

УТВЕРЖДАЮ

Директор департамента науки
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

д.т.н., профессор
В.В. Лучинин



« 5 »

2019 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Кулинича Ивана Владимировича
«Микроэлектромеханический переключатель для сверхвысокочастотных широкополосных интегральных схем» представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»

Общие положения

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

В состав диссертации входят введение, 5 глав, заключение, список литературы из 89 наименований. Объем диссертации – 113 с., в т.ч. 93 рисунка и 4 таблицы.

Актуальность избранной темы диссертации

Актуальность темы работы определяется, в первую очередь, ее направленностью на совмещение полупроводниковых СВЧ устройств и СВЧ микроэлектромеханических (МЭМ) устройств на одной подложке. Это позволяет повысить степень интеграции СВЧ изделий при использовании преимуществ микромеханических переключателей. Все это требует разработки согласованных технологических и конструктивных решений.

Краткое содержание работы

В **первой главе** (с. 11-47 диссертации) проведен обзор существующих конструкций микроэлектромеханических ключей, технологий их изготовления и корпусирования. Описаны способы оценки надежности механических конструкций. Обоснована актуальность исследования в выбранной диссертационной области, сформулированы задачи исследования.

Во **второй главе** (с. 49-60 диссертации) описана техника и методика проводимых экспериментов. Приведено подробное описание тестовых

структур, применяемые в разработке методик формирования ключевых элементов микроэлектромеханического ключа и технологии его корпусирования.

Третья глава (с. 60-86 диссертации) посвящена разработке механической и электрической модели микроэлектромеханического ключа. Проведены исследования подвижной балки МЭМ ключа, определены оптимальные геометрические размеры, позволяющие обеспечивать высокую надежность прибора. Проведены исследования СВЧ характеристик разработанной модели МЭМ ключа. На основании проведенных исследований разработана конструкция СВЧ МЭМ ключа, а также разработана модель корпуса МЭМ ключа, позволяющий проводить герметизацию на уровне пластины.

В **четвертой главе** (с. 89-10 диссертации) описаны исследования, направленные на формирования СВЧ МЭМ ключа на основе технологии изготовления GaAs СВЧ МИС. По результатам проведенных исследований разработаны технологические маршруты формирования подвижной балки СВЧ МЭМ ключа, формирования корпуса СВЧ МЭМ ключа, формирования секции аттенюатора на основе СВЧ МЭМ ключей.

В **пятой главе** (с. 101-104 диссертации) приведены исследования электрических характеристик разработанного СВЧ МЭМ ключа с медной металлизацией. Исследования по постоянному току показали, что выход годных приборов составляет не менее 70%, среднее значение контактного сопротивления по пластине составляет 2.46 Ом, время включения составило 80 мкс. Исследования на СВЧ сигнале показали, что разработанный МЭМ ключ в открытом состоянии имеет коэффициент вносимых на максимальной частоте 25 ГГц потерь не более 0,4 дБ. Коэффициент изоляции на максимальной частоте 25 ГГц не хуже -25 дБ.

Степень обоснованности и достоверности научных результатов

Достоверность полученных диссертантом результатов обеспечивается применением сертифицированных и поверенных автоматизированных измерительных комплексов.

Результаты моделирования механических характеристик обосновываются применением сертифицированного программного обеспечения Comsol Multiphysics, в котором расчет осуществляется с помощью численных методов математического анализа в моделировании, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных и методе конечных элементов. Результаты моделирования электромагнитного

анализа обосновывается применением сертифицированного программного обеспечения EDAAWRMicrowaveOffice.

Основные результаты проведенных исследований

- Проведены исследования и разработана механическая модель МЭМ ключа с медной металлизацией и балкой на основе МДМ структуры.
- Проведены исследования и разработана СВЧ модель МЭМ ключа с медной металлизацией.
- Разработаны технологический маршрут и технология изготовления СВЧ МЭМ ключа, позволяющие изготавливать в едином технологическом цикле с GaAs СВЧ МИС.
- Разработаны технологический маршрут и технология корпусирования МЭМ ключа на уровне пластины, совместимый с GaAs технологией изготовления СВЧ МИС.
- По разработанной технологии были изготовлены СВЧ МЭМ ключи и СВЧ аттенюатор на их основе. Показано, что электрические параметры разработанных СВЧ МЭМ ключей с медной металлизацией превосходят электрические параметры зарубежных МЭМ аналогов и по некоторым параметрам превосходят полупроводниковые ключи.
- Время включения, разработанного СВЧ МЭМ ключа, составляет 80 мкс.
- Напряжение включения составило 25 В.

