

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Темнова Александра Михайловича  
**«ГИБРИДНО-МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СВЧ»**  
на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,  
микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

**Актуальность темы.** Твердотельная сверхвысокочастотная электроника является ключевым направлением, во многом определяющим облик и области применения различных технических устройств в повседневной деятельности человека. Расширение функциональных возможностей и повышение технических характеристик приборов СВЧ электроники активно стимулирует развитие систем сотовой связи, телекоммуникации, радиолокации гражданских и военных применений. Тенденция миниатюризации при одновременном увеличении функциональных возможностей и уменьшении стоимости устройств СВЧ-техники позволила создать многие революционные продукты, изменившие образ жизни людей. Потребительские свойства сложных СВЧ устройств напрямую определяются характеристиками исходных СВЧ модулей, применяемых для их изготовления. Это делает актуальным поиск новых конструкций и путей создания СВЧ модулей. Диссертационная работа Темнова А.М. посвящена поиску новых конструктивных решений и развитию технологии получения СВЧ модулей для новых поколений наземной и бортовой аппаратуры. Комплексное исследование на стыке радиотехники, материаловедения и технологии, направленное на миниатюризацию, повышение надёжности с учетом рентабельности промышленного выпуска СВЧ модулей на основе полупроводников типа  $A_3B_5$  делает **актуальной** тему представленной к защите диссертационной работы.

**Диссертационная работа состоит** из введения, восьми глав с выводами в конце каждой главы, заключения с перечнем основных выводов диссертации, списка использованных литературных источников и 4-х приложений. Общий объем диссертации 303 страницы машинописного текста, в том числе 4 приложение на 11 страницах, 58 таблиц, 93 рисунка и список литературы из 278 наименований.

Во введении отражены требуемые признаки квалификационной работы, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук - актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, цель работы, задачи и методы исследования, научная новизна и практическая значимость результатов, степень достоверности и апробация работы, а также научные положения, выносимые на защиту.

В главе 1, посвященной обзору интегральных СВЧ схем, представлены основные их параметры, дан обзор гибридных и монокристаллических интегральных СВЧ схем (ГИС и МИС), показаны их достоинства и недостатки. Предложена концепция построения гибридно-монокристаллических интегральных схем (ГМИС) СВЧ, заключающаяся в создании монокристаллической платы содержащей пассивные элементы ( $R$ ,  $C$ ,  $L$  элементы, межсоединения, выводы) и навесные активные СВЧ компоненты (кристаллы полупроводниковых диодов, транзисторов и МИС), изготовленные по групповым, но различным технологиям. Дана оценка надёжности ГМИС, показано, что надёжность ГМИС не менее, чем в 2 раза выше надёжности ГИС за счёт интегрального исполнения конденсаторов и сокращения числа проволочных соединений между навесными элементами ГИС.

Глава 2 диссертации посвящена разработке конструкции ГМИС СВЧ на сапфире. Проведено сравнение микрополосковой (МПЛ) и копланарной линий (КЛ) и показано, что при выборе конструкции КЛ с воздушным зазором между подложкой и основанием она имеет параметры не хуже, чем МПЛ, а по добротности - на 30 % лучше. Более того, при использовании КЛ обеспечивается создание всей ГМИС СВЧ на одной стороне диэлектрической подложки и не требуется изготавливать металлизированные отверстия. Предложена оригинальная конструкция ГМИС СВЧ, содержащая монолитную сапфировую плату, рамку из поликора с МПЛ выводами и керамическую крышку, размещенные на металлическом основании с «обращенным» монтажом платы в корпус. Описаны особенности конструкций пассивных элементов - подстраиваемых тонкоплёночных резисторов, конденсаторов и индуктивностей с воздушными мостами. Проведен анализ максимальной рассеиваемой мощности ГМИС СВЧ на монолитной сапфировой подложке и определены ограничения по величине допустимой мощности рассеяния (порядка 1 Вт). На основании представленных материалов сформулированы общие принципы и правила конструирования ГМИС СВЧ.

