

## 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 нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

В диссертационной работе Темнова А.М. рассматриваются и решаются важные вопросы твердотельной электроники и радиоэлектронных компонентов СВЧ диапазона, связанные с их миниатюризацией при одновременном повышении надёжности и обеспечении рентабельного промышленного выпуска. Эти вопросы особенно актуальны для СВЧ техники в составе бортовой аппаратуры, а также для решения задач импортозамещения.

Автором впервые предложена концепция создания гибридно-монокристаллических СВЧ устройств, обеспечивающих уменьшение массогабаритных характеристик, потерь и роста надёжности за счет исключения сварных/паяных/клеевых соединений пассивных элементов, путем реализации монокристаллической составной части устройства - платы с отрезками линий передачи и всеми интегральными пассивными элементами - дорожками межсоединений, резисторами, индуктивностями и конденсаторами, изготавливаемыми в едином технологическом цикле, и кристаллами навесных активных полупроводниковых СВЧ компонентов (диодов, транзисторов и МИС), изготавливаемыми по иной технологии, что обеспечило требуемые разработчикам гибкость и универсальность решений.

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. Описана концепция построения ГМИС, при которой вся пассивная часть схемы, содержащая  $R$ ,  $C$ ,  $L$  элементы, межсоединения, выводы выполнена монолитной на диэлектрической плате, а навесными на плате являются кристаллы активных компонентов, при этом и плата, и кристаллы выполнены групповым способом по различным технологиям. Дана оценка надёжности ГМИС СВЧ.

*Глава 2* диссертации посвящена конструкциям ГМИС СВЧ на сапфире. Проведено сравнение микрополосковой (МПЛ) и копланарной линий (КЛ) и продемонстрированы преимущества КЛ. Предложена оригинальная конструкция ГМИС СВЧ, содержащая монолитную сапфировую плату, рамку из поликора с МПЛ выводами и керамическую крышку, размещенные на металлическом основании «обращенным» монтажом платы в корпус. 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. Представлены результаты испытаний ГМИС СВЧ, изготовленных по разработанным технологиям.

*В главе 4* рассмотрены усилительные ГМИС СВЧ малой мощности (до 100 мВт) на GaAs в виде отдельных ПТШ и МИС СВЧ. 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: двухкаскадных малошумящих узкополосных усилительных ГМИС, перекрывающих диапазон частот от 7 до 16,6 ГГц и имеющих коэффициент шума от 2,5 до 5 дБ. Ряд малошумящих усилителей L-диапазона частот 1,4-1,7 ГГц с коэффициентом усиления 20 дБ, коэффициентом шума не более 2 дБ и наработкой до отказа 100 000 ч. Широкополосные усилители, перекрывающие диапазон частот от 0,4 до

18 ГГц. Однокаскадный усилитель бегущей волны 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. Представлены балансные преобразователи частоты и 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 и выполнены на двух двухзатворных ПТШ. Также разработаны и выпускаются серийно балансные делители частоты в диапазоне частот от 1 до 12 ГГц и генераторы частоты на двухкаскадных ПТШ в диапазоне частот от 4,5 до 12 ГГц.

*Глава 6* представляет особенности мозаичных схем ГМИС СВЧ. Для улучшения теплоотвода сапфировые монолитные платы с пассивными элементами (фрагментами СВЧ устройств) и активные кристаллы монтируются на металлическое или алмазное основания. Габариты устройств СВЧ не превышают габаритов ГМИС СВЧ на сапфире, а улучшение теплоотвода обеспечивает реализацию усилителей с выходной мощностью до 17 Вт в импульсе X-диапазона частот.

*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 предложено на одной плате из поликристаллической алмазной плёнки (ПАП) располагать все компоненты ГМИС СВЧ. Проведен анализ потерь, вносимых при использовании монолитной подложки на ПАП, и установлено, что они соизмеримы с потерями на МПЛ. 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).

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.

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.

Научные положения и выводы, сформулированные в заключении каждой главы, аргументированы в тексте диссертации, подтверждены современными методами исследования (оптическая, электронная микроскопия) и 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.

Представленная диссертация не лишена недостатков.

1. Поскольку в диссертации практически не рассматриваются вопросы разработки и создания активных элементов, в первом научном положении, по-

видимому, можно утверждать не о решении проблемы создания ЭКБ в целом, а о решении части этой проблемы (безусловно важной), связанной с созданием пассивных компонент и сборкой ГМИС.

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

3. На взгляд оппонента в диссертации несколько недооцениваются роль, возможности и, соответственно, перспективы СВЧ МИС, которые, например, уже в 80-е годы составляли основу спутниковой аппаратуры, выпускавшейся НИИМП в г. Зеленограде.

4. В работе представлены, в основном, однофункциональные ГМИС СВЧ - усилители, преобразователи частоты, хотя в настоящее время проблема миниатюризации устройств СВЧ, особенно для космического применения, стоит гораздо шире.

Указанные недостатки не снижают научной и практической ценности диссертационной работы, выполненной на высоком профессиональном уровне. 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 нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах, представляет собой научно квалификационную работу, 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 внесло значительный вклад в развитие страны.

По своей актуальности, научной новизне, объёму 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 Темнов Александр Михайлович достоин присуждения искомой степени доктора технических наук по специальности 05.27.01- Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано- электроника, приборы на квантовых эффектах.

Оппонент: Академик, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ФИАН

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук

119991 ГСП-1 Москва,

Ленинский проспект, д.53.

Подпись Горбачевича А.А. удостоверяю:

Ученый секретарь ученого совета ФИАН

к.ф.-м.н.

Александр  
Алексеевич  
Горбачевич

А.В. Колобов

