

УДК 621.318.51

На правах рукописи



Кулинич Иван Владимирович

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ ДЛЯ
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Специальность 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»)

АВТОРЕФЕРАТ
Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель: Троян Павел Ефимович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Разинкин Владимир Павлович,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный технологический
университет», г. Новосибирск;

Будяков Алексей Сергеевич,
кандидат технических наук,
АО «Научно-производственное
предприятие «Пульсар», г. Москва.

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И.
Ульянова (Ленина)», г. Санкт-
Петербург.

Защита состоится «25» декабря 2019 г. в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.268.01, созданного на базе ТУСУР по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/f82xztrq>

Автореферат разослан «22» ноября 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



А.Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

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, аттенуаторов, 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 полупроводниковых СВЧ устройств и СВЧ микроэлектромеханических (МЭМ) устройств 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 аттенуаторов 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.

Цель работы.

Целью работы является исследование, разработка и создание СВЧ микроэлектромеханического ключа на основе медной металлизации и СВЧ МИС включающая МЭМ ключ, изготовленные в едином технологическом цикле.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка и оптимизация конструкции монолитного МЭМ СВЧ ключа на основе пленок Cu на полупроводниковой подложке GaAs.
2. Разработка и апробация технологического маршрута изготовления МЭМ СВЧ ключа.
3. Исследование различных типов корпусирования МЭМС устройств, разработка и оптимизация конструкции и технологии корпусирования СВЧ МЭМ ключа на уровне пластины на полупроводниковой подложке GaAs.
4. Исследование электрических параметров и оценка надежности СВЧ МЭМ ключа на основе пленок Cu.
5. Проектирование СВЧ МЭМ переключателя на GaAs подложке.

Научная новизна:

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.

4. 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.

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 также снизить себестоимость производства за счёт замены Au на Cu, а также создаёт предпосылки для гетероинтеграции GaAs и Si интегральных схем.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. СВЧ ключи в копланарном исполнении на основе пленок Cu, изготовленные на GaAs подложке в виде микроэлектромеханической системы в полосе частот от DC до 25 ГГц имеют в открытом состоянии потери менее -0,5 дБ, в закрытом состоянии изоляцию не хуже -25 дБ.
2. 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.
3. Технология изготовления СВЧ МЭМ ключей с медной металлизацией и его корпусирования на уровне пластины позволяет изготавливать GaAs СВЧ МИС на основе МЭМС на одной подложке в едином технологическом цикле.

Апробация результатов работы.

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- XI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2015.
- Материалы VI общероссийской научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем», г. Омск, 2016.

- VI Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», г. С.-Петербург, 2017.
- IV Международная конференция по микроэлектронике «ЭКБ и микроэлектронные модули», г. Алушта, 2018.
- 29 – Международная крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2019.

Личный вклад автора.

Диссертация является результатом исследований, проводившихся автором совместно с сотрудниками АО «НПФ «Микран» и НОЦ «Нанотехнологии» ФГБОУ ВО ТУСУР. Автором, совместно с научным руководителем формулировались цель и задачи исследования, обсуждались пути их достижения, анализировались результаты экспериментов, а также проводилось обобщение полученных результатов исследования. Личный вклад автора заключается в выборе направлений исследования, разработке и оптимизации конструкции МЭМ ключа, операций, технологических блоков и технологического маршрута изготовления СВЧ МЭМ ключа, выполнении экспериментальных исследований, обработке и анализе результатов экспериментов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен литературный обзор по теме диссертации. Анализ научно-технической литературы позволил сделать следующие выводы:

1. Широкое распространение в СВЧ электронике получили МЭМ ключи электростатического типа с ёмкостным и резистивным типом контакта.

2. Основным материалом при создании МЭМС является кремний и золото. Наиболее близкой технологией создание МЭМС с технологией GaAs СВЧ МИС является поверхностная микрообработка.

3. Применяемые в мире методы корпусирования МЭМС плохо совместимы с традиционной технологией изготовления GaAs СВЧ МИС, так как требуют специального оборудования и материалов.

4. Разработка СВЧ МЭМ ключа с медной металлизацией по совместимой с технологией изготовления GaAs СВЧ МИС имеет высокую практическую значимость. Замена золотой металлизации на медную металлизацию позволит снизить механические напряжения в конструкции МЭМ ключа. Совместимость технологий изготовления позволит провести гетероинтеграцию МЭМС и МИС.

5. Для упрощений процесса гетероинтеграции МЭМС и МИС требуется разработка метода корпусирования на уровне пластины совместимой с технологией изготовления GaAs СВЧ МИС.

Полученные выводы позволяют сформулировать следующие задачи:

1. Разработка и оптимизация конструкции монолитного МЭМ СВЧ ключа на основе пленок Cu на полупроводниковой подложке GaAs.

