимальный коэффициент отражения в полосе частот. Знак равенства соответствует предельному случаю - согласующей цепи с бесконечным числом элементов. Из выражения (42) видно, что с увеличением полосы согласования $\Delta \omega$ значение |Гтах | увеличивается, т.е. увеличивается КСВН.

$$\text{KCBH} = ((|\Gamma max| + 1)/(|\Gamma max| - 1)), \qquad (68)$$

Оценим максимальную полосу согласования усилительного каскада на ПТШ при КСВН входа и выхода 2.

$$|\Gamma max| = \left(\frac{\text{KCBH} - 1}{\text{KCBH} + 1}\right) = (2 - 1)/(2 - 1) = 0.33,$$
 (69)

 $\Delta \omega_{max} \le (1/(\ln(1/|\Gamma\max| \times R \times C))), \qquad \Delta fmax = \left(\frac{1}{2.2RC}\right), \tag{70}$

Учитывая, что входная цепь усилительного каскада более узкополосная, чем выходная, расчет проведен только для входной цепи. Представив входную цепь транзистора в виде параллельного соединения сопротивления и емкости, и определив их величины можно рассчитать полосу согласования $\Delta fmax$ входной цепи.

$$R = \left(\frac{R_{\rm BX}^2 + X_{\rm BX}^2}{R_{\rm BX}}\right), \qquad C = \left(\left(\frac{1}{\omega}\right) \times \left(\frac{R_{\rm BX}^2 + X_{\rm BX}^2}{R_{\rm BX}}\right)\right), \tag{71}$$

ПТШ «Пенс-6» в диапазоне 1...2 ГГц имеет максимальную полосу согласования Δ*fmax* порядка 0.14 ГГц, в диапазоне 2...4 ГГц порядка 0.6 ГГц, а в диапазоне 4...8 ГГц порядка 2.4 ГГц.

Самосогласованные усилители, в которых для согласования с источником сигнала и нагрузкой используют каскады на ПТШ с общим затвором, общим стоком и общим истоком [52, 54] рис. 8.



Рис. 8. Электрическая схема самосогласованного усилителя на ПТШ Оценим входное сопротивление каскада с общим затвором.

$$Z_{\rm BX} = \left(\frac{U_{\rm BX}}{I_{\rm BX}}\right) = \left(\frac{U_{\rm BX}}{U_{\rm BX} \times S_m}\right) \sim \left(\frac{1}{S_m}\right),\tag{72}$$

Где: $Z_{\rm BX}$ – входное сопротивление транзистора; S_m – крутизна транзистора. Для транзистора «Пенс-6» крутизна S_m порядка 20 мА/В, при этом входное сопротивление транзистора $Z_{\rm BX}$ порядка 50 Ом.

Аналогично для выходного каскада с общим стоком.

$$Z_{\rm Bbix} = \left(\frac{U_{\rm Bbix}}{I_{\rm Bbix}}\right) = \left(\frac{U_{\rm Bbix}}{U_{\rm 3H} \times S_m}\right) \sim \left(\left(\frac{1}{S_m}\right) \times \left(\frac{U_{\rm Bbix}}{U_{\rm 3H}}\right)\right),\tag{73}$$

Где: $Z_{вых}$ – выходное сопротивление транзистора; S_m – крутизна транзистора; $U_{3и}$ – напряжение затвор-исток.

При условии, что $U_{\rm вых} = U_{\rm 34}$ выходное сопротивление транзистора $Z_{\rm вых}$ порядка 50 Ом.

Таким образом, соединение трех каскадов - общий затвор, общий исток и общий сток - позволяет создать усилитель, имеющий входное и выходное сопротивления 50 Ом, т.е. самосогласованный усилитель.

Однако использование схемы с общим затвором в первом каскаде приводит к повышенным шумам усилителя порядка 8...10 дБ. Кроме того каскад с общим стоком с ростом частоты быстро теряет свои усилительные свойства и на высоких частотах становится неустойчивым. Поэтому частотный диапазон самосогласованных усилителей ограничен 3...5 ГГц.

Усилители с распределенным усилением (усилителя бегущей волны -УБВ) в каждом каскаде, которого используется несколько параллельно включенных ПТШ, затворная и стоковая цепи, которых нагружены на согласованные линии с распределенными параметрами [52, 55]. Электрическая схема усилителя с распределенным усилением на ПТШ приведена на рис. 9.



Рис. 9. Схема усилителя с распределенным усилением на ПТШ

Индуктивные элементы линий вместе с собственными емкостями транзисторов (*Cзu*, *Ccu*) образуют ячейки искусственной линии с распределенными параметрами.

На относительно низких частотах индуктивные элементы оказывают слабое влияние на работу схемы, и все транзисторы работают, как один резистивный каскад, нагруженный по входу и выходу на резисторы *R1* и *R2* равные 50 Ом, с крутизной равной сумма крутизны отдельных транзисторов.

$$S = (S1 + S2 + S3 + S4). \tag{74}$$

Усилители с распределенным усилением имеют повышенный коэффициент усиления на низких частотах и обеспечивают в диапазоне
частот 2...18 ГГц коэффициент усиления 5...6 дБ, при этом коэффициенте шума 8...10 дБ. Малое усиление на один транзистор, повышенный коэффициент шума и самое главное низкий (порядка 10 %) КПД являются существенными недостатками таких усилителей.

Усилители с обратной связью, в которых согласование ПТШ с источником сигнала и нагрузкой осуществляется за счет введения внешней отрицательной обратной связи [52, 56]. Электрическая схема усилителя с обратной связью приведена на рис. 10.



Рис. 10. Схема усилителя с обратной связью на ПТШ

Обратная связь в виде последовательно соединенных сопротивления *Roc* и индуктивности *Loc* осуществляет как согласование, так и выравнивание коэффициента усиления в диапазоне частот.

На относительно низких частотах сопротивление обратной связи *Roc* и коэффициент усиления *Ku* и могут быть найдены с помощью простых выражений.

$$R_{\rm oc} = \left(Z_0 \left((S_m Z_0 K) - 1 \right) \right), \qquad K_u = \left((S_m Z_0) - \frac{1}{K} \right), \tag{75}$$

Где: *К* – допустимый КСВН на входе каскада; *Z*₀ – сопротивление генератора и нагрузки равные 50 Ом.

Оценим коэффициент усиления *Ки* и величину резистора обратной связи *Roc* при создании усилительного каскада на отечественном транзисторе «Пенс-6», имеющем крутизну 20 мА/В.

Расчеты показывают, что при КСВН = 2 сопротивление резистора обратной связи R_{oc} будет 50 Ом, а коэффициент усиления усилительного каскада K_u будет 0.5 дБ, т.е. усилительный каскад будет ослаблять сигнал.

Для создания усилителей с обратной связью необходимо использовать транзисторы с крутизной более 100 мА/В.

Усилители с диссипативными согласующе-выравнивающими цепями, в которых согласование входной и выходной цепей усилительного каскада осуществляется в верхней части рабочего диапазона, а в нижней части вводятся активные потери [52, 57]. Электрическая схема усилительного каскада с согласующе-выравнивающими цепями приведена на рис. 11.



Рис. 11. Усилительный каскад с простейшими согласующевыравнивающими цепями

В этой схеме резистор R1 включен последовательно с индуктивность L2, а конденсатор C1 включен параллельно индуктивности L2. При этом индуктивность L2 и конденсатор C1 образуют параллельный колебательный контур, который резонирует в верхней части рабочего диапазона частот, отключая от схемы резистор R1, а согласование источника сигнала с входом транзистора T1 осуществляется за счет индуктивности L1.

В нижней части диапазона влиянием индуктивностей *L1* и *L2* можно пренебречь. Входное сопротивление транзистора велико и согласование

осуществляется за счет резистора *R1*, величина которого для получения КСВН менее 2 должна быть менее 100 Ом.

Введение активных потерь в виде сопротивления *R1* на входе усилительного каскада приводит к увеличению его коэффициента шума. С учетом потерь коэффициент шума каскада составит.

$$K_{\rm III} = (K_{\rm T} + L), \tag{76}$$

Где: $K_{\rm m}$ – коэффициент шума усилительного каскада; $K_{\rm T}$ – коэффициент шума транзистора; L – потери в (дБ), вносимые сопротивлением *R1*.

Оценим величину вносимых потерь.

$$L = 10\log(\frac{P_1}{P_2}) = \left(10\log(\frac{U_1}{U_2})^2\right),\tag{77}$$

Где: P_1 и U_1 – мощность и напряжение на входе транзистора до подключения резистора R1; P_2 и U_2 – мощность и напряжение на входе транзистора после подключения резистора R1.

$$U_{1} = I_{1}Z_{\rm BX} = \left(\frac{E_{\rm \Gamma}Z_{\rm BX}}{Z_{o} + Z_{\rm BX}}\right), \qquad U_{2} = \left(I_{2}\frac{Z_{\rm BX}R_{1}}{Z_{\rm BX} + R_{1}}\right), \tag{78}$$

$$I_{2} = \left(\frac{E_{\Gamma}}{Z_{o} + \left(\frac{Z_{\mathrm{BX}}R_{1}}{Z_{\mathrm{BX}} + R_{1}}\right)}\right), \quad U_{2} = \left(\left(\frac{E_{\Gamma}}{Z_{o} + \left(\frac{Z_{\mathrm{BX}}R_{1}}{Z_{\mathrm{BX}} + R_{1}}\right)}\right) \times \left(\frac{Z_{\mathrm{BX}}R_{1}}{Z_{\mathrm{BX}} + R_{1}}\right)\right), \tag{79}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{\left(\frac{Z_0}{R_1}\right) + \left(\frac{Z_0}{Z_{BX}}\right) + 1}{\left(\frac{Z_0}{Z_{BX}}\right) + 1}\right), L = \left(10\log\left(\frac{\left(\frac{Z_0}{R_1}\right) + \left(\frac{Z_0}{Z_{BX}}\right) + 1}{\left(\frac{Z_0}{Z_{BX}}\right) + 1}\right)^2\right),\tag{80}$$

Поскольку Z_{BX} значительно больше R_1 то для сопротивления $R_1 = 100$ Ом потери составят L = 3,5 дБ, т.е. на 3,5 дБ увеличится коэффициент шума усилителя. По мере повышения частоты сопротивление R_1 будет отключаться, а вносимые потери будут уменьшаться. При этом будет уменьшаться и коэффициент шума усилителя.

$$K_{\rm III} = \left(K_{\rm T} + L(1 - (\frac{\omega}{\omega_{\rm B}}))\right),\tag{81}$$

Где: $\omega_{\rm B}$ – верхняя рабочая частота диапазона.

Для расширения полосы рабочих частот резистивные потери вводятся во все каскады усилителя. Усилители с диссипативными согласующевыравнивающими цепями способны перекрывать полосу частот в 5 - 6 октав.

Анализ схемных решений широкополосных усилителей на полевых транзисторах показал:

- усилители с реактивными согласующе-выравнивающими цепями и самосогласованные усилители не обеспечивают широкую полосу рабочих частот;
- усилители с распределенным усилением, имеют малое усиление на один транзистор, большой коэффициент шума и малый КПД;
- усилители с обратной связью требуют применения ПТШ с большой крутизной.

Поэтому целесообразно строить широкополосные усилители на ПТШ по схеме с диссипативными согласующе-выравнивающими цепями.

В настоящее время появились GaAs ПТШ с крутизной более 100 мА/В и возможно создание широкополосных усилителей с обратной связью.

Для создания широкополосных усилителей с одной стороны необходимо измерение оптимальных нагрузок ПТШ в широком диапазоне частот, а с другой необходимо проведения оптимизации для нахождения согласующе-выравнивающих элементов, обеспечивающих значение требуемые параметры усилителя. Для оптимизации значений согласующевыравнивающих элементов, обеспечивающих требуемые параметры усилителя, целесообразно использовать программу расчета микроволновых схем. После подтверждения всех параметров широкополосного СВЧ усилителя на ПТШ приступают к топологическому синтезу пассивной части интегральной схемы СВЧ на плате. При этом все пассивные тонкопленочные элементы располагаются на поверхности одной диэлектрической платы в виде ЕМ-структуры, синтезирующей оптимальные нагрузки на входе и выходе ПТШ. Расчет ЕМ-структуры, проводится с помощью программы расчета микроволновых схем позволяющей включить процесс проектирования интегральных схем СВЧ в единую программу САПР, при этом пассивная часть схемы рассчитывается с учетом взаимного влияния элементов расположенных на поверхности платы (кристалла) и влияния экрана.

1.2. Обзор микрополосковых ГИС и МИС СВЧ

В конце 70-х и начале 80-х годов на предприятии НПО «Исток» и других предприятиях отрасли изготавливались микрополосковые ГИС СВЧ различного функционального назначения на GaAs ПТШ. Конструкции ГИС СВЧ однокаскадных усилителей Х-диапазона частот показаны на рис. 12.



Рис. 12. ГИС СВЧ одноплатная (а); многоплатная (мозаичная) (б)

Микрополосковые ГИС СВЧ интегрировали на поверхности плат тонкопленочные индуктивные элементы – L в виде распределенных отрезков микрополосковой линии (длиной до 0.25 **1**) и резисторы – R. При этом обратная сторона плат металлизируется, а для заземления шунтирующих элементов L и R в плате формируются металлизированные отверстия. Платы

ГИС СВЧ изготавливались на подложках поликора размером $60 \times 48 \times 0.5$ мм по групповой планарной технологии, при этом отверстия в подложке формировались лазером. ГИС СВЧ имеют однослойную металлизацию, что позволяло изготавливать только (*L*, *R*) элементы. Навесные компоненты ГИС СВЧ конденсаторы – *С* и кристалл ПТШ – *T*. Для объединения тонкопленочных элементов и навесных компонентов в единую схему ГИС СВЧ требовалось большое число проволочных соединений.

Одноплатная и многоплатная (мозаичная) конструкции ГИС СВЧ широко используются ведущими зарубежными фирмами (Avantek, Miteg, Nardar и др.) [58-61], а также отечественными предприятиями и обеспечивают создание как маломощных, так и мощных ГИС СВЧ.

Достоинства гибридно-интегральных схем (ГИС СВЧ):

- Простота изготовления поликоровых плат, быстрый (2 недели) цикл изготовления;
- Высокая (более 400) добротность распределенных индуктивных элементов длиной до λ/4;
- Поликоровые платы и кристаллы ПТШ отбираются по НЧ, ВЧ и СВЧ параметрам и внешнему виду и устанавливаются в ГИС СВЧ, выход годных более 70 %;
- 4) Возможность настройки по постоянному току и СВЧ параметрам обеспечивают максимальные СВЧ параметры ГИС СВЧ.

Недостатки гибридно-интегральных схем (ГИС СВЧ):

- 1) Одноуровневая металлизация, малая интеграция *R* и *L*, много плат, конденсаторов и проволочных соединений;
- 2) Относительно большие массогабаритные характеристики;
- Разброс СВЧ параметров компенсируется ручной настройкой, большая трудоемкость изготовления;
- Как следствие ГИС СВЧ эффективны при небольших объемах производства, порядка 10³ шт./год.

В начала 80-х годов появилось большое количество статей о создании зарубежных МИС СВЧ на GaAs ПТШ [62-81]. Это были узкополосные и широкополосные малошумящие усилители, усилители мощности и даже приемники, содержащие малошумящий усилитель, смеситель и гетеродин.

В статьях были описаны конструкции МИС СВЧ и технологические особенности их изготовления и показано, что по сравнению с ГИС СВЧ технологический процесс изготовления МИС СВЧ длиннее т.к. включает процесс изготовления ПТШ и пассивной части. Для производства МИС СВЧ арсенидгаллиевых требовалось сложное И дорогое технологическое оборудование, обеспечивающее высокую повторяемость и воспроизводимость технологических процессов для получения приемлемого выхода годных кристаллов МИС СВЧ.

Микрополосковая конструкция МИС СВЧ на ПТШ, показана на рис. 13.



Рис. 13. Однокристальная конструкция МИС СВЧ на ПТШ

Конструкция МИС СВЧ содержала все активные и пассивные элементы на кристалле арсенида галлия. При этом все пассивные элементы МИС СВЧ тонкопленочные сосредоточенные пассивные элементы (R, L, C) и транзистор – T, располагались на одной стороне кристалла, обратная сторона кристалла металлизировалась, а для заземления шунтирующих элементов

были сформированы металлизированные отверстия. В качестве пассивных элементов МИС СВЧ использовались преимущественно сосредоточенные тонкопленочные пассивные (L, R, C) элементы, геометрические размеры которых менее 0.1 1. Для МИС СВЧ использована двухуровневая металлизация, позволяющая изготавливать МДМ-конденсаторы. В качестве первого уровня металлизации использовался алюминий либо система (титанплатина-золото) толщиной менее 1 мкм, а второго уровня металлизации система (титан-платина-золото) толщиной порядка 2 мкм. В качестве диэлектрического слоя использовались пленки SiO₂ и Si₃Ni₄ толщиной 0.2...0,3 мкм. Для изготовления отверстий в подложке использовались групповые химические и плазмохимические методы травления арсенида галлия. Кристаллы МИС изготавливались групповым способом на подложке арсенида галлия диаметром 2-3 дюйма на основе планарной технологии и прецизионной литографии. Габаритные размеры МИС СВЧ от 0.4×0.3×0.1 мм до 4×3×0.1 мм в зависимости от диапазона рабочих частот, выходной мощности и числа усилительных каскадов. По зарубежным оценкам выход годных кристаллов МИС СВЧ составлял менее 5 %, а ориентировочная цена МИС СВЧ была более 10 \$/мм².

Достоинства монолитных интегральных схем (МИС СВЧ):

- Двухуровневая металлизация, сосредоточенные пассивные (*R*, *L*, *C*) элементы и ПТШ формируются монолитно на одном кристалле арсенида галлия по групповой планарной технологии и прецизионной литографии;
- 2) Нет проволочных соединений и подстраиваемых элементов;
- 3) Высокая повторяемость СВЧ параметров.
- 4) Малые массогабаритные характеристики в сравнении с ГИС СВЧ.

Недостатки монолитных интегральных схем (МИС СВЧ):

- 1) Длинный порядка 6 месяцев цикл изготовления;
- Емкость конденсаторов не более 10 пФ, добротностью индуктивных элементов менее 30, низкие СВЧ параметры;
- 3) Пассивные элементы занимают порядка 90 % площади МИС СВЧ;

- 4) Выход годных МИС СВЧ порядка 1 %;
- 5) Высокая стоимость МИС СВЧ при малых объемах производства, целесообразно производить при объемах порядка 10⁶ шт./год.

1.3. Сравнение массы и габаритов ГИС и МИС СВЧ

Сравнение массогабаритных характеристик проводилось для однокаскадного усилителя (рис. 6), содержащего: индуктивные элементы – 4 шт.; конденсаторы – 4 шт.; резисторы – 1 шт.; выводы – 3 шт.; ПТШ – 1 шт. При оценке площади индуктивного элемента использовалась линия длиной *l* равной 1 мм.

Для ГИС СВЧ:

- 1) ширина линии W равна 0.5 мм;
- 2) площадь индуктивного элемента равна $S_l = l \times W = 0.5 \text{ мм}^2$;
- 3) площадь МОП-конденсатора емкостью 10 пФ с удельной емкостью диэлектрика SiO₂ равной 100 пФ/мм² будет порядка $S_{\rm C} = 0.25$ мм²;
- 4) площадь резистора 50 Ом с выводами будет порядка $S_R = 0.1 \text{ мм}^2$;
- 5) вывод занимает площадь порядка $S_B = 0.25 \text{ мм}^2$
- 6) площадь ПТШ буде порядка $S_T = 0.25 \text{ мм}^2$.

Оценим площадь, занимаемую ГИС СВЧ:

 $S_{\Gamma MC} = 4S_l + 4S_C + S_R + 3S_B + S_T = 4.1 \text{ mm}^2.$

Площадь ГИС СВЧ заполнена элементами не полностью, а с учетом коэффициента заполнения полезной площади – k = 0...1, поэтому полная площадь $S = \frac{S_{\Gamma И C}}{k}$. Полная площадь ГИС СВЧ с учетом коэффициента заполнения порядка 0.1...0.2 составит порядка $S = 20...40 \text{ мm}^2$.

Для МИС СВЧ:

Использовались линии шириной *W* равной 10 мкм, которые сворачивались в спираль. При этом квадратный индуктивный элемент занимал площадь равную $S_{\Box} = \left(\frac{l}{4}\right)^2$, а круглый $S_{\circ} = \left(\frac{\pi}{4}\right) \left(\frac{l}{\pi}\right)^2$. Для более существенного уменьшения занимаемой площади использовали

многовитковые индуктивные элементы с числом витков N. При этом площадь, занимаемая индуктивным элементом была для квадратного

индуктивного элемента $S_{\Box} \sim \left(\frac{l}{4N}\right)^2$, а для круглого $S_{\odot} \sim \left(\frac{\pi}{4}\right) \left(\frac{l}{\pi N}\right)^2$. Тогда:

- 1) площадь квадратного индуктивного элемента МИС СВЧ с числом витков N = 2 будет порядка $S_{\Box} = 0.016$ мм², а круглого $S_{\circ} = 0.019$ мм²;
- 2) площадь конденсатора величиной порядка 10 пФ, при удельной емкости диэлектрика Si₃Ni₄ порядка 200 пФ/мм² будет порядка $S_C = 0.05 \text{ мм}^2$;
- 3) резистор занимает площадь порядка $S_R = 0.03 \text{ мм}^2$;
- 4) вывод занимает площадь порядка $S_B = 0.01 \text{ мм}^2$;
- 5) ПТШ занимает менее 10 % площади кристалла МИС СВЧ.

Оценим площадь кристалла, занимаемую МИС СВЧ:

$$S_{\text{MHC}} = 4S_{l\Box} + 4S_C + S_R + 3S_B + S_T = 0.35 \text{ mm}^2.$$

Площадь кристалла МИС СВЧ – *S* заполнена элементами не полностью, а с учетом коэффициента заполнения полезной площади – k = 0...1, поэтому площадь кристалла будет $S = \frac{S_{\text{МИС}}}{k}$. Полная площадь кристалла МИС СВЧ с учетом коэффициента заполнения порядка 0.2...0.3 составит порядка $S = 0.6...1 \text{ мм}^2$.

Учитывая, что плата ГИС СВЧ устанавливается на теплоотвод, а размеры теплоотвода не определены, при этом МИС СВЧ тоже нужен теплоотвод, поэтому сравнение проведено без теплоотвода.

Результаты сравнения массогабаритных характеристик ГИС и ГМИС СВЧ приведены в табл. 5.

Таблица	5
---------	---

Параметры	ГИС СВЧ	МИС СВЧ
Подложка	Поликор	Арсенид галлия
Диэлектрическая проницаемость	9.6	12.9
Тангенс угла потерь	0.0002	0.006
Плотность, Г/см ³	4	5.5
l – длина линии, мм	1	1
W – ширина линии, мм	0.5	0.01
Н – толщина подложки, мм	0.5	0.1
<i>S</i> – площадь кристалла, платы, мм ²	40	1
Н – толщина подложки, мм	0.5	0.1
$V - объем (S \times H), MM^3$	20	0.1
П – плотность материала подложки, Г/см ³	4	5.5
M – масса (V × П), Г	0.08	0.0006
Выигрыш по площади	1	40
Выигрыш по объему	1	200
Выигрыш по массе	1	133
По массогабаритным характеристикам	1	26 666

МИС СВЧ позволяют уменьшить занимаемую площадь в 40 раз, объем в 200 раз, массу в 133 раз и улучшить массогабаритные характеристики ГИС СВЧ более чем в 26 666 раз.

1.4. Концепция гибридно-монолитных интегральных схем СВЧ

Проведенный обзор интегральных схем показал, что единственным типом отечественных интегральных схем СВЧ сантиметрового диапазона длин волн были микрополосковые ГИС СВЧ, как одноплатные, так и многоплатные (мозаичные). Они имели большие массогабаритные характеристики, трудоемкость изготовления и стоимость. Микрополосковые МИС СВЧ на арсениде галлия только разрабатывались, имели малый процент выхода годных кристаллов и требовали для изготовления дорогого технологического оборудования.

Таким образом, сложилась ситуация при которой ГИС СВЧ не могли решить проблему создания интегральных схем СВЧ с высокими СВЧ параметрами и надежностью, малыми массогабаритными характеристиками и стоимостью, а МИС СВЧ были не готовы к ее решению, и требовалось новое конструктивное решение для интегральных схем СВЧ.

Для преодоления недостатков ГИС СВЧ автором была предложена концепция создания интегральных схем СВЧ нового типа, обеспечивающих требования высоконадежной бортовой аппаратуры. Этот новый тип интегральных схем был назван гибридно-монолитные интегральные схемы (ГМИС) СВЧ, которые должны были обеспечить:

- 7) Короткий цикл изготовления и СВЧ параметры, сравнимые с ГИС СВЧ;
- Монолитную диэлектрическую плату, содержащую все пассивные (*R*, *L*, *C*) элементы, межсоединения и выводы;
- Возможность отбора плат и кристаллов активных компонентов по параметрам и внешнему виду;
- Высокую более 100 добротность индуктивных элементов, возможность настройки на максимальные СВЧ параметры, большой порядка 70 % выход годных;
- 11) Повышенную надежность за счет интеграции на монолитной диэлектрической плате всех конденсаторов и проволочных соединений;
- Изготовление монолитной диэлектрической платы по групповой планарной технологии и прецизионной литографии, и большие объемы выпуска, сравнимые с МИС СВЧ.

Концепция ГМИС СВЧ:

3) Вся пассивная часть ГМИС СВЧ, содержащая (*R*, *L*, *C*) элементы, межсоединения и выводы, выполняется на одной диэлектрической плате ГМИС СВЧ монолитно по групповой планарной технологии и

84

прецизионной литографии;

 Навесными на плате ГМИС СВЧ являются только кристаллы активных компонентов, минимизированные по площади.

Предложенная концепция предлагала разделить процесс изготовления МИС СВЧ на два технологических процесса.

- 3) Первый процесс изготовление монолитной диэлектрической платы ГМИС СВЧ, содержащей все пассивные элементы, включая и цепи питания, по групповой планарной технологии и прецизионной литографии, аналогичной МИС СВЧ. После изготовления монолитные диэлектрические платы отбирались по внешнему виду и НЧ и ВЧ параметрам и заведомо годные направлялись на сборку ГМИС СВЧ.
- 4) Второй процесс изготовление навесных кристаллов активных компонентов (диодов, транзисторов и МИС СВЧ) минимизированных по площади. За счет малой площади на одной полупроводниковой пластине изготавливалось большее количество кристаллов, что позволяло повысить до 5...10 раз выход годных активных компонентов. После изготовления кристаллы отбирались по внешнему виду и НЧ, ВЧ и СВЧ параметрам и заведомо годные направлялись на сборку ГМИС СВЧ.

Платы и кристаллы отбирались по внешнему виду и НЧ, ВЧ и СВЧ параметрам и заведомо годные направлялись на сборку ГМИС СВЧ. После сборки и подстройки по НЧ и СВЧ параметрам обеспечивался выход годных гибридно-монолитных интегральных схем СВЧ порядка 70 %.

Определение ГМИС СВЧ

Гибридно-монолитная интегральная схема СВЧ (ГМИС СВЧ) -

микроэлектронное изделие для усиления и преобразования СВЧ сигнала, в котором вся пассивная часть схемы выполнена монолитно на монолитной диэлектрической плате, содержащей интегральные (R, L, C) элементы, межсоединения и выводы, а навесные только кристаллы активных компонентов.

1.5. Классификация гибридно-монолитных интегральных схем СВЧ

В предложенной концепции настояшее время по созданы преобразовательные ГМИС СВЧ генераторные усилительные, И волн для высоконадежной сантиметрового диапазона длин бортовой аппаратуры. Они разделяются по уровню выходной мощности (маломощные и мощные), полосе рабочих частот (узкополосные и широкополосные) и конструктивному исполнению: одноплатные и многоплатные (мозаичные).

В соответствии с этим делением была проведена классификация ГМИС СВЧ показанная на рис. 4. Определены направления исследования.



Рис. 14. Классификация ГМИС СВЧ

1.6. Оценка надежности ГМИС СВЧ

Расчет показателей безотказности ГМИС СВЧ выполнен по последовательной схеме надежности (резервирование отсутствует), поэтому отказ (внезапный или параметрический) любого элемента электрической ГМИС СВЧ. Оценка приводит К отказу безотказности схемы последовательной схемы задаётся совокупность N элементов схемы, каждый из которых характеризуется индивидуальным значением интенсивности отказов λ_i , а интенсивность отказов ГМИС СВЧ определяется как сумма интенсивностей отказов отдельных элементов.

$$\lambda_{\text{ГМИС}} = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i , \quad T_{\gamma} = -\ln(\gamma) / \sum_{i=1}^{N} \lambda_i$$
(82, 83)

Где T_γ – гамма-процентная наработка до отказа изделия в целом, определенная с вероятностью γ.

Результаты оценки λ_i пассивных элементов, по данным справочника «Надежность ЭРИ» представлены в табл. 6.

Таблица 6

Тип элемента	λ·10 ⁸ 1/час
Конденсаторы оксидно-полупроводниковые (дискретные)	16
Конденсаторы интегральные тонкопленочные	0,10,3
Резисторы интегральные тонкопленочные	0,31
Индуктивности, микрополосковые элементы	< 0,1

Интенсивность отказов ГМИС СВЧ определяется как сумма интенсивностей отказов λ_{Π} сапфировой платы, содержащей все пассивные (*R*, *L*, *C*) элементы и интенсивностей отказов λ_{T} навесных активных элементов.

ГМИС СВЧ однокаскадный усилитель (рис. 6) содержит интегральные пассивные элементы: (С – 4 шт., L – 4 шт., R – 1 шт.) и навесные активные компоненты: (ПТШ) – 1 шт. Интенсивность отказов пассивной сапфировой платы будет. $\lambda_{\Pi} = \lambda_{C} + \lambda_{L} + \lambda_{R} = ((0.3 \cdot 4) + (0.1 \cdot 4) + (1)) \cdot 10^{-8} = 2.6 \cdot 10^{-8}$.

Оценка надежности арсенидгаллиевых ПТШ проведена расчетноэкспериментальным методом, при Еа – энергии активации процессов деградации полупроводниковой структуры и параметров ПТШ равной 0,8 эВ. Получена $\lambda_{\rm T}$ интенсивность отказов ПТШ порядка 1.6·10⁻⁷ 1/час [82]. Результаты расчета надежности ГМИС СВЧ приведены в табл. 7.

Таблица 7

Компонент	λ _i , 1/час	Т _γ , час	γ
Транзистор (ПТШ)	1.6.10-7	320 000	0.95
Сапфировая плата с (R, L, C)	$2.6 \cdot 10^{-8}$	1 973 000	0.95
ГМИС СВЧ (1 каскад)	$1.86 \cdot 10^{-7}$	258 000	0.95

Оценка показателей надежности ГМИС СВЧ показала, что самым ненадежным компонентом является навесной ПТШ.

В большинстве ГМИС СВЧ используется 2 - 3 ПТШ, соответственно показатели надежности ГМИС СВЧ будут в два или три раза меньше.

По сравнению с ГМИС СВЧ, показатели надежности аналогичных ГИС СВЧ будут ниже т.к. в них конденсаторы являются навесными компонентами, имеющими на порядок большую интенсивность отказов по сравнению с интегральными элементами. Кроме того каждый навесной компонент требует проволочных соединений, что дополнительно снижает надежность ГИС СВЧ. Интенсивность отказа пассивной части ГИС СВЧ будет $\lambda_{\Pi ruc} = \lambda_{C} + \lambda_{L} + \lambda_{R} = ((6 \cdot 4) + (0.1 \cdot 4) + (1)) \cdot 10^{-8} = 25.4 \cdot 10^{-8}.$

Таким образом, за счет применения навесных конденсаторов интенсивность отказа пассивной части ГИС СВЧ возрастает в 9 раз. Тогда интенсивность отказа аналогичной ГИС СВЧ будет.

 $\lambda_{\Gamma UC} = \lambda_{T} + \lambda_{\Pi_{\Gamma UC}} = 4.14 \cdot 10^{-7}$, а наработка до отказа будет $T_{\gamma} = 123\ 000$ час.

Таким образом, ГМИС СВЧ будут иметь наработку до отказа приблизительно в 2 раз больше, чем аналогичные ГИС СВЧ.

Заключение по главе 1

- 1. Даны научные основы интегральных схем СВЧ.
- 2. Проведен обзор и сравнение конструктивных и технологических особенностей ГИС и МИС СВЧ и показано, что недостатки ГИС СВЧ не позволяли решить проблему создания интегральных схем с высокими СВЧ параметрами и надежностью и малыми массогабаритными характеристиками, а МИС СВЧ были не готовы к их решению.
- 3. Впервые была предложена концепция создания интегральных схем СВЧ нового типа – гибридно-монолитных интегральных схем (ГМИС) СВЧ на одной монолитной диэлектрической плате, содержащей (*R*, *L*, *C*) элементы, межсоединения, выводы по групповой планарной технологии и прецизионной литографии.
- 4. Проведена классификация ГМИС СВЧ и определены направления исследования
- 5. Показано, что надежность ГМИС СВЧ порядка 2 раз выше надежности аналогичных ГИС СВЧ, за счет интеграции на монолитной диэлектрической плате навесных емкостных компонентов, имеющих интенсивность отказов на порядок выше по сравнению с интегральными элементами.

ГЛАВА 2. КОНСТРУКЦИЯ ГМИС СВЧ НА САПФИРЕ

В данной главе проведено сравнение МПЛ и КЛЭ линий и выбрана оригинальная конструкции ГМИС СВЧ на основе копланарной линии и монолитной сапфировой платы, содержащей все пассивные (*R*, *L*, *C*) элементы, межсоединения и выводы. Проведено сравнение массогабаритных характеристик ГИС и ГМИС СВЧ. Разработаны конструктивнотехнологические принципы создания ГМИС СВЧ, оценена рассеиваемая мощность.

2.1. Сравнение микрополосковой и копланарной линий

В микрополосковой линии для включения шунтирующих пассивных элементов (*R*, *L*, *C*) необходимы металлизированные отверстия в подложке. Наряду с микрополосковой линией, в которой сигнальный и заземляющий проводники лежат на разных сторонах подложки, существовала копланарная линия, в которой сигнальный и заземляющий проводники лежат на одной стороне подложки. На рис. 1 показана конструкция копланарной линии с экранирующей металлизацией на обратной стороне подложки (КЛЭ).



Рис. 1. Копланарная линия КЛЭ

В копланарной линии КЛЭ для включения шунтирующих пассивных элементов (*R*, *L*, *C*) металлизированные отверстия в подложке не нужны. Благодаря этому в копланарной конструкции легко включать как последовательные, так и шунтирующие элементы. В копланарной линии с экранирующей металлизацией на обратной стороне подложки (КЛЭ) ширина линии W, щель S между центральным проводником и заземляющими проводниками линии, и толщина подложки H определяют волновое

сопротивление линии.

Для сравнения и расчета микрополосковой и копланарной линий [83] использовалась программа Fagot И система автоматического проектирования и расчета (САПР), а также графические и аналитические зависимости, приведенные в работах [84-86]. Сравнивались конструкции МПЛ и КЛЭ линий с подложкой из алюмооксидной керамики Al₂O₃ (поликора). Сравнительные расчеты МПЛ и КЛЭ линий с волновым сопротивлением 50 Ом показали, что потери в КЛЭ на частоте 10 ГГц, выше на 50...60 % по сравнению с МПЛ и увеличиваются с ростом частоты и уменьшением ширины проводника. При этом КЛЭ имеет повышенную емкость за счет заземляющих проводников, а ширина W копланарной линии всегда меньше ширины W микрополосковой линии МПЛ. В копланарной линии КЛЭ общая емкость складывается из двух емкостей первая между центральным проводником и экраном, и вторая между центральным и заземляющими проводниками. При этом емкость между центральным проводником и экраном является паразитной емкостью снижает добротность

линии $Q = \frac{Z_B}{R} = \frac{\left(\sqrt{\frac{L}{c}}\right)}{R}$ и ее надо уменьшать. Для уменьшения паразитной емкости автор предложил приподнять копланарную линию и ввести между экраном и подложкой воздушный зазор (рис. 2).



Рис. 2. Копланарная линия КЛ с зазором

В конструкции КЛ с воздушным зазором длина линии L, ширина линии W, щель S, толщина подложки H и воздушный зазор H1. Наличие воздушного зазора разделило паразитную емкость между центральным проводником и экраном на две последовательно включенные емкости пропорциональные площади центрального проводника. При этом емкость C_1 пропорциональна диэлектрической проницаемости подложки поликора ($\varepsilon = 9.6$), а емкость C_2 пропорциональна диэлектрической проницаемости воздуха ($\varepsilon = 1$). Рассчитаем емкость C_1 при длине линии l равной 1 мм, ширине линии W = 0.25 мм, толщине подложки поликора H = 0.25 мм. $C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{l \times W}{H} = \varepsilon_0 (9.6) \frac{l \times W}{H} = 0.09$ пФ, воздушная емкость при толщине воздушного зазора H1 = 0.25 мм будет в ε раз меньше $C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{l \times W}{H} = \varepsilon_0 (1) \frac{l \times W}{H} = 0.009$ пФ. Тогда общая паразитная емкость C_{Π} двух последовательно включенных конденсаторов будет меньше емкости наименьшего конденсатора $C_{\Pi} = \frac{c_1 \times c_2}{c_1 + c_2} = 0.008$ пФ. Наличие воздушного зазора уменьшает паразитную емкость более чем в 10 раз.

В литературе не было расчета подвешенной КЛ с приближенным снизу экраном, поэтому для расчета использовалась программа Fagot [85].

Исследовалась зависимость потерь от частоты в КЛ длиной 1 мм при различной ширине проводника и различной толщине подложки, при этом суммарная толщина H + H1 была постоянна, т.е. увеличение толщины подложки уменьшало воздушный зазор и наоборот.

Исследования показали, что потери в КЛ зависят от ширины проводника W. Волновое сопротивление КЛ определяется шириной центрального проводника W и щелью S между центральным проводником и заземляющими проводниками, при этом волновое сопротивление КЛ порядка 50 Ом соответствует $K = \frac{s}{w} = 0.5$ и практически не зависит от толщины подложки. Сравнение КЛ и МПЛ линий показало, что на частоте 10 ГГц потери КЛ на 30...40 % выше, чем в МПЛ при одинаковой ширине W линии. Исследование потерь КЛ с волновым сопротивлением более 50 Ом показало, что с увеличением величины $K = \frac{s}{W}$ от 0.5 до 3 потери в КЛ уменьшаются и становятся соизмеримыми с МПЛ, при равной W ширине линии. Расчет зависимости замедления в КЛ показал, что замедление меньше, чем в МПЛ.

Для экспериментального исследования потерь необходимо было подключить КЛ к измерительной установке. Все измерительные установки оснащались волноводными либо коаксиальными трактами и для соединения с ними существовали контактные устройства обеспечивающие подключение микрополосковой линии – МПЛ через коаксиально-микрополосковой переход, а подключение КЛ было проблемой.

Для преодоления этой проблемы автором была предложена оригинальная конструкция интегральной схемы СВЧ, которая содержала рамку с микрополосковыми выводами и сапфировую плату с КЛ линией. Предложенная конструкция интегральной схемы СВЧ приведена на рис. 3.



Рис. 3. Конструкция интегральной схемы СВЧ

В этой конструкции экранная металлизация МПЛ линии соединялась с заземляющей металлизаций КЛ линии, а сигнальный проводник микрополосковой линии соединялся с сигнальным проводником КЛ. МПЛ рамка с выводами изготавливалась на подложке из поликора толщиной 0.5 мм по традиционной технологии ГИС СВЧ, по которой изготавливалась и КЛ линия на сапфировой плате толщиной 0.2...0.4 мм. Для соединения экранной металлизации рамки с заземляющей металлизацией платы использовался токопроводящий клей, а для соединения сигнального проводника МПЛ с сигнальным проводником КЛ использовалась золотая проволока. Предложенная конструкция интегральной схемы СВЧ позволила проводить экспериментальные исследования параметров КЛ, используя контактные устройства микрополосковой линии. Экспериментальные исследования подтвердили результаты теоретических исследований. Современные программы расчета микроволновых схем позволяют, рассчитывать МПЛ, КЛЭ и КЛ линии и их ЕМ-структуры. Для оценки добротности МПЛ, КЛЭ и КЛ отрезков линий длиной порядка $\lambda/4$ разомкнутых на конце, рассчитывались ЕМ-структуры оценивались: резонансная И частота, волновое сопротивление и добротность отрезков линий. Добротность отрезков линий длиной порядка $\lambda/4$ оценивалась по значению КСВН. Электрическая схема измерения параметров линий приведена на рис. 4.



Рис. 4. Электрическая схема измерения параметров линий

Сравнивались волновое сопротивление $Z_B = \sqrt{\frac{L}{c}}$, резонансная частота

 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ и добротность $Q = \frac{Z_B}{R} = \frac{\left(\sqrt{\frac{L}{c}}\right)}{R}$ разомкнутых на конце отрезков МПЛ и КЛ с толщиной проводника 2 мкм, и длиной 3 мм ($\lambda/4$) на подложках поликора и GaAs. При этом длина волны $\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon\mu}}$, а замедление $\sqrt{\epsilon\mu} = \frac{c}{f\lambda}$.

Результаты сравнения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Материал	Линия	Ширина	Толщина	Воздушный	Z_B ,	f рез,	Q
		W, мкм	подложки	зазор, мкм	Ом	ГГц	
			Н, мкм				
Поликор	МПЛ	500	500	0	50	10	498
Поликор	МПЛ	250	250	0	50	9.9	288
GaAs	МПЛ	70	100	0	50	8.6	73
GaAs	МПЛ	10	100	0	100	8.8	25
Сапфир	КЛ	250	250	250	50	11.6	230
Сапфир	КЛ	50	250	250	100	11.2	115
Сапфир	КЛ	10	250	250	140	11	34

Сравнение показало, что добротность подвешенной КЛ с шириной проводника 50 мкм на сапфире на 30 % выше добротности МПЛ с шириной проводника 70 мкм на арсениде галлия. Поэтому для ГМИС СВЧ была выбрана подвешенная КЛ. Наличие воздушного зазора в подвешенной КЛ линии обеспечило слабую чувствительность параметров КЛ от толщины подложки и позволило использовать подложки толщиной 0.2...0.4 мм.

Керамическая рамка с выводами является отрезком МПЛ. Верхний предел рабочего диапазона частот МПЛ определяется критической частотой интенсивного возбуждения поверхностных волн. Для подложки из поликора толщиной 0.5 мм критическая частота порядка 23 ГГц.

2.2. Обоснование копланарной конструкции ГМИС СВЧ

Проведенный обзор микрополосковых интегральных схем СВЧ, теоретическое и экспериментальное исследование параметров МПЛ, КЛЭ и КЛ линий и сравнение их параметров позволило автору предложить новое конструктивное решение для интегральной схемы СВЧ.

Новый тип интегральных схем был назван гибридно-монолитные интегральные схемы – ГМИС СВЧ, а их конструкция показана на рис. 5.



Рис. 5. Оригинальная конструкция ГМИС СВЧ на основе КЛ: в разрезе (*a*); в изометрии (б)

Стержневым вопросом при поиске нового конструктивного решения был способ заземления. Трудности заземления в традиционных конструкциях ГИС и МИС СВЧ связаны с использованием микрополосковой линии, в которой сигнальный проводник расположен на одной стороне подложки, а заземляющий на другой. При этом для включения шунтирующих элементов неизбежны металлизированные отверстия.

Для преодоления недостатков, присущих традиционным микрополосковым конструкциям ГИС СВЧ, впервые в отечественной и зарубежной практике была предложена конструкция интегральной схемы СВЧ нового типа на основе копланарной линии и одной сапфировой платы [52, 87].

В оригинальной конструкции ГМИС СВЧ на основе КЛ и одной монолитной сапфировой платы, все сосредоточенные пассивные *R*, *L*, *C* элементы, межсоединения, выводы и заземляющая металлизация, а также навесной кристалл ПТШ расположены на одной стороне диэлектрической платы. Переход от КЛ к МПЛ осуществляется с помощью керамической рамки с микрополосковыми выводами. Для создания сосредоточенных элементов, включая МДМ-конденсаторы, используется двухслойная металлизация, как и в МИС СВЧ.

