

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе и инновациям
Томского государственного университета систем
управления и радиоэлектроники, кандидат
технических наук, доцент

Иошилов Антон Геннадьевич



09

2019 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Диссертация «Микроэлектромеханический переключатель для
сверхвысокочастотных широкополосных интегральных схем» выполнена на кафедре
Физической электроники.

В период подготовки диссертации соискатель Кулинич Иван Владимирович работал
в НОЦ «Нанотехнологии» федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники» в должности инженера, обучался в очной аспирантуре
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники».

В 2013 г. И.В. Кулинич окончил федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный
университет систем управления и радиоэлектроники» по специальности Электроника и
наноэлектроника.

Научный руководитель – Троян Павел Ефимович, доктор технических наук,
профессор, основное место работы: федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный
университет систем управления и радиоэлектроники», заведующий кафедрой физической
электроники.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы.

Диссертация И.В. Кулинич является научно-квалификационной работой, в которой
содержится решение задачи создания микроэлектромеханического переключателя для
сверхвысокочастотных широкополосных интегральных схем, имеющей особенное
значения для создания электронно-компонентной базы и технологии её реализации на

основе бездрагметальной металлизации, позволяющая совмещать на одном кристалле различные схемотехнические решения.

Актуальность темы и направленность исследования.

Основными тенденциями развития мировой СВЧ радиоэлектронной и телекоммуникационной аппаратуры является расширение полосы частот, повышение степени интеграции и надежности, уменьшение трудоемкости изготовления радиоэлектронных изделий в серийном производстве. Одним из качественных решений для достижения указанных целей является создание СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) по принципу «система на кристалле» (СнК), то есть объединение на одном кристалле в едином технологическом процессе сразу нескольких функциональных блоков (усилителей, смесителей, переключателей, аттенюаторов, фазовращателей и др.).

Особый интерес представляют технологии изготовления СнК, позволяющие создавать усилительные и переключательные СВЧ МИС с повышенными тактико-техническими характеристиками (ТТХ), в частности, для усилительных схем – пониженный коэффициент шума и повышенная выходная мощность; для переключательных устройств – ультранизкие вносимые потери, высокая развязка и высокий уровень коммутируемой мощности.

Одним из перспективных направлений развития таких технологий изготовления СВЧ МИС с улучшенными ТТХ является совмещение транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ-транзисторов) и СВЧ микроэлектромеханических (МЭМ) переключателей на одной подложке. В работах зарубежных исследовательских групп представлены результаты успешных попыток создания таких технологий, а также СВЧ МИС на их основе, в частности, усилителей на рНЕМТ-транзисторах и коммутаторов на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС).

В настоящий момент в некоторых работах приведены результаты разработки 3-х разрядных СВЧ аттенюаторов на основе МЭМ переключателей с ультранизкими потерями в опорном состоянии (менее 1,7 дБ) для широкого диапазона частот (0-20 ГГц). Из отечественных разработок можно отметить работу, в которой автор приводит результаты создания СВЧ МЭМ ключей и НЕМТ-транзисторов на одной пластине без существенного изменения их параметров из-за изменения технологического процесса.

Созданная GaAs СВЧ МИС на основе СВЧ МЭМ ключей, будет по уровню соответствовать мировым достижениям, а по некоторым критериям выше мировых, так как отличается от существующих технологий тем, что вместо традиционной металлизации (золотом), будут использоваться бездрагметальные композиции на основе меди.

Утверждение темы диссертации.

Тема диссертации утверждена решением учёного совета факультета электронной техники томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники от 23 мая 2019 г.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации.

Автором проводился расчет механических и электрических параметров МЭМ ключа, разработка конструкции МЭМ ключа, разработка топологии и технологического маршрута, ведение полупроводниковых пластин по маршруту, химическая пред- и постоперационная обработка пластин, проведение литографических операций, измерение DC характеристик МЭМ ключей и анализ полученных результатов. Вклад основных соавторов заключался в проведении сложных технологических операций (напыление металлов, осаждение диэлектриков), в подготовке и проведении экспериментов, в обсуждении результатов исследований.

Степень достоверности результатов проведённых исследований.

Достоверность результатов диссертационной работы основывается на применении физически обоснованных экспериментальных методик и современного высокоточного оборудования, воспроизводимости полученных результатов и их качественным согласием с результатами авторов других работ, проводимых в данном направлении.

Новизна результатов проведённых исследований.

1) Разработан СВЧ МЭМ ключ с металлизацией на основе пленок Cu, изготовленный на GaAs подложке по модернизированной GaAs технологии, имеющий электрические параметры на уровне параметров СВЧ МЭМ ключей с традиционной металлизацией на основе пленок Au.

2) Предложена конструкция активного элемента СВЧ МЭМ ключа на основе многослойных металлических и диэлектрических пленок, которая характеризуется расширенным частотным диапазоном, увеличенной надежностью, по сравнению с активным элементом на основе однослойной металлизации.

3) Предложена технология корпусирования СВЧ МЭМ ключа на уровне пластины, полностью совместимая с GaAs технологией, не требующая специальных материалов и оборудования.