2. Разработка и апробация технологического маршрута изготовления МЭМ СВЧ ключа на основе пленок Cu на полупроводниковой подложке GaAs.

3. Исследование различных типов корпусирования МЭМС устройств, разработка и оптимизация конструкции и технологии корпусирования СВЧ МЭМ ключа на уровне пластины на полупроводниковой подложке GaAs.

4. Исследование электрических параметров и оценка надежности СВЧ МЭМ ключа на основе пленок Cu.

Во второй главе представлены оборудование и экспериментальные методики, использовавшиеся при выполнении данной работы.

В третьей главе представлены результаты работы, направленные на разработку конструкции (макета) СВЧ МЭМ ключа с медной металлизацией на основе копланарной линии, проведено моделирование механических характеристик балки СВЧ МЭМ ключа, а также моделирование электрических характеристик макета МЭМ ключа на СВЧ сигнале.

Разработка макета СВЧ МЭМ ключа требует мультизадачный подход. СВЧ МЭМ ключ — это механический прибор, который должен работать в полосе частот от DC до 40 ГГц. Так как

разрабатываемый СВЧ МЭМ ключ предназначен для гетероинтеграции с GaAs СВЧ МИС на полупроводниковой подложке, геометрические размеры элементов МЭМ ключа, должны соответствовать геометрическим размерам GaAs СВЧ МИС. Так же, СВЧ МЭМ ключ должен корпусироваться на уровне пластины, сохраняя при этом свободное воздушное пространство для механического передвижения балки. Соответственно для разработки макета СВЧ МЭМ ключа необходимо разработать механическую модель МЭМ ключа, механическую модель корпуса МЭМ ключа и СВЧ модель МЭМ ключа.

Для реализации нормально закрытого СВЧ МЭМ ключа была предложена конструкция на основе копланарной линии с разрывом в сигнальном электроде (рис.1).

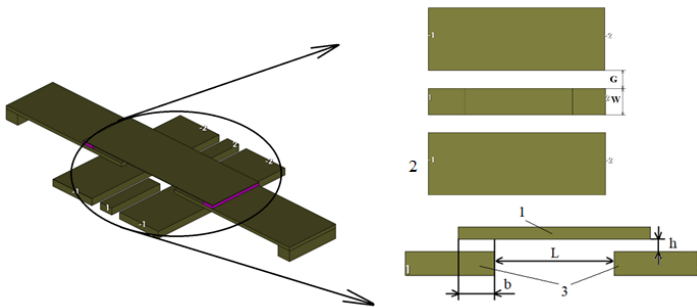


Рис.1 – Поясняющий рисунок конструкции МЭМ ключа на основе копланарной линии

- 1- Замыкающий электрод; 2 – Заземляющий электрод;
3 – Сигнальный электрод.

В такой конструкции в режиме, когда на управляющие электроды МЭМ ключа напряжение не подано, сигнал от входа не будет поступать на выход за счет разрыва L . При приложении управляющего напряжения, положительный заряд на управляющие электроды, отрицательный на подвижную балку, за счет электростатических сил балка притянется и замыкающий электрод замкнет разрыв в сигнальном электроде и сигнал пройдет от входа к выходу ключа.

Расчет механических параметров разрабатываемой конструкции был направлен на поиск геометрических размеров балки МЭМ ключа и проводился с помощью Comsol Multiphysics. Выбранные

геометрические размеры должны обеспечить количество циклов переключения не менее 10^8 , напряжение переключения должно быть не более 25 В, а так же должны соответствовать технологическим особенностям литографического процесса изготовления GaAs СВЧ МИС. Расчет электрических параметров проводился в AWR Microwave Office и направлен на поиск геометрических размеров, обеспечивающие режим работы СВЧ МЭМ ключа до 25 ГГц с вносимыми потерями не хуже -0,5 дБ, коэффициентом изоляции не хуже -25дБ.

По результате проведения механических и электрических исследований были выбраны следующие параметры: разрыв в сигнальном электроде - 60 мкм, толщина балки - 1 мкм, толщина диэлектрического слоя в балке МЭМ ключа - 0,2 мкм, длина балки МЭМ ключа - 350 нм, область перекрытия замыкающим электродом - 8 мкм. На рис.2 представлена геометрическая модель разработанного СВЧ МЭМ ключа.

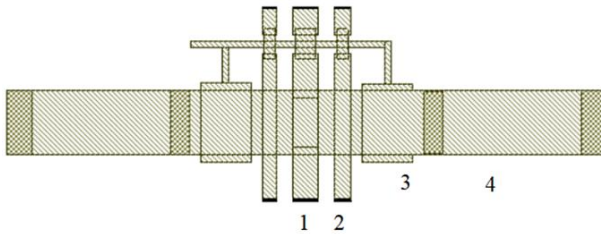


Рис.2 – 2D модель спроектированного СВЧ МЭМ ключа:
 1 – Электрод сигнальной линии; 2 – Заземляющий электрод;
 3 – Управляющий электрод; 4 – Балка МЭМ ключа.

