

ОТЗЫВ

официального оппонента к.т.н., доцента Миннебаева Вадима Минхатовича
на диссертационную работу Ефимова Александра Сергеевича
на тему «Интеграция кристаллов полупроводниковых СВЧ приборов с
применением метода перевернутого монтажа на основе тонкопленочной
системы металлов Au-Sn», представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная
компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств»

Актуальность темы диссертации

Полупроводниковая электронная компонентная база (ЭКБ) СВЧ является основой для построения радиоэлектронной аппаратуры для систем связи, радиолокации и других областей науки и техники. Гибридно-монолитные интегральные схемы (ГМИС) СВЧ являются важной частью современной отечественной ЭКБ СВЧ. Концепция ГМИС – интеграция отдельных кристаллов активных элементов (транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ) с кристаллами и платами пассивных элементов. Традиционный способ гибридно-монолитной интеграции кристаллов СВЧ подразумевает монтаж отдельных кристаллов активных элементов и пассивных элементов, электрическое соединение между кристаллами с помощью проволок. рабочие частоты МИС СВЧ заметно продвигаются вверх по частотному диапазону, их электрический контакт друг с другом остается ограничивающим фактором применения широкополосной ЭКБ СВЧ. Электрическое соединение отдельных кристаллов в единый модуль является важным переходом от параметров отдельных кристаллов к параметрам функциональной системы. Снижение массогабаритных характеристик СВЧ модулей, а также переход от однофункциональных схем к

многофункциональным, ведёт к необходимости интеграции отдельных транзисторов и МИС СВЧ с минимальным влиянием межсоединений на электрические и эксплуатационные параметры модуля.

Таким образом, актуальность беспроводной интеграции в ГМИС СВЧ обусловлена необходимостью расширения диапазона частот, снижения потерь СВЧ и значений реактивных паразитных составляющих эквивалентной схемы переходных соединений, а также снижения массогабаритных характеристик для схем СВЧ диапазона.

Содержание диссертационной работы

Диссертация А.С. Ефимова состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 159 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков и 13 таблиц, список литературы включает 150 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, проанализированы современные тенденции и проблемы развития твердотельной электронной компонентной базы СВЧ. Определены цели и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён обзор существующих конструктивных способов интеграции твердотельных полупроводниковых приборов в микроэлектронике СВЧ, рассмотрены ключевые способы реализации метода перевернутого монтажа, сформулированы основные задачи диссертационных исследований, включающие:

- Исследование и разработку технических решений, обеспечивающих реализацию локального соединения кристаллов A_3B_5 с топологическими размерами не менее 10 мкм;
- Исследование физических свойств локального соединения;
- Разработка конструкции беспроводной ГМИС СВЧ с локальными межсоединениями;
- Исследование частотных характеристик и тепловых свойств конструкции с локальными межсоединениями;

Во второй главе представлены результаты исследования и разработки технологии:

- формирования для СВЧ МИС соединительного слоя с применением системы Au-Sn-слоев, формируемых фотолитографическими способами;
- соединения кристаллов – формирования локальных межсоединений – методом взаимной переходной диффузии.

Предложена и реализована последовательная система чередующихся металлов золота и олова из пяти слоев металлических пленок с общей концепцией Au-Sn-Au-Sn-Au толщиной 1,0 - 1,0 - 1,0 - 1,0 - 0,3 мкм соответственно. Исследованы морфологические и фазовые характеристики сформированной системы после тепловой обработки.

В третьей главе исследованы частотные и тепловые характеристики конструкций интеграции кристаллов СВЧ с межсоединениями, сформированными на основе предложенной автором системы металлов Au-Sn; описана оригинальная конструкция ГМИС СВЧ, сборка которой осуществлена с применением метода перевернутого монтажа на основе тонкопленочной системы металлов Au-Sn; представлены экспериментальные результаты и модельные расчеты тестовых конструкций с копланарной линией и активным элементом. Определены параметры эквивалентных схем межсоединений и доказано, что значения паразитных параметров эквивалентной схемы межсоединения, выполненного методом перевернутого монтажа, в 5 раз меньше, чем при проволочной интеграции, что существенно снижает влияние соединения на рассогласование в волновом тракте, особенно при широкополосном согласовании. Исследованы зависимости максимальной разности температур от толщины соединяющего слоя в пределах от 2 до 20 мкм.

