На правах рукописи

ТЕМНОВ Александр Михайлович

Front

ГИБРИДНО-МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СВЧ

Специальность 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

> Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

> > г. Фрязино 2020 г.

Работа выполнена в АКЦИОНЕРНОМ ОБЩЕСТВЕ «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «ИСТОК» ИМЕНИ А. И. ШОКИНА»

Официальные оппоненты:

Гамкрелидзе Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, директор (ИСВЧПЭ РАН) Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова, РАН, г. Москва.

Горбацевич Александр Алексеевич – академик РАН,

доктор физико-математических наук, (ФГБУН) Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва.

Журавлев Константин Сергеевич – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Ведущая организация: АО "Российские космические системы" (РКС), Акционерное общество "Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем", г. Москва.

Защита состоится «18» июня 2020 г в 14:00 на заседании диссертационного совета Д409.001.01 на базе АО «НПП «Исток» по адресу: 141190, Московская область, г. Фрязино, Вокзальная, д. 2а. Большой конференц-зал. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «НПП «Исток» им. Шокина» и на сайте http://www.istokmw.ru/avtoreferati-dissertaciy.

Автореферат разослан «14» апреля 2020 г. Учёный секретарь диссертационного совета кандидат технических наук Куликова И. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение обороноспособности России невозможно без создания конкурентоспособных систем радиоэлектронного уровня высокими вооружения мирового С тактико-техническими характеристиками. Высокие требования радиоэлектронной аппаратуры СВЧ компонентами обеспечиваются отечественной электронной компонентной базы СВЧ (ЭКБ СВЧ) с высокими СВЧ параметрами и надежностью, малыми массогабаритными характеристиками, техникоэффективностью, экономической технологичностью, устойчивостью К воздействию внешних факторов, серийно пригодностью и др.

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.

Для создания такой аппаратуры оказались непригодны 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). 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

3

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.

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 конструктивнотехнологических 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 на монолитной диэлектрической плате, а навесными были кристаллы активных компонентов, минимизированные по площади.

Новый тип интегральных схем СВЧ был назван гибридно-монолитными интегральными схемами (ГМИС) СВЧ.

Первые сообщения о создании аналогичных зарубежных ГМИС СВЧ

4

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 ГМИС СВЧ 1) разработка концепции создания с высокими 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 пассивной 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.

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:

1. 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 (R, L, C) элементы, межсоединения и пассивные выводы, все обеспечивающая высокие СВЧ параметры и надежность, и улучшение сравнению более 3 раз массогабаритных характеристик по С 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
 ...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.

- 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 пассивированных 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 2...20 ΓГц широкополосных усилительных диапазона 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 пироко 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 October 2000, Paris; "CBЧ - техника и телекоммуникационные 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.

Личный вклад

Впервые в отечественной и зарубежной практике автор предложил конструкцию ГМИС СВЧ оригинальную на основе подвешенной копланарной монолитной сапфировой Разработал линии И платы. технологию изготовления монолитных сапфировых плат, создал сапфировый технологический базис. Организовал серийное производство усилительных, преобразовательных, генераторных ГМИС СВЧ различного функционального назначения на GaAs ПТШ и МИС СВЧ и создал усилительные ГМИС СВЧ мозаичной конструкции на GaN ПТШ. С участием автора на предприятии АО «НПП «Исток» им. Шокина» построена пилотная линия и создан арсенидгаллиевый технологический базис по разработке и производству GaAs ПТШ, МИС СВЧ и пассивных плат для ГМИС СВЧ.

Впервые в отечественной и зарубежной практике предложил конструкцию мощных усилительных ГМИС СВЧ, в том числе для поверхностного монтажа на одной алмазной плате с объемной алмазной крышкой. Разработал технологию изготовления монолитных алмазных плат с металлизированными отверстиями и алмазных крышек по групповой планарной технологии. Создал мощные усилительные ГМИС СВЧ на алмазе, в том числе поверхностного монтажа, а также контактное устройство для сплошного неразрушающего контроля их параметров.

- Статьи (1, 10, 11) написаны автором лично; в статьях (6 10, 14, 15) принято участие в постановке задачи, написании статьи, получении, обработке и обсуждении результатов; в статьях (5, 12, 15 – 20) принято участие в постановке задачи и обсуждении результатов. Более 51 % объема опубликованных работ принадлежит соискателю.
- Патенты (16, 22) принадлежат лично автору; в патентах (1 − 4), (10 − 21) основной автор; в патентах (5 − 9) ведущий соавтор.
- 3. Научный руководитель 8 НИР и главный конструктор 23 ОКР.