Металлизация занимает существенную часть сапфировой платы и является единой заземляющей плоскостью. При ЭТОМ все нижние обкладки блокировочных конденсаторов располагаются под металлизацией, а резисторы, индуктивности разделительные конденсаторы, И выводы формируются в окнах, вскрытых в металлизации. В такой конструкции соединение с «землей» возможно в любой точке платы. При этом все элементы интегральной схемы СВЧ располагаются в центральной части платы, а её периферийная часть служит для обращенного монтажа платы в Корпусом является керамическая рамка с микрополосковыми корпус. выводами, которая совместно с сапфировой платой создают внутренний объем закрытый диэлектрической сапфировой крышкой, а для улучшения отвода тепла ГМИС СВЧ установлено на металлическое основание, имеющее полость для платы.

Использование обращенного монтажа позволяет непосредственно соединить металлизацию сапфировой платы с экранной металлизацией керамической рамки и практически исключить проволочные соединения.

Расположение всех пассивных элементов на одной стороне сапфировой ГМИС СВЧ. платы отсутствие металлизированных отверстий И металлизации обратной стороны, позволяет для изготовления платы использовать все возможности современной групповой планарной технологии и прецизионной литографии.

Для установки в **модуль** СВЧ предложены два варианта конструкции ГМИС СВЧ, показанные на рис. 6.



Рис. 6. Конструкции ГМИС СВЧ для установки в модуль СВЧ:

вариант 1 с помощью винтов (*a*); вариант 2 с помощью пайки (б) Металлическое основание изготавливается из сплава МД-50 (медь 50% и молибден 50 %). Керамическая рамка изготавливается из поликора. Монолитная сапфировая плата содержит всю пассивную часть ГМИС СВЧ. Сапфировая крышка является забракованной по параметрам сапфировой платой, с которой удалена металлизация.

ГМИС СВЧ (вариант 1) устанавливается в модуль СВЧ с помощью винтов, имеет габаритные размеры 12×7.5×1.8 мм, массу 0.6 Г. ГМИС СВЧ (вариант 2) устанавливается в модуль СВЧ с помощью пайки, имеет габаритные размеры 7.5×6×1.8 мм, массу 0.4 Г. .

Электрическая схема первых однокаскадных ГМИС СВЧ – усилителей Х-диапазона частот, показана на рис. 7.



Рис. 7. Электрическая схема однокаскадного усилителя

Учитывая, что воздействие статического электричества на выводы ГМИС СВЧ, а также скачки напряжения, в том числе в момент включения и выключения источника питания приводят к выходу ПТШ из строя. Для защиты ПТШ затворы соединены с землей через малое сопротивление, а напряжение питания на ГМИС СВЧ подается через последовательный балластный резистор *R2* и защитный диод (стабилитрон) *D*1.

Блокировочный конденсатор *Сбл1* в цепочке автосмещения ограничивает диапазон рабочих частот снизу и при емкости конденсатора 10 пФ нижняя рабочая частота ГМИС СВЧ должна быть выше 3 ГГц, а при емкости конденсатора 100 пФ выше 0.3 ГГц.

2.3. Выбор конструкции пассивных R, L, C элементов

Конструкция тонкопленочных элементов (*R*, *L*, *C*) должна удовлетворять целому комплексу конструктивных и технологических требований, предъявляемых к элементам ГМИС СВЧ, наиболее важными из них являются: планарность конструкции; малая занимаемая площадь; технологичность; малые потери на СВЧ; стабильность параметров; стойкость

к воздействию повышенной температуры окружающей среды до температуры термокомпрессии 300...330 °С.

Тонкопленочные резисторы являются важными элементами ГМИС СВЧ, и должны быть стабильны, особенно после нагрева на воздухе до температуры термокомпрессии 300...330 °C. Традиционная технология изготовления тонкопленочных резисторов ГИС связана с напылением тонкой (10...20 нм) пленки металлов (хрома, титана, тантала), с большим удельным сопротивлением (табл. 2).

Таблица 2

No	Материал	Удельное	Удельная
П.П.	резистора	сопротивление,	проводимость,
		мкОм·м	Siemens/M
1.	Хром	0,130	7.6×10^{6}
2.	Титан	0,470	2.1×10^{6}
3.	Тантал	0,124	8.1×10^{6}

Проведенные исследования стабильности тонкопленочных резисторов путем нагрева и выдержки их на воздухе при температуре термокомпрессии показали, что сопротивление резисторов увеличивается тем больше, чем больше время выдержки [88]. Анализ показал, что причиной этого является взаимодействие поверхности нагретой пленки металла с кислородом воздуха и образование пленки окисла металла,

снижающего толщину резистивного слоя. Для устранения этого явления предложена конструкция тонкопленочного резистора [89], в которой защитная пленка диэлектрика покрывает всю поверхность резистивного слоя, предохраняй его от взаимодействия с кислородом. Исследования показали, что уход сопротивления незащищенных резисторов составляет 50...100 %, а защищенных 1...7 %, при этом танталовые резисторы оказались наиболее стабильными. Конструкция танталового резистора с защитной пленкой диэлектрика используется в ГМИС СВЧ. Подстройка сопротивления осуществляется набором резисторов конструкция, которых приведена на рис. 8.



Рис. 8. Конструкция тонкопленочного резистора (*a*); подстраиваемая (б) Подстраиваемый тонкопленочный резистор *R* представляет набор сопротивлений разного номинала, а общее сопротивление резистора определяется формулой:

$$R = (R_0 2^0 + R_0 2^1 + \dots R_0 2^n), \tag{1}$$

где: R_0 – минимальное сопротивление резистора; n – номер резистора.

Подстройка резисторов осуществляется за счет механического разрыва проводников объединяющих резисторы либо проволочных перемычек. Сопротивление тонкопленочного резистора рассчитывается исходя из удельного сопротивления материала слоя и геометрических размеров.

$$R = \left(\rho \, \frac{l}{s}\right),\tag{2}$$

Где: R – электрическое сопротивление резистора, Ом; ρ – удельное сопротивление резистивного слоя; l – длина резистора, м; $s = b \times h$ – площадь поперечного сечения резистора, м²; b – ширина резистора, м; h – толщина резистора, м. Сопротивление резистора прямо пропорционально длине резистора и обратно пропорционально площади поперечного сечения резистора. Если в уравнении (2) длину резистора принять равной ширине резистора, тогда уравнение примет следующий вид.

$$R = \rho \frac{l}{s} = \frac{\rho b}{b h} = \frac{\rho}{h}, \qquad (3)$$

Получим сопротивление квадратного резистора R_{\Box} , Ом.

В ГМИС СВЧ используются резисторы с $R\Box = (50 \text{ и } 100)$ ом. Если сопротивление любого резистора Rx разделить на $R\Box$, то получим число N.

$$N = Rx/R\Box; N = l/b, \qquad (4)$$

Число N связывает электрические и геометрические параметры резистора.

Тонкопленочные конденсаторы щелевой конструкции имеют малую удельную емкость (менее 1 $\pi \Phi/mm^2$) и занимают большую площадь. Наиболее ГМИС СВЧ являются двухобкладочные подходящими для МДМконденсаторы со структурой металл-диэлектрик-металл. Для уменьшения площади занимаемой конденсатором необходимо применять диэлектрики, которые позволяют получить наибольшую удельную емкость. МДМконденсаторы имеют тонкое место по линии пересечения нижней обкладки с верхней, где велика вероятность пробоя пленки диэлектрика. Для повышения надежности МДМ-конденсатора в ГМИС СВЧ с одной стороны стремятся уменьшить площадь пересечения верхней обкладки с краем нижней путем формирования окон, а с другой формируют «воздушные» мосты.

Для подстройки конденсаторов используется ряд конденсаторов конструкции, которых приведены на рис. 9.



Рис. 9. Конструкция конденсатора (*a*); подстраиваемая (б) Подстраиваемые конденсаторы представляют собой набор конденсаторов разного номинала, а общая емкость конденсатора определяется формулой:

$$C = C_0 2^0 + C_0 2^1 + \dots C_0 2^n, (5)$$

где: C₀ – минимальная емкость конденсатора; n – номер конденсатора.

Подстройка конденсаторов осуществляется за счет механического разрыва проводников объединяющих конденсаторы либо проволочных перемычек.

Емкость двухобкладочного конденсатора рассчитывается исходя из материала диэлектрического слоя и геометрических размеров плоского конденсатора. Емкость конденсатора прямо пропорциональна площади одной обкладки конденсатора и относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика, и обратно пропорциональна расстоянию между обкладками конденсатора. Если площадь конденсатора равной 1 мм², тогда уравнение для величины емкости примет вид.

$$C = \varepsilon \varepsilon_o \frac{S}{d} = \left(\varepsilon \frac{8.854}{d}\right),\tag{6}$$

При этом получаем удельную емкость конденсатора на 1 мм² площади конденсатора *Суд*. Если емкость любого конденсатора *Сх* разделить на *Суд*, то получим число N, при этом площадь конденсатора $Sx = (l \times b)$. Если принять l = b = bx, то получим.

$$N = Cx/Cyд; \sqrt{N} = bx,$$
 (7)

Таким образом, число N связывает электрические и геометрические параметры конденсатора. Важнейшим параметром, определяющим возможность использования конденсатора на CBЧ являются потери, которые могут быть выражены через $tg\delta$.

$$tg\delta = (tg\delta 1 + \omega CRe), \tag{8}$$

Где: $tg\delta 1$ – потери в диэлектрике независимые от частоты;

Re – сопротивление обкладок.

Из выражения (11) видно, что для уменьшения потерь в конденсаторе необходимо не только уменьшать $tg\delta$ диэлектрика, но и уменьшать сопротивление обкладок, т.е. использовать материалы с малым удельным сопротивлением. Малый $tg\delta$ порядка 0.001 имеют диэлектрические слои SiO₂ и Ta₂O₅, получаемые BЧ-распылением. В конструкции ГМИС СВЧ используются оба слоя толщиной порядка 0.3 мкм, при этом удельная емкость SiO₂ порядка 100 пФ/мм², а Ta₂O₅ порядка 400 пФ/мм².

Тонкопленочные индуктивности являются важными элементами ГМИС СВЧ и выполняются в виде отрезков линий с повышенным волновым сопротивлением, меандра и спирали (квадратная и круглая), межсоединений и выводов. Повышенную индуктивность на единицу площади имеют спиральные индуктивные элементы, которые целесообразно использовать при синтезе элементов ГМИС СВЧ. Для подстройки индуктивных элементов используются подстраиваемые индуктивные элементы. Конструкции индуктивных элементов ГМИС СВЧ приведены на рис. 10.



Рис. 10. Конструкция индуктивности (а); подстраиваемая (б)

Подстройка индуктивностей *L*, представляющих собой спиральные индуктивности осуществляется за счет изменения длины наружного витка индуктивности за счет механического разрыва проводников замыкающих индуктивность либо проволочных перемычек. В качестве материала проводника индуктивностей используются металлы, имеющие малое удельное сопротивление, при этом толщина проводника выбирается с учетом скин-эффекта, а ширина с учетом электромиграции.

2.4. Сравнение массы и габаритов ГИС и ГМИС СВЧ

Проведен расчет массогабаритных характеристик ГМИС СВЧ для электрической схемы (рис. 7) содержащей: индуктивных элементов (4), конденсаторов (4), резисторов (1), выводов (3), ПТШ (1).

Для получения высоких СВЧ параметров ГМИС СВЧ ширина КЛ принята равной 50 мкм, при этом добротность отрезков КЛ более 100 на сапфировой плате толщиной 250 мкм (табл. 1).

Расчет площади занимаемой ГМИС СВЧ:

- 1) индуктивный элемент длиной 1 мм прядка $S_l = 0.06 \text{ мм}^2$;
- 2) конденсатор емкостью 10 пФ, при удельной емкости диэлектрика Ta_2O_5 порядка 400 пФ/мм² порядка $S_C = 0.025$ мм²;
- 3) резистор занимает площадь порядка $S_R = 0.03 \text{ мм}^2$.
- 4) вывод порядка $S_B = 0.01 \text{ мм}^2$;
- 5) ПТШ $S_T = 0.25 \text{ мм}^2$.

Тогда площадь, занимаемая ГМИС СВЧ, будет.

 $S_{\Gamma M \mu C} = 4S_l + 4S_C + S_R + 3S_B + S_T = 0.6 \text{ mm}^2.$

Площадь платы ГМИС СВЧ – *S* заполнена элементами не полностью, а с учетом коэффициента заполнения полезной площади – k = 0...1, поэтому площадь платы будет $S = \frac{S_{\Gamma M U C}}{k}$. Коэффициент заполнения площади платы ГМИС СВЧ порядка 0.1...0.2.

Учитывая, что плата ГИС СВЧ устанавливается на теплоотвод, а размеры теплоотвода не определены, при этом ГМИС СВЧ тоже нужен теплоотвод, поэтому сравнение проведено без теплоотвода.

Результаты сравнения массогабаритных характеристик ГИС и ГМИС СВЧ приведены в табл. 3.

Таблица 3	3
-----------	---

Параметры	ГИС СВЧ	ГМИС СВЧ
Подложка	Поликор	Сапфир
Ширина линии, мм	0.5	0.05
S – площадь платы, мм ²	50	5
Н – толщина платы, мм	0.5	0.25
$V - объем (S \times H), MM3$	25	1.25
П – плотность материала платы, Г/см ³	4	4
M – масса (V × П), Г	0.1	0.005
Выигрыш по площади	1	10
Выигрыш по объему	1	20
Выигрыш по массе	1	20
По массогабаритным характеристикам	1	400

Таким образом, ГМИС СВЧ позволяет уменьшить занимаемую площадь в 10 раз, объем в 20 раз, массу в 20 раз и улучшить массогабаритные характеристики ГИС СВЧ более чем в 400 раз.

2.5. Максимальная рассеиваемая мощность ГМИС СВЧ

Теплопроводность обусловлена передачей кинетической (колебательной) энергии атомов (молекул), составляющих тело (вещество), в горячей области к менее нагретым областям. В результате чего, средняя кинетическая энергия атомов (молекул) выравнивается, как и температура в объеме тела (вещества).

В установившемся режиме тепловой поток энергии – *P*, передающийся посредством теплопроводности, пропорционален градиенту температуры на единице пути этого потока.

$$P = -A(dT/dx), \qquad (9)$$

Знак минус указывает, что энергия переносится в направлении убывания температуры. Где: $A = (Ph)/(S\Delta T)$ – коэффициент теплопроводности

Р – полная мощность тепловых потерь Вт (тепловой поток Дж/сек);

S – площадь области теплообмена м²;

 ΔT — перепад температур на контролируемом участке;

h – толщина тепло проводящего слоя м.

Тепловое сопротивление определяет падение температуры на пути прохождения теплового потока по длине – *h* и площади – *S*.

$$Rt = \frac{\Delta T}{P} = h/AS , \qquad (10)$$

Где: Rt – тепловое сопротивление имеет размерность К/Вт или (°С/Вт) и определяется отношением разности температур горячей и холодной поверхности ΔT теплопроводящего материала к проходящему по нему тепловому потоку Р.

Расчет тепловой мощности проводился с помощью программы теплового расчета для конструкции ГМИС СВЧ, показанной на рис. 10.



Рис. 10. Модель в разрезе

Исходные данные для теплового расчета приведены в табл. 4.

Таблица 4

Номе	Наименование	Ктп,	Мощность	Толщин
р		Вт/(м•К)	рассеяния,	a,
на			Вт	МКМ
рис.				
1	Кристалл GaAs ПТШ	46		
2	Поверхность кристалла с		0,15	
	областью тепловыделения			
3	Клей GaAs-сапфир	15 (30)		10
4	Сапфир	40		
5	Клей сапфир-поликор	15 (30)		
6	Поликор.	40		
7	Припой Au-St поликор-Мд-50	15 (30)		
8	Мд-50	250		
9	Медное основание - модель	100-384		

Сетка модели с областью тепловыделения 1 × 300 мкм на поверхности кристалла GaAs приведена на рис. 11.



Рис. 11. Сетка модели: на кристалле (а); всей модели (б)

Результаты исследования температурного поля вблизи канала GaAs ПТШ для тепловыделения с одного кристалла ПТШ в ГМИС базовой конструкции приведены на рис. 12.




Рис. 12. Модель в разрезе (*a*); изометрия GaAs-сапфир (δ); GaAs-сапфир (*в*)

б)

Температурное поле для варианта: температура основания 0 С, КТП клея – 15, меди =100 Вт/(м· *K*). Зависимость максимальной температуры Тмах от теплопроводности клея под кристаллом приведена в табл. 4.

Таблица 4

Ктп клея (GaAs-	(Ктп меди 100)	(Ктп меди 384)	Температура
сапфир),	Макс. температура	Макс. температура	основания,С
Вт/(м· К)			
5	27,07	27,07	0
15	26,27	26,26	0
30	26,03	26,02	0
50	25,90	25,89	0
Ктп клея (сапфир-	(Ктп меди 100)	(Ктп меди 384)	Температура
АрГа), Вт/(м град)	Макс.	Макс.	основания,С
	Температура	Температура	
5	80,86	80,85	50
15	80,02	80,01	50
30	79,76	79,76	50
50	79,62	79,61	50

Различные варианты расположения GaAs кристаллов GaAs ПТШ на сапфировой плате приведены на рис. 13.



Рис. 13. Перегрев канала GaAs ПТШ на сапфировой плате в ГМИС СВЧ: два кристалла 27 °С (*a*); семь кристаллов 42 °С (*б*)

Расчеты показали, что в ГМИС СВЧ два кристалла GaAs ПТШ выделяют мощность 0.3 Вт и имеют перегрев канала 27 °С, а семь кристаллов GaAs ПТШ выделяют мощность 1.05 Вт и имеют перегрев канала 42 °С. ГМИС СВЧ имеют диапазон рабочих температур -60...+85 °С. С учетом перегрева температура канала GaAs ПТШ не должна превысить 140 °С.

При температуре ГМИС +85 °С и перегреве 42 °С температура канала GaAs ПТШ будет 127 °С. Температурный перегрев канала ПТШ от суммарной выделяемой мощности приведен на рис. 14.



Рис. 14. Температурный перегрев канала ПТШ

Тепловой расчет показал, что для ГМИС СВЧ максимальная рассеиваемая мощность порядка 1 Вт.

2.6. Общие принципы конструирования ГМИС СВЧ

Предложенные конструктивно технологические решения, а также экспериментальные теоретические И исследования тонкопленочных элементов позволили сформулировать следующие конструктивнотехнологические принципы создания ГМИС СВЧ:

- Все сосредоточенные пассивные элементы и навесные активные компоненты располагаются на одной стороне сапфировой платы;
- Вся поверхность сапфировой платы металлизируется и является единой заземляющей плоскостью;
- Металлизация двухуровневая с диэлектрическими слоями SiO₂ и Ta₂O₅, при этом на первом уровне располагаются резисторы и нижние обкладки блокировочных конденсаторов;
- 11) Индуктивные, резистивные элементы, а также разделительные конденсаторы формируются в окнах, вскрытых в металлизации;
- 12) Подстроечные элементы в ГМИС СВЧ соединяются со схемой «воздушными» мостами;
- 13) Для монтажа ГМИС СЧ в корпус используется «обращенный монтаж»;
- 14) Максимальная рассеиваемая мощность порядка 1 Вт.

Эти конструктивно-технологические принципы были приняты как базовые при конструировании ГМИС СВЧ.

Заключение по главе 2

- Впервые предложено оригинальное конструктивное решение для ГМИС СВЧ на основе копланарной линии и одной сапфировой платы, содержащей все сосредоточенные пассивные элементы и кристаллы навесных активных компонентов.
- Копланарная конструкция позволила изготавливать монолитную сапфировую плату ГМИС СВЧ по групповой планарной технологии и прецизионной фотолитографии, с высокой повторяемость параметров и надежностью.
- Снизу диапазон рабочих частот ГМИС СВЧ ограничен емкостью блокировочных конденсаторов: при емкости 10 пФ нижняя рабочая частота должна быть выше 3 ГГц, а при емкости 100 пФ выше 0.3 ГГц.
- 4. Сверху диапазон рабочих частот ГМИС СВЧ ограничен керамической рамкой с МПЛ линиями, с критической частотой порядка 23 ГГц.
- Проведено сравнение массы и габаритов и показано, что ГМИС СВЧ обеспечивают уменьшение более чем в 3 раза массогабаритных характеристик по сравнению с ГИС СВЧ.
- Оценена рассеиваемая мощность и показано, что максимальная рассеиваемая мощность ГМИС СВЧ составляет порядка 1 Вт.

ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГМИС СВЧ

В данной главе оптимизированы процессы нанесения металлических и диэлектрических слоев SiO₂ и Ta₂O₅, для формирования МДМконденсаторов, стабильных резисторов и разработан технологический процесс изготовления пассивной части ГМИС СВЧ на монолитной сапфировой плате по групповой планарной технологии и прецизионной литографии. Создан сапфировый технологический базис для промышленного производства ГМИС СВЧ.

3.1. Изготовление пассивных элементов

Конструкция ГМИС СВЧ полагает наличие диэлектрической подложки, на которой размещаются тонкопленочные пассивные элемента и кристаллы активных компонентов. Для формирования МДМ-конденсаторов и уменьшения геометрических размеров элементов, существенно возрастает требования к качеству обработки поверхности и ее плоскостности. Кроме того повышаются требования к теплопроводности материала подложки, так как возрастает удельная (Вт/мм²) рассеиваемая мощность. Одновременно с ростом объема выпускаемых приборов и расширением областей их применения возрастает роль таких факторов, как доступность материала подложки и его стоимость.

Анализ параметров известных подложечных материалов показал, что ни один из них не может одновременно удовлетворить всем перечисленный выше требованиям.

Традиционно в ГИС СВЧ используются подложки из алюмооксидной керамики (Al_2O_3) – поликора, однако поверхность этих подложек имеет большую шероховатость (Ra = 40 нм, Rz = 200 нм) и глубокие поры и не позволяют изготавливать МДМ-конденсаторы.

Можно использовать полуизолирующей арсенид галлия, но он дорогой, хрупкий и не технологичный.

Среди других материалов наиболее подходящим оказался синтетический сапфир имеющий малую шероховатость (Ra = 10 нм, Rz = 50

нм) и не имеющий пор, прочный и технологичный. Подложки из сапфира, выпускаются отечественной промышленностью и имеют большую площадь (диаметр 60 и 76 мм).

Учитывая, что все пассивные элементы и транзисторы в ГМИС СВЧ располагаются на одной полированной стороне подложки, обратная сторона подложки сапфира может быть не полированной. Пластины сапфира с односторонней полировкой имеют меньшую стоимость и называются пластины Лейкосапфира. Поэтому сапфир выбран материалом платы для ГМИС СВЧ.

Наиболее сложным в технологии ГМИС СВЧ является формирование тонкопленочных МДМ-конденсаторов с выходом годных более 90 %. Оказалось, что выбор материала и технологии нанесения диэлектрического слоя в сильной степени влияет на процент выхода годных тонкопленочных конденсаторов. Известно большое количество органических и неорганических диэлектриков [90], однако применение органических диэлектриков ограничено из-за отсутствия точного контроля состава пленки и трудностей создания рисунка с высоким разрешением.

Наиболее известными среди неорганических диэлектриков являются: моноокись кремния SiO двуокись кремния SiO₂ и окись тантала T_2O_5 . При этом пленки SiO имеют большие токи утечки и не стабильны во времени. Пленки T_2O_5 , полученные анодированием, имеют низкий $tg\delta$ и являются полярными. И только пленки SiO₂ позволяют формировать добротные тонкопленочные конденсаторы с высоким процентом выхода годных.

Для нанесения пленок SiO₂ используется несколько способов [90]: электронно-лучевое испарение; плазмохимическое осаждение; пиролитическое осаждение; ВЧ-распыление.

Исследование пленок SiO₂ показало, что лучший $tg\delta$ имеют пленки SiO₂, полученные ВЧ-распылением. Они обеспечивают $tg\delta$ (4...30) 10⁴ при удельной емкости *Суд* порядка 100 пФ/мм² и пробивном напряжении *Unp* >

114

100 В. Пленки SiO₂, полученные ВЧ-распылением, приняты в качестве базовых для ГМИС СВЧ.

Наряду с пленками SiO₂ исследована возможность применения в ГМИС СВЧ пленок T_2O_5 полученных реактивным ВЧ-распылением, которые имеют $tg\delta$ (4...30) 10⁴ при удельной емкости *Суд* порядка 400 пФ/мм² и пробивном напряжении *Unp* > 100 В, и отсутствие «полярности».

Большой диапазон изменения $tg\delta$ пленок SiO₂ и отсутствие полной априорной информаций о пленках Ta_2O_5 потребовали проведения исследований и оптимизации технологических режимов нанесения этих пленок. Процесс ВЧ-распыления зависит от множества технологических факторов и поэтому решить задачу в аналитическом виде оказалось затруднительно. Вместе С тем, с помощью метода планирования эксперимента возможно отыскание экспериментальных зависимостей основных показателей качества напыляемой пленки от технологических факторов процесса ВЧ-распыления, т.е. построение математической модели.

$$Yi = f(X1, X2 \dots Xn), \tag{1}$$

Где Yi - показатель качества планки; Xi - технологические факторы.

3.1.1. <u>Оптимизация режимов напыления пленок SiO₂ и Ta₂O₅</u>

Напыление пленки SiO₂ проводилось на установке ВЧ-распыления УРМ3279014 из кварцевой мишени в аргонно-кислородной среде при повышенной температуре подложки.

Параметры оптимизации:

 y_1 – удельная емкость Суд (п Φ /мм²); $y_2 - tg\delta \times 10^{-4}$; y_3 – Uпр (В).

Факторы технологического процесса: x_1 - напряжение на мишени Uм (кВ); x_2 - процентное содержание кислорода в среде O₂ (%); x_3 - температура подложки t (°C); x_4 - время напыления, равное 4 часа; x_5 - рабочее давление в системе, равное 0,13 Па.

Задачей исследования являлось определение зависимостей:

$$y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3); y_2 = f_2(x_1, x_2, x_3); y_3 = f_3(x_1, x_2, x_3),$$
(2)

Диапазон изменения факторов x_1 , x_2 , x_3 в планируемом эксперименте был выбран на основе априорной; информации о технологическом процессе, практического опыта и возможностей технологической установки.

В работе [90] SiO₂ показано, что скорость нанесения пленки пропорциональна напряжению на мишени. При этом качество пленки зависит от времени, необходимого атому, пришедшему на поверхность осаждаемой пленки, чтобы занять оптимальное положение. Это время уменьшается с увеличением температуры подложки, однако атомы, не занявшие оптимального положения, могут быть эмитированы повторно. При напылении возможно разложение пленки SiO_2 на Si, SiO, O_2 и осаждение как Si, SiO и SiO₂. В связи с высокой трудоемкостью эксперимента (время одного опыта порядка 8 часов) и отсутствием полной априорной информации о характере исследуемых зависимостей на первом этапе исследования автором была предпринята попытка аппроксимации изучаемых зависимостей полиномом первого или неполным полиномом второго порядка С использованием простого и экономичного плана факторного эксперимента (табл. 1).

Таблица 1

Фактор	Уровень фактора			
	-1	0	1	
<i>x</i> ₁ – напряжение на мишени, кВ	0.5	0.75	1	
<i>x</i> ₂ – содержание кислорода, %	0	50	100	
<i>x</i> ₃ – температура подложки, °С	150	225	300	

Номер	x_1	x_1	x_1	Суд,	$tg\delta imes 10^{-4}$	Uпр,
опыта				$п\Phi/мм^2$		В
1.	-1	1	-1	118.5	4.9	≥ 120
2.	1	1	-1	65.2	11.9	≥ 120
3.	-1	-1	-1	30.1	17.2	≥ 120
4.	1	-1	-1	14.6	21.5	≥ 120
5.	-1	1	1	168	7.07	60
6.	1	1	1	109.9	18.8	≥ 120
7.	-1	-1	1	38.6	14.2	≥ 120
8.	1	-1	1	18.3	15.7	≥ 120
9.	1	0	1			
10.	-1	0	-1			
11.	0	0	0			

Опыты плана выполнялись однократно, а опыт в центре эксперимента, для получения оценки дисперсии воспроизводимости дублировался четыре раза. Результаты измерения параметров напыленной пленки (среднее значение из 10 измерений в различных точках подложки) приведены в таблице 2. По этим данным рассчитаны коэффициенты уравнений для откликов *y*₁, *y*₂, *y*₃.

$$y = \left(b0 + \sum_{i=1}^{3} bi \cdot xi + \sum_{i=j}^{3} bij \cdot xi \cdot xj\right),\tag{3}$$

Проверка по критерию Стьюдента значимости различия опытных и расчетных значений этих откликов в центре эксперимента показала, что полученные модели вида (16) неадекватны экспериментальным данным. Значимость различия y_3 и y_{pac4} в центре эксперимента указала на наличие в реальной зависимости квадратичных эффектов влияния факторов, не учтенных в модели.

Учитывая априорную информацию [90] о том, что числе испускаемых мишенью атомов возрастает с увеличением напряжения на мишени

117

Таблица 2

приблизительно линейно, а температура подложки слабо влияет на параметры пленки, ответственность за нелинейность процесса целиком была возложена на фактор *x*₂. С учетом этого вид модели был скорректирован.

$$y = (13) + b_{22} (x_2)^2, \tag{4}$$

Для построения данного вида модели сказалось возможным применить композиционный принцип, т.е. добавить к плану полного факторного эксперимента небольшое число опытов и достроить его до плана Уэбба [91] (табл. 5). Расчет коэффициентов модели проводился на ЭВМ методами шаговой регрессия, автоматически исключающей из модели незначительные эффекты влияния факторов y_1 – удельная емкость п $\Phi/\text{мm}^2$, $y_2 - tg\delta \times 10^{-4}$.

$$y_1 = (118.1 - 22.7 x_1 + 45 x_2 - 47.7 (x_2)^2 + 10 x_2 x_3),$$
(5)

$$y_2 = (7.87 + 2.08 x_1 - 3.16 x_2 + 6.27 (x_2)^2 + 2.31 x_2 x_3), \tag{6}$$

Пробивное напряжение - параметр у₃ не рассчитывался, так как во всех опытах оно выше 50 В, что достаточно для ГМИС СВЧ.

Неоднозначность расхождения *у*_э и *у*_{расч} по модели (3) в нулевой точке плана подтвердила адекватность этой модели и, тем самым отсутствие квадратичных эффектов, относящихся к первому и третьему факторам.

Непосредственно из уравнений (4) следует, что преобладающим является квадратичный эффект фактора *x*₂. Достаточно сильно влияет изменение напряжения да мишени, а влияние температуры подложки почти неощутимо.

Графическое представление моделей в виде семейства изолиний позволило решить задачу выбора оптимальных технологических режимов нанесения пленки SiO₂: напряжение на мишени UM = 500 B; содержание кислорода $O_2 = 70$ %; температура подложки $t_n = 150$ °C.

Эти технологические режимы приняты базовыми при напылении пленок SiO₂ в ГМИС СВЧ [92].

Напыление пленки Та₂О₅ проводилось на установке ВЧ-распыления УРМ3279014 из танталовой мишени в аргонно-кислородной среде. Диапазон изменения факторов приведен в табл. 3. План полного факторного эксперимента и дополнительные опыты для построения плана Уэбба приведены в табл. 4.

Т	็ลดี	пина	13
T	ao	лица	i J

Фактор	Уровень фактора		
	-1	0	1
x_1 – напряжение на мишени, кВ	0.5	0.75	1
x_2 – содержание кислорода, %	0	50	100
<i>x</i> ₃ – температура подложки, °С	150	225	300

Таблица 4

Номер	x_1	x_1	x_1	Суд,	tgδ	Ипр,
опыта				$п\Phi/мм^2$	$\times 10^{-4}$	В
1.	-1	-1	-1	880	30	10
2.	1	-1	-1	205.6	17	240
3.	-1	-1	1	994.4	40	15
4.	1	-1	1	296.6	43	240
5.	-1	1	-1	840	15	40
6.	1	1	-1	419.2	33	240
7.	-1	1	1	1280	27	20
8.	1	1	1	360	22	200
9.	1	0	1			
10.	-1	0	-1			
11.	0	0	0			

Расчет коэффициентов модели также проводился на ЭВМ методами шаговой регрессии, автоматически исключающей из модели незначительные эффекты влияния факторов y_1 – удельная емкость, п $\Phi/\text{мм}^2$, y_2 – $(tg\delta 10^{-4})$, y_3 – пробивное напряжение, В.

$$y_1 = (475.9 - 342.9 x_1 + 73.3 x_2 + 61.5 x_3 + 183.6 (x_2)^2 -$$

 $-63.5x_1x_2 - 59.5x_1x_2x_3), (7)$

$$y_2 = (29.67 + 4x_2 - 3.91x_3 - 5x_2x_3 - 5.5x_1x_2x_3),$$
(8)

 $y_3 = (200 + 91.5 x_1 - 71.4 (x_2)^2), \tag{9}$

Графическое представление моделей в виде семейства изолиний позволило решить задачу выбора оптимальных технологических режимов нанесения пленки Ta_2O_5 : напряжение на мишени UM = 750 B; содержание кислорода $O_2 = 55$ %; температура подложки $t_n = 150$ °C.

Эти технологические режимы приняты базовыми при напылении пленок Ta₂O₅ в ГМИС СВЧ [93].

3.1.2. Выбор материала обкладок МДМ-конденсаторов

Для снижения потерь в обкладках конденсаторов исследовались металлы, имеющие малое удельное сопротивление: серебро, медь, золото, алюминий.

Анализ металлов для обкладок конденсаторов показал, что ни один из первых трех материалов не может напыляться без подслоя вследствие слабой адгезии к подложке. Кроме того медь и серебро обладают высокой миграционной способностью и могут легко проколоть пленку диэлектрика. Поэтому в качестве материала нижней обкладки был выбран алюминий.

В качестве материала верхней обкладки, кроме алюминия, были исследованы традиционные материалы, используемые в ГИС СВЧ (Cr-Cu-Ni-Au, Cr-Au, Ti-Au, Al-Ni-Au). Исследование показало, что только алюминий дает наибольший более 90 % выход годных конденсаторов.

Алюминий был выбран базовым материалом обкладок конденсаторов для ГМИС СВЧ. Однако алюминий недостаточно коррозиеустойчив и при температуре выше 220 °C алюминий в контакте с золотом образует чуму». При разводке ГМИС СВЧ золотой проволокой «пурпурную температура термокомпрессии порядка 300...330 °С поэтому для уверенного процесса сборки необходимо было верхнюю обкладу проведения конденсатора покрыть золотом. Для предотвращения взаимодействия между золотом и алюминием необходим барьерный слой из барьерных металлов (платина, палладий, никель), учитывая, что первые два драгоценные металлы, барьерным слоем был выбран никель.

Таким образом, верхнюю металлизацию ГМИС СВЧ предложено было делать трехслойной алюминий-никель-золото.

3.1.3. <u>Формирование «воздушных» мостов</u>

Наибольшая вероятность выхода конденсаторов из строя это пробой по линии пресечения верхней обкладки с нижней обкладкой. Для предотвращения пробоя по линии пересечения формируются окна и «воздушный» мост необходимые для достижения максимально возможного процента выхода годных МДМ-конденсаторов.

Известный способ формирования мостов с помощью полиамидного лака [94] оказался трудоемким. Полимеризация полиамидного лака происходит при температуре около 400°С, а для его травления необходимо использовать защитную маску из алюминия. При этом появляется большое число технологических операций, удлиняющих технологический процесс. Кроме того, при травлении полиамидного лака в плазме получается ступенька с нулевым или отрицательным клином и при последующем напылении металла возникает разрыв на ступеньке.

"воздушных" Предложен способ формирования мостов с использованием полоски фоторезиста, который основан на округлении краев резистивной маски при повышенной температуре задубливания. Выдержка фоторезиста при высокой температуре приводит к округлению края фоторезиста и формированию необходимого профиля. Скругленный профиль металлизации. Удаление фоторезиста исключает разрывы ИЗ-ПОД "воздушного" моста осуществляется в кислородной плазме.

3.1.4. Выбор материала резистивного слоя

В традиционных конструкциях ГИС СВЧ преимущественно используются пленки чистых металлов - хрома, тантала, титана [95], имеющих большое удельное сопротивление. Пленки хрома удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к материалу резистивной пленки, и стоят да первом месте по возможности использования в ГМИС СВЧ. Подходящим материалом резистивного слоя оказался и титан, он имеет наибольшее удельное сопротивление, отличную адгезию к сапфировой и арсенидгаллиевой подложке, легко напыляется и совместим со всеми проводящими и диэлектрическими материалами. Поэтому первоначально резистивным материалом для ГМИС СВЧ был выбран титан. Однако в процессе нанесения диэлектрических слоев SiO₂ и Ta₂O₅ наблюдалось значительное (более 20 %) повышение сопротивления титановых резисторов и пришлось искать другие материалы. Исследование пленки тантала показало, что она более стабильна, но ее трудно напылить резистивным способом в одном технологическом процессе с проводящей пленкой алюминия. Поэтому пришлось осваивать электронно-лучевые способы напыления металлов. При этом тантал был выбран базовым материалом резисторов для ГМИС СВЧ.

3.1.5. Способ напыления проводящих и резистивных слоев

В тонкопленочной технологии используются следующие способы напыления тонких пленок [96]: термовакуумное (резистивное) испарение; катодное и магнетронное распыление; электронно-лучевое испарение.

Термовакуумное испарение осуществляется в вакууме из тугоплавких тиглей. не взаимодействующих С испаряемым материалом, однако выбранные ГМИС СВЧ материалы: алюминий, для никель, титан взаимодействуют с материалами испарителя И ИХ напыление термовакуумным испарением нежелательно.

Катодное и магнетронное распыление целесообразно лишь для тугоплавких металлов, при этом, пленки металлов, полученные катодным распылением, загрязнены атомами рабочего газа.

Электронно-лучевое испарение позволяет исключить влияние материала испарителя на свойства испаряемых пленок. Электронный луч непосредственно воздействует на испаряемый материал, и напыленные тонкие пленки имеют высокую чистоту. Поэтому способ электроннолучевого испарения выбран базовым способом для напыления проводящих и резистивных слоев в ГМИС СВЧ. Процесс испарения вещества описывается уравнением Герца-Кнудсена, где основным параметром, является скорость испускания вещества источником, которая, в случае вакуумного напыления тождественна скорости испарения. Выражение для удельной скорости испарения V с единицы поверхности нагретого вещества приведено в работе [97].

$$V = p \sqrt{\frac{m}{2\pi \times \kappa \times T}} = 5.834 \times 10^{-2} p \sqrt{\frac{M}{T}}$$
(10)

Где: V – удельная скорость испарения с единицы поверхности, г·см⁻²·с⁻¹; m – масса испаряемой молекулы; k – постоянная Больцмана; T – температура вещества, °К; p – давление пара вещества при данной температуре, мм рт. ст., M – молярная масса пара, а.е.м.

Скорость испарения, в основном, определяется давлением пара испаряемого вещества. Приемлемые скорости испарения более 10^{-4} г·см⁻²·с⁻¹ для вакуумного напыления большинства веществ достигаются при давлении пара 10^{-2} мм рт. ст. и выше. Испарение вещества с поверхности происходит неравномерно во всех направлениях, а преимущественно в направлении близком к нормали к испаряемой поверхности, где соз φ имеет максимальную величину (косинусоидальный закон распределения). Количество вещества, которое осаждается на противолежащую поверхность, зависит от положения этой поверхности относительно испарителя вещества. Масса вещества, осажденного на единицу площади для плоского испарителя равна.

$$M = \frac{m\cos(\varphi)\cos(\theta)}{\pi r^2} \tag{11}$$

Толщина пленки материала зависит от плотности материала пленки.

$$\Delta = \left(\frac{1}{\rho}\right) \times \left(\frac{m\cos(\varphi)\cos(\theta)}{\pi r^2}\right) = \frac{m\cos(\varphi)\cos(\theta)}{\rho\pi r^2}$$
(12)

Где: $m = V \times t$ – масса вещества, испаренного с единицы площади, г; V – скорость напыления, г·см⁻²·с⁻¹; t – время напыления, с⁻¹; ρ – плотность материала пленки, г/см³.

Таким образом, толщина осажденной пленки вещества прямо пропорциональна массе испаренного вещества и обратно пропорциональна квадрату расстояния от подложки. Для нанесения толстых пленок вещества необходимо увеличивать площадь испарения и время напыления, повышать скорость испарения и уменьшать расстояние между подложкой и испарителем.

Температура испарения и температура кипения металлов отличаются приблизительно в 2 раза. При повышении температуры испарения до температуры кипения образуются капли металла, которые летят на подложку и не позволяют получить равномерную пленку. Поэтому для увеличения толщины осажденной пленки целесообразно повышать скорость испарения за счет увеличения площади испарения и уменьшать расстояние между подложкой и испарителем.

Площадь испарителя вакуумных электронно-лучевых установок напыления металлов составляет порядка 1 см².

3.2. Изготовление монолитной сапфировой платы ГМИС СВЧ

Проведенные исследования, выбранные базовые конструкции ГМИС СВЧ и ее элементов, а также найденные оптимальные технологические режимы напыления металлов и диэлектриков позволили создать базовый технологический процесс изготовления сапфировой платы ГМИС СВЧ.

Последовательность технологических операций в базовом процессе изготовления монолитной сапфировой платы ГМИС СВЧ показана на рис. 1.





Технологический процесс изготовления монолитной сапфировой платы ГМИС СВЧ содержит следующие операции:

 На очищенную поверхность подложки из сапфира или полуизолирующего арсенида галлия напыляются последовательно в одном технологическом процессе слои тантала - 100 Ом/□ и алюминия 0,8...1,0 мкм при температуре подложки 200°С. Затем проводятся последовательно две фотолитографии. С помощью первой - формируются нижние обкладки конденсаторов, проводники и определяются резисторы. При этом слои тантала и алюминия протравливаются насквозь. С помощью второй

125

фотолитографии формируются резисторы, т.е. удаляется слой алюминия между контактными площадками резистора.

- 2) На сформированный нижний уровень металлизации напыляется диэлектрический слой SiO₂ или Ta₂O₅ толщиной 0.3...0.4 мкм при температуре 150°C. Затем с помощью фотолитографии в диэлектрике формируются окна в местах соединения верхнего уровня металлизации с нижним.
- 3) Далее по линии пересечения нижней обкладки с верхней фотолитографией формируются полоски фоторезиста толщиной 1.0...1.5 мкм, которые задубливаются при температуре 250 °C, за счет чего формируется необходимый профиль фоторезиста.
- 4) Затем на всю поверхность напыляются слои алюминия толщиной 3...4 мкм и никеля толщиной 0.2...0.4 мкм при температуре 200°С. После этого на никель осаждается гальваническое золото толщиной 2...3 мкм.
- 5) И наконец, проводится последняя пятая фотолитография для формирования верхнего слоя металлизации, т.е. протравливаются последовательно слои золота, никеля и алюминия, для удаления фоторезиста из-под "воздушных" мостов проводится обработка В кислородной плазме.

На одной, сапфировой пластине диаметром 60 мм по групповой планарной технологии формируется одновременно более 100 плат, а на пластине диаметром 76 мм – более 200 плат ГМИС СВЧ. Для разделения пластины на отдельные платы использовался лазерный скрайбер ЭМ-210.

Базовый технологический процесс изготовления плат ГМИС СВЧ обеспечивал выход годных плат порядка 50 % [52, 98, 99].

Для получения высокого процента выхода годных обкладки тонкопленочных конденсаторов выполнены из алюминия, резисторы защищены пленкой диэлектрика и применены «воздушные» мосты.

Платы ГМИС СВЧ отбирались по внешнему виду, НЧ и ВЧ параметрам, и направлялись на участок сборки.

3.2.1. <u>Ограничения номиналов элементов R, L, C</u>

Базовый технологический процесс изготовления ГМИС СВЧ позволяет формировать тонкопленочные элементы следующих номиналов (табл. 5):

- тонкопленочные резисторы 10...1000 Ом, точность $\pm 10\%$;
- тонкопленочные индуктивные элемента 0.02...20 мм;
- тонкопленочные конденсаторы емкостью 0.1...100 пФ, точность ± 20 %.

Таблица 5

№ п.п.	Параметр	Номинал
1.	Точность совмещения	± 1 мкм
2.	Минимальный размер	10 мкм
3.	Толщина нижнего уровня металлизации	0.81 мкм
4.	Толщина верхнего уровня металлизации	35 мкм
5.	Толщина диэлектрика	0.30.4 мкм
6.	Сопротивление резистивной пленки	50…100 Ом/□
7.	Удельная емкость пленки: SiO ₂	100 пФ/мм ²
	Ta_2O_5	400 пФ/мм ²
8.	Тангенс диэлектрических потерь	менее 0.001

Технология изготовления пассивных плат ГМИС СВЧ на сапфире описана в стандарте «Платы гибридно-монолитных интегральных приборов, конструирование и технология изготовления» СТП ТСО.010.014-2004 [100].