В четвертой главе проведен анализ существующих конструктивных способов реализации интегральных схем СВЧ для поверхностного монтажа; исследованы зависимости частотных характеристик схем от параметров отдельных элементов конструкции; описана оригинальная конструкция ГМИС

СВЧ для поверхностного монтажа; исследованы частотные и тепловые характеристики предложенной конструкции.

В заключении по диссертационной работе автор формулирует основные достижения, полученные в результате диссертационного исследования по каждой из поставленных задач.

Научная новизна, достоверность и обоснованность научных положений, результатов и выводов не вызывают сомнений, поскольку они базируются на комплексном использовании современных методов анализа, совпадении теоретических и экспериментальных данных, полученных различными методами испытаний.

Практическая ценность результатов диссертационного исследования подтверждается Актом об использовании при выполнении ОКР «Одноцветник-65» и ОКР «Основа-1».

Диссертационная работы грамотно и логично структурирована и отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Публикации автора отражают основное содержание диссертации. В их число входят 18 научных работ, в том числе 6 – в журналах, рекомендованных ВАК, 9 тезисов докладов в сборниках международных и всероссийских конференций, 2 из которых проиндексированы в Scopus, 3 патента РФ на изобретение. Принципиальных замечаний к оформлению диссертации и автореферата нет.

Замечания и вопросы по диссертации и автореферату

– на стр. 54, абз. 2, стр. 84 абз.1, стр.88 несогласованное предложение;

– в разделе 3.1.1 автор указывает, что «в конструкциях перевернутого монтажа и hot-via влияние подводящих 50-омных линий было нивелировано с помощью процедуры «deembedding». Означает ли это, что для анализа проволочного соединения процедура деембеддинга не производилась? Кроме того, из рис.38б следует, что S11 в начале частотного диапазона имеет емкостной характер в отличии от hot-via и проволочного соединения. Чем это объясняется?

- номер рисунка «46» повторяется дважды;
- на рис. 52 опечатки: вместо « $R_{tr\ face}$ » – « R_{tr} », вместо « R_{PAD} » – « R_{AuSn} », вместо « R_{subst} » – « $R_{carrier}$ »;
- на рис. 49 не указана толщина подложки;
- в разделе 3.2.3 при расчете не учтены металлическое основание и соединяющий слой (как в п.3.2.2), что, видимо и привело к ошибочному результату о преимуществах использования обратного монтажа для GaN/SiC транзисторов;
- в разделе 3.3.2 показано, что минимальное экспериментально достигнутое значение прочности соединения на сдвиг составляет 44 МПа. Чем обусловлено значение «32,2 МПа» в положениях, выдвигаемых на защиту?
- чем объясняются различия в S_{21} на 25% при моделировании и измерении малосигнальных параметров транзистора 3ПЗ107АН5 от частоты?
- на стр. 120 ошибки в математических расчетах: снижение коэффициента усиления с 7,8 дБ до 6,6 дБ составляет 31%, а не 15%, и соответственно – с 7,8 дБ до 5,1 дБ – 57%, а не 45%.

Однако, указанные недостатки не снижают общей научной и практической значимости научно-квалификационной работы.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным в Положении о порядке присуждения ученых степеней, утвержденном Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013г. № 842 (ред. от 18.03.2023г.)

Диссертационная работа А.С. Ефимова «Интеграция кристаллов полупроводниковых СВЧ приборов с применением метода перевернутого монтажа на основе тонкопленочной системы металлов Au-Sn.» является законченным научным исследованием, выполнена на высоком научном и методическом уровне, полностью соответствует паспорту специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств». По актуальности, научной новизне, практической значимости, полученным результатам и выводам диссертационное

исследование является законченной научно-квалификационной работой, удовлетворяет требованиям п.п. 9–14 Положения о порядке присуждения учёных степеней, предъявляемых ВАК к кандидатским диссертациям, а её автор Ефимов Александр Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

Официальный оппонент, кандидат технических наук (по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано- электроника, приборы на квантовых эффектах»), доцент, заместитель генерального директора Акционерного общества «Микроволновые системы» по развитию электронной компонентной базы



Миннебаев Вадим Минхатович

23.08.2024 г. (дата)

Согласен на обработку персональных данных

Адрес места работы: 105122 г. Москва, Щёлковское шоссе, д. 5, стр.1, помещение 100

Контактные данные:

моб.тел.: +7 (903) 721-87-60

e-mail: vm@mwsystems.ru

Подпись Миннебаева В.М. удостоверяю

Специалист по кадровому делопроизводству

АО «Микроволновые системы»



Д.Ю. Косова