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.

<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 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 (полосы рабочих частот, равномерности коэффициента усиления, коэффициента шума, КСВН, выходной мощности, КПД и т.д.) необходимо обеспечить оптимальные нагрузки на входе и выходе каскада. Для синтеза оптимальных нагрузок и обеспечения согласования ПТШ с генератором и нагрузкой в узкополосных усилителях используются преимущественно индуктивные отрезки МПЛ и КЛЭ линий длиной менее $l < \lambda/4$, имеющие высокую добротность. На рис. 1 приведена электрическая схема однокаскадного узкополосного малошумящего усилителя на ПТШ.



Рис. 1. 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*. Во входной цепи ПТШ установлена согласующе-

трансформирующая цепь, состоящая из индуктивностей L1 и L2 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 по постоянному току развязывающие конденсаторы Cp1 и Cp2.

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 (рис. 1) проведено сравнение конструкции и технологии изготовления, известных микрополосковых ГИС СВЧ, приведенных на рис 2.



Рис. 2. Одноплатная ГИС СВЧ (а); многоплатная (мозаичная) (б)

Маломощная одноплатная ГИС СВЧ (рис. 2 а), в которой все элементы и навесные компоненты (конденсаторы и кристаллы ПТШ) размещены на одной плате. Мощная многоплатная (*мозаичная*) ГИС СВЧ (рис. 2 б), в которой все элементы и навесные компоненты (конденсаторы и кристаллы

ПТШ) размещались на нескольких платах и одном теплопроводящем основании. Платы ГИС СВЧ изготавливались групповым способом, имели одноуровневую металлизацию и позволяли интегрировать индуктивные элементы – L в виде распределенных отрезков микрополосковой линии (длиной до 0.25 λ) и резисторы – R, а навесными компонентами были конденсаторы – C и кристалл ПТШ – T. Для заземления шунтирующих элементов в плате формировались металлизированные отверстия. ПТШ имели существенный разброс параметров, поэтому перед установкой в ГИС СВЧ кристаллы ПТШ проходили тщательный отбор по НЧ, ВЧ и СВЧ на заданные параметры использовались подстраиваемые элементы.

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 10^3 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 (рис. 1) проведен анализ конструкции и технологии изготовления МИС СВЧ, приведенной на рис 3.



Рис. 3. Микрополосковая конструкция МИС СВЧ на ПТШ

Кристаллы МИС СВЧ изготавливались групповым способом, имели двухуровневую металлизацию и содержали активные и сосредоточенные пассивные элементы (R, L, C). Геометрические размеры пассивных элементов были менее 0.1 λ . Для заземления шунтирующих элементов в кристалле формировались металлизированные отверстия. МИС СВЧ не имели *подстраиваемых* элементов и проволочных соединений, что значительно повышало требования к точности их расчета, совершенству материала и точности их изготовления, и обеспечивало высокую надежность.

Достоинства МИС СВЧ: все активные и сосредоточенные пассивные элементы формируются на одном кристалле монолитно по групповой планарной технологии и прецизионной литографии, 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 (рис. 1) 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 при толщине подложки 500 мкм порядка 400, что обеспечивает высокие СВЧ параметры ГИС СВЧ.

В разделе 1.4. на основе проведенного обзора и сравнения ГИС и МИС СВЧ показано, что единственным типом интегральных СВЧ схем сантиметрового диапазона частот были микрополосковые ГИС СВЧ, которые 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 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 схем, 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;
- 2) Навесными на плате ГМИС СВЧ являются только кристаллы активных компонентов, минимизированные по площади.

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 формировалось 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. 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 показанная на рис. 4. Определены направления исследования.



Рис. 4. Классификация ГМИС СВЧ

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.

$$\lambda_{\text{ГМИС}} = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i , \text{ T}_{\gamma} = -\ln(\gamma) / \sum_{i=1}^{N} \lambda_i$$
 (1, 2)

Где Т_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. 1.

Таблица 1

Тип элемента	λ·10 ⁸ 1/час
Конденсаторы (дискретные)	16
оксидно-полупроводниковые	
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_{Γ} навесных активных элементов.

