

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 74.1.008.01,
созданного на базе Акционерного общества «Научно-производственное
предприятие «Исток» имени А.И. Шокина»,
Государственная корпорация «Ростех»,
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 03.10.2024 г. протокол № 87

О присуждении Ефимову Александру Сергеевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация **«Интеграция кристаллов полупроводниковых СВЧ приборов с применением метода перевернутого монтажа на основе тонкоплёночной системы металлов Au-Sn»** по специальности 2.2.2. – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств» принята к защите 22.07.2024 года (протокол заседания № 86) диссертационным советом 74.1.008.01, созданным на базе Акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Исток» имени А.И. Шокина», Государственная корпорация «Ростех», 141190, Московская область, г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2а, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11 апреля 2012 г.

Соискатель Ефимов Александр Сергеевич, 11 мая 1994 года рождения.

В 2017 г. соискатель окончил Рязанский государственный радиотехнический университет по программе магистратуры по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника». С 2017 по 2023 г. обучался в аспирантуре АО «НПП «Исток» им. Шокина» по направлению подготовки 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи».

Работает инженером 2 категории в Акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Исток» имени А.И. Шокина» (АО «НПП «Исток» им. Шокина»), Государственная корпорация «Ростех».

Диссертация выполнена в научно-производственном комплексе № 4 (НПК-4) АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Научный руководитель – доктор технических наук Лапин Владимир Григорьевич, эксперт экспертной группы АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Официальные оппоненты:

- Панасенко Пётр Васильевич, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по разработке комплексированной СВЧ ЭКБ Акционерного общества «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», и

- Миннебаев Вадим Минхатович, кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора Акционерного общества «Микроволновые системы» по развитию электронной компонентной базы, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук, г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Пономаревым Дмитрием Сергеевичем, к.т.н., доцентом, заместителем директора по научной работе, и утвержденном Гамкрелидзе Сергеем Анатольевичем., д.т.н., профессором, директором ИСВЧПЭ РАН, указала, что диссертационная работа Ефимова А.С. является актуальной и важной для современной СВЧ-электроники, обладает научной новизной, обоснованностью и достоверностью полученных результатов. Диссертация является законченной квалификационной научно-исследовательской работой, а автореферат полностью отражает содержание диссертации.

В качестве недостатков указано следующее:

1. Не определены границы применимости предложенных конструкций ГМИС СВЧ по реализуемой площади соединяющего слоя из системы слоёв Au-Sn.

2. В главе 3 не приведена методика экстракции параметров элементов эквивалентной схемы исследуемых межсоединений.

3. Имеется ряд опечаток в тексте диссертации.

Отмечено, что перечисленные в отзыве замечания не снижают ценности диссертационной работы и её практической значимости, а автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.2.2. – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Соискатель имеет 18 опубликованных работ по теме диссертации, из них в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК опубликовано 6 работ (одна из них без соавторов), 2 работы проиндексированных в Scopus, 3 патента РФ на изобретение.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Патент №2782184 С1 РФ, МПК Н01L 27/12. Интегральная схема СВЧ: №2021135646: заявл. 03.12.2021: опубл. 21.10.2022 / А.С. Ефимов, А. М. Темнов, К.В. Дудинов.
2. Патент №2782187 С1 РФ, МПК Н01L 27/12. Интегральная схема СВЧ: №2021139182: заявл. 28.12.2021: опубл. 21.10.2022 / А.С. Ефимов, А. М. Темнов, К.В. Дудинов.
3. A. S. Efimov et al., Flip-Chip Integration of III-V Chips on Wafer for mmW Applications // IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC). Moscow. Russian Federation. 2022. pp. 220-222. doi: 10.1109/RMC55984.2022.10079408.
4. Ефимов А. С, Темнов А. М., Зайцев А. А. и др. Система Au-Sn для монтажа кристаллов на пластине в микроэлектронике СВЧ методом взаимной переходной диффузии // Нано- и микросистемная техника. 2023. Т. 25, № 4. С. 171-180. doi: 10.17587/nmst.25.171-180. – EDN ULVCXM.