Для обеспечения корпусирования МЭМ ключа на уровне пластины, был разработан метод корпусирования на основе каркасной системы, совместимый с технологией изготовления GaAs СВЧ МИС. Проведенные механические и гидродинамические исследования позволили определить необходимые геометрические размеры ячейки каркасного слоя. На рис. 3 представлен результат моделирования возникающих напряжений в каркасном слое при оптимальной геометрии.

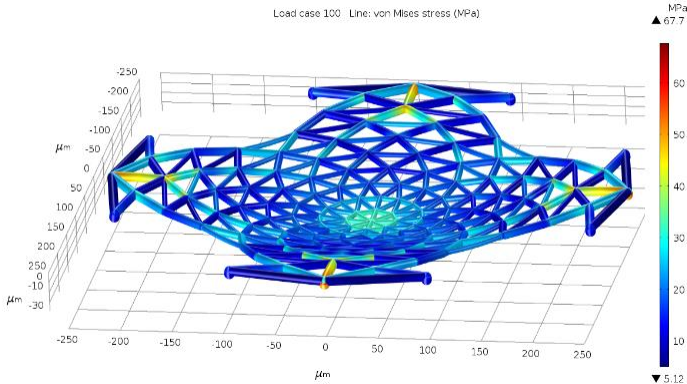


Рис. 3 – Результат моделирования возникающих напряжений в каркасной системе.

На рис. 4 представлен результат моделирования распределения герметизирующего слоя бизбензоциклобутена (BCB) на поверхности каркасной системы при оптимальном размере ячейки.

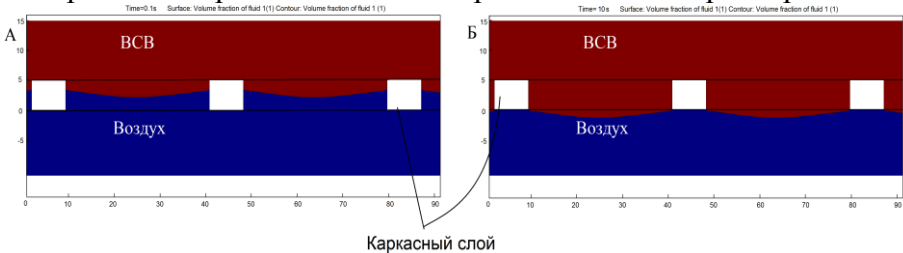


Рис.4 – Распределение фракций BCB и воздуха на каркасном слое

Так как корпусирование МЭМ ключа должно осуществляться непосредственно на пластине, и при этом технология корпусирования должна быть совместима с технологией изготовления GaAs СВЧ МИС, то перед герметизацией слоем BCB, необходимо проведение операции удаления жертвенных слоев и маскирующих слоев фоторезиста. Удаление жертвенных слоёв и маскирующих слоёв фоторезиста в технологии изготовления GaAs СВЧ МИС осуществляется жидкостными растворителями. В следствии чего было проведено исследование, показывающие возможность каркасной системы беспрепятственно пропускать жидкостные растворители. На рис. 5 представлен результат

моделирования двухфазной системы N-метилпирролидона и воздуха в объеме каркасной системы.

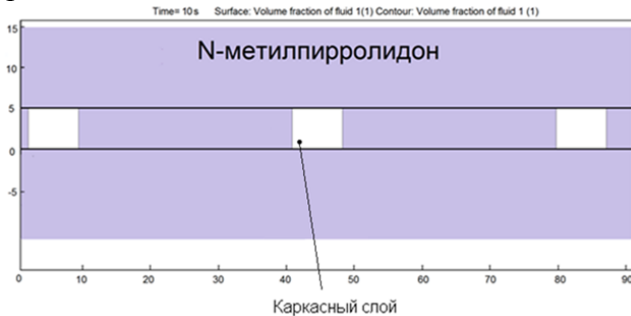


Рис.5 - Распределение фракций растворителя и воздуха через 10 секунд после нанесения

В результате можно заключить, что согласно проведенному исследованию размера ячейки, выбранная конфигурация пространственной рамы отвечает требованиям, предъявляемым к каркасному слою корпуса и может быть использована для удаления жертвенных слоев фоторезиста и последующей герметизации МЭМ ключа.

В четвертой главе приводятся результаты разработки технологических блоков формирования балки МЭМ ключа, корпуса МЭМ ключа и СВЧ аттенюатора на основе МЭМ ключей.

