



НИЦ "Курчатовский институт"

**Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение
Институт сверхвысокочастотной
полупроводниковой электроники
им.В.Г.Мокерова
Российской академии наук
(ИСВЧПЭ РАН)**

117105, г. Москва, Нагорный проезд д.7, стр.5
тел./факс 8 (499) 123-44-64
e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru, isvch@isvch.ru
www.isvch.ru
ОКПО 58725825, ОГРН 1027726000180
ИНН/КПП 7726318050/772601001

«21» 08 2024 г. № 24-У/294
На № _____ от _____

В диссертационный совет
74.1.008.01
АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, Московская
область,
ул. Вокзальная, дом 2а, корпус 1

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИСВЧПЭ РАН
доктор технических наук, профессор

С.А. Гамкрелидзе

2024 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Ефимова Александра Сергеевича «Интеграция кристаллов полупроводниковых СВЧ приборов с применением метода перевернутого монтажа на основе тонкопленочной 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».

В последние годы тенденции увеличения функциональной сложности, скорости передачи данных при ужесточении требований к массогабаритным параметрам компонентов и модулей электронных устройств стимулируют развитие технологий высокоплотной интеграции изделий электронной компонентной базы (ЭКБ). Особый интерес, в частности для СВЧ-электроники, представляют технологии развития гибридно-монокристаллических интегральных схем обеспечивающие

улучшенные электрические характеристики, тепловые режимы, снижение массогабаритных характеристик современной ЭКБ СВЧ, что является актуальной задачей.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников, двух приложений. Работа изложена на 159 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков и 13 таблиц. Список использованных источников включает 150 наименований. Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с действующими требованиями ВАК России. Работа изложена ясным научным языком. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

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

В первой главе приведён обзор существующих конструктивных способов интеграции полупроводниковых приборов в микроэлектронике СВЧ; рассмотрены ключевые методы реализации метода перевернутого монтажа, сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты исследования и разработки технологии формирования соединительного слоя для МИС СВЧ с применением системы слоёв Au-Sn, сформированных с применением фотолитографических процессов, соединения кристаллов методом взаимной переходной диффузии на основе системы слоёв Au-Sn. Показано, что монтаж методом взаимной переходной диффузии на основе системы Au-Sn обеспечивает интеграцию кристалла к кристаллу, близкую к монолитной, одновременно обеспечивая преимущества гибридно-монолитной конструкции, в том числе возможность применения разных полупроводниковых технологий – гетерогенной интеграции.

В третьей главе исследованы частотные и тепловые характеристики конструкций интеграции кристаллов СВЧ с межсоединениями, сформированными из предложенной системы металлов Au-Sn. Описана оригинальная конструкция гибридно-монолитной интегральной схемы СВЧ с применением метода перевернутого монтажа на основе тонкоплёночной системы металлов Au-Sn.

Представлены экспериментальные результаты тестовых конструкций с копланарной линией и активным элементом, которые подтверждают работу конструкции ГМИС СВЧ в диапазоне до 50 ГГц. Результаты тестов на прочность показывают стойкость к механическим и климатическим воздействиям, предъявляемые к современной ЭКБ СВЧ специального назначения.

В четвёртой главе представлен анализ зарубежных и отечественных конструктивных способов реализации интегральных схем СВЧ для поверхностного монтажа. Исследованы зависимости частотных характеристик схем от параметров отдельных элементов конструкции. Описана оригинальная конструкция гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ для поверхностного монтажа, исследованы её частотные и тепловые характеристики.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы, выводы и перспективы дальнейшей разработки темы.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что:

- 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. Средняя прочность соединения на сдвиг составила 32,2 МПа;

- 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 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;

- 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. 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.

Обоснованность и достоверность сформулированных в работе положений, основных выводов и рекомендаций подтверждается применением современных методов математического моделирования, использованием современного оборудования для получения экспериментальных данных, а также близостью полученных расчётных результатов с экспериментальным данным. Результаты диссертационного исследования апробированы на 8 российских и международных научно-технических конференциях.

Основные результаты работы опубликованы в 18 научных работах, в том числе в 6 изданиях, рекомендованных ВАК (1 без соавторов), 2 публикации проиндексированы в Scopus. Получено 3 патента на изобретение Российской Федерации. Результаты исследований доложены и обсуждались на 8 всероссийских и международных конференциях.

Практическая значимость обеспечена использованием результатов работы при выполнении опытно-конструкторских работ по созданию гибридно-монолитных интегральных схем СВЧ в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

В автореферате достаточно полно отражены основные положения и выводы диссертации, которая выполнена на высоком научно-техническом уровне.

К недостаткам диссертационной работы следует отнести следующее:

- не определены границы применимости предложенных конструкций ГМИС СВЧ по реализуемой площади соединяющего слоя из системы слоёв Au-Sn;
- в главе 3 не приведена методика экстракции параметров элементов эквивалентной схемы исследуемых межсоединений;
- имеется ряд опечаток в тексте диссертации.

Однако отмеченные недостатки не снижают ценности диссертационной работы и ее практической значимости. Материалы диссертационного исследования свидетельствуют о научной зрелости диссертанта, способного решать научно-теоретические и практически значимые проблемы производства гибридно-

монолитных интегральных схем СВЧ с применением метода перевернутого монтажа.

Диссертационная работа Ефимова А.С., её содержание, цель, постановка задач и методы их решения, а также полученные автором результаты и их анализ соответствует паспорту специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств». Диссертационная работа удовлетворяет требованиям п.п. 9-14 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 14.09.2013 года №842, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Диссертационная работа была заслушана и обсуждена на заседании Ученого совета федерального государственного бюджетного научного учреждения Институт сверхвысококачастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) (протокол № 7).

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Институт сверхвысококачастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН).

Адрес: 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр.5

Тел.: 8 (495) 280-75-48

Электронная почта: isvch@isvch.ru

Сайт: <https://new.isvch.ru>

Заместитель директора по научной работе ИСВЧПЭ РАН,

кандидат физико-математических наук, доцент



Д.С. Пономарев