ГМИС СВЧ однокаскадный усилитель (рис. 1) 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. Результаты расчета надежности ГМИС СВЧ приведены в табл. 2.

Таблица 2

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 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 $\lambda_{\Pi \Gamma \mu c} = \lambda_{C} + \lambda_{L} + \lambda_{R} = ((6 \cdot 4) + (0.1 \cdot 4) + (1)) \cdot 10^{-8} = 25.4 \cdot 10^{-8}.$

Применения навесных конденсаторов увеличивает интенсивность отказа пассивной части ГИС СВЧ в 9 раз, а 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.

ГМИС СВЧ будут иметь наработку до отказа приблизительно в 2 раз больше по сравнению с аналогичными ГИС СВЧ.

Дано 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 на монолитной диэлектрической плате, содержащей интегральные (R, L, C) элементы, межсоединения и выводы, а навесные – только кристаллы активных компонентов.

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 для включения шунтирующих элементов необходимы В КЛЭ металлизированные отверстия. сигнальный И заземляющий проводники лежат в одной плоскости и 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, которая снижает добротность линии $Q = \frac{Z_B}{R} = \frac{\left(\sqrt{\frac{L}{c}}\right)}{R}$. 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 21

проницаемостью подложки, а вторая воздушная. При этом общая емкость становится меньше наименьшей, а параметры КЛ слабо зависят от толщины подложки. 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 на подложках поликора, сапфира и GaAs, при этом длина волны $\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon\mu}}$, а замедление $\sqrt{\epsilon\mu} = \frac{c}{f\lambda}$. Результаты сравнения в табл. 3.

Таблица 3

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 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 отсутствия контактных устройств. Поэтому для экспериментального

исследования СВЧ потерь автором была 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 одной сапфировой платы, показанное на рис. 5.



Рис. 5. Конструкция ГМИС СВЧ на основе КЛ:

в разрезе (a); в изометрии (δ)

Bce сосредоточенные пассивные элементы И заземляющая металлизация, а также кристалл ПТШ расположены на одной стороне сапфировой платы. Существенную часть платы занимает заземляющая Нижние обкладки металлизация. блокировочных конденсаторов располагаются под металлизацией, a разделительные конденсаторы,

резисторы, индуктивности и выводы формируются в окнах, вскрытых в металлизации. Расположение всех элементов ГМИС СВЧ на одной стороне платы, отсутствие металлизированных 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, показанные на рис. 6.



a)

Рис. 6. Конструкции ГМИС СВЧ вариант 1 (а); вариант 2 (б)

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 усилительных ГМИС СВЧ, показана на рис. 7.



Рис. 7. Электрическая схема однокаскадного усилителя

Воздействие статического электричества на выводы ГМИС СВЧ, а также скачки напряжения, в том числе в момент включения и выключения и источника питания 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 *R2* и 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.

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 соответствующей схеме (рис. 7). 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. Для конструкции ГМИС СВЧ, показанной на (рис. 5), 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 °C. Зависимость величины температурного перегрева канала ПТШ от суммарной выделяемой мощности приведена на рис. 8.



Рис. 8. Температурный перегрев канала ПТШ

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

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

- 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 диэлектрических слоев SiO₂ И Ta_2O_5 для формирования МДМ-И 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 полученные ВЧ-распылением, tqδ пленки. имеют лучше 0.001. планирования Оптимизированы С помощью метода эксперимента технологические режимы напыления слоев SiO₂ и Ta₂O₅. Найдены математические уравнения, описывающие технологический процесс.

Для SiO₂:
$$y_1 = (118.1 - 22.7 x_1 + 45x_2 - 47.7 (x_2)^2 + 10x_2 x_3),$$
 (3)

$$y_2 = (7.87 + 2.08 x_1 - 3.16x_2 + 6.27 (x_2)^2 + 2.31x_2 x_3),$$
(4)

Для Ta₂O₅: $y_1 = (475.9 - 342.9 x_1 + 73.3x_2 + 61.5x_3 + 183.6 (x_2)^2 - (5))$

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

$$y_2 = (29.67 + 4x_2 - 3.91x_3 - 5x_2x_3 - 5.5x_1x_2x_3), \tag{6}$$

Где параметры оптимизации: yl – удельная емкость конденсатора, $y2 - tg\delta 10^{-4}$, факторы технологического процесса: x_1, x_2, x_3 .