В главе 3 диссертации обосновывается выбор технологического базиса для создания ГМИС СВЧ. С учётом предложенной конструкции ГМИС СВЧ определены принципиальные особенности материалов, отдельных технологических процессов и маршрутов, необходимых для реализации модулей. Описаны технологии изготовления и результаты испытаний образцов ГМИС СВЧ на воздействие внешних воздействующих факторов и на надёжность. Показано, что для отдельных типов ГМИС СВЧ достигнута минимальная наработка на отказ в 100 000 часов.

В главе 4 рассмотрены усилительные ГМИС СВЧ малой мощности (с выходной СВЧ мощностью до 100 мВт) на кристаллах полевых транзисторов с барьером Шоттки (ПТШ) и МИС СВЧ на GaAs. Представлены электрические схемы ГМИС, конструкции и достигнутые характеристики. В том числе, описаны ряды двухкаскадных малошумящих узкополосных усилительных ГМИС, перекрывающих диапазон частот от 7 до 16,6 ГГц в количестве 8 типов с шириной полосы рабочих частот от 5 до 14 % и коэффициентом шума от 2,5 до 5 дБ. Ряд малошумящих усилителей L-диапазона частот (1,4-1,7 ГГц) с коэффициентом усиления 20 дБ и коэффициентом шума не более 2 дБ, и наработкой до отказа 100000 часов. Широкополосные усилители, перекрывающие диапазон частот от 0,4 до 18 ГГц с шириной рабочей полосы частот от 12 до 30 %. Широкополосный однокаскадный усилитель бегущей волны (2 типа) на базе МИС разработанной АО НПП «Исток» им. Шокина», работающий в диапазоне частот от 1 до 12 ГГц. Создание и налаживание выпуска полнофункциональных рядов усилительных ГМИС СВЧ, являющихся унифицированными рядами модулей для бортовых и наземных СВЧ устройств различного применения представляет большую практическую ценность.

Глава 5 посвящена преобразовательным ГМИС СВЧ. Основное внимание уделено умножителям и делителям частоты. Рассмотрены электрические схемы и конструкции балансных преобразователей частоты на основе ПТШ, унифицированный ряд которых перекрывает диапазон частот от 2 до 12 ГГц, а отдельные типы преобразователей работают до 17 ГГц. Представлены балансные смесители на ПТШ, работающие в диапазоне частот от 2 до 18 ГГц и при этом обеспечивающие низкие частоты преобразования (от 0,01 до 2 ГГц). Балансные умножители на ПТШ с коэффициентом умножения 2 перекрывают диапазон частот от 1 до 18 ГГц восемью типами унифицированного ряда и выполнены на двух ПТШ. Балансные делители частоты (2:1) перекрывают 11-ю типами диапазон частот от 1 до 12 ГГц. Генераторы

частоты двухкаскадные на ПТШ разработаны в диапазоне частот от 4,5 до 12 ГГц и имеют выходную мощностью 25 и 50 мВт с фазовыми шумами (при отстройке 10 кГц) минус 90 и минус 105 дБ/Гц. Большинство преобразовательных ГМИС СВЧ выпускается серийно.

В главе 6 рассмотрены особенности реализации мощных узкополосных и широкополосных ГМИС СВЧ мозаичной конструкции. Для улучшения теплоотвода кристаллы активных СВЧ компонентов монтируются непосредственно на металлические или алмазные основания, на которые монтируются и сапфировые платы, содержащие пассивные элементы. Представлены электрические схемы, конструкции и параметры узкополосных усилителей мощности диапазона частот от 7 до 20 ГГц с выходной мощностью порядка 250 мВт, а также предварительный усилитель мощности X-диапазона частот с выходной мощностью порядка 600 мВт на GaAs ПТШ и выходные усилители мощности X-диапазона частот с выходными импульсными мощностями 5, 10 и 17 Вт на GaN ПТШ. Продемонстрировано, что такая мозаичная конструкция ГМИС СВЧ модулей благодаря малой толщине диэлектрических и полупроводниковых подложек (до 100 мкм) обеспечивает габариты, не превышающие габариты ГМИС СВЧ на монолитной сапфировой плате, и обеспечивает повышение импульсной выходной мощности усилителей X-диапазона частот до 17 Вт за счет улучшение теплоотвода.