3.3. Отбор кристаллов ПТШ по НЧ и СВЧ параметрам

Кристаллы активных элементов, минимизированные по площади, изготавливались по отдельному технологическому процессу на подложках арсенида галлия. Параметры изготовленных полевых транзисторов с барьером Шотки (ПТШ) низкочастотные (крутизна, ток насыщения, напряжение отсечки и т.д.) и СВЧ-параметры (усиление, выходная мощность, КПД и т.д.) имеют существенный разброс. Поэтому после разделения пластины арсенида галлия кристаллы ПТШ отбирались по внешнему виду, НЧ, ВЧ и СВЧ параметрам.

Измерение низкочастотных параметров ПТШ проводилось на пластине в автоматическом режиме низкочастотными измерительными станциями, оснащенными НЧ игольчатыми зондами. Низкочастотные параметры измерялись на 100 % транзисторов расположенных на пластине. После этого ПТШ не соответствующие требуемым параметрам маркировались и передавались на операцию разделения пластины на кристаллы. После разделения пластины и тщательного визуального контроля отделялись только годные кристаллы, а маркированные кристаллы утилизировались. Годные кристаллы проходили повторное измерение низкочастотных параметров.

Измерение СВЧ-параметров кристаллов транзисторов связано со сложностью контактирования к выводам ПТШ имеющих малые размеры порядка (30 ×30 мкм). Поэтому формировалась партия ПТШ годных по низкочастотным параметрам. Из партии делалась выборка, и измерялись СВЧ-параметры ПТШ. Измерение СВЧ-параметров кристаллов ПТШ проводилось с помощью тестовой ГМИС СВЧ.

Измерялись S-параметры, коэффициент усиления, коэффициент шума, выходная мощность, КПД, оптимальные нагрузки на входе и выходе транзистора.

Кристаллы ПТШ отобранные по внешнему виду, НЧ, ВЧ и СВЧ параметрам направлялись на участок сборки ГМИС СВЧ.

3.4. Сапфировый технологический базис ГМИС СВЧ

Таким образом, в соответствии с предложенной концепцией:

- пассивная монолитная сапфировая плата ГМИС СВЧ изготовлена по отдельному технологическому процессу, при этом сапфировые платы отбираются по внешнему виду, НЧ и ВЧ параметрам, и только годные поступают на участок сборки ГМИС СВЧ;
- 2) кристаллы навесных активных компонентов изготовлены по отдельному технологическому процессу, при этом кристаллы отбираются по

внешнему виду, НЧ и ВЧ параметрам, и только годные поступают на участок сборки ГМИС СВЧ;

В результате на годную пассивную монолитную сапфировую плату ГМИС СВЧ монтируются годные кристаллы ПТШ. Монтаж осуществляется с помощью токопроводящего клея ЭКС-1 [101], либо припоя золото-олово.

Соединение выводов ПТШ с выводами монолитной сапфировой платы осуществляется золотой проволокой диаметром 20 мкм.

Все пассивные элементы и навесные активные компоненты располагаются в центральной части платы, ее периферийная часть служит для обращенного монтажа ГМИС СВЧ в корпус. В качестве корпуса используется керамическая рамка с микрополосковыми выводами, при этом экранная металлизация рамки соединяется с периферийной металлизацией платы ГМИС СВЧ с помощью токопроводящего клея ЭКС-1 и практически полностью исключает проволочные проводники.

Для улучшения отвода тепла ГМИС СВЧ устанавливается на металлическое основание из сплава МД-50, имеющего полость для сапфировой платы. При этом в полости между основанием и платой остается технологический зазор, обеспечивающий возможность применения подложек разной толщины.

ПТШ имели существенный разброс как по НЧ параметрам, так и по СВЧ-параметрам и поэтому после сборки ГМИС СВЧ настраивались как по постоянному току, так и СВЧ параметрам используя подстраиваемые тонкопленочные элементы. При этом отбор сапфировых плат, кристаллов ПТШ и настройка обеспечивали выход годных ГМИС СВЧ порядка 70 %.

После настройки и измерения параметров ГМИС СВЧ закрывается сапфировой крышкой, которая соединяется с корпусом с помощью диэлектрического клея МС-Н [102]. Крышка обеспечивает герметичность конструкции ГМИС СВЧ и для экономии сапфировых пластин крышкой являлась сапфировая плата ГМИС СВЧ забракованная по параметрам, с которой удалены все слои металлизации.

129

Все ГМИС СВЧ имеют одинаковые конструктивно-присоединительные размеры и для измерения их параметров и тестирования используются одинаковая измерительная и технологическая оснастка. Это позволяет изготавливать большую номенклатуру ГМИС СВЧ на ограниченном количестве измерительного и испытательного оборудования.

ГМИС СВЧ изготовляются в климатическом исполнении УХЛ по ГОСТ В 20.39.404-81 и должны удовлетворять требованиям ОСТ В 11 0265-86 и дополнений ГОСТ В 20.57.403-81 и ГОСТ В 20.57.404-81.

ГМИС СВЧ Технологический маршрут изготовления включал испытания по стойкости к ВВФ (внешним воздействующим факторам): синусоидальной вибрации – 20 g, механическим ударам многократного действия – 40 g, линейному ускорению – 500 g, механическим ударам однократного действия - 500 g, смене температур -60...+85 °C, а также на ШСВ - 160 лБ (шумовой случайной прочность к вибрации). Электротермотренировку в течение 168 часов при температура +85°С и при повышенном на 10 % напряжении источника питания.

Параметры – критерии годности ГМИС СВЧ до и после воздействий не отличались в пределах погрешности измерений.

Анализ причин отказов показал, что при проведении испытаний не было ни одного отказа пассивной части ГМИС СВЧ, а самым ненадежным элементом был GaAs ПТШ.

Показатели надежности ГМИС СВЧ

Испытания ГМИС СВЧ на долговечность и безотказность проводилось по методикам ЭТ-361 и ЭТ-362 соответственно [103, 104]. ГМИС СВЧ в соответствии с требованиями ТУ должны иметь следующие показатели надежности:

- минимальная наработка 10 000 часов;
- срок сохранности, при хранении в составе аппаратуры 15 лет;
- ресурс 20 000 часов.

В настоящее время проведены дополнительные испытания и для отдельных ГМИС СВЧ минимальная наработка увеличена до 100 000 часов, а долговечность до 25 лет.

Анализ ГМИС СВЧ возращенных потребителем после их выхода из строя показал, что причиной отказа является воздействие на выводы ГМИС СВЧ статического электричества и скачков источника питания, которые ведут к выходу ПТШ из строя [52, 105]. Поэтому все практические ГМИС СВЧ построены с учетом практических рекомендаций по защите ПТШ:

- 1) затворы ПТШ, соединяются с «землей» через резистор, имеющий малое сопротивление;
- питание на ГМИС СВЧ подается через последовательный резистор и шунтирующий защитный стабилитрон с напряжением включения на 1,0 вольт больше напряжения источника питания.

Таким образом: оригинальная конструкция ГМИС СВЧ на основе КЛ и одной монолитной сапфировой плате; оптимизированные процессы нанесения металлических и диэлектрических слоев SiO₂ и Ta₂O₅ для формирования МДМ-конденсаторов И стабильных резисторов; разработанный технологический процесс изготовления пассивной части ГМИС СВЧ на монолитной сапфировой плате по групповой планарной технологии и прецизионной литографии – позволили создать сапфировый технологический базис для промышленного производства ГМИС СВЧ различного функционального назначения.

Заключение по главе 3

- Выбраны материалы подложки, проводящих, резистивных и диэлектрических слоев, оптимизированы технологические режимы напыления слоев SiO₂ и Ta₂O₅.
- 2. Создан технологический процесс изготовления пассивной монолитной сапфировой платы ГМИС СВЧ, использующий ряд новых конструктивнотехнологических решений по сравнению с технологией ГИС СВЧ:

двухуровневая металлизация; диэлектрические слои SiO₂ и Ta₂O₅; МДМконденсаторы с «воздушными» мостами; резисторы, пассивирование слоем диэлектрика.

- 3. Определены методы визуального контроля и измерения НЧ, ВЧ и СВЧ параметров кристаллов активных компонентов и пассивных монолитных сапфировых плат, и методы настойки ГМИС СВЧ, позволившие повысить воспроизводимость параметров и получить выход годных ГМИС СВЧ порядка 70 %.
- 4. Создан сапфировый технологический базис для промышленного изготовления ГМИС СВЧ различного функционального назначения.

ГЛАВА 4. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ ГМИС СВЧ

В данной главе приведены результаты исследования маломощных усилительных ГМИС СВЧ. Показано, что на основе оригинальной конструкции и сапфирового технологического базиса в соответствии с предложенной концепцией и классификацией создан ряд узкополосных и широкополосных промышленных усилительных ГМИС СВЧ сантиметрового диапазона длин волн с выходной мощностью до 100 мВт на GaAs ПТШ и МИС СВЧ.

4.1. Узкополосный усилитель Х-диапазона частот

При создании первой ГМИС СВЧ – узкополосного малошумящего усилителя Х-диапазона частот, схемное решение и расчет и проводился сразу для двухкаскадного усилителя [52, 106-108].

Электрическая схема ГМИС СВЧ – двухкаскадного усилителя, его топология и конструкция приведена на рис. 1.





Рис. 1. Электрическая схема ГМИС СВЧ – двухкаскадного усилителя (а),

его топология (δ) и конструкция (e)

Первый и второй каскады усилителя выполнены на GaAs ПТШ. Согласующие элементы выполнены на отрезках линий с волновым сопротивлением ZB порядка 100 ом. Межкаскадная согласующая цепь содержит элементы TL3, TL4 и TL5. Для расширения полосы пропускания элемент TL5 шунтирован резистором R3. Исходными данными для расчета были оптимальные нагрузки ПТШ.

Для защиты от скачков напряжения источника питания введен балластный резистор *R4* и защитный стабилитрон, а для защиты от статического электричества затворы ПТШ заземлены через отрезки линий.

Конструктивно усилитель выполнен на одной монолитной сапфировой плате, содержащей всю пассивную часть ГМИС СВЧ. Навесными активными компонентами на плате являются кристаллы ПТШ. Сапфировая плата соединена с керамической рамкой токопроводящим клеем. Соединение выводов ПТШ с платой и выводов платы с рамкой осуществляется золотым проводом диаметром 20 мкм. Керамическая рамка с сапфировой платой установлена на металлическое основание. Для герметизации объема ГМИС СВЧ используется сапфировая крышка. Габаритные размеры ГМИС СВЧ не более 12×7,5×1,8 мм, масса не более 0.6 Г.

Исследование ГМИС СВЧ показало, что при КСВН входа и выхода менее 2 коэффициент усиления уменьшается в верхней части диапазона. Уменьшение коэффициента усиления связано с частотными свойствами ПТШ, усиление которого уменьшается приблизительно 6 дБ на октаву. Уменьшить спад коэффициента усиления сказалось возможным за счет подстройки межкаскадной цепи на верхнюю точку диапазона частот.

Для измерения СВЧ параметров ГМИС СВЧ используется специальное контактное устройство с переходом коаксиал-микрополосок обеспечивающее механический контакт с микрополосковыми СВЧ выводами ГМИС СВЧ расположенными на керамической рамке. Для подачи питания на ГМИС СВЧ используются игольчатые зонды, входящие в состав контактного устройства,

подающие питание на выводы, расположенные на керамической рамке. Для измерения НЧ параметров, электротермотренировки и испытаний ГМИС СВЧ на внешние воздействующие факторы создана универсальная оснастка, которая обеспечивает возможность изготовления большой номенклатуры ГМИС СВЧ на ограниченном количестве оборудования. Контактное устройство и специальная оснастка для измерения СВЧ параметров и испытания ГМИС СВЧ изготавливаются в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

ГМИС СВЧ – двухкаскадный усилитель М421156 имеет параметры, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Обозначение	Номинал	Примечание
Рабочий диапазон частот, ГГц	Δfp	8.59.0	1
Коэффициент усиления, дБ	Ку	≥15	
Коэффициент шума, дБ	Кш	≤ 3.5	
Неравномерность усиления, дБ	ΔΚγ	≤ 2	
КСВН входа/выхода	КстU	≤ 2	
Выходная мощность, мВт	Рвых	10	
Допустимая входная мощность, Вт	Рвх	0.1	
Напряжение питания, В	U	9	
Ток потребления, мА	Ι	< 30	
Масса, Г	M	0,6	
Габариты, мм	l×b×h	12×7,5×1,8	

Примечание 1. В настоящее время диапазон рабочих частот усилителя расширен до 7...14.6 ГГц и создан ряд промышленных узкополосных усилительных ГМИС СВЧ с параметрами, приведенными в табл. 2.

								1	
№ п.п.	ГМИС	Δfp,	Ку,	Кш,	ΔКу,	Рвых,	КстU	Пита	ание
		ГГц	дБ	дБ	дБ	мВт		U, B	I,
									мА
1.	M421156-1	8.59	15	3.5	2	5	2	9	30
2.	M421156-2	8.79.2	13	3.5	2	5	2	9	30
3.	M421156-3	9.29.7	13	3.5	2	5	2	9	30
4.	M421156-4	77.5	13	3.5	2	5	2	9	30
5.	M421156-5	9.710.7	13	3.5	2	5	2	9	30
6.	M421156-6	1416.6	21	5	2	5	2	9	30
7.	M421156-7	1416.6	14	4	2	5	2	9	30
8.	M421156-8	8.710	14	2.5	2	5	2	9	30

Сравнение параметров ГМИС СВЧ – двухкаскадного малошумящего усилителя M421156-3 с параметрами аналогичного модуля выпускаемого фирмой Avantek, США, приведено в табл. 3.

Таблица 3

Таблица 2

ГМИС	Фирма	Δf ,	Κш,	Кр,	Рвых,	Рпот,	l×b×h,	Macca,	Система
		ГГц	дБ	дБ	мВт	В×мА	ММ	Г	
«Ориентация-1»	«Исток»	9.29.7	3.5	15	5	9×15	7.5×12×2	0.6	РЛС
AM-9922	Avantek	9.49.9	4	18	10	15×40	99×39×47	92	РЛС

4.2. Узкополосный усилитель L-диапазона частот

Создан ГМИС СВЧ – узкополосный малошумящий усилитель Lдиапазона частот M421173 [52, 109]. Усилитель рассчитывался сразу как двухкаскадный усилитель. Он предназначен для усиления первой промежуточной частоты. Электрическая схема ГМИС СВЧ – двухкаскадного усилителя, его топология и конструкция приведена на рис. 2.

136



Рис. 2. Электрическая схема ГМИС СВЧ – двухкаскадного усилителя (*a*), его топология (б) и конструкция (в)

Первый и второй каскады усилителя выполнены на GaAs ПТШ. Согласующие элементы выполнены на сосредоточенных индуктивных элементах. Особенностью этой схемы является последовательное питание ПТШ, при котором питание подается на сток транзистора T2, а питание на транзистор T1 подается с истока T2, который по переменному току шунтирован блокировочным конденсатором $Cбл_2$. Для расширения полосы частот и повышения стабильности усилителя введена отрицательная обратная связь по напряжению через резистор R2 со стока T1 в его затворную цепь. Исходными данными для расчета были оптимальные нагрузки ПТШ.

Конструктивно усилитель выполнен на одной монолитной сапфировой плате, содержащей всю пассивную часть ГМИС СВЧ. Навесными компонентами на плате являются кристаллы ПТШ. Габаритные размеры ГМИС СВЧ не более 12×7,5×1,8 мм, масса не более 0.6 г.

Исследование усилителя показало, что для точной настройки усилителя на рабочую частоту необходимы подстроечные конденсаторы *C1*, *C2*, *C3*.

Для измерения СВЧ параметров ГМИС СВЧ использовалась универсальная оснастка, которая обеспечивает возможность изготовления ГМИС СВЧ на ограниченном количестве оборудования. Параметры ГМИС СВЧ – двухкаскадного усилителя M421173 представлены в табл. 4.

Таблица 4

Парамотр	Оборновника	Цолинал	Приналина
Параметр	Ооозначение	поминал	примечание
Рабочий диапазон частот, ГГц	Δfp	1.21.5	1
Коэффициент усиления, дБ	Ку	≥20	
Коэффициент шума, дБ	Кш	≤2	
Неравномерность усиления, дБ	ΔКу	≤ 1.5	
КСВН входа/выхода	КстU	≤ 2	
Выходная мощность, мВт	Рвых	≥ 25	
Допустимая входная, Вт	Рвх	0.1	
Напряжение питания, В	U	9	
Ток потребления, мА	Ι	< 30	
Масса, Г	М	0,6	
Габариты, мм	l×b×h	12×7,5×1,8	

Примечание 1. В настоящее время диапазон рабочих частот усилителя расширен до 1.2...1.7 ГГц и создан ряд промышленных узкополосных усилительных ГМИС СВЧ с параметрами, приведенными в табл. 5.

Таблица 5

N⁰	ГМИС	Δfp,	Ку,	Кш,	ΔКу,	Рвых,	КстИ	Пита	ание
п.п.		ГГц	дБ	дБ	дБ	мВт		U, B	І, мА
1.	M421173-1	1.21.5	20	2	2	25	2	9	30
2.	M421173-2	1.41.7	20	2	2	25	2	9	30
3.	М421173-1-Д	1.21.5	20	2	2	25	2	9	30
4.	М421173-2-Д	1.41.7	20	2	2	25	2	9	30

ГМИС СВЧ М421173-1 и М421173-2 имеют минимальную наработку до отказа 10 000 часов, а М421173-1-Д и М421173-2-Д имеют минимальную наработку до отказа 100 000 часов.

4.2.1. <u>Узкополосный усилитель дециметрового диапазона</u>

Создан ГМИС СВЧ – усилитель дециметрового диапазона [52, 110]. Он сразу рассчитывался, как двухкаскадный усилитель и предназначен для усиления первой промежуточной частоты. Малые шумы, большое усиление, большая глубина бланкирования (т.е. подавления усиления) при малом времени восстановления – вот основные трудности, которые необходимо было преодолеть при создании этого усилителя. На рис. 3 представлена электрическая схема ГМИС СВЧ.



Рис. 3. Электрическая схема ГМИС СВЧ – двухкаскадного усилителя

Двухкаскадный усилитель на частоту 0,3 ГГц и изготовлен на ПТШ, имеющих рабочую частоту порядка 10 ГГц и которые крайне неустойчивы на частоте 0,3 ГГц. Расчет согласующе-трансформирующих цепей проводился, на центральной рабочей частоте. Низкие рабочие частоты потребовали с одной стороны использования блокировочных МДМ-конденсаторов емкостью порядка 100 пФ, а с другой – многовитковых индуктивностей *L1...L5*.

Технология изготовления ГМИС СВЧ не позволяет изготавливать МДМ-конденсаторы емкостью более 100 пФ, поэтому для ГМИС СВЧ нижняя рабочая частота ограничена и составляет порядка 0.3 ГГц. Исследование усилителя показало, что требуемая полоса рабочих частот достигается при КСВН входа больше 2, при этом усилитель склонен к самовозбуждению. Поэтому в схему был введен резистор параллельной обратной связи R5, который позволил повысить устойчивость усилителя и получить требуемую полосу частот при КСВН < 2.

Важной задачей было создание безынерционной (менее 10 нс) схемы бланкирования, позволяющей уменьшать коэффициент усиление на 40 дБ. Для этого были исследованы четыре схемы, приведенные на рис. 4.



Рис. 4. Электрические схемы бланкирования коэффициента усиления

Все схемы выполнены на ПТШ, а управление коэффициентом усиления осуществляется путем подачи напряжения бланкирования на затвор транзистора.

1) Схема на двухзатворном ПТШ (рис. 4 а) позволяет управлять коэффициентом усиления каскада за счет изменения потенциала на втором затворе. Исследование схемы показало, что она не позволяет получить требуемое (порядка 10 нс) время восстановления, так как в цепях питания ПТШ возникают длительные переходные процессы. Во время действия импульса бланкирования *tu*, когда транзистор *T1* заперт и ток через него не

течет, происходит разряд емкости C_2 через резистор R_2 . Вследствие этого напряжение на истоке транзистора T1 уменьшается, а напряжение на стоке увеличивается.

$$\Delta Uu = \left(Uu \left(1 - e^{-\left(\frac{tu}{R4C2}\right)} \right) \right), \tag{40}$$

$$\Delta Uc = \left((E_{\pi} - Uc) \times \left(1 - e^{-\left(\frac{tu}{R5C1}\right)} \right) \right), \tag{41}$$

Где: ΔUu – приращение напряжения на истоке;

 ΔUc – приращение напряжения на стоке.

Это приводит к изменению рабочих режимов ПТШ. После окончания воздействия импульса через ПТШ будет протекать повышенный ток, а напряжение будет выше нормы. Это приведет к изменению коэффициента усиления каскада и искажению формы радиоимпульса. Последнее заставило отказаться от схемы бланкирования на двухзатворном ПТШ.

2) В схеме с последовательным транзистором (рис. 4 б) канал бланкирующего транзистора *T1* включается последовательно с источником сигнала. Сопротивление открытого канала ПТШ составляет порядка 40 Ом. Это сопротивление, включаемое последовательно с источником сигнала, приводит к увеличению коэффициента шума каскада, кроме того, закрытый канал обеспечивает слабую (менее 15 дБ) развязку из-за влияния проходной емкости сток-исток, что является недостатком схемы.

3) В схеме с шунтирующим транзистором на входе (рис. 4 в). канал T1бланкирующего транзистора включается параллельно входу транзисторного каскада И удерживается В закрытом состоянии отрицательным источником смещения Ес. При подаче бланкирующего импульса положительной полярности транзистор TIоткрывается И *T2*. вход транзистора Эта схема обеспечивает шунтирует высокое быстродействие, однако необходимость дополнительного источника питания отрицательной полярности, является недостатком схемы.

4) В схеме с шунтирующим транзистором на выходе (рис. 4 г) канал бланкирующего транзистора T1 включается параллельно выходу каскада на транзисторе T2. По принципу работы эта схема аналогична схеме (рис. 8 в), но не требует источника смещения, так как смещение подается со стока транзистора T2. Схема с шунтирующим транзистором на выходе использована в усилителе промежуточной частоты.

Двухкаскадный усилитель промежуточной частоты TC2.031.033 ТУ имеет параметры, приведенные в табл. 6.

Таблица 6

Параметр	Номинал	Примечание
Рабочий диапазон частот, ГГц	0.30.33	
Коэффициент усиления, дБ	≥ 20	
Коэффициент шума, дБ	≤ 3	
Неравномерность коэффициента усиления, дБ	≤ 1	
КСВН входа/выхода	≤2	
Выходная мощность, мВт	≥ 10	
Допустимая входная непрерывная мощность, Вт	0.1	
Напряжение источника питания, В	9	
Ток потребления, мА	< 30	
Масса, Г	0,6	
Габариты (l×b×h), мм	12×7,5×1,8	

4.3. Широкополосный усилитель с диссипативным согласованием

ГМИС СВЧ имеют возможности большие потенциальные ПО частотного диапазона. Для широкополосных усилителей расширению наиболее оптимальной была схема с диссипативными согласующевыравнивающими цепями. Диссипативные цепи согласования имеют повышенные потери, которые с одной стороны позволяют расширить полосу рабочих частот усилителя, а с другой уменьшают коэффициент усиления и увеличивают коэффициент шума.

Выбор схемного решения и расчет широкополосной усилительной ГМИС СВЧ с диссипативными согласующе-выравнивающими цепями ГМИС СВЧ проводился сразу для двухкаскадного усилителя. На основе САПР был рассчитан широкополосный трехкаскадный усилитель, электрическая схема которого приведена на рис. 5.



Рис. 5. Схема усилителя с диссипативным согласованием

Усилитель с диссипативными согласующе-выравнивающими цепями, работает в диапазоне частот 1...8 ГГц на транзисторах «Пенс-6» [52]. Во входной цепи первого каскада и выходных цепях каждого каскада введены активные потери (резисторы *R1, R2, R6, R9*) по 100 Ом. Во втором и третьем каскаде в затворную цепь ПТШ установлены резисторы *R4, R5* по 1000 Ом.

Усилитель с диссипативными согласующе-выравнивающими цепями на ПТШ имеет параметры, приведенные в табл. 7.

Таблица 7

Параметр	Обозначение	Номинал	Примечание
Рабочий диапазон частот, ГГц	Δfp	18.5	1
Коэффициент усиления, дБ	Ку	≥14	
Коэффициент шума, дБ	Кш	≤ 6.5	
Неравномерность усиления, дБ	ΔΚγ	≤ 2	
КСВН входа/выхода	КстU	≤ 2	
Выходная мощность, мВт	Рвых	5	
Напряжение питания, В	U	9	
Ток потребления, мА	Ι	< 30	

Примечание 1. Исследован однокаскадный широкополосный усилитель, который в диапазоне частот 1...18 ГГц имеет коэффициент усиления более 7 дБ и коэффициент шума менее 8 дБ на транзисторе «Пенс-4» [52].

4.4. Широкополосный усилитель L...С диапазона

Создан широкополосный усилитель *L...С* диапазона с диссипативными согласующе-выравнивающими цепями. При создании – двухкаскадного широкополосного усилителя М421227 [52, 111], схемное решение и расчет усилителя выбирались и проводились сразу для двухкаскадного усилителя. Электрическая схема ГМИС СВЧ – двухкаскадного широкополосного усилителя, его топология и конструкция приведена на рис. 6.



Рис. 6. Электрическая схема ГМИС СВЧ – двухкаскадного широкополосного усилителя (*a*), его топология (*б*) и конструкция (*в*)

Конструктивно усилитель выполнен на одной монолитной сапфировой плате, содержащей всю пассивную часть ГМИС. Навесными компонентами на плате являются кристаллы ПТШ. Сапфировая плата соединена с
керамической рамкой токопроводящим клеем. Соединение выводов ПТШ с платой и выводов платы с рамкой осуществляется золотым проводом диаметром 20 мкм. Керамическая рамка с сапфировой платой установлена на металлическое основание. Для герметизации объема ГМИС СВЧ сапфировая используется крышка, которая приклеивается К рамке изолирующим клеем.

Габаритные размеры ГМИС СВЧ не более $12 \times 7,5 \times 1,8$ мм, а масса не более 0.6 Г.

ГМИС СВЧ – двухкаскадный широкополосный усилитель М421227 имеет параметры, приведенные в табл. 8.

Таблица 8	3
-----------	---

	-	-	-
Параметр	Обозначение	Номинал	Примечание
Рабочий диапазон частот, ГГц	Δfp	0.44.5	1
Коэффициент усиления, дБ	Ку	≥10	
Коэффициент шума, дБ	Кш	<i>≤</i> 5	
Неравномерность усиления, дБ	ΔΚy	≤ 2	
КСВН входа/выхода	КстU	≤ 2	
Выходная мощность, мВт	Рвых	≥15	
Напряжение источника питания, В	U	9	
Ток потребления, мА	I	< 30	
Масса, Г	М	0,6	
Габариты, мм	l×b×h	12×7,5×1,8	

Примечание 1. В настоящее время диапазон рабочих частот усилителя расширен до 18 ГГц и создан ряд промышленных широкополосных усилительных ГМИС СВЧ с параметрами, приведенными в табл. 9 [112,113].

Таблица	9
таолица	/

N⁰	ГМИС	Δfp,	Ку,	Кш,	ΔКу,	Рвых,	КстU	Пита	ание
П.П.		ГГц	дБ	дБ	дБ	мВт		U, B	I,
									мА
1.	M421227-6	0.44.5	15	8	2	15	2	9	30
2.	M421227-7	0.44.5	15	5	2	15	2	9	30
3.	M421227-12	0.81.2	19	3.5	2	15	2	9	30
4.	M421227-13	77.5	17	4	2	15	2	9	30
5.	M421228-1	46	15	6	2	15	2	9	30
6.	M421228-2	68	15	6	2	15	2	9	30
7.	M421228-3	810	14	6	2	15	2	9	30
8.	M421228-4	1012	14	7	2	15	2	9	30
9.	M421228-5	1214	13	7	2	15	2	9	30
10.	M421228-6	1416	12	8	2	15	2	9	30
11.	M421228-7	1618	11	8	2	15	2	9	30

4.5. Широкополосный усилитель L...Х диапазона

Наряду с ГМИС СВЧ использующими диссипативные согласующевыравнивающие цепи, созданы широкополосные усилители с распределенным усилением (усилители бегущей волны - УБВ).

ГМИС СВЧ – усилитель бегущей волны создана на основе МИС СВЧ, в которой используется несколько параллельно включенных ПТШ, затворная и стоковая цепи, которых нагружены на согласованные линии с распределенными параметрами [112]. Электрическая схема ГМИС СВЧ – широкополосного усилителя M421161, его топология и конструкция приведена на рис. 7.



Рис. 7. Электрическая схема ГМИС СВЧ – однокаскадного широкополосного усилителя M421161 (*a*), его топология (б) и конструкция (в)

Конструктивно усилитель выполнен на одной монолитной сапфировой плате, содержащей всю пассивную часть ГМИС. Навесным компонентом на плате является кристалл МИС СВЧ. Сапфировая плата соединена с керамической рамкой токопроводящим клеем. Соединение выводов ПТШ с платой и выводов платы с рамкой осуществляется золотым проводом диаметром 20 мкм. Керамическая рамка с сапфировой платой установлена на металлическое основание. Для герметизации объема ГМИС используется сапфировая крышка, которая приклеивается к рамке изолирующим клеем. Габаритные размеры ГМИС СВЧ не более 12×7,5×1,8 мм.

ГМИС СВЧ – сверхширокополосный усилитель M421161 имеет параметры, приведенные в табл. 10.

Таблица	10)

Параметр	Обозначение	Номинал	Примечание
Рабочий диапазон частот, ГГц	Δfp	112	1
Коэффициент усиления, дБ	Ку	≥ 5	
Коэффициент шума, дБ	Кш	≤ 8	
Неравномерность усиления, дБ	ΔΚy	≤ 2	
КСВН входа/выхода	КстU	≤ 2	
Выходная мощность, мВт	Рвых	\geq 5	2
Напряжение источника питания, В	U	5	
Ток потребления, мА	Ι	< 50	
Масса, Г	М	0,6	
Габариты, мм	l×b×h	12×7,5×1,8	

Примечание 1, 2. В настоящее время выходная мощность усилителя M421161 повышена до 25 мВт и создан ряд промышленных широкополосных ГМИС СВЧ с параметрами, представленными в табл. 11.

Таблица 11

$\mathbb{N}_{\underline{0}}$	ГМИС	Δfp,	Ку,	Кш,	ΔКу,	Рвых,	КстU	Пита	ание
П.П.		ГГц	дБ	дБ	дБ	мВт		U, B	I,
									мА
1.	M421161-1	112	5	8	2	3	2	9	30
2.	M421161-2	112	5	5	2	25	2	9	30

Таким образом, в соответствии с предложенной концепцией и классификацией, на основе оригинальной конструкции и сапфирового технологического базиса созданы маломощные узкополосные и широкополосные усилительные ГМИС СВЧ диапазона 0.4...20 ГГц с выходной мощностью менее 100 мВт.

Заключение по главе 4

- Создан промышленный ряд ГМИС СВЧ узкополосных малошумящих усилителей диапазона 0.3...17 ГГц с выходной мощность менее 100 мВт на GaAs ПТШ.
- Созданы ГМИС СВЧ с рабочей частотой 0.3 ГГц и подтверждено, что нижняя граница применимости ограничена емкостью конденсаторов, которая для ГМИС СВЧ не более 100 пФ.
- Создан промышленный ряд ГМИС СВЧ широкополосных усилителей с диссипативными согласующе-выравнивающими цепями диапазона 0.4...18 ГГц и усилителей диапазона 1...12 ГГц с выходной мощность менее 100 мВт на GaAs ПТШ и МИС СВЧ.
- 4. Для защиты от статического электричества затворы всех ПТШ соединены с «землей» через малые сопротивления.
- 5. Для защиты ПТШ от скачков напряжения в момент включения и выключения источника питания во всех ГМИС СВЧ напряжение питания подается через последовательный балластный резистор и шунтирующий защитный стабилитрон.

ГЛАВА 5. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ГМИС СВЧ

В данной главе приведены результаты исследования маломощных преобразовательных и генераторных ГМИС СВЧ. Показано, что на основе оригинальной конструкции и сапфирового технологического базиса в соответствии с предложенной концепцией и классификацией создан полнофункционального ряда промышленных преобразовательных и генераторных ГМИС СВЧ сантиметрового диапазона длин волн с выходной мощностью до 100 мВт на GaAs ПТШ и МИС СВЧ.

5.1. Анализ преобразовательных свойств ПТШ

Преобразователи частоты изготавливаются на однозатворных ПТШ и. двухзатворных ПТШ (полевых тетродах) [114].

Преобразователи на однозатворном ПТШ

Преобразователи используют нелинейную зависимость тока стока Ic от напряжения на затворе Ug, которую можно аппроксимировать выражением.

$$Ic = (I_0 + aUg + bUg^2 + ..), (1)$$

Где: *а*, *b* – коэффициенты преобразования; *Ug* – напряжение на затворе.

В преобразователе частоты на затвор подаются одновременно напряжение сигнала *Uc* и накачки *Uн*.

$$Ug = Uc + Un$$
, где: $Uc = Uc \times cos(\omega_c t)$; $Un = Un \times cos(\omega_H t)$. (2)

Подставляя выражение (2) в выражение (1), получим.

$$Ic = I_0 + \left(a \left((Uc \times \cos(\omega_c t)) + (Un \times \cos(\omega_n t)) \right) \right) + \left(b \left((Uc \times \cos(\omega_c t)) + (Un \times \cos(\omega_n t)) \right)^2 + .. \right),$$
(3)

После раскрытия скобок и простых преобразований получаем.

$$Ic = I_0 + ((aUc \times \cos(\omega_c t)) + (aUn \times \cos(\omega_n t)) + (bUc^2 \times (\cos(\omega_c t))^2)$$

$$+ (b \times Un^2 \times (\cos(\omega_n \times t))^2) + (bUc \times Un(\cos(\omega_c + \omega_n) t))$$

$$+ (bUc \times Un(\cos(\omega_c - \omega_n) t)) + ...),$$
(4)

Анализ выражения (4) показывает, что преобразование частоты на однозатворном ПТШ происходит за счет квадратичного члена в зависимости I = f(Ug). Чем выше нелинейность проходной характеристики транзистора,

тем выше уровень преобразованного сигнала. Проходная характеристика однозатворного ПТШ имеет слабо выраженную нелинейность. Поэтому преобразователи на однозатворных ПТШ имеют невысокую эффективность, а на выходе преобразователя присутствуют частоты сигнала и накачки.

Преобразователи на двухзатворных ПТШ

Преобразователи частоты на двухзатворных ПТШ имеют больший динамический диапазон, хорошую развязку входов сигнала и накачки, малый уровень мощности накачки, малые потери преобразования, высокую линейность, хорошее подавление гармоник накачки [52]. Двухзатворный ПТШ рассматривают как два однозатворных ПТШ, включенных последовательно. Проходная емкость затвор 1-сток, при заземленном втором затворе в $1 + S_{22}/g_{22}$ раз меньше, чем для аналогичного однозатворного ПТШ, а усиление и устойчивость транзистора выше [52].

$$G = \left(\left(\frac{S_1}{\omega C_{g_1}} \right) S_2 \right), \quad K = \left(K_1 + \frac{\omega C_{g_1}}{S_2} \right), \tag{5}$$

Где: G – коэффициент усиления; К – коэффициент устойчивости; S₁ – крутизна по первому затвору; S_2 – крутизна по второму затвору. Видно, что коэффициент устойчивости ПТШ двухзатворного выше, чем y однозатворного ПТШ, и они абсолютно устойчивы во всем рабочем диапазоне частот [52]. Принцип преобразования частоты на двухзатворного $Uc = Uc \times$ ПТШ заключается В TOM, что напряжение сигнала $\cos(\omega_c t)$ подается на первый затвор, а напряжение накачки $Un = Un \times In$ $\cos(\omega_n t)$ на второй. Под действием напряжения крутизна накачки характеристики двухзатворного ПТШ будет изменяться, соответственно будет изменяться амплитуда тока стока. Следовательно, крутизна двухзатворного ПТШ будет периодической функцией времени с периодом $T_n = \left(\frac{1}{f_n}\right)$. Эту связь можно представить выражением.

$$S(t) = (K \times Un \times \cos(\omega_n t)), \tag{6}$$

Где: *К* – коэффициент пропорциональности. Ток стока двухзатворного ПТШ при одновременном воздействии двух напряжений представим в виде суммы отдельных воздействий и парного взаимодействия.

$$Ic = I_0 + (S_1 \times (Uc \times \cos(\omega_c t))) + (S_2 \times (Un \times \cos(\omega_n t))) + (S(t) \times (Uc \times \cos(\omega_c t))),$$
(7)

Где: (S_1) , (S_2) – крутизна по первому и второму затворам соответственно.

После подстановки (6) в (7) и простых преобразований получим.

$$Ic = I_0 + (S_1 \times (Uc \times \cos(\omega_c t))) + (S_2 \times (Un \times \cos(\omega_n t))) + ((1/2) \times K \times Un \times Uc \times (\cos(\omega_c + \omega_n) t))) + ((1/2) \times K \times Un \times Uc \times (\cos(\omega_c - \omega_n) t))),$$
(8)

В выражении (8) произведение $K \times Un$ имеет размерность крутизны. Обозначим ее через $S_{np} = K \times Un$, тогда получим

$$Ic = I_0 + (S_1 \times (Uc \times \cos(\omega_c t))) + (S_2 \times (Un \times \cos(\omega_n t))) + ((1/2) \times S_{\pi p} \times Uc \times (\cos(\omega_c + \omega_n) t))) + ((1/2) \times S_{\pi p} \times Uc \times (\cos(\omega_c - \omega_n) t))),$$
(9)

Проведенный анализ преобразовательных свойств двухзатворного ПТШ показывает, что преобразование частоты на нем возможно при линейной зависимости тока стока от напряжения на затворе. Поэтому при работе на линейном участке ВАХ гармоник сигнала и накачки на выходе преобразователя не будет. Если в стоковую цепь полевого тетрода поставить резонансную нагрузку, то можно выделить любую из преобразованных частот. Мощность сигнала на преобразованной частоте при известном импедансе нагрузки $Z_{\rm H}$ можно выразить следующим образом.

$$P_{\rm np} = (I_{\rm np}^2 \times Z_{\rm H}), \tag{10}$$

Где: $I_{\rm np}_{\rm B} = ((1/2) \times S_{\rm np} \times Uc(\cos(\omega_c + \omega_n) t)))$
 $= ((S_{\rm np}/2) \times Uc(\cos(\omega_c + \omega_n) t))),$
 $I_{\rm np}_{\rm H} = ((1/2) \times S_{\rm np} \times Uc(\cos(\omega_c - \omega_n) t)))$
 $= ((S_{\rm np}/2) \times Uc(\cos(\omega_c - \omega_n) t))),$

Аналогично диодным преобразователям оценим потери преобразования преобразователя на двухзатворном ПТШ.

$$L(дБ) = \left(10 \lg\left(\frac{P_{\rm np}}{P_c}\right)\right),\tag{11}$$

Где: $P_c = (U_c^2 / Z_{\rm BX})$ – подводимая мощность сигнала.

После подстановки (10) в (11) получим.

$$L(\mathbf{д}\mathbf{E}) = \left(10 \lg\left(\left(S_{\mathrm{np}}/2\right)^2 \times Z_{\mathrm{H}} \times Z_{\mathrm{Bx}}\right)\right), \tag{12}$$

При резонансе во входной и выходной цепях.

$$L(\mathbf{д}\mathbf{E}) = \left(10 \lg\left(\left(S_{\pi p}/2\right)^2 \times R_{\mathrm{H}} \times R_{\mathrm{BX}}\right)\right), \tag{13}$$

Анализ выражения (13) показывает, что при $\left(\left(\frac{S_{\rm пp}}{2}\right)^2 \times R_{\rm H} \times R_{\rm BX}\right) < 1$, преобразователь работает с потерями, а при $\left(\left(\frac{S_{\rm пp}}{2}\right)^2 \times R_{\rm H} \times R_{\rm BX}\right) > 1$ преобразователь усиливает преобразованную частоту.

Преобразователь частоты на двухзатворном ПТШ

Электрическая схема преобразователя частоты на полевом тетроде приведена на рис. 1 [55, 115].



Рис. 1. Электрическая схема преобразователя частоты на полевом тетроде

Преобразователь выполнен на двухзатворном ПТШ. Смещение на первый затвор подается, как и в усилительном каскаде, за счет цепочки автосмещения. Потенциал второго затвора выбирается делителем на резисторах *R1*, *R2*. Напряжение питания подается на сток транзистора через

резистор R4 и защитный стабилитрон D1. Сигнал fc подается на первый затвор, а накачка fn на второй затвор, при этом преобразованный сигнал fnp выделяется в нагрузке. По входам и выходу включены согласующетрансформирующие цепи, с помощью которых осуществляется согласование с источниками сигнала, накачки и нагрузкой. Эффективность преобразования преобразованной оценивалась по выходной мощности. Благодаря свойствам выходной резонансным цепи, настроенной на верхнюю преобразованную составляющую, нижняя составляющая оказывается частично подавленной. Оптимизацией уровня мощности накачки можно гармонических составляющих накачки получить уровень на выходе преобразователя частоты ниже - 80 дБ. ГМИС СВЧ – преобразователь частоты [52, 114, 115] имеет параметры, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Обозначение	Номинал	Примечание
Частота сигнала, ГГц	fc	8.08.6	
Частота накачки, ГГц	fn	1	
Частота преобразованная, ГГц	fпp	9.09.6	1
Мощность накачки, мВт	Pn	8÷10	
КСВН входа/выхода	Кст U	≤ 2	
Максимальная выходная мощность, мВт	Рмах	4	
Выходная мощность при уровне	Рпр	1	
гармоник -80 дБ, мВт			
Потери преобразования, дБ	Кп	0	
Развязка между входами сигнала, дБ	L	15	
Напряжение источника питания, В	Uπ	9	
Ток потребления, мА	Іп	< 30	
Масса, Г	М	0,6	
Габариты, мм	l×b×h	12×7,5×1,8	

Исследование преобразователя частоты на двухзатворном ПТШ показало, что он позволяет получить малые потери преобразования, при

малом уровне гармоник, но на выходе преобразователя присутствуют частоты сигнала и накачки.

5.2. Балансные преобразователи частоты на ПТШ

Для подавления частот сигнала и накачки необходимы балансные преобразователя частоты.

При создании балансных преобразователей частоты на двухзатворных ПТШ возникла проблема получения на малой площади ГМИС двух сигналов сдвинутых по фазе на 180°. Для решения этой проблемы была предложена схема балансного преобразователя частоты на однозатворном ПТШ на основе двух каскадов с разделенной нагрузкой [117-120]. Однозатворный ПТШ имеет слабо выраженную нелинейность и невысокую эффективность преобразования, для компенсации низкой эффективности преобразования на выходе балансной схемы был добавлен усилитель и создана специальная МИС АБПЧ, содержащая три ПТШ. Электрическая схема МИС АБПЧ на ПТШ с выходным усилительным каскадом на ПТШ, а также ее топология приведена на рис. 2.



Рис. 2. Электрическая схема МИС АБПЧ (*a*), и ее топология (б) Электрическая схема балансного преобразователя частоты на МИС АБПЧ, а также топология и конструкция приведена на рис. 3.



Рис. 3. Электрическая схема ГМИС СВЧ – балансного преобразователя частоты (*a*), топология (*б*) и конструкция (*в*)

В МИС АБПЧ (рис. 4 а) входной СВЧ сигнал подается синфазно на затвор транзистора *T1* и исток транзистора *T2*. Сигнал накачки продается синфазно на затвор транзистора T2 и исток транзистора T1. При этом стоки транзисторов *T1* и *T2* соединены и токи стока транзисторов складываются. Сигнал с затворов транзисторов поступает в стоковую цепь со сдвигом 180°, а сигнал с истока транзисторов со сдвигом 0°. При сложении противофазные токи сигнала и противофазные токи накачки взаимно подавляют друг друга и на выходе остаются сигналы нижней и верхней преобразованной частот. При отсутствии мощности гетеродина транзисторы Т1 и Т2 открыты, а при подаче мощности *R1*, *R4* накачки благодаря резисторам р происходит автоматическое смещение рабочих точек транзисторов в область близкую к отсечке. Для усиления преобразованного сигнала служит усилитель на транзисторе *Т3*. ГМИС СВЧ – балансный преобразователь частоты М43227 имеет параметры, приведенные в табл. 2.