5. Ефимов А.С., Груша А.В., Чибирев Р.А. Исследование тепловых характеристик беспроводной интеграции мощных СВЧ кристаллов // Журнал радиоэлектроники. 2023. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.3>.

6. **Ефимов А. С.** Конструктивные подходы к интеграции приборов на основе разных полупроводниковых технологий в микроэлектронике СВЧ // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26. №. 4. С. 33-55. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2023-26-4-33-55>.

7. A. S. Efimov and A. V. Grusha. Thermal Analysis of 3D Heterogeneous Integration for Microwave HEMTs. // IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk. Russian Federation. 2023. pp. 120-123. doi: 10.1109/APEIE59731.2023.10347800.

В отзывах официальных оппонентов Панасенко П.В. и Миннебаева В.М. отмечается, что диссертационная работа является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научно-техническом уровне. Полученные в ней результаты обладают научной новизной и практической значимостью, а основные выводы и положения, выносимые на защиту, представляются обоснованными и достоверными. Диссертация соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а соискатель достоин присуждения учёной степени кандидата технических наук.

В отзыве Панасенко П.В. были сделаны следующие замечания:

1. В тексте диссертации отсутствуют обоснования выбора предлагаемых конструкций соединяющего слоя многослойной системы Au-Sn и конструкции ГМИС, что является важным аспектом с точки зрения научности подхода к исследованиям.

2. В тексте диссертации неоднократно подчеркивается важность создания соединения Au-Sn с весовым содержанием олова 20%, что требует соблюдения необходимого соотношения толщин слоев многослойной системы Au-Sn.

Однако, реальное соотношение толщин слоев металлов, измеренных по поперечному сечению структуры контакта в растровом электронном микроскопе, сильно отличается от целевого значения, а последствия влияния такого расхождения на эксплуатационные характеристики реализованного изделия остаются неясными.

3. Результаты химического состава многослойной системы металлизации Au-Sn методом рентгеновской дифрактометрии свидетельствуют об отсутствии чистой фазы Sn непосредственно после этапа напыления, что указывает на возможное диффузионное перемешивание металлов и протекании химических реакций еще до стадии монтажа кристалла с Au-площадкой на его поверхности.

4. На рис. 35 в диссертации приведен снимок соединения Au-Sn в поперечном сечении, на котором можно наблюдать 2 типа дефектов, в том числе, микроскопические поры. Автором признается проблема и высказывается предположение о возможном устранении дефектности за счет увеличения давления при монтаже. Однако, данные исследования, не требующие большой трудоёмкости, по какой-то причине не были проведены. Кроме того, с точки зрения практического использования исследуемой технологии необходим анализ надежности соединения, отсутствия возможного развития дефектности под действием внешних деградиционных факторов (температура, вибрация и пр.).

5. В положении научной новизны и в заключении к Главе 2 утверждается, что исследуемая автором технология обеспечивает локальность соединения с минимальным топологическим размером до 10 мкм, при этом в тексте диссертации нигде не указаны ни топологические размеры контактных площадок кристаллов транзисторов, ни шаг «точечных» контактов.

6. В соответствии с требованиями ОСТ В 11 1009-2001 минимально допустимое усилие сдвига установленного на держатель кристалла площадью до $0,5\text{мм}^2$ составляет 0,2 кгс. В работе не приводятся топологические размеры контактных окон, что делает невозможной объективную оценку достигнутого автором уровня усилия сдвига 32,2 МПа.

7. Предложенное и исследованное в диссертационной работе конструктивно-технологическое решение автор распространяет как на дискретные транзисторы, так и на СВЧ МИС. Однако, на самом деле в работе реализовано только исполнение для транзисторов, но не для МИС СВЧ, содержащих цепи согласования транзисторов с 50-омным трактом. Для этого необходимы множественные металлизированные сквозные отверстия, «заземляющие» металлизацию обратной стороны кристалла – эта проблема не нашла своего отражения в рассматриваемой работе.

