Акционерное общество
«Российская корпорация ракетно-космического
приборостроения и информационных систем»

РКС
РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Авиамоторная, д. 53, Москва, 111250, почтовый адрес: а/я 16, г. Москва, 111250
тел.: +7 495 673-94-30, факс: +7 495 509-12-00, www.spacecorp.ru, contact@spacecorp.ru
ОКПО 11477389 ОГРН 1097746649681 ИНН 7722698789 КПП 774550001

от 01.06.2020 № РКС НТС 9-34
На № 211/65 от 27.03.2020 г.

Заместителю председателя
диссертационного совета Д409.001.01,
д.ф.-м.н.
АО «Научно-производственного
предприятия «Исток»
им. А.И. Шокина»

А.И. Панасу

«О направлении отзыва на диссертацию Темнова А.М.»

Уважаемый Андрей Иванович!

В ответ на исх. от 27.03.2020 № 211/65 направляю Вам отзыв ведущей организации по диссертации Темнова Александра Михайловича на тему: «Гибридно-монолитные интегральные схемы СВЧ», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».
Приложение: 1. Отзыв на 12 л. в 2 экз.

С уважением,

Ученый секретарь С.А. Федотов

С.А. Федотов
Тел: +7 (495) 673-29-30

Акционерное общество
«Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем»
(АО «Российские космические системы»)
Авиамоторная ул., д.53, Москва, 111250
Тел. (495) 673-95-19, факс (495) 509-11-00, e-mail: contact@spacecorp.ru

от 01.06.2020 № РКС НТС 9-34
На № 211/65 от 27.03.2020 г.

Утверждаю
Генеральный директор
АО «Российские космические системы»
доктор экономических наук,
кандидат технических наук
_____ А.Е. Тюлин
«7» 06 2020 г.

АО «Российские космические системы»

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию ТЕМНОВА АЛЕКСАНДРА МИХАЙЛОВИЧА
по теме «Гибридно-монолитные интегральные схемы СВЧ», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук
по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано- электроника, приборы на квантовых эффектах

Диссертационная работа Темнова А.М. посвящена одному из важнейших направлений развития твердотельной электроники и радиоэлектронных компонентов СВЧ диапазона – их миниатюризации в сочетании с повышением надёжности и обеспечением рентабельного промышленного выпуска.

Актуальность темы выполненной работы.

Тенденция миниатюризации при одновременном увеличении функциональных возможностей, конкурентоспособности, технологичности, рабочих частот и, в целом, эффективности устройств СВЧ-техники для новых поколений наземной и бортовой аппаратуры обусловила необходимость

поиска новых технических решений на стыке радиотехники, материаловедения и технологии. С другой стороны, особенностью СВЧ-техники применительно к бортовой аппаратуре космических аппаратов являются требования малой массы и габаритов устройств, исключительной надёжности из-за ограничений проведения ремонтных работ в космосе, увеличения срока активного существования аппаратов и возникшей в этой связи проблемой обеспечения импортонезависимости бортовой аппаратуры, в первую очередь, активных элементов СВЧ устройств. Решение указанных проблем определяют актуальность выполненной диссертационной работы.

Научная новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Автором впервые предложена концепция создания гибридно-монолитных СВЧ устройств, обеспечивающих уменьшение массогабаритных характеристик, потерь и роста надежности за счет исключения сварных/паяных/клеевых соединений пассивных элементов, путем реализации монолитной составной части устройства – платы с отрезками линий передачи и всеми ненавесными пассивными элементами – дорожками межсоединений, резисторами, индуктивностями и конденсаторами, изготавливаемыми в едином технологическом цикле, и навесными активными элементами, изготавливаемыми по иной технологии, – полупроводниковых СВЧ диодов, транзисторов, смесителей, преобразователей частоты и, при возможности, монолитных интегральных схем (МИС), что и обеспечило требуемые разработчикам гибкость и универсальность решений. Предложенная концепция базируется на научно обоснованных решениях, основанных на целенаправленном выборе материалов, конструктивно-технологических вариантах гибридно-монолитных интегральных схем, особенностях обработки и предложениях по построению активных полупроводниковых элементов и устройств, монтируемых в монолитную плату.

Автором впервые предложено на одной плате из поликристаллической алмазной плёнки (ПАП) располагать все компоненты ГМИС СВЧ: пассивные элементы схемы (R, L, C), линии передачи, выводы и навесные кристаллы активных элементов. ПАП имеет металлизированное покрытие на обратной стороне, а также 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 МПЛ, а также сделан вывод о том, что на таких подложках можно создавать ГМИС СВЧ как на МПЛ, так и на копланарных экранированных линиях.

Значимость для производства и практической деятельности полученных соискателем результатов.