Таблица	2
---------	---

Параметр	Обозначение	Номинал	Примечание
Частота сигнала, ГГц	fc	212	1
Частота накачки, ГГц	fn	0.22	2
Частота преобразованная, ГГц	fпp	214	3
Мощность накачки, мВт	Pn	8÷15	
КСВН входа/выхода	Кст U	≤ 2	
Выходная мощность, мВт	Рпр	≥ 5	
Потери преобразования, дБ	Кп	≥-3	
Напряжение источника питания, В	Uп	9	
Ток потребления, мА	Іп	< 50	
Масса, Г	М	0,6	
Габариты, мм	l×b×h	12×7,5×1,8	

Примечание 1, 2, 3. В настоящее время диапазон рабочих частот балансного преобразователя частоты расширен до 17 ГГц и создан ряд промышленных преобразователей частоты табл. 3 [118].

Таблица 3

№	ГМИС	fc,	fn,	fпp,	Pn,	Рпр,	Кп,	Пит	ание
П.П.		ГГц	ГГц	ГГц	мВт	мВт	дБ	Uп, B	Іп, мА
1.	M43227-1	212	0.22	fc - fn	8÷15	≥5	≥-3	9	50
2.	M43227-2	212	0.10.4	fc - fn	8÷15	≥5	≥-3	9	50
3.	M43227-3	214	0.22	fc - fn	8÷15	≥5	≥-9	9	50
4.	M43227-4	214	0.10.4	fc - fn	8÷15	≥5	≥-9	9	50
5.	Репей ПРБ	1517							
6.	Созвездие-БП	78							

5.3. Балансные смесители частоты на ПТШ

На основе МИС АБПЧ созданы балансные смесители частоты [117, 121-124]. Электрическая схема ГМИС СВЧ – балансного смесителя частоты М43226, его топология и конструкция приведена на рис. 4.



Рис. 4. Электрическая схема ГМИС – балансного смесителя

B)

частоты (*a*), его топология (δ) и конструкция (*в*)

При создании ГМИС балансного смесителя частоты на основе МИС АБПЧ перемычка ВМ (рис. 2 а) разрывается. Отличительной особенностью балансного смесителя является низкая промежуточная частота. В МИС АБПЧ входной СВЧ сигнал подается синфазно на затвор транзистора T1 и исток транзистора T2. Сигнал гетеродина продается синфазно на затвор транзистора T1 и T2 соединены и токи стока транзисторов складываются. Сигнал с затвора транзисторов поступает в стоковую цепь со сдвигом 180°, а сигнал с истоков

транзисторов со сдвигом 0°. При сложении противофазные токи сигнала и противофазные токи гетеродина взаимно подавляют друг друга и на выходе остаются сигналы нижней и верхней преобразованной частот. Резисторы R2, R3 задают рабочие точки транзисторов T1 и T2. При отсутствии мощности гетеродина транзисторы T1 и T2 открыты. При подаче мощности гетеродина благодаря резисторам R1, R4 расположенным в цепях затвора происходит автоматическое смещение рабочих точек транзисторов в область близкую к отсечке. ГМИС – балансный смеситель частоты M43226 имеет параметры, приведенные в табл. 4.

Таблица 4

Параметр	Обозначение	Номинал	Примечание
Частота сигнала, ГГц	fc	212	1
Частота гетеродина, ГГц	fΓ	212	2
Частота преобразованная, ГГц	fпp	0.012	3
Потери преобразования, дБ	Кп	\leq 3	
Коэффициент шума, дБ	Кш	≤13	
КСВН входа/выхода	Кст U	≤ 2	
Напряжение источника питания, В	Uπ	5	
Ток потребления, мА	Іп	< 100	
Macca, Γ	М	0,6	
Габариты, мм	l×b×h	12×7,5×1,8	

Примечание 1, 2, 3. В настоящее время диапазон рабочих частот балансного смесителя частоты расширен до 18 ГГц и создан ряд промышленных смесителей частоты табл. 5 [118].

Таблица 5

N⁰	ГМИС	fc,	fг,	fпp,	Кп,	Кш,	Пит	гание
П.П.		ГГц	ГГц	ГГц	$2 \leq 3 \leq 12$		U π, B	Іп, мА
1.	M43226-1	212	212	0.012	≤ 3	≤ 13	9	50
2.	M43226-2	214	214	0.012	≤ 9	≤ 10	9	50
3.	M43226-3	218	218	0.52	≤10	≤ 10	9	50
4.	M43226-4	1.412	1.412	0.71.5	≤10	≤ 10	9	50

5.4. Балансные умножители частоты на ПТШ

Создан балансный умножитель частоты на 2 [117, 125]. Электрическая схема ГМИС СВЧ – балансного умножителя частоты М43108, его топология и конструкция приведена на рис. 5.





Входной СВЧ сигнал подается синфазно на исток транзистора T1 и затвор транзистора T2. При этом стоки транзисторов T1 и T2 соединены и токи стока транзисторов складываются. Сигнал с затвора транзистора T2поступает в стоковую цепь со сдвигом 180° , а сигнал с истоков транзистора T1 со сдвигом 0° . При сложении противофазные токи сигнала взаимно подавляют друг друга, а на выходе остается сигнал второй гармоники, который выделяется выходными цепями согласования. Резисторы R1, R3задают рабочие точки транзисторов T1 и T2. При отсутствии мощности сигнала транзисторы T1 и T2 открыты. При подаче мощности сигнала происходит автоматическое смещение рабочих точек транзисторов в область близкую к отсечке. ГМИС СВЧ – умножитель частоты M43108 имеет параметры, приведенные в табл. 6.

Параметр	Обозначение	Номинал	Примечание
Частота входного сигнала, ГГц	fc	44.5	1
Частота выходного сигнала, ГГц	2fc	89	2
Потери преобразования, дБ	Кп	0	
Выходная мощность, мВт	Рвых	80	
Уровень 1 и 3 гармоники, дБ	Кг	-25	
КСВН входа/выхода	Кст U	≤ 2	
Напряжение источника питания, В	Uπ	9	
Ток потребления, мА	Іп	< 60	
Масса, Г	М	0,6	
Габариты, мм	l×b×h	12×7,5×1,8	

Примечание 1, 2. В настоящее время диапазон рабочих частот балансного умножителя частоты расширен до 18 ГГц и создан ряд промышленных балансных умножителей частоты табл. 7 [118].

Таблица 7

№ п.п.	ГМИС	fc,	2fc,	Рвых,	Кп,	Кг,	Π	итание
		ГГц	ГГц	мВт	дБ	дБ	Uп,	Іπ,
							В	мА
1.	M43108-1	12	24	7,5-20	+3	-25	9	60
2.	M43108-2	24	48	20-50	+2	-25	9	60
3.	M43108-3	44,5	89	20-60	0	-25	9	60
4.	M43108-4	4,55	910	20-60	-1	-25	9	60
5.	M43108-5	55,5	1011	20-60	-2	-25	9	60
6.	M43108-6	5,56	1112	20-60	-3	-25	9	60
7.	M43108-7	67,5	1215	20-80	-4	-15	9	40
8.	M43108-8	7,59	1518	20-80	-7	-15	9	40

5.5. Балансные делители частоты на ПТШ

Для создания делителя частоты использована схема аналогового делителя частоты Миллера (АДЧМ) [117, 126-134]. Балансный делитель частоты делит частоту входного сигнала на 2. Принцип действия АДЧМ основан на смешении частоты сигнала fc и компоненты белого шума в цепи сигнала с частотой f/2. После взаимодействия с сигналом на выходе смесителя появляется частота fc – f/2 = fc/2. Если на выходе смесителя полосно-пропускающий фильтр (ППФ) на частоту fc/2, усилить ее и часть полученной мощности направить на сигнальный вход смесителя, то происходит регенерация частоты f/2. Для создания балансного делителя частоты используется МИС АБПЧ.

Электрическая схема ГМИС – балансного делителя частоты М43301, его топология и конструкция приведена на рис. 6.



Рис. 6. Электрическая схема ГМИС СВЧ – делителя частоты (*a*), его топология (*б*) и конструкция (*в*)

В МИС АБПЧ (рис. 2 а) входной СВЧ сигнал fc подается синфазно на затвор транзистора T1 и исток транзистора T2. При этом стоки транзисторов T1 и T2 соединены и токи стока транзисторов складываются. Сигнал с затвора транзистора T1 поступает в стоковую цепь со сдвигом 180°, а сигнал с истока транзистора T1 со сдвигом 0°. При сложении противофазные токи сигнала взаимно подавляют друг друга. За счет внутренней обратной связи в МИС АБПЧ, перемычка ВМ (рис. 2 а) не разрывается, сигнал с выхода смесителя подается на вход смесителя АДЧМ и регенерирует частоту fc/2. Резисторы R2, R3 задают рабочие точки транзисторов T1 и T2. При отсутствии мощности сигнала транзисторы T1 и T2 открыты. При подаче мощности сигнала происходит автоматическое смещение рабочих точек транзисторов в область близкую к отсечке. ГМИС СВЧ – делитель частоты M43301 имеет базовую конструкцию и изготовлен по базовой технологии и имеет параметры, приведенные в табл. 8.

Таблица 8

Параметр	Обозначение	Номинал	Примечание
Частота входного сигнала, ГГц	fc	68	1
Частота выходного сигнала, ГГц	fc/2	34	2
Входная мощность, мВт	Рвх	5÷20	
Выходная мощность, мВт	Рвых	2 ÷ 8	
КСВН входа/выхода	Кст U	≤ 2	
Напряжение источника питания, В	Uп	5	
Ток потребления, мА	Іп	< 45	
Масса, Г	М	0,6	
Габариты, мм	l×b×h	12×7,5×1,8	

Примечание 1, 2. В настоящее время диапазон рабочих частот балансного делителя частоты расширен до 12 ГГц и с участием автора создан ряд промышленных балансных делителей частоты табл. 9 [118].

Таблица 🤉)
-----------	---

№ п.п.	ГМИС	fc,	fc/2,	Рвх,	Рвых,	Пит	ание
		ГГц	ГГц	мВт	мВт	Uп,	Ιп,
						В	мА
1.	M43301-1	1 2	0.5 1	5÷20	2 ÷ 8	5	45
2.	M43301-2	1,5 3	0,75 1.5	5÷20	2 ÷ 8	5	45
3.	M43301-3	2 4	1 2	5÷20	2 ÷ 8	5	45
4.	M43301-4	3 5	1.5 2.5	5÷20	2 ÷ 8	5	45
5.	M43301-5	4 6	23	5÷20	2 ÷ 8	5	45
6.	M43301-6	5 7	2.5 3.5	5÷20	2 ÷ 8	5	45
7.	M43301-7	6 8	3 4	5÷20	2 ÷ 8	5	45
8.	M43301-8	7 9	3.5 4.5	5÷20	2 ÷ 8	5	45
9.	M43301-9	8 10	4 5	10÷30	2 ÷ 8	5	45
10.	M43301-10	9 11	4.5 5.5	10÷30	2 ÷ 8	5	45
11.	M43301-11	10 12	5 6	10÷30	2 ÷ 8	5	45

5.6. Генераторы частоты на ПТШ

Для создания генератора частоты использована схема Шембеля – (емкостной трех точки) на ПТШ [117, 135-157]. Принцип действия генератора частоты основан на создании резонансного контура во входной цепи за счет индуктивной нагрузки в затворной цепи, собственной емкости затвор-исток ПТШ и емкости в истоковой цепи. При условии соблюдения баланса фаз и амплитуд, при включении источника питания каскад на ПТШ самовозбуждается на частоте сигнала fc.

Электрическая схема ГМИС СВЧ – генератора частоты М41147, его топология и конструкция приведена на рис. 7.



Рис. 7. Электрическая схема ГМИС – генератора (*a*), его топология (*б*), конструкция (*в*)

ПТШ. Первый Генератор содержит каскада на два каскад автогенератор на транзисторе *T1* имеет в цепи затвора транзистора *T1* R1, а в цепи истока емкость C3. Если в цепи затвора нет резистор индуктивности, то автогенератор при включении источника питания не возбуждается. Второй каскад генератора усилитель, служащий для развязки автогенератора с нагрузкой. Резисторы R2, R5 задают рабочие токи транзисторов *T1* и *T2*. При подключении на вход транзистора T1индуктивной нагрузки либо микрополосковой линии с диэлектрическим резонатором автогенератор возбуждается и генерирует частоту сигнала fc, которая усиливается вторым каскадом и подается на выход. ГМИС СВЧ генератор частоты М41147 имеет параметры, приведенные в табл. 10.

	10
Гаопина	10
таолица	10

Параметр	Обозначение	Номинал	Примечание
Частота выходного сигнала, ГГц	fc	4.512	2
Входная мощность, мВт	Рвых	≥25	
Фазовые шумы на частоте 10 кГц, дБ/Гц	Фш	-90	
КСВН входа/выхода	Кст U	≤2	
Напряжение источника питания, В	Uп	9	
Ток потребления, мА	Іп	< 50	
Масса, Г	М	0,6	
Габариты, мм	l×b×h	12×7,5×1,8	

Примечание 1, 2. В настоящее время фазовые шумы генератора частоты уменьшены, а выходная мощность увеличена и с участием автора создан ряд промышленных генераторов частоты табл. 11 [118].

Таблица 11

$\mathbb{N}^{\underline{o}}$	ГМИС	fc,	Рвых,	Фш,	Π	итание
П.П.		ГГц	мВт	дБ/Гц	Uп, B	Іп, мА
1.	M41147-1	4,5 12,0	25	- 90	9	50
2.	M41147-2	4,5 12,0	25	- 105	9	50
3.	M41147-3	4,5 12,0	50	- 90	9	80
4.	M41147-4	4,5 12,0	50	- 105	9	80

Таким образом, в соответствии с предложенной концепцией и классификацией, на основе оригинальной конструкции и сапфирового технологического базиса созданы маломощные преобразовательные и генераторные ГМИС СВЧ диапазона 0.4...20 ГГц с выходной мощностью менее 100 мВт.

Заключение по главе 5

- преобразователей 1. Проведен анализ частоты однозатворных на И двухзатворных ПТШ и показано, что преобразователи частоты на двухзатворных ПТШ более эффективны, однако для подавления на выходе преобразователя частот сигнала и накачки необходимы балансные преобразователи частоты, которые целесообразнее строить на однозатворных ПТШ, поэтому создана специальная МИС СВЧ.
- Создан и внедрен в производство ряд промышленных преобразовательных ГМИС СВЧ базовой конструкции с выходной мощностью менее 100 мВт на GaAs ПТШ и МИС СВЧ:
- балансные преобразователи частоты диапазона 2...17 ГГц;
- балансные смесители частоты диапазона 2...18 ГГц;
- балансные умножители частоты на 2 диапазона 1...18 ГГц;
- балансные делители частоты на 2 диапазона 1...12 ГГц;
- генераторы частоты диапазона 4.5...12 ГГц.
- Для защиты от скачков напряжения в момент включения и выключения источника питания во всех ГМИС СВЧ напряжение питания подается через последовательный балластный резистор и шунтирующий защитный стабилитрон.
- 4. Для защиты от статического электричества затворы ПТШ соединены с «землей» через малые сопротивления.

ГЛАВА 6. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ МОЗАИЧНЫЕ ГМИС СВЧ

В данной главе приведены результаты исследования мощных усилительных ГМИС СВЧ мозаичной конструкции. Показано, что в соответствии с классификацией создан ряд промышленных усилительных ГМИС СВЧ сантиметрового диапазона длин волн с выходной мощностью до 0.6 Вт на GaAs и МИС СВЧ, а также ГМИС СВЧ с выходной мощностью до 17 Вт на GaN ПТШ.

6.1. Узкополосные усилители мощности на ПТШ

Для повышения выходной мощности ГМИС СВЧ необходимо было улучшить отвод тепла, и в первую очередь от ПТШ. Для решения проблемы предполагалось изготавливать в сапфировой плате отверстия и монтировать ПТШ непосредственно на металлическое основание. Однако в 80 годы изготовление отверстий в сапфире было большой проблемой, поэтому для увеличения выходной мощности пришлось электрическую схему ГМИС СВЧ разбить на фрагменты и каждый фрагмент изготавливать на отдельной плате.

Конструкция ГМИС СВЧ, содержащая несколько плат с пассивными элементами были названа мозаичной по аналогии с многоплатной мозаичной конструкцией ГИС СВЧ.

ГМИС СВЧ мозаичной конструкции на сапфировых платах стали основой для создания ряда мощных усилительных ГМИС СВЧ.

В ГМИС СВЧ мозаичной конструкции сапфировые платы, содержащие (*R*, *L*, *C*) элементы, и кристаллы ПТШ установлены на единое металлическое основание, при этом стало возможно использование как МПЛ, так и КЛЭ линий.

Электрическая схема ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – однокаскадного усилителя «Созвездие-К», его топология и конструкция приведена на рис. 1.



Рис. 1. Электрическая схема ГМИС – однокаскадного усилителя «Созвездие-К» (*a*), его топология (б) и конструкция (в)

ГМИС СВЧ мозаичной конструкции выполнена на GaAs ПТШ. Согласующие элементы отрезки линий с волновым сопротивлением Zв порядка 50 ом. Для расширения полосы пропускания включен резистор обратной связи R2. Для защиты от перенапряжения со стороны источника питания введен защитный стабилитрон и балластный резистор. Для защиты от статического электричества затворы ПТШ заземлены через отрезки линий.

Конструктивно усилитель выполнен на металлическом основании с пазом глубиной 0.5 мм. В паз основания установлены две сапфировые платы, содержащие всю пассивную часть ГМИС СВЧ и кристалл ПТШ, которые монтируются на основание с помощью токопроводящего клея. Соединение компонентов в схему осуществляется золотым проводом диаметром 20 мкм. Сапфировая крышка приклеивается к основанию изолирующим клеем. Габаритные размеры ГМИС СВЧ не более 12×7,5×1,8 мм.

ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – однокаскадный узкополосный усилитель «Созвездие-К» имеет параметры, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Обозначение	Номинал	Примечание
Рабочий диапазон частот, ГГц	Δfp	14.414.7	1
Коэффициент усиления, дБ	Ку	≥ 6	
КСВН входа/выхода	КстU	≤ 2	
Выходная мощность, мВт	Рвых	50	
Напряжение питания, В	U	9	
Ток потребления, мА	Ι	< 30	
Масса, Г	М	0,6	
Габариты, мм	l×b×h	12×7,5×1,8	

Примечание 1. В настоящее время диапазон рабочих частот усилителя расширен до 7...20.5 ГГц и создан ряд промышленных ГМИС мозаичной конструкции – узкополосных усилителей табл. 2 [158].

Таблица 2

№	ГМИС	Δfp,	Ку,	Рвых,	КстU		Питание	
П.П.		ГГц	дБ	мВт		+U, B	-U, B	I, мА
1.	«Созвездие-К-1»	77.5	6	50	2	9		30
2.	«Созвездие-К-2»	14.114.4	6	50	2	9		30
3.	«Созвездие-К-3»	14.414.7	6	50	2	9		30
4.	«Созвездие-Д-5»	1414.5	6	150	2	9	-5	85
5.	«Созвездие-Д-6»	1616.4	6	100	2	9	-5	60
6.	«Созвездие-Д-6.2»	1616.4	6	100	2	9	-5	60
7.	«Созвездие-Д-6.3»	1616.4	6	250	2	9	-5	140
8.	«Созвездие-Д-7»	18.520.5	6	150	2	9	-5	120

6.2. Широкополосные усилители мощности на МИС СВЧ

Созданы ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – широкополосный усилитель с распределенным усилением (усилитель бегущей волны - УБВ) L...Ku - диапазона на МИС СВЧ, в которой используется несколько параллельно включенных ПТШ, затворная и стоковая цепи, которых нагружены на согласованные линии с распределенными параметрами [158].

ГМИС СВЧ мозаичной конструкции M421227 – широкополосные усилители (однокаскадный и двухкаскадный) их топология и конструкция приведены на рис. 2.







Рис. 2. ГМИС СВЧ мозаичной конструкции: однокаскадная (*a*) и (*б*); двухкаскадная (*в*) и (*г*)

ГМИС СВЧ мозаичной конструкции выполнены на металлическом основании с пазом глубиной 0.5 мм. В паз основания установлены две сапфировые платы, содержащие всю пассивную часть ГМИС СВЧ и кристаллы МИС СВЧ. Соединение компонентов в схему осуществляется золотым проводом диаметром 20 мкм. Конструкция ГМИС СВЧ негерметичная, сапфировая крышка приклеивается к основанию изолирующим клеем.

ГМИС СВЧ М421227 – однокаскадный широкополосный усилитель имеет параметры, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Параметр	Обозначение	Номинал	Примечание
Рабочий диапазон частот, ГГц	Δfp	218	
Коэффициент усиления, дБ	Ку	≥ 6	1
Коэффициент шума, дБ	Кш	≤ 8	
Неравномерность усиления, дБ	ΔΚy	≤ 2	
КСВН входа/выхода	КстU	≤ 2	
Выходная мощность, мВт	Рвых	10	2
Напряжение питания, В	+U	9	
Напряжение питания, В	-U	5	
Ток потребления, мА	Ι	< 50	
Масса, Г	М	0,6	
Габариты, мм	l×b×h	12×7,5×1,8	

Примечание 1, 2. В настоящее время повышены коэффициент усиления и выходная мощность и создан ряд промышленных широкополосных усилителей мозаичной конструкции табл. 4 [158].

Таблица 4

N⁰	ГМИС	Δfp,	Ку,	Кш,	Рвых,	КстИ	Питание		e
П.П.		ГГц	дБ	дБ	мВт		+U,	-U,	I,
							В	В	мА
1.	M421227-1	218	6	8	10	2	9	5	50
2.	M421227-3	218	6	8	50	2	9	5	60
3.	M421227-4	218	12	8	10	2	9	5	100
4.	M421227-5	218	12	8	50	2	9	5	120

6.3. Предварительный усилитель мощности (ПУМ) на ПТШ

Стремление к миниатюризации было и остается важной задачей развития ГМИС СВЧ. В оригинальной конструкции ГМИС СВЧ на основе подвешенной КЛ и пассивной монолитной сапфировой платы имеется четыре основных компонента: рамка с микрополосковыми выводами и окном, сапфировая плата, металлическое основание и крышка для герметизации.

На пути миниатюризации для уменьшения массы и габаритов ГМИС СВЧ и приближения их к МИС СВЧ было принято решение:

 исключить рамку с микрополосковыми выводами, при этом площадь, занимаемая ГМИС СВЧ, сокращается в 6 раз, а именно до размеров окна рамки 4,5×3 мм;

2) традиционное металлическое основание выполнить из алмаза, чтобы уменьшить массу (масса алмаза в 2,5 раза меньше, чем у меди) и улучшить теплоотвод (теплопроводность алмаза в 4 раза выше, чем у меди);

- 3) сапфировые платы изготовить на арсениде галлия;
- 4) использовать для измерения параметров ГМИС СВЧ такие же зонды, как и для измерения параметров МИС СВЧ.

Создана ГМИС СВЧ мозаичной конструкции М42241 – двухкаскадный предварительный усилитель мощности (ПУМ) Х-диапазона частот на GaAs ПТШ. Электрическая схема ГМИС СВЧ мозаичной конструкции, топология и конструкция показана на рис. 3.



Рис. 3. ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – двухкаскадный предварительный усилитель мощности: электрическая схема (*a*); конструкция на металлическом основании (*б*); на алмазном основании (*в*)

Переход к существующей мозаичной конструкции ПУМ проходил постепенно. На первом этапе миниатюризации ПУМ размещался на металлическом основании размером $3,5 \times 3 \times 0,8$ мм и выполнялся на двух кристаллах GaAs ПТШ (рис. 3 б). В настоящее время ПУМ размещается на алмазном основании размером $3,5 \times 3 \times 0,2$ мм и содержит однокаскадную усилительную МИС СВЧ на входе и мощный выходной усилительный каскад на GaAs ПТШ (рис. 3 в). Для подачи питания и смещения используется специальная сервисная плата.

Все пассивные платы изготавливаются из полуизолирующего арсенида галлия, имеющего толщину порядка 100 мкм, по укороченному маршруту изготовления МИС СВЧ, описанному в стандарте предприятия «Арсенидгаллиевые пассивные схемы для СВЧ твердотельных приборов. Требования к конструированию» СТП ТСО.010.019-03 [159].

Для измерения параметров ГМИС СВЧ – мозаичного усилителя мощности СВЧ используются копланарные СВЧ зонды и многоконтактный НЧ зонд [160, 161], как и для измерения параметров МИС СВЧ.

Конструкция ГМИС СВЧ М42241 с зондами для измерения ее параметров приведена на рис. 4.



Многоконтактный зонд ВЧ и НЧ

Выход СВЧ зонд СВЧ

Рис. 4. ГМИС мозаичной конструкции M42241 с зондами для измерения параметров

Копланарные СВЧ зонды расположены соосно и контактируют к входу и выходу ГМИС СВЧ предварительного усилителя мощности СВЧ, а многоконтактный зонд НЧ контактирует одновременно к 10 площадкам размером 0,25×0,12 мм сервисной платы, содержащей контактные площадки и соединительные линии, а также резистивный делитель для регулировки оптимального напряжения смещения на затвор ПТШ.

ГМИС СВЧ мозаичной конструкции позволили существенно улучшить массогабаритные характеристики и повысить выходную мощность.

ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – двухкаскадный предварительный усилитель мощности М42241 имеет параметры, приведенные в табл. 5.

Таблица 5

Параметр	Обозначение	Номинал	Примечание
Рабочий диапазон частот, ГГц	Δfp	910	1
Коэффициент усиления, дБ	Ку	≥13	2
КСВН входа/выхода	КстU	≤ 2	
Выходная мощность, Вт	Рвых	0.5	3
Напряжение питания, В	+U	9	
Напряжение питания, В	-U	5	
Ток потребления, мА	Ι	< 300	
Масса, г	М	0,1	
Габариты, мм	l×b×h	3,5×3×0.2	

Примечание 1, 2, 3. В настоящее время диапазон рабочих частот расширен, повышены коэффициент усиления и выходная мощность и создан ряд промышленных узкополосных усилителей мозаичной конструкции табл. 6.

Таблица 6

№	ГМИС	Δfp,	Ку,	Рвых,	КстU	Питание		ние
п.п.		ГГц	дБ	Вт		+U,	-U,	I, мА
						В	В	
	Основание металл							
1.	M42241-1	910	13	0.5	2	9	5	250
2.	M42241-2	9.510.6	15	0.6	2	9	5	300
	Основание Алмаз							
1.	M42241-3	910	13	0.5	2	9	5	250
2.	M42241-4	9.510.6	15	0.6	2	9	5	300

ГМИС СВЧ мозаичной конструкции негерметичны и не имеют крышки.

6.4. Выходные усилители мощности (ВУМ) на GaN ПТШ

Исследовалась возможность создания усилительных ГМИС СВЧ мозаичной конструкции с выходной мощностью более 1 Вт.

В настоящее время мощные GaAs ПТШ серийно изготавливаются как за рубежом, так и в России [162-170]. Удельная выходная мощность современных GaAs ПТШ составляет порядка 1 Вт/мм ширины затвора для отечественных и зарубежных транзисторов, при этом выходная мощность кристаллов ПТШ порядка 5...8 Вт. На предприятии АО «НПП «Исток» им. Шокина» на основе мощные GaAs ПТШ ведутся разработки и серийно выпускаются мощные усилительные ГИС СВЧ [171-178].

Мощные GaN ПТШ на подложке SiC серийно изготавливаются только за рубежом, а в России ведутся разработки этих GaN ПТШ. Удельная выходная мощность современных зарубежных GaN ПТШ на подложке карбида кремния (SiC) составляет порядка 4 Вт/мм ширины затвора, при этом выходная мощность кристаллов зарубежных ПТШ порядка 80 Вт.

ПТШ на GaN и подложке SiC имеют в 4 раза большую удельную выходную мощность по сравнению с ПТШ на GaAs при одинаковых габаритных размерах. Для создания и исследования мощных усилительных ГМИС СВЧ автор использовал зарубежные GaN ПТШ на подложке SiC.

Наиболее доступными среди известных GaN ПТШ на подложке SiC оказались зарубежные транзисторы фирмы TriQuint, США типа: TGF2023-1, TGF2023-2, TGF2023-5 [179], которые работают на частотах до 18 ГГц, имеют выходную мощность 5, 10, 20 Вт и именно они выбраны автором для создания мощных усилительных ГМИС СВЧ.

Внешний вид транзисторов TGF2023-1, TGF2023-2, TGF2023-5 и их параметры, соответствующие описанию на транзисторы, приведены в табл. 7.

Таблица	7	
		-

	TGF2023-1	TGF2023-2	TGF2023-5					
Параметр								
	На частоте 10	ГГц						
Выходная мощность, Вт/дБм	5/37	10/40	20/43					
Коэффициент усиления, дБ								
Максимальный	13	13	13					
В насыщении	9,5	9,4	8,9					
КПД, %	55	55	55					
Входная мощность, дБм	31	34	37					
Рассеиваемая мощность, Вт	8,1	16,2	32,4					
Низкочастотные параметр	Ы	I						
Ток стока рабочий, А	0,4	0,75	1,5					
Ток стока начальный, А	0,125	0,25	0,5					
Ток стока насыщения, А	1,25	2,5						
Ток затвора макс., мА	7	14	28					
Напряжение стока, В	28	28	28					
Пробивное напряжение сток-затвор, В	80	80	80					
Геометрические размеры	Геометрические размеры							
Ширина затвора, мм	1,25	2,5	5					
Длина затвора, мкм	0,25	0,25	0,25					
Размер кристалла, мм	0,82×0,66×0,10	0,82×0,92×0,10	0,82×1,44 ×0,10					

Анализ таблицы показывает, что основой ряда является транзистор TGF2023-1, а другие транзисторы TGF2023-2, TGF2023-5, получаются путем масштабирования транзистора TGF2023-1. Все транзисторы

выполнены по технологии мощных дискретных GaN HEMT на теплопроводящей подложке SiC с шириной затвора кратной 1.25 мм и длиной Т-образного затвора 0,25 мкм. Поперечное сечение (скол) транзистора TGF2023-1 показан на рис. 5.



Рис. 5. Поперечное сечение транзистора TGF2023-1 (a),

поперечное сечение Т-образного затвора транзистора (б)

TGF2023-1 Анализ показывает, что транзистор имеет канал, ограниченный контактами истока и стока. Видно, что металлизация контактов истока и стока очень толстая порядка 6...7 мкм, что необходимо для уменьшения сопротивлений истока и стока. В канале расположен Т-образный затвор, смещенный к истоку, который позволяет уменьшить сопротивление металлизации затвора и емкости затвор исток и затвор сток. При этом смещение затвора к истоку с одной стороны увеличивает крутизну транзистора, а с другой увеличивает пробивное напряжение сток-затвор. Толстый слой диэлектрика покрывает канал И затвор транзистора, обеспечивая его защиту от внешней среды. Т-образный затвор транзистора имеет сложную конструкцию и покрыт двумя слоями диэлектрика, между которыми располагается металлический электрод гальванически соединенный с истоком. Этот электрод в зарубежной литературе называют «field plate» полевой электрод. Полевой электрод имеет потенциал истока и экранирует затвор от стока, уменьшая при этом проходную емкость

транзистора сток-затвор. Уменьшение проходной емкости приводит к увеличению устойчивого коэффициента усиления транзистора.

Для создания усилительного каскада на полевом транзисторе и получения требуемых характеристик: усиления, полосы рабочих частот, равномерности коэффициента усиления, КСВН, выходной мощности, КПД и др. необходимо обеспечить определенные оптимальные нагрузки на входе и выходе каскада. В диапазоне частот 8...18 ГГц были измерены оптимальные нагрузки на входе и выходе транзистора TGF2023-1 для получения максимального КПД. Значения оптимальных нагрузок, измеренных при напряжении питания 30 В и начальном токе стока 125 мА, приведены в табл. 8.

Таблица 8

Параметры	Частота, ГГц							
Tupunetpbi	8	10	12	14	16	18		
Максимальное	15.05	10.64	10 5 10	10.5	0.0	0		
усиление, дБ	15,85	13,64	12,548	10,5	9,9	9		
Выходная	0.6 771	26.026	26150	26.21	25.0	261		
мощность, дБм	36,771	36,036	36,158	36,31	35,9	36,1		
КПД, %	58,129	56,144	53,477	46,88	42,7	40,79		
Zн выхода	18,65+j31,8	15,51+j25,12	11,27+j23	11,36+j20	11.1+j15	9.75+j13		
Zн входа	2,4+j4,55	2,55+j2,35	2,7+j0,1	2,9-j2,25	3-j3,9	2,58-j6,4		

Анализ оптимальных нагрузок на входе и выходе ПТШ показывает:

- выходной импеданс ПТШ носит емкостный характер и соответственно для комплексно сопряженного согласования оптимальные нагрузки на выходе ПТШ должны иметь индуктивный характер;
- входной импеданс ПТШ на частотах до 12 ГГц носит емкостный характер и соответственно для комплексно сопряженного согласования оптимальные нагрузки на входе и выходе ПТШ должны иметь индуктивный характер;
- на частотах выше 12 ГГц входной импеданс ПТШ носит индуктивный характер и соответственно для комплексно сопряженного согласования
оптимальные нагрузки на входе и выходе ПТШ должны иметь емкостный характер.

Созданы ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – усилители мощности Х-диапазона на GaN транзисторах TGF2023-1, TGF2023-5 [180].

Электрическая схема ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – тестового однокаскадного усилителя мощности его топология и конструкция показаны на рис. 6.





Рис. 6. ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – тестовый однокаскадный усилитель мощности Х-диапазона частот на транзисторе TGF2023-1:

электрическая схема (а), конструкция (б)

Все компоненты ГМИС СВЧ расположены на плоскости золоченого металлического основания, служащего теплоотводом, размером 7,5×12×1 мм. На металлическое основание припаяна рамка размером 7,5×6×0,5 мм с микрополосковыми выводами входа и выхода и выводы для подачи питания.

В рамке имеется окно размером $4,5 \times 3$ мм, в котором непосредственно на поверхности металлического основания установлены кристаллы GaN ПТШ – TGF2023-1. Согласующие платы выполнены из полуизолирующего арсенида галлия толщиной 100 мкм. Они содержат индуктивные *L* и емкостные *C* элементы в виде отрезков МПЛ, синтезирующие оптимальные нагрузки, элементы питания и выводы. Соединение всех компонентов в схему осуществляются золотым проводом диаметром 20 мкм. ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – выходной усилитель мощности (ВУМ) работает в режиме большого сигнала и характеризуется следующими основными параметрами: полосой рабочих частот, выходной мощностью, КПД, коэффициентом усиления, КСВН входа.

Измерение всех параметров ГМИС СВЧ проводилось на специальном измерительном стенде с импульсным источником питания, созданным автором (**приложение 4**), параметры источника приведены в табл. 9.

Таблица 9

– Длительность импульса, мкс	199
– Скважность импульса, ед	299
– Импульсное положительное напряжение стока, В	030
 Импульсный ток стока, А 	010
– Постоянное отрицательное напряжение затвора, В	05

Стенд позволяет в диапазоне 8...18 ГГц проводить калибровку параметров и измерять в автоматическом режиме выходную мощность, коэффициент усиления, КПД, КСВН входа, питающие напряжения, потребляемый импульсный ток стока.

ГМИС СВЧ Измерение параметров мозаичной конструкции проводилось с контактного устройства помощью С коаксиальномикрополосковыми переходами, обеспечивающими соединение с микрополосковыми выводами ГМИС СВЧ.

Питающее напряжение +30 В подавалось на выводы ГМИС СВЧ через игольчатые зонды. ГМИС СВЧ настраивались на максимальный КПД.

Параметры ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – однокаскадного ВУМ на ПТШ ТGF2023-1 при входной мощности 0,5 Вт и напряжении питания +30 В приведены на рис. 7.





Параметры ВУМ соответствуют параметрам, приведенным изготовителем в описании на транзистор TGF2023-1.

Полученные в результате исследований уточненные комплексные входные и выходные сопротивления транзистора TGF2023-1 послужили основой для расчета ГМИС СВЧ – однокаскадного усилителя ВУМ на сосредоточенных элементах и двухкаскадного ВУМ.

ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – однокаскадный и двухкаскадный усилители на транзисторах TGF2023-1 и TGF2023-5 представлены на рис. 8.





Рис. 8. ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – усилители мощности Х-диапазона частот: однокаскадный (*a*), двухкаскадный (б)

183

Применение сосредоточенных элементов позволило существенно сократить размеры входной и выходной согласующих плат. ГМИС СВЧ – однокаскадный усилитель на сосредоточенных элементах в основном повторяет параметры ГМИС СВЧ на распределенных элементах, а занимаемая площадь уменьшается практически в два раза. Это позволило в тех же габаритах создать двухкаскадный усилитель мощности.

Все компоненты ГМИС СВЧ кристаллы ПТШ ТGF2023-1 и TGF2023-5, согласующие платы входная, межкаскадная и выходная установлены непосредственно на плоскости металлического основания. Соединение всех компонентов в схему осуществляются золотым проводом диаметром 20 мкм.

Измеренные характеристики ГМИС мозаичной конструкции – двухкаскадного ВУМ на транзисторах TGF2023-1 и TGF2023-2, при входной мощности 0,2 Вт и напряжении питания +30 В приведены на рис. 9.



Рис. 9. ГМИС мозаичной конструкции – двухкаскадный ВУМ на TGF2023-1 и TGF2023-5: коэффициента усиления и КСВН (*a*),

выходная мощность и КПД (б)

Были рассчитаны и изготовлены ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – однокаскадные и двухкаскадные ВУМ на TGF2023-1 и TGF2023-5, работающие на частоте 14 и 15 ГГц. ГМИС СВЧ мозаичной конструкции на частоты 14 и 15 ГГц приведены на рис. 10.



Рис. 10. ГМИС мозаичной конструкции: однокаскадный ВУМ на 15 ГГц (*a*), двухкаскадный ВУМ на 15 ГГц (*б*), двухкаскадный ВУМ на 14 ГГц (*в*)

Исследование мощных однокаскадных и двухкаскадных ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – выходных усилителей мощности X и Ku диапазона частот показало, что ГМИС СВЧ мозаичной конструкции позволяют изготавливать ВУМ на GaN ПТШ с выходной мощностью 5 и 12 Вт.

Аналогичные ГИС и ГМИС СВЧ на GaN ПТШ разрабатываются зарубежными фирмами и отечественными предприятиями [181-195].

Созданы также ГМИС мозаичной конструкции – выходные усилители мощности Х-диапазона на GaN транзисторах TGF2023-1, TGF2023-2, TGF2023-5 [196] на алмазном основании.

ГМИС СВЧ **мозаичной** конструкции на **алмазном** основании – однокаскадные выходные усилители мощности (ВУМ) показаны на рис. 11.



Рис. 11. ГМИС мозаичной конструкции: на TGF2023-1 (*a*); на TGF2023-2 (*б*); на TGF2023-5 (*в*)

185

Все компоненты ГМИС СВЧ мозаичной конструкции: кристалл ПТШ, входная, выходная и сервисная платы размещены на алмазном металлизированном основании размером 3,5×3 мм толщиной 0,2 мм.

Входная и выходная платы включают все пассивные элементы ГМИС (*R*, *L*, *C*) и выводы. Сервисная плата содержит резистивный делитель для питания затвора транзистора и выводы для подачи питания. Все платы изготовлены на полуизолирующем GaAs толщиной 100 мкм. Все соединения в схеме выполнены золотым проводом диаметром 20 мкм.

Параметры ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – однокаскадного выходного усилителя мощности на TGF2023-1 при входной мощности 0,5 Вт и напряжении питания +30 В приведены на рис. 12.



Рис. 12. ГМИС мозаичной конструкции на TGF2023-1: выходная мощность и коэффициент усиления (*a*), выходная мощность и КПД (б)

Параметры ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – однокаскадного выходного усилителя мощности на TGF2023-2 при входной мощности 1 Вт и напряжении питания +30 В приведены на рис. 13.



Рис. 13. ГМИС мозаичной конструкции на TGF2023-2: выходная мощность и коэффициент усиления (*a*), выходная мощность и КПД (б)

Параметры ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – однокаскадного выходного усилителя мощности на транзисторе TGF2023-5 при входной мощности 2 Вт и напряжении питания +30 В приведены на рис. 14.



Рис. 14. ГМИС мозаичной конструкции на TGF2023-5: выходная мощность и коэффициент усиления (*a*), выходная мощность и КПД (б)

ГМИС СВЧ мозаичной Исследование конструкции – мощных однокаскадных выходных усилителей мощности Х-лиапазона частот миниатюрной ГМИС СВЧ конструкции показало, что позволяют изготавливать ВУМ на GaN ПТШ с выходной мощностью 5, 10 и 17 Вт.

Для возбуждения ГМИС СВЧ – однокаскадных выходных усилителей мощности (ВУМ) с выходной мощностью 5, 10 и 17 Вт необходимы были ГМИС СВЧ – предварительные усилители мощности (ПУМ) с входной мощностью 0,5 Вт, 1 Вт и 2 Вт соответственно. При этом питание ГМИС

187

СВЧ – предварительных усилителей мощности целесообразно было осуществлять от источника напряжением +30В.

Построить ГМИС СВЧ – предварительный усилитель мощности можно было на GaAs ПТШ, однако напряжение питания GaAs ПТШ порядка +8 B, а напряжение питания GaN ПТШ порядка +30 B.

Создана ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – двухкаскадного предварительного усилителя мощности на обоих типах транзисторов GaAs ПТШ и GaN ПТШ.

Электрическая схема и конструкция ГМИС СВЧ приведена на рис. 15.



Рис. 15. ГМИС мозаичной конструкции – ПУМ на GaAs и GaN ПТШ: электрическая схема (*a*), конструкция (б)

Все компоненты ГМИС СВЧ мозаичной конструкции: транзисторы *T1* и *T2*, входная, выходная и сервисная платы размещены на алмазном металлизированном основании размером 3,5×3 мм толщиной 0,2 мм. Входная и выходная платы включают все пассивные элементы ГМИС (*R*, *L*, *C*) и выводы. Сервисная плата содержит резистивный делитель для питания затвора транзистора и выводы для подачи питания. Платы (кристаллы) выполнены на полуизолирующем GaAs толщиной 100 мкм. Компонент *T2* – GaN ПТШ установлен на поверхности блокировочного МОП-конденсатора из кремния. Все межсоединения выполнены золотым проводом диаметром 20 мкм.

Измеренные параметры ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – двухкаскадного ПУМ на GaAs и GaN ПТШ при входной мощности 30 мВт и напряжении питания +30 В приведены на рис. 16.



Рис. 16. ГМИС мозаичной конструкции –ПУМ на GaAs и GaN ПТШ: выходная мощность и коэффициент усиления (*a*), выходная мощность и КПД (б)

Выходная мощность ГМИС СВЧ достаточна для возбуждения выходного усилителя мощности на транзисторе TGF2023-1. ГМИС СВЧ – имеет не высокий КПД. Последовательное питание транзисторов *T1* и *T2*, при котором уменьшается напряжение питания выходного транзистора TGF2023-1, приводит к снижению выходной мощности и КПД.

Проведенное исследование ГМИС СВЧ мозаичной конструкции – двухкаскадного предварительного усилителя мощности показало, что при последовательном питании транзисторов можно использовать в одной схеме оба типа транзисторов GaAs и GaN, и создавать предварительные усилители с удовлетворительными параметрами.

Таким образом, в соответствии с предложенной классификацией, на основе мозаичной конструкции и сапфирового технологического базиса созданы мощные усилительные ГМИС СВЧ диапазона 2...20 ГГц с выходной мощностью до 17 Вт на GaAs и GaN ПТШ.

ГМИС СВЧ мозаичной конструкции нашли применение на других предприятиях отрасли.

Заключение по главе б

- 1. Создан ряд промышленных ГМИС СВЧ мозаичной конструкции на GaAs ПТШ:
- узкополосные усилители диапазона 7...20 ГГц с выходной мощностью порядка 250 мВт;
- широкополосные усилители диапазона 2...12 ГГц с выходной мощностью порядка 50 мВт;
- предварительные усилители мощности (ПУМ) диапазона частот 9...11
 ГГц с выходной мощностью порядка 0.6 Вт.
- Созданы ГМИС СВЧ мозаичной конструкции однокаскадные и двухкаскадные выходные усилители мощности (ВУМ) Х-диапазона частот с выходной мощностью 5, 10, 17 Вт на GaN ПТШ.
- Создана ГМИС СВЧ мозаичной конструкции двухкаскадный предварительный усилитель мощности (ПУМ) Х-диапазона частот с выходной мощностью 0.7 Вт на ПТШ с последовательным питанием GaAs и GaN ПТШ.

ГЛАВА 7. ГМИС СВЧ НА АЛМАЗЕ

В данной главе выбраны конструкции ГМИС СВЧ, в том числе поверхностного монтажа, на одной монолитной алмазной плате, оптимизированы процессы формирования металлизированных отверстий в алмазной плате и создан технологический процесс изготовления монолитной алмазной платы ГМИС СВЧ по групповой планарной технологии и прецизионной литографии. Созданы мощные усилительные ГМИС СВЧ на алмазе, в том числе поверхностного монтажа.