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 SiO_2 и Ta_2O_5 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 рис. 9.



Рис. 9. Технологический процесс изготовления монолитной сапфировой платы ГМИС СВЧ

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, a *tg* δ менее 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 за счет 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. При создании первой промышленной ГМИС СВЧ – узкополосного малошумящего усилителя Х-диапазона частот решено было отказаться от традиционного подхода соединения двух однокаскадных 30

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.

Создана ГМИС СВЧ узкополосного двухкаскадного усилителя Lдиапазона 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.

Промышленные конструкции узкополосных усилительных ГМИС СВЧ без металлического основания и крышки показаны на рис. 10.





Рис. 10. Промышленные двухкаскадные усилители: Х-диапазона частот (*a*); L-диапазона частот (*б*)

Для усилителя Х-диапазона частот индуктивные элементы выполнены в виде одновитковых, а L-диапазона частот в виде спиральных элементов.

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.

Для создания широкополосных усилителей наиболее 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. Выбор схемного решения и расчет широкополосной усилительной ГМИС СВЧ с диссипативными согласующе-выравнивающими цепями ГМИС СВЧ проводился для двухкаскадного усилителя. 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.

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 32

ГМИС СВЧ. Показано, что для подавления частот сигнала и накачки необходимы балансные преобразователя частоты, при создании которых 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 (АБПЧ) на ПТШ. На основе МИС АБПЧ была создана ГМИС СВЧ 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.

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.

Промышленные конструкции созданных балансных преобразователей и смесителей частоты сантиметрового диапазона длин волн, без металлического основания и крышки, показаны на рис. 11.





Рис. 11. Промышленные преобразователи частоты: преобразователь частот (*a*); смеситель частоты (*б*)

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.

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.

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.

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.

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.

Для уменьшения массы и габаритов создана ГМИС СВЧ мозаичной конструкции на алмазном основании и арсенидгаллиевых платах – предварительный усилитель мощности (ПУМ) диапазона 9...10 ГГц, который 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 усилителей с выходной мощностью более 0.6 Вт на GaAs ПТШ и МИС СВЧ.

Созданы мощные усилительные ГМИС СВЧ мозаичной конструкции на GaN ПТШ, которые имели усиление порядка 9...18 дБ, выходную мощность 5, 10, 17 Вт при КПД более 40 % и напряжении питания +30 В.

На основе мозаичной конструкции был 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.

ГМИС СВЧ мозаичной конструкции нашли применение на других предприятиях отрасли.

В седьмой главе 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.

Конструкция ГМИС СВЧ на одной алмазной плате – однокаскадного усилителя мощности на ПТШ показана на рис. 12.



Рис. 12. Конструкция ГМИС СВЧ на монолитной алмазной плате

ГМИС СВЧ на монолитной алмазной плате позволили:

- разместить на одной стороне алмазной платы все пассивные элементы и навесные кристаллы активных компонентов;
- изготавливать монолитную пассивную часть ГМИС СВЧ, содержащую все пассивные (*R*, *L*, *C*) элементы, межсоединения и выводы, на одной стороне алмазной платы, заземляющую металлизацию на обратной стороне платы, а в объеме платы металлизированные отверстия, по групповой планарной технологии и прецизионной литографии.

Впервые в отечественной и зарубежной практике автором в 2016 г предложена и создана оригинальная конструкция ГМИС СВЧ-SMD для поверхностного монтажа на печатную плату. Конструкция ГМИС СВЧ-SMD, содержащая алмазное основание и объемную алмазную крышку из ПАП показана на рис. 13.



Рис. 13. Конструкция ГМИС СВЧ-SMD с алмазным основанием и объемной алмазной крышкой

ГМИС СВЧ-SMD состоит из диэлектрического алмазного основания и объемной алмазной крышки, отличительной особенностью которой 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.

Поликристаллическая алмазная пленка – ПАП выращивалась из газовой фазы водорода и метана методом CVD в CBЧ плазме на поверхности жертвенной пластины кремния 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.

$$y = (1,012 + 0,025x_1 + 0,062x_2 - 0,055x_3 - 0,04x_1x_2 - 0,023x_1x_3 + 0 \cdot x_2x_3 - (7))$$

- 0,033 $x_1x_2x_3$), где: *у* – скорость травления, x_1 , x_2 , x_3 – факторы процесса.