Формирование балки МЭМ ключа производилось по традиционной GaAs технологии изготовления воздушных мостов методом гальванического осаждения с использованием жертвенного слоя. Толщина жертвенного слоя определяла толщину воздушного зазора между балкой и управляющим электродом. В качестве жертвенного слоя использовался фоторезист m-AP1225. На рис. 6 представлена фотография части изготовленной балки на краю электрода сигнальной линии и управляющего электрода.

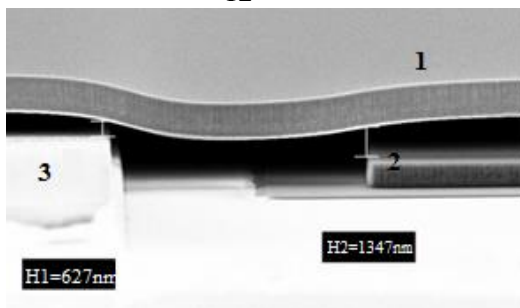


Рис.6 – Микрофотография части балки переключателя:
 1 –Балка МЭМ ключа; 2 –Управляющий электрод;
 3 – Сигнальная линия МЭМ ключа.

Видно, что воздушный зазор между балкой и электродом сигнальной линии на её краю (H1) меньше, чем этот же зазор в центре электрода сигнальной линии (H2). Это обусловлено применением для нанесения жертвенного слоя фоторезиста метода центрифугирования, в результате чего происходит частичная планаризация рельефа, а толщина жертвенного слоя фоторезиста на краю электрода становится меньше, чем в его центре.

Использование метода центрифугирования, при нанесении фоторезиста не позволяет получать равномерный воздушный зазор между балкой и сигнальной линией с управляющими электродами. На рис. 7 пунктирной линией 5 показан профиль в жертвенном слое фоторезиста который позволит получить равномерный воздушный зазор между балкой и сигнальной линией. Для получения данного профиля необходимо провести экспонирование жертвенного слоя фоторезиста, нанесенного толщиной, большей толщины необходимого воздушного зазора (рис. 7, линия 4). Для проведения экспонирования необходимо правильно выбрать распределение подпороговой дозы по площади экспонирования в области сигнальной линии и управляющего электрода, а также режимы последующего проявления фоторезиста в растворителе с тем, чтобы верхняя часть жертвенного слоя фоторезиста (рис. 7, область б) была удалена.

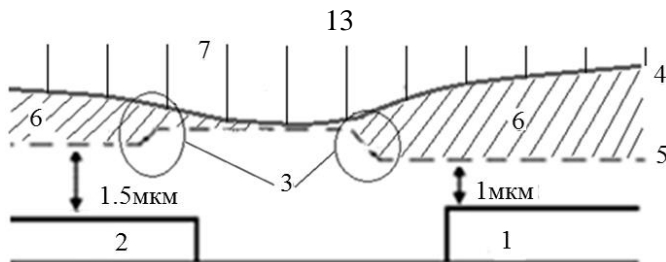


Рис.7 Схематичное изображение поперечного сечения структуры с нанесенным слоем фоторезиста:

- 1 – Электрод сигнальной линии;
- 2 – Управляющий электрод;
- 3 – Область перепада высоты в слое фоторезиста
- 4 – Реальный профиль в фоторезистивном слое;
- 5 – Требуемый профиль в фоторезистивном слое;
- 6 – Удаляемая область жертвенного слоя фоторезиста
- 7 – Область макропикселя.

Для оптимизации распределения подпороговой дозы экспонирования по площади, топологический чертеж был разбит на области (макропиксели) (рис. 7 - 7). Для каждого макропикселя задавалась подпороговая доза экспонирования, в соответствии с толщиной слоя фоторезиста, которую необходимо было удалить в процессе проявления. Выбор дозы экспонирования каждого макропикселя осуществлялся на основе данных, полученных в эксперименте, в котором экспонирование фоторезистивного слоя общей толщиной 3 мкм происходило с градиентом дозы вдоль линии макропикселов. В результате была построена зависимость толщины жертвенного слоя фоторезиста, удаляемого в процессе проявления, от подпороговой дозы экспонирования.

Эксперименты с различными распределениями дозы экспонирования показали, что оптимальный размер макропикселя составляет 0,5 мкм, а изменение дозы экспонирования между соседними макропикселями не должны превышать 10%.

Для исключения образования разрывов в металлизации балки в области перепада высоты (рис. 7, область 3) были проведены исследования, направленные на поиск режимов экспонирования этих областей, позволяющие регулировать наклон стенок в

фоторезистивном слое, без использования попиксельного режима экспонирования с распределением дозы.