7.1. Конструкция ГМИС на алмазе

Анализ известных конструктивно-технологических решений ДЛЯ мозаичных ГИС и ГМИС СВЧ показал, что их общим недостатком является низкая теплопроводность платы и невозможность размещения на плате мощных активных компонентов (кристаллов ПТШ и МИС СВЧ), что снижению интеграции И увеличению массогабаритных приводит К характеристик. Для повышения интеграции ГИС и ГМИС СВЧ мозаичной конструкции появилась необходимость в поиске новых конструктивнотехнологических решений для ГМИС СВЧ.

Новые конструктивно-технологические решения целесообразно было искать на пути совершенствования ГИС и ГМИС СВЧ мозаичной конструкции: перехода к одноплатной конструкции; повышения теплопроводности платы; изготовления металлизированных отверстий в Эти вопросов плате. задачи охватывали комплекс теоретического, конструктивного и технологического характера.

В соответствии с предложенной концепцией для преодоления выше перечисленных недостатков, присущих мощным усилительным ГИС и ГМИС СВЧ мозаичной конструкции, новое конструктивно-технологическое решение ГМИС СВЧ должно было обеспечить:

 размещение на одной диэлектрической плате всех пассивных элементов и кристаллов мощных активных компонентов; изготовление всей монолитной пассивной части ГМИС СВЧ на одной диэлектрической плате по групповой планарной технологии и прецизионной литографии.

В 2012 г впервые в отечественной и зарубежной практике автором было предложено новое конструктивно-технологическое решение для мощной усилительной ГМИС СВЧ на одной монолитной алмазной плате из поликристаллической алмазной пленки – ПАП [197-199], имеющей: теплопроводность – более 1000 Вт/м·К и относительную диэлектрическую проницаемость – 5,7 ед.

Зарубежное название ПАП (NCA – нано кристаллический алмаз). Сообщений о создании за рубежом аналогичных ГМИС СВЧ на одной алмазной плате из ПАП пока не появились. Конструкция ГМИС СВЧ на одной алмазной плате – однокаскадного усилителя мощности на ПТШ показана на рис. 1.



Рис. 1. ГМИС СВЧ на алмазной плате – усилитель мощности на ПТШ

ГМИС СВЧ – однокаскадный усилитель мощности выполнен на одной диэлектрической алмазной плате из ПАП. На алмазной плате размещены все пассивные элементы схемы (R, L, C), межсоединения, выводы, а также навесной активный компонент (кристалл полевого транзистора T), на обратной стороне платы металлизационное покрытие, а в объеме платы сквозные металлизированные отверстия.

Вся пассивная часть ГМИС СВЧ, содержащая (*R*, *L*, *C*) элементы, межсоединения, выводы изготавливается на монолитной алмазной плате из ПАП по групповой планарной технологии и прецизионной литографии.

Кристалл активного компонента монтируется на алмазную плату ГМИС СВЧ и соединяется с платой посредством проволочных проводников.

Таким образом, новое конструктивно-технологическое решение ГМИС СВЧ на алмазной плате позволило преодолеть недостатки, присущие мозаичным конструкциям ГИС и ГМИС СВЧ и обеспечило:

- возможность размещать на одной стороне алмазной платы мощные активные компоненты и все пассивные (*R*, *L*, *C*) элементы, межсоединения и выводы, на обратной стороне платы металлизационное покрытие, а в объеме платы металлизированные отверстия;
- интеграцию на алмазную плату навесных мощных и маломощных кристаллов диодов, транзисторов и МИС СВЧ различного назначения, в том числе изготовленных из различных материалов (Si, GaAs, InP, GaN, C и др.);
- планарность конструкции необходимую для применения современных методов групповой обработки, планарной технологии и прецизионной литографии, в том числе в условиях массового производства.

Интеграция всех элементов и компонентов схемы на одной алмазной плате позволяет получить высокие СВЧ параметры, повысить надежность, уменьшить массу, габариты и стоимость изготовления ГМИС СВЧ.

Корпусирование ГМИС СВЧ на алмазе

ГМИС СВЧ на алмазной плате не защищены от воздействия пыли и грязи, и их необходимо герметизировать в корпус.

Для корпусирования можно использовать как традиционную конструкцию ГМИС СВЧ, так и новое конструктивное решение, показанное на рис. 2.



a)

б)

Рис. 2. ГМИС СВЧ на алмазной плате: традиционная конструкция (а),

новая конструкция с объемной алмазной крышкой из ПАП (б)

Традиционное конструктивное решение полагает преемственность конструкции ГМИС СВЧ и использование всей инфраструктуры изготовления, включая средства измерения параметров, испытания, тренировки и т.д. Именно традиционное конструктивное решение использовано для ГМИС СВЧ на алмазе.

Новое конструктивное решение ГМИС СВЧ позволяет всю пассивную часть, включая пассивные элементы (*R*, *L*, *C*), межсоединения, выводы и кристалл активного элемента разместить на монолитной алмазной плате из ПАП, а герметизацию осуществить объемной алмазной крышкой из ПАП.

Алмазная плата и объемная алмазная крышка из ПАП позволяют получить самосогласованную в диапазоне температур конструкцию ГМИС СВЧ на алмазе.

Для проволочных полного исключения проводников, присущих традиционным методам сборки, целесообразно использовать в ГМИС СВЧ на алмазе методы беспроволочного монтажа навесных активных компонентов (кристаллов диодов, транзисторов и МИС) на алмазную плату ГМИС СВЧ, а именно методы:

планарно-монтируемых компонентов (SMD – Surface Mount Device);

перевернуто-монтируемых компонентов (FMD – Flip chip Mount Device); по технологии поверхностного монтажа (SMT – Surface Mounted Technology) полностью исключающие проволочные соединения [200-203].

Примеры беспроволочного монтажа транзистора на поверхность алмазной платы ГМИС СВЧ показаны на рис. 3.



a)

Рис. 3. Конструкция ГМИС СВЧ с кристаллами поверхностного монтажа:

SMD транзистор на плате ГМИС СВЧ (a),

FMD транзистор на плате ГМИС СВЧ (б)

(патенты РФ №244224, № 2258330, № 2194337)

Беспроволочный монтаж позволяет полностью исключить проволочные соединения и сделать конструкцию ГМИС СВЧ на алмазе максимально приближенной к МИС СВЧ.

Массогабаритные характеристики ГМИС СВЧ на алмазе становятся соизмеримыми с МИС СВЧ, а для измерения параметров ГМИС СВЧ используется оборудование, предназначенное для МИС СВЧ.

7.2. ГМИС СВЧ-SMD для поверхностного монтажа

Для поверхностного монтажа ГМИС СВЧ на алмазе предложена конструкция ГМИС СВЧ-SMD, которая родилась в результате анализа конструкций, материалов, блок-схем, электрических схем и тестовых плат, зарубежных и отечественных МИС СВЧ в корпусе SMD [204-213].

Анализ корпусированных МИС СВЧ показал, что основная масса зарубежных и отечественных МИС СВЧ выполнена в корпусе SMD для поверхностного монтажа на печатную плату. Корпус SMD изготавливается преимущественно из керамики LTCC [214], имеющей малую теплопроводность порядка 20 Вт/м·К° позволяющей герметизировать только МИС СВЧ с малой рассеиваемой мощностью.

Для тестирования зарубежных и отечественных МИС СВЧ в корпусе SMD используется преимущественно тестовая плата на основе экранированной копланарной линии – КЛЭ. Тестирование с помощью тестовой платы предполагает только выборочный контроль МИС СВЧ.

Предложена конструкция ГМИС СВЧ-SMD для поверхностного монтажа с повышенной выходной мощностью показанная на рис. 4 [215].



Рис. 4. Конструкция ГМИС СВЧ-SMD с алмазным основанием и объемной алмазной крышки из ПАП

ГМИС СВЧ-SMD состоит из диэлектрического алмазного основания и объемной алмазной крышки из ПАП. На внутренней и внешней стороне основания расположены контактные площадки и выводы.

Герметизация ГМИС СВЧ-SMD осуществляется посредством крышки объемной формы из ПАП соединенной с алмазным основанием клеем МС-Н.

Внешние и соответствующие им внутренние металлизированные контактные площадки и выводы соединены между собой электрически кратчайшим путем посредством металлизированных отверстий, имеющих высокую электропроводность. При этом:

- внешние и соответствующие им внутренние «земляные»
 металлизированные контактные площадки расположены в центральной
 части основания и электрически соединенные между собой;
- внешние и соответствующие им внутренние металлизированные выводы расположены по периферии на внешней и внутренней стороне основания между центральными контактными площадками и периметром;
- внешние и соответствующие им внутренние металлизированные выводы
 выполнены в виде отрезков копланарной линии КЛ;
- «заземляющие» выводы КЛ на внешней и внутренней стороне основания электрически соединены с соответствующими внешними и внутренними «земляными» металлизированными контактными площадками.

На внутреннюю центральную металлизированную контактную площадку устанавливается кристалл МИС СВЧ, имеющий планарные выводы, расположенные по периферии кристалла. Соединение выводов кристалла с выводами корпуса осуществляется золотой проволокой.

Конструкция ГМИС СВЧ-SMD является самосогласованной в диапазоне температур т. к. алмазное основание и объемная алмазная крышка изготавливаются из одинакового материала.

7.3. Исследование потерь в МПЛ и КЛЭ линиях на алмазе

В конструкции ГМИС СВЧ на алмазе все пассивные элементы схемы ГМИС размещены на одной алмазной плате изготовленной из ПАП толщиной порядка 100 мкм. Априорная информация о параметрах ПАП оказалась недостаточна, поэтому потребовались дополнительные исследования и измерение потерь в микрополосковых линиях – МПЛ и экранированных копланарных линиях – КЛЭ с заземляющей металлизацией обратной стороны подложки. Теоретические расчеты потерь в линиях проводились с помощью программы ADS. Потери в МПЛ и КЛЭ на алмазных платах толщиной порядка 100 мкм сравнивались с аналогичными потерями в МПЛ на плате из арсенида галлия толщиной 100 мкм. Структура подложек, на которых проводились расчеты, показана на рис. 5.



Рис. 5. Алмазная плата из ПАП толщиной 100 мкм (*a*), плата арсенида галлия толщиной 100 мкм (б) Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Материал подложки	Относительная диэлектрическая проницаемость	Тангенс диэлектрических потерь	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Лейкосапфир	9,6	0,0002	40
Арсенид галлия	12,9	0,006	46
GaAs			
Карбид кремния	9,66	0,003	490
4H-SiC			
Алмаз С	5,7	0,006	1000
Материал слоя металлизации	Толщина, мкм	Проводимость, См/м	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Золото (in)	3	29 000 000	320
Золото (vh)	3	29 000 000	320
Медь			406

Теоретически рассчитанные значения потерь в линиях с волновым сопротивлением 50 Ом изготовленных на платах толщиной 100 мкм и длиной 1 мм, в МПЛ на арсениде галлия, и в МПЛ и КЛ на алмазе представлены в виде графиков, приведенных на рис. 6.



Рис. 6. Теоретические потери в линиях (50 Ом) длиной 1 мм, на платах толщиной 100 мкм: МПЛ на алмазе С и арсениде галлия GaAs (*a*);

КЛЭ на алмазе С и МПЛ на арсениде галлия GaAs (б)

В диапазоне частот до 40 ГГц, теоретически рассчитанные потери в линиях МПЛ и КЛЭ на алмазе меньше, чем потери в МПЛ на GaAs. Это связано с меньшей диэлектрической проницаемостью алмаза и соответственно большей шириной линии. Для измерения потерь изготовлены отрезки МПЛ, КЛЭ линий длиной 1, 2 и 3,6 мм на алмазных платах из ПАП размером 3,8×2,8×0,1мм. При этом линии и контактные площадки располагались на лицевой стороне платы, на обратной стороне платы заземляющая металлизация, а в объеме платы металлизированные отверстия.

Внешний вид изготовленных отрезков МПЛ и КЛЭ на алмазной плате из ПАП показан на рис. 7.



Рис. 7. Отрезки МПЛ линий длиной 1 мм и 2 мм соответственно *(а)*, отрезок МПЛ линии длиной 3,8 мм *(б)*, отрезок КЛЭ линии длиной 3,8 мм *(в)*

Результаты измерения удельных потерь в сравнении с расчетными потерями в МПЛ на плате из арсенида галлия толщиной 100 мкм (на 1 мм длины линии) показаны на рис. 8.



Рис. 8. Измеренные потери: потери в МПЛ на алмазе и GaAs (*a*), потери в КЛЭ на алмазе и МПЛ на GaAs (*б*)

Потери в линиях измерялись с помощью векторного анализатора цепей №5244А (фирмы Keysight), оснащенного зондовой станцией с копланарными зондами (фирмы Cascade Microtech).

Потери оценивались по параметру S₂₁ и сравнивались с расчетными потерями в МПЛ на плате арсенида галлия.

Исследование показало, что в диапазоне до 40 ГГц измеренные потери в МПЛ и КЛЭ на алмазных платах из ПАП сравнимы с расчетными потерями в МПЛ на плате арсенида галлия.

Таким образом, теоретические рассчитанные и измеренные потери в МПЛ и КЛЭ линиях на алмазе сравнимы с потери в МПЛ линиях на арсениде галлия.

ГМИС СВЧ на алмазе позволяют использовать оба типа линий МПЛ и КЛЭ.

Теоретически рассчитанные значения КСВН и потерь в КЛЭ и МПЛ на алмазе при длине линии 1 мм и различной толщине алмазной подложки из ПАП показаны на рис. 9.



б)

Рис. 9. При изменении толщины алмазной подложки из ПАП: КСВН и потери в КЛЭ (*a*) и МПЛ (б)

Согласованный режим соответствует МПЛ и КЛЭ линиям с толщиной алмазной подложки 100 мкм.

При изменении толщины алмазной подложки от 100 до 150 мкм увеличиваются КСВН и потери в обоих типах линий, однако увеличение КСВН и потерь значительно меньше для копланарной линии – КЛЭ.

Таким образом, в ГМИС СВЧ на алмазе можно использовать оба типа линий МПЛ и КЛЭ, однако при использовании некалиброванных алмазных подложек из ПАП толщиной от 100 до 150 мкм копланарная линия – КЛЭ оказывается более предпочтительной по сравнению с МПЛ линией.

201

7.4. Пассивные элементы ГМИС СВЧ на алмазе

ГМИС СВЧ на алмазе предназначены в первую очередь для создания предварительных и выходных усилителей мощности (ПУМ, ВУМ), которые работают при повышенных напряжениях питания и токах.

Основными пассивными элементами ГМИС СВЧ на алмаз являются резистивные, индуктивные и емкостные (*R*, *L*, *C*) элементы, МПЛ и КЛЭ линии, выводы. Выбирая их конструкции, использован опыт создания ГИС и ГМИС СВЧ с учетом, которого и выбраны конструкции пассивных элементов ГМИС СВЧ на алмазе.

Резистивные элементы изготавливаются из тантала с удельным поверхностным сопротивлением 50…100 Ом/□. При этом тантал обязательно защищается слоем диэлектрика, препятствующим его взаимодействие с кислородом воздуха.

Индуктивные элементы межсоединения и выводы изготавливаются из меди обеспечивающей повышенную на порядок, по сравнению с алюминием, удельную плотность тока и более устойчивой к электромиграции.

Емкостные элементы МДМ-конденсаторы (разделительные, блокировочные и согласующие) имеют конструкцию плоского двухобкладочного конденсатора с одним диэлектрическим слоем.

Емкость МДМ-конденсатора прямо пропорциональна площади одной обкладки конденсатора и относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика, и обратно пропорциональна расстоянию между обкладками конденсатора. Пробивное напряжение между обкладками конденсатора определяется электрической прочностью диэлектрика, при этом, чем меньше расстояние между обкладками, тем меньше пробивное напряжение конденсатора. При создании конденсаторов возникают противоречия:

 с одной стороны разделительные и блокировочные конденсаторы требуют большую удельную емкость, чтобы обеспечить малую занимаемую площадь ГМИС СВЧ;

- с другой стороны согласующие конденсаторы требуют малую удельную емкость, чтобы обеспечить геометрическую реализуемость обкладок конденсаторов и точную настройку схемы на заданную частоту;
- с третьей стороны ГМИС СВЧ на алмазе предназначены для работы при повышенных напряжениях питания и требуют конденсаторов с повышенным пробивным напряжением, что требует увеличения толщины диэлектрического слоя и неминуемо приводит к уменьшению емкости конденсатора.

Для преодоления этих противоречий в зарубежных конструкциях МИС СВЧ миллиметрового диапазона длин волн используются многослойные *3D* конструкции конденсаторов [216-219].

Исследована возможность создания многослойного 3D конденсатора на многослойных диэлектриках, содержащих несколько слоев диэлектрика Si_3N_4 и один слой SiO_2 , и создан четырехобкладочный конденсатор, конструкция которого приведена на рис. 10.





Рис. 10. Конструкция четырехобкладочного конденсатора: проект *а*) и практический конденсатор *б*)

В многослойной *3D* конструкции МДМ-конденсатора для увеличения емкости двухобкладочные МДМ-конденсаторы соединяются параллельно, при этом емкость четырехобкладочного МДМ-конденсатора в 3 раза больше по сравнению с двухобкладочным МДМ-конденсатором.

В многослойной *3D* конструкции МДМ-конденсатора для уменьшения емкости двухобкладочные МДМ-конденсаторы соединяются

последовательно и соответственно емкость четырехобкладочного МДМконденсатора в 3 раза меньше по сравнению с емкостью двухобкладочного МДМ-конденсатора.

7.5. Технология изготовления ГМИС на алмазе

Стержневыми задачами при поиске нового технологического решения для ГМИС СВЧ оказались: выбор материала диэлектрической подложки с высокой теплопроводностью; разработка технологического процесса изготовления металлизированных отверстий в подложке.

Обоснование выбора подложки для ГМИС СВЧ

Параметры известных подложечных материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Материал	Ширина запре-	Напря- жение	Подвижность, см ² /(В·с)		Тепло- прово-	Посто- янная	ТКЛР,	Цена,
Watephan	зоны, эВ	МВ/см	элект- ронов	дырок	дность, Вт/(м·К)	решётки, нм	×10 ⁻⁶ K ⁻¹	руб/см ²
RO4350B					0,62		11	
LTCC					20		7	
SiO ₂		1			0,1		4	
Si ₃ N ₄		1			30		5	
Ge	0,66	0,2	3900	1900	28	0,357	5,9	
Si	1,12	0,4	1500	540	150	0,357	5	150
GaAs	1,42	0,4	8500	400	46	<i>a</i> = 0,565	6,4	300
Сапфир					40		5	300
GaN	3,0	3	1250	850	130	a = 0,319 b = 0,519	5,9	
Карбид кремния (4H-SiC)	3,26	3	800	70	490	a = 0,3 c = 1	4,0	5000
Алмаз (CVD)	5,45	10	2200	1600	2000	0,357	1,1	2000
Графен					5000	0,246		
Медь					406		16,6	
Молибден					150,0		5,3	
МД-50					271		10,9	

Анализ известных подложечных материалов показывает, что ни один из них не может одновременно удовлетворить всем требованиям, которые

предъявляются к диэлектрическим платам для ГМИС СВЧ. При этом только три материала (карбид кремния, графен и алмаз) имеют теплопроводность необходимую для создания ГМИС СВЧ повышенной выходной мощности.

Подложки из карбида кремния

Карбид кремния – SiC со своими уникальными характеристиками используется в качестве подложки для создания высокочастотных, высокомощных и высокотемпературных электронных приборов – полевых СВЧ транзисторов на гетероструктурах AlGaN/GaN/SiC (GaN ПТШ). Подложки из SiC в настоящее время очень дорогие и производятся фирмой Cree, США [220].

Стее – мировой лидер в области разработки и производства технологий и материалов на основе SiC, и поставляет на мировой рынок пластины монокристаллического SiC, а также эпитаксиальные и гетероэпитаксиальные структуры нитрида галлия на подложках SiC диаметром 2, 3 и 4 дюйма.

В настоящее время начали разработки пластин монокристаллического SiC страны Японии, Китая и европейские фирмы.

В условиях санкций против России высокая стоимость монокристаллических подложек SiC и гетероструктур GaN на SiC, трудности их приобретения в необходимых для разработки и тем более для производства количествах сдерживает работы отечественных разработчиков.

В России ведутся разработки подложек монокристаллического SiC и эпитаксиальных и гетероэпитаксиальных структур нитрида галлия на подложках SiC.

Подложки из графена

Графен – Gr двумерная аллотропная модификация углерода, образованная слоем атомов углерода толщиной в один атом. Благодаря очень высокой электропроводности и прочности графен обещает стать ключевым материалом в полупроводниковой промышленности [221, 222]. Подвижность электронов в графеновых структурах в 100 раз превышает подвижность в кремнии. Не смотря на большое количество публикаций, в настоящее время материал графен находится на стадии исследований и в России не выпускается.

Подложки из алмаза

Алмаз – С «несокрушимый» самый твёрдый минерал и при нормальных условиях метастабилен и может существовать неограниченно долго. Алмаз имеет теплопроводность при комнатной температуре выше любого другого объемного материала, (кроме графена). Температура плавления алмаза 3700÷4000 °C при давлении 11 ГПа. На воздухе алмаз сгорает при температуре 850-1000 °C, а в струе чистого кислорода горит слабо-голубым пламенем при 720-800 °C, полностью превращаясь, в конечном счёте, в углекислый газ. В вакууме или в инертном газе при повышенных температурах постепенно переходит в графит, а при нагреве до 2000 °C без доступа воздуха алмаз спонтанно за 15-30 минут переходит в графит и взрывообразно разрушается на мелкие части.

Алмаз является единственным диэлектрическим подложечным материалом с высокой теплопроводностью, который в настоящее время разрабатывается И изготавливается В России. В настоящее время изготавливают подложки из естественного алмаза и искусственного монокристаллического алмаза [223,224]. Однако подложки монокристаллического алмаза имеют малые размеры не более 3×3 мм и не пригодны для группового изготовления плат ГМИС СВЧ.

Основой современной алмазной электроники стал искусственный поликристаллический алмаз, а именно поликристаллическая алмазная пленка (ПАП), получаемая из газовой фазы водорода и метана методом CVD в CBЧ плазме [225-227].

В настоящее время методом CVD получают чистые поликристаллические алмазные пленки – ПАП толщиной 1...3000 мкм на жертвенной пластине кремния – Si диаметром до 100 мм.

Алмазная электроника на основе ПАП уже используется для создания: прочных покрытий на режущих инструментах, шестерен сверхточных

механизмов, алмазных теплоотводов, конструкционных компонентов и алмазных подложек.

Технология CVD алмаза стала самой популярной благодаря максимально высокой чистоте синтезируемой пленки, гибкости в выборе режимов роста, скорости роста, малым затратам времени на обслуживание установки, при этом получаются пластины поликристаллического алмаза высокого качества [228].

В настоящее время многие зарубежные фирмы и отечественные организации выращивают ПАП, а в России этим занимаются организации: ИОФ РАН, ООО «ТВИНН» (г. Москва) и др.

Сравнительный внешний вид ПАП зарубежного и отечественного производства показан на рис. 11.



Рис. 11. Поликристаллические алмазные пленки – ПАП: зарубежные *(а)*, отечественные – ООО «ТВИНН» *(б)*

ПАП изготавливаются в виде квадратов и круглых пластин диаметром 2...4 дюйма.

Сравнительные параметры поликристаллических пластин алмаза и пластин монокристаллического сапфира приведены в табл. 3.

Таблица З	3
-----------	---

Параметр	Алмаз	Сапфир
Тип кристаллической структуры	Кубическая	Гексагональная
Диэлектрическая проницаемость, ед	5,7±0,2	9,4 - 11,6
Ширина запрещённой зоны, эВ	5,45	9,5
Тангенс угла диэлектрических потерь, ×10 ⁻⁶	10 - 100	200
Удельное сопротивление, Ом см	$10^{13} - 10^{16}$	10 ¹⁶
Теплопроводность, Вт/(м·К)	2200	40
Температурный коэффициент линейного расширения × 10 ⁻⁶ К ⁻¹	1,0	5,8
Плотность, г/см ³	3,45	3,98
Прочность на растяжение, МПа	400 - 800	420
Радиационная стойкость, нейтрон/см ²	10 ¹⁴	$7 \cdot 10^{15}$
Подвижность электрона/дырки, В/м·К	2200 / 1600	_
Критическое поле пробоя, В/см	107	$4 \cdot 10^5$
Биологическая совместимость	Совместим	Совместим

Алмаз имеет высокую теплопроводность, меньшую относительную диэлектрическую проницаемость и высокое критическое поле пробоя по сравнению с сапфиром и карбидом кремния. Поэтому базовым материалом для изготовления ГМИС СВЧ выбраны отечественные диэлектрические подложки из ПАП выращиваемые методом CVD.

7.5.1. Исследование параметров алмазных подложек из ПАП

В настоящее время предприятие АО «НПП «Исток» им. Шокина» является активным участником выполнения программы импортозамещения и ведет разработки по созданию малошумящих и мощных МИС СВЧ диапазона до 40 ГГц.

В обеспечение работ АО «НПП «Исток им. Шокина» в 2016 г с организациями ИОФ РАН, ООО «ТВИНН» заключены договоры на выполнение опытно-конструкторских работ по разработке диэлектрических поликристаллических алмазных пленок ПАП.

В рамках договора организации выращивают ПАП методом CVD на поверхности полированных подложек жертвенного монокристаллического

кремния в виде гетеропластины ПАП-Si диаметром 50 и 57 мм и поставляют их в АО «НПП «Исток им. Шокина».

Автором были проведены предварительные исследования опытных образцов ПАП, изготавливаемых организациями: ИОФ РАН, ООО «ТВИНН» с помощью измерительной аппаратуры имеющейся в этих организациях и в АО «НПП «Исток им. Шокина».

Исследование чистоты поверхности ПАП

ПАП выращиваются на полированной стороне жертвенной пластины монокристаллического кремния имеющего 14 класс чистоты поверхности (соответствующий шероховатости Ra = 10 нм, Rz = 50 нм). Исследование зародышевой и ростовой поверхности поставляемых ПАП толщиной 100 мкм проводилось с помощью растрового электронного микроскопа Leo 2515.

Результаты исследования показали, что на зародышевой стороне явно видны центры нуклеации, которые образуются после процедуры засева поверхности подложки кремния наночастицами алмаза (зародышами). Именно по центрам нуклеации – наночастицам алмаза (зародышам) идет рост алмазной пленки. Видно, что пленка алмаза не сплошная, а имеет явную пятнистость с размерами пятен 200...1000 нм. При этом на поверхности между пятнами видны щели шириной до 200 нм и глубиной порядка 200 нм. Ростовая сторона ПАП имеет ярко выраженную шероховатость за счет хаотично растущих кристаллов. Величина шероховатости определяется толщиной ПАП и чем больше толщина тем больше шероховатость ее обратной стороны.

Исследование шероховатости поверхности ПАП

Шероховатость поверхности ПАП толщиной порядка 100 мкм измерялась с помощью профилометра Dektak 150. Шероховатость зародышевой стороны ПАП без обработки достигает Ra = 20 нм, Rz = 70 нм, что соответствует 12 классу чистоты поверхности. Шероховатость ростовой стороны ПАП без обработки достигает Ra = 2 мкм, Rz = 10 мкм, что соответствует 6 классу чистоты поверхности.

Исследование поверхностного и объемного сопротивлений ПАП

Измерение поверхностного и объемного сопротивлений ПАП проводилось методом последовательного вольтметра (**приложение 4**). Измерения показали, что сопротивление ПАП больше 10⁹ Ом·см.

Исследование теплопроводности ПАП

Измерение коэффициента теплопроводности (Вт/(м·К)) проводилось организацией ИОФ РАН на тестовых образцах ПАП изготовленных АО «НПП «Исток ИМ. Шокина» (приложение **4**). Тестовые образцы изготавливались на кусках ПАП площадью 10×10 мм и толщиной 50...250 мкм. Теплопроводность ПАП оценивалась на образцах различной толщины комнатной температуре с помошью лазерного при флэш-метода (приложение 4). Результаты измерения теплопроводности показали, что практические значения теплопроводности для ПАП толщиной 100...200 мкм составляют 500...1000 Вт/(м·К), точность измерения теплопроводности ПАП с помощью лазерного флэш-метода составляет 30 %.

Согласно зарубежным данным теплопроводность CVD алмаза толщиной 100...200 мкм составляют 1000...1500 Вт/(м·К) [229].

Исследование внешнего вида ПАП

Исследование внешнего вида ПАП-Si проводилось путем внешнего осмотра и фотографирования пластины в естественном свете и с подсветкой. Результаты исследования показывают, что пленки ПАП получаются очень напряженными из-за разного теплового коэффициента линейного расширения – ТКЛР (10⁻⁶/°К), который для алмаза равен 1, а для кремния равен 5 и отслаиваются от подложки кремния. Гетеропластина ПАП-Si имеет трещины и после отделения ПАП от жертвенного кремния рассыпается на куски, имеющие значительный прогиб.

7.5.2. Создание гетеропластин ПАП-Si и отделение ПАП

На основе проведенных предварительных измерений параметров были сформулированы и согласованы требования технического задания на разработку и поставку ПАП-Si с организациями: ИОФ РАН, ООО «ТВИНН». В соответствии с техническим заданием гетеропластины ПАП-Si изготавливаются в двух вариантах конструктивного исполнения:

- в виде ПАП на подложке кремния диаметром 57 мм толщиной 3 мм;
- в виде ПАП на подложке монокристаллического кремния с ориентацией (111), поверхностным сопротивлением более 10 000 ом, диаметром 50 мм, толщиной 0,35 мм.

Параметры разрабатываемых ПАП приведены в табл. 4.

		Таблица 4	
Параметр, елицина измерения	Норма		
	не менее	не более	
Толщина ПАП, мкм	1	250	
Шероховатость зародышевой стороны ПАП, нм		100	
Шероховатость ростовой стороны ПАП, мкм		15	
Неравномерность толщины ПАП, %		±15	
Прогиб ПАП-Si, мкм (на Si толщиной 3 мм)		10	
Прогиб ПАП-Si, мкм (на Si толщиной 0,35 мм)		30	
Количество трещин на ПАП, шт.		0	
Поверхностное сопротивление ПАП-Si, Ом см	10 ⁸		
Объемное сопротивление ПАП-Si, Ом см	10^{8}		
Теплопроводность ПАП, Вт/(м·К)	1000		

Из ΠΑΠ таблицы видно, что имеют удовлетворительную шероховатость поверхности, существенный прогиб, большой разброс по толщине ПАП, не высокое поверхностное и объемное сопротивления. При этом ПАП имеют высокую теплопроводность, твердость и прочность, что изготавливать из ΠΑΠ алмазную плату ГМИС СВЧ позволяет И устанавливать на нее кристаллы мощных активных компонентов.

В июне 2018 г организации: ИОФ РАН, ООО «ТВИНН» завершили ОКР по разработке гетеропластин ПАП-Si и выпустили на них технические условия [230, 231].

Процесс разделения ПАП-Si

Организации: ИОФ РАН, ООО «ТВИНН» выращивают ПАП с CVD-процесса помощью поверхности жертвенной на пластины гетеропластины монокристаллического кремния В виде _ $\Pi A \Pi$ -Si. Исследование показало, что в технологическом процессе ПАП растет как на поверхности, так и по периметру жертвенной подложки кремния, образуя жесткое кольцо. Температура роста ПАП составляет порядка 800...900°С, потому после остывания из-за разного ТКЛР, который для алмаза равен 1, а для кремния равен 5 ПАП остается очень напряженной.

Если жертвенный кремний химически стравить то ПАП ломается на несколько бесформенных кусков, имеющих малую площадь и большой прогиб. Для предотвращения разрушения ПАП, бережного разделения гетеропластины ПАП-Si и отделения целой пластины ПАП необходимо было разорвать связь между ПАП и кольцом. Наиболее простым способом решения этой задачи был метод лазерного фрезерования.

Предложен технологический процесс бережного разделения гетеропластины ПАП-Si и отделения целой пластины ПАП.

Технологический процесс отделения от гетеропластины ПАП-Si целой пластины ПАП показан на рис. 12.



Рис. 12. Гетеропластина ПАП-Si и технологический процесс отделения ПАП от жертвенного кремния

Технологический процесс разделения включает три операции:

- 1) помощью лазерного фрезерования с ростовой стороны ПАП-Si делается паз глубиной 500 мкм на расстоянии 1 мм от края пластины;
- проводится шлифовка ростовой стороны ПАП, которая осуществляется с помощью процесса химико-механической шлифовки [232, 233] и проводится в водородной печи при температуре 1000 °C, при этом ПАП шлифуется и утоняется до толщины 100 ... 150 мкм;

3) проводится химическое травление кремния и отделение целой ПАП.

За счет паза диаметр отделенной пластины ПАП с 50 мм и 57 мм уменьшается до 48 мм и 55 мм соответственно.

Этапы практического отделения целой пластины ПАП от ПАП-Si показаны на рис. 13.



a)

Рис. 13. ПАП-Si паз глубиной 500 мкм с ростовой стороны пластины (a),

ПАП-Si с ростовой стороны после шлифовки и утонения (б),

ПАП с ростовой стороны после отделения (в)

Предложенный процесс отделения целой пластины ПАП позволяет отделять ПАП правильной геометрии с малым прогибом, пригодные для группового изготовления ГМИС СВЧ.

Если отделить ПАП без шлифовки она имеет правильную геометрию, но большой прогиб и поэтому после шлифовки получаются пластины, имеющие неправильную геометрию, уменьшенную площадь и большую неравномерность толщины ПАП. Процесс термохимической шлифовки необходим для успешного проведения последующих процессов литографии. После термохимической шлифовки и отделения от жертвенного кремния шероховатость ростовой стороны ПАП составляет порядка 3 мкм, а неравномерность толщины ПАП порядка 30 %.

Примеры зародышевой стороны отделенных ПАП показаны на рис. 14.



Рис. 14 Зародышевая сторона отделенных пленок ПАП (1 pix = 1 мкм)

Шероховатость зародышевой стороны отделенных пластин ПАП должна определяется качеством полировки поверхности жертвенного кремния обычно 14 класс (шероховатость 10 нм). Однако реально шероховатость зародышевой стороны ПАП после отделения от жертвенного кремния имеет большой разброс и не повторяется от пластины к пластине.

Выход годных отделенных ПАП с шероховатость зародышевой стороны соответствующей ТУ составляет порядка 10 %.

Завершившиеся работы организаций ИОФ РАН и ООО «ТВИНН» показали, что для повышения выхода годных необходима разработка процесса прецизионной шлифовки и полировки ПАП.

7.5.3. Выбор метода формирования отверстий в ПАП

В базовой технологии изготовления пассивной части ГМИС СВЧ не решен вопрос формирования отверстий в подложке. Известно несколько методов изготовления отверстий в подложке: метод лазерного фрезерования, темплат метод, метод плазмохимического травления.

Метод лазерного фрезерования применяется для изготовления отверстий в диэлектрических и металлических пластинах. Лазеры видимого света на парах меди имеют великолепные характеристики и обеспечивают апертуру луча лазера порядка 10 мкм. Исследованы отверстия, изготовленные в ПАП с помощью лазера видимого света на парах меди на установке «Каравелла-2», разработанной и изготавливаемой в АО «НПП «Исток им. Шокина».

Для измерения глубины отверстий диаметром 100 мкм и глубиной до 500 мкм промышленных приборов нет, автор предложил устройство, позволяющее измерять глубину отверстий в пластине толщиной до 500 мкм, с точностью ± 1 мкм (приложение 4).

Результаты исследования отверстий с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) представлены на рис. 15.



Рис. 15. Отверстия в пластине ПАП с ростовой стороны *(а)*, отверстия в пластине ПАП с зародышевой стороны *(б)*

Отверстия формировались методом лазерного фрезерования с ростовой стороны пластины. Размеры отверстия с ростовой стороны – 111,9 мкм, а размеры отверстия с зародышевой стороны - 106,7 мкм, при заданном диаметре отверстия 100 мкм и толщине ПАП равной 100 мкм.

Отверстия имеют четкую геометрию и практически вертикальные стенки, имеющие скос стенок отверстий порядка 5 %.

Ростовая сторона ПАП чистая, а на зародышевой стороне вблизи отверстия видны кольца от перегрева пластины лучом лазера. Перегрев пластины в области реза приводит к образованию пленки графита с малым сопротивлением.

Недостатки метода лазерного фрезерования отверстий в ПАП:

- не может обеспечить групповую обработку пластин, так как изготавливает отверстия последовательно одно за другим за несколько (до 10) проходов;
- приводит к появлению проводящей пленки графита по линии реза, удалить которую не удается.

Известны способы прецизионной лазерно-плазмохимической резки пластин алмаза [234, 235], которые не приводят к образованию пленки графита по линии реза, но они требуют дорогих установок.

Темплат-метод (template, модель, шаблон, матрица) используется практически везде, где необходимо быстрое воспроизведение формы для массового производства изделий [236].

Сделана попытка использовать этот метод для изготовления отверстий в ГМИС СВЧ. Для алмазных платах создания темплата (матрицы) использовалась полированная пластина кремния толщиной 3 мм, на поверхности которой формировалась металлическая маска алюминия для травления отверстий в кремнии. Далее пластина кремния с нанесенной металлической маской помещалась установку В плазмохимического травления, где путем глубокого плазмохимического травления в реакторе 08-ПХО-100/10-005 в плазме SF₆ на глубину 100 мкм были установки сформированы отверстия в пластине кремния – темплат (матрице). После
изготовления темплата слой алюминия удалялся с поверхности пластины кремния.

На рельефной поверхности темплата выращивалась поликристаллическая алмазная пленка толщиной 100 мкм, а после стравливания жертвенной пластины кремния на поверхности ПАП с зародышевой стороны появились холмы.

После проведения процесса химико-механической шлифовки холмов на лицевой поверхности ПАП вскрылись отверстия. При этом зародышевая сторона получается шлифованной и требует полировки, а отверстия не имеют четкой геометрии.

Недостатки темплат метода: низкое качество отверстий; необходимость применения химико-механической шлифовки.

Перспективой темплат метода: изготовление компонентов объемной формы с архитектурой 3D.

Метод плазмохимического травления

В ряде работ опубликованных в отечественной и зарубежной литературе этот метод используется для травления поликристаллической алмазной пленки – ПАП. В работе [237] описан способ реактивного ионного травления поликристаллической алмазной плёнки в плазме на основе Ar, O₂, их смесей и SF₆. При этом с маской алюминия достигнута скорость травления 70 нм/мин. Процесс проводился в установке реактивного ионного травления при мощности ВЧ источника 30 Вт, давлении 5-6 Па и газовом составе плазмы Ar, O₂, SF₆ в соотношении 1:1:1. Скорость травления низкая и для травления отверстий в ПАП толщиной 100 мкм требуется 24 часа. Анализ показал, что низкая скорость травления ПАП связана с типом установки, не позволяющей получить высокую интенсивность плазмы.

В настоящее время высокую интенсивность плазмы (10¹¹-10¹² e/cм³) обеспечивают установки реактивного ионного травления с источником индуктивно связанной плазмы (РИТ-ИСП). Именно реактивное ионное травление (РИТ-ИСП) используется в зарубежных и отечественных

установках для быстрого травления диэлектрических пленок на большую глубину. Метод плазмохимического травления обеспечивает групповое изготовление отверстий в алмазной подложке из ПАП и именно он выбран базовым методом.

7.5.4. Плазмохимическое травление отверстий в ПАП

Отсутствие полной априорной информации о скорости травлении поликристаллических алмазных пленок – ПАП на установках РИТ-ИСП потребовали проведения исследований и оптимизации технологических режимов травления ПАП. Процесс реактивного ионного травления зависит от факторов множества технологических И поэтому решить задачу аналитическом виде оказалось затруднительно. Поэтому задача решалась с помощью метода математического планирования эксперимента, отыскания ΠΑΠ экспериментальной зависимости скорости травления ОТ технологических факторов процесса РИТ-ИСП, построение Τ. e. математической модели вида:

$$y = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$$
 (1)

где: у – показатель скорости травления ПАП,

xi – факторы технологического процесса.

Исследование технологического процесса травления ПАП проводилось на зарубежной установке РИТ-ИСП – Corial 200IL, имеющейся в составе пилотной линии АО «НПП «Исток им. Шокина».

Для создания металлической маски на зародышевую поверхность ПАП вакуумным напылением наносились слои титана и алюминия толщиной 0,1 мкм и 4 мкм соответственно, а фотолитографией формировалась металлическая маска алюминия.

Для определения возможностей установки Corial 200IL по травлению отверстий были сделаны предварительные эксперименты и определена скорость травления отверстий в ПАП в плазме с газовым составом Ar, O₂, SF₆. Анализ результатов показал, что скорость травления ПАП зависит от множества факторов. Наибольшая скорость травления ПАП получается при

максимальной мощности генератора, наибольшем процентном соотношении O₂, оптимальном процентном соотношении Ar, SF₆ и рабочем давлении в установке.

Максимальная скорость травления 1,3 мкм/мин достигнута при мощности RF равной 250 Вт. Эта мощность является предельной для установки Corial 200IL.

На основе предварительных экспериментов были выбраны параметр оптимизации и факторы эксперимента и составлен план полного факторного эксперимента для поиска оптимальных параметров технологического процесса травления отверстий в ПАП.

Параметр оптимизации:

у – скорость травления отверстий в ПАП.

Факторы технологического процесса:

 x_1 – скорость потока элегаза – SF₆;

 x_2 – скорость потока кислорода – O_2 ;

 x_3 – скорость потока аргона – Ar;

 x_4 – мощность генератора – RF равна 230 Вт;

*x*₅ – мощность индуктивно связанной плазмы – Рисп равна 1000 Вт;

x₆ – давление в камере – р, выбрано равным 10 мТор.

Задачей исследования являлось определение зависимости скорости травления отверстий в ПАП от факторов технологического процесса. Диапазон изменения факторов x_1 , x_2 , x_3 в планируемом эксперименте был выбран на основе априорной информации о технологическом процессе, практического опыта и возможностей технологической установки Corial 200IL. В связи с отсутствием полной априорной информации о характере исследуемой зависимости скорости травления ПАП автором с целью аппроксимации изучаемой зависимости полиномом первого порядка был составлен план полного факторного эксперимента с учетом парных и тройных взаимодействий. Опыты выполнялись однократно, а опыт в центре эксперимента дублировался три раза. Результаты измерения параметра – скорости травления пленки ПАП (среднее значение из 5 измерений в различных точках ПАП) приведены в табл. 5, 6.

Таблица 5

Фактор	Уровень фактора				
	-1	0	1		
x_1 – скорость потока элегаза SF ₆ , см ³ /мин	0.3	0.4	0.5		
x_2 – скорость потока кислорода O ₂ , см ³ /мин	40	60	80		
x_3 – скорость потока аргона Ar, см ³ /мин	20	35	50		

Таблица 6

№ опыта	Факто экспе	оры римен	іта		Парны	е взаимо	Скорость		
	<i>x</i> ₀	<i>x</i> ₁	x_2	<i>x</i> ₃	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$	травления v, мкм/мин
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0.95
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1.06
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1.09
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1.17
5	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1.09
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0.97
7	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0.82
8	1	1	1	1	1	1	1	1	0.95
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.92

По полученным данным рассчитаны коэффициенты уравнения для параметра оптимизации у – скорость травления ПАП:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3,$$
(2)

С учетом найденных коэффициентов математическое уравнение описывающее зависимость скорости травления ПАП от факторов технологического эксперимента будет иметь вид:

$$y = (1,012 + 0,025x_1 + 0,062x_2 - 0,055x_3 - 0,04x_1x_2 - 0,023x_1x_3 + 0 \cdot x_2x_3 - 0,033x_1x_2x_3),$$
(3)

Анализ уравнения показал, что наибольший вклад в увеличение скорости травления ПАП дает кислород. Вклад элегаза в три раза меньше, а аргон уменьшает скорость травления ПАП и его необходимо уменьшить до минимума. Уравнение скорости травления отверстий в ПАП, при скорости потока элегаза $x_1 = 1$, скорость потока аргона $x_3 = -1$, будет иметь вид.

$$y = 1,1155 + 0,0555x_2,\tag{4}$$

В выбранном диапазоне факторов зависимость скорости травления отверстий в ПАП от содержания кислорода имеет линейный характер и не имеет насыщения. При этом достигнута скорость травления 1,171 мкм/мин с маской титан алюминий. Оптимальные режимы процесса травления ПАП:

- скорость потока элегаза $SF_6 - 0.5$ см³/мин,

- скорость потока кислорода $O_2 80 \text{ см}^3$ /мин,
- скорость потока аргона $Ar 20 \text{ см}^3$ /мин.

