

ОТЗЫВ

официального оппонента Панасенко Петра Васильевича на диссертацию Ефимова Александра Сергеевича «Интеграция кристаллов полупроводниковых СВЧ приборов с применением метода перевернутого монтажа на основе тонкоплёночной системы металлов Au-Sn», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

Актуальность темы диссертации

Актуальность темы диссертационной работы прежде всего обусловлена насущной необходимостью освоения разработчиками СВЧ аппаратуры миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов частот как в гражданских, так и в специальных радиоэлектронных системах. В частности, для систем телекоммуникации повышение рабочих частот позволяет увеличить ширину полосы канала связи и повысить информационную емкость сигнала, для систем радиолокации – повысить разрешающую способность радаров и т. п. При этом одним из главных практических ограничений при создании СВЧ модулей на рабочие частоты свыше X-диапазона являются трудности, связанные с учетом неоднородности СВЧ тракта, имеющие место вследствие традиционного метода монтажа кристаллов путем проволочной коммутации высокочастотных выводов. Этим бесспорно определяется актуальность выполненных диссертантом исследований по применению беспроводного монтажа кристаллов «flip-chip» методом, что, к тому же, позволяет обеспечить более оптимальную компоновку кристаллов и существенно уменьшить габаритные размеры СВЧ устройств. Несмотря на то, что в литературе представлено большое количество результатов подобных исследований, технология перевернутого монтажа для кристаллов СВЧ полевых транзисторов и МИС пока не получила широкого практического применения из-за ряда нерешенных проблем конструктивно-технологического характера и особенностей эксплуатации СВЧ устройств, что определяет несомненный интерес к рассматриваемой диссертационной работе.

Содержание диссертационной работы

На отзыв представлены диссертационная работа объемом 159 страниц и автореферат объемом 21 страница. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и содержит 79 рисунков и 13 таблиц. Список литературы включает 150 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, обозначены основные тенденции развития исследуемого направления, сформированы цель и задачи

исследований, показана научная новизна и представлены теоретическая и практическая значимость результатов.

В первой главе приведен аналитический обзор существующих конструктивных способов интеграции полупроводниковых СВЧ приборов в технологии микроэлектроники, рассмотрены основные подходы к реализации метода перевернутого монтажа кристаллов, сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты разработки и экспериментальных исследований технологии формирования соединительного слоя для монтажа СВЧ схем методом перевернутого кристалла с применением системы слоев Au-Sn, сформированных путем послойного напыления металлов и проведения фотолитографических процессов для создания контактных областей.

В третьей главе с использованием средств моделирования проведены исследования частотных и тепловых характеристик коммутационных межсоединений предлагаемой автором конструкции на основе системы слоев Au-Sn, предложена оригинальная конструкция гибридно-монолитной интегральной схемы СВЧ с применением метода перевернутого монтажа кристаллов, представлены экспериментальные результаты исследований тестовых конструкций с копланарными линиями связи и активным элементом в виде полевого транзистора с затвором Шоттки.

В четвертой главе представлен анализ зарубежных и отечественных конструктивных решений при реализации интегральных схем СВЧ для поверхностного монтажа, исследованы зависимости частотных характеристик схем от параметров отдельных элементов конструкции, описана оригинальная конструкция гибридно-монолитной интегральной схемы СВЧ для поверхностного монтажа, исследованы частотные и тепловые характеристики предложенной конструкции.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы и выводы.

Степень новизны результатов и научных положений диссертации, которые выносятся на защиту

Научная новизна диссертационного исследования состоит в том, что в рамках работы:

- Предложен и обоснован метод формирования соединяющего слоя на основе тонкоплёночной многослойной системы Au-Sn при монтаже способом взаимной переходной диффузии для применения в микроэлектронике СВЧ с минимальным топологическим размером

до 10 мкм, показано, что прочность соединения на сдвиг составляет до 32,2 Мпа и является достаточной для практических применений.

- Предложена оригинальная конструкция гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ, в которой кристаллы транзисторов и МИС СВЧ лицевой стороной интегрируются на диэлектрическую подложку посредством соединяющего слоя из тонкопленочной системы Au-Sn, обеспечивающего монтаж методом взаимной переходной диффузии. Показано, что вносимые потери одного переходного соединения составляют менее 0,1 дБ на частотах до 50 ГГц и ими можно пренебречь. При этом максимальная разность температур кристалла транзистора с толщиной подложки 100 мкм снижена на 5 – 40 °С по сравнению с традиционным методом интеграции.
- Предложена оригинальная конструкция гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ для поверхностного монтажа, в которой кристаллы транзисторов и МИС СВЧ лицевой стороной интегрируются на диэлектрическую подложку посредством соединяющего слоя Au-Sn, обеспечивающего монтаж методом взаимной переходной диффузии, а выводы ГМИС СВЧ расположены на обратной стороне диэлектрической подложки, соединённые с лицевой стороной сквозными металлизированными отверстиями. Показано, что вносимые потери одного переходного соединения составляют менее 0,5 дБ на частотах до 60 ГГц. При этом максимальная разность температур схемы с толщиной подложки 100 мкм снижена на 10 – 45 °С по сравнению с традиционным методом интеграции, что является весомым результатом.

