

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники»

На правах рукописи

Кулинич Иван Владимирович



**Микроэлектромеханический переключатель для сверхвысокочастотных  
широкополосных интегральных схем**

05.12.07. – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Троян Павел Ефимович,  
доктор технических наук, профессор

ТОМСК 2019

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. Литературный обзор.....	11
1.1 Виды и конструкции МЭМ ключей .....	11
1.2 Используемые материалы в технологиях микрореле.....	18
1.3 Традиционные технологии изготовления микроэлектромеханических систем .....	21
1.3.1 Объемная микрообработка .....	22
1.3.2 Поверхностная микрообработка .....	22
1.3.3 Технология LIGA.....	23
1.3.4 Технология глубокого активного ионного травления .....	24
1.4 Методы корпусирования МЭМС.....	24
1.4.1 Методы корпусировки на уровне кристалла (DLP).....	26
1.4.1.1 Корпусирование с помощью монолитных капсул .....	26
1.4.1.2 Корпусирование с помощью пайки стеклокерамическим припоем .....	28
1.4.1.3 Объемная поверхностная микрообработка .....	30
1.4.2 Методы корпусирования на уровне пластины WLP .....	34
1.4.2.1 Тонкопленочные метод корпусирования .....	34
1.4.2.2 Герметизация с помощью лазерного оплавления .....	36
1.4.2.3 Корпусирование МЭМ структур в объеме кремниевой пластины	38
1.4.2.3 Корпусирование МЭМС с применением термопластичных материалов .....	39
1.4.2.4 Корпусирование МЭМС методом электрохимического осаждения .....	45
1.5 Исследование надежности стальных конструкций .....	46
1.7 Выводы и постановка задачи .....	47
ГЛАВА 2. Техника и методика эксперимента .....	49
2.1 Техника эксперимента .....	49
2.2 Методика эксперимента .....	50

2.2.1	Формирование металлизации управляющих, заземляющего и сигнального электродов на тестовых структурах.....	50
2.2.2	Формирование тестовых структур для разработки методики формирования необходимого профиля в жертвенном слое фоторезиста.	50
2.2.3	Формирование тестовых структур для разработки методики формирования балки МЭМ ключа в виде МДМ структуры .....	51
2.2.4	Исследование механических напряжений в балки МЭМ ключа.....	52
2.2.5	Исследование электрических характеристик МЭМ ключа по СВЧ сигналу .....	53
2.2.6	Технология изготовления СВЧ МЭМ ключа и его корпусирования на GaAs подложке.....	54
ГЛАВА 3. Разработка макета СВЧ МЭМ ключа .....		60
3.1	Исходные данные к разработке макета СВЧ МЭМ ключа .....	60
3.3	Разработка механической модели балки МЭМ ключа.....	61
3.4.	Исследование модели балки МЭМ ключа с реальной геометрией.....	66
3.4.1.	Исследование влияние рельефа жертвенного слоя на надежность балки МЭМ ключа .....	66
3.5	Разработка электрической модели область электрического контакта балки МЭМ ключа.....	68
3.6.	Разработка модели корпуса МЭМ ключа .....	70
3.6.1	Исследование механики корпуса МЭМ ключа.....	71
3.6.2	Исследование гидродинамики корпуса МЭМ ключа .....	77
3.7	Исследование СВЧ модели МЭМ ключа.....	79
3.7.1	Исследование СВЧ характеристик копланарной линии с разрывом	79
3.7.2	Исследование СВЧ характеристик МЭМ ключа в виде копланарной линии .....	83
3.8	Исследование СВЧ модели МЭМ ключа в корпусе .....	85
3.10	Разработка модели секции аттенюатора на основе СВЧ МЭМ ключа	86
ГЛАВА 4. Технологические блоки и процессы формирования СВЧ МЭМ ключа и GaAs СВЧ МИС на его основе.....		89

4.1 Разработка технологического блока изготовления балки СВЧ МЭМ ключа на основе медной металлизации .....	89
4.1.1 Формирование балки МЭМ ключа на основе медной металлизации по традиционной технологии изготовления воздушных мостов.....	89
4.1.2 Формирование балки МЭМ ключа на основе медной металлизации по технологии 3D литографии.....	90
4.2 Разработка технологического блока изготовления балки СВЧ МЭМ ключа на основе МДМ структуры.....	94
4.3 Разработка технологического блока корпусирования СВЧ МЭМ ключа .....	96
4.4 Формирования секции СВЧ аттенюатора на основе МЭМ ключей .....	98
4.5 Выводы .....	100
ГЛАВА 5 Исследование параметров СВЧ МЭМ ключа и GaAs СВЧ МИС на основе СВЧ МЭМ ключа с медной металлизацией.....	101
5.1 Исследование электрических характеристик по постоянному току СВЧ МЭМ ключа .....	101
5.2 Исследование электрических характеристик по СВЧ сигналу СВЧ МЭМ ключа .....	103
5.5 Выводы к главе .....	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	105
Литература .....	106

## ВВЕДЕНИЕ

**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, аттенюаторов, фазовращателей и др.). Особый интерес представляют технологии изготовления СнК, позволяющие создавать 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.

Повышение ТТХ СВЧ монолитных интегральных схем на основе подложек  $A_3V_5$  осуществляется за счет совмещения с цифровыми схемами на основе кремния [1,2]. Различие в используемой металлизации для кремниевой технологии и технологий на основе подложек  $A_3V_5$  привело к исследованиям, направленные на замену традиционной металлизации на основе золота на металлизацию на основе алюминия и меди [3,4].

Еще одним из перспективных направлений развития технологий изготовления СВЧ МИС с улучшенными ТТХ является совмещение с микроэлектромеханическими (МЭМ) устройствами на одной подложке. В работах зарубежных исследовательских групп представлены результаты успешных попыток создания таких технологий. В работах [5,6,7] 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 [8], 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.

Разработка технологии и созданная СВЧ МЭМ ключей с металлизацией на основе меди, будет по уровню соответствовать мировым достижениям, а по некоторым критериям выше мировых, так как отличается от существующих технологий тем, что вместо традиционной металлизации (золото), будут использоваться композиции на основе меди.

**Цель работы.** Целью работы является исследование и разработка СВЧ микроэлектромеханического ключа на основе медной металлизации, и разработка технологии изготовления СВЧ МЭМ ключа, совместимой с технологии изготовления GaAs СВЧ МИС.

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.

**Методология и методы исследования.** При проведении исследований использовалось численное моделирование механических и электрических процессов, проходящих в металлических и диэлектрических слоях МЭМ ключа. Для подтверждения расчетов проводились экспериментальные исследования особенностей применения жидкостной химической обработки образцов, формирования резистивных пленок методом центрифугирования, лазерной литографии, электронно-лучевого осаждения тонких металлических и диэлектрических пленок при изготовлении МЭМ ключей. Для исследования конструкций макетов МЭМ ключей и разработанных технологических процессов, применялась сканирующая электронная спектроскопия.

**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 позволяет 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.

### **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 пластины, 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.** Основные 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.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 113 страницах, состоит из 5 глав, заключения и списка литературы. Содержит 4 таблицы, 93 рисунка.

**Публикации по теме диссертации.** Всего по результатам исследований опубликовано 13 работ, из них два издания из перечня ВАК, две работы во всероссийских изданиях, 9 международных изданий (одна индексируется базами данных Scopus).

Результаты работы были получены при выполнении следующих научных проектов:

1) ПНИЭР «Прикладные исследования и экспериментальная разработка многочастотных радиолокационных станций дистанционного зондирования Земли на платформах легкомоторной и беспилотной авиации для решения задач мониторинга и противодействия техногенным и биогенным угрозам» выполняемые при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения №14.577.21.0279 от 26.09.2017, уникальный идентификатор RFMEFI57717X0279.

2) Проектная часть государственного задания №8.9423.2017/ ПЧ «Исследование и разработка элементов высокоинтегрированных приемных модулей К-диапазона типа «Система на кристалле», выполняемых по кремниевым наногетероструктурным технологиям, для систем связи», выполняемое при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, 2017-2019 гг.

## ГЛАВА 1. Литературный обзор

### 1.1 Виды и конструкции МЭМ ключей

Микроэлектромеханические (МЭМ) ключи разделяются по механизму управления балкой (электростатическим, электромагнитным, пьезоэлектрическим и термическими полями), а также по типу контакта – с омическим или емкостным контактом [9] и с различной схемой включения/отключения (нормально открытые и нормально закрытые).

МЭМ ключи с разным механизмом управлением балкой имеют разные электрические характеристики. В таблице 1.1 [10] приведена сравнительная характеристика электрических характеристик МЭМ устройства [11].

Таблица 1.1 - Сравнение параметров МЭМС устройств с различным механизмом работы

МЭМС	$V_{упр}$ (В)	$I_{упр}$ (мА)	P (мВт)	Размер (мкм)	Контактн ая сила (мкН)	Время переключения (мкс)
Электростатические	20-80	0	0,002	100×440	50-1000	1-200
Термомеханические	3-5	5-100	15 -250	200×220	500-4000	300-10000
Электромагнитные	3-5	20-150	60 -100	1000×500	50-200	300-1000
Пьезоэлектрические	3-20	0	0,002	200×340	50-200	50-500

Как видно из таблицы 1.1 ключи с электростатическим типом управления имеют преимущества перед другими типами механизмов переключения по следующим параметрам: потребляемой мощности; размерам МЭМ ключа. В целом же следует отметить достоинства МЭМ с электростатическим управлением [12]:

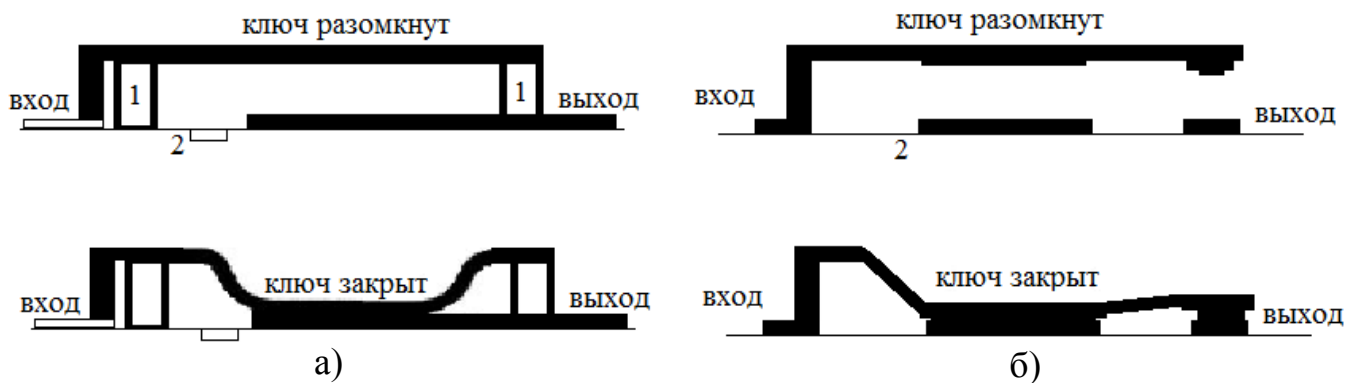
- 1) малый размер МЭМ ключа;
- 2) потребляемая мощность близка к нулю;
- 3) при изготовлении ключа используется хорошо разработанная планарная технология;

- 4) наименьшее время коммутации;
- 5) усилие для срабатывания ключа 50-200 мкН;
- 6) при использовании LC-фильтра развязки управляющее напряжение может подаваться через ВЧ волновод.

Основным недостатком электростатических ключей с омическим контактом является высокое значение напряжения срабатывания 20-80 В, в то время, когда большинство схем имеют напряжение управления 3-5 В.

В зависимости от условий эксплуатации для разных типов МЭМ ключей может меняться область применения, но у электростатических она более широкая, не только из-за перечисленных преимуществ, но также из-за возможности использования при изготовлении ключа хорошо известной технологии изготовления полупроводниковых приборов на основе соединений  $A^{III}B^V$ .

Электростатические МЭМ ключи подразделяются на два типа – мембранные (рисунок 1.1, а) и кантилеверные (консольные) (рисунок 1.1, б). Эти два вида ключей имеют одинаковый принцип работы.



1 – опора мембраны; 2- управляющий электрод.

Рисунок 1.1 – Схемы типов электростатических МЭМС ключей:

а) мембранный МЭМС ключ; б) консольный МЭМС ключ

С электростатическим методом управления мембраны или консоли при подаче управляющего напряжения между верхним и нижним электродами происходит перераспределение зарядов, что приводит к появлению

электростатических сил между металлическими электродами. Эти силы, вне зависимости от полярности приложенного напряжения, приводят к тому что свободно подвешенный контакт (консоль или мембрана) перемещается по направлению к нижнему электроду. Поскольку консоль или мембрана начинает прогибаться, в ней возникают силы упругости, направленные в противоположных направлениях.

По мере того как приложенная сила достигает порогового значения срабатывания, что происходит, когда электростатические силы становятся больше сил упругости, консоль или мембрана падает на нижний электрод, замыкая при этом контакты. Когда напряжение станет много ниже напряжения срабатывания, консоль возвращается в исходное положение.

В МЭМ ключе с емкостным контактом применяется трехтерминальное строение конденсатора с зазором, который может варьироваться в зависимости от приложенного напряжения. Функциональность емкостного ключа состоит в осуществлении переключения ВЧ-сигналов, основанного на шунтировании емкости. Емкость такого ключа в исходном состоянии мала (порядка фФ), а при воздействии управляющего напряжения – высокая (порядка пФ) [13]. Как правило, ключи с емкостным контактом используют в качестве шунтирующих ключей (рисунок 1.2) с рабочими частотами от 10 до 100 ГГц.

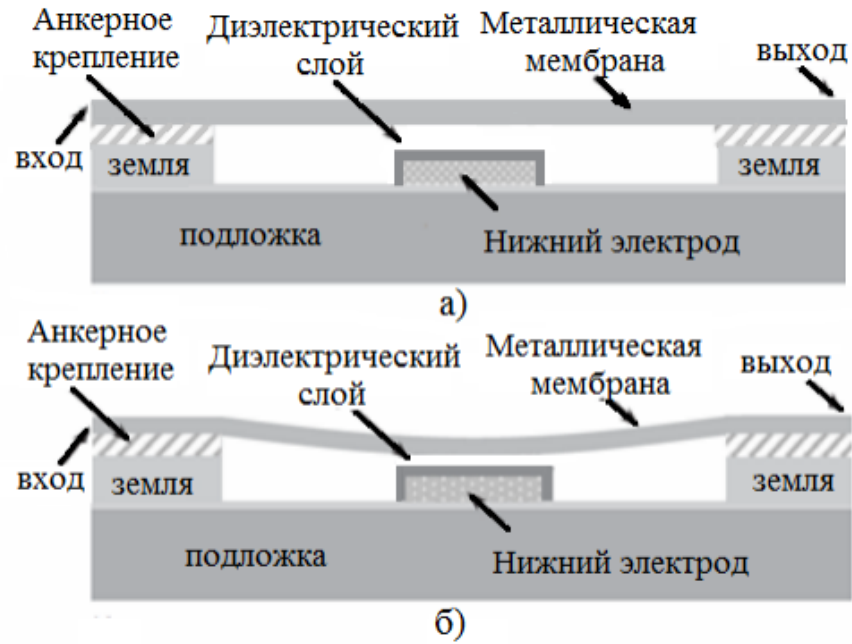


Рисунок 1.2 - Схемы параллельного емкостного МЭМ ключей в выключенном (а) и включенном (а) положениях

В конструкции, когда состояние ключа, при котором подвижная металлическая мембрана находится в верхнем положении и высокочастотный сигнал проходит через переключатель от входа к выходу, называется «включенным» (рисунок 1.2, а). Состояние, когда мембрана под действием электростатических сил, возникающих при приложении управляющего напряжения между нижним электродом и мембраной, опускается вниз и большая часть высокочастотного сигнала замыкается на землю, называется «выключенным» (рисунок 1.2, б). Это состояние называют нормально открытым. Для изоляции друг от друга мембраны и нижнего электрода в «выключенном состоянии» нижний электрод покрывают тонким слоем диэлектрика (рисунок 1.2). Тонкий диэлектрический слой служит для уменьшения эффекта залипания между металлическими слоями [14].