Технологический процесс плазмохимического травления отверстий в ПАП был выбран базовым процессом [238].

Разработка отечественной установки РИТ-ИСП

Установка Corial 200IL, имеющаяся в составе пилотной линии АО «НПП «Исток им. Шокина», является единственной, поэтому было принято решение о разработке отечественного аналога.

Технические требования и договор на разработку и поставку отечественного аналога согласованы с организацией НИИТМ, г. Зеленоград.

В декабре 2018 г. организация поставила в АО «НПП «Исток им. Шокина» установку РИТ-ИСП «Плазма-ТМ5» для плазмохимического травления ПАП. Сравнение технических параметров установок Corial 2001L и Плазма ТМ5 показало, что технические параметры установки Плазма ТМ5 не уступают параметрам Corial 2001L.

Для сравнения зарубежной и отечественной установок были проведены технологические процессы на установке «Плазма ТМ5» и получена скорость травления 1,1 мкм/мин.

Исследована возможность изготовления отверстий в ПАП различной формы: круглой, квадратной и треугольной формы, в том числе с помощью растрового электронного микроскопа, показаны на рис. 16.



Рис. 16. Пластина с отверстиями в ПАП (*a*), тестовая пластина (*б*); зародышевая сторона (*в*), ростовая сторона (*г*); отверстие на сколе (*д*)

Травление отверстий проводилось групповым способом с зародышевой стороны ПАП. Круглые отверстия диаметром 100 мкм в ПАП толщиной равной 100 мкм имеют четкую геометрию, а отверстия квадратной и треугольной формы имеют скругленные углы, при этом скос вертикальных стенок отверстий составляет порядка 3 %. Следует отметить, что пластина

ПАП после травления остается чистой как с ростовой стороны, так и с зародышевой стороны.

Для определения возможностей установки Плазма ТМ5 исследовано травление глубоких (более 300 мкм) отверстий в ПАП. Для этого изготовлена ПАП толщиной 340 мкм, на которой сформирована алюминиевая маска толщиной 8 мкм с отверстиями диаметром 100 мкм. Процесс травления отверстий в ПАП проводился с зародышевой стороны последовательно в несколько этапов. На каждом этапе ПАП помещалась в реактор установки Плазма ТМ5 и травилась 30 или 60 минут, после чего ПАП вынималась и измерялась глубина отверстий. Результаты исследования внешнего вида отверстий в пластине ПАП показаны на рис. 17.





Отверстия в пластине ПАП толщиной 340 мкм протравлены насквозь. При этом отверстия в алюминиевой маске имели размер 200 × 100 мкм и строго прямоугольную форму, а в результате травления ПАП размеры отверстий увеличились и углы округлились. Отверстия с зародышевой стороны ПАП имеют размер 238 ×149 мкм, а с ростовой стороны 252 × 164 мкм соответственно. При этом увеличение линейных размеров отверстий в ПАП идет неравномерно:

- с зародышевой стороны по широкой стенке 38 мкм, а по узкой 49 мкм;
- с ростовой стороны по узкой стенке 64 мкм, а по широкой 52 мкм.

Отверстия в ПАП имеют скругленную форму и практически вертикальные стенки, скос стенок отверстий порядка 4 %.

Результаты исследования зависимости глубины и скорости травления отверстий в пластине ПАП показаны на рис. 18.





Исследованные зависимости глубины (Н) травления отверстий в ПАП от времени травления (Т) и скорости (V) травления отверстий в ПАП от глубины (Н) отверстий в ПАП носят нелинейный характер. При этом скорость травления уменьшается с увеличением глубины отверстия. Причиной уменьшения скорости (V) травления отверстий в ПАП является снижение концентрации активных частиц плазмы в отверстии в связи с уменьшением скоростей подачи реагентов и отвода продуктов реакции из отверстий.

Травление отверстий идет в глубину и одновременно травятся стенки отверстий. Скорость травления стенок отверстий составляет 0.06...0.1 мкм/мин, при этом алюминиевая маска травится со скоростью 10 нм/мин.

Глубина травления отверстий в ПАП приближенно аппроксимируется полиномиальной функцией второго порядка.

$$H = (6.446 + 0.77 \times T - 0.0003 \times T^2), \tag{5}$$

Где: *H* – глубина травления отверстий в ПАП (мкм), а *T* – время травления в мин.

Скорость травления отверстий в ПАП приближенно аппроксимируется логарифмической функцией.

$$V = 1,588 - 0.17 \times \ln(H), \tag{6}$$

Где: V – скорость травления отверстий в ПАП (мкм/мин), а H – глубина отверстия мкм.

Для изготовления плат мощных ГМИС СВЧ используются пластины ПАП толщиной 100...150 мкм, поэтому при скорости травления 1 мкм/мин время травления составит порядка 100...150 минут. Плазмохимическое травление отверстий на установке Плазма ТМ5 выбрано базовым технологическим процессом для группового изготовления отверстий в ПАП.

Технологические процессы травления отверстий в алмазной подложке из ПАП адаптированы с технологическими процессами изготовления ГМИС на пилотной линии АО «НПП «Исток им. Шокина».

Процесс травления отверстий в ПАП происходит преимущественно в среде кислорода и продуктом реакции является углекислый газ – CO₂. Это экологически чистый процесс, не наносящий вреда окружающей среде.

7.5.5. Металлизация отверстий в ПАП

Для нанесения металлов в отверстия используются процессы термического вакуумного испарения (резистивное, тигельное, электроннолучевое) и плазменного испарения (катодное и магнетронное) металлических пленок. Для того чтобы отверстие можно было заполнить металлом оно должно иметь дно. Особенностью отверстий в ПАП являются вертикальные стенки. Для напыления металла на вертикальные стенки необходимы планетарные механизмы. Однако при этом на стенки отверстий осаждается вещества в 4 раза меньше, чем на дно и в середине глухого отверстия растет холм, кроме того традиционные установки вакуумного испарения имеют очень малую скорость испарения. Для увеличения скорости испарения вещества используются плазменные установки магнетронного испарения металла, позволяющие осаждать вещество на дно и стенки отверстий со скоростью порядка 7 мкм/час, при расстоянии от испарителя до подложки 90 мм. Для повышения скорости испарения в магнетроне создают разряд через пары меди, что позволяет повысить скорость испарения до 2 мкм/мин [239, 240], однако при этом на подложку летят капли меди.

Предложена конструкция установки вакуумного термического испарения, показанная на рис. 19.



Рис. 19. Конструкция вакуумной установки термического испарения (*a*); соответствующие профиль металла на дне и стенках отверстия (б)

Особенностью установки является тигельный испаритель большой площади. Испарителем является анод, который подогревается электронами, летящими с катода. Напряжение между испарителем и катодом равно 10 кВ.

Диаметр испарителя приблизительно в два раза больше диаметра подложки. Металл осаждается на дно и стенки отверстия подложки. При этом металл осаждается на дно отверстия практически вертикально, а на стенки отверстия пропорционально $\cos(\theta)$.

Автором создана отечественная установка вакуумного напыления слоев хрома и меди из тиглей диаметром 100 мм на алмазные подложки диаметром 50...60 мм. При расстоянии между испарителем и подложкой

равном 150 мм, мощности на испарителе равной 2.5 кВт установка позволяет напылять слой меди со скоростью порядка 5...6 мкм/мин. При этом слой меди имеет гладкую поверхность, не содержит капель и за 5 минут напыляется слой меди толщиной 25...30 мкм. Тонкий подслой хрома напыляется сублимацией хрома.

7.6. Процесс изготовления плат ГМИС СВЧ на ПАП

Технологический процесс изготовления монолитной пассивной части ГМИС на ПАП можно разбить на три основных этапа:

- 1. Формирование отверстий в ПАП с зародышевой стороны;
- 2. Металлизация отверстий;
- 3. Изготовление на зародышевой стороне ПАП всей пассивной части ГМИС.

Технологический процесс изготовления монолитной пассивной части ГМИС на ПАП частично совпадает с базовой технологией изготовления пассивных монолитных сапфировых плат ГМИС СВЧ, а именно: танталовые резисторы пассивированные слоем диэлектрика; алюминиевая металлизация обкладок МДМ-конденсаторов; прямая литография.

Основные отличия изготовления пассивных монолитных алмазных плат мощных ГМИС СВЧ:

- верхний проводящий слой медный, что связано большей плотностью тока
 в проводниках мощных ГМИС СВЧ;
- плазмохимическое изготовление отверстий по групповой планарной технологии и прецизионной литографии.

В настоящее время алмазные подложки имеют малую площадь и ограничивают количество алмазных плат ГМИС СВЧ изготавливаемых по групповой технологии. На одной ПАП диаметром 50 мм по групповой технологии формируется более 180 плат мощных ГМИС СВЧ размером 3,8×2,8 мм.

Упрощенный процесс изготовления плат ГМИС СВЧ на ПАП

Разработан упрощенный технологический процесс изготовления тестовых плат экспериментальных мощных усилительных ГМИС СВЧ на

ПАП для измерения S-параметров, коэффициента усиления, выходной мощности, КПД кристалла мощного СВЧ транзистора.

Технологический процесс, являющийся частью базового технологического процесса изготовления алмазных плат ГМИС СВЧ, показан на рис. 20.

1. Отделенная ПАП после шлифовки толщиной 100 мкм



Рис. 20. Упрощенный технологический процесс изготовления

монолитной алмазной платы ГМИС

Упрощенный технологический процесс изготовления пассивной монолитной алмазной платы ГМИС СВЧ содержит следующие операции.

- 1. Поверхность алмазной подложки из ПАП очищается.
- Последовательно вакуумным напылением в одном технологическом процессе наносятся слои Ті, Аl толщиной 0,1 и 2 мкм соответственно, затем проводится фотолитография и слои Ті, Al протравливаются насквозь, формируя металлическую маску.
- 3. Проводятся процесс плазмохимического травления ПАП и отверстия протравливаются насквозь.
- 4. Слои Ті, Аl удаляются и поверхность очищается.

- 5. На обе стороны ПАП вакуумным напылением последовательно наносятся слои Ті, Си толщиной 0,1 и 5 мкм соответственно, а затем гальванически с обеих сторон осаждается металлизация Ni, Au толщиной 0,5 и 2 мкм соответственно.
- 6. Затем проводится фотолитография, которая формирует маску фоторезиста на зародышевой стороне ПАП, через которую слои Ті, Сu, Ni, Au протравливаются насквозь, и формируется верхняя металлизация. В этом слое изготавливаются индуктивные и емкостные отрезки линий МПЛ и КЛ, спиральные индуктивности, межсоединения и выводы, объединяющие все элементы в единую электрическую схему.

Далее следует операция разделения ПАП на платы ГМИС СВЧ.

Именно этот упрощенный технологический процесс использован для изготовления плат с отрезками линий МПЛ и КЛЭ, платы для измерения СВЧ параметров мощного ПТШ и восстановления его нелинейной модели, а также для создания экспериментальных мощных усилительных ГМИС СВЧ на транзисторах нитрида галлия. Пластины ПАП с платами для ГМИС СВЧ нового поколения и отрезками МПЛ и КЛ линий показаны на рис. 21.



Рис. 21. ПАП с платами для ГМИС СВЧ и отрезками МПЛ и КЛ линий

Процесс изготовления оснований ГМИС СВЧ-SMD

ГМИС СВЧ поверхностного монтажа содержат монолитное алмазное основание и объемную алмазную крышку из ПАП. Поэтому для их изготовления потребовалась разработка двух отдельных технологических процессов. Технологический процесс изготовления алмазного основания из ПАП соответствует технологическому процессу изготовления монолитной алмазной платы ГМИС СВЧ с локальной металлизацией на ростовой стороне. Основания ГМИС СВЧ-SMD, изготовленные по групповой планарной технологии и прецизионной литографии показаны на рис. 22.



Рис. 22. Основания из ПАП (внутренняя сторона) *(а)*, основания (наружная сторона) *(б)*; фрагмент основания (внутренняя сторона) и на сколе *(в)* металлизированные отверстия в ПАП после разделения *(г)*

В ГМИС СВЧ-SMD металлизированные отверстия расположены строго по периферии основания, никаких других отверстий в основании нет.

Разделить пластину ПАП на основания лазерным фрезерованием нельзя, т. к. по линии реза образуется проводящий графитовый слой, который замыкает выводы.

Поэтому предложено было разделять пластины ПАП путем плазмохимического скрайбирования на установке плазмохимического травления Плазма ТМ5 и последующего механического разделения пластины ПАП на основания.

7.7. Процесс изготовления объемных алмазных крышек из ПАП

Для изготовления объемных алмазных крышек ГМИС СВЧ использован темплат метод, который позволяет в едином технологическом процессе по групповой технологии изготавливать крышки размерами 5×5 мм, 4×4 мм, 3×3 мм, 2×2 мм. Технологический процесс изготовления объемных алмазных крышек из ПАП для ГМИС СВЧ показан на рис. 23.





Рис. 23. Технологический процесс изготовления

объемных крышек из ПАП для ГМИС СВЧ

Технологический процесс изготовления объемных алмазных крышек из ПАП для ГМИС СВЧ включает следующие технологические операции:

- 1. Жертвенная пластина кремния толщиной Змм, диаметром 57 мм.
- 2. На всю лицевую поверхность жертвенной пластины кремния вакуумным напылением последовательно в одном технологическом процессе наносятся слои Ті, Аl толщиной 0,1 и 2 мкм соответственно, далее проводится фотолитография, слои Ті, Al протравливаются насквозь и формируется металлическая маска.
- 3. Проводится глубокое изотропное плазмохимическое травление отверстий в пластине кремния в реакторе установки «Плазма TM5» в плазме SF₆ на глубину 200 мкм. При этом на поверхности кремния изготавливаются полости соответствующие внешним размерам крышек корпусов SMD.
- 4. Металлическая маска, состоящая из слоев Ті, Аl полностью удаляется и остается пластина кремния с полостями.
- 5. На всей поверхности пластины кремния, в полостях и стенках полостей выращивается ПАП толщиной 200...250 мкм.
- 6. После этого жертвенная пластина кремния удаляется путем травления и остается ПАП содержащая массив крышек ГМИС СВЧ.

Далее следует операция разделения ПАП на отдельные крышки ГМИС СВЧ с помощью установки лазерного фрезерования «Каравелла-2».

Внешний вид объемных крышек ГМИС СВЧ с архитектурой 3D, изготовленных с помощью темплат метода размерами 5×5 мм, 4×4 мм, 3×3 мм, 2×2 мм соответственно, показан на рис. 24.



Рис. 24. Объемные крыши из ПАП четырех типоразмеров 5×5, 4×4, 3×3 и 2×2 мм соответственно: наружная сторона (*a*) и внутренняя сторона (*б*)

Аналогично можно изготавливать объемные крышки из ПАП прямоугольной формы и другие конструкционные компоненты с архитектурой 3*D*.

Конструкции ГМИС СВЧ-SMD четырех типоразмеров: 5×5, 4×4, 3×3 и 2×2 мм, содержащие алмазное основание и объемную алмазную крышку показаны на рис. 25.



Рис. 25. ГМИС СВЧ-SMD четырех типоразмеров вид сверху (*a*); размером 5×5×0,6 мм вид снизу б)

В ГМИС СВЧ-SMD поверхностного монтажа металлизированные отверстия расположены строго по периферии основания, никаких других отверстий в основании нет. Герметизация ГМИС СВЧ осуществляется посредством диэлектрической крышки объемной формы из ПАП соединенной с диэлектрическим алмазным основанием клеем МС-Н или ЭЗК-184-11.

7.8. Создание ГМИС СВЧ, в том числе поверхностного монтажа

Для создания ГМИС СВЧ на алмазе – однокаскадного усилителя мощности Х-диапазона частот использован кристалл GaN транзистора TGF2023-1, фирмы TriQiunt США.

Усилитель рассчитывался по измеренным S-параметрам и оптимальным

нагрузкам ПТШ с помощью программы ADS, позволяющей включить процесс проектирования ГМИС СВЧ в единую программу САПР. Программа ADS рассчитывает параметры пассивной части ГМИС с учетом взаимного влияния элементов расположенных на поверхности платы и влияния экрана.

Созданы и исследованы ГМИС СВЧ на алмазе – однокаскадные усилители мощности на одной алмазной плате изготовленной из ПАП.

Для герметизации ГМИС СВЧ может использоваться, как традиционная конструкция, так и новая конструкция ГМИС СВЧ на алмазной плате герметизированная объемной алмазной крышкой. Конструкции алмазной платы из ПАП, ГМИС СВЧ в традиционном корпусе и в новом корпусе с алмазной крышкой показаны на рис. 26.



Рис. 26. Алмазная плата из ПАП (а); ГМИС СВЧ в корпусе (б),

в новом корпусе с алмазной крышкой (в)

Вся пассивная часть ГМИС СВЧ на алмазе размещается на монолитной алмазной плате из ПАП размером 3,8×2,8×0,1 мм.

На зародышевой стороне алмазной платы изготовлены все пассивные элементы схемы. На ростовой стороне алмазной платы заземляющая металлизация, а в объеме платы сквозные металлизированные заземляющие отверстия. Кристалл мощного GaN транзистора TGF2023-1 монтируется на поверхность алмазной платы и соединяется с ее выводами с помощью золотой проволоки диаметром 20 мкм. Измерение параметров ГМИС СВЧ на

алмазе проводилось в оправке с коаксиально-микрополосковыми выводами. Питание на выводы питания ГМИС CDX подавалось через игольчатые зонды. Усилитель настраивался на максимальный КПД. Измеренные параметры двух образцов ГМИС CBЧ на алмазе – однокаскадного усилителя X-диапазона частот на транзисторе TGF2023-1, при входной мощности 0.5 Вт приведены на рис. 27.



Рис. 27. ГМИС СВЧ на алмазе, образцы №1, №2 соответственно: коэффициент усиления и входной КСВН (*a*), выходная мощность и КПД (*б*); коэффициент усиления и входной КСВН (*в*), выходная мощность и КПД (*г*)

Измерения показали, что ГМИС СВЧ на алмазе – усилители мощности Х-диапазона частот имеют параметры сравнимые с параметрами GaN ПТШ.

Создание ГМИС СВЧ-SMD поверенного монтажа

ГМИС измерения параметров CB4-SMD были Для изготовлены основания и объемные крышки из ПАП с габаритными размерами 5×5, 4×4, 3×3, 2×2 мм. Для измерения КСВН и потерь на внутреннюю поверхность ГМИС CB4-SMD основания монтировалась МПЛ c волновым сопротивлением 50 Ом, изготовленная на плате арсенида галлия толщиной 100 мкм, которая соединялась с выводами основания. Результаты измерения КСВН и потерь показаны на рис. 28.



Рис. 28. ГМИС СВЧ-SMD с линией МПЛ (*a*), КСВН и прямые потери (б) Измерения показали, что ГМИС СВЧ-SMD имеют удовлетворительные параметры в Х-диапазоне частот.

Созданы усилительные ГМИС СВЧ-SMD поверхностного монтажа на МИС СВЧ, конструкция которых показана на рис. 29.





Рис. 29. Конструкция ГМИС СВЧ-SMD: основание с МИС СВЧ *(а)*, крышка *(б)*

ГМИС СВЧ-SMD имеет габаритные размеры 5×5×0.6 мм. Все выводы ГМИС СВЧ-SMD выведены на периферию основания. Основание имеет ключ в виде большой площадки. На основание установлены навесные активные и пассивные компоненты, объединенные в схему золотой проволокой диаметром 20 мкм. Герметизируется ГМИС СВЧ-SMD алмазной крышкой, которая соединяется с основанием с помощью изолирующего клея.

На крышке лазером написан номер ГМИС СВЧ и ключ в виде – А, которой совпадает с ключом на основании.

ГМИС СВЧ-SMD испытаны на герметичность, показатель герметичности 2.3×10^{-3} Па×см³/с, критерий годности не более 6.65×10^{-2} Па×см³/с по ГОСТ 5901-004-2010 п.5.2.11.

МИС СВЧ не является конечным продуктом и требует для включения дополнительных компонентов.

Расчетные параметры МИС СВЧ не совпали с измеренными параметрами ГМИС СВЧ-SMD, поэтому для подстройки КСВН пришлось дополнительно устанавливать на основании подстроечные (*L* и *C*) компоненты.

Измеренные параметры ГМИС СВЧ-SMD (М421426) до настройки и после настройки приведены на рис. 30.



Рис. 30. Измеренные параметры ГМИС СВЧ-SMD до и после настройки После настройки входной КСВН в диапазоне частот стал меньше 2, а усиление увеличилось.

В процессе выполнения ОКР «Одноцветник ИЗ-РК» разработан ряд опытных образцов ГМИС СВЧ-SMD: M421426, M421427, M421430, M421431 параметры, которых приведены в табл. 7.

Т	аблица	7
	иолици	'

N⁰	ГМИС	Δfp,	Ку,	Кш,	Рвых,	OIP3,	Кст	Пита	ние
п.п.	СВЧ-	ГГц	дБ	дБ	дБм	дБ	U	U,	I,
	SMD							В	мА
1.	M421426	33.5	16.5	1.3	18	33	2	+5/-5	120
2.	M421427	0.054	14.5	1.5	17	27	2	+5/-5	120
3.	M421430	0.56	10	3	21	31	2	+5/-5	170
4.	M421431	0.56.2	14.5	2.4	11.4	21.4	2	+5/-5	65

Для измерения параметров МИС СВЧ в корпусе SMD в зарубежной практике используется тестовая печатная плата на основе копланарной линии КЛЭ с разъемами SMA. Метод тестовой платы позволяет проводить только выборочный контроль МИС СВЧ в корпусе SMD. При этом МИС СВЧ в корпусе SMD монтируются на печатную плату только один раз, повторное использование невозможно. Для проведения сплошного неразрушающего контроля параметров ГМИС СВЧ-SMD предложена конструкция контактного устройства, описанная в (приложении 4).

7.9. Температура канала GaAs, GaN ПТШ на алмазной плате

Исследовано влияние алмазной платы из ПАП на температуру канала мощных полевых GaAs, GaN ПТШ. Для этого проведен расчет температуры канала мощных полевых GaAs, GaN ПТШ с алмазной платой и без нее.

Исходные данные для теплового расчета:

- теплопроводность меди 401 Вт/(м·К);
- теплопроводность слоя клея 15...30 Вт/(м·К), толщина 10...20 мкм;
- теплопроводность арсенида галлия (GaAs) 46 Вт/(м·К);
 теплопроводность нитрида галлия (GaN) 130 Вт/(м·К);
 теплопроводность карбида кремния (SiC) 490 Вт/ Вт/(м·К);
 теплопроводность алмазной платы из ПАП (C) 1000 Вт/(м·К).

238

Расчет температуры канала мощных полевых GaAs, GaN транзисторов выполнен для нескольких конструктивных вариантов.

Первый конструктивный вариант – кристалл мощного полевого GaAs транзистора на подложке арсенида галлия или GaN транзистора на подложке карбида кремния приклеен теплопроводящим клеем ЭКС-1 непосредственно к медному основанию. Конструкция и градиент температуры, соответствующие первому варианту приведены на рис. 31.



Рис. 31. Кристалл GaAs, GaN ПТШ размещен непосредственно на медном основании (*a*); градиент температуры GaN ПТШ на подложке SiC (*б*) Верхний слой – медь размерами 300×100×5 мкм имитирует усреднённую область тепловыделения GaAs, GaN ПТШ; следующий слой – кристалл GaAs, SiC размерами 700×500×100 мкм; затем слой клея ЭКС-1 под кристаллом толщиной *h*; нижний слой – медное основание с теплопроводностью 401 Вт/(м·К), размерами 4,7×4,5×0,5 мм.

При расчете температура нижней грани медного основания принята равной 27°С. Клей ЭКС-1 имеет разброс по теплопроводности 15...30 Вт/(м·К), а по толщине 10...20 мкм.

Для мощного GaAs ПТШ при мощности тепловыделения 2,5 Вт температура области тепловыделения составит: при толщине клея 20 мкм, теплопроводности 15 Вт/(м·К) – 144,6 °C; при толщине клея 10 мкм, теплопроводности 30 Вт/(м·К) – 132,6 °C; без клея – 127,7 °C.

Для мощного GaN ПТШ при мощности тепловыделения 10 Вт температура области тепловыделения составит: при толщине клея 20 мкм, теплопроводности 15 Вт/(м·К) – 131,3 °C; при толщине клея 10 мкм, теплопроводности 30 Вт/(м·К) – 101,5 °C; без клея – 90,2 °C.

Второй конструктивный вариант – кристалл GaAs ПТШ или GaN ПТШ на подложке SiC приклеен теплопроводящим клеем к алмазной плате, а плата приклеена к медному основанию, показан на рис. 32.



Рис. 32. Кристалл GaAs или GaN ПТШ приклеен к алмазной плате из

ПАП, а алмазная плата приклеена к медному основанию В этой конструкции: верхний слой размерами 300×100×5 мкм имитирует усреднённую область тепловыделения ПТШ; следующий слой – кристалл GaAs или SiC размерами 700×500×100 мкм; следующий слой – клей ЭКС-1 под кристаллом; затем – алмазная плата размерами 2,7×2,5×0,1 мм; нижний слой – медное основание размерами 4,7×4,5×0,5 мм. При расчете температура нижней грани медного основания принята равной 27 °C. Клей ЭКС-1 имеет разброс по теплопроводности 15...30 Вт/(м·К), а по толщине 10...20 мкм.

Для GaAs ПТШ при мощности тепловыделения 2,5 Вт температура области тепловыделения составит: при толщине клея 20 мкм, теплопроводности 15 Вт/(м·К) – 144,4 °С; при толщине клея 10 мкм, теплопроводности 30 Вт/(м·К) – 131,0 °С.

Для GaN ПТШ при мощности тепловыделения 10 Вт температура области тепловыделения составит: при толщине клея 20 мкм, теплопроводности 15 Вт/(м·К) – 132,0°С; при толщине клея 10 мкм, теплопроводности 30 Вт/(м·К) – 98,1 °С.

Для арсенида галлия при мощности тепловыделения 2,5 Вт расчетный прирост температуры за счет применения алмазного слоя приведен в табл. 8.

Таблица 8

GaAs	T _{max}	$\Delta T_{0 \max}$	Δ/ΔT _{0,} %	Клей							
				<i>h</i> =	20 мкм, <i>k</i> :	= 15	h = 10 мкм, k = 30				
				T _{max}	$\Delta T_{\rm max}$	Δ/ΔT _{0,} %	T _{max}	$\Delta T_{\rm max}$	Δ/ΔT _{0,} %		
C+Cu	_	_	_	144,4	117,4	-0,2	131,0	104,0	-1,5		
Медь	127,7	100,7	0	144,6	117,6	0	132,6	105,6	0		

Примечание. $\Delta = \Delta T_{\text{max}} - \Delta T_{\text{max}}$ (для меди без алмаза).

Для арсенида галлия при мощности тепловыделения 2,5 Вт расчетный прирост температуры за счет применения клеевого слоя приведен в табл. 9.

Таблица 9

GaAs	T _{max}	$\Delta T_{0 \mathrm{max}}$	Δ/ΔT _{0,} %	Клей							
				h=2	20 мкм, <i>k</i>	= 15	h = 10 мкм, $k = 30$				
				T _{max}	$\Delta T_{\rm max}$	$\Delta/\Delta T_{0,}$	T _{max}	$\Delta T_{\rm max}$	$\Delta/\Delta T_{0,}$		
						%			%		
C+Cu	_	_	_	144,4	117,4	16,7	131,0	104,0	3,3		
Медь	127,7	100,7	0	144,6	117,6	16,8	132,6	105,6	4,9		

Примечание. $\Delta = \Delta T_{\text{max}} - \Delta T_{0\text{max}}$.

Для карбида кремния при мощности тепловыделения 10 Вт расчетный прирост температуры за счет алмазного слоя приведен в табл. 10.

Таблица 10

	T _{max}			Клей							
SiC		۸T	$\Delta/\Delta T_0$,	h = 20 мкм, $k = 15$			h = 10 мкм, $k = 30$				
SIC		Δ1 _{0max}	%	T _{max}	$\Delta T_{\rm max}$	Δ/ΔT ₀ , %	T _{max}	$\Delta T_{\rm max}$	$\Delta/\Delta T_0,$ %		
C+Cu	-	_	_	132,0	105,0	0,7	98,2	71,2	-4,4		
Медь	90,3	63,3	0	131,3	104,3	0	101,5	74,5	0		

Примечание. $\Delta = \Delta T_{\text{max}} - \Delta T_{\text{max}}$ (для меди без алмаза).

Для карбида кремния при мощности тепловыделения 10 Вт расчетный прирост температуры за счет применения клеевого слоя приведен в табл. 11.

Таблица 11

				Клей							
SiC	T _{max}	AT	Δ/ΔT _{0,} %	h=20) мкм, <i>k</i>	= 15	h = 10 мкм, $k = 30$				
		Δ1 _{0max}		T _{max}	$\Delta T_{\rm max}$	Δ/ΔT _{0,} %	T _{max}	$\Delta T_{\rm max}$	Δ/ΔT _{0,} %		
C+Cu	_	_	_	132,0	105,0	65,9	98,2	71,2	12,5		
Медь	90,3	63,3	0	131,3	104,3	64,8	101,5	74,5	17,7		

Примечание. $\Delta = \Delta T_{\text{max}} - \Delta T_{0\text{max}}$

Введение алмазной платы из ПАП между кристаллом GaAs ПТШ и медным основанием может привести:

- к незначительному охлаждению (на 0,2 %) при толщине слоя клея 20 мкм и его теплопроводности 15 Вт/(м·К);
- к слабому охлаждению (на 1,5 %) при слое клея 10 мкм и его теплопроводности 30 Вт/(м·К).

Введение алмазной платы из ПАП между кристаллом GaN ПТШ на подложке SiC и медным основанием может привести:

- к незначительному перегреву на (0,7 %) транзистора при толщине слоя клея 20 мкм и его теплопроводности 15 Вт/(м·К);
- к слабому охлаждению (на 4,4 %) при слое клея 10 мкм и его теплопроводности 30 Вт/(м·К).

Таким образом, оба конструктивных варианта на медном основании без алмазной платы и на алмазной плате из ПАП по эффективности отвода тепла от GaAs ПТШ и GaN ПТШ на SiC оказались эквивалентны.

Зависимости температуры перегрева канала ПТШ (с алмазной платой и без нее) от толщины (Н) теплопроводящего клея с теплопроводностью k = 30 Вт/м·К показаны (на рис. 33), при выделяемой мощности: для GaAs ПТШ равной 2,5 Вт/мм и для GaN ПТШ равной 10 Вт/мм.



Рис. 33. Зависимости температуры перегрева канала ПТШ от толщины теплопроводящего клея

Главный результат расчётов показывает, что введение алмазной платы дает слабое охлаждение канала ПТШ, которое ослабляется с ростом толщины клеевого слоя и приводит к повышению температуры канала ПТШ.

Поэтому целесообразно использовать методы беспроволочного монтажа кристаллов транзисторов и МИС на алмазную плату, чтобы с одной стороны отказаться от клеевого соединения и использовать пайку, а с другой исключить проволочные соединения и повысить повторяемость параметров ГМИС СВЧ нового поколения.

Таким образом, в соответствии с предложенной концепцией и классификацией созданы мощные усилительные ГМИС СВЧ на алмазе, в том числе поверхностного монтажа, пассивная часть которых изготавливается на одной монолитной алмазной плате с навесными кристаллами активных компонентов.

Заключение по главе 7

- 1. Впервые зарубежной практике В отечественной И предложено конструктивное решение для ГМИС СВЧ, в том числе поверхностного монтажа на монолитной алмазной плате из ПАП, которые обеспечивают высокий интеграции улучшение массогабаритных уровень И характеристик по сравнению с мощными ГИС СВЧ.
- Теоретически и экспериментально исследованы потери в МПЛ и КЛЭ линиях на алмазной подложке из ПАП и показано, что они сравнимы с потерями в МПЛ линии на подложке арсенида галлия.
- Выбран материал подложки ГМИС СВЧ, а именно поликристаллическая алмазная пленка – ПАП, которая поставляется ее в виде гетеропластины ПАП-Si, разработан технологический процесс отделения ПАП от жертвенного кремния.
- 4. Выбран метод изготовления отверстий в алмазной подложке из ПАП и оптимизированы методом математического планирования эксперимента технологические режимы плазмохимического травления отверстий в ПАП, создана отечественная установка плазмохимического травления.
- 5. Впервые в отечественной практике создан технологический процесс изготовления монолитной алмазной платы ГМИС СВЧ с металлизированными отверстиями и объемной алмазной крышки по групповой планарной технологии и прецизионной литографии.
- Созданы усилительные ГМИС СВЧ на алмазе с выходной мощностью порядка 5 Вт на GaN ПТШ и ряд ГМИС СВЧ-SMD поверхностного монтажа диапазона 0.05...6.2 ГГц.
- 7. Показано, что алмазная платы из ПАП, установленная между кристаллом ПТШ и медным основанием дает слабое охлаждение температуры канала ПТШ при малой толщине клея, а с ростом толщины клея наблюдается снижение эффекта охлаждения и повышение температуры канала ПТШ.

ГЛАВА 8. ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ ГМИС СВЧ

Для обеспечения производства модулей СВЧ предприятие АО «НПП «Исток им. Шокина» в 1980 г начало разработки собственных транзисторов и МИС СВЧ на арсениде галлия.

Для создания МИС СВЧ для ППМ АФАР в период с 2004 по 2009 г на предприятии выполнен ряд комплексных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (научный руководитель и главный конструктор А.М. Темнов) по разработке комплекта МИС СВЧ для ППМ АФАР:

- 1) «Разработка комплекта унифицированных функциональных узлов для многоканальных ППМ АФАР», шифр «Прогресс-2004»;
- «Разработка и испытания серии СВЧ микросхем на гетероструктурах А₃В₅ для ППМ АФАР Х-диапазона», шифр «Донецк»;
- «Исследование и разработка СВЧ-микросхем на гетероструктурах полупроводников А₃В₅ для унифицированных приемно-передающих модулей АФАР Х-диапазона с выходной мощностью до 10...15 Вт», шифр «Локатор 2004».

В 2009 г впервые в России была завершена разработка восьми типов МИС *X*-диапазона частот на основе гетероэпитаксиальных структур на подложках арсенида галлия для комплектования ППМ АФАР [241-255].

МИС СВЧ разработаны в климатическом исполнении УХЛ по ГОСТ 15150–69, удовлетворяют требованиям ГОСТ РВ 20.39.412–97 и ОСТ В 11 0265–86, предназначены для использования в составе герметизированной аппаратуры, обеспечивающей их защиту от воздействия влаги, пыли, соляного тумана, плесневых грибов, инея, росы, агрессивных газов.

Для производства арсенидгаллиевых транзисторов, МИС СВЧ и пассивных плат ГМИС на предприятии АО «НПП «Исток им. Шокина» с участием автора построена пилотная линия, на которой разработанные транзисторы, МИС СВЧ и пассивные платы ГМИС освоены производством.

Создан арсенидгаллиевый технологический базис.

Пилотная линия АО «НПП «Исток» им. Шокина», обеспечивает размерную обработку 100 нм и оснащена новейшим технологическим оборудованием, содержащим элементы СМИФ технологии (контейнер, шлюз, загрузчик).

Автором проведен комплекс технологических работ в обеспечение создания технологической пилотной линии по производству МИС СВЧ на арсениде галлия в АО «НПП «Исток им. Шокина» [256–258].

Пилотная линия АО «НПП «Исток» им. Шокина» стала основой для проведения работ по созданию ПТШ на GaN и алмазе [259, 260].

8.1. Применение ГМИС СВЧ для создания ППМ АФАР

Интерес к активным фазированным антенным решеткам (АФАР), как за рубежом, так и в России не ослабевает с начала восьмидесятых годов прошлого столетия. АФАР состоит из сотен и даже тысяч отдельных приемопередающих модулей (ППМ). Именно АФАР поставили задачу улучшения массогабаритных показателей ППМ, создания легких И ППМ с низкой стоимостью [261]. В настоящее время компактных зарубежные и отечественные конструкции ППМ АФАР имеют архитектуру 2D и используют плату LTCC в качестве объединительной платы, а качестве активных СВЧ компонентов используют кристаллы маломощных и мощных ПТШ и МИС СВЧ. Низкая теплопроводность платы LTCC позволяет устанавливать на плату только маломощные активные компоненты (ПТШ и МИС СВЧ), а для установки мощных активных компонентов требуется изготавливать в плате LTCC сквозные отверстия. В качестве мощных активных компонентов используются ГМИС СВЧ мозаичной конструкции на кристаллах МИС СВЧ. Недостатками ППМ АФАР с архитектурой 2D являются: большая занимаемая площадь; необходимость отверстий в плате LTCC компонентов; большое для установки мощных количество проволочных соединений; повышенные массогабаритные характеристики не позволяющие устанавливать ППМ плашмя непосредственно на плоскость водоохлаждаемого полотна фазированной антенной решетки.

Мировая тенденция развития ППМ АФАР – это движение от конструкции тяжелых и громоздких модулей с архитектурой 2D к конструкции легких и компактных модулей с архитектурой 3D.

Зарубежными и отечественными специалистами предлагаются конструкции ППМ АФАР с архитектурой *3D* на основе объединительной платы LTCC [262, 263]. Этим конструкциям свойственны недостатки присущие ППМ АФАР с архитектурой *2D с* объединительной платой LTCC.

На основе анализа конструкций ППМ АФАР архитектурой 2D и 3D на основе объединительной платы LTCC [264, 265], предложена конструкция ППМ АФАР с архитектурой 3D [266] на основе ГМИС СВЧ на алмазной плате. Использование алмазной платы ГМИС СВЧ в качестве объединительной платы, позволит создать ППМ АФАР с архитектурой 3D и улучшить массогабаритные характеристики до 10 раз по сравнению с существующими конструкциями ППМ АФАР архитектурой 2D.

Создан макет СВЧ модуля с архитектурой *3D* СВЧ с вертикальным элементом связи на основе копланарной линии с экраном – КЛЭ.

8.2. Создание МИС СВЧ на алмазе

В настоящее время зарубежные и отечественные специалисты предлагают различные варианты создания МИС СВЧ на кремнии, карбиде кремния и алмазе.

Фирма Raytheon интегрирует высокоэффективные GaN ПТШ и nMOS, *p*MOS полевые транзисторы на общей кремниевой подложке и на их основе МИС гетероинтегрированные СВЧ [267]. Основным изготавливает гетероинтегрированных МИС СВЧ. является недостатком низкая теплопроводность подложки кремния, ограничивающая параметры МИС СВЧ и в первую очередь выходную мощность и КПД.

В 2009 г автором совместно с ИОФ РАН г. Москва создан алмазный ПТШ [268, 269]. Подложками для алмазных ПТШ служили монокристаллические подложки из искусственного монокристаллического синтетического алмаза размером 3×3×1 мм.

Проводящий слой ПТШ создавался гидрогенизацией поверхности алмазной подложки водородом.

На гидрогенизированном слое алмаза формировалась меза-структура и далее изготавливался ПТШ используя нанотехнологический комплекс пилотной линии АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Созданы алмазные ПТШ и измерены их вольт-амперные характеристики и СВЧ параметры в диапазоне частот 1...10 ГГц.

На частоте 5 ГГц коэффициент усиления ПТШ по мощности 5,5 дБ, а удельная выходная мощность 5 Вт/мм.

Малые размеры подложек монокристаллического алмаза (3×3 мм, площадью 9 мм²) не позволили использовать все возможности нанотехнологического комплекса пилотной линии АО «НПП «Исток» им. Шокина» и организовать производство алмазных ПТШ.

Зарубежные и отечественные специалисты предлагают различные варианты создания GaN ПТШ и МИС СВЧ на алмазной подложке из ПАП.

В работе [270] описан практический GaN транзистор на ПАП и показан технологический процесс его изготовления с использованием пластин жертвенного полуизолирующего монокристаллического кремния. Приведены Параметры изготовленных ПТШ: рабочая частота 10 ГГц; выходная мощность 25 дБм; КПД 30 %; пробивное напряжение 30 В; максимальный ток стока 850 мА/мм.

В работах [271, 272] также показаны технологические процессы изготовления GaN транзисторов на ПАП с использованием пластин жертвенного полуизолирующего монокристаллического кремния.

Исследованием возможности создания GaN транзисторов на ПАП занимаются, как в России, так и за рубежом, однако эти работы находятся в стадии исследований.

248

Монолитные интегральные схемы СВЧ на ПАП

Предложена конструкция и способ изготовления интегральной схемы СВЧ на гетеропластине ПАП-Si, содержащей тонкий слой монокристаллического кремния на поверхности ПАП [273-275].

Исследованы потери в гетеропластине ПАП-Si и показано, что потери в гетеропластине выше, чем потери в ПАП и кроме того слой кремния имеет малое сопротивление и дает утечку. Поэтому целесообразно удалять слой кремния с поверхности гетеропластины и располагать пассивные элементы непосредственно на ПАП, а активные элементы (диоды, транзисторы) располагать на локальном слое кремния (мезаструктуре).

Для изготовления локального слоя кремния автор предложил технологический процесс изготовления мезаструктур (кристаллов Si), имплантированных в объем ПАП показанный на рис. 1.



Рис. 1. Технологический процесс изготовления кристаллов Si имплантированных в объем ПАП

Технологический процесс изготовления мезаструктур (кристаллов Si), имплантированных в объем ПАП, позволяет изготовить гетеропластины ПАП-Si с кристаллами Si имплантированными в объем ПАП.

Результаты исследования гетеропластины ПАП-Si с мезаструктурами (кристаллами Si) имплантированными в объем ПАП и макет транзистора на гетеропластине показаны на рис. 2.



Рис. 2. Гетеропластина ПАП-Si с кристаллами монокристаллического кремния, имплантированными в объем ПАП (*a*);

ПТШ на мезаструктуре кремния (δ)

Шлифовка и полировка гетеропластин ПАП-Si проводилась организацией ИОФ РАН [276-278]. Гетеропластины шлифовались и полировались со стороны кремния до зародышевой поверхности алмаза. После полного удаления кремния с поверхности в объеме остались мезаструктуры (кристаллы Si) имплантированные в объем ПАП на толщину мезаструктуры (кристалла Si).

При этом мезаструктуры кремния должны быть имплантированы (углублены) в объем ПАП в строгом соответствии с топологией МИС СВЧ.

На мезаструктурах кремния, имплантированных в объеме ПАП изготовлены первые макетные образцы ПТШ. Изготовление ПТШ является первым этапом изготовления МИС СВЧ на подложке из ПАП.

Для изготовления пассивной части МИС СВЧ возможно использовать технологический процесс изготовления ГМИС СВЧ на ПАП.

Предложенный технологический процесс обеспечивает возможность изготовления на одной гетеропластине ПАП-Si как МИС СВЧ, так и гетероинтегрированных МИС СВЧ (НМИС), которые могут быть однофункциональными и многофункциональными, а также включать в свой состав аналоговые, ключевые и цифровые схемы класса «система на кристалле», в том числе ППМ АФАР.

250

Заключение по главе 8

- Показано, что для производства арсенидгаллиевых ПТШ и МИС СВЧ, и пассивных плат ГМИС СВЧ на предприятии АО «НПП «Исток им. Шокина» построена пилотная линия, на которой разработанные ПТШ, МИС СВЧ и пассивные платы ГМИС СВЧ освоены производством.
- 2. Предложена конструкция ППМ АФАР с архитектурой 3D на основе ГМИС СВЧ на алмазе и показано, что она позволяет улучшить массогабаритные показатели ППМ до 10 раз по сравнению с существующими конструкциями ППМ АФАР с архитектурой 2D.
- Созданы экспериментальные образцы алмазного ПТШ на подложке монокристаллического алмаза и показано, что ПТШ имеет удельную выходную мощность 5 Вт/мм на частоте 5 ГГц.
- 4. Предложена конструкция и способ изготовления интегральных схемы СВЧ на алмазе и технологический процесс изготовления гетеропластин ПАП-Si с мезаструктурами (кристаллами Si) имплантированными (углубленными) в объем ПАП на толщину мезаструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты работы и констатировано решение поставленных задач.