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. На основе сапфирового технологического базиса создан полнофункциональный ряд узкополосных и широкополосных усилительных и преобразовательных ГМИС в диапазоне частот от 0,4 до 20 ГГц с выходными мощностями от 100 до 700 мВт; на платах мозаичной конструкции реализованы ГМИС усилителей мощности на GaN диапазона частот от 8 до 12 ГГц с выходными мощностями 5; 10 и 17 Вт в импульсе. Автором представлены перспективы построения ГМИС и МИС СВЧ на сложных монолитных платах с использованием поликристаллической алмазной плёнки (ПАП-Si), которые могут быть не только однофункциональными узлами, но и многофункциональными, включающими в своем составе аналоговые, ключевые и цифровые схемы класса «система на кристалле».

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 объём их выпуска превышает 100 типов ГМИС СВЧ и составляет порядка 100000 шт. в год.

Характеристика структуры и содержания работы.

Диссертационная работа состоит из Введения, восьми глав, Заключения, списка литературы из 278 наименований и 4-х приложений.

Во ***Введении*** автор даёт общую характеристику работы, указывая на актуальность, формулирует научные положения диссертации, выносимые на защиту, показывает практическую значимость работы, апробацию её результатов и приводит краткое содержание работы.

В главе 1, посвященной обзору интегральных схем СВЧ, представлены основные параметры, дан обзор ГИС и МИС СВЧ, показаны их достоинства и недостатки, показано, что выигрыш у МИС перед ГИС по массе и габаритам. Предложена концепция построения ГМИС, заключающаяся в СВЧ устройствах монолитной диэлектрической платы с R, C, L-элементами, межсоединениями, выводами и активными кристаллами, выполненными по групповым, но различным технологиям. Дана оценка надёжности ГМИС СВЧ, при этом проведено сопоставление значений надёжности для ГИС и ГМИС. Утверждается, что надёжность монолитной платы ГМИС не менее, чем в 2 раза выше надёжности платы ГИС за счёт интегрального исполнения конденсаторов и сокращения числа проволочных соединений между навесными элементами ГИС.

Глава 2 диссертации посвящена конструкциям ГМИС СВЧ на сапфире. Проведено сравнение микрополосковой и копланарной линий (КЛ) и показано, что при выборе конструкции КЛ с воздушным зазором между

подложкой и основанием КЛ имеет параметры не хуже, чем МПЛ, а по добротности – на 30 % лучше. С другой стороны, при использовании КЛ обеспечивается выполнение всего устройства ГМИС СВЧ на одной стороне диэлектрической подложки без необходимости изготавливать металлизированные отверстия. Предложена оригинальная конструкция ГМИС СВЧ, содержащая монолитную сапфировую плату, рамку из поликора с МПЛ выводами и керамическую крышку, размещенные в металлическом корпусе с «обращенным» монтажом платы в корпус. Представлены особенности конструкций пассивных элементов – подстраиваемых тонкоплёночных резисторов, конденсаторов и индуктивностей с воздушными мостами. Проведен анализ максимальной рассеиваемой мощности ГМИС СВЧ на монолитной сапфировой плате. Показаны ограничения по величине допустимой мощности рассеяния (порядка 1 Вт). На основании представленных материалов сформулированы общие принципы и правила конструирования ГМИС СВЧ.

Глава 3 диссертации обосновывает выбор технологического базиса для создания ГМИС СВЧ. С учётом выбранной конструкции ГМИС СВЧ отмечены принципиальные особенности по выбору материалов, отдельных технологических процессов и маршрутов. По разработанным технологиям изготовлены и испытаны образцы. Представлены результаты испытаний ГМИС СВЧ на воздействие внешних воздействующих факторов и на надёжность. Показано, что для отдельных типов ГМИС СВЧ минимальная наработка на отказ увеличена до 100000 часов.

В главе 4 рассмотрены усилительные ГМИС СВЧ малой мощности (до 100 мВт) на GaAs в виде отдельных ПТШ и МИС СВЧ. Представлены электрические схемы ГМИС, конструкции и достигнутые параметры. Наибольшую практическую ценность представляет создание и выпуск полнофункциональных рядов усилительных ГМИС СВЧ, являющихся по существу унифицированными рядами для бортовых и наземных СВЧ устройств различного применения. Представлены 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 коэффициент шума, не более 2 дБ и с наработкой до отказа 100000 ч; широкополосные усилители, перекрывающие диапазон частот от 0,4 до 18 ГГц с шириной рабочей полосы частот от 12 до 30 % а в L диапазоне – до 10 октав; однокаскадный усилитель бегущей волны (2 типа) на базе МИС разработки АО НПП «Исток» им. Шокина», работающий в диапазоне частот от 1 до 12 ГГц.