В последовательных емкостных ключах состояние, когда металлическая мембрана находится в верхнем положении и высокочастотный сигнал не пропускается, называется «выключенным» (рисунок 1.3, а) [15] и, напротив, состояние, когда мембрана находится в нижнем положении и высокочастотный сигнал пропускается, называется

«включенным» (рисунок 1.3, б). Такой вид конструкции называют нормально закрытым.

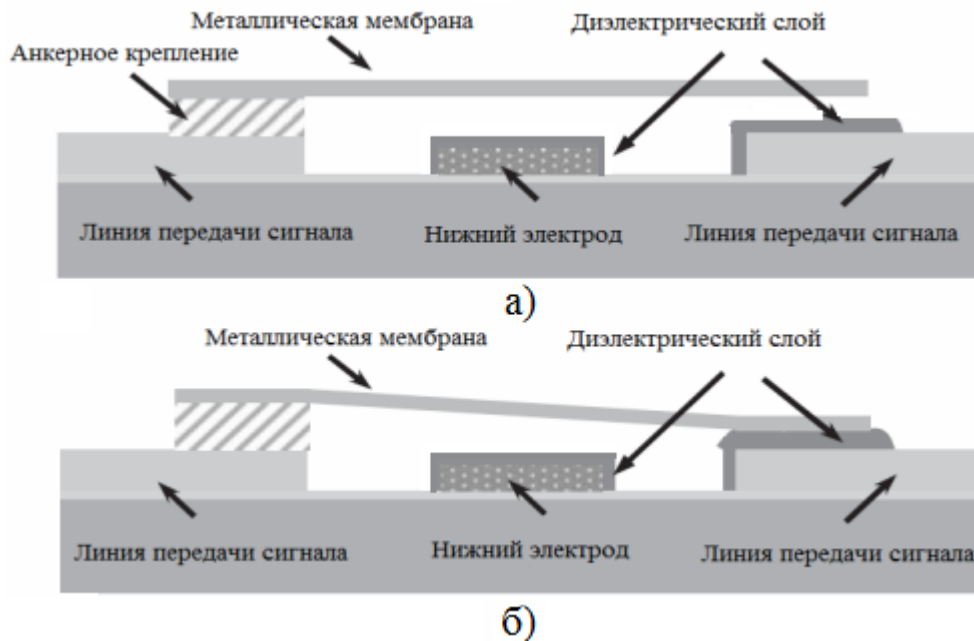


Рисунок 1.3 - Схемы последовательных емкостных МЭМС переключателей в выключенном (а) и включенном (б) положениях

Основным достоинством МЭМ ключей с емкостным контактом является возможность создать ключи с низким напряжением управления, так как нет необходимости в приложении большого усилия при создании пятна контакта. Но в то же время МЭМ ключи этого типа крайне чувствительны к шероховатости поверхности и внутренним напряжениям в мембране из-за возникновения дополнительного воздушного зазора, в большой степени влияющего на соотношение емкостей во включенном и выключенном состоянии ключа. Переключаемая мощность емкостных ключей не превышает 7 Вт, так как плотность тока может превышать критическое значение из-за большего сопротивления крепления мембраны по сравнению с ключами резистивного типа [16]. Это связано с тем, что при проектировании крепления мембран ключей с емкостным типом переключения большее внимание уделяется уменьшению напряжения управления, и, как следствие, сопротивление между СВЧ электродом

мембраны и заземляющим электродом больше, чем у ключей с омическим контактом.

МЭМ ключ с емкостным контактом работает сопоставимое количество рабочих циклов с резистивными ключами. Согласно данным компании Raytheon срок службы емкостного МЭМ ключа составил  $10^{11}$  циклов, при этом переключаемая мощность составляла до 4 Вт на частоте 10 ГГц, время переключения 10 нс, собственные потери 0.07 дБ и изоляцией до 35 дБ [17].

Омические ключи включают в себя два металлических электрода, соединяемых вместе для исполнения контакта с низким сопротивлением. При закрытии ключа осуществляется настоящий омический (электрический и физический) контакт металл-металл. Резистивные контакты характеризуются сопротивлением в открытом состоянии  $R_{\text{вкл}}$ , которое обычно составляет доли Ом, и емкостью в закрытом состоянии  $C_{\text{выкл}}$ , типовое значение которой — единицы фемтофард. Ключи с омическим контактом используют в широком диапазоне частот от 0 до 50 ГГц как в последовательном (рисунок 1.4), так и в шунтирующем (рисунок 1.5) исполнении.

Последовательный или нормально открытый ключ открыт при отсутствии активации МЭМ ключа и закрыт при активации.

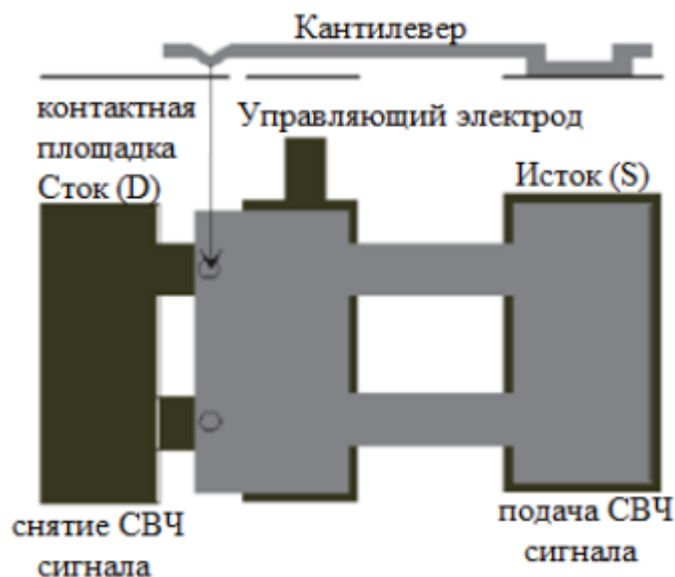


Рисунок 1.4 - Схема последовательного МЭМ ключа резистивного типа с контактной площадкой



Основным критерием при создании ключей с резистивным контактом является площадь контакта. Меньшее сопротивление имеют большие области контакта и, следовательно, меньшей температурой контактного пятна. Площадь контакта (истинная) определяется прикладываемой силой и твердостью материала, а также его способностью формировать поверхностный слой с большим сопротивлением. Так же необходимо учитывать силу адгезии в контактном пятне – балка МЭМ ключа должны быть достаточно жесткой, чтобы преодолеть силу адгезии после снятия управляющего напряжения.

Другими недостатками являются: накопление заряда, самонагреве, так называемых ограничениях обработки мощности и «горячего» переключения (при высоких уровнях мощности и при разбросе диапазона/уровней мощностей в работающей схеме) и микросварке. Все это приводит к деградации контактов и изменению сопротивления. Использование воздуха вместо диэлектрика устраняет недостаток заряда диэлектрика, но дает низкое соотношение емкости on-off для электростатического возбуждения. [18]

Для ключей с омическим контактом при низких мощностях (менее 1 мВт) основными механизмами отказа являются эрозия, упрочнение контактов и образование диэлектрических пленок на контакте.

Ключи средней мощности (10–100 мВт) отказывают из-за высокой плотности тока в контакте и переносе материала между контактами.

Эти проблемы решаемы – необходимо подобрать металлы с лучшими характеристиками контакта. Материал платиновой группы наносится на окончания кантилевера и истока в виде тонких пленок.

Для ключей с большой мощностью (от 100 мВт и выше) основным механизмом отказа является повышение температуры, плотности тока и перенос материала в контакте. Эта проблема решается принятием мер по охлаждению контактной площадки, увеличением прижимающей силы контактов и подбором материала, из которого сделаны контакты.

Обычно, ключи с омическим контактом используют в широком диапазоне частот от 0 до 50 ГГц. Сопротивление контакта омического ключа на основе золота, как правило, лежит в диапазоне 0,15-0,4 Ом.

Преимущества ключей с омическим контактом: низкие потери, хорошая изоляция, практически нулевая потребляемая мощность (только напряжение для активации). Высокое напряжение управления является преимуществом только в высокомоощных приложениях, поскольку оно помогает избежать самовозбуждения и нежелательного переключения.

## 1.2 Используемые материалы в технологиях микрореле

Работа МЭМ ключа осуществляется за счет упругих сил, возникающие в подвижном элементе, а включение или отключение из электрической цепи осуществляется путем разъединения проводников. Следовательно, работу МЭМ ключа можно рассматривать как микро реле, где подвижный элемент представляет пластинчатую пружину изгиба, а замыкающий контакт называется разрывным контактом.

Для пружин изгиба применяются следующие требования [19]:

- 1) высокая релаксационная стойкость;
- 2) наличие некоторой минимальной вязкости и прочности;
- 3) высокий предел усталости;
- 4) высокий предел упругости.

Основной рабочей характеристикой пружин является их жесткость, т. е. способность деформироваться на определенный размер при заданных нагрузках.

Разрывные контакты используются для частых коммутаций электрических цепей – размыкания, замыкания, переключения. В зависимости от величины коммутируемого тока разрывные контакты подразделяют на мало-, средне - и высоконагруженные. Они подвергаются трем главным видам износа; эрозии, коррозии, свариванию. Работа и износ

контактов, помимо внешних условий, зависит от свойств материала. Разные свойства в различной степени влияют на виды износа, препятствуя или, наоборот, способствуя износу контактов [20].

Свойства материала, способствующие износостойкости контактов:

- электрофизические - высокие электро - и теплопроводность, параметры дуги, значения работы выхода электронов и потенциала ионизации; коэффициент Томсона и угол смачивания близки нулю. Высокое поверхностное натяжение в жидком состоянии. Малый атомный объем и термо - э. д. с. в паре с медью и алюминием;
- механические - высокие твердость, пределы прочности при сжатии и сдвиге, умеренный модуль упругости и пластичность, низкий коэффициент трения;
- термические - высокие температуры (напряжения) рекристаллизации, плавления, кипения, сублимации;
- высокие теплоемкость, скрытая теплота плавления, испарения, сублимации; низкая упругость пара при температурах дуги;
- электрохимические — высокий электродный потенциал; малое химическое сродство к компонентам среды;
- высокая упругость диссоциации продуктов коррозии; малая механическая и электрическая прочность пленок — продуктов коррозии;

В производстве микрореле чаще всего используются следующие материалы и сплавы:

**Золото и сплавы на его основе** [21]. Золото обладает высокими электро - и теплопроводностью, устойчивостью против коррозии, не окисляется и не образует сернистых пленок, имеет низкое и стабильное переходное сопротивление в различных атмосферных условиях при нормальных и повышенных температурах. Это делает его незаменимым при изготовлении прецизионных контактов, работающих при малых контактных нажатиях и низком напряжении. Оно имеет очень низкую твердость, которая может быть повышена в несколько раз холодной обработкой давлением.

Золотые контакты легко свариваются, образуют иглы при малых токах и подвержены эрозии в дуговом режиме. Золото технологично. Большая пластичность позволяет легко его обрабатывать давлением в холодном состоянии без промежуточных отжигов. Его часто применяют в виде электроосажденного металла. Примеси повышают твердость и удельное электрическое сопротивление золота.

**Палладий — медь** [22]. Применяют сплавы, содержащие до 40 % меди. Наиболее распространен сплав, содержащий 40 % меди. Он подвержен упорядочению кристаллической решетки и при медленном охлаждении, сопровождаемому значительным изменением свойств (уменьшение удельного электрического сопротивления, увеличение температурного коэффициента электрического сопротивления и твердости). Сплав имеет ограниченную свариваемость и небольшой мостиковый перенос. Он образует окисные пленки. По физическим свойствам все палладиево-медные сплавы близки и легко обрабатываются после соответствующей термической обработки (закалка выше температуры упорядочения).

**Медь и сплавы на ее основе** [23]. Медь обладает высокими тепло - и электро-проводностью (на втором месте после серебра) и теплоемкостью, т. е. обладает комплексом свойств, обеспечивающих хороший отвод тепла от контактов. Медные контакты меньше подвержены перегреву током даже по сравнению с серебряными (при отсутствии окисления). Медь недорога. Коррозионные свойства меди невысокие; корродирует в атмосферных условиях с образованием оксидных и сульфидных пленок, которые могут приводить к нарушению проводимости контактов. При нагреве медь окисляется еще в большей степени, но образуемые при этом пленки легко разрушаются. При температуре мощной дуги происходит диссоциация окиси меди с обнажением медной поверхности — это предотвращает нарушение контакта. Твердость и прочность на разрыв, параметры дуги у меди выше, чем у серебра, она менее склонна к иглообразованию, но из-за окисления непригодна для маломощных контактов. Медь успешно можно применять в

устройствах, работающих с большими механическими усилиями с притирающим или проскальзывающим действием (механическое разрушение окисной пленки), при высоких напряжениях (электрическое разрушение — пробой пленки) — это различного рода контакторы и выключатели. В мощных установках вследствие большого обгара и недостаточной надежности медь не рекомендуется использовать. Ее нужно заменять металлокерамическими композициями.

Примеси металлов повышают прочность и твердость меди. Некоторые примеси, например, серебро и кадмий, мало понижают тепло- и электропроводность меди, поэтому в небольших количествах их рационально вводить в медь.

С целью повышения твердости контактов рекомендуется применять медь с 2—6 % Ag. Присадка серебра мало изменяет электропроводность меди, но уменьшает ее склонность к свариванию.

Значительно улучшает качество контактов присадка кадмия (до 1,5 %). Сплав способен к устареванию и дисперсионному твердению. Присадка 1 % Cd мало влияет на электропроводность меди, но значительно уменьшает ее свариваемость и увеличивает износо-устойчивость, Кадмий в несколько раз уменьшает износ меди при истирании [24].

### **1.3 Традиционные технологии изготовления микроэлектромеханических систем**

В данном подразделе рассмотрены технологии, используемые в настоящее время для изготовления МЭМС, и отмечены перспективные решения, применяемые для решения поставленных задач настоящей диссертационной работы

### 1.3.1 Объемная микрообработка

Объемная микрообработка – это производственный процесс, идущий от поверхности в глубину пластины, чаще всего кремниевой. С помощью мокрого химического травления последовательно удаляются ненужные участки пластины, в результате чего создается МЭМС. С помощью традиционного метода фотолитографии на пластине формируется рисунок, защищающий те участки, которые необходимо сохранить. Затем пластины погружаются в травитель, в котором удаляются незащищенные участки пластины. Технология объемной микрообработки относительно проста и недорога, и хорошо подходит для не слишком сложных приложений, критичных к цене [25].

### 1.3.2 Поверхностная микрообработка

При поверхностной микрообработке происходит последовательное наращивание слоев материала на кремниевую пластину. Типичный процесс поверхностной микрообработки представляет собой повторяющуюся последовательность нанесения на поверхность кремниевой пластины тонких пленок, формирования на пленке защитного рисунка методом фотолитографии и химического травления пленки [26]. Чтобы создать подвижные, функционирующие механизмы, в слоях чередуют тонкие пленки конструкционного материала и заполнителя, называемого также абляционным материалом (как правило, двуокись кремния). Из конструкционного материала образуются механические элементы, а абляционный материал заполняет пустоты между ними. На последнем этапе заполнитель удаляется травлением, и конструкционные элементы приобретают подвижность и функциональность.

Поверхностная микрообработка требует большего количества технологических операций, чем объемная, и, соответственно, она дороже.

Поверхностная микрообработка используется для создания более сложных, по сравнению с МЭМС получаемые при объемной микрообработке, механических элементов.