Обоснованность и достоверность сформулированных в работе положений, основных выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность сформулированных в работе положений, основных выводов и рекомендаций не вызывают сомнений, поскольку они подтверждены применением современных средств математического моделирования, использованием поверенного и аттестованного современного технологического и аналитического оборудования, достаточно высоким соответствием полученных расчетных результатов экспериментальным данным.

Результаты исследований апробированы на всероссийских и международных научно-технических конференциях, отражены в статьях в периодической научной печати и патентах.

Научная, практическая и экономическая значимость результатов и основных положений диссертации

Результаты диссертационной работы имеют весомое научное значение с точки зрения развития научных представлений о физике формирования

контактов для системы металлизации Au-Sn методом взаимной переходной диффузии, а также для обеспечения возможности моделирования и теоретического учета практически всех неоднородностей конструктива ГМИС.

Практическая значимость работы заключается в подготовке физических и конструктивно-технологических основ разработки способов компоновки кристаллов СВЧ транзисторов и МИС методом перевернутого монтажа для обеспечения существенного расширения диапазона рабочих частот, снижения габаритных размеров и улучшения тепловых характеристик СВЧ изделий.

Кроме того, поскольку одним из основных современных направлений развития СВЧ техники является использование в составе СВЧ модулей разнородной гетерогенной ЭКБ (GaAs, GaN, SiGe, Si и др.), предлагаемая в работе технология монтажа, по всей видимости, может быть эффективно применима к практической реализации широкого класса СВЧ изделий.

Полнота опубликования основных результатов диссертации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях в журналах, рекомендованных ВАК, в ряде других научных статей и тезисов докладов, а также подтверждены 3-мя патентами РФ на изобретения. Основные результаты работы диссертанта докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях российского и международного уровня. В тексте диссертации соискатель акцентирует внимание на оригинальных результатах исследований, которые опубликованы им, со ссылками на соответствующие источники.

Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представляется к защите

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.2.2 - «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств» в части направлений исследований по п.1 и п.5. Проведенные научные и экспериментальные исследования однозначно отражают отрасль технических наук.

Оценка оформления диссертации

Текст диссертации написан грамотным, понятным, логически связанным научным языком и содержит минимальное количество грамматических ошибок и опечаток. Автор умело структурирует информацию в виде таблиц, графиков и рисунков, что улучшает её восприятие. Следует также положительно отметить стремление автора акцентировать внимание на ключевых оригинальных результатах работы. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Соответствие научной квалификации соискателя учёной степени,
на которую он претендует

Работа содержит новые научные результаты, имеющие существенное практическое значение для разработки промышленной технологии монтажа полупроводниковых кристаллов методом «flip-chip» с целью создания СВЧ многокристальных модулей гибридного и гибридно-монокристалльного исполнения с продвижением в мм- и субмиллиметровый диапазоны частот. Апробация результатов научных исследований подтверждена публичными докладами на конференциях всероссийского и международного уровня. По теме диссертации опубликовано необходимое количество статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК и патентов. По совокупности критериев диссертационная работа Ефимова А.С. отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Недостатки диссертации и автореферата

По диссертационной работе, однако, необходимо отметить и ряд недостатков:

1. В тексте диссертации отсутствуют обоснования выбора предлагаемых конструкции 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 протекание 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 деградиационных 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 0,5мм² 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.

Отмеченные недостатки представленной диссертационной работы никоим образом не умаляют ее научной и практической значимости и носят скорее рекомендательный характер для дальнейшего развития рассматриваемого направления работ.

Заключение

Диссертация Ефимова А.С. по теме «Интеграция кристаллов полупроводниковых СВЧ приборов с применением метода перевернутого

монтажа на основе тонкоплёночной системы металлов Au-Sn», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств», является законченной научно-квалификационной работой, которая посвящена исследованиям конструктивно-технологических особенностей монтажа кристаллов транзисторов для создания гибридно-монолитных интегральных схем СВЧ диапазона. По своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и практической значимости полученных результатов представленная работа соответствует требованиям пункта 9 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а автор данной диссертации Ефимов Александр Сергеевич достоин присуждения ему искомой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Официальный оппонент,
Заместитель генерального директора
по разработке комплексированной СВЧ ЭКБ
АО «НИИМЭ»,
д.т.н., профессор



Панасенко Пётр Васильевич

«25» 08 2024 г.

Подпись Панасенко Петра Васильевича «Заверяю»

Начальник ОУП  М.В. Лизавенко



Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д.6, с. 1.
Тел.: +7 495 229-70-00