В отзыве Миннебаева В.М. указаны следующие замечания:

1. На стр. 54, абз. 2, стр. 84 абз.1, стр.88 несогласованное предложение.
2. 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?
3. Номер рисунка «4б» повторяется дважды.
4. На рис. 52 опечатки: вместо «*Rtr face*» – «*Rtr*», вместо «*RPAD*» – «*RAuSn*», вместо «*Rsubst*» – «*Rcarrier*».
5. На рис. 49 не указана толщина подложки.
6. 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.
7. 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?
8. Чем объясняются различия в S21 на 25% при моделировании и измерении малосигнальных параметров транзистора 3П3107АН5 от частоты?

9. 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%.

На автореферат диссертации получено 8 отзывов. Все отзывы положительные. Отзывы поступили из следующих организаций:

1. АО «НПП «Радар ммс». Отзыв составил д.ф.-м.н. Кагадей Валерий Алексеевич, первый заместитель директора по развитию и науке НПК Томское.

2. АО «НИИ «Октава». Отзыв составил к.т.н. Раков Юрий Николаевич, ведущий инженер.

3. Новосибирский государственный технический университет. Отзыв составил д.т.н., профессор Киселев Алексей Васильевич, профессор кафедры РПиРПУ.

4. АО «ЦНИРТИ им. Академика А.И. Берга». Отзыв составил к.т.н. Волков Андрей Валентинович, заместитель главного инженера по конструированию и технологии, начальник конструкторско-технологической службы.

5. Национальный исследовательский университет «МИЭТ». Отзыв составил к.т.н. Вертянов Денис Васильевич, начальник НИЛ ТКПМ, доцент института нано- и микросистемной техники.

6. Томский государственный университет систем управления и радиотехники. Отзыв составил к.т.н. Кулинич Иван Владимирович, заведующий кафедрой «Физическая электроника».

7. ООО «50ом Тех.». Отзыв составил к.т.н. Сальников Андрей Сергеевич, ведущий научный сотрудник.

8. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Отзыв составил д.т.н. Иванов Аркадий Анатольевич, заведующий кафедрой «Микрорадиоэлектроника и технологии радиоаппаратуры».

В отзывах отмечается, что диссертация посвящена исследованию и разработке конструктивно-технологических способов интеграции в СВЧ

полупроводниковой электронике для повышения параметров гибридно-монолитных интегральных схем СВЧ. Результаты работы достигаются за счет разработки метода формирования соединяющего слоя на основе тонкоплёночной системы Au-Sn для монтажа кристаллов СВЧ лицевой стороной (flip-chip) методом взаимной переходной диффузии, предложенных оригинальных конструкций ГМИС СВЧ, в том числе для поверхностного монтажа.

Полученные автором результаты свидетельствуют о новизне и практической значимости работы. Положения и основные выводы, сформулированные в диссертации, достаточно обоснованы. Достоверность данных, полученных диссертантом, не вызывает сомнений, поскольку они подтверждены применением современных средств математического моделирования, использованием поверенного и аттестованного современного технологического и аналитического оборудования, достаточно высоким соответствием полученных расчётных результатов с экспериментальными данными. Результаты исследований апробированы на 8 всероссийских и международных научно-технических конференциях.

В отзывах имеются следующие замечания и вопросы:

1. АО «НПП «Радар ммс»:

- в автореферате не определены границы применимости предложенных конструкций ГМИС СВЧ с точки зрения возможного диапазона величин площадей контактных площадок с тонкоплёночной системы Au-Sn;

- из автореферата не ясна эквивалентная схема межсоединений ГМИС СВЧ, а также значения её параметров, хотя и приводятся сравнительные данные для разных типов межсоединений;

- а автореферате не приведена эквивалентная тепловая модель гибридно-монолитной интегральной схемы СВЧ.