### 1.3.3 Технология LIGA

LIGA (Litographie, Galvanoformung и Abformung) технология – это технология, позволяющая методами рентгенолитографии гальванопластики и пресс-формовки создавать высокоаспектные микроструктуры [27]. На поверхности подложки формируется полимерная пленка (рентгенорезист), затем рентгенорезист подвергается экспонированию рентгеновскими лучами высокой энергии через специальный шаблон. Экспонированные участки удаляются с помощью травителя, в результате чего образуются исключительно точные микроскопические элементы.

На следующем этапе LIGA технологии участки проводящей подложки, вскрывшиеся после удаления, могут быть металлизированы посредством электроформовки-гальванического осаждением слоя металла из электролита. После чего, оставшийся резист удаляется, оставляя металлические структуры с рисунком, соответствующим шаблону в качестве конечного продукта. Таким образом, микроструктура из резиста является вторичной маской для создания микроструктуры из металла, например, никеля, меди и золота, или сплавов, таких как кобальта-никеля и железа-никеля. Эта технология может использоваться для производства микроструктур, как для прямого использования, так и для изготовления пресс-форм для последующего тиражирования полимерных микроструктур методом горячей формовки (прессования). Эти вторичные полимерные структуры также могут широко применяться. Они могут формировать конечный полимерный компонент, использоваться как шаблон при вторичном гальванопокрытии, или служить в качестве одноразовой литейной формы для изготовления керамических микроструктур [28].

### **1.3.4 Технология глубокого активного ионного травления**

От традиционной объемной микрообработки глубокое реактивное ионное травление (Deep Reactive Ion Etching – DRIE) отличается только тем, что вместо влажного химического травления для создания элементов, используется сухое плазменное травление [29]. Это позволяет намного гибче управлять профилями травления и существенно расширить ассортимент изготавливаемых элементов. Производственное оборудование для ионного травления весьма дорого, поэтому и приборы, созданные по технологии DRIE, как правило, дороже приборов, сделанных с использованием традиционного влажного травления.

## **1.4 Методы корпусирования МЭМС**

Технические требования к корпусу интегральной схемы, как правило, четко определены — это механическая поддержка кристалла, электрическое соединение и теплоотвод. В то время как МЭМС могут эксплуатироваться в самых различных условиях, таким образом при корпусировке МЭМС необходимо добиться согласованной работы кристалла и корпуса в условиях конкретной окружающей среды.

Среди методов корпусировки МЭМС можно выделить две группы: методы корпусировки на уровне кристалла (DLP) и методы корпусировки на уровне пластины (WLP). В первой группе методов корпусирование МЭМС производится индивидуально после разделения пластины на отдельные кристаллы, и является конечным этапом производства. Во второй группе герметизация всех МЭМС происходит одновременно, до их разделения на отдельные чипы.

Для разделения пластин традиционно используется дисковая пила с алмазной режущей кромкой, что требует дополнительного охлаждения



пластины потоком хладагента. При этом в случае DLP методов, высока вероятность загрязнения МЭМС продуктами резки, смешанными с охлаждающей жидкостью. Альтернативой может выступать способ разделения приборов с помощью лазерной резки, однако при этом вероятность теплового повреждения МЭМС значительно повышается [30].

Для резки МЭМС пластин необходимо применение специальных манипуляторов. Применение традиционных вакуумных захватов осложняется наличием развитого рельефа МЭМС, подверженных механическим повреждениям [31]. Манипуляции с МЭМС кристаллами необходимо проводить за углы кристалла при помощи специальных роботизированных захватов [32]. Сравнение DLP и WLP методов корпусировки МЭМС приведено на рисунке 1.5

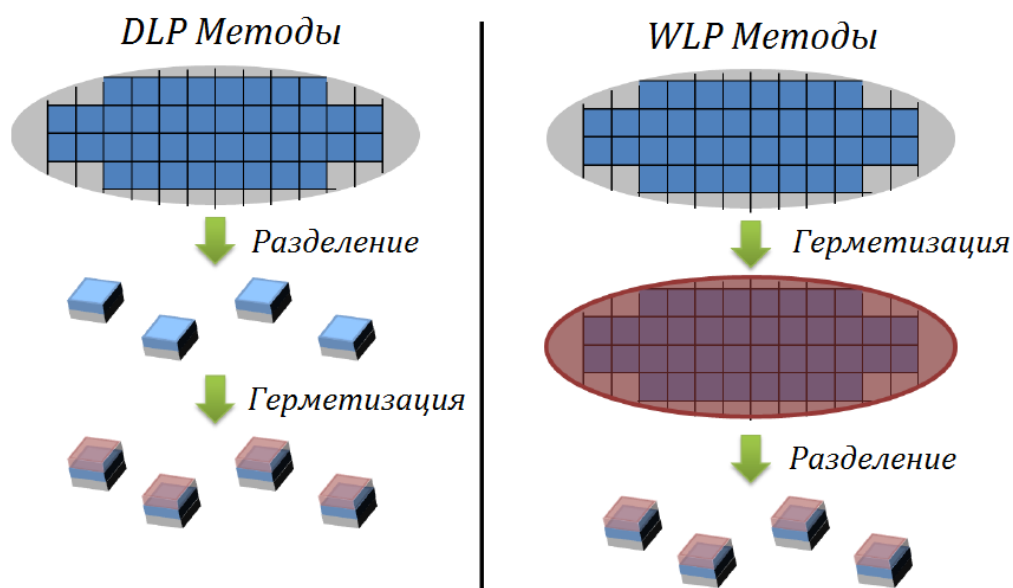


Рисунок 1.5 – Сравнение методов корпусировки МЭМС

К преимуществам WLP методов относятся более высокие экономическая целесообразность и выход годных приборов по сравнению с DLP (Die Level Packaging) методами. Так как каждый МЭМ прибор на пластине снабжается индивидуальным корпусом, отпадают как необходимость применения специальных манипуляторов, так и опасность их

загрязнения на стадии разделения. Данные методы также позволяют провести обезгаживание или напустить в полость корпуса инертный газ.

WLP методы позволяют проводить тестирование и отбраковку приборов в процессе производства, что позволяет сократить временные и материальные затраты по сравнению с методами индивидуального корпусирования, при которых тестирование прибора возможно лишь после разделения и герметизации кристалла.

Герметизация полости МЭМС на ранних стадиях технологического процесса обеспечивает механическую защиту прибора, защиту от загрязнений на стадии резки, и избавляют от необходимости применения специализированного оборудования. Также, преимуществом WLP методов являются малые габаритные размеры корпуса, позволяющие интегрировать МЭМС в множество других систем.

Несмотря на все вышперечисленные преимущества, WLP методы не являются универсальными.

#### **1.4.1 Методы корпусировки на уровне кристалла (DLP)**

##### **1.4.1.1 Корпусирование с помощью монокристаллических капсул**

Данный метод подразумевает использование внешней капсулы, размещенной над активными элементами МЭМС как показано на рисунке 1.6. Подобный корпус включает три ключевых элемента: капсулу, электрические контакты, и слой припоя между капсулой и пластиной прибора. В качестве материала капсулы могут выступать металлы, стекло, керамика, или полупроводниковые материалы [33]. Соединение капсулы с полупроводниковой пластиной производится с помощью припоя.

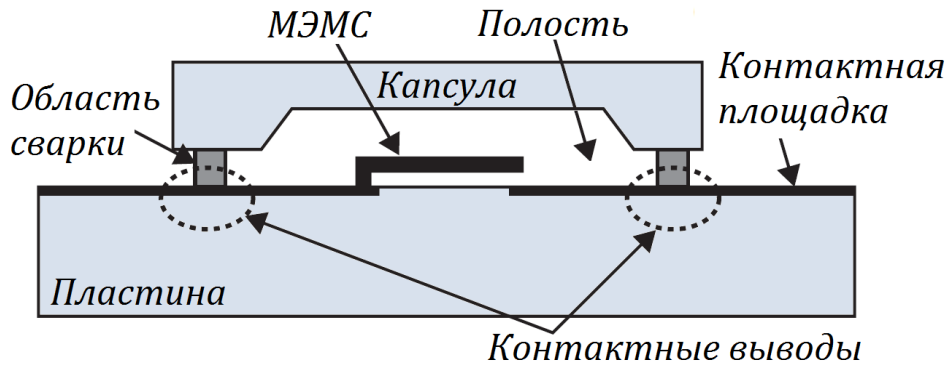


Рисунок 1.6 – Сечение МЭМС прибора, корпусированного методом поверхностного монтажа

Для предотвращения термического повреждения элементов МЭМС и межсоединений, необходимо избегать высокотемпературных процессов. Также присутствуют ограничения на рельефность МЭМС пластины. При наличии развитого рельефа на поверхности МЭМС пластины, электрические меж соединения могут выполнены в слое капсулы. Большинство корпусов данного типа устойчивы к негативным факторам окружающей среды.

Одним из наиболее часто применяемых способ соединения кремниевой пластины с капсулой из боросиликатного стекла Pyrex является метод анодной сварки [34]. На рисунке 1.7 показана схема данного процесса, и механизм ионного дрейфа, приводящий к химической сварке двух пластин.

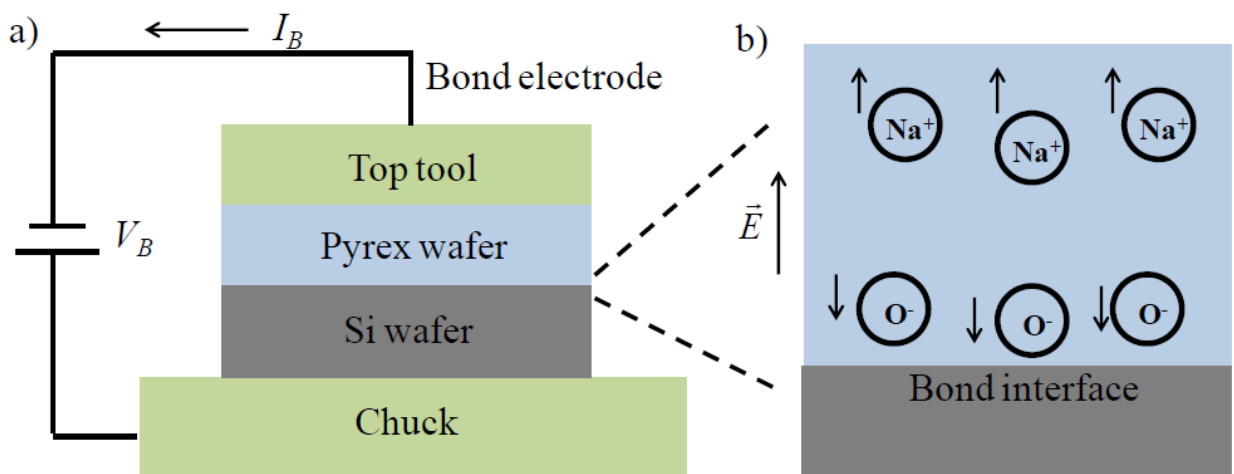


Рисунок 1.7 – Изображение процесса анодной сварки (a) и ионного дрейфа (b)

Механизм сварки основан на электрохимических реакциях, происходящих между поверхностями стекла и кремния при повышенной температуре и воздействии электрического поля. Поверхности двух пластин приводятся в непосредственный контакт и нагреваются до 400°C, после чего к полученной структуре прикладывают напряжение в 800-1500В. Электростатическое поле вызывает дрейф ионов, образованных в результате распада связей Na-O, и окисление поверхности кремниевой пластины ионами O<sup>2+</sup>. После образования устойчивого механического контакта структура охлаждается до комнатной температуры, а хорошее согласование ТКР стекла и кремния в диапазоне температур от 20 до 400°C позволяет избежать формирования в структуре высоких механических напряжений [35].

Высокая прозрачность стеклянной капсулы позволяет использовать ее во множестве микро-опто-электромеханических систем (МОЭМС), а также в ряде биологических микро-электромеханических систем (Bio-MEMS), в которых возникает необходимость передачи СВЧ сигнала сквозь корпус имплантированного прибора. Боросиликатное стекло является устойчивым к коррозии биосовместимым материалом, а технология его производства хорошо отработана, что делает данный материал достаточно доступным.

#### **1.4.1.2 Корпусирование с помощью пайки стеклокерамическим припоем**

К методам поверхностного монтажа относятся пайка стеклокерамическим припоем, пайка Si-Au эвтектическим сплавом, пайка при помощи оплавления [36]. Наиболее распространенными являются методы с применением припоя и эвтектического сплава. В первом методе в области контакта между капсулой и пластиной наносится слой припоя, после приведения пластин в контакт, нагревание структуры приводит к оплавлению припоя. Нагревание может производиться точно при помощи магнитных катушек, что позволяет сохранять температуру МЭМ прибора ниже 125°C

[37]. Однако примеси, содержащиеся в припое и испаряющиеся при нагревании, могут осложнить вакуумное корпусирование МЭМС.

В методе пайки эвтектическим сплавом для формирования герметичного соединения используются металлы, и в частности золото [38]. Эвтектический плав Si-Au с температурой плавления около 360°C обладает высокой чистотой, что позволяет применять его для вакуумного корпусирования. На рисунке 1.8 показан механизм пайки эвтектическим сплавом.

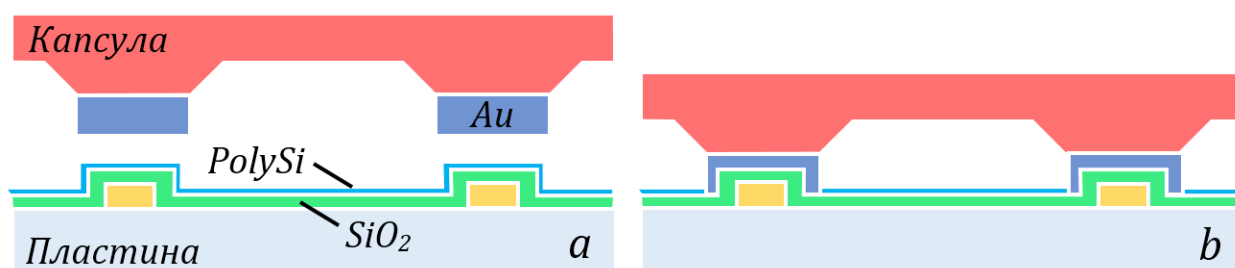


Рисунок 1.8 – Схема корпуса МЭМС до (а) и после (б) пайки эвтектическим сплавом

Золотая пленка, как правило, осаждается на пластину капсулы. А кремний поступает в расплав из поверхности пластины корпусируемой МЭМС, или же из осажденной на поверхность поликремниевой пленки. После приведения двух пластин в механический контакт и их нагревания, происходит диффузия кремния в золотой расплав. После охлаждения между двумя пластинами формируется контакт с высокой адгезией. Однако данный метод также имеет свои недостатки. К ним относятся неравномерность и низкая воспроизводимость соединения. Причиной может быть окисление расплава, его неравномерное растекание. Образование полостей в контактном слое приводит к уменьшению площади контакта и снижению адгезии. Несмотря на толщину слоя расплава в несколько микрон, метод имеет ограничения к плоскостности корпусируемой пластины [39].

Соединение пластин с помощью стеклокерамического припоя при температуре свыше 700°C, что превышает допустимый температурный диапазон большинства МЭМС и ИС. Как упоминалось ранее, существуют

методы локального разогрева припоя. В настоящее время разработаны технологии резистивного, лазерного, ИК и СВЧ нагрева, ультразвуковой сварки [40]. В качестве примера, на рисунке 1.9 представлена схема метода резистивного нагрева припоя.

