

ОТЗЫВ
на автореферат диссертационной работы
Ефимова Александра Сергеевича на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная
компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств»
Тема работы: **«Интеграция кристаллов полупроводниковых СВЧ приборов**
с применением метода перевернутого монтажа на основе тонкопленочной
системы металлов AuSn»

Развитие современных СВЧ систем РЛС с АФАР, систем управления и навигации и РЭБ предусматривает создание современных приемо-передающих модулей (ППМ) на основе полупроводников (ПП) группы АЗВ5 и гетероструктурных полевых транзисторов. Развитие СВЧ электронной компонентной базы (ЭКБ) происходит в направлениях повышения уровней выходной мощности, рабочих частот, расширения рабочей полосы частот, увеличения функциональности и миниатюризации СВЧ систем. 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 подход гибридно-монолитной интеграции кристаллов СВЧ подразумевает монтаж отдельных кристаллов активных и пассивных элементов, электрическое соединение между кристаллами с помощью проволоч. Проволочное электрическое соединение кристаллов ограничивает частотные характеристики схем и имеет непредсказуемый разброс по длине и форме изгиба, что сильно сказывается с ростом рабочих частот. Отвод тепла осуществляется через подложку и соединяющий слой, которые имеют ограничения по теплопроводности и толщинам. Плотность интеграции ограничена планарностью и одноэтажностью конструкции и необходимым технологическим зазором между кристаллами. Необходимость расширения диапазона частот, снижения потерь СВЧ и значений реактивных паразитных составляющих эквивалентной схемы межсоединений, а также снижение стоимостных (при применении только проверенных по СВЧ параметрам активных элементов, особенно гетероструктурных транзисторов на основе АЗВ5 и III-N ПП) и массогабаритных характеристик изделий обуславливают необходимость разработки беспроводного монтажа. Беспроволочный монтаж твердотельных ЭКБ СВЧ широко применяется в АО «НИИ «Октава» в диапазоне частот до 20ГГц (промышленный мелкосерийный выпуск). Основой такого соединения является перевернутый монтаж (Flip-chip) с применением ультразвуковой сварки «золото по золоту» и температуры 300 - 320°С. Однако этот тип монтажа имеет ряд недостатков, к которым можно отнести необходимость точного совмещения соединяемых кристаллов, повышенные требования к поверхностным обработкам кристаллов перед монтажом, шероховатость и пластичность гальванического покрытия соединяемых золотыми столбиками поверхностей, а также сложность неразрушающего контроля качества соединения. Применение вместо Au столбиков (bumps) столбиков на основе низкотемпературной тонкопленочной системы Au-Sn, формируемых методом напыления, гальваники и фотолитографии, позволяет упростить процесс сборки, реализовать самосовмещаемость соединяемых контактных площадок на кристаллах и повысить процент выхода на операции перевернутого монтажа. Исследованию и созданию технологии формирования и конструкции столбиков на основе многослойной металлизационной системы Au-Sn-Au-Sn, внедрению ее в изделия ГМИС АО НПП «Исток» и разработке новых конструкций ГМИС СВЧ в диапазоне частот до 60 - 100ГГц посвящена диссертационная работа Ефимова А. С. Постановка такой задачи актуальна и своевременна.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Предложен и реализован метод формирования соединяющего слоя на основе тонкоплёночной системы Au-Sn для перевернутого 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. Проведены механические и температурные испытания такого соединения.

2. Предложена оригинальная конструкция гибридно-монолитной интегральной схемы СВЧ, в которой кристаллы транзисторов и МИС СВЧ лицевой стороной интегрируются на диэлектрическую подложку посредством соединяющей тонкоплёночной системы Au-Sn. 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 (проволочками) методом интеграции.

3. Предложена оригинальная конструкция гибридно-монолитной интегральной схемы СВЧ для поверхностного монтажа, в которой кристаллы транзисторов и МИС СВЧ лицевой стороной интегрируются на диэлектрическую подложку посредством соединяющего слоя Au-Sn, а выводы ГМИС СВЧ расположены на обратной стороне диэлектрической подложки, соединённые с лицевой стороной сквозными металлизированными отверстиями и квази-коаксиальным переходом через нижний кристалл. 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 (проволочками) методом интеграции.

Достоверность научных результатов:

Степень достоверности научных результатов подтверждается применением современных методов математического моделирования электрических и тепловых характеристик разработанных конструкций, большим объемом полученных экспериментальных данных с использованием современного технологического и измерительного оборудования, подтверждающих теоретические расчеты и надежность перевернутого монтажа методом взаимной переходной диффузии соединения Au-Sn.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

В представленной диссертации заложены теоретические и технологические основы нового способа перевернутого монтажа кристаллов, который уже внедрен в двух ГМИС усилителей диапазонов X и Ku, разработанных в АО НПП «Исток», и предложены две новые конструкции корпусированных ГМИС СВЧ.

Апробация работы

Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на многочисленных отечественных и международных конференциях в Крыму, Москве, Омске, Новосибирске и Санкт - Петербурге с 2019 по 2023гг. Результаты диссертации опубликованы в 18 научных работах, в том числе 6 в журналах, рекомендованных ВАК. На технические решения получены 3 патента РФ на изобретения.

Диссертация Ефимова А. С. является законченной научно-квалификационной работой. Все результаты, представленные в диссертационном исследовании, получены автором лично, либо при его непосредственном участии. В работах, опубликованных в соавторстве, автором получены существенные теоретические и практические результаты.

К сожалению, в работе не отражен вопрос о неразрушающем контроле нового способа перевернутого монтажа, однако это не снижает ценность и пионерский характер работы в целом.

Считаю, что по объему выполненных исследований, новизне и значимости полученных результатов, обоснованности выводов представленная диссертационная

работа удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ» п.8, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор **Ефимов Александр Сергеевич** заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Ведущий инженер АО «НИИ «Октава», к.т.н., специальность 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Раков
27.08.2024

Раков Юрий Николаевич

Подпись Ракова Юрия Николаевича удостоверяю
Генеральный директор АО «НИИ «Октава»



[Handwritten signature]
Хлыстов Игорь Васильевич

Место работы Ракова Ю.Н.:
Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Октава»
630049 г. Новосибирск, Красный проспект 220, корпус 36
Тел. 8(383) 3630298
e-mail: info@oktava-nsk.ru