- На практике применена концепция создания ГМИС СВЧ с высокими СВЧ параметрами и надежностью, малыми массогабаритными характеристиками с организацией их промышленного производства, выработаны научные основы, проведен обзор и анализ возможных технических решений интегральных схем СВЧ на ПТШ, оценены границы применимости, дана классификация, выбраны направления исследований, оценена надежность.
- 2. Впервые в отечественной и зарубежной практике найдена оригинальная конструкция ГМИС СВЧ на основе подвешенной КЛ и монолитной сапфировой платы, содержащей все пассивные элементы (*R*, *L*, *C*), линии, выводы, обеспечивающая высокие СВЧ параметры и надежность, и улучшение более 3 раз массогабаритных характеристик, по сравнению с аналогичными ГИС СВЧ.
- 3. Оптимизированы процессы нанесения диэлектрических слоев SiO₂ и Ta₂O₅, и впервые создан технологический процесс изготовления монолитной сапфировой платы ГМИС СВЧ по групповой планарной технологии и прецизионной литографии, обеспечивающий промышленное производство ГМИС СВЧ.
- Создан полнофункциональный ряд промышленных усилительных, преобразовательных и генераторных маломощных ГМИС СВЧ диапазона 0.4...20 ГГц с выходной мощностью до 100 мВт на GaAs ПТШ и МИС СВЧ.
- 5. Создан ряд промышленных усилительных ГМИС СВЧ мозаичной конструкции диапазона 2...18 ГГц с выходной мощностью до 600 мВт на GaAs и МИС СВЧ, а также ГМИС СВЧ с выходной мощностью до 17 Вт на GaN ПТШ.
- 6. Впервые в отечественной и зарубежной практике созданы мощные усилительные ГМИС СВЧ, в том числе поверхностного монтажа, оптимизирован процесс плазмохимического травления отверстий в алмазной плате, создан технологический процесс изготовления монолитной алмазной платы и объемной алмазной крышки по групповой планарной технологии И прецизионной литографии. Созданы усилительные ГМИС СВЧ на алмазе с выходной мощностью 5 Вт и усилительные ГМИС СВЧ поверхностного монтажа. Создано контактное устройство для сплошного неразрушающего контроля параметров ГМИС СВЧ поверхностного монтажа.
- Показана перспектива создания ППМ АФАР с архитектурой 3D на ГМИС СВЧ и перспектива создания МИС СВЧ на алмазе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Стратегическая программа исследований технологической платформы «СВЧ-технологии»: утв. 17 декабря 2012 года на заседании наблюдательного совета технологической платформы «СВЧ-технологии», под председательством А.С. Якунина, директора департамента радиоэлектронной промышленности Министерства промышленности и торговли Российской Федерации, г. Москва. https://www.hse.ru.
- Стратегическая программа исследований технологической платформы «СВЧ-технологии»: утв. 31 июля 2015 года на заседании наблюдательного совета технологической платформы «СВЧ-технологии» под председательством М. И. Критенко, заместителя начальника департамента планирования и промышленной политики Государственной корпорации «Ростех», Москва. https://studylib.ru
- Технологическая платформа «СВЧ-технологии»: координатор ОАО «Российская Электроника» Государственная корпорация «Ростехнологии», Москва, 2013. https://docplayer.ru.
- Вапнэ Г.М. Антенны с электрическим сканированием для многофункциональной РЛС//Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ М: ЦНИИ «Электроника». 1982. вып.5 (874). С.1-5.
- 5. Локшин Б.А. Приемные установки систем спутникового вещания// Зарубежная радиоэлектроника, 1982. №2, С.51-75.
- Активные ФАР путь и увеличение надежности РЛС// Электронная техника Сер. Электроника СВЧ, 1982, вып.4 (340), с.71-72.
- Pengelly R.S. Transmit-receiver module using GaAs ICS//Electronic Engineering, 1982, vol. 56, №695, pp. 141-149.
- Jamasaki H. GaAs FET Technology available approach to millimeter waves//Microwave journal. 1982, June, pp. 93-104.
- Edward T. Watkins GaAs FET Amplifier uses One-Quarter micron gate heralding MIC opportunities at up to 60 GHz // Microwave system news 1983, vol. 13, №13, pp. 52-62.

- Современное состояние разработок твердотельных приемопередающих модулей 3-см диапазона для самолетных РЛС с ФАР//Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1979. вып.12. С.82.
- Данилин В.Н. Монолитные аналоговые интегральные схемы СВЧ диапазона//Обзоры СВЧ интегральных схем за рубежом. Сер. Полупроводниковые приборы. М: ЦНИИ «Электроника» 1982. вып. 791. С. 1.
- Шопина Н.И. Современное состояние разработок GaAs монолитных CBЧ интегральных схем за рубежом// Электронная техника. Сер. Электроника CBЧ. 1984. вып.10. С.70.
- 13. Атабеков Г.И. Основы теории цепей//Энергия. Москва. 1969. С.282.
- 14. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств//Под. Ред. В. И. Вольмана. М. Радио и связь. 1982. С. 30.
- Black, J.R. Electromigration-A Brief Survey and Some Recent Results// IEEE Transactions on Electron Devices. April.1969.16 (4): 338-347.
- 16.DOI:10.1109/T-ED. 1969.16754.
- Black, J.R. Electromigration Failure Modes in Aluminium Metallization for Semiconductor Devices//Proceedings of the IEEE. September 1969. 57 (9): 1587-94. DOI:10.1109/PROC.1969.7340.
- Ho, P.S., Kwok T. Electromigration in metals// Rep. Prog. Phys. 1989. 52: 301-348. DOI:10.1088/0034-4885/52/3/002.
- 19. Sheer, M. S. Analytical model of GaAs MESTET^S// IEEE Transactions of electron devices. 1978. Vol. ED-25. №6. P.606.
- 20. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т.1. М.: Мир, 1984. 333 с.
- Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. Москва, Мир. 1991. 312 с.
- 22. A. Zárate de Landa, J. E. Zúñiga-Juárez, J. R. Loo-Yau, J. A. Reynoso-Hernández, M. C. Maya-Sánchez, and J. L. Valle-Padilla, "Advances in Linear Modeling of Microwave Transistors", IEEE Microwave magazine, pp. 100-111, April 2009.

- 23. Кальфа А.А., Пашковский А.Б., Тагер А.С. Математическое моделирование полевого транзистора с субмикронным затвором в режиме большого сигнала/ // Электронная техника, Сер.1, Электроника СВЧ. 1985, В.10(382). С. 30-34.
- 24. Materka A., Kacpeak T. Computer calculation of large signal GaAs FET amplifier characteristics. // IEEE Trans. 1985. MTT 33. №. 2 P. 129.
- 25. Егудин, А. Б. Малошумящие СВЧ полевые транзисторы с барьером Шотки//Обзоры по электронной технике. Сер. Полупроводниковые приборы. М.: ЦНИИ «Электроника» 1983.вып.1 (927). С.11.
- 26. Егудин, А. Б. Малошумящие СВЧ полевые транзисторы с барьером Шотки//Обзоры по электронной технике. Сер. Полупроводниковые приборы. М.: ЦНИИ «Электроника» 1983.вып.1 (927). С.11.
- 27. Шварц Н.З. Усилители СВЧ на полевых транзисторах//Москва. Радио и связь. 1987. С.18.
- 28. Mogestue, C. Monte Carlo particle model study of the influence of gate metallization and gate geometry on the AS characteristics of GaAs MESFET`S// IEEE procudings. Vol. 131 Pt 1. 1984. №6. p.193.
- Филинюк, Н.А. Определение параметров эквивалентной схемы активной области кристалла полевого транзистора//Известия ВУЗов. Сер. Радиоэлектроника. 1983. Т.26. №7. С.90.
- 30. Красник В.М., Манченко Л.В., Пашковский А.Б., Пчелин B.A. Нелинейная модель гетероструктурных полевых транзисторов С субмикронным затвором на гетероструктурах с селективным легированием//Электронная техника, Сер. 1, СВЧ-техника, 2007, В.4(492), C.25 - 28.
- 31. Angelov, Chalmers. Nonlinear HEMT and MESFET Model Extraction Procedure, Part A// Chalmers University of Technology, Dept. of Microwave Technology, Report no. 25, July, 1996.

- 32. K. Fujii, Y. Hara, F. M. Ghannouchi, T. Yakabe, and H. Yabe. A Nonlinear GaAs FET Model Suitable for Active and Passive MM-Wave Applications// IEICE Trans., vol. E83-A, no. 2, p. 228, Feb., 2000.
- 33. K. Fujii, Y. Hara, T. Yakabe and H. Yabe. Accurate Modeling for Drain Breakdown Current of GaAs MESFETs// IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 47, no. 4, p. 516, April, 1999.
- 34. Ana M. Pelaez-Perez, Simon Woodington, Monica Femandez-Barciela. Application of an NVNA-Based System and Load-Independent X -Parameters in Analytical Circuit Design Assisted by an Experimental Search Algorithm// IEEE transactions on microwave theory and techniques, vol. 61, no. 1, january 2013 p 581 -585
- 35. W. Curtice and R. Caamisa. Self-cosistent GaAsFET models for amplifier design and device diagnostic// IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 32, no. 12, pp. 1573–1578, July 1984.
- 36. G. Dambrine, A. Cappy, F. Heliodore, and E. Playez. A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit// IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 36, no. 7, pp. 1151–1159, July 1988.
- E. Chigaeva and W. Walthes. Determination of small-signal parameters of GaN-based HEMTs// IEEE/Cornell High Performance Devices Conf., 2000, pp. 115–122.
- 38. W. R. Curtice. A MESFET model for use in the design of GaAs integrated circuits// IEEE Trans Microwave Theory Tech , vol. MTT-28, pp. 448-456, May 1980.
- 39. Богданов Ю.М., Балыко А.К., Пашковский А.Б. и др. Полевой транзистор с низкой модуляционной чувствительностью для малошумящих СВЧ генераторов// Электронная техника. Сер.1, СВЧ-техника.-1993.- Вып.3.-С.14
- 40. Бельчиков, С. Коэффициент шума. Теория и практика измерений.// Компоненты и технологии. № 4. 2008. С. 196.

- 41. Алмазов-Долженко К.И. Коэффициент шума и его измерение на СВЧ// Москва. Научный мир. 2000. С. 12.
- 42. ГОСТ 20271.1-91. Изделия электронные СВЧ. Методы измерения электрических параметров.
- 43. ГОСТ Р 53373-2009. Оборудование станций радиоконтроля.
- 44. Технические условия на ПТШ 3П325А-2 («Пенс-6»). aA0.339.355 ТУ.
- 45. Технические условия на ПТШ 3П326А-2 («Пенс-4»). aA0.339.314 ТУ.
- 46. Темнов А.М., Крутов А.В. Практические схемы защиты интегральных устройств СВЧ на полевых транзисторах от скачков питающего напряжения. – Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1984, вып. 12 (372), с.57.
- 47. Степаненко И. П. «Основы микроэлектроники» М.: Сов. радио. 1980.
- 48. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей.- М: Радио и связь, 1982.
- 49. Данилин В.Н., Кушниренко А.И., Петров Г.В. Аналоговые полупроводниковые интегральные схемы СВЧ.- М.: Радио и связь, 1985.
- 50. Carlin I. A new method of broad-band aqualization applied to microwave amplifiers//IEEE Transactions on microwave theory and techniqies. 1979. Vol. MTT-27. №2. p.93.
- Hang S. Cr. Amplifier interstate matching network design//microwave journal.
 1983. №3. p.103.
- 52. Темнов А.М. Исследование и создание гибридно-монолитных усилительных и преобразовательных приборов СВЧ на малошумящих бескорпусных полевых транзисторах в диапазоне от 0,3 до 18 ГГц/ канд. Дисс. № 19279. Фрязино. 1987. 180 с.
- 53. Шварц Н.З. Линейные транзисторные усилители СВЧ// М.: Советское радио. 1980. С.40.
- 54. Estreich D.B. A monolithic wide-band GaAs IC amplifier//IEEE Journal of solid state circuits. 1982. vol. Sc-17. №6. p.1166.

- 55. Vayne Kennan. A miniature 2-18 GHz Monolithic GaAs distributed amplifier// IEEE microwave and millimeter - wave monolithic circuits symposium. 1984. p. 41.
- 56. Niclas K.B. Wilsev W.T. The matched feed-back amplifications with GaAs MESFET^S/IEEE transactions on microwave theory and techniques. 1980. vol. MTT-28. №4. p. 1.
- 57. Niclas K.B. On design and performance of lossy match GaAs MESFET amplifier//IEEE transactions on microwave theory and techniques. 1982. №11. p.1900.
- 58. Sterzer F. Trends in monolithic microwave integrated circuits microwave journal, 1981, vol 24, №11, pp. 18, 24, 26, 28.
- 59. W-J Hybrid MIC technology in production// Microwave journal. 1984. Vol. 27. №3. P.19.
- 60. Пузанова С.Н. Зарубежные малошумящие СВЧ усилители на транзисторах, рекламированные в 1983 //Справочные материалы по электронной технике. 1984.
- 61. S-band power transistors up to 45 watts //MSN. 1984. vol. 14. №2. P. 112.
- 62. Shigekazu H. GaAs monolithic MIC`S for direct broadcast-satellite receivers//IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1983, vol. MTT-31, №12, pp.1089-1095.
- 63. Brehm I.E. Lebman R.E. Monolithic GaAs FET low-noise amplifiers for Xband applications//Microwave journal, 1982, №11, pp.103-107.
- 64.Lebman R.E., Brehm I.E. 10 GHz monolithic GaAs low-noise amplifier with common-gate input//IEEE GaAs IC symposium, 1982, pp.71-74.
- 65.Tadaniko S., Hitoste I. 12 GHz-band low-noise GaAs monolithic amplifiers// IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1983, vol MTT-31, №12, pp.1083-1088.
- 66.Vamasaki H. GaAs FET technology available approach to millimeter waves//Microwave journal, 1982, №6, pp.93-105.

- 67.Watkins E.T. A 60 GHz GaAs amplifier//IEEE MTTS, International microwave symposium digest, may 31-june 3, 1983.
- 68. Honjo K., Sugiura T. Low-noise, low-power dissipation GaAs monolithic broad-band amplifiers//IEEE GaAs IC symposium, 1982, pp.87-90.
- Rigby P.N., Suffolk I.R., Paugelly R.S. Broad-band monolithic low-noise feedback amplifier//IEEE MTTS, International microwave symposium digest, may 31-june 3, 1982.
- 70. Wendall C. A monolithic GaAs DC 2-GHz feedback amplifiers//IEEE transactions on electron devices, 1983, vol. ED-30, №1, pp.27-29.
- 71. Jnial V., Iton H. Ultra-broadband GaAs monolithic direct coupled feedback amplifiers//IEEE electron device letters, 1983, vol. EDL, №9, pp.323-325.
- 72. Donald Estreich B. A monolithic wide-band GaAs IC amplifiers//IEEE Journal of solid-state curcuits, 1982, vol Sc-17, №6, Dec, pp.1166-1173.
- 73. Mahesh Kumar. Monolithic dual-gate GaAs FET amplifier//IEEE transactions of electron devices, 1981, vol ED-28, №2, pp.197-198.
- 74. Esfandiari R., Make D. Two stage semi-lumped and distributed//IEEE GaAs IC symposium, 19882, pp.142-145.
- 75. Tserng H.Q., Mackscy H.U. A four-stage monolithic X-band GaAs FET power amplifier with Internal bias networks//IEEE GaAs IC Symp., 1982.
- Dviver U.C., Eldridge G.W. Broad-band monolithic integrated power amplifier in gallium arsenide//Microwave journal, 1982, Nov., pp.87-94.
- 77. Miller P., Tajema I. 7-18 GHz GaAs FET monolithic power amplifiers IEEE GaAs IC Symposium, 1982, pp.139-141.
- 78. Toshkazu Tsuku. A 33 dB gain monolithic X-Ku band power amplifier module//IEEE international solid-state circuits conf., 1983, pp.202-203.
- 79. Chen D.R., Decker D.R. The next generation of microwave components// Microwave journal, 1983, May, pp. 67-78.
- Pauker K. Wideband high gain small size monolithic GaAs amplifier//IEEE MTT-S, international microwave Symp. 1983, may 31June 3, pp.50-53.

- Shigekazu Hori, Kiyoko Kamoi. GaAs monolithic MIC`S for direct broadcast satellite receivers//IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1983, vol. MTT-31, №12, pp.1089-1095.
- 82. Лапин В.Г. Новые направления создания промышленных полевых СВЧ транзисторов на основе арсенида галлия/www/istokmw.ru/avtoreferatidissertaciy.
- 83. Красноперкин В.М., Прокопьева И.Г., Самохин Г.С. Комплекс программ анализа устройств на связанных полосковых линиях// Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1984. вып. 10 (370). С. 66-69.
- 84. Pucel R. Design considerations for monolithic microwave circuits// IEEE transactions microwave theory and techniques. 1981.vol. 29. №6. pp. 518.
- 85. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств//Под Ред. В.И. Вольмана. М. Радио и связь.1982. С. 175-182.
- 86. Карпов В.М., Малышев В.А., Перевощиков И.В. Широкополосные устройства СВЧ на элементах с сосредоточенными параметрами// М.: Радио и связь. 1984.
- 87. А.с. 204807 СССР. Конструкция интегрального прибора / А.М. Темнов,
 В.А. Лукъянов, В.Л. Наумов и др. Приоритет 26. 05.1983.
- 88. Темнов А.М. Исследование и разработка технологии получения металлических и диэлектрических покрытий, способов формирования пассивных элементов и соединений между ними с целью создания СВЧ устройств на полевых транзисторах// Техн. Отчет №17-6641 по теме №2190. Фрязино. 1983.
- А.с.188115 СССР. Тонкопленочная структура/ А.М. Темнов, С.Л. Темнова, А.В. Крутов. Приоритет 06. 05. 1983.
- 90. Майселл Л., Гленг Р. Технология тонких пленок//Справочник М.: Советское радио. 1977. С. 631-640, 730, 731.
- 91. В.Б. Байбурин, Р.П. Кутьенков, Г.А. Умнов. Методы планируемого эксперимента и их применение//Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ.– М.: ЦНИИ «Электроника». 1975. вып. 5 (302). С.104.

- 92. Темнов, А.М. Разработка групповой технологии изготовления тонкопленочных пассивных элементов, обеспечивающей повышение процента выхода годных элементов с 3 до 20, для создания малошумящих усилителей промежуточной частоты размером не более 12 х 7,5 х 4 мм⁻на одно и двухзатворных полевых транзисторах//Техн. отчет №142-1067 по теме «Откос». Фрязино. 1984.
- 93. Темнов, А.М. Исследование и разработка групповой технологии напыления пленок Ta₂O₅ с удельной емкостью C_{νд} ≥ 400 пФ/мм²,
- tg δ < 0,003 для использования в ГМИС//Техн. Отчет №284-7427 по теме «Орешек-Ф». Фрязино. 1986.
- 94. Chu A, Mahoney L.I. Two-stage monolithic RF amplifier utilizing a Ta2O5 capacitor// IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 1983. MTT-31. №1. p.21.
- 95. Гимпельсон В.Л., Родионов Ю.А. Тонкопленочные микросхемы для приборостроения и вычислительной техники// М.: Машиностроение. 1976. С. 295.
- 96. Ханке Х.Н., Фабиан Х. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры//М.: Энергия. 1980. С. 60.
- 97. Майссел Л., Глэнг Р. Технология тонких пленок//Справочник, М. Советское радио. 1977. С. 38.
- 98. Темнов А.М. и др. Разработка унифицированной технологии изготовления микроплат на сапфире для мелкосерийного производства гибридно-монолитных приборов СВЧ-диапазона//Техн. Отчет № 35-8367 «Перекат». Фрязино. 1989. 20 с.
- 99. Темнов А.М. и др. Исследование и разработка групповой технологии изготовления тонкопленочных элементов с двухуровневой металлизацией для использования в квазимонолитных интегральных схемах СВЧ//Техн. Отчет № 111-7616. «Орех-1». Фрязино. 1986. 42 с.

- 100. Стандарт предприятия «Платы гибридно-монолитных интегральных приборов, конструирование и технология изготовления» СТП ТСО.010.014-2004. АО «НПП «Исток» им. Шокина». Фрязино. 2004.
- 101. Термостойкий токопроводящий клей ЭКС-1. Технические условия ТУ 2225-001-07622667-2014. АО «НПП «Исток» им. Шокина». Фрязино. 2014.
- 102. Термостойкие диэлектрические клеи марки МС. Технические условия ТУ 2252-004-07622667-99. АО «НПП «Исток» им. Шокина». Фрязино.1999.
- 103. Методика ЭТ-361 оценки соответствия изделий ИЭТ СВЧ требованиям ТЗ по минимальной наработке на этапе ОКР//АО «НПП «Исток» им. Шокина. Фрязино. 1988.
- 104. Методика ЭТ-362 оценки соответствия изделий ИЭТ СВЧ требованиям ТЗ по сохраняемости на этапе ОКР//АО «НПП «Исток» им. Шокина. Фрязино. 1988.
- 105. Chiang, D. R., Huang L. Reliability aspects off small signal GaAs FET'S// Microwave Journal 1979. № 6. P. 39.
- 106. Темнов А.М., Крутов А.В., Лукьянов В.А. Исследование возможности создания МШУ 3-см диапазона длин волн с Кш не более 3,5 дБ, Кр не менее 12 дБ, выдерживающего на ВЧ входе мощность не менее 0,3 Вт в квазимонолитном исполнении на полевых транзисторах массой 0,3 г// Техн. отчет № 118-7261. «Ориентация». Фрязино. 1985.
- 107. Темнов А.М. и др. Разработка квазимонолитного малошумящего усилителя см. диапазона Кш < 3,5 дБ и Кус > 12 дБ, массой не более 0,3 г для комбинированных входных усилителей бортовой аппаратуры// Науч. отчёт № 129-7919. «Ориентация-1». Фрязино. 1987. 30 с.
- 108. Темнов А.М. и др. Исследование возможности разработки и применения гибридно-монолитных СВЧ-приборов на полевых транзисторах в приемопередающих СВЧ-устройствах см-диапазона длин волн с безынерционным управлением фазой сигнала// Науч. отчёт № 204-7709. Фрязино. 1986. 111 с.

- 109. Темнов А.М. и др. НИР. «Исследование и создание малошумящего гибридно-монолитного усилителя 30-см диапазона с коэффициентом шума не более 2 дБ для входных устройств». Науч. отчёт № 83-8415. «Очаг». Фрязино. 1989. 18 с.
- 110. Темнов А.М. и др. ОКР. «Разработка групповой технологии изготовления тонкопленочных пассивных элементов, обеспечивающей повышение процента выхода годных элементов с 3 до 20 % для создания малошумящих усилителей промежуточной частоты размером 7,5×12×2 мм на одно и двух затворных полевых транзисторах». Науч. отчёт № 142-7067. «Откос». Фрязино. 1984. 40 с.
- 111. Темнов А.М. и др. ОКР. «Исследование и создание широкополосного гибридно-монолитного усилителя в спец. диапазоне частот с коэффициентом шума 4,5 дБ для радиометрического приемного модуля». Науч. отчёт № 237-8027. «Обзор». Фрязино. 1987. 42 с.
- 112. Дудинов К.В., Темнов А.М., Крутов А.В. и др. Разработка мощных усилителей в микрокорпусах в диапазоне частот 1...2, 2...4, 4...18 ГГц//Науч. отчёт № 12-9200. «Софора». Фрязино. 2002. 101 с.
- 113. Кальфа А.А., Тагер А.С., Темнов А.М. Полупроводниковые приборы СВЧ// Электронная техника. Сер.1, СВЧ – техника. – 1993. – Вып. 1. – С.34-45.
- 114. Савельев В.С. Смесители частоты и ограничители мощности СВЧдиапазона на транзисторах//Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ. М.: ЦНИИ «Электроника». 1983. вып.9.
- 115. Темнов А.М. Исследование и разработка технологических процессов (в том числе ионно-плазменного травления, фотолитографии) изготовления преобразовательного модуля размером 6×9×3 мм состоящего из двух затворного транзистора и пассивных элементов для 3-см диапазона длин волн// Техн. отчет № 205-6829. «Океан». Фрязино. 1983. 28 с.
- 116. Темнов А.М., Крутов А.В., Лукьянов В.А. Разработка и внедрение групповой технологии изготовления преобразовательного модуля

размером не более 6×9×3 мм, обеспечивающий исключение паяных соединений и повышение надежности//Техн. отчет №149-7292. «Облет-1». Фрязино. 1985.

- 117. Богданов, Ю.М. Исследование и создание гибридно-монолитных СВЧгенераторов и преобразователей частоты на универсальных активных GaAs МИС в диапазоне частот 1...18 ГГц//Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Фрязино. 2007. 143 с.
- Богданов Ю.М., Темнов А.М., Щербаков Ф.Е. и др. Разработка ряда 118. СВЧ гибридно-монолитных интегральных схем (генераторов, преобразователей, смесителей, умножителей и делителей частоты) для синтезаторов частот И трактов преобразования частоты приемопередающих модулей аппаратуры РЭБ, РЛС// Техн. отчёт № 11-9199. «Синтетика». Фрязино. 2002. 107 с.
- 119. Богданов Ю. М., Темнов А. М., Щербаков Ф.Е. и др. Ряды устройств для преобразования частоты на основе многофункциональной GaAs МИС// Электронная техника, Сер. 1, СВЧ-техника. – 2007. – Вып. 1 (489). 50 с.
- 120. Богданов Ю.М., Щербаков Ф.Е. Разработка активных преобразователей частоты балансных (ПРБ) в двухсантиметровом диапазоне длин волн// Техн. отчет № 23-9247. «Репей – ПРБ». Фрязино. 2002. 13 с.
- 121. G. Dambrine, A. Cappy, F. Heliodore, and E. Playez. A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit// IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 36, no. 7, pp. 1151–1159, July 1988.
- 122. Don Neuf. Conventional and New Applications for the Quardrature IF Microwave Mixer. // Microwave J. – 1983. – V. 26. – N. 1. – P. 99 - 109.
- 123. Tsironis C. Dual Gate MESFET Mixers // IEEE Trans. 1984. MTT 32.
 N. 3. P. 248-255.
- 124. Руденко В.М., Халяпин Д.Б., Мангушевский В.Р. Малошумящие входные цепи СВЧ приемных устройств. М.: Связь, 1991.

- 125. Губарев В.Ф. Характеристики СВЧ генераторно-умножительной цепочки с электрической перестройкой частоты на биполярных и полевых транзисторах// Электронная техника, Сер.1, Электроника СВЧ. - 1988. -Вып. 5. - С.21-24.
- 126. Богданов Ю.М., Белов В.А., Балыко А.К. и др. Исследование возможности создания гибридно – монолитных преобразователей (аналоговых делителей) частоты в диапазоне 2…12 ГГц для синтезаторов частот.//Техн. отчет № 103-8641. «Овод». Фрязино. 1990. 38 с.
- Takahashy M., Iton H. A 9,5 GHz commercially available ¹/₄ GaAs dynamic prescealer // IEEE Trans. On MTT. 1988. Vol. MTT-36. N.12. P.1912-1918.
- 128. Van Tuyl R., Leichti C.A. High speed integrated logic with GaAS MES FET's // IEEE J. Solid – State Circuits. 1984. – Vol.SC - 9. - October. - P. 269-216.
- 129. Noordanus J, Meiling G., Van Heijiningen P. Derect division phase lock loop at 12 GHz // Proc. IEEE. - 1983. Vol.130. – Pt.2. – N.7.
- 130. Miller R.L. Fractional frequency generators utilizing regerative modulation
 // Proc. IRE. 1939.- Vol.27. July. P. 446-456.
- 131. Ohira T., Kato H., Hitsuka F. A. Compact full MMIC module for Ku-band phase locked oscillators // IEEE Trans. on MTT.- 1989. Vol.37.- N.4. April. P. 723-727.
- 132. Kanarava K., Hagio M., Kano G. A 15 GHz single stage GaAs dual gate FET monolithic analog frequency divider With reduced input power// IEEE Trans. on MTT.- 1988.- Vol.36. – N.12.- P.1908-1911.
- Rauscher C. Regenerative frequency division with a GaAs FET // IEEE Trans. On MTT. 1984.– Vol. 32. – November. – P.1461-1468.
- 134. Honjo K., Madihian M. Novel desigh approach for X-band GaAs monolithic analog 1/4 frequency divider // IEEE Trans. On MTT. – 1986. – Vol.34. – N.4.

- 135. Зырин С.С. Применение базовой модели биполярного транзистора для расчета СВЧ - автогенераторов и усилителей.// Электронная техника. Сер.1, Электроника СВЧ.- 1989.- Вып.3.- С.33-39.
- 136. И.И. Бродуленко, А.И. Абраменков, Д.А. Ковтунов и др. Стабильные и высокостабильные полупроводниковые СВЧ - генераторы на диэлектрических резонаторах. Обзоры по электронной технике. Сер.1, Электроника СВЧ./ - М.: ЦНИИ "Электроника".- 1989.- Вып.10.- 61 с.
- 137. Л.Г. Гассанов, А.А. Липатов и др. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи// М.: Радио и связь, 1988 г. 288с.
- Brazil E.J., Scanlan S.A. A nonlinear design and optimisation procedure for GaAs MESFET oscillator.// IEEE Trans.- 1988.- Vol.MTT-36, No.2.- P. 388-393
- 139. Дубровский В.Н., Карасев А.С. Расчет монолитного СВЧ генератора с электрической перестройкой частоты // Электронная техника. Сер.1, Электроника СВЧ. – 1991. - Вып.7. - С. 22-26.
- 140. Богданов Ю.М., Дудинов К.В., Красник В.А. и др. Разработка гибридно – монолитных приборов, малошумящих ПТШ и сосредоточенных емкостей в обеспечение изделия И-50Э// Науч. отчет № 5-9127. «Созвездие – 4». Фрязино. 1997. 30 с.
- 141. Патент РФ № 2012102. Генератор СВЧ на полевом транзисторе/ Богданов Ю.М., Балыко А.К., Пашковский А.Б. и др.// Приоритет от 30.05.91.
- 142. Балыко А.К., Богданов Ю.М., Козлов Г.П. и др. Расчет энергетических и диапазонных характеристик автогенераторов на полевых транзисторах с барьером Шотки // Электронная техника. Сер.1, СВЧ-техника.- 1992.-Вып.6.- С.14-20.
- 143. Bogdanov Y.M., Gusev A.P., Tager A.S. and all. A microwave HTSC resonator – stabilized oscillator / Superconductivity: Physics, Chemistry, Technology (SPCT) – 1994. – 7(1). – PP.169-171.

- 144. Абраменков А.И., Бродуленко И.И., Богданов Ю.М. и др. Миниатюрный электрически перестраиваемый стабильный транзисторный генератор малой мощности 4-см диапазона // Специальная электроника. Сер.1, Электроника СВЧ. 1991. Вып.3. С.44.
- 145. Абраменков А.И. Балыко А.К., Богданов Ю.М. и др. Создание миниатюрного перестраиваемого транзисторного генератора 4-х см диапазона длин волн с относительной нестабильностью частоты не более 2 10⁻⁵ и выходной мощностью до 30 мВт// Науч. отчет N 45-8783 (по теме N 4960, «Отель»). Фрязино. 1991. 54 с.
- 146. Богданов Ю.М., Балыко А.К., Тагер А.С и др. Разработка гибридно монолитных генераторов управляемых напряжением в диапазоне 2...3 ГГц и генераторов на фиксированную частоту в диапазонах 8...12 и 3 ГГц.// Науч. отчет № 31-8769. «Орден». Фрязино. 1991. 66 с.
- 147. Королев А.Н., Абакумова Н.В., Богданов Ю.М. и др. Генератор управляемый напряжением на ПТШ // Электронная техника. Сер.1, СВЧтехника.-2006.- Вып.2. - С.54 - 57.
- 148. M. Camiade, A. Bert, J. Graffeui1, G. Pataut. Low noise design of dielectric resonator FET oscillators // 13. Ben. Microwave Conf. Dig. - 1983. -P. 297-302.
- 149. Rohdin H., Su C. Y., Sfo11e C. A study of therelation between device low-frequency noise and oscillator faze noise for GaAs MESFETs // IEEE Trails. –
 1985. Vol. MTT 33, No 3. P. 233-242.
- 150. Siweris H.J., Schek B. Analisis of noise up conversion in microwave FET oscillators // IEEE Traris. 1985. Vol. MTT 33, No 3. P. 233-242.
- 151. Балыко А.К., Юсупова Н.И. Математическое обеспечение проектирования транзисторных генераторов СВЧ// Обзоры по электронной технике. Сер.1, СВЧ-техника.- 1994.- Вып.2.- 54 с.
- Adams K. Oxley C. Broadband FET VCO design.// Electronic Engineering Supplement. 1989. № 786. P. 25-30.

- 153. Rauscher C. Large signal technique for designing single frequency and voltage controlled GaAs FET oscillators // IEEE Trans. 1981. V. MTT 29.
 № 4. P. 293-304.
- 154. Madjar A. Analisis of a microwave FET oscillator using an efficient computer model for the device. 1982.
- 155. Балыко А.К., Мартынов Я.Б., Тагер А.С. Проектирование автогенераторов на полевых транзисторах. Ч.1. Модель автогенератора и методика его проектирования // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. – 1988. – Вып.1 (405). – С. 35 – 40.
- 156. Балыко А.К., Овечкин С.М. Программа анализа автогенераторов СВЧ на полевых транзисторах (OSFET) // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1988. – Вып. 2 (406). С. 70 – 71.
- 157. Мякиньков В.Ю. Метод повышения линейности перестроечной характеристики генератора // Электронная техника. Сер.1, СВЧ техника. 1993. Вып.2 (462). С.20-22.
- 158. Дудинов К.В., Темнов А.М., Крутов А.В. и др. Разработка мощных усилителей в микрокорпусах в диапазоне частот 1...2, 2...4, 4...18 ГГц//Науч. отчёт № 12-9200. «Софора». Фрязино. 2002. 101 с.
- 159. Стандарт предприятия «Арсенидгаллиевые пассивные схемы для СВЧ твердотельных приборов. Требования к конструированию» СТП ТСО.010.019-03. АО «НПП «Исток» им. Шокина». Фрязино. 2003.
- 160. Пат. 2285930 РФ. Зонд для измерения электрических характеристик планарных элементов интегральных схем / Темнов А. М., Шульга Н. В., Дудинов К. В. – Патентообладатель ФГУП «НПП «Исток»; приоритет 11.04.2005; зарегистрир. 20.10.2006.
- 161. Пат. 2293339 РФ. Многоконтактный зонд для испытания планарных элементов интегральных схем / Темнов А. М., Шульга Н. В., Дудинов К. В. Патентообладатель ФГУП «НПП «Исток»; приоритет 25.07.2005; зарегистрир. 10.02.2007.

- 162. Н.А. Кувшинова, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, К.И. Петров. Мощный полевой транзистор со смещенным к истоку Г-образным затвором// Радиотехника, 2011 г. No 11, с. 90-93.
- 163. Лапин В.Г., Красник В.А., Петров К.И., Темнов А.М Мощные GaAs полевые СВЧ транзисторы со смещенным затвором// 11-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Сборник материалов конференции 10-14 сентября 2001 г., Севастополь, Крым, Украина, стр. 135-136.
- 164. А.А. Воробьев, Е.В. Воробьева, А.В. Галдецкий Моделирование теплового режима мощных транзисторов и МИС и новый метод монтажа кристаллов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып. 3 (510). – С. 37-41.
- 165. Лапин В.Г., Лукашин В.М., Петров К.И., Темнов А.М. Полевые транзисторы со смещенным затвором// Электронная техника, Сер.1, СВЧтехника, 2011, В.4(511), с. 59-71.
- 166. Королев А.Н., Красник В.А., Пчелин В.А., Трегубов В.Б. Мощные корпусированные внутрисогласованные транзисторы S, C, X и Ки диапазонов длин волн // Радиотехника. 2007. №3. С. 53-56.
- 167. Дудинов К.В., Ипполитов В.М., Пашковский А.Б. и др. Особенности тепловыделения в мощных полевых транзисторах // Радиотехника. 2007.
 № 3. С. 60-62.
- 168. Капралова А.А., Пчелин В.А., Трегубов В.Б. Внутрисогласованный транзистор Х-диапазона с выходной мощностью 14 Вт// 20-я Международная конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь. 2010. "Вебер", С.129.
- 169. Ляпин Л.В., Манченко Л.В., Пчелин В.А., Трегубов В.Б. Внутрисогласованный транзистор Х-диапазона с повышенным коэффициентом усиления и КПД// 18-я Международная конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь. 2008. "Вебер". С. 69-70.

- 170. Капралова А.А., Пчелин В.А., Трегубов В.Б. Внутрисогласованный транзистор Х-диапазона с выходной мощностью 14 Вт // 20-я Международная конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь. 2010. "Вебер". С. 129.
- 171. Бабинцев Д.В. Красник В.А., Лапин В.Г., Пчелин В.А., Трегубов В.Б. Мощный твердотельный импульсный усилитель двухсантиметрового диапазона // Радиотехника. – 2007. – №3. – С. 41-42.
- 172. Манченко Л.В., Пчелин В.А., Трегубов В.Б. Двухкаскадный усилитель мощности Х – диапазона на гетероструктурных полевых транзисторах ФГУП «НПП «Исток»// 20-я Международная конференция «СВЧ техника и телекоммуникационной технологии». Севастополь. 2010. С. 127-128.
- 173. Пчелин В.А., Корчагин И.П., Галдецкий А.В. и др. Двухкаскадный усилитель Х-диапазона с выходной мощностью 17 Вт на элементной базе ФГУП «НПП «Исток»// 21-я Международная конференция «СВЧ техника и телекоммуникационной технологии». Севастополь. 2011. С. 129-130.
- 174. Пчелин В.А. СВЧ Усилители мощности на сосредоточенных
 элементах // Электронная техника. Сер.1. СВЧ техника. 2000. Вып. 1.
 С.5-9.
- 175. Пчелин В.А., Трегубов В.Б., Красник В.А., и др. Гибридноинтегральные малогабаритные усилители мощности// Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. 2015. - Вып.4(527). С.57 – 62
- 176. Пчелин В.А., Красник В.А., Лапин В.Г. и др. Мощный твердотельный импульсный усилитель двухсантиметрового диапазона. «Радиотехника». 2007.№3. С.41-42.
- 177. Пчелин В.А., Лисицын А.А., Трегубов В.Б. и др. Малогабаритные усилители с выходной мощностью не менее 0,5 и 6 Вт для АФАРдиапазона // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2017, В.1(534), С. 22-27.

- 178. Маковецкая А.А., Пчелин В.А., Лапин В.Г., Пашковский А.Б. и др. Усилительный каскад Х-диапазона частот с выходной мощностью более 6 Вт на гетероструктурных полевых транзисторах с донорно-акцепторным легированием // Электронная техника. Сер.1, СВЧ-техника, 2018. Вып.1 (538). С. 25-31.
- 179. TriQuint Semiconductor. http://www.triquint.com.
- 180. Темнов А.М., Дудинов К.В., Емельянов А.М. и др. Исследование мощных усилительных ГМИС Х-диапазона длин волн на транзисторах нитрида галлия// Электронная техника, серия 1, СВЧ-техника. Вып. 2(525), 2015 г., стр. 4-20.
- 181. Данилин В.Н. Мощные высокотемпературные и радиационно-стойкие СВЧ приборы нового поколения на широкозонных гетеропереходных структурах Al-GaN/GaN // Обзоры по электронной технике, Сер.1. СВЧ техника. 2001. Вып.1.
- 182. Васильев А. Новое поколение полупроводниковых материалов и приборов. Через GaN к алмазу // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, №4, 2007, 68-76.
- 183. Викулов И., Кичаева Н. GaN технология новый этап развития СВЧмикросхем // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука. Технология. Бизнес. 2007.№4, С.80.
- 184. Кищинский А.А. Твердотельные СВЧ-усилители мощности на нитриде галлия – состояние и перспективы развития// 19-я Международная конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь. Вебер. 2009. С.11–16.
- 185. Зимин Р.А., Кищинский А.А., Суханов Д.А. Широкополосный усилительный модуль в диапазоне 2-4 ГГц с выходной мощностью 35 Вт//

23-я Международная конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". 2016. Севастополь. «Вебер». С. 10.

186. Y.-F. Wu, A. Saxler, M. Moore, R.P. Smith, S. Sheppard. 30-W/mm GaN HEMTs by field plate optimization // IEEE Electron Device Letters, 2004, v.25, № 3, p.117-119.

- 187. Кищинский А.А., Надеждин Б.Б., Свистов Е.А., Шульга Н.В. Метод автоматизированного определения параметров линейной модели СВЧ полевого транзистора.// 10-я Международная конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь 2000. «Вебер». С.56.
- 188. Кищинский А.А. Сверхширокополосные твердотельные усилители мощности СВЧ диапазона: схемотехника, конструкции, технологии. Электроника и микроэлектроника СВЧ// Сборник статей VII Всероссийской конференции. СПб. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018, С. 4.
- 189. Кищинский А.А., Радченко А.В., Радченко В.В. Широкополосные квадратурные делители/сумматоры для применения в усилителях СВЧ мощности// 23-я Международная конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, Вебер, 2013. С.6-10.
- M. Litchfield, J. Komiak. A 6–18 GHz 40W Reactively Matched GaN MMIC Power Amplifier. IEEE International Microwave Symposium, 2018.
- 191. C. Andersson et al. Decade Bandwidth. High Efficiency GaN HEMT Power Amplifier. Designed With Resistive Harmonic Loading// IEEE International Microwave Symposium, 2012.
- 192. T. Arnous et al. Multi-Octave GaN High Power Amplifier Using Planar
 Transmission Line Transformer// Proceedings of the 46th European Microwave
 Conference, 2016. P. 580 583
- 193. K. Krishnamurthy et al. A 0.1-1.8 GHz, 100 W GaN HEMT Power Amplifier Module//Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), 2010. – P. 1-4.
- 194. Гармаш С.В., Кищинский А.А., Радченко А.В. Квазимонолитный транзисторный усилитель диапазона 8-18 ГГц с выходной мощностью
- 2 Вт// 19-я Международная конференция "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь. 14-18 сентября 2009.
- 195. Астахов П.Н., Гармаш С.В., Кищинский А.А., Крылов Б.В., Свистов Е.А. Принципы конструирования и параметры широкополосных транзисторных СВЧ усилителей мощности, разрабатываемых в ФГУП

«ЦНИРТИ» // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2003. – Вып.2. С. 83-88.

- 196. Темнов А.М., Дудинов К.В., Емельянов А.М. и др. Исследование мощных усилительных ГМИС Х-диапазона длин волн на транзисторах нитрида галлия// Электронная техника, серия 1, СВЧ-техника, выпуск 2(529). 2015. С. 45-53.
- 197. Темнов А.М., Дудинов К.В., Емельянов А.М. и др. Новое поколение мощных усилительных ГМИС *X*-диапазона на алмазной плате и нитридгаллиевых транзисторах// Электронная техника. Сер. 1. СВЧтехника. – 2017. – Вып. 2 (533). – С. 54 – 74.
- 198. Пат. 2474921 РФ. Интегральная схема СВЧ / К. В. Дудинов, А. М. Темнов, и др. Патентообладатель ФГУП «НПП «Исток»; приоритет 30.08.2011; зарегистрир. 30.08.2011.
- 199. Дудинов К.В., Темнов А.М., Лапин В.Г., Аверин В.В. Application of CVD-diamond substrates for microwave semiconductor devices// 10-я Международная конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь. 2000. «Вебер». С. 10-12.
- 200. Пат. 2442241 РФ. Электронный прибор СВЧ / Ю. М. Богданов, А. М. Темнов, К. В. Дудинов, и др. Патентообладатель ФГУП «НПП «Исток»; приоритет 25.08.2010; зарегистрир. 10.02.2012.
- 201. Пат. 2194337 РФ. Устройство для монтажа кристалла/ А. М. Темнов, К.
 В. Дудинов, В. Л. Наумов. Патентообладатель ФГУП «НПП «Исток»; приоритет 22.06.2001; зарегистрир. 10.12.2002.
- 202. Пат. 2258330 РФ. СВЧ интегральная схема / А. М. Темнов, К. В. Дудинов, В. Л. Наумов. Патентообладатель ФГУП «НПП «Исток»; приоритет 01.08.2003; зарегистрир. 20.02.205.
- 203. Дудинов К.В., Темнов А.М. Design of microwave hybrid-monolithic integrated circuits with the use of flip-chip technique// 11-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. 2001. «Вебер». С. 128-129.