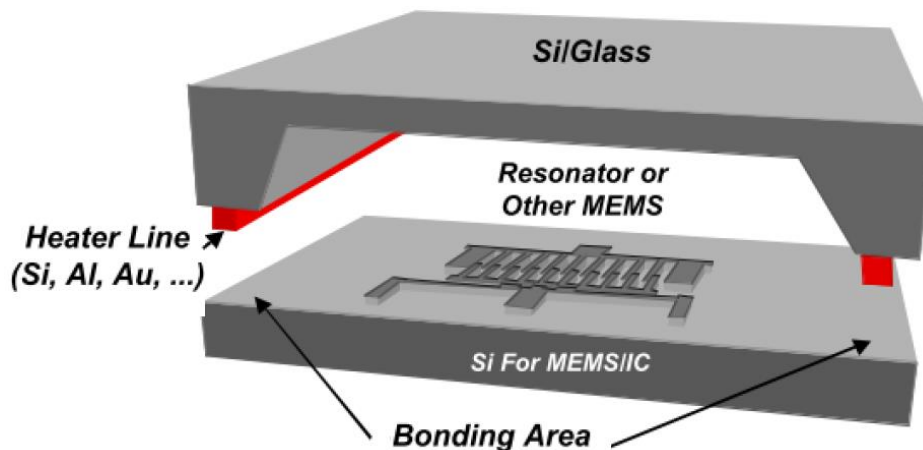


Рисунок 1.9 – Метод локального резистивного нагрева припоя [36]

Для резистивного нагрева могут быть использованы такие материалы как алюминий или поликремний. Осаждаться они могут как на пластины капсулы, так и пластину корпусируемой МЭМС. Данный метод позволяет добиться перепада температур от 50 до 700°C на расстоянии менее 100 мкм [41].

#### 1.4.1.3 Корпусирование методом объемной поверхностной микрообработкой

Еще одна технология корпусирования МЭМС основана на методах объемной и поверхностной микрообработки корпусирующей подложки, ее последующего совмещения и пайки с подложкой МЭМС-прибора (Wafer-to-Wafer) [42]. Данная технология является исторически первой и имеет множество вариаций. Общий принцип проиллюстрирован на рисунке 1.10.

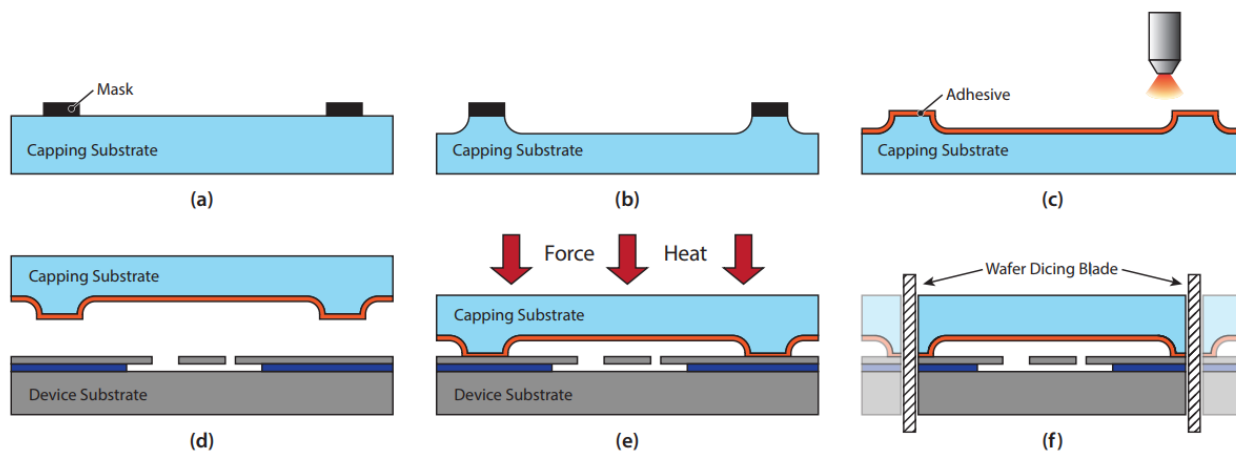


Рисунок 1.10 – Этапы процесса упаковки по технологии Wafer-to-Wafer[B1]:

- а – формирование ФР маски; б – травление углублений;
- с – осаждение припоя; д – совмещение пластин; е – спекание пластин;
- ф – разделение на кристаллы.

Данная технология включает несколько основных этапов:

- формирование маски на корпусирующей подложке (а);
- травление полостей и удаление маски (б);
- распыление на поверхности тонкого слоя полимерного клея (с);
- совмещение корпусирующей и основной подложек (д);
- склеивание подложек методом термокомпрессии (е);
- разделение полученной структуры на отдельные приборы (ф).

Wafer-to-Wafer метод корпусирования так же может реализовываться путем совмещения с технологией тонкопленочного корпусирования. Суть метода заключается в формировании массива сар-структур на вспомогательной подложке и их последующем переносе на подложку с элементами МЭМС. К недостаткам метода можно отнести повышенные требования к плоскостности подложек [43].

На рисунке 1.11 изображены основные этапы технологии со вспомогательной подложкой. На первом этапе вспомогательная стеклянная подложка при помощи клея совмещается с кремневой вспомогательной подложкой. Методами поверхностной микрообработки в слое кремния получают необходимые сар-структуры, после нанесения слоя припоя и

совмещения подложек, полученные сар-структуры фиксируются на МЭМС-подложке. Отделение же сар-структур производится при помощи разложения связующего клея или лазерной резки [44].

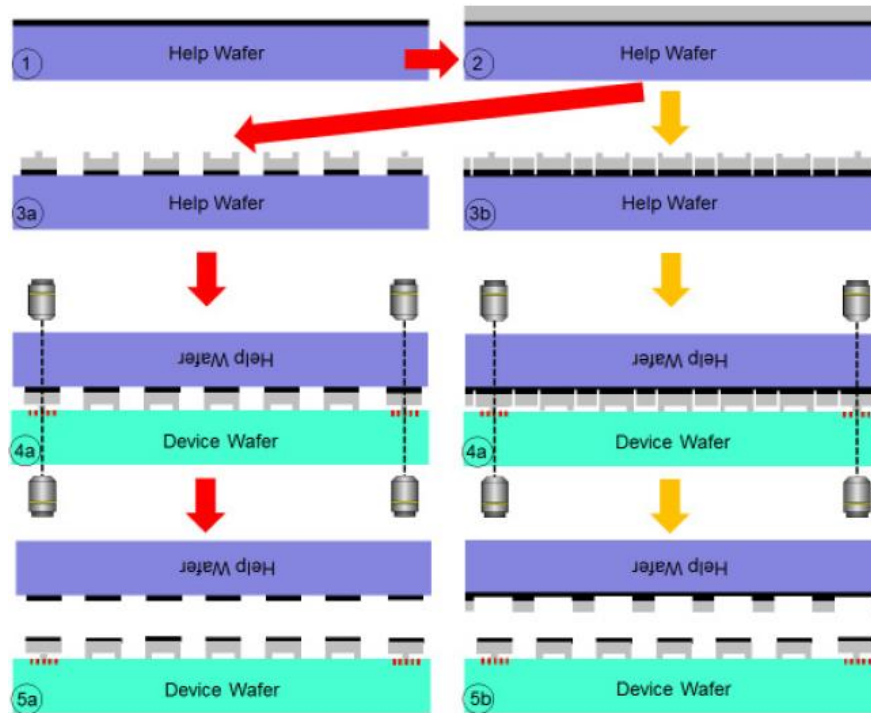


Рисунок 1.11 – Технологии с применением вспомогательной подложкой

В зависимости от количества используемых пластин (MEMS, ASIC, Cap) и расположения выводов, которые могут быть выполнены в виде сквозных отверстий (TSV), горизонтальных тонкопленочных выводов или паяных проволочных соединений, можно выделить 9 типов конструкций МЭМС-корпусов, которые представлены на рисунке 1.12.



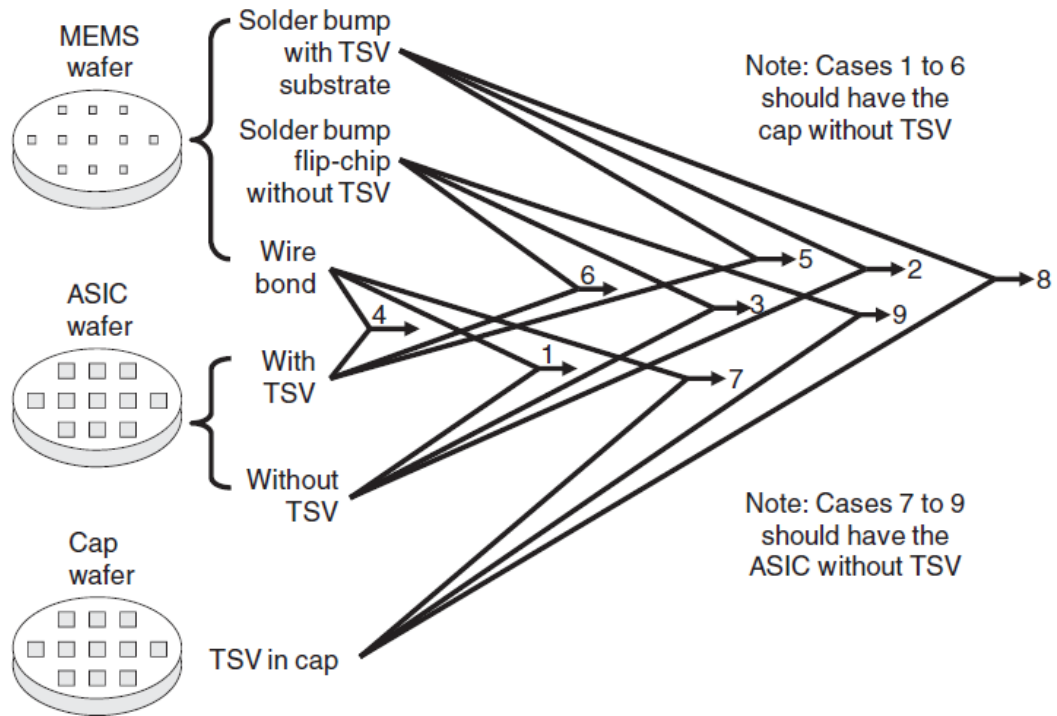


Рисунок 1.12 – Типы конструкций МЭМС-корпусов на основе технологии Wafer-to-Wafer

На рисунке 1.13 представлена иллюстрация четырех вариантов подобных корпусов [45].

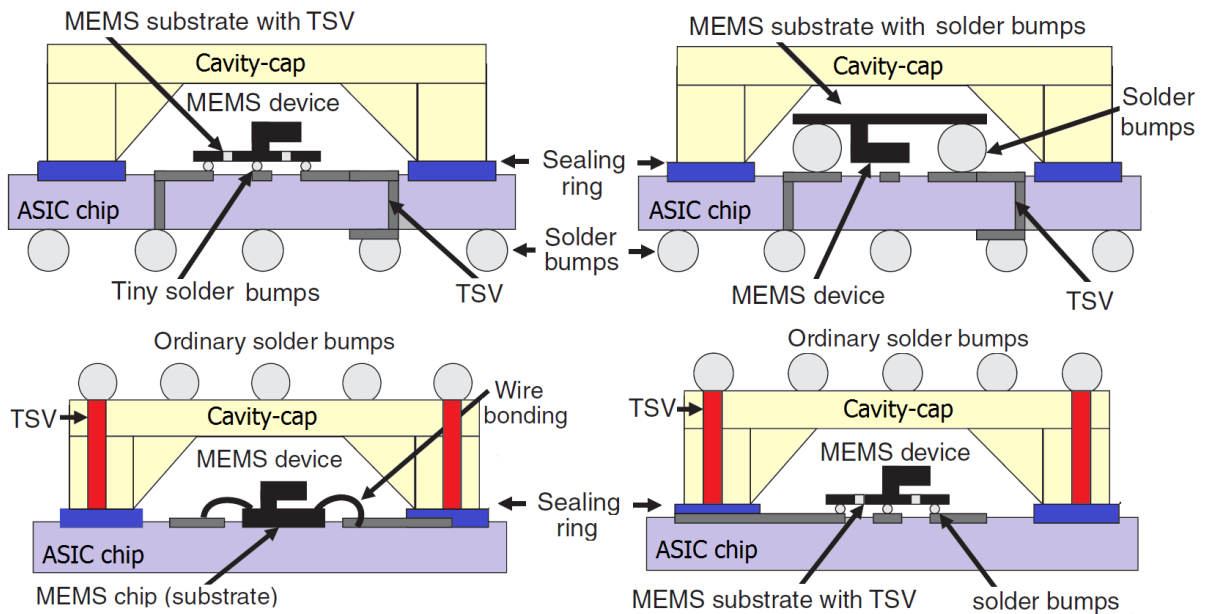


Рисунок 1.13 – Варианты межсоединений в технологии Wafer-to-Wafer

## 1.4.2 Методы корпусирования на уровне пластины WLP

### 1.4.2.1 Тонкопленочные метод корпусирования

Метод тонкопленочного корпусирования WL $\mu$ E (Wafer-level micro Encapsulation) основан на технологии производства полупроводниковых интегральных схем. Ранее данный метод применялся для герметизации различных МЭМ приборов, так как датчики давления, резонаторы и акселерометры. Основной чертой технологии тонкопленочного корпусирования является формирование каналов, посредством которых обеспечивается вытравливание жертвенного слоя в корпусируемой полости. Например, если в качестве жертвенного слоя использовался оксид кремния, травителем может выступать буферный раствор плавиковой кислоты. После удаления жертвенного слоя, травильные каналы герметизируются методом химического осаждения нитрида кремния из газовой фазы при пониженном давлении (LPCVD), плазмохимического осаждения оксида кремния (PECVD) или методом осаждения металлической пленки [46].

На рисунке 1.14 приведена структура СВЧ МЭМ переключателя, корпусированного по технологии WL $\mu$ E (Wafer-level Microencapsulation). Технологический процесс включает в себя очистку подложки, осаждение/фотолитографию/травление (D/P/E) 300-нм золотого электрода, D/P/E 250-нм SiO<sub>2</sub> диэлектрика, электроосаждение медных линий передач толщиной 2.5-мкм, фотолитографию жертвенного слоя органического состава, и D/P/E 350-нм мембраны на основе алюминиевого сплава, формирование опорного жертвенного слоя на поверхности мембраны, поверх которого осаждается каркасный диэлектрический слой (Glob top - BCB). В каркасном диэлектрическом слое выполняются отверстия, через которые при помощи плазменного травления удаляются жертвенные слои как под мембраной, так и над ней. На заключительном этапе данной технологии отверстия в каркасном слое заполняются слоем герметизирующего материала

с достаточно высокой вязкостью (SiN/парилен), препятствующей его проникновению в герметизируемую полость.