Научная новизна работы

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

Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики

Работа обладает как научной, так и практической ценностью.

Теоретическая значимость исследования заключается в следующем:

Показано, что СВЧ ключи в копланарном исполнении на основе пленок Cu, изготовленные на GaAs подложке в виде микроэлектромеханической системы в полосе частот до 25 ГГц имеют электрические характеристики не хуже зарубежных аналогов на основе золотой металлизации.

Метод корпусирования на основе каркасной системы позволяет проводить герметизацию СВЧ МЭМ ключей на уровне пластине, сохраняя при этом свободное внутреннее пространство, является совместимым с технологией изготовления разработанного GaAs СВЧ МЭМ ключа и GaAs СВЧ МИС.

Практическая значимость диссертационной работы:

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

Разработанная конструкция СВЧ МЭМ ключа позволила увеличить частотный диапазон GaAs СВЧ МИС, а также снизить себестоимость производства за счёт замены Au на Cu.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке радиоизмерительной аппаратуры, приемо-передающих модулей, средств связи и радиолокации на предприятиях: АО «НПФ «Микран», АО «НИИПП», АО «Микроволновые системы», ООО «Планар», АО «НПП «Радар ммс», НПП «Пульсар», АО «ОНИИП».

Общие замечания по диссертационной работе

1. В 5 главе (4 станицы) не представлены методики проведения измерений и результаты исследования быстродействия переключателей (есть только на включение). Отсутствует сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования.

2. В работе поставлена задача, но отсутствует оценка надежности разработанного СВЧ МЭМ ключа на основе пленок Cu.

3. Не представлен алгоритм и процесс оптимизации конструкции монолитного МЭМ СВЧ ключа на основе пленок Si на подложке GaAs.

4. По предложенным и раскрытым в работе техническим решениям отсутствуют защищающие их патенты.

Отмеченные недостатки не снижают теоретическую и практическую значимость диссертации и не влияют на общую положительную оценку выполненных исследований и разработок умножителей частоты.

Заключение

Диссертация Кулинич Иван Владимировича «Микроэлектромеханический переключатель для сверхвысокочастотных широкополосных интегральных схем» представляет собой законченную научно-квалификационную работу по актуальной проблеме разработки технологии и создания компонентной базы СВЧ диапазона. Достоверность полученных результатов подтверждена качеством проработки теоретической базы описанных методов и полученных экспериментальных данных. Основным итогом диссертации – разработка конструкции и технологии монолитного МЭМ СВЧ ключа на основе пленок Si на полупроводниковой подложке GaAs. Результаты и выводы в работе достаточно обоснованы.

По теме диссертации автором опубликовано 13 научных работ, в том числе 2 статей в изданиях из перечня ВАК. Результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на 9 международных и всероссийских научно-технических конференциях.

Автореферат отражает содержание диссертации, а публикации полностью раскрывают защищаемые научные положения. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»(пункты 2 и 3).

По результатам проведенного рассмотрения материалов диссертации считаем, что диссертационная работа Кулинич И.В. «Микроэлектромеханический переключатель для сверхвысокочастотных широкополосных интегральных схем» по актуальности, объему выполненных исследований, научной и практической значимости удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор Кулинич Иван Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 - «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Доклад по диссертационной работе Кулинича И.В. заслушан и одобрен на заседании кафедры микро- и нанoeлектроники (протокол № 8/19 от 04 декабря 2019 г.)

Зам. заведующего кафедры МНЭ
по научной работе, д.ф.-м.н., профессор



В.А. Мошников

Ученый секретарь кафедры МНЭ,
к.ф.-м.н., доцент



О.А. Александрова

Наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Почтовый адрес: 197376, Россия, С.-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5

E-mail: info@etu.ru

Телефон: +7 812 346-44-87

www.etu.ru