- 204. MGA-62563/ фирма Agilent, США. http://datasheet.elcodis.com.
- 205. HMC479MP86/ фирма Hittite, CША. https://www.alldatasheet.com.
- 206. HMC507LP5/ фирма Hittite, CША. https://www.alldatasheet.com.
- 207. HMC490LP5/ фирма Hittite, CША. https://www.alldatasheet.com.
- 208. HMC608LC4/ фирма Hittite, CША. https://www.alldatasheet.com.
- 209. TGA2513-SM/ фирмa TriQuint, CША. https://www.alldatasheet.com.
- 210. HMC517LC4/ фирма Hittite, CША. https://www.alldatasheet.com.
- CHA2069-FAA фирмa United Monolithic Semiconductors, Франция. https://www.alldatasheet.com.
- 212. Китайская корпорация электронных технологий СЕТС. http://www.cetc22.com/ru.
- 213. Пат. 2489769 РФ. Герметичный корпус для полупроводникового прибора или интегральной схемы СВЧ-диапазона / А. Г. Бабак, А. С. Адонин, Е. М. Воробьевский и др. Патентообладатель ООО «НПП ТЭЗ»/ «Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод»; приоритет 28.12.2011; зарегистрир. 10.08.2013.
- 214. Кондратюк Р. LTCC Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика// Промышленные нанотехнологии. Наноиндустрия. Научнотехнический журнал. 2/2011. С. 26.
- 215. Темнов А.М., Дудинов К.В., Емельянов А.М. и др. Корпуса SMD для герметизации мощных МИС диапазона до 40 ГГц // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 2 (537). С. 22 – 43.
- 216. K. Lee et al. 220 265 GHz active ×6 frequency multiplier MMIC with InP HEMT technology. Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2018.
- 217. Microwaves & RF, 2017, No 3, p. 88.
- 218. Промышленный каталог компании Northrop Grumman, 2017.
- 219. T. Shivan et al. An ultra-broadband low-noise distributed amplifier in InP DHBT technology. Proceedings of the 48th European Microwave Conference.
- 220. Пластины монокристаллов карбида кремния SiC и SiC подложки с

эпитаксией. Фирма CREE. https://www.prosoft.ru.

- 221. Шурыгина, В. "Чудо-материал" графен новый конкурент на рынке РЧэлектроники. Ч. 1 / В. Шурыгина // Электроника: наука, технология, бизнес. 2014. № 4 (00135). С. 141.
- 222. Шурыгина, В. «Чудо-материал» графен новый конкурент на рынке РЧ-электроники. Ч. 2 / В. Шурыгина // Электроника: наука, технология, бизнес. 2014. № 5 (00135). С. 151.
- 223. CVD-алмаз и алмазная электроника. ВШОПФ ННГУ. http://www.vshopf.unn.ru
- 224. Chen, Y. Diamond chemical vapor deposition and practical applications. Dissertation. 2009. ETD. C. 104. http://etd.auburn.edu.
- 225. ООО «ТВИНН» Научно-прикладной центр. http://www.twinnplasma.com/
- 226. Седов, В. С. Синтез тонких микро- и нанокристаллических алмазных пленок в СВЧ-плазме: дис. на соиск. уч. ст. физ.-мат. наук. / В. С. Седов. 2013. 126 с.
- 227. Совык, Д. Н. Плазмохимический синтез трёхмерных структур из алмаза методом реплики: дис. на соиск. уч. ст. физ.-мат. наук. / Д. Н. Совык. – 2014. – С. 111.
- 228. В. Г. Ральченко, А. П. Большаков, «СVD-алмаз: синтез и свойства», Углеродная фотоника, Москва, Наука, 2017 г, стр. 9-107.
- 229. Julian Anaya, Huarui Sun, James Pomeroy/ Thermal Management of GaNon-Diamond High Electron Mobility Transistors: Effect of the Nanostructure in the Diamond near Nucleation Region// 15th IEEE ITHERM Conference/ 2016/ C. 1558.
- 230. Поликристаллическая алмазная пленка на подложке кремния. Технические условия ЦПКЛ 0100.001.001 ТУ/ ИОФ РАН. Москва. 2018. С.22.

- 231. Поликристаллическая алмазная пленка на подложке кремния. Технические условия ВНТФ.758779.001 ТУ/ ООО «ТВИНН». Москва. 2018. С.24.
- 232. Дерябкин, А. В. Диффузионная термохимическая обработки поверхности алмаза/Научно-технический журнал Электроника и электрооборудование транспорта/ № 4. 2018. С. 35-37.
- 233. Духновский, М. П. Термическая обработка поликристаллического СVD-алмаза с целью формирования гладкой поверхности/ М. П. Духновский, А. К. Ратникова, И. А. Леонтьев, и др./ Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, 2008. Вып. 2 (495). С.41-46.
- 234. Мальцев, П. П. Технология лазерной резки поликри¬сталлических алмазных пластин // П. П. Мальцев, С. В. Редькин, М. П. Духновский, и др./ Нано- и микросистемная техника. 2015. № 5. С. 44–48.
- 235. Пат. 2537101 РФ. Способ прецизионной лазерно-плазмохимической резки пластин / Аристов В.В., Мальцев П.П., Редькин С.В., и др. □ Патентообладатель ИСВЧПЭ РАН; приоритет 08.08.2013; зарегистрир. 30.10.2014.
- 236. Михайлов О. В. Что такое темплатный синтез// СОЖ. 1999. № 10. С.42.
- 237. Голованов, А. В. Реактивное ионное травление поверхности синтетического алмаза/ТРУДЫ МФТИ/ 2013/ Том 5, № 1, стр. 31.
- 238. Темнов А. М. Формирование отверстий в алмазной подложке гибридно-монолитных интегральных схем СВЧ//Радиотехника и электроника. 2020, том 65, № 2, с. 174–182.
- 239. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы// М.: Радио и связь. 1982.
- 240. Жуков В.В., Кривобоков В.П., Янин С.Н., Распыление мишени магнетронного диода в присутствии внешнего ионного пучка//Журнал технической физики, 2006, том 76, вып. 4.

- 241. Темнов А.М. и др. ОКР. «Разработка и испытания СВЧ-микросхем на гетероструктурах_А₃В₅ для ППМ АФАР Х-диапазона». Науч. отчёт № 9-9361. «Донецк». Этап 3.2. Фрязино. 2010. 22 с.
- 242. Темнов А.М. и др. ОКР. «Разработка и испытания СВЧ-микросхем на гетероструктурах_А₃В₅ для ППМ АФАР Х-диапазона». Науч. отчёт № 11-9336, «Донецк». Этап 3.1. Фрязино. 2009. 58 с.
- 243. Темнов А.М. и др. ОКР. «Разработка комплекта унифицированных функциональных узлов для многоканальных ППМ АФАР». Науч. № 9-9321. «Прогресс-2004». Этап 3.2.2. Фрязино. 2008. 24 с.
- 244. Темнов А.М. и др. НИР. «Исследование и разработка СВЧ-микросхем на гетероструктурах полупроводников А₃В₅ для унифицированных приемно-передающих модулей АФАР Х-диапазона с выходной мощностью до 10-15 Вт», шифр «Локатор 2004», Науч. отчёт № 18-9294. Фрязино. 2006. 228 с.
- 245. Темнов, А. М. Комплект унифицированных МИС СВЧ для многоканальных приемопередающих модулей АФАР Х-диапазона/ А. М. Темнов, К. В. Дудинов и др.// Электронная техника, Сер. 1, СВЧ-техника. – 2009. – Вып. 2 (501). С. 31 – 44.
- 246. Темнов, А. М. Комплект широкополосных СВЧ-микросхем на гетероструктурах АЗВ5 для ППМ АФАР Х-диапазона/ А. М. Темнов, К. В. Дудинов и др.// Электронная техника, Сер. 1, СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 2 (505). С. 30 – 49.
- 247. Богданов Ю. М., Дудинов К. В., Темнов А. М. и др. Broadband monolitic IC on GaAs heterostructures for time quantized control of amplitude and phase of microwave oscillations with inbuilt driver// 20-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. 2010. «Вебер». С. 189-190.
- 248. Богданов Ю. М., Галдецкий А. В., Темнов А. М. и др. Full-Scale Family of Discrete GaAs Steering Circuits// 16-я Международная конференция

«СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. 2006. «Вебер». С. 185-186.

- 249. Балыко А.К., Богданов Ю.М., Темнов А.М. и др. Designing of monolithic two-channel microwave switch//Радиотехника. 2004. №2. С.40-46.
- 250. Королев А.Н., Зайцев С.А., Темнов А.М. и др. 60 years of designing microwave devices at «ISTOK»// 13-я Международная конференция «СВЧтехника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. 2003. «Вебер». С. 811-813.
- 251. Крутов А.В., Ребров А.С., Темнов А.М. GaAs MMIC design using basic elements library// 13-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. 2003. «Вебер». С. 218-220.
- 252. Лапин В.Г., Темнов А.М., Красник В.А., Петров К.И. GaAs microwave power offset gate MESFETs// 11-я Международная конференция «СВЧтехника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. 2001. «Вебер». С. 135-136.
- 253. Зайцев С.А., Лебедев В.Н., Темнов А.М. и др. «ISTOK» achievements in solid-state microwave devices//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 14-18 June 1993. Atlanta. GA. USA. 1993. pp. 1129 vol.2.
- 254. Абакумова Н.В., Богданов Ю.М., Балыко А.К. и др. Проектирование многоразрядных монолитных аттенюаторов / Электронная техника. Сер.1, СВЧ - техника. 2005. – Вып.2. – С. 6-20.
- Богданов Ю.М., Темнов А.М., Щербаков Ф.Е. Монолитные приборы СВЧ// Электронная техника. Сер.1, СВЧ - техника. - 2006. - Вып.2. - С.54 -57.
- 256. Темнов А.М. и др. ОКР. «Исследование и создание пилотной линии с размерной обработкой 0,1 мкм и объемом выпуска МИС СВЧ до 1 млн. шт./год». Науч. отчёт № 22-9148. «Подгрифок». Фрязино. 1999. 15 с.
- 257. Темнов А.М. и др. НИР. «Создание опытной технологии монолитных интегральных СВЧ-схем, в том числе синтезаторов частоты и образцов

многофункциональных приемопередающих модулей АФАР сантиметрового диапазона длин волн». Науч. отчёт № 12-9115. «Прорыв». Фрязино. 1996. 84 с.

- 258. Темнов А.М. и др. НИОКР. «Исследование и разработка комплекса базовых технологических процессов создания МИС и ГМИС СВЧ, в т. ч. формирования элементов размером 0,1 мкм, корпусов, модернизация оборудования, защита изделий СВЧ от дестабилизирующих факторов». Науч. отчёт № 21-9096. «Фабрикатор». Фрязино. 1995. 66 с.
- 259. Борисов А.А., Королев А.Н. Твердотельная СВЧ-электроника. Развитие твердотельной СВЧ-электроники на ФГУП «НПП «Исток»// История отечественной электроники. Т. 1, гл. 3. 2012. С. 311 – 327.
- 260. Михальченков, А.Г., Темнов А.М. Транзисторы и интегральные схемы СВЧ, конструкция и технология изготовления//Фрязинская школа электроники. Москва. 2012. С. 275-299.
- 261. Викулов, И.К. Монолитные интегральные схемы СВЧ технологическая основа АФАР/ ЭЛЕКТРОНИКА наука | технология | бизнес №7 (00121) 2012. С. 60-73.
- 262. Ju-Young Moon and Sang-Won Yun, Chang-Soo Ahn and Seon-Joo Kim/New Tile Structure for Microwave Modules Using Solderless Vertical Interconnections//MICROWAVE JOURNAL. OCTOBER 2012/C. 76-86.
- 263. Планарные приемные многоканальные модули АФАР Х-диапазона на основе LTCC-керамики/ © 2014-2016 АО «НИИПП». https://topwar.ru
- 264. Темнов А. М. Анализ монолитных интегральных схем СВЧ для приемопередающих 2D и 3D модулей АФАР Х-диапазона, Электронная техника, серия 1, СВЧ-техника, выпуск 1 (520), 2014 г, стр. 45-53.
- 265. Темнов А. М. Анализ монолитных интегральных схем СВЧ для приемопередающих 2D и 3D модулей АФАР Х-диапазона, Электронная техника, серия 1, СВЧ-техника, выпуск 2 (521), 2014 г, стр. 23-32.
- 266. Пат. 2657336 РФ. Приемопередающий модуль активной фазированной антенной решетки/А. М. Темнов, К. В. Дудинов и др. Патентообладатель

ФГУП «НПП «Исток»; приоритет 11.05.2017; Зарегистрирован. 13. 06.2018.

- 267. Thomas E. Kazior. Philosophical transactions of the royal society a mathematical and engineering sciences. Beyond CMOS: heterogeneous integration of III–V devices, RF MEMS and other dissimilar materials/devices with Si CMOS to create intelligent microsystems// Published 24 February 2014. https://royalsocietypublishing.org.
- 268. Ральченко, В. Г. СVD-алмазы, применение в электронике/ В. Г. Ральченко, В. Конов.// ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 4/2007. С. 58.
- 269. Темнов А.М. и др. НИР. «Разработка технологии изготовления СВЧ транзисторов на гидрогенизированном алмазе». Науч. отчёт № 17-9342. «Модуль-5.8-И». Фрязино. 2009. 20 с.
- 270. D. I. Babić, Q. Diduck, P. Yenigalla. GaN-on-diamond Field-Effect Transistors: from Wafers to Amplifier Modules// Group4 Labs, Inc., 13500 Stevenson Place, Suite 207, Fremont, CA 94539, USA, Cornell University School of Electrical and Computer Engineering, Ithaca, NY 14853, USA. https://akashsystems.com.
- 271. Bruce Bolliger, Felix Ejeckam, Firooz Faili. History of GaN-on-diamond technology Microsemi PPG. Gallium Nitride (GaN) versus Silicon Carbide (SiC) In The High Frequency (RF) and Power Switching Applications// October 13, 2014. https://www.edn.com.
- 272. Хрыкин О.И., Дроздов Ю.Н., Духновский М.П. Монокристаллические слои GaN/AlN на CVD-алмазе// Письма в ЖТФ, 2015, том 41, вып. 19, стр. 73-79.
- 273. Пат. 2556271 РФ. Интегральная схема СВЧ/А.М. Темнов, К.В. Дудинов и др. – Патентообладатель ФГУП «НПП «Исток»; приоритет 30.12.2013; зарегистрир. 10. 06.2015.

- 274. Пат. 2557317 РФ. Интегральная схема СВЧ/А.М. Темнов, К.В. Дудинов и др. – Патентообладатель ФГУП «НПП «Исток»; приоритет 30.12.2013; зарегистрир. 20.06.2015.
- 275. Пат. 2654970 РФ. Интегральная схема СВЧ/ А.М. Темнов, К.В. Дудинов и др. Патентообладатель ФГУП «НПП «Исток»; приоритет 2.05.2017; зарегистрир. 23.05. 2018.
- 276. Ашкинази Е.Е., Кононенко В.В. «Методы обработки алмаза», Углеродная фотоника, Москва, Наука, 2017 г, Стр. 152-203.
- 277. Ральченко В.Г., Ашкинази Е.Е. Условия синтеза, абразивная и лазерная обработка поликристаллического CVD-алмаза//Инструментальный сайт. 2005. №3. С. 14-18.
- 278. Ashinazi E.E., Zavedeev., Bolshakov A.P.//Microwave plasma deposition and mechanical treatment of single crystals and polycrystalline diamond films // Inorg. Mater.: Appl. Res. 2014/ Vol. 5. P. 29-36.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ПОДЛОЖКА – диэлектрическая, полупроводниковая или металлическая пластина, предназначенная для создания на ней диэлектрических, полупроводниковых или металлических плёнок.

ПЛАСТИНА – полуфабрикат в технологическом процессе производства интегральных схем на поверхности, которой групповым способом с помощью операций планарной технологии формируется массив дискретных пассивных элементов (R, L, C) линий, выводов, активных элементов (диодов,

транзисторов) или интегральных схем (ИС).

ПЛАТА (кристалл) – часть диэлектрической, металлической или

полупроводниковой пластины после разделения ее на отдельные чипы (chip – кусок тонкой пластины).

ЭЛЕМЕНТ – часть ИС, реализующая функцию: пассивного элемента

(резистора – R, индуктивности – L, конденсатора – C),

или активного элемента (диода – Д, транзистора – Т), который не может быть выделен как самостоятельное изделие при приемке,

поставке и эксплуатации.

Компонент – это резистор, индуктивность, конденсатор,

диод, транзистор или ИС, выполненные как самостоятельное изделие при приемке, поставке и эксплуатации.

МПЛ – микрополосковая линия.

КЛ – подвешенная копланарная линия имеет зазор между подложкой и заземляющей металлизацией.

КЛЭ – экранированная копланарная линия не имеет зазора между подложкой и заземляющей металлизацией.

ЭМ – электромиграция.

ПТШ – полевой транзистор с барьером Шотки.

ВАХ – вольтамперная характеристика.

ВУМ – выходной усилитель мощности.

ПУМ – предварительный усилитель мощности.

КПД – коэффициент полезного действия.

ГИС СВЧ – гибридно-интегральная схема СВЧ, в которой пассивные элементы (R, L) и межэлементные соединения выполнены монолитно на поверхности и в объеме подложки, а навесными компонентами являются конденсаторы – С и активные компоненты – диоды, транзисторы и МИС СВЧ в виде кристалла или в корпусе.

ГМИС СВЧ – гибридно-монолитная интегральная схема СВЧ, в которой все пассивные элементы (R, L, C) и межэлементные соединения выполнены монолитно на поверхности и в объеме подложки, а навесными являются только активные компоненты в виде кристаллов – диоды, транзисторы и МИС СВЧ.

МИС СВЧ – монолитная интегральная схема, в которой все пассивные и активные элементы и межэлементные соединения выполнены монолитно на поверхности и в объеме подложки.

НМИС СВЧ – гетероинтегрированная монолитная интегральная схема СВЧ, в которой все пассивные и активные элементы и межэлементные соединения выполнены монолитно на поверхности и в объеме подложки, при этом активные элементы изготовлены из различных материалов.

MTTF – (Mean Time to Failure) среднее время до первого отказа, средняя наработка на отказ, среднее время безотказной работы/ Количественный показатель надёжности оборудования и компонентов, определяется производителями, как правило, в часах, чем больше это время, тем лучше.

ППМ – приемопередающий модуль.

ЭКБ – электронная компонентная база.

АФАР – активная фазированная антенная решетка.

ВВСТ – вооружение и военная специальная техника.

SMD – surface mounted device (прибор, монтируемый на поверхность платы).

SMT – surface mount technology (технология поверхностного монтажа

компонентов на плату).

SMA – коаксиальный сверхминиатюрный радиочастотный А-разъем с волновым сопротивлением 50 Ом.

DAHI – Diverse & Accessible Heterogeneous Integration (Разнообразная и Доступная Неоднородная Интеграция) под управлением DARPA.

DARPA – Defense Advanced Research Projects Agency (агентство передовых оборонных исследовательских проектов Министерства обороны США, отвечающее за разработку новых технологий для использования в вооружённых силах).

CVD – Chemical Vapor Deposition (метод химического осаждения из газовой фазы).

ПАП – поликристаллическая алмазная пленка.

ПАП-Si – поликристаллическая алмазная пленка на кремнии.

МЛЭ – молекулярно-лучевая эпитаксия.

РЭМ – Растровая Электронная Микроскопия.

РИТ – реактивное ионное травление.

ИСП – индуктивно связанная плазма.

РИТ-ИСП – реактивное ионное травление с источником ИСП.

СМИФ – стандартный механизированный интерфейс – механизмы (контейнер, шлюз, загрузчик).

СМИФ – технология, технологический процесс, в котором технологическое оборудование оснащено СМИФ механизмами.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ВНЕДРЕНИЕ

Развитые автором подходы, методики расчета, проектирования и конструирования, и оптимизации базовых технологических процессов изготовления использованы при разработке ряда ГМИС СВЧ базовой, мозаичной и миниатюрной конструкции, разрабатываемых в АО «НПП «Исток» им. Шокина»: ОКР «Ориентация», «Очаг», «Обзор», «Орех», «Орешек», «Облет-1», «Откос», «Синтетика», «Софора», «Синтез», «Отвес», «Светлогорск», «Охта», «Беглец», «Репей», «Позиция», «Отвага», «Одноцветник-ИЗ-РК», «Одноцветник-И4-РК», «Одноцветник-И11», «Одноцветник-60», «Аббат», «Одноцветник-65».

Разработанные ГМИС СВЧ широко внедрены в радиоэлектронную аппаратуру, выпускаемую АО «НПП «Исток» им. Шокина» и другими предприятиями отрасли: АО "КНИРТИ"; АО "ММЗ"; АО "УПКБ "Деталь"; АО "ЦКБА"; ПАО "НПО "Стрела"; АО "РКБ "Глобус"; ОАО "ЦНПО "Ленинец"; АО "Микроволновые системы"; АО "ИЭМЗ "Купол"; АО "ЦНИРТИ им. академика А. И. Берга"; ПАО "Сигнал"; АО "РАТЕП"; АО "Северный пресс"; АО "НИИЭП"; АО "НПП "Салют-25"; АО "Завод "Метеор"; АО "ППО ЭВТ им. В.А. Ревунова"; АО "РИРВ"; АО "Корпорация "Комета"; АО "ВНИИРТ"; АО "Радиоприбор"; АО "Октава"; АО "Промтехкомплект"; ООО "ЦМК-Аэро"; АО "ЗИТЦ".

ГМИС СВЧ составляют основу ЭКБ СВЧ важнейших систем вооружения РЛС, РЭБ, высокоточного оружия космического, воздушного, морского и наземного базирования: С-500, Т-50, Панцирь, Хибины-М, И-50, Тор, СУ-34, 5П20К, 48Я6-К1, Обра-М, 646Л, 646М и др.

Создано более 100 типов ГМИС СВЧ различного функционального назначения. Общий объем выпуска составляет порядка 100 000 шт./год.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. СПИСОК ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЯ

Публикации по теме диссертации в изданиях, индексируемых в базах данных «Web of Science» и «Scopus»

- 1. Темнов А.М. Формирование отверстий в алмазной подложке гибридномонолитных интегральных схем СВЧ//Радиотехника и электроника. 2020, том 65, № 2, с. 174–182.
- 2. Балыко А.К., Богданов Ю.М., Темнов А.М. и др. Создание монолитных двухканальных СВЧ переключателей//Радиотехника. 2004. №1. С.40-46.
- V.G. Lapin, A.M. Temnov, K.I. Petrov, V.A. Krasnik GaAs Microwave Offset Gate Self-Aligned MESFET's and their applications. "GaAs 2000 Conference proceedings, 2nd-3rd October, Paris, 2000" p.314-317.
- S.A. Zasev, V.N. Lebedev, A.M. Temnov «ISTOK» achievements in solid-state microwave devices//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 14-18 June 1993. Atlanta. GA. USA. 1993. pp. 1129 vol.2.

Публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК.

- Ефимов А.С., Темнов А.М., Дудинов К.В. и др. Гибридно-монолитная интегральная схема усилителя Ки-диапазона с выходной мощностью 1 Вт// Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. 2019. Вып. 3(542). С. 108.
- Темнов А. М., Дудинов К. В., Емельянов А.М. и др. Корпуса SMD для герметизации мощных МИС диапазона до 40 ГГц // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2018. Вып. 2 (537). С. 22.
- Темнов А.М., Дудинов К.В., Емельянов А.М. и др. Новое поколение мощных усилительных ГМИС *X*-диапазона на алмазной плате и нитридгаллиевых транзисторах // Электронная техника. Сер. 1. СВЧтехника. 2017. Вып. 2 (533). С. 54.
- Темнов А.М., Дудинов К.В., Емельянов А.М. и др. Исследование мощных усилительных ГМИС *Х*-диапазона длин волн на транзисторах нитрида галлия// Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2015. – Вып. 2 (525). С. 4.

- Темнов А.М., Дудинов К.В., Емельянов А.М. и др. Исследование мощных усилительных ГМИС *Х*-диапазона длин волн на транзисторах нитрида галлия // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2015. Вып. 2 (529). С. 45.
- 10. Темнов А. М. Анализ монолитных интегральных схем СВЧ для приемопередающих 2D и 3D модулей АФАР Х-диапазона // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2014. Вып. 1 (520). С. 45.
- 11. Темнов А. М. Анализ монолитных интегральных схем СВЧ для приемопередающих 2D и 3D модулей АФАР Х-диапазона // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2014. Вып. 2 (521). С. 23.
- 12.Лапин, В.Г., Темнов А.М., Петров К.И. и др. Полевые транзисторы со смещенным затвором // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2011. Вып. 4 (511). С. 59.
- Темнов А.М., Дудинов К.В., Богданов Ю.М. и др. Комплект широкополосных СВЧ-микросхем на гетероструктурах А₃В₅ для ППМ АФАР *Х*-диапазона // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 2 (505). С. 30.
- 14. Темнов А.М., Дудинов К.В., Богданов Ю.М. и др. Комплект унифицированных МИС СВЧ для многоканальных приемопередающих модулей АФАР *X*-диапазона // Электронная техника. Сер. 1. СВЧтехника. 2009. Вып. 2 (501). С. 31 – 44.
- 15. Богданов, Ю. М., Темнов А. М. и др. Монолитный двухпозиционный переключатель для диапазона частот 0,5...18 ГГц, согласованный по всем каналам // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2007. – Вып. 1 (489). С. 33.
- 16. Аверин, В.В., Темнов А.М. и др. Модернизация бескорпусных диодов СВЧ// Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2007. – Вып. 1 (489). С. 46.
- Богданов Ю.М., Темнов А.М. и др. Ряды устройств для преобразования частоты на основе многофункциональной GaAs МИС// Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2007. – Вып. 1 (489). С. 50.
- Богданов Ю.М., Темнов А.М. и др. Двухканальный интегральный переключатель СВЧ // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2006.
 – Вып. 1 (489). С. 27.
- Абакумова, Н. В., Богданов Ю.М., Темнов А. М. и др. Двухканальный интегральный переключатель на ПТШ // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2006. – Вып. 1 (489). С. 31.
- Богданов Ю.М., Темнов А.М. и др. Полнофункциональный ряд дискретных управляющих GaAs МИС // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2006. – Вып. 2 (489). – С. 15 – 18.

Патенты и свидетельства

- Пат. 2654970 РФ. Интегральная схема СВЧ / А. М. Темнов, К. В. Дудинов и др. – Приоритет 2.05.2017.
- Пат. 2657336 РФ. Приемопередающий модуль активной фазированной антенной решетки / А. М. Темнов, К. В. Дудинов и др. – Приоритет 11.05.2017.
- Пат. 2556271 РФ. Интегральная схема СВЧ / А. М. Темнов, К. В. Дудинов, Ю. М. Богданов. – Приоритет 30.12.2013.
- Пат. 2557317 РФ. Способ изготовления интегральной схемы СВЧ / А. М. Темнов, К. В. Дудинов, М. П. Духновский, А. Ю. Городецкий. – Приоритет 30.12.2013.
- Пат. 2474921 РФ. Интегральная схема СВЧ / К. В. Дудинов, А. М. Темнов, М. П. Духновский, А. М. Емельянов. – Приоритет 30.08.2011.
- Пат. 2442241 РФ. Электронный прибор СВЧ / Ю. М. Богданов, А. М. Темнов, К. В. Дудинов, Ф. Е. Щербаков. – Приоритет 25.08.2010.
- Пат. 2393589 РФ. Мощный СВЧ полевой транзистор с барьером Шотки / В. Г. Лапин, К. И. Петров, А. М. Темнов. – Приоритет 25.05.2009.

- Пат. 2361219 РФ. Способ изготовления СВЧ полевого транзистора с барьером Шотки / В. Г. Лапин, К. И. Петров, А. М. Темнов. – Приоритет 09.01.2009.
- Пат. 2307424 РФ. Мощный СВЧ полевой транзистор с барьером Шотки / В. Г. Лапин, К. И. Петров, А. М. Темнов. – Приоритет 02.12.2005.
- Пат. 2258330 РФ. Зонд для измерения электрических характеристик планарных элементов интегральных схем / А. М. Темнов, Н. В. Шульга, В. Л. Наумов, К. В. Дудинов. – Приоритет 11.04.2005.
- Пат. 2293339 РФ. Многоконтактный зонд для испытания планарных элементов интегральных схем / А. М. Темнов, Н. В. Шульга, В. Л. Наумов, К. В. Дудинов. – Приоритет 25.07.2005.
- Пат. 2258330 РФ. СВЧ интегральная схема / А. М. Темнов, К. В. Дудинов,
 В. Л. Наумов. Приоритет 01.08.2003.
- Пат. 2194337 РФ. Устройство для монтажа кристаллов / А. М. Темнов, К.
 В. Дудинов, В. Л. Наумов. Приоритет 22.06.2001.
- 14. Пат. 2079978 РФ. Миниатюрный электретный микрофон/ А. М. Темнов,
 В. П. Снегирев, В. Л. Наумов. Приоритет 08.09.1994.
- 15. Пат. 2076473 РФ. СВЧ интегральная схема / А. М. Темнов, В. Л. Наумов. – Приоритет 25.07.1994.
- 16. Пат. 2076392 РФ. Зондовая головка для измерения параметров кристаллов
 / А. М. Темнов. Приоритет 22.05.1991.
- Пат. 1812642 РФ. Контактное устройство / А. М. Темнов, В. Л. Наумов. Приоритет 14.05.1990.
- Пат. 2076396 РФ. Способ изготовления интегрального прибора СВЧ / А.
 М. Темнов, С. Л. Темнова, Г. В. Зверева. Приоритет 09.07.1987.
- 19. Пат. 2067361 РФ. Тонкопленочная структура / А. М. Темнов, С. Л. Темнова, А. В. Крутов. Приоритет 09.08.1982г.
- Пат. 2076476 РФ. Тонкопленочная структура / А. М. Темнов, С. Л. Темнова. – Приоритет 21.04.1982.

- 21. А. с. 204807 СССР. Конструкция интегрального прибора / А. М. Темнов,
 В. А. Лукъянов, В. Л. Наумов и др. Приоритет 26.05.1983.
- 22. Пат. 2076475 РФ. Тонкопленочная структура / А. М. Темнов. Приоритет 10.11.1980.

Другие публикации по теме диссертации.

- Богданов Ю. М., Дудинов К. В., Темнов А. М. и др. Broadband monolitic IC on GaAs heterostructures for time quantized control of amplitude and phase of microwave oscillations with inbuilt driver// Материалы 20 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 13-17 сентября 2010. Севастополь. «Вебер». С. 189-190.
- Богданов Ю. М., Галдецкий А. В., Темнов А. М. и др. Full-Scale Family of Discrete GaAs Steering Circuits// Материалы 16 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 11-15 сентября 2006. Севастополь. «Вебер». С. 185-186.
- Королев А.Н., Зайцев С.А., Темнов А.М. и др. 60 years of designing microwave devices at «ISTOK»// Материалы 13 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 8-12 сентября 2003. Севастополь. «Вебер». С. 811-813.
- Крутов А.В., Ребров А.С., Темнов А.М. GaAs MMIC design using basic elements library// Материалы 13 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 8-12 сентября 2003. Севастополь. «Вебер». С. 218-220.
- Лапин В.Г., Темнов А.М., Красник В.А., Петров К.И. GaAs microwave power offset gate MESFETs// Материалы 11 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 10-14 сентября 2001. Севастополь. «Вебер». С. 135-136.
- 6. Дудинов К.В., Темнов А.М. Design of microwave hybrid-monolithic integrated circuits with the use of flip-chip technique// Материалы 11 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и

телекоммуникационные технологии». 10-14 сентября 2001. Севастополь. «Вебер». С. 128-129.

 Дудинов К.В., Темнов А.М., Лапин В.Г., Аверин В.В. Application of CVDdiamond substrates for microwave semiconductor devices// Материалы 10 Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". 11-15 сентября 2000. Севастополь. «Вебер». С. 10-12.

Монографии

 А. Г. Михальченков, А. М. Темнов. Транзисторы и интегральные схемы СВЧ, конструкция и технология изготовления//Фрязинская школа электроники/ ООО Издательство «Янус-К». Москва. 2012. С. 275-299.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. РАЗРАБОТАННЫЕ СТЕНДЫ

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.1

СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

Стенд предназначен для проведения измерений входной и выходной мощности, коэффициента усиления и КСВН входа усилителей мощности.

Диапазон частот	8 — 18 ГГц
Мощность на входе	0,01 – 3 Вт
Мощность на выходе	0,01 – 20 Вт
Напряжение питания:	
импульсное, положительное	0 – 30 B
постоянное, отрицательное	0 – 5 B
Импульсный ток	0 – 10 A
Длительность импульса	1 – 99 мкс
Скважность импульса	2 - 99

Основные технические характеристики стенда

Состав стенда

Структурная схема стенда для измерения электрических параметров усилителей приведена на рис. П2.1.1.



Рис. П4.1.1. Структурная схема стенда для измерения электрических

параметров усилителей мощности

В табл. 1 приведены приборы и комплектующие, входящие в состав стенда.

Таблица 1

Наименование	Обозначение, параметры	
Генератор сигналов	E8257D, фирма Agilent, США	
Входной усилитель мощности	Лабораторный, <i>К</i> _у ≥ 35 дБ	
Направленный ответвитель	Коаксиальный	
Направленный ответвитель	Коаксиальный	
Трансформатор согласующий	PeM 3.563.060	
Контактное устройство	КГ11-585	
Трансформатор согласующий	PeM 3.563.060	
Направленный ответвитель	Коаксиальный	
Измеритель мощности	U2021XA, фирма Agilent, CША	
Источник питания измеряемого	Лабораторный	
усилителя		
Блок измерения и питания входного	Лабораторный	
усилителя		
Персональный компьютер с платой	Плата сопряжения АЦП и ЦАП	
Осциллограф	Gw Instek GDS-820C	

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.2

СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО И ОБЪЕМНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ ПАП

Измерение поверхностного и объемного сопротивлений ПАП проводилось методом последовательного вольтметра по схеме, приведенной на рис. П2.2.1.



Рис. П4.2.1. Схема для измерения поверхностного и объемного сопротивлений ПАП

Измерительная схема содержит источник питания и измерительный вольтметр, соединенные последовательно с измерительными зондами 1 и 2. Зонды контактируют с измеряемой пластиной ПАП, лежащей на металлическом столе. Режим работы выбирается с помощью переключателя, имеющего два положения 1 и 2. Зоны могут подниматься и опускаться на металлический стол или на измеряемую пластину. Измерения проводятся в 4 режимах:

1) если переключатель находится в положении 1, а зонды 1 и 2 опущены на металлический стол, вольтметр показывает напряжение источника питания;

2) если переключатель находится в положении 1, зонды 1 и 2 подняты, а между зондами включено постоянное сопротивление (режим измерения входного сопротивления вольтметра), напряжение вольтметра пропорционально его входному сопротивлению;

 если переключатель находится в положении 1, а зонды 1 и 2 опущены на измеряемую пластину, показания вольтметра обратно пропорциональны поверхностному сопротивлению ПАП;

295

 если переключатель находится в положении 2, а зонды 1 и 2 опущены на измеряемую пластину, показания вольтметра обратно пропорциональны объемному сопротивлению ПАП.

В качестве вольтметра используется обычный тестер, имеющий пять пределов измерения напряжения: 1000, 200, 20, 2, 0,2 В.

Перед началом измерений необходимо измерить входное сопротивление вольтметра, которое обычно составляет 10 МОм. Для измерения входного сопротивления вольтметра используется режим 2, когда между зондом 1 и зондом 2 включается постоянное сопротивление 10 МОм. Входное сопротивление вольтметра рассчитывается ПО следующим формулам:

$$R_{\rm B} = U_{\rm B} / I, \qquad I = (U_{\rm II} - U_{\rm B})/10^7,$$

где $R_{\rm B}$ – входное сопротивление вольтметра; $U_{\rm B}$ – напряжение на вольтметре; I – ток в цепи; $U_{\rm n}$ – напряжение источника питания.

Если $U_{\rm m} = 100$ B, $U_{\rm b} = 50$ B, то $R_{\rm b} = 10^7 = 10$ МОм.

Зная входное сопротивление вольтметра, измеряют поверхностное $R_{\text{пов}}$ и объемное $R_{\text{об}}$ сопротивления. Для этого используют режимы 3 и 4.

Величина сопротивлений *R*_{пов} и *R*_{об} рассчитывается по измеренному напряжению вольтметра по следующим формулам:

$$R_x = (U_{\Pi} - U_{B})/I, \qquad I = U_{B}/R_{B}, \qquad R_x = (U_{\Pi} - U_{B}) \cdot R_{B}/U_{B},$$

где R_x – поверхностное или объемное сопротивление; $R_{\rm B}$ – входное сопротивление вольтметра; $U_{\rm B}$ – напряжение на вольтметре; I – ток в цепи; $U_{\rm n}$ – напряжение источника питания.

Схема позволяет измерять сопротивление R_x в диапазоне $10^4...10^{13}$ Ом.

Общепринято измерять поверхностное и объемное сопротивления в Ом·см.

Аналогично проводились измерения гетеропластин со структурой ПАП-Si до отделения ПАП.

СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПАП

Измерение теплопроводности ПАП проводилось на стенде ИОФ РАН (г. Москва). Стенд позволяет измерять теплопроводность тонких пластин флэш-методом в направлении, перпендикулярном поверхности пластины, как при комнатной температуре для образцов большой площади, так и в диапазоне температур от -50 до 200 °C для образцов не более 10×10 мм. Толщина пластин не должна превышать 0,8 мм, измерение пластин большей толщины возможно только для примерной оценки теплопроводности.

Стенд состоит из следующих частей:

- Nd:YAG-лазер с блоком питания;
- оптическая часть;

– ИК-приёмник для измерений при комнатной температуре и криостат для измерений в интервале температур от -50 до 200 °C;

- персональный компьютер с АЦП, с программным обеспечением;
- блок контроля и поддержания температуры.

На рис. П2.3.1 приведена блок-схема стенда.



Рис. П4.3.1. Блок-схема стенда измерения теплопроводности

СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ ОТВЕРСТИЙ В ПАП

Для измерения глубины отверстий автор предложил специальный стенд, представленный на рис. П4.4.1.



Рис. П4.4.1. Стенд для измерения глубины отверстий:

чертеж (а), внешний вид (б)

Стенд содержит основание 1, на котором размещены следующие элементы конструкции:

двухкоординатная каретка 2;

рабочий стол 3;

индикатор глубины 4 с упором 5;

 однокоординатная каретка 6 с упором 7 в виде шарикоподшипника;

– однокоординатная каретка 8 с упором 9 в виде клина;

коромысло 10, на одном конце которого размещен
 измерительный зонд 11, а на другом – изолированный контакт 12;

 заземленный контакт 13 на винте 14 вертикального перемещения земляного контакта;

индикаторный светодиод 15 для индикации соединения контактов;

кулачковый механизм подъема зонда 16.

Устройство для измерения глубины отверстий позволяет измерять глубину отверстий диаметром от 50 мкм и более в пластине толщиной до 500 мкм. Измерительный зонд 11 закреплен на одном конце коромысла 10, а на другом конце – изолированный контакт 12. Коромысло 10 является уравновешенным, имеет плечи одинаковой длины. Разбаланс коромысла 10 создается за счет выполнения его плеч из разного материала, латуни и дуралюминия. Разбаланс коромысла 10 составляет 1...2 г.

Измерительный зонд является наиболее хрупким элементом конструкции устройства. Он изготавливается из вольфрамовой проволоки диаметром 500 мкм, при этом конец зонда затачивается до диаметра 25 мкм с помощью процесса электрохимической полировки.

Малая толщина зонда требует аккуратного обращения и плавного опускания его на измеряемую поверхность пластины.

В исходном положении зонд 11 всегда поднят над поверхностью стола с помощью кулачкового механизма.

Индикаторный светодиод 15 служит для индикации соединения контактов, а именно: изолированного контакта 12 и заземленного контакта 13. При соединении изолированного контакта 12 и заземленного контакта 13 индикаторный светодиод 15 загорается, а при разрыве – гаснет. Для надежного контактирования контакты выполнены из отрезков платиновой проволоки диаметром 0,5 мм.

Схема включения светодиода 15 последовательная, содержит:

- источник питания постоянного тока, любой, напряжением 9 В;

последовательный резистор;

- изолированный контакт 12;

– заземленный контакт 13.

Для точного попадания зонда в измеряемое отверстие устройство оснащается микроскопом. Принцип работы устройства для измерения глубины отверстий следующий.

Перед проведением измерений глубины отверстий необходимо провести калибровку устройства:

1. Вращая винт перемещения однокоординатной каретки 6, поставить индикатор глубины 4 в среднее положение.

2. Опустить зонд 11 на поверхность стола с помощью кулачкового механизма 16.

3. Плавным вращением винта 14 вертикального перемещения земляного контакта 13 добиться положения, когда индикаторный светодиод 15 погаснет.

4. Поднять зонд 11 на поверхность стола с помощью кулачкового механизма 16.

Для измерения глубины отверстий необходимо:

1. Положить на стол 3 измеряемую пластину.

2. С помощью двухкоординатной каретки 2 переместить стол с пластиной так, чтобы в поле зрения микроскопа оказалось измеряемое отверстие.

3. Аккуратно опустить зонд 11 на поверхность пластины, рядом с измеряемым отверстием.

4. Вращая винт перемещения однокоординатной каретки 6, поставить индикатор глубины 4 в положение, когда индикаторный светодиод 15 загорится, и записать показания индикатора *h*₁.

5. Аккуратно поднять зонд 11 над поверхностью пластины, чтобы он был виден в поле зрения микроскопа.

6. С помощью двухкоординатной каретки 2 переместить стол с пластиной так, чтобы в поле зрения микроскопа зонд 11 оказался точно над измеряемым отверстием.

7. Аккуратно опустить зонд 11 в отверстие пластины с помощью кулачкового механизма 16, при этом индикаторный светодиод 15 будет гореть.

8. Вращая винт перемещения однокоординатной каретки 6, поставить индикатор глубины 4 в положение, когда индикаторный светодиод 15 погаснет, и записать показания индикатора h_2 .

9. Аккуратно поднять зонд 11 над поверхностью пластины с помощью кулачкового механизма 16.

10. Рассчитать глубину отверстия по формуле $H = h_2 - h_1$.

11. Для картирования глубины отверстий по площади образца переместить пластинку таким образом, чтобы следующее измеряемое отверстие на поверхности пластины оказалась в поле зрения микроскопа, и повторить измерение.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.5

ЗОНДОВОЕ КОНТАКТНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СВЧ-, ВЧ- И НЧ- ПАРАМЕТРОВ ГМИС И МИС СВЧ В КОРПУСЕ SMD

За рубежом для измерения параметров МИС СВЧ в корпусе SMD используются специальные тестовые платы. Эти платы содержат: СВЧразъемы для подачи СВЧ-сигнала, НЧ- и ВЧ-разъемы для подачи питания и управления, необходимые *R*-, *L*-, *C*- элементы, линии передачи и выводы для монтажа на плату корпуса SMD.

Монтаж МИС СВЧ в корпусе SMD на плату осуществляется пайкой методом поверхностного монтажа по технологии SMT. На тестовых платах измеряются все параметры МИС в корпусе SMD. Метод тестовой платы позволяет делать только выборочный контроль МИС СВЧ в корпусе SMD, т. к. после измерения параметров МИС СВЧ непригодны для дальнейшего использования.

Автор предложил конструкцию контактного устройства для проведения сплошного контроля параметров МИС СВЧ в корпусе SMD. На

рис. П4.5.1 приведена конструкция контактного устройства для проведения сплошного контроля параметров МИС СВЧ в корпусе SMD.



Рис. П4.5.1. Конструкция контактного устройства для проведения сплошного контроля параметров МИС СВЧ в корпусе SMD (a); конструкция контактного устройства без крышки (δ);

Контактное устройство содержит корпус, имеющий два коаксиальных СВЧ-вывода: один для входа, другой для выхода СВЧ-сигнала, выводы НЧ и ВЧ предназначены для подачи питания и управления. В корпусе контактного устройства расположена первая печатная плата с *R*-, *L*-, *C*-элементами, линиями передачи и выводами. В центре печатной платы имеются отверстие и металлическая контактная площадка, служащая теплоотводом. Выводы на плате расположены в строгом соответствии с контактами корпуса SMD. Для строгого позиционирования корпуса SMD над первой платой установлена вторая печатная плата с отверстием в центре. Корпус SMD устанавливается в второй печатной плате контактами вниз. окно Контактирование на осуществляется за счет подачи усилия на крышку корпуса. При этом центральная контактная площадка корпуса SMD упирается в теплоотвод и заземляется, а выводы корпуса соединяются с выводами первой печатной платы. Прижим осуществляется крышкой, в центре которой расположен толкатель, передающий усилие на крышку корпуса SMD. Величина усилия регулируется пружиной.

Для измерения КСВН и прямых потерь в корпус SMD монтировалась МПЛ на плате арсенида галлия толщиной 100 мкм. Измерения проводились в диапазоне до 20 ГГц. Результаты измерения параметров контактного устройства совместно с корпусом SMD приведены на рис. П2.5.2.



Рис. П2.5.2. Результаты измерения КСВН и потерь контактного устройства совместно с корпусом SMD

КСВН и потери в контактном устройстве измерялись с помощью векторного анализатора цепей № 5244А (фирмы Keysight).