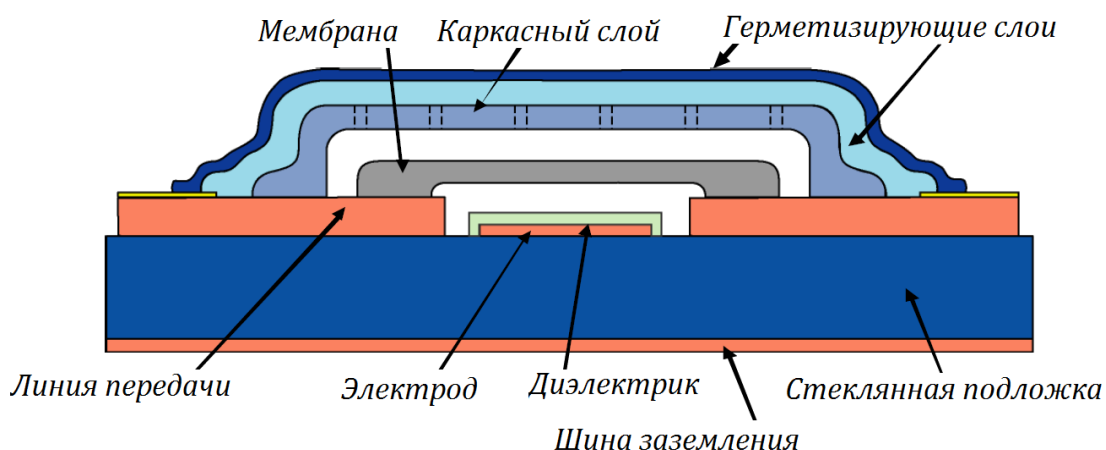


Рисунок 1.14 – Структура МЭМС в тонкопленочном корпусе

Можно выделить следующие преимущества WL $\mu$ E технологии [47]:

- Отсутствие высокотемпературных процессов (200°C – 275°C)
- Отсутствие высоких требований к плоскостности и рельефу подложки
- Отсутствие уплотнительных колец
- Чрезвычайно малый объем полости
- Не требует совмещения двух подложек
- Отсутствие нестандартных для технологии МЭМС процессов
- Существенное увеличение допустимого числа приборов на подложке
- Обеспечивает у уменьшение массогабаритных параметров МЭМС прибора
- Низкие вносимые потери (0.04 dB на частоте 35 GHz)
- Отсутствие дополнительных паразитных параметров
- Простота проектирования

На рисунке 1.15 приведено СЭМ-изображение емкостного СВЧ-датчика, на поверхности которого осажден полимерный жертвенный слой толщиной 8 мкм [48]. Как видно из рисунка, на основе данной технологии возможно получение корпуса с площадью более 1 мм<sup>2</sup>.

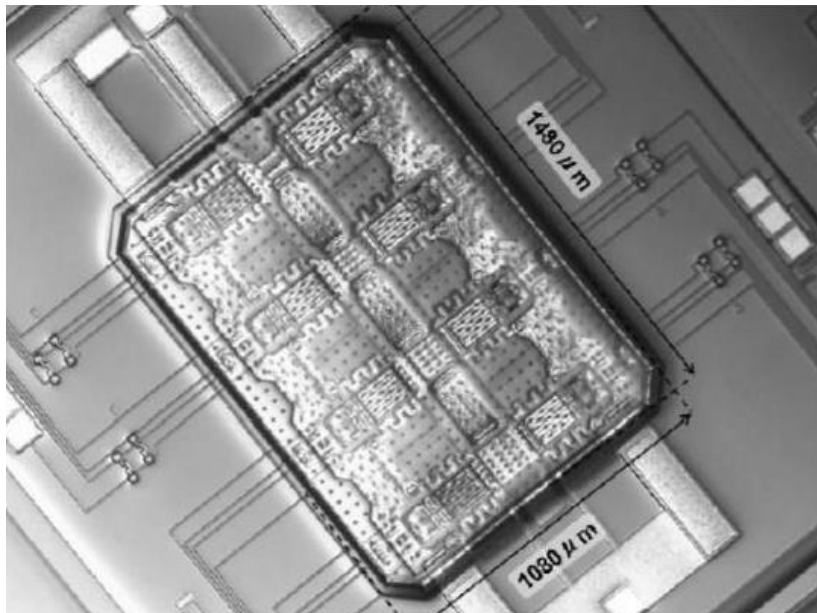


Рисунок 1.15 – СЭМ-изображение емкостного СВЧ-датчика, на поверхности которого осажден полимерный жертвенный слой толщиной 8 мкм

#### 1.4.2.2 Герметизация с помощью лазерного оплавления

Данный метод является вариацией тонкопленочной технологии. Главным отличием здесь выступает метод заполнения отверстий в каркасном слое. На поверхности опорного жертвенного слоя при помощи ионного распыления сформирован каркасный слой нитрида кремния толщиной около 1 мкм. В каркасном слое выполнены множественные сквозные отверстия диаметром около 1 мкм. На поверхности каркасного слоя методом ионного распыления осаждается пленка меди толщиной 1 мкм. С помощью эксимерного лазера с длиной волны около 308 нм, энергией импульса 500 мДж, и площади сфокусированного на поверхности пятна 5 мм на 5 мм происходит оплавление медной пленки, что приводит к заполнению отверстий и герметизации полости [49]. Структура МЭМ переключателя после осаждения опорного жертвенного слоя приведена на рисунке 1.16

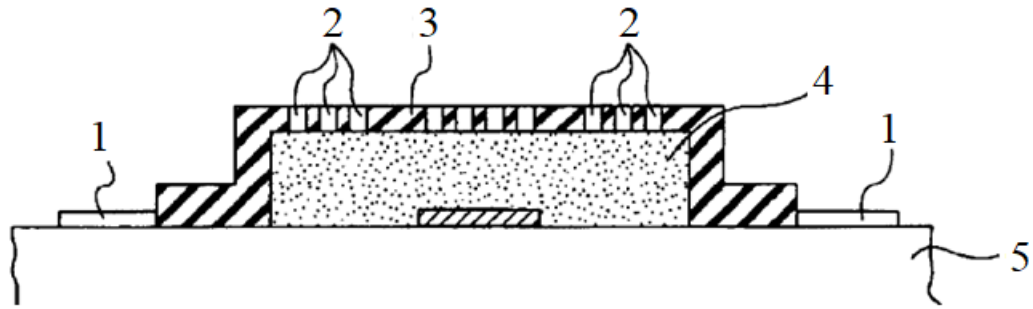


Рисунок 1.16 – Структура МЭМ переключателя после осаждения опорного жертвенного и каркасного слоя с множественными сквозными отверстиями:

- 1 – линии передач; 2 - сквозные отверстия; 3 - каркасный слой;  
4 – жертвенный слой; 5 – подложка.

На рисунке 1.17 приведена структура МЭМ переключателя с герметизированным корпусом

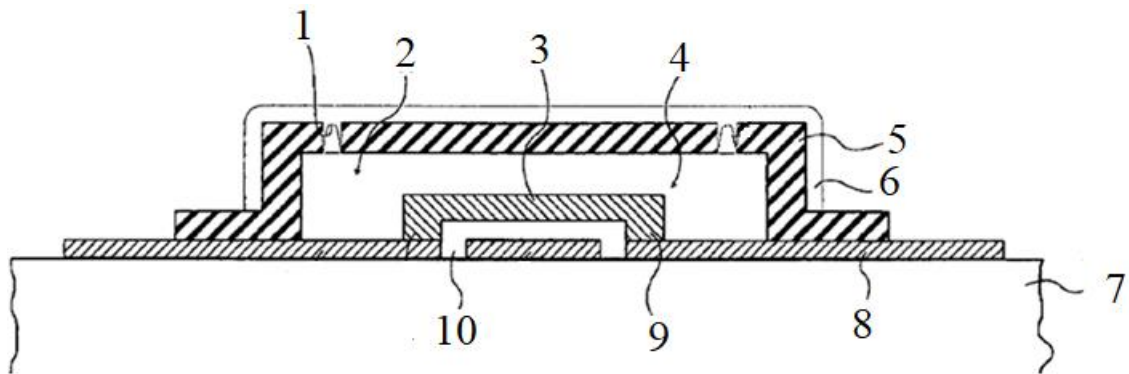


Рисунок 1.17 – Структура МЭМ переключателя с герметизированным корпусом:

- 1 – Герметизированные отверстия; 2 – Свободное пространство;  
3 - Мембрана; 4 – МЭМС-переключатель; 5 – Каркасный слой;  
6 – Медная пленка; 7 – Подложка; 8 – Линии передач.

### 1.4.2.3 Корпусирование МЭМ структур в объеме кремниевой пластины

Для МЭМ структур, выполненных в объеме монокристаллического кремния применяется вариант тонкопленочного корпусирования с использованием множественных жертвенных слоев [50]. Основные технологические операции данного метода корпусировки проиллюстрированы на рисунках 1.18-1.19

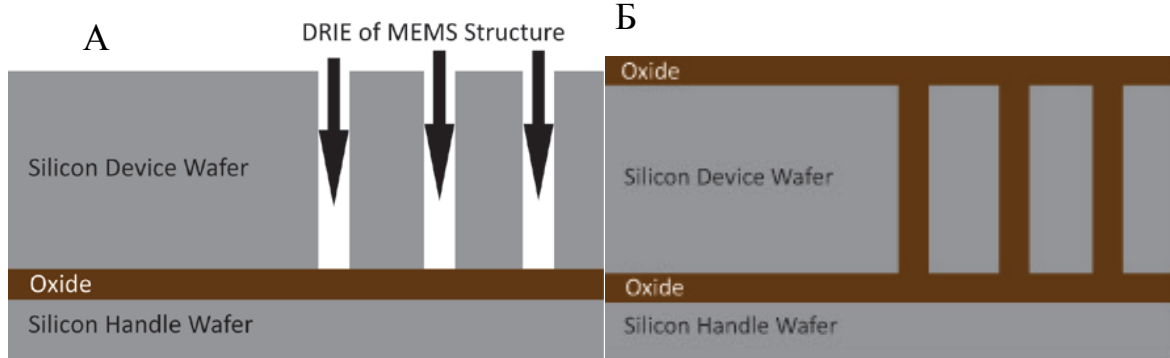


Рисунок 1.18 – Травление МЭМ структуры в объеме кремния (А) и осаждение жертвенного слоя (Б)

На поверхности полученной структуры осаждается слой поликремния, в котором при помощи газофазного травления ( $\text{HF}/\text{XeF}_2$ ) удаляются жертвенные слои, окружающие МЭМ структуру.

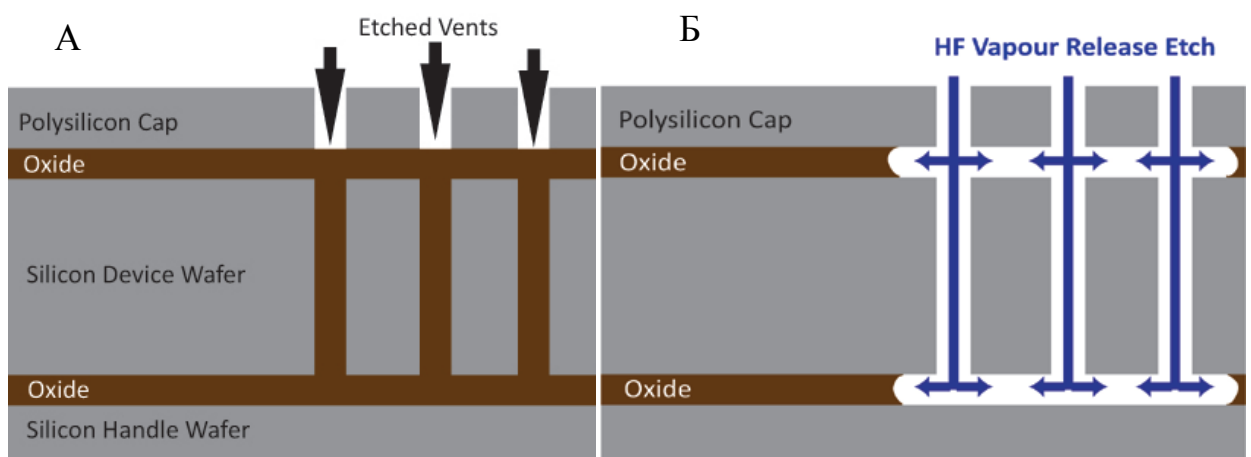


Рисунок 1.19 – Осаждение [B2] поликремния, травление отверстий (А) и удаление жертвенных слоев вокруг МЭМ структуры (Б)

Полученные отверстия герметизируются осаждением пленки поликремния, нитрида или оксида кремния, полученных методами эпитаксии или осаждения из газовой фазы при пониженном давлении (LPCVD).

### 1.4.2.3 Корпусирование МЭМС с применением термопластичных материалов

Отдельного внимания заслуживает метод корпусирования МЭМС на основе пленок карбида кремния [51], который позволяет получить каркасный слой повышенной жесткости, что особенно актуально при производстве вакуумных МЭМ приборов. Авторы приводят подробное описание технологического процесса корпусировки, основные этапы которого изображены на рисунке 1.20.

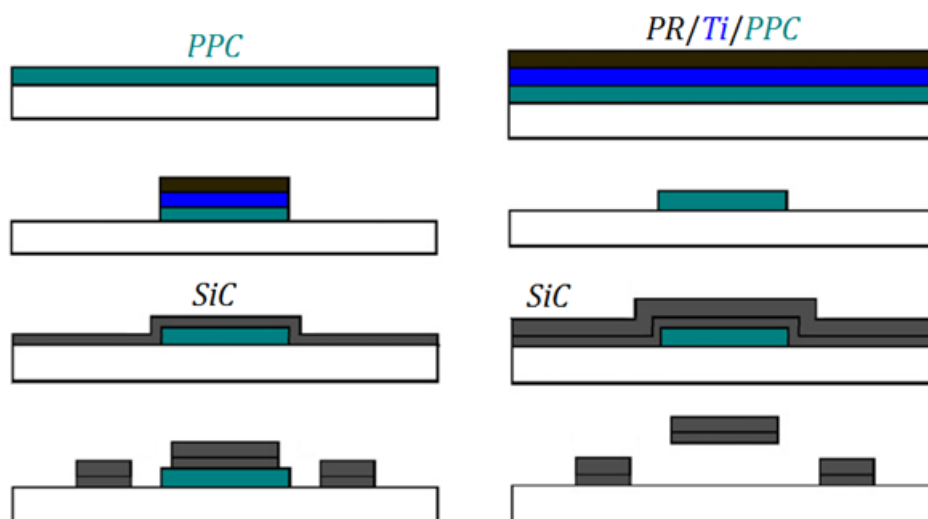


Рисунок 1.20 – Схематическое изображение процесса формирования каркасной структуры

На первом этапе тонкопленочной технологии корпусировки МЭМС формируют каркасный слой корпуса на предварительно осажденном жертвенном слое. Для облегчения травления жертвенного слоя методами сухого или жидкостного травления, в каркасном слое вскрываются окна. Время полного вытравливания жертвенного слоя зависит от количества отверстий, их размера и расположения. Данный этап значительно затрудняет

технологии производства МЭМС [52]. Несмотря на то что жидкостные травители обладает большей скоростью, их применение может вызвать залипание как МЭМ прибора, так и корпуса. Для предотвращения попадания герметизирующего слоя на функциональные элементы МЭМС, технологические отверстия в каркасном слое должны достаточно быть малых размеров и/или находиться от них на значительном расстоянии. Данные ограничения также приводят к увеличению длительности процесса травления жертвенного слоя.

Альтернативные методы, не требуют формирования технологических отверстий за счет использования пористых материалов. Каркасная структура в этом случае выполняется достаточно тонкой, и требует слоя дополнительной механической поддержки [53]. Также известны работы, в которых толщина каркасной структуры достаточно велика и механической поддержки не требует. Данный подход заключается в электрохимическом травлении проводящего жертвенного слоя через пористую мембрану [54]. Электрический контакт к мембране при этом подводится через подложку, что не позволяет интегрировать данный метод в технологию GaAs СВЧ МИС. Процесс электрохимического травления в HF жертвенного слоя PSG через мембрану пористого поликремния проиллюстрирован на рисунке 1.21.

С недавнего времени в методах тонкопленочной WLP корпусировке МЭМС в качестве жертвенных слоев получили применение полимерные материалы, разлагающиеся под действием температуры [55]. Данные полимеры разлагаются при относительно низких температурах, а продуктами их распада являются летучие газы, которые проникая через газопроницаемый каркасный слой образуют полость в корпусе МЭМС. Поскольку данный процесс является температурно-активируемым и не требует дополнительных химических реагентов, удаления жертвенного слоя протекает с высокой скоростью и в полном объеме.