3) По результатам измерений электрических характеристик по СВЧ сигналу, изготовленные СВЧ МЭМ ключи с медной металлизацией имеют S-параметры, превосходящими параметры СВЧ ключей на основе транзисторов и диодов.

Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов.

1) Разработанная технология СВЧ МЭМ ключа позволила создать серийно производимые GaAs СВЧ МИС, включающие СВЧ МЭМ ключи, в едином технологическом цикле

2) Разработанная конструкция СВЧ МЭМ ключа позволила увеличить частотный диапазон GaAs СВЧ МИС, а так же снизить себестоимость производства за счёт замены Au на Cu, а также создаёт предпосылки для гетероинтеграции GaAs и Si интегральных схем.

Ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах.

По результатам научно-исследовательской деятельности Кулинича И.В. опубликовано 14 работ. Из них количество публикаций в научных журналах, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций – 2, публикаций, индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования Scopus: 1, материалы конференций: 11.

Статьи, опубликованные в журналах, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. Кулинич И.В., Кагадей В.А., Мухтеев Р.Н. Метод корпусирования СВЧ МЭМ-ключа на пластине GaAs с использованием каркасной системы Наноиндустрия. 2019. № S89. С. 211-215.

2. Ерофеев Е.В., Казимиров А.И., Кулинич И.В. Способ формирования наноразмерного затвора для GaAs СВЧ-транзисторов с высокой подвижностью электронов Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 2-1 (26). С. 53-56.

Публикации, проиндексированные в БД Scopus:

1) Baranov, P., Nesterenko, T., Barbin, Kulinich I., Zykov, D., Shelupanov, A. A novel multiple-axis MEMS gyroscope-accelerometer with decoupling frames. Sensor Review. 2019. Vol. 39 No. 5, pp. 670-681

Материалы конференций:

1) Кулинич И.В., Кагадей В.А., Сигута Т.В. Технология изготовления СВЧ МЭМС переключателя с медной металлизацией. VI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», С-Петербург 2017

2) Сигута Т.В., Кулинич И.В. Разработка технологического процесса и изготовление механической модели МЭМС-переключателя // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов XI Международной научно-практической конференции. 2015 г.: В 2 ч. – Ч. 1. С. 119-123

3) Кулинич И.В., Кагадей В.А., МЭМС СВЧ переключатель с металлизацией на основе меди, Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: материалы VI общероссийской научно-технической конференции, Омск 2016. С. 245-249.

4) Попов А.А., Билевич Д.В., Сидорюк Т.Ю., Кулинич И.В., Сальников А.С. Построение поведенческой модели проявления фоторезистивной маски // Электронные средства и системы управления. 2017. № 1-1. С. 110-113.

5) Кулинич И.В. Фам Т.Х. Программа моделирования для исследования процесса проявления фоторезистивной маски // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР 2016», Томск. 2016.

6) Кулинич И.В. Сигута Т.В. Моделирование активного элемента МЭМС СВЧ переключателя // Глобализация науки: проблемы и перспективы. Сборник статей Международной научно-практической конференции. 3 апреля 2015 г Уфа. 2015 С. 26-29.

7) А.А. Коколов, А.В. Помазанов, Ф.И. Шеерман, Е.А. Шутов, Л.И. Бабак, И.В. Кулинич Двойной балансный активный субгармонический смеситель К-диапазона на основе 0.25 мкм SiGe БиКМОП технологии // Электронные средства и системы управления. 2019.

8) И.В. Кулинич, В.А. Кагадей, Н.Д. Малютин, Д. Бабашко Монолитный СВЧ МЭМ переключатель до 25 ГГц // 29-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 2019, Севастополь.

9) И.В. Кулинич, Т.В. Сигута Исследование влияния технологических допусков на характеристики МЭМС СВЧ переключателя // Международный Научный Институт "Educatio" VIII(15), 2015. – С. 93-96.

10) И.В. Кулинич, Т.В. Сигута Анализ технологии изготовления МЭМС ключа // Международная научно – практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР - 2016». – Томск: ТУСУР, 2016. – Часть 2 – с. 147-150.

11) И.В. Кулинич, Т.В. Сигута Оптимизация технологии формирования балки МЭМС переключателя // XII Международная научно – практическая конференция «Электронные средства и системы управления». – Томск: ТУСУР, 2016.

В опубликованных работах достаточно полно отражены материалы диссертационного исследования.

Соответствие диссертации избранной специальности.

Предмет исследования и материалы диссертационной работы соответствуют специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии по областям исследования:

1) Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных устройств СВЧ, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих и других, с существенно улучшенными параметрами

Диссертация «Микроэлектромеханический переключатель для сверхвысокочастотных широкополосных интегральных схем» Кулинич Ивана Владимировича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии.

Заключение принято на заседании кафедры физической электроники факультета электронной техники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Присутствовало на заседании 10 чел. Результаты голосования «за» 10 чел., «против» нет, «воздержались» нет, протокол № 28 от 26.09.2019 г.

Председатель
Зав. кафедрой ФЭ
профессор, д.т.н.



Троян Павел Ефимович

Секретарь
Ст. преподаватель
каф. ФЭ



Каранский Виталий
Владиславович

Верно:
Учёный секретарь ТУСУР



Прокопчук Елена
Викторовна