Глава 5 посвящена преобразовательным ГМИС СВЧ. Основное внимание уделено умножителям и делителям частоты. В результате проведённого анализа показано, что для преобразователя частоты наиболее приемлем двухзатворный ПТШ. Рассмотрены электрические схемы и конструкции балансных преобразователей частоты на ПТШ, унифицированный ряд которых перекрывает диапазон частот от 0,2 до 2 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 двухзатворных ПТШ.

Балансные делители частоты (2:1), разработанные по известной схеме, также выпускаются серийно и перекрывают 11-ю типами диапазон частот от 1 до 12 ГГц. Генераторы частоты на двухкаскадных ПТШ в диапазоне частот от 4,5 до 12 ГГц разработаны и выпускаются с выходной мощностью 25 и 50 мВт с фазовыми шумами (при отстройке 10 кГц) минус 90 и минус 105 дБ/Гц.

Глава 6 представляет особенности мозаичных схем ГМИС СВЧ. Для улучшения теплоотвода сапфировые монолитные платы с пассивными

фрагментами СВЧ устройств и активные кристаллы монтируются к металлическим или алмазным основаниям. Благодаря возможности использовать малую толщину диэлектрических и полупроводниковых подложек (до 100 мкм), габариты устройств СВЧ не превышают габаритов ГМИС СВЧ на сапфире, а улучшение теплоотвода обеспечивает реализацию усилителей с выходной мощностью до 20 Вт в импульсе X-диапазона частот. Представлены электрические схемы, конструкции и параметры узкополосных усилителей диапазона частот от 7 до 20 ГГц с выходной мощностью порядка 250 мВт, а также предварительных усилителей мощности X-диапазона частот с выходной мощностью порядка 600 мВт и выходные усилители мощности X-диапазона частот с выходными импульсными мощностями 5, 10 и 17 Вт.

Глава 7 посвящена созданию ГМИС СВЧ на алмазе. Отмечены недостатки мозаичных ГМИС СВЧ: недостаточная степень интеграции при использовании мозаичных плат, возрастание числа проволочных соединений и некоторое увеличение массы и габаритов устройств СВЧ. Автором впервые предложено на одной плате из поликристаллической алмазной плёнки (ПАП) располагать все компоненты ГМИС СВЧ: пассивные элементы схемы (R, L, C), линии передачи, выводы и навесные кристаллы активных элементов. ПАП имеет металлизированное покрытие на обратной стороне, 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 МПЛ, а также сделан вывод о том, что на таких подложках можно создавать ГМИС СВЧ как на МПЛ, так и на копланарных экранированных линиях.

Представляет практический интерес технология изготовления ГМИС на алмазе. Показано, что в перспективе с ПАП может конкурировать только графен, однако в настоящее время технология его производства для

промышленного применения отсутствует. Проведен всесторонний анализ промышленно выпускаемых диэлектрических подложек на ПАП (чистота, шероховатость поверхности, поверхностное и объемное сопротивление, теплопроводимость, 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, перекрывающих диапазон частот 0,05…6,2 ГГц.

Глава 8 посвящена перспективам 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 объёмных конструкций ГМИС (3D), включающих объединительную алмазную плату, имеющую существенные преимущества в теплопроводности по сравнению с применяющейся в настоящее время керамической платой (LTCC). Конспективно упомянуто о создании «двухэтажного» СВЧ модуля с архитектурой 3D на основе копланарной линии с экраном и вертикальными элементами связи. Показано, что перспективным является создание монолитных подложек, содержащих имплантированные в ПАП кристаллы кремния для того, чтобы на них изготавливать активные элементы, а на ПАП – пассивные. Предложен технологический процесс изготовления гетеропластин ПАП-Si с мезаструктурами (кристаллами кремния), имплантированными в объем ПАП.

Степень достоверности и обоснованности научных положений и выводов.

Научные положения и выводы, сформулированные в заключении каждой главы, аргументированы в тексте диссертации, многократно проверены на практике как в проведённых ОКР на разных предприятиях отрасли, так и в серийном производстве, что свидетельствует о высокой степени достоверности и обоснованности научных положений и выводов.

Автором использованы современные методы исследования (оптическая, электронная микроскопия), что также обусловило достоверность научных положений и выводов.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.

В настоящее время имеет место серийный выпуск более 100 типов ГМИС СВЧ различного функционального назначения с общим объемом более 100000 шт./год. Очевидно, что с ростом спроса на ГМИС СВЧ целесообразно наращивать выпуск уже разработанных изделий, а также ставить НИОКР по созданию ГМИС СВЧ с более высокой интеграцией функций с использованием перспективных направлений развития, оговоренных в главе 8 диссертации. При создании ГМИС СВЧ для космического применения целесообразно рассмотреть возможность построения технологического процесса изготовления ГМИС, в котором обеспечивается замена клеевых соединений методами соответствующих паек с применением припоев, разрешённых для космических устройств.