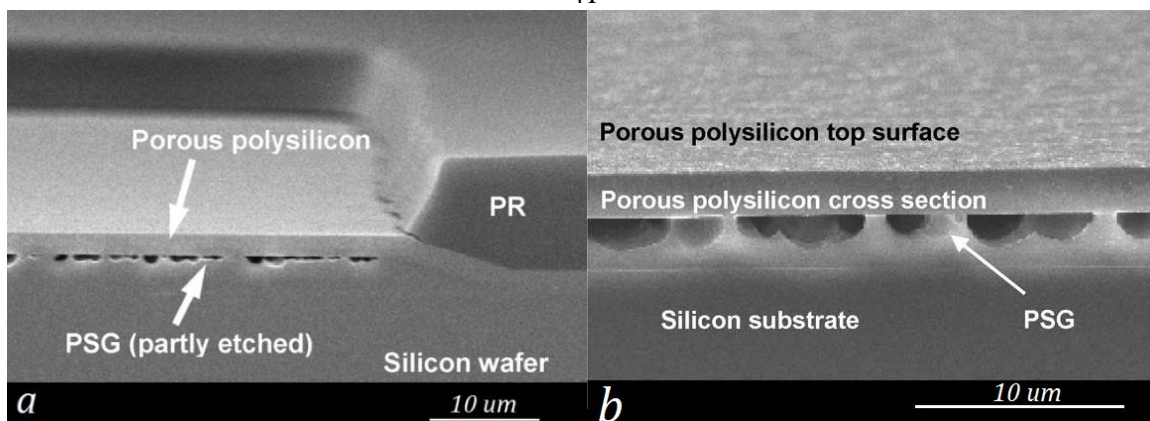


Рисунок 1.21 – Электрохимическое травление PSG в HF через слой Poly-Si

В описанной выше технологии корпусировки МЭМС каркасный слой выполняется из газопроницаемого материала, осаждение и сушка которого производится при температуре ниже температуры разложения жертвенного полимера. Стоит отметить, что вследствие низких значений модуля Юнга и температуры стеклования полимерных материалов, подобные каркасные структуры на этапе разложения жертвенного слоя подвержены деформации. К тому же, зачастую возникают технологические проблемы, связанные с низкой селективностью растворителей к полимерам каркасного и жертвенного слоев. Решением этой проблемы может быть осаждение методом PECVD тонкой оксидной пленки при  $100^{\circ}\text{C}$  под слоем полимера каркасного слоя. Оксидный слой увеличивает механическую прочность корпуса и выступает в качестве химического барьера [56]. Кроме того, осаждение герметизирующего слоя, как правило, производится при пониженном давлении. А увеличение разности внутреннего и атмосферного давлений приводит к появлению значительных вертикальных деформаций, которые отрицательно сказываются на характеристиках МЭМС. Значительно снизить влияние подобных деформаций возможно при помощи оптимизации геометрических размеров корпуса и толщины его стенок.

Альтернативный и наиболее приемлемый метод корпусировки заключается в сочетании термопластичного жертвенного слоя и жесткой каркасной структуры. Ненапряженные пленки керамического оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) осаждаются методом ионного распыления поверх

жертвенного слоя полипропилен карбоната (PPC) при температуре ниже температуры разложения PPC ( $200^{\circ}\text{C}$ ). Каркасный слой оксида алюминия, после формирования в нем отверстий и удаления жертвенного слоя PPC, обеспечивают высокую структурную надежность корпуса благодаря превосходным механическим свойствам. Модуль Юнга низкотемпературной керамической пленки оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) находится в диапазоне от 345 до 409 ГПа [57]. В качестве материала каркасного слоя могут быть также использованы такие керамические материалы как карбид германия (SiGe) и SiC, осажденные методом PECVD [58,59], однако их использование затрудняют высокие температуры их осаждения, которые значительно превышают  $300^{\circ}\text{C}$ . Структура WLP корпуса на основе SiC представлена на рисунке 1.22

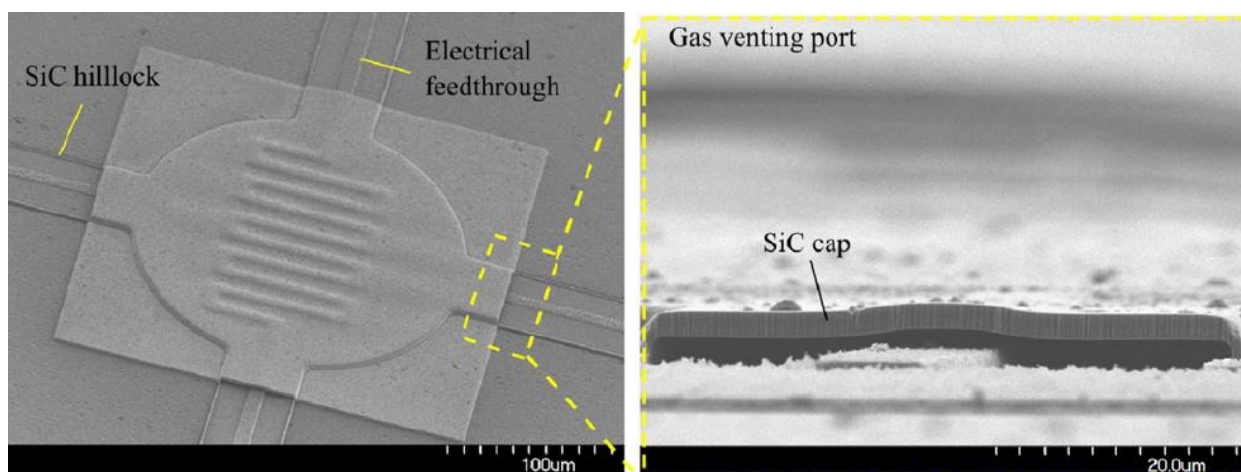


Рисунок 1.22 – Структура WLP корпуса на основе SiC

Значение модуля Юнга PECVD-пленок нитрида кремния и других их низкотемпературных аналогов, согласно литературным данным, значительно падает при снижении температуры их осаждения. Например, модуль Юнга PECVD-пленки нитрида кремния, осажденного при  $100^{\circ}\text{C}$  составляет 83 ГПа, что составляет 43% от его значения для пленки, полученной при  $300^{\circ}\text{C}$ . Температурный режим предлагаемой в работе технологии, сочетающей  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и PPC в качестве основных материалов тонкопленочного корпуса МЭМС, позволяет использовать ее в производстве систем на кристалле, включающих

интегральные схемы. Схематичное изображение процесса корпусирования МЭМС-датчика Pirani приведено на рисунках 1.23 и 1.24.

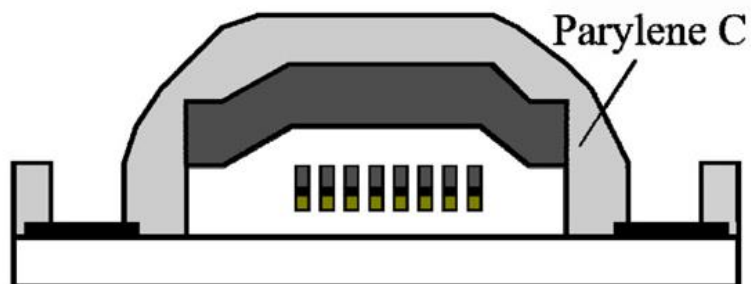


Рисунок 1.23 – Изображение герметизированной структуры Pirani

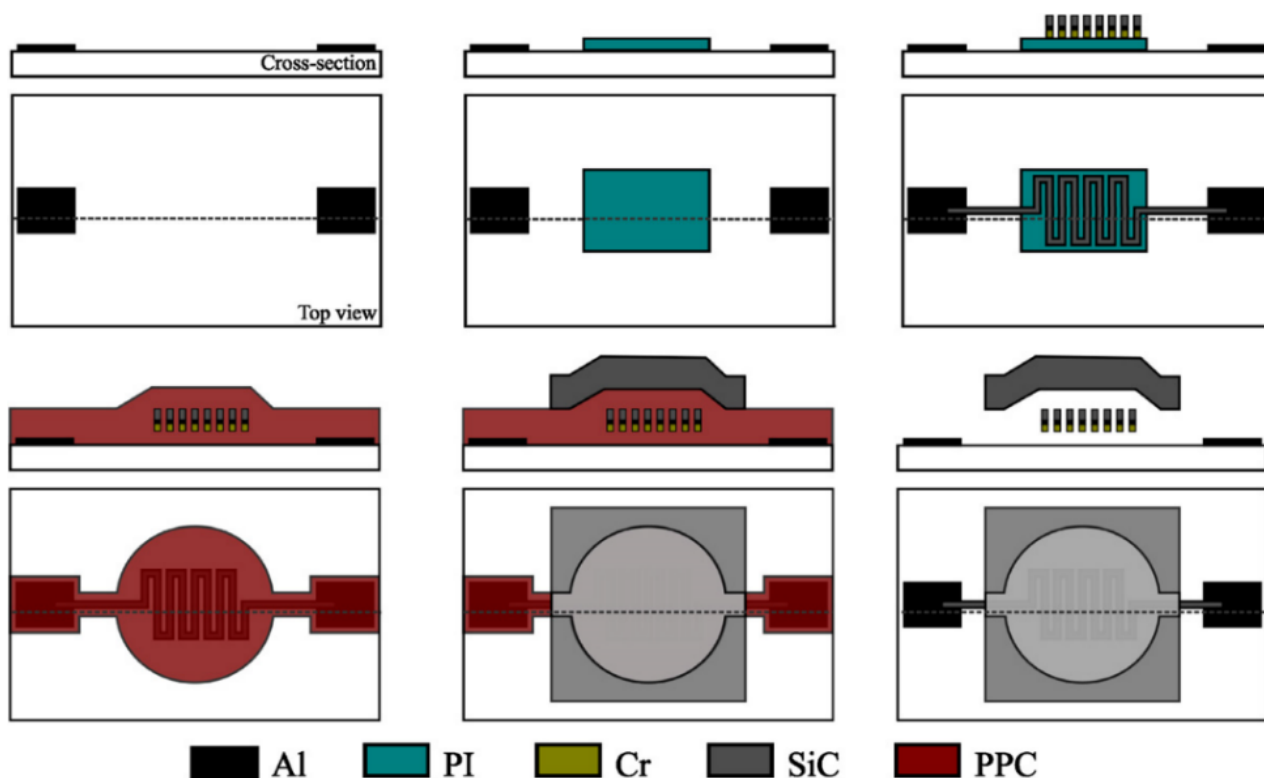


Рисунок 1.24 – Основные этапы процесса корпусирования

МЭМС-датчика Pirani

Структура пленок PPC (a) и SiC (b) после оптимизации процесса осаждения приведена на рисунке 1.2.

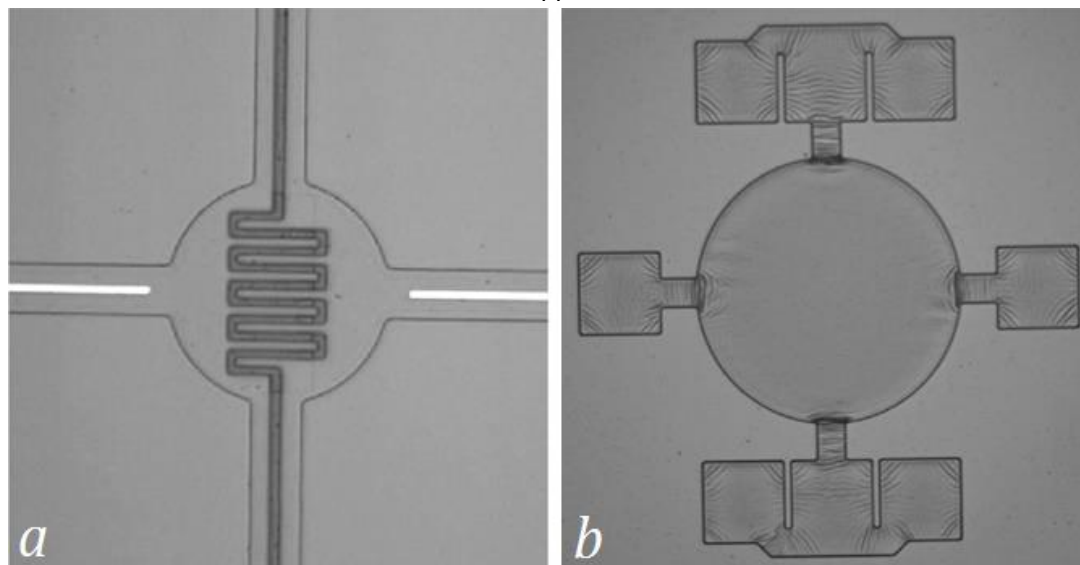


Рисунок 1.25 – Структура пленок PPC (a) и SiC (b) после оптимизации процесса осаждения

Микрофотографии корпусов, полученных по описанной технологии, приведены на рисунке 1.2.

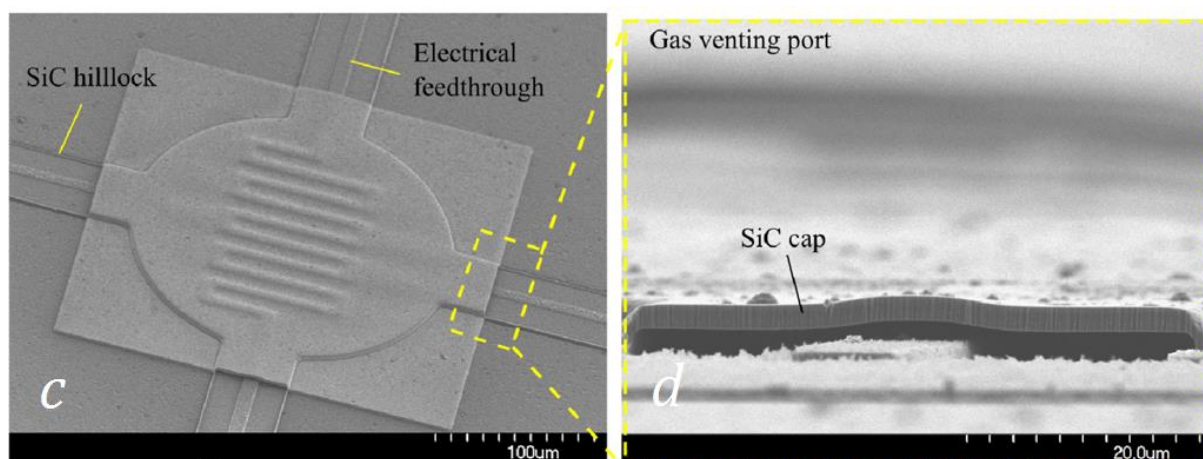


Рисунок 1.26 – Изображение каркасной SiC мембраны (c) и отверстия для выхода продуктов распада PPC (d)

#### 1.4.2.4 Корпусирование МЭМС методом электрохимического осаждения

Данная технология позволяет получить корпус размерами более  $800 \times 800$  мкм при толщине каркасной металлической структуры около 40 мкм. К достоинству данной технологии можно отнести низкую температуру технологических процессов ( $<250^\circ\text{C}$ ) [60]. Основные этапы технологического процесса проиллюстрированы на рисунке 1.27

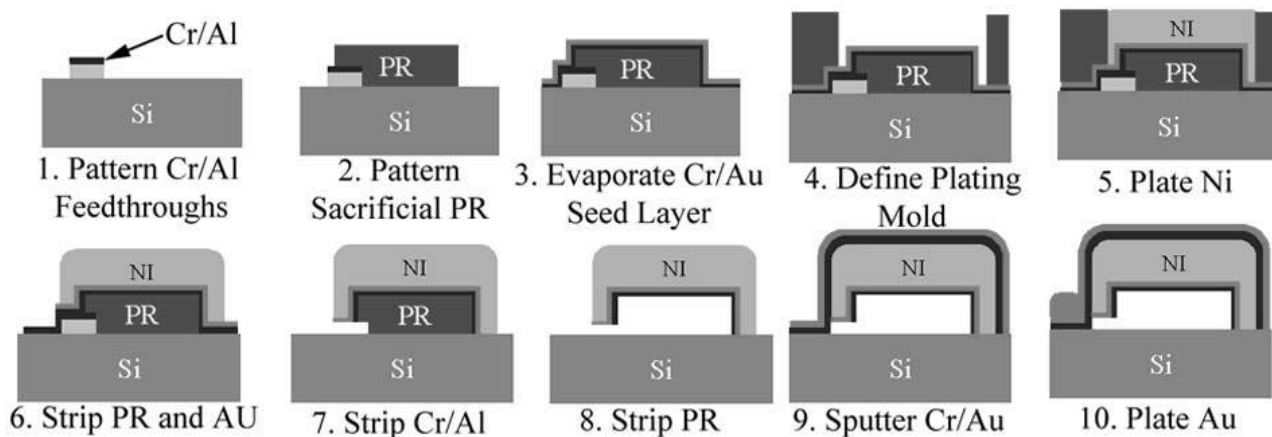


Рисунок 1.27 – Схематическое изображение процесса формирования вакуумного корпуса на основе пленки никеля

На первом этапе формируется жертвенный слой алюминия толщиной 150 нм, поверх которого осаждается защитный слой хрома толщиной 30 нм. Жертвенный слой фоторезиста осаждается таким образом, чтобы после селективного удаления пленки Cr/Al образовался полый канал. На поверхности жертвенного слоя осаждают затравочный слой Cr/Au и формируют фоторезистивную маску для электроосаждения никелевого каркасного слоя. После осаждения никеля, удаляют жертвенные слои Cr/Al, открывая тем самым доступ к жертвенному слою резиста. Полученная никелевая капсула герметизируется методом магнетронного распыления пленки Cr/Au.