2. АО «НИИ «Октава»:

- не отражен вопрос о неразрушающем контроле нового способа перевернутого монтажа.

3. Новосибирский государственный технический университет:

- в тексте автореферата не указаны топологические размеры контактных площадок монтируемых кристаллов, что ставит под сомнение утверждение о локальности соединений с минимальным топологическим размером до 10 мкм.

4. АО «ЦНИРТИ им. Академика А.И. Берга»:

- из автореферата непонятно, за счёт чего улучшены тепловые режимы предложенных конструкций;

- чем объясняется неравномерность потерь в тестовой конструкции с копланарной структурой?

- не раскрыты причины частотных ограничений предлагаемых конструкций ГМИС СВЧ.

5. Национальный исследовательский университет «МИЭТ»:

- из автореферата не ясна эквивалентная схема межсоединений, значения её параметров, хотя и приводятся сравнительные данные по разным типам межсоединений;

- недостаточное количество представленных в автореферате характеристик гибридно-монолитных интегральных схем СВЧ (только частоты и вносимые потери) для комплексной оценки достигаемых улучшений изделий за счет применения нового метода формирования соединяющего слоя для flip-chip монтажа кристаллов;

- недостаточно описаны технологические решения по интеграции кристаллов на основе тонкоплёночной системы металлов Au-Sn (например, какой использовался метод осаждения системы металлов, через какую маску осуществлялось осаждение металлов);

- наличие в некоторых рисунках наименований на английском языке (наименование осей на графиках, элементов конструкции ГМИС СВЧ).

6. Томский государственный университет систем управления и радиотехники:

- из автореферата не ясна эквивалентная схема межсоединений, значения её параметров, хотя и приводятся сравнительные данные по разным типам межсоединений.

7. ООО «50ом Тех.»:

- в автореферате отсутствуют графики, на которых представлены одновременно результаты моделирования и измерения параметров полученной ГМИС для оценки корректности моделирования. Замечания касаются как СВЧ, так и тепловых характеристик;

- один из методов уменьшения влияния выводов – применение нескольких разварочных проволочек или разварочной ленты. В обзоре данный метод не рассмотрен, интересно его сравнение с остальными методами;

- в автореферате имеются опечатки и огрехи оформления. Так, на стр. 13 встречается слово «преложенной», на стр. 16 – «соеднений», на рис. 3, 5, 6 подписи осей на английском языке.

8. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина):

- из текста автореферата не ясно как контролируется толщина тонкоплёночной системы Au-Sn;

- не рассмотрен вопрос по герметичности предлагаемой конструкции ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа.

В отзывах отмечается, что указанные недостатки не являются принципиальными и не ставят под сомнение основные научные результаты и положения, сформулированные в диссертации. Автор работы Александр Сергеевич Ефимов обладает высокой научной квалификацией и заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в области исследования и разработки полупроводниковой ЭКБ СВЧ. Панасенко П.В. является ведущим учёным и научным организатором

в области СВЧ гетерогенной интеграции. Миннебаев В.М. является признанным учёным и научным организатором в области разработки однофункциональной и многофункциональной ЭКБ СВЧ. Выбор ИСВЧПЭ РАН в качестве ведущей организации обоснован тем, что данный институт является ключевым профильным научным центром по направлению СВЧ полупроводниковой электроники, осуществляющим проведение фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований, выполнение опытно-конструкторских и технологических работ, изучение и реализацию достижений науки и передового опыта, направленных на получение и применение новых знаний в области СВЧ полупроводниковой электроники.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- предложен и реализован метод формирования соединяющего слоя на основе тонкоплёночной системы Au-Sn для монтажа методом взаимной переходной диффузии для применения в микроэлектронике СВЧ с минимальным топологическим размером до 10 мкм. Значение прочности соединения на сдвиг составила 32,2 МПа;

- предложена оригинальная конструкция гибридно-монолитной интегральной схемы СВЧ, в которой кристаллы транзисторов и МИС СВЧ лицевой стороной интегрируются на диэлектрическую подложку посредством соединяющего слоя из тонкоплёночной системы Au-Sn, обеспечивающего монтаж методом взаимной переходной диффузии. Вносимые потери одного переходного соединения составляют менее 0,1 дБ на частотах до 50 ГГц. Максимальная разность температур схемы с толщиной подложки 100 мкм снижена на 5 – 40 °С по сравнению с традиционным методом интеграции.