Наиболее значимое применение ожидается в приемопередающих модулях АФАР, при этом максимальный эффект прогнозируется от использования микромодулей на основе объёмных конструкций ГМИС (3D), включающих объединительную алмазную плату, имеющую существенные преимущества по теплопроводности по сравнению с применяющейся в настоящее время керамической платой (LTCC). Перспективным также представляется создание монолитных подложек, содержащих имплантированные в ПАП кристаллы кремния для того, чтобы на них изготавливать активные элементы, а на ПАП – пассивные. Кроме того, перспективным представляется применение концептуальных принципов создания ГМИС СВЧ для микроминиатюрных СВЧ устройств (микромодулей) миллиметрового диапазона длин волн.

Автору рекомендуется издание монографии (и/или учебного пособия) по созданию ГМИС СВЧ и постановка курсов лекций и лабораторных работ

в ведущих вузах страны, включая базовые кафедры на промышленных предприятиях, занимающихся проблематикой создания микроэлектронных модулей, работающих в СВЧ –диапазоне.

Представленная диссертационная работа не лишена некоторых недостатков:

1. По формулировкам научных положений:

– в первом научном положении не следует ограничивать проблему создания высоконадёжной бортовой СВЧ аппаратуры сантиметровым диапазоном длин волн (поскольку он гораздо шире), и следовало бы указать основной признак создаваемой СВЧ аппаратуры – миниатюрность;

– во втором и третьем научных положениях вместо понятий «оригинальной конструкции» или «оригинальной технологии» следует указывать конкретные признаки конструкции и технологии, обеспечивающие защищаемые эффекты.

2. В работе представлены, в основном, однофункциональные ГМИС СВЧ – усилители, преобразователи частоты (в основном, с кратностью 2), хотя в настоящее время проблема миниатюризации устройств СВЧ, особенно для космического применения, стоит гораздо шире. В диссертации не отражены проблемы создания многофункциональных СВЧ устройств и пути их решения с помощью предложенных в работе методов, включая построение резервированных устройств со сроком службы не менее 150000 часов.

3. Автор некорректно подсчитывает эффект создания ГМИС СВЧ в части их габаритов и массы, указывая, что масса для большинства промышленно выпускаемых изделий не превышает 0,1 г. В действительности это масса монолитной подложки, а конкретное изделие включает все элементы «оригинальной конструкции» – керамические рамки, крышку и металлическое основание. Данных об их массе и габаритах в диссертации не приводится.

4. Автор иногда вводит в диссертацию избыточный материал. Так в главе 2 приводится вывод телеграфных уравнений длинных линий, коэффициентов отражения в них и ряда других параметров, выражения для которых хорошо известны. Объем первой главы (обычно обзор литературы и постановка задач) составляет 80 страниц, т.е. более четверти от всего объема диссертации. Более рационально было бы ее сократить и ограничиться ссылками на соответствующую литературу.

6. В разделе 3.1.3 изложена технология формирования «воздушных мостов», при этом автором предложено использовать предпочтительно фоторезист, а не полиимид, что является неоптимальным и спорным, в особенности для устройств СВЧ. Данная технология поверхностной микрообработки хорошо известна, использована для изготовления матричных микроболометров (например, компаниями Boeing и Uliss), причем полиимид, широко применяемый как «жертвенный» слой, позволяет увеличить температуру формирования металлов, а значит, адгезию, и величину воздушного промежутка, о чем в работе не упомянуто.

Несмотря на указанные недостатки, диссертационная работа выполнена на высоком профессиональном уровне, недостатки не снижают общего положительного впечатления о ней и существенно не влияют на заключение.

Заключение

Диссертация Темнова Александра Михайловича «Гибридно-монолитные интегральные схемы СВЧ», представленная на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано-электроника, приборы на квантовых эффектах, является научно-квалификационной работой, в которой содержится совокупность научных положений и выводов, полученных автором при создании ГМИС. Диссертация может квалифицироваться как содержащая научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

По своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и практической значимости полученных результатов, представленная работа соответствует требованиям пункта 9 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 Темнов Александр Михайлович достоин присуждения искомой степени по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано- электроника, приборы на квантовых эффектах.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании отделения создания бортовых комплексов и ВЧ аппаратуры АО «Российские космические системы» (протокол от «29» мая 2020 г. № 12/1).

Директор проектов по созданию бортовой аппаратуры систем связи, ретрансляции, поиска и спасания – заместитель генерального конструктора
кандидат технических наук
Александр Сергеевич Кондрашов

Начальник конструкторско-технологического отдела
доктор технических наук
Андрей Александрович Жуков

Учёный секретарь
кандидат технических наук, с.н.с.
Сергей Анатольевич Федотов

АО «Российские космические системы»