## 1.5 Исследование надежности стальных конструкций

Для исследования надежности балки МЭМ ключа была применена теория надежности стальных балок [61]. Первостепенным вопросом при проектировании прямоугольной балки, является проведение расчетов прочности. Прочность прямоугольной балки зависит от предельных напряжений, возникающие в результате изгиба. Предельные напряжения зависят от материала, из которого изготовлена балка. В настоящей работе для исследования балки МЭМ ключа применялась медь, алюминий, золото, которые являются пластичными материалами. Для пластичных материалов за допустимые напряжения применяется предел текучести материала [62]. Максимальный запас прочности должен составлять 20% от предельной прочности конструкции [63]. В таблице 1.2 представлены физические параметры исследуемых материалов, определяющие механические свойства конструкций, а также физические параметры кремния, который традиционно применяется для изготовления МЭМС.

Таблица 1.2 – Физические параметры исследуемых материалов

Материал	Предел упругости, ГПа	Предел прочности $\sigma$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_T$ МПа	Коэффициент Пуассона $\mu$	$\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Au	79	140	30	0,42	0,024	19,32
Cu	110	200	60	0,32	0,0175	8,93
Al	70	120	35	0,34	0,028	2,69

Для оценки повреждений текучих материалов используется теория Мизес-Хенки [64]. Данная теория утверждает, что материал начинает разрушаться, когда напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению. Следовательно, проведя исследования возникающих напряжений по Мизесу в балке МЭМ ключа, можно определить геометрию балки, позволяющую достичь максимальной надежности.

Еще одним критерием, определяющий надежность балки, является приложенная нагрузка. При силе нагрузке больше предела упругости

материала, произойдет неупругая деформация балки, что в дальнейшем негативно повлияет на количество циклов работы устройства.

### 1.7 Выводы и постановка задачи

Анализ литературных данных 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 Si.



## ГЛАВА 2. Техника и методика эксперимента

### 2.1 Техника эксперимента

Для проведения исследований было использовано современное технологическое, диагностическое и контрольно-измерительное оборудование НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУР и линии по выпуску СВЧ МИС АО «НПФ «Микран»:

- 1) Установка для нанесения резистов OPTIspin SB20;
- 2) установка для влажных химических обработок OPTIwet SB30;
- 3) установка для удаления остаточного резиста в кислородной плазме YES – G500;
- 4) термоплиты для сушки пластин и резистов Sawatec HP-401-250C;
- 5) система безмасковой лазерной литографии Heidelberg microPG 101;
- 6) электронный микроскоп Zeiss Supra 55;
- 7) оптический микроскоп компании Leica Microsystems GmbH;
- 8) установка магнетронного напыления тонких пленок ORION-B;
- 18) установка гальванического осаждения меди;
- 19) зондовая станция SUSS MicroTec PM5;
- 21) измеритель параметров полупроводниковых приборов Tektronix 370A
- 23) источник питания Keysight E3645A;
- 24) мультиметр Keithley 2400-C.

## **2.2 Методика эксперимента**

### **2.2.1 Формирование металлизации управляющих, заземляющего и сигнального электродов на тестовых структурах**

Проведение экспериментов по разработке необходимых методик осуществлялось на тестовых структурах. В качестве тестовых структур использовались полупроводниковые подложки GaAs с предварительно сформированной металлизацией. Формирование металлизации на тестовых структурах осуществлялась в следующей последовательности: формирование металлизации управляющих электродов, формирование металлизации заземляющих электродов и сигнальной линии.

Для формирования металлизации управляющих, заземляющего и сигнального электродов методом центрифугирования наносилась двуслойная фоторезистивная маска LOR 20B/AZ1518 толщиной 3 мкм и 1,5 мкм соответственно. Сушка резиста осуществлялась при температуре 180гр 5мин и 100гр 70 сек. Напыление металлизации осуществлялось методом электронно-лучевого напыления в вакууме металлов Ti/Cu/Ti. Толщины металлизации управляющих электродов составляли 20/1460/20 нм. Толщины металлизации заземляющего и сигнального электродов составляли 20/1960/20 нм. После напыления металлизации фоторезистивная маска удалялась методом обратной литографии на «взрыв» в растворе метилперролидон при температуре 110 гр. с последующей промывкой в изопропиловом спирте и сушке в потоке азота.

### **2.2.2 Формирование тестовых структур для разработки методики формирования необходимого профиля в жертвенном слое фоторезиста**

В эксперименте по разработке методики формирования необходимого профиля в жертвенном слое путем экспонирования и проявления

фоторезиста ma-P 1225, использовались полупроводниковые подложки GaAs с предварительно сформированной металлизацией заземляющих электродов, сигнальной линией и управляющих электродов толщиной 2 мкм, 2 мкм и 1.5 мкм соответственно.

Экспонирования фоторезиста ma-P 1225 осуществлялось путем распределение подпороговой дозы по площади экспонирования в области сигнальной линии и управляющего электрода. Оптимизация распределения подпороговой дозы экспонирования по площади осуществлялась путем разбиения топологического чертежа на макропиксели. Для каждого макропикселя задавалась подпороговая доза экспонирования, в соответствии с толщиной слоя фоторезиста.

Для режимов экспонирования, позволяющие регулировать наклон стенок в фоторезистивном слое, без использования попиксельного режима экспонирования с распределением дозы, применялся метод дефокусировки. Дефокусировка лазерного излучения осуществляется путем смещение положение фокуса (дефокус) оптической системы вдоль вертикальной оси. При нулевом дефокусе лазерный луч фокусируется на поверхности фоторезиста, при положительном дефокусе фокусировка лазерного излучения происходила в объеме фоторезиста, а при отрицательном дефокусе над поверхностью фоторезиста.

### **2.2.3 Формирование тестовых структур для разработки методики формирования балки МЭМ ключа в виде МДМ структуры**

В эксперименте по разработке конструкции жертвенных слоёв и маскирующих слоев на основе фоторезистивных масок, режимов экспонирования и проявления фоторезистивных масок использовались полупроводниковые подложки GaAs с предварительно сформированной металлизацией заземляющих электродов, сигнальной линией и управляющих электродов толщиной 2 мкм, 2 мкм и 1.5 мкм соответственно.

На поверхности подложек формировался жертвенный слой на основе пленки фоторезиста  $\mu\text{-P1240}$  толщиной 3 мкм. В жертвенном слое формировались окна в области крепления балки МЭМ ключа к опорам методом лазерной литографии на установке Heidelberg DWL2000. На поверхности жертвенного слоя формировался маскирующий слой из фоторезиста AZ1518 толщиной от 2 до 3 мкм. Напыление слоёв Ti, Cu, SiO<sub>2</sub> осуществлялось методом электронно-лучевого напыления на установке Orion-B.

#### **2.2.4 Исследование механических напряжений в балки МЭМ ключа**

Исследование механических напряжений возникающие в балке МЭМ ключа проводилось в программном комплексе Comsol Multiphysics. Работа программного комплекса осуществляется с помощью численных методах математического анализа в моделировании, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных и методе конечных элементов [65].

Для моделирования механических параметров балки МЭМ ключа и тонкопленочной пространственной рамы использовался интерфейс механики твердого тела. Данный интерфейс позволяет провести анализ напряжений, а также линейной и нелинейной механики деформируемого твердого тела. Модуль включает в себя возможности моделирования линейные упругие и линейные вязкоупругие материалы [66].

Для решения дифференциальных уравнений в качестве начальных условий использовались характеристики материалов, такие как: модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность материала. Граничными условиями для решения дифференциальных уравнений являлась геометрий балки МЭМ ключа.

Для исследования балки МЭМ ключа были созданы 2D и 3D модели, позволяющие изменять геометрические размеры балки, физические и

электрические свойства, электростатические свойства. В процессе расчета исследовалось напряжение по Мизесу.

### 2.2.5 Исследование электрических характеристик МЭМ ключа по СВЧ сигналу

Исследование электрических характеристик МЭМ ключа по СВЧ сигналу проводилось в системе проектирования электронных устройств EDA AWR Microwave Office. Работа системы представляет собой интегрированный программный пакет для проектирования СВЧ ИС. Пакет имеет инструменты линейного и нелинейного моделирования во временной и частотной области, трехмерного электромагнитного моделирования, моделирования радиотехнических устройств на системном уровне. Пакет также имеет возможности подготовки топологии ИС, таким образом, обеспечивая полный цикл проектирования [67].

Для исследования коэффициента отражения ( $S_{11}$ ) и коэффициента передачи ( $S_{21}$ ) СВЧ сигнала МЭМ ключа в программе была построена геометрическая модель (рисунок 2.1).

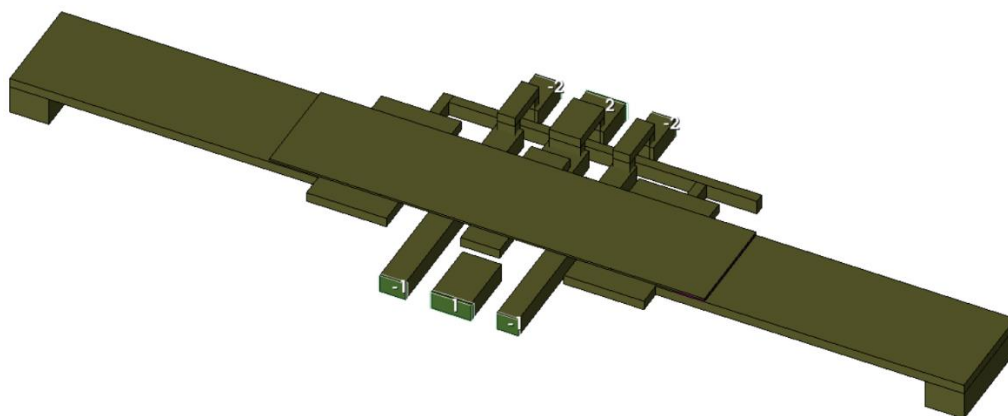


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение геометрической модели СВЧ МЭМ ключа в AWR Microwave Office

Расчет S-параметров проводился в модуле электромагнитных исследований. Для расчета задавались параметры среды, представленные на рисунке 2.2.

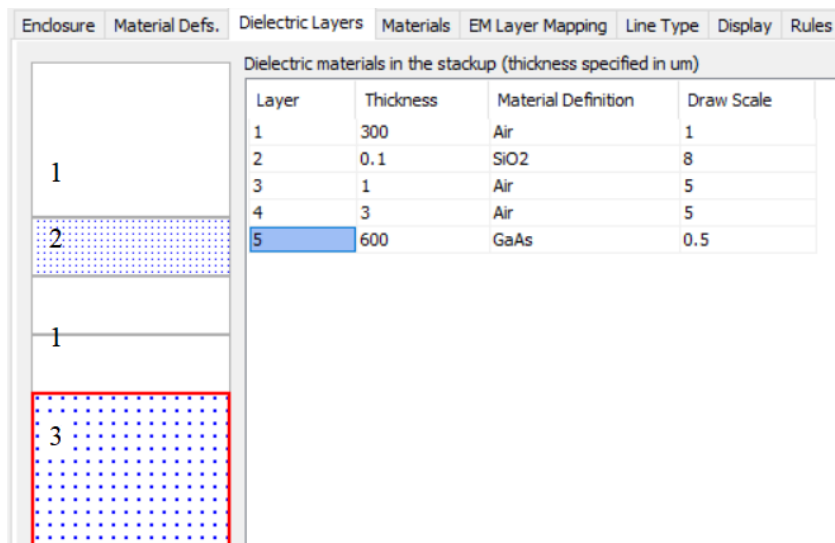


Рисунок 2.2 – Иллюстрация параметров среды моделирования в модуле EM анализа:

1 – Воздух; 2 – Диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ ; 3 – Арсенид галлия GaAs.

### 2.2.6 Технология изготовления СВЧ МЭМ ключа и его корпусирования на GaAs подложке

Для формирования СВЧ МЭМ ключей в тонкопленочном корпусе, использовались подложки полуизолирующего арсенида галлия (i-GaAs) с кристаллографической ориентацией (100). Технологический маршрут включает в себя традиционные процессы технологии арсенид-галлиевых МИС, такие как оптическая литография, жидкостное травление, электронно-лучевое и магнетронное осаждение металлических, резистивных и диэлектрических пленок [68].

На первом этапе технологического маршрута, методом электронно-лучевого осаждения металлических пленок через двуслойную фоторезистивную маску AZ1518/LOR20B, формируются управляющие электроды, сигнальная линия, опоры балки и корпуса МЭМ ключа (рисунок 2.3).

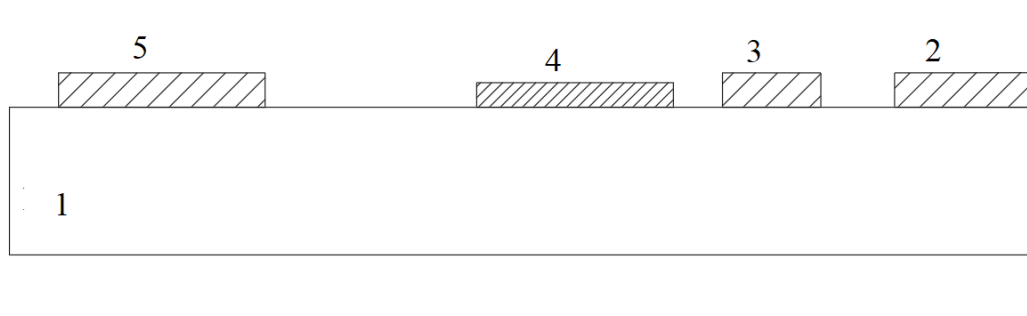


Рисунок 2.3 – Этап технологического маршрута формирования управляющих электродов, сигнальной линии, опор балки и корпуса МЭМ ключа

1 – Подложка GaAs; 2 – Сигнальный электрод; 3 – Заземляющий электрод;  
4 – Управляющий электрод; 5 – Опора балки.