На рис. 8 представлены результаты экспериментов, направленные на выявления зависимости наклона стенок в фоторезисте от смещения фокусного расстояния от оптимального (дефокусировка).

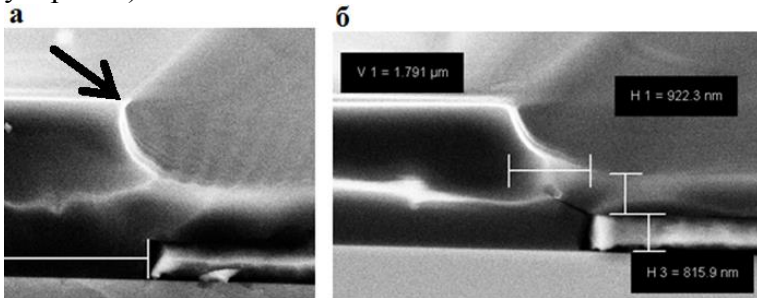


Рис.8 – Микрофотография, иллюстрирующая влияние дефокуса на наклон стенок в жертвенном слое фоторезиста:

а – Профиль в слое фоторезиста при положительном дефокусе;

б – Профиль в слое фоторезиста при отрицательном дефокусе.

При положительном дефокусе в верхнем крае стенки фоторезиста наблюдается отрицательный наклон, показанный стрелкой на рис. 8. При отрицательном дефокусе верхний край стенки фоторезиста сглажен (рис.8 б.) Для того, чтобы не возникали разрывы в металлизации балки, необходимо иметь сглаженный наклон стенок, что достигается при дефокусе в -15 мкм.

По результатам проведенных исследований был разработан оптимальный алгоритм выполнения операций нанесения, экспонирования и проявления жертвенного слоя фоторезиста. На рис. 9 представлена микрофотография профиля в жертвенном слое, полученного по разработанному алгоритму.

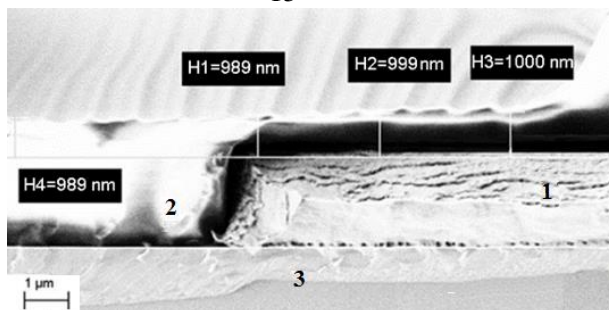


Рис.9 – Микрофотография профиля в жертвенном слое фоторезиста m-AP 1240, полученного методом 3D литографии в оптимальных режимах:

- 1 – электрод сигнальной линии;
- 2 – жертвенный слой фоторезиста;
- 3 – полупроводниковая подложка.

Таким образом, проведенные исследования по оптимизации технологии изготовления медной балки СВЧ МЭМ ключа позволили разработать алгоритм литографических операций, позволяющих получить нужный профиль в жертвенном слое фоторезиста. Для экспонирования с распределением дозы по поверхности жертвенного слоя фоторезиста m-AP 1240 толщиной 3 мкм, оптимальный размер макропиксела составляет 0,5 мкм. Для исключения разрыва металлизации балки в области перепада высоты, необходимо использовать отрицательное дефокус.

В нормально закрытом МЭМ ключе балка представляет собой МДМ структуру. Для получения балки МЭМ ключа в виде МДМ структуры, были проведены исследования и разработан технологический маршрут, представленный на рис. 10.

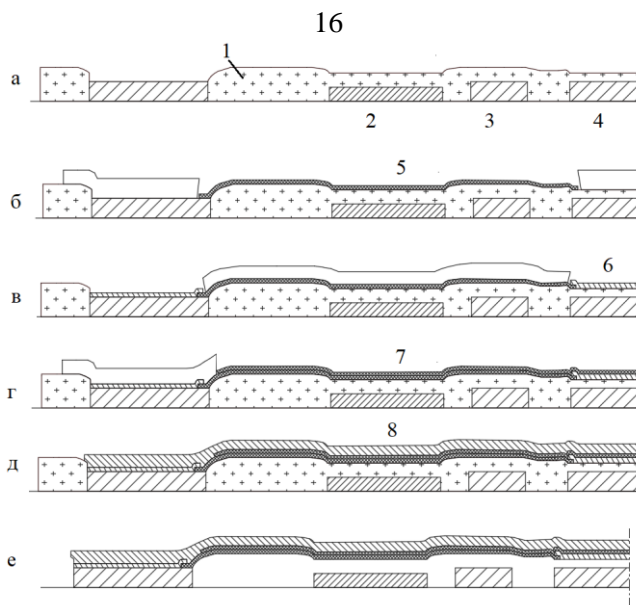


Рис.10 – Технологический маршрут изготовления балки МЭМ ключа в виде МДМ структуры:

- 1 – Жертвенный слой ФР; 2 – Управляющий электрод;
- 3 – Заземляющий электрод; 4 – Электрод сигнальной линии;
- 5 – Нижний диэлектрический слой;
- 6 – Замыкающий электрод;
- 7 – Верхний диэлектрический слой;
- 8 – Основная металлизация балки

На первом этапе блока формирования балки МЭМ ключа формировался жертвенный слой фоторезиста по технологии 3D литографии (рис. 10, а).