Глава 7 посвящена созданию ГМИС СВЧ на алмазе. Отмечены недостатки мозаичных ГМИС СВЧ на сапфире (недостаточная степень интеграции, возрастание числа проволочных соединений). Рассмотрены перспективные высокотеплопроводные подложки, показано, что наиболее перспективными являются алмаз и графен, но в настоящее время технология получения графена для промышленного применения отсутствует. Впервые предложено располагать все компоненты ГМИС СВЧ: активные компоненты и пассивные элементы схемы (R, L, C), линии передачи, выводы на одной плате из поликристаллической диэлектрической алмазной плёнки (ПАП). ГМИС СВЧ на ПАП имеют металлизированное покрытие на обратной стороне и сквозные металлизированные отверстия. Использование современных методов поверхностного монтажа позволило полностью исключить проволочные соединения между пассивными и активными компонентами ГМИС СВЧ. Автором проведен анализ потерь, вносимых при использовании монолитной подложки на ПАП, и установлено, что они соизмеримы с потерями на микрополосковых линиях, а также сделан вывод о том, что на таких подложках можно создавать ГМИС СВЧ как на микрополосковых линиях, так и на копланарных экранированных линиях. Проанализированы перспективы практической реализации технология изготовления ГМИС на алмазе. Проведен всесторонний анализ промышленно выпускаемых диэлектрических подложек на ПАП (чистота, шероховатость поверхности, поверхностное и объемное сопротивление, теплопроводность, внешний вид), подтверждающий перспективность построения ГМИС СВЧ на ПАП, особенно для устройств с повышенной рассеиваемой мощностью. На основе ПАП создан усилитель мощности на 5 Вт в импульсе в X-диапазоне частот и ряд широкополосных ГМИС СВЧ поверхностного монтажа, перекрывающих диапазон частот 0,05...6,2 ГГц.

В главе 8 рассмотрены перспективы развития ГМИС СВЧ. Показано, что наиболее значимое применение этого класса приборов ожидается в приемопередающих модулях АФАР. При этом отмечается, что наибольший эффект можно ожидать от использования объемных (трехмерных - 3D) конструкций ГМИС, включающих объединительную алмазную плату, имеющую существенные преимущества в теплопроводности по сравнению с применяющейся в настоящее время керамической платой (LTCC). Показано, что перспективным является



создание монокристаллических ПАП подложек со встроенными кристаллами кремния, на которых можно изготавливать активные элементы. Предложен технологический процесс изготовления ПАП подложек со встроенными кристаллами кремния.

**Научная новизна и практическая значимость исследований.** В диссертации Темнова А.М. представлены результаты, обладающие научной новизной и имеющие большую практическую значимость, среди которых можно выделить следующие ключевые достижения.

Автором впервые предложена и реализована концепция создания гибридно-монокристаллических СВЧ модулей, обеспечивающих уменьшение потерь и массогабаритных характеристик, повышение надежности за счет исключения сварных/паяных/клеевых соединений пассивных элементов с диэлектрической платой, изготовления непосредственно на плате в едином технологическом цикле линий передач пассивных элементов - резисторов, индуктивностей и конденсаторов и дорожек межсоединений, и расположения навесных активных компонентов - полупроводниковых СВЧ транзисторов и МИС изготавливаемых по иной технологии. Такая конструкция обеспечила требуемые разработчикам СВЧ устройств гибкость и универсальность решений. Предложенная концепция базируется на научно обоснованных решениях, основанных на целенаправленном выборе материалов, конструктивно-технологических вариантах реализации гибридно-монокристаллических интегральных схем, учете особенностей построения активных полупроводниковых СВЧ компонентов, монтируемых на монокристаллическую плату с пассивными элементами.