Жертвенный слой на основе фоторезиста (ФР) та-Р1225 формируется методом центрифугирования толщиной 3 мкм с последующим экспонированием на лазерном литографе методом 3D литографии и проявлением в жидкостном проявителе. Сушка резиста осуществляется на горячей плите в течении 5 мин при 100°С, экспонированием фоторезиста осуществляется с дозой 300 мДж, проявление ФР осуществляется в растворе гидроксид тетраметиламмония и воды в течении 2 минут (рисунок 2.4).

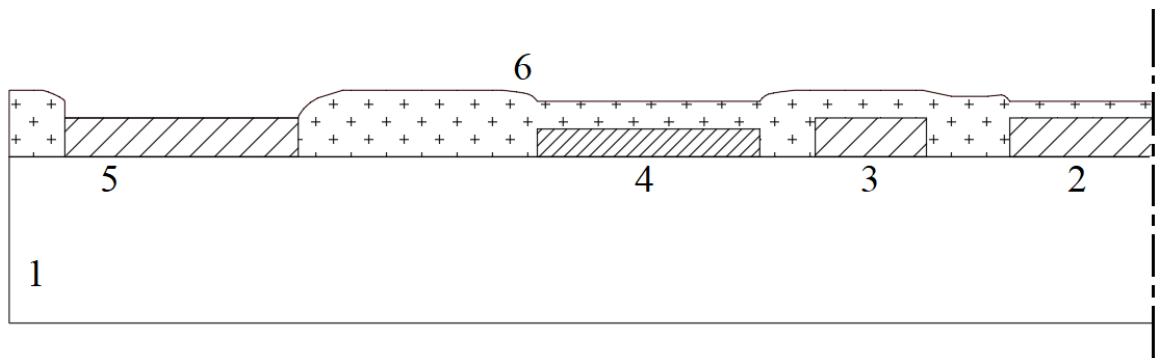


Рисунок 2.4 – Этап технологического маршрута формирования жертвенного слоя фоторезиста:

1 – Подложка GaAs; 2 – Сигнальный электрод; 3 – Заземляющий электрод;  
4 – Управляющий электрод; 5 – Опора балки; 6 – ФР та-Р 1225

Затем формируется металлизация замыкающего электрода и разделяющий диэлектрический слой  $\text{SiO}_2$  методом элеткронно-лучевого напыления через однослойную фоторезистивную маску AZ1518 толщиной 2 мкм. Толщина металлизации замыкающего электрода составила 300нм, толщина разделяющего диэлектрического слоя 200 нм. На рисунке 2.5 представлен этап технологического маршрута формирования замыкающего электрода и диэлектрического слоя.

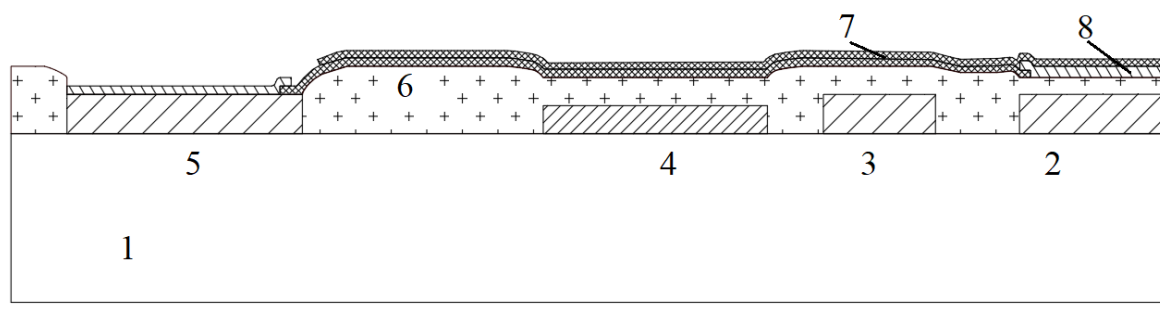


Рисунок 2.5 – Этап технологического маршрута формирования замыкающего электрода и диэлектрического слоя:

- 1 – Подложка GaAs; 2 – Сигнальный электрод; 3 – Заземляющий электрод;  
 4 – Управляющий электрод; 5 – Опора балки; 6 – ФР ma-P 1225;  
 7 – Диэлектрический слой  $\text{SiO}_2$ ; 8 – Замыкающий электрод

Далее методом гальванического осаждения меди формируется основная металлизация балки МЭМ ключа и формируются окна в ФР для опор каркасной системы (рисунке 2.6).



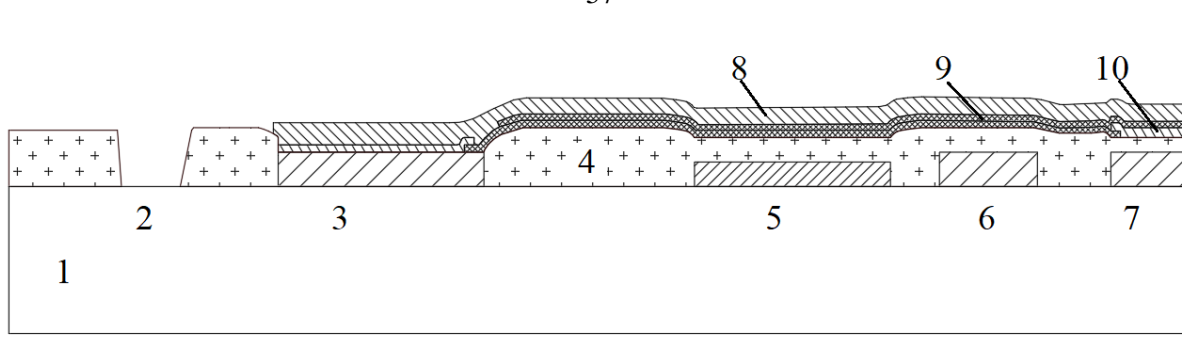


Рисунок 2.6 – Этап формирования основной металлизации  
балки МЭМ ключа:

- 1 – Подложка GaAs; 2 – Окно в ФР для опоры корпуса; 3 – Опора балки;  
4 – ФР ma-P 1225; 5 – Управляющий электрод; 6 –Заземляющий электрод;  
7 – Сигнальный электрод; 8 – Основная металлизация балки МЭМ ключа;  
9 - Диэлектрический слой SiO<sub>2</sub>; 10 – Замыкающий электрод.

После чего формируется жертвенный слой ФР ma-P 1240 толщиной 5 мкм, методом электронно-лучевого напыления осаждается затравочный слой Cu, поверх которого формируется маскирующий слой ФР AZ1518 толщиной 6 мкм. С помощью гальванического осаждения меди формируется металлизация корпуса толщиной 5 мкм. Структура приведена на рисунке 2.7.

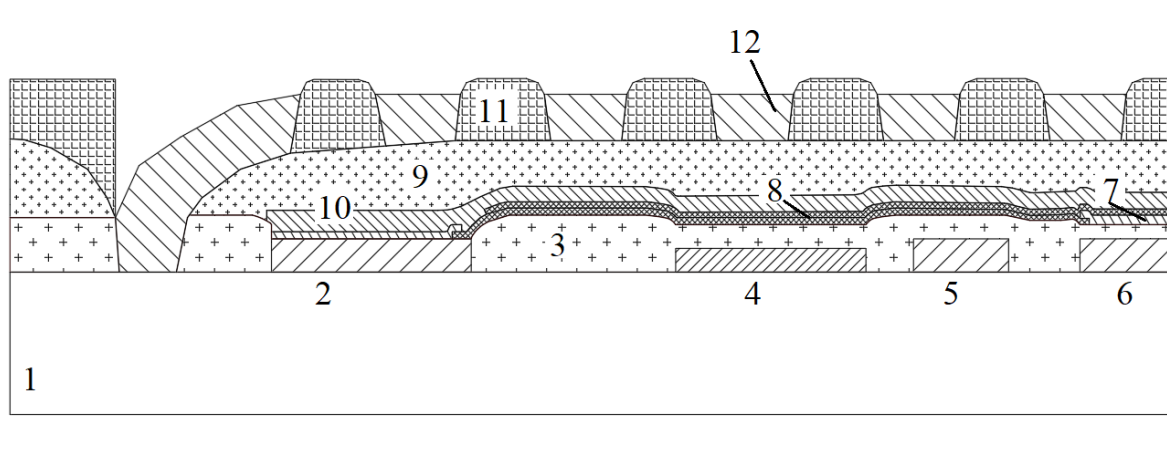


Рисунок 2.7 – Этап формирования металлизации каркасной системы

- 1 – Подложка GaAs; 2 – Опора балки; 3 – ФР ma-P 1225;  
 4 – Управляющий электрод; 5 –Заземляющий электрод;  
 6 – Сигнальный электрод; 7 – Замыкающий электрод;  
 8 - Диэлектрический слой  $\text{SiO}_2$ ; 9 – Жертвенный слой ФР ma-P1240;  
 10 – Основная металлизация балки МЭМ ключа; AZ1518;  
 11 – Маскирующий слой ФР; 12 – Металлизация каркасной системы.

После формирования необходимых металлических и диэлектрических слоев, осуществляется процесс поэтапного удаления жертвенных слоев и маскирующих слоёв фоторезиста. Удаление жертвенных слоев осуществляется в растворителе N-метилпирролидон. Структура МЭМ прибора после полного удаления жертвенных слоев приведена на рисунке 2.8.

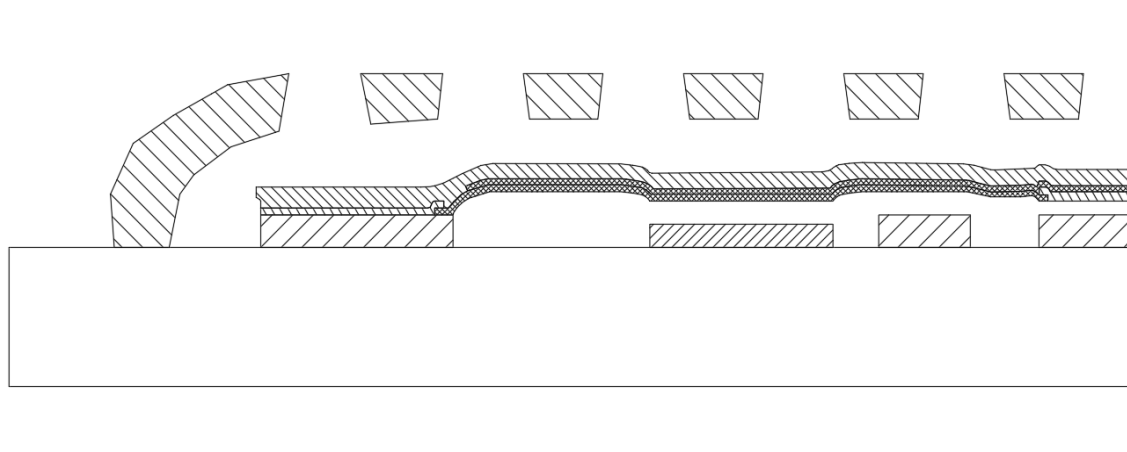


Рисунок 2.8 - Структура МЭМ ключа после полного удаления жертвенных слоев фоторезиста

После удаления всех жертвенных слоев фоторезиста, сушки и визуального осмотра пластины, следует заключительный этап технологического маршрута. С целью изоляции МЭМ ключа поверх каркасной системы наносится толстый слой бензоциклобутена Cyclotene 4024 толщиной 7 мкм методом центрифугирования. Структура МЭМ ключа в герметизированном корпусе приведена на рисунке 2.9.

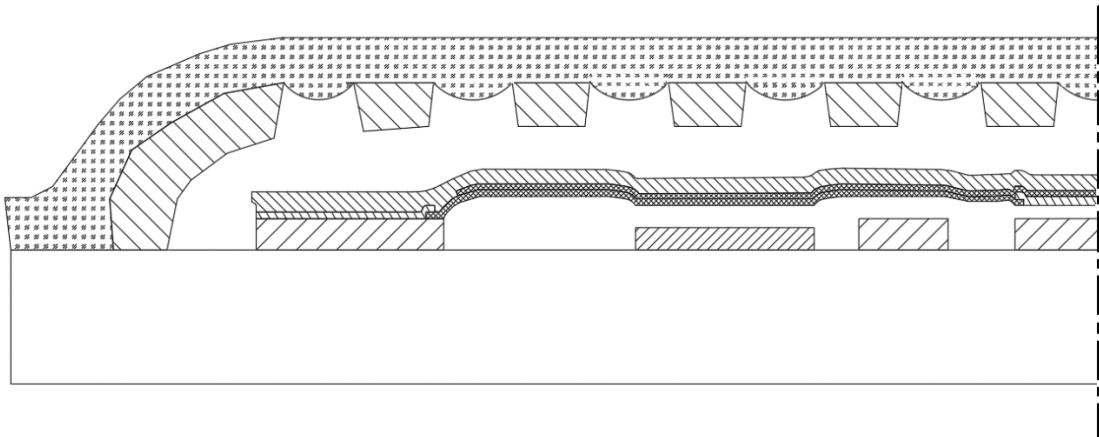


Рисунок 2.9 – Структура МЭМ ключа в герметизированном корпусе

После нанесения бензоциклобутен Cyclotene 4024 сушится при 250 градусов Цельсия в течении 20 минут.

## ГЛАВА 3. Разработка макета СВЧ МЭМ ключа

### 3.1 Исходные данные к разработке макета СВЧ МЭМ ключа

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 (рисунок 3.1).

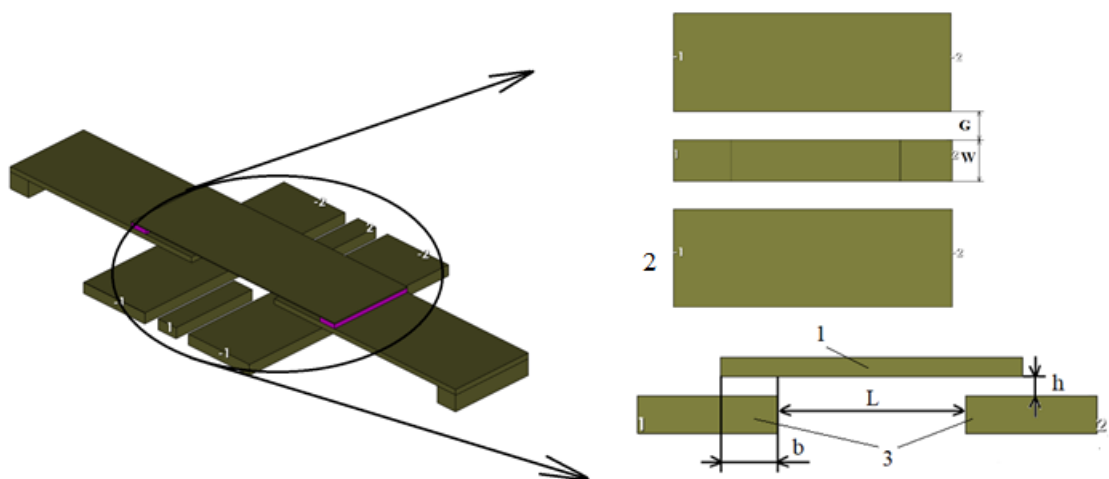


Рисунок 3.1 – Поясняющий рисунок конструкции МЭМ ключа на основе копланарной линии

- 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. В результате сигнал пройдет от входа к выходу ключа.

Расчет механических параметров разрабатываемой конструкции проводился с помощью Comsol Multiphysics. Расчет электрических параметров проводился в AWR Microwave Office.

### **3.3 Разработка механической модели балки МЭМ ключа**

Первым этапом является определение минимальной и максимальной длины балки на основе меди. Минимальные и максимальные геометрические размеры определялись на основании возникающего максимального напряжения в балке. В качестве исходных геометрических размеров были выбраны ширина балки и максимальное отклонение от исходного положения, и составили 60 мкм и 1 мкм соответственно (расчет приведен в разделе 3.5). На рисунке 3.2 представлен график зависимости возникающего максимального напряжения по Мизесу в балке толщиной 1 мкм, при изменении длины балки [69].