Последним этапом блока формирования балки является осаждение основной металлизации балки (рис. 10, д) и удаление жертвенного слоя фоторезиста в растворителе N-метилперролидон (рис.10, е).

Разработка технологического блока корпусирования СВЧ МЭМ ключа включает формирование фоторезистивной маски и гальваническое осаждение медной металлизации каркасной системы. Фоторезистивная маска для гальванического осаждения меди, состояла из жертвенного слоя фоторезистов ma-P1240 и

маскирующего слоя фоторезиста S1830, которые формировались по верх маски балки МЭМ ключа и металлизации балки МЭМ ключа.

В жертвенном слое фоторезиста та-P1240 с помощью лазерной литографии формировались окна, затем с помощью вакуумного осаждения напылялся затравочный слой металлов Ti/Cu. Далее формировалась фоторезистивная маска S1830, через окна которой осаждалась медная металлизация. На рис. 11 представлено схематическое изображение технологического блока формирования металлизации корпуса СВЧ МЭМ ключа.

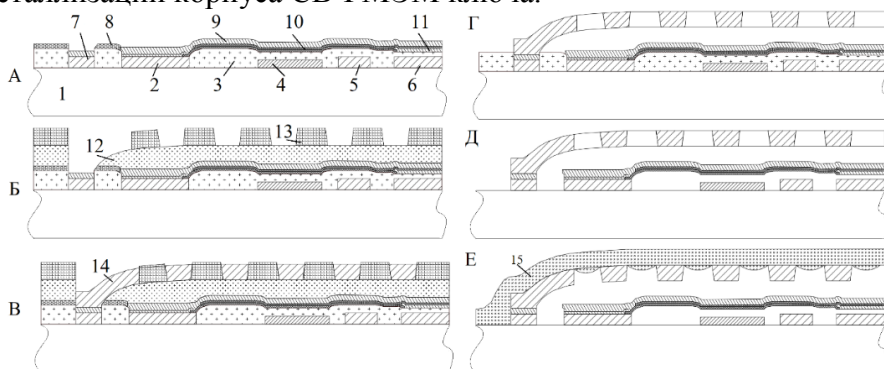


Рис.11 – Схематическое изображение технологического блока формирования корпуса СВЧ МЭМ ключа:

- 1 – Подложка; 2 – Опора балки; 3 – Жертвенный слой ФР;
- 4 – Управляющий электрод; 5 – Заземляющий электрод;
- 6 – Электрод сигнальной линии; 7 – Опора каркасной системы;
- 8 – Маска фоторезиста S1818; 9 – Основная металлизация балки;
- 10 – Диэлектрический слой SiO_2 ; 11 – Замыкающий электрод;
- 12 – Жертвенный слой для каркасной системы;
- 13 – Маскирующий слой ФР для каркасной системы;
- 14 – Металлизация каркасной системы;
- 15 – Герметизирующий слой ФР ВСВ.

После формирования металлизации корпуса, осуществлялось последовательное удаление фоторезистивных масок, затравочных слоев, разделительных слоёв и жертвенных слоев.

После удаления всех затравочных и жертвенных слоев, полученная структура была герметизирована слоем бензоциклобутена Cusclotene 4024. На рис. 12 представлена микрофотография герметизированного СВЧ МЭМ ключа.

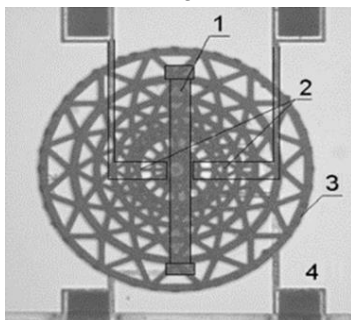


Рис. 12 – Микрофотография СВЧ МЭМ ключа с сформированным корпусом на основе каркасной системы:

- 1 – Балка СВЧ МЭМ ключа;
- 2 – Сигнальная линия СВЧ МЭМ ключа;
- 3 – Каркасная рама СВЧ МЭМ ключа;
- 4 – Управляющий электрод СВЧ МЭМ ключа.

После герметизации проводилось вскрытие окон в слое бензоциклобутена Cyclotene 4024 для получения доступа к электрическим контактам МЭМ ключа.