Автор впервые показал возможность создания мощных ГМИС СВЧ на одной плате из поликристаллической алмазной пленки (ПАП), обладающей высокой теплопроводностью. Конструкция ПАП с металлизированным покрытием на обратной стороне и сквозными металлизированными отверстиями, использование современных методов поверхностного монтажа позволило полностью исключить проволочные соединения между пассивными и активными компонентами ГМИС СВЧ.

Новые технические решения, представленные в диссертации Темнова А.М., защищены 22 патентами Российской Федерации, их наиболее рациональные варианты внедрены и уже широко применяются в промышленности. Результаты работы использованы в ряде ОКР и получили широкое внедрение в АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина» и 25 предприятиях отрасли, среди которых АО «КНИРТИ», АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга», АО «РИРВ», АО «Корпорация Комета», АО «ВНИИРТ». ГМИС СВЧ составляют основу современных ЭКБ СВЧ важнейших систем РЛС, РЭБ космического, воздушного, морского и наземного базирования. Общий объем их выпуска превышает 100 типов ГМИС СВЧ и составляет порядка 100000 шт. в год.

**Обоснованность и достоверность научных положений и выводов** обеспечивается корректностью постановки цели и задач исследований, использованием адекватных расчетных программ, современных технологических методов, методик измерений и анализа экспериментальных данных, многократной проверкой на практике как в рамках проведенных ОКР на разных предприятиях отрасли, так и в серийном производстве, а также непротиворечивостью существующим научным представлениям. Основные результаты исследований, представленные в работе, достаточно полно отражены в 1 монографии, 4 статьях в журналах индексируемых в международных базах данных; 16 статьях (3 без соавторов) в ведущих рецензируемых журналах по перечню ВАК РФ, 22 патентах РФ, доложены и обсуждены на 10 российских и международных научных конференциях и семинарах.

**Замечания по работе.** В работе недостаточно четко описана ниша ГМИС СВЧ в приемопередающих модулях АФАР, их преимущества перед современными МИС СВЧ. Отсутствует пояснение относительно малой мощности ГМИС СВЧ (17 Вт) на основе 20 Вт GaN транзистора типа TGF2023-5. Не рассматривается возможность использования технологии перевернутого монтажа (flip-chip) на платах из поликристаллического алмаза, а также использование AlGaN/GaN HEMT, полученных методом селективной эпитаксии на подложках из поликристаллического алмаза со встроенными кристаллами кремния.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку представленного диссертационного исследования

**Общее заключение.** В целом диссертация Темнова А.М. «Гибридно-монолитные интегральные схемы СВЧ» является научно-квалификационной работой, представляет широкомасштабное исследование, выполненное на высоком научно-техническом уровне и объединенное общим подходом при решении поставленных задач, которое вносит значительный вклад в развитие СВЧ электроники страны. В результате проведенного исследования разработаны научные положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, вносящее существенный вклад в технологию производства СВЧ модулей. По своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне представленная диссертационная работа соответствует специальности 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертационной работы и отражает ее основные результаты, научные положения и выводы.

По своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и практической значимости полученных результатов, представленная работа отвечает всем требованиям ВАК – п.п. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук, а её автор Темное Александр Михайлович достоин присуждения искомой степени по специальности 05.27.0 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано- электроника, приборы на квантовых эффектах.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией молекулярно-лучевой эпитаксии соединений  $A_3B_5$  Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН», 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13.  
тел.: (383) 3304475; e-mail [zhur@isp.nsc.ru](mailto:zhur@isp.nsc.ru)

Журавлев  
Константин  
Сергеевич

Подпись сотрудника ИФП СО РАН  
К.С. Журавлева заверяю:  
Ученый секретарь ИФП СО РАН к.ф.-м.н.

С.А. Аржанникова