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.

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.

Для изготовления алмазных крышек ГМИС СВЧ из ПАП был использован темплат метод, позволяющий в одном технологическом процессе изготавливать по групповой технологии объемные алмазные крышки размерами 5×5 мм, 4×4 мм, 3×3 мм, 2×2 мм, для разделения которых использовалась установка лазерного фрезерования.

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.

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.

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.

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 алмазе. Показано, что использование ГМИС СВЧ в качестве объединительной алмазной платы позволит создать ППМ АФАР с архитектурой 3D и улучшить более 10 раз массогабаритные характеристики по сравнению с конструкциями ППМ АФАР архитектурой 2D.

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.

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 0.6 Вт 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 технологический процесс плате, создан изготовления монолитной алмазной платы и объемной алмазной крышки по групповой прецизионной литографии. Созданы планарной технологии И 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.

Публикации по теме диссертации

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 ku-диапазона с выходной мощностью 1 Вт/ // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. 2019. Вып. 3(542). С107.
- 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.
- 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.
- 8. 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.
- Темнов А.М. Анализ монолитных интегральных схем СВЧ для приемопередающих 2D и 3D модулей АФАР X-диапазона//Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2014. Вып. 1 (520). С. 45 – 53.
- 11. Темнов А.М. Анализ монолитных интегральных схем СВЧ для приемопередающих 2D и 3D модулей АФАР X-диапазона//Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2014. Вып. 2 (521). С. 23 – 32.
- Лапин В.Г., Петров К.И., Темнов А.М. и др. Полевые транзисторы со смещенным затвором//Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2011. – Вып. 4 (511). С. 59 – 71.
- 13. Темнов А.М., Дудинов К.В., Богданов Ю.М. и др. Комплект широкополосных СВЧ-микросхем на гетероструктурах А₃В₅ для ППМ АФАР *X*-диапазона// Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2010. Вып. 2 (505). С. 30 – 49.
- 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. СВЧ-техника. – 2009. Вып. 2 (501). С. 31 – 44.
- 15. Богданов Ю.М., Темнов А.М, Щербаков Ф.Е. и др. Монолитный двухпозиционный переключатель для диапазона частот 0,5...18 ГГц, согласованный по всем каналам// Электронная техника. Сер. 1. СВЧтехника. 2007. Вып. 1 (489). С. 33 – 37.
- 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, 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).С. 50.

- Богданов Ю.М., Темнов А.М, Щербаков Ф.Е. и др. Двухканальный интегральный переключатель СВЧ//Электронная техника. Сер. 1. СВЧтехника. 2006. Вып. 1 (489). С. 27 – 30.
- 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 – 36.
- 20. Богданов Ю.М., Темнов А.М, Щербаков Ф.Е. и др. Полнофункциональный ряд дискретных управляющих GaAs МИС//Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2006. Вып. 2(489). С.15. Патенты и свидетельства
- Пат. 2654970 РФ. Интегральная схема СВЧ / А.М. Темнов, К.В. Дудинов и др. – Приоритет 2.05.2017.
- 2. Пат. 2657336 РФ. Приемопередающий модуль активной фазированной антенной решетки / А.М. Темнов, К.В. Дудинов 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.
- 13.Пат. 2194337 РФ. Устройство для монтажа кристаллов/А.М. Темнов, К.В. Дудинов, В.Л. Наумов. – Приоритет 22.06.2001.
- 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.
- Пат. 2076392 РФ. Зондовая головка для измерения параметров кристаллов/ А.М. Темнов. – Приоритет 22.05.1991.
- 17. 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.
- Пат. 2067361 РФ. Тонкопленочная структура/А.М. Темнов, С.Л. Темнова, А.В. Крутов. – Приоритет 09.08.1982г.
- 20. Пат. 2076476 РФ. Тонкопленочная структура/А.М. Темнов, С.Л. Темнова.
 Приоритет 21.04.1982.
- 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.
- 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

 Михальченков А.Г., Темнов А.М. Фрязинская школа электроники, Транзисторы и интегральные схемы СВЧ, конструкция и технология изготовления// ООО Издательство «Янус-К», Москва, 2012 г, Стр. 275.