Формирования секции СВЧ аттенюатора на основе МЭМ ключей в виде копланарной линии основан на технологическом маршруте изготовления МЭМ ключа. Для формирования аттенюатора технологический маршрут изготовления СВЧ МЭМ ключа был дополнен блоком формирования резисторов и включал:

- формирование двуслойной фоторезистивной маски для тела резистора;
- напыление тела резистора;
- формирование двуслойной фоторезистивной маски для металлизации управляющих электродов МЭМ ключа;
- напыление металлизации управляющих электродов;
- формирование фоторезистивной маски для изоляции управляющих электродов МЭМ ключа;
- напыление изоляции управляющих электродов МЭМ ключа;
- формирование фоторезистивной маски для воздушных мостов и балки МЭМ ключа;
- осаждение металлизации воздушных мостов и балки МЭМ ключа;

- удаление фоторезистивных масок и жертвенных слоёв.

На рис. 13 представлена микрофотография изготовленного аттенюатора на основе СВЧ МЭМ ключей с металлизацией на основе меди.

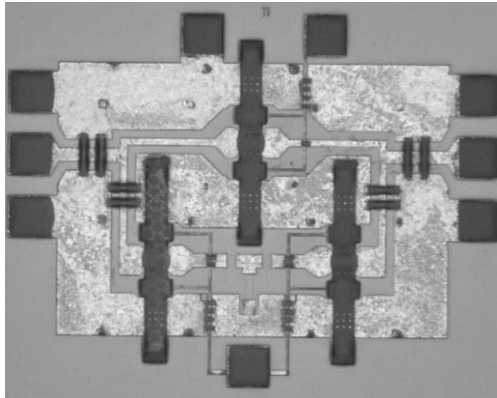


Рис.13 – Микрофотография изготовленного аттенюатора на основе СВЧ МЭМ ключей с металлизацией на основе меди

В пятой главе приведено исследование электрических характеристик СВЧ МЭМ ключей.

На измерениях по постоянному току были сняты временные характеристики процесса включения СВЧ МЭМ ключа. На рис. 14 представлена зависимость коммутирующего тока от времени.

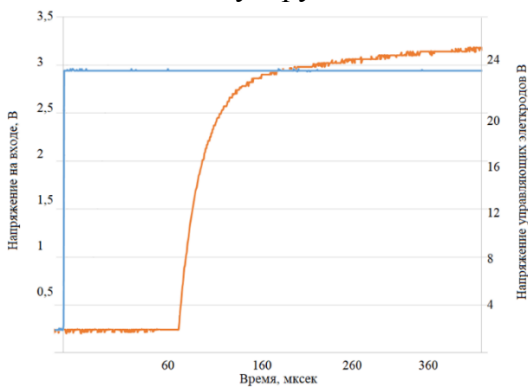


Рис.14 – Измерение времени включения СВЧ МЭМ ключа

Из полученной осциллограммы было установлено, что время включения составляет 80 мксек,

Проведенные измерения контактного сопротивления показали, что среднее значение контактного сопротивления по пластине составило 2,46 Ом.

Исследование по СВЧ МЭМ ключей на выходном контроле показали, что МЭМ ключи, изготовленные по технологии 3D литографии имеют выход годных приборов 70%. МЭМ ключи, изготовленные по классической технологии изготовления GaAs СВЧ МИС имеют выход годных приборов менее 30 %.

Параметры изготовленных макетов МЭМС переключателей по СВЧ сигналу измерялись на векторном анализаторе цепей R&S ZVA-40. На рис. 15-16 представлены результаты измерений S11 и S21 переключателя в открытом и закрытом состояниях.

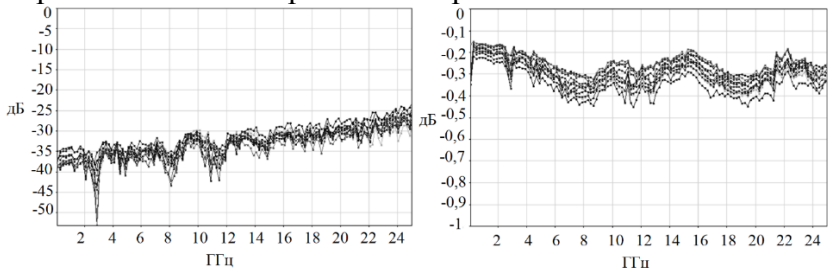


Рис.15– Измеренные коэффициенты S11 и S21 МЭМ СВЧ переключателей с металлизацией на основе меди в открытом состоянии