- Разработаны и изготовлены тестовые конструкции ГМИС СВЧ с применением метода перевернутого монтажа на основе тонкоплёночной системы металлов Au-Sn. Потери в тестовой конструкции ГМИС СВЧ с интегрированной копланарной линией составили менее 0,4 дБ/мм, включая 2

переходных соединения на частотах до 50 ГГц. Прочность соединения тестовой конструкции на сдвиг превышает 32 МПа;

- предложена оригинальная конструкция гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ для поверхностного монтажа. Выводы ГМИС СВЧ расположены на обратной стороне диэлектрической подложки, соединённые с лицевой стороной сквозными металлизированными отверстиями. Кристаллы транзисторов и МИС СВЧ лицевой стороной интегрируются на диэлектрическую подложку посредством соединяющего слоя Au-Sn, обеспечивающего монтаж методом взаимной переходной диффузии. Вносимые потери одного переходного соединения составляют менее 0,5 дБ на частотах до 60 ГГц. Максимальная разность температур схемы с толщиной подложки 100 мкм снижена на 10 – 45 °С по сравнению с традиционным методом интеграции.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что результаты работы, полученные в ходе аналитических и численных исследований конструктивных и технологических способов интеграции кристаллов полупроводниковых приборов СВЧ, являются теоретической и практической базой разработки методов построения устройств микроэлектроники СВЧ на основе гетерогенной интеграции. Предложены и разработаны конструкции гибридно-монокристаллических интегральных схем СВЧ, позволяющие существенно расширить диапазон рабочих частот, снизить габаритные размеры и улучшить тепловые характеристики схем.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что результаты диссертационного исследования использованы при проведении опытно-конструкторских работ по созданию гибридно-монокристаллических интегральных схем СВЧ усилителей мощности X- и Ku-диапазонов частот, проводимых в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Получен акт использования результатов работы при выполнении ОКР, проводимых в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Предложенные и реализованные конструктивно-технологические решения интеграции кристаллов СВЧ методом

перевернутого монтажа открывают перспективы создания отечественных ГМИС СВЧ миллиметрового диапазона длин волн.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- научные выводы, полученные в диссертации, подтверждены теоретически и экспериментально;
- научные положения диссертации аргументированы и основаны на общепринятых теоретических и физических положениях;
- для проведения измерений электрических параметров использовалось сертифицированное оборудование с использованием установленных калибровок, результаты измерений воспроизводимы, методики измерений прошли метрологическую экспертизу;
- установлена сопоставимость теоретических и экспериментальных результатов с данными других исследователей;
- проведенные исследования позволили теоретически обосновать и практически реализовать основные положения и результаты, полученные автором и выносимые на защиту.

Личный вклад соискателя состоит в следующем:

- предложен метод формирования соединяющего слоя на основе тонкоплёночной системы Au-Sn;
- предложена оригинальная конструкция, где кристаллы МИС СВЧ лицевой стороной интегрируются на диэлектрическую подложку посредством соединяющего слоя из тонкоплёночной системы Au-Sn, обеспечивающего монтаж методом взаимной переходной диффузии;
- предложена оригинальная конструкция гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ для поверхностного монтажа;
- подготовлены основные научные публикации и доклады по результатам проведенных исследований.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается

проведённым комплексом исследований, взаимосвязью полученных результатов и выводов.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие замечания:

1. У Вас второе и третье положения очень близки по смыслу. С какой целью Вы разделили их между собой?
2. В конструкции ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа, теплоотвод идёт через крышку. Кристаллы с какой максимальной рассеивающей мощностью можно использовать в предложенной конструкции?
3. Были исследованы показатели прочности интеграции кристаллов на сдвиг, и полученные результаты выше требований к военной микроэлектронике. Насколько эти показатели превышают уровни предъявляемых требований?
4. Какие тепловые характеристики конструкций Вы исследовали? И насколько они лучше имеющих конструкций?
5. Какая сфера применения предлагаемого Вами метода и как соотносится с текущим подходом, проволочной интеграцией?
6. В каких работах на данный момент, и в перспективе, рассматривается внедрение результатов работы?
7. Вы сказали, что проводили расчёты тепловых режимов конструкций, были ли проведены эксперименты и испытания?

Соискатель Ефимов А.С. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1. Во втором и третьем положениях представлены результаты, относящиеся и решающие две разные научно-технические проблемы: реализация конструкций незащищённой от внешних воздействующих факторов ЭКБ миллиметрового диапазона длин волн, и ЭКБ миллиметрового диапазона длин волн для поверхностного монтажа. Схожесть конструкций в данном случае считаю достоинством предлагаемых решений.
2. Определение пределов по максимальной рассеивающей мощности для предложенной конструкции является темой дальнейших исследований. В

работе представлены расчёты, где в качестве активного элемента применялись GaN и GaAs мощные полевые транзисторы с рассеивающей мощностью 6 и 2 Вт/мм соответственно, с общей шириной затвора 1,2 мм.

3. Более чем на 10%. Точных данных, к сожалению, сказать не могу.

4. Важный параметр для исследуемых конструкций – максимальная разность температур в конструкции с применением активного элемента, полевого транзистора, в стационарном режиме теплового распределения. Данные сравнивались с конструкцией традиционного метода интеграции. Первая представленная конструкция может обеспечить снижение максимальной разности температур ГМИС СВЧ схемы на 7 °С для GaN НЕМТ и на 41 °С для GaAs рНЕМТ в сравнении с традиционным методом интеграции, 7% и 30% соответственно. Улучшения достигаются благодаря снижению расстояния от области тепловыделения до межсоединения, около 5 микрометров, когда в традиционном подходе тепло проходит через всю толщину кристалла – 100 микрометров.

5. В диапазоне до 20 ГГц предлагаемым конструкциям сложно будет конкурировать с технологически зрелым проволочным методом интеграции. Дальнейшее продвижение вверх по частотному диапазону при проволочной интеграции критично ухудшает параметры транзисторов и МИС СВЧ. Метод перевернутого монтажа показывает приемлемые характеристики межсоединений и на 500 ГГц. Поэтому, именно реализация ЭКБ СВЧ миллиметрового диапазона длин волн является наиболее перспективной областью применения предлагаемых конструкций.

6. Результаты используются в проводимых на «Истоке» ОКР, нацеленных на реализацию ГМИС Ки- диапазона частот, которые на текущий момент ещё продолжают. Дальнейшее внедрение результатов актуально при разработке ЭКБ СВЧ миллиметрового диапазона длин волн.

7. В данной работе представлены только расчётные исследования тепловых режимов конструкций. Проведение экспериментов для определения

тепловых характеристик конструкция является одним из направлений дальнейших исследований.

На заседании 03 октября 2024 года диссертационный совет принял следующее **решение**: за новые научно-обоснованные технические и технологические решения, имеющие существенное значение для развития отечественной микроэлектроники СВЧ, присудить Ефимову А.С. учёную степень кандидата технических наук по научной специальности 2.2.2. «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **15** человек (из них **7** докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации) из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – **15**, против – **0**, недействительных бюллетеней – **0**.

Заместитель председателя
диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Ученый секретарь

диссертационного совета

к.т.н.

03.10.2024 г.



Панас Андрей Иванович

Куликова Ирина Владимировна