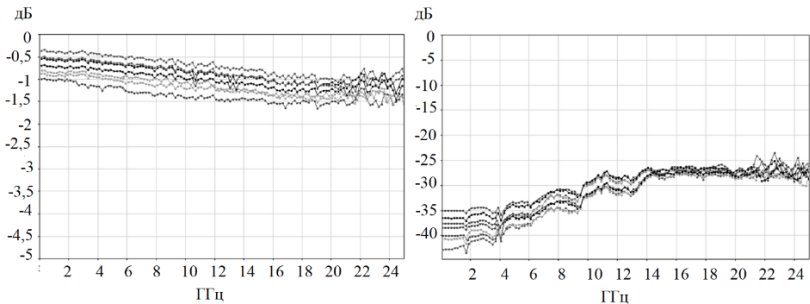


Рис.16 - Измеренные коэффициенты S11 и S21 МЭМ СВЧ переключателей с металлизацией на основе меди в закрытом состоянии

Для оценки полученных данных был проведен сравнительный анализ. В таб. 1 приставлены СВЧ характеристики разработанного СВЧ МЭМ ключа, характеристики промышленных и лабораторных аналогов, и полупроводниковых ключей.

Таблица 1 – Сравнительный анализ характеристик СВЧ МЭМ ключей

Производитель	$U_{\text{упр}}, \text{В}$	$S_{21} (\text{Off})/ S_{21} (\text{On}), \text{dB}$				Материал контактов
		5 ГГц	10 ГГц	15 ГГц	20 ГГц	
ТУСУР	25	-38/ -0,25	-35/ -0,3	-32/ -0,3	-30/ -0,32	Cu
Raytheon	50	-23/ 0,2	-18/ 0,25	-15/ -0,3	-13/ -0,35	Au
Omron. Co	40	-40/ -0,5	-35/ -1	-30/ -1,5	-	Au
Radant MEMS	90	-26/ -0,33	-20/ -0,36	-17/ -0,4	-15/ -0,4	Au
MEMtronics	50	-25/ 0,3	-20/ -0,5	-15/ -0,6	-13/ -0,8	Au
НИИПП	5	-45/-1	-42/ -1,2	-38/ -1,4	-40/ -1,5	GaAs
ЛЭТИ	31	-40/ -0,2	-35/ -0,28	-30/ -0,23	-27,5/ -0,32	Au/SiC
ИСВЧПЭ РАН	20	-	-15/ -0,4	-50/ -0,5	-	Au

Основные результаты работы

В настоящей диссертационной работе проведены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на разработку конструкции СВЧ МЭМ переключателя с медной металлизацией, разработку технологии изготовления СВЧ МЭМ переключателя позволяющая проводить интеграцию GaAs СВЧ МИС и МЭМС на одной полупроводниковой подложке.

Основные результаты полученные в процессе выполнения работы, сформулированы следующим образом:

1) Проведены исследования и разработана механическая модель МЭМ ключа с медной металлизацией и балкой на основе МДМ структуры.

2) Проведены исследования и разработана СВЧ модель МЭМ ключа с медной металлизацией.

3) Разработаны технологический маршрут и технология изготовления СВЧ МЭМ ключа, позволяющие изготавливать в едином технологическом цикле с GaAs СВЧ МИС.

4) Разработаны технологический маршрут и технология корпусирования МЭМ ключа на уровне пластины, совместимый с GaAs технологией изготовления СВЧ МИС.

5) По разработанной технологии были изготовлены СВЧ МЭМ ключи и СВЧ аттенуатор 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

6) Время включения, разработанного СВЧ МЭМ ключа составляет 80 мксек.

7) Напряжение включения составило 25 В.

Список публикаций в журналах, входящие в перечень ВАК РФ:

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.

Список публикаций в журналах в наукометрической базе scopus:

3. Baranov, P., Nesterenko, T., Barbin, , Zikov, D., Shelupanov, A. A novel multiple-axis MEMS gyroscope-accelerometer with decoupling frames.

Список публикаций в трудах конференций:

4. 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. С. 186-191.

5. 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

6. Кулинич И.В., Кагадей В.А., МЭМС СВЧ переключатель с металлизацией на основе меди // Материалы VI общероссийской научно-технической конференции, Омск 2016. С. 245-249.
7. 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: Материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции. 2017. № 1-1. С. 110-113.
8. 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.
9. 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.
10. 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: Материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции. 2019.
11. И.В. Кулинич, В.А. Кагадей, Н.Д. Малютин, Д. Бабошко Монолитный СВЧ МЭМ переключатель до 25 ГГц // 29-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 2019, Севастополь.
12. И.В. Кулинич, Т.В. Сигута Исследование влияния технологических допусков на характеристики МЭМС СВЧ переключателя// Educatio VIII(15), 2015. – С. 93-96.
13. 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. – Часть2 – с. 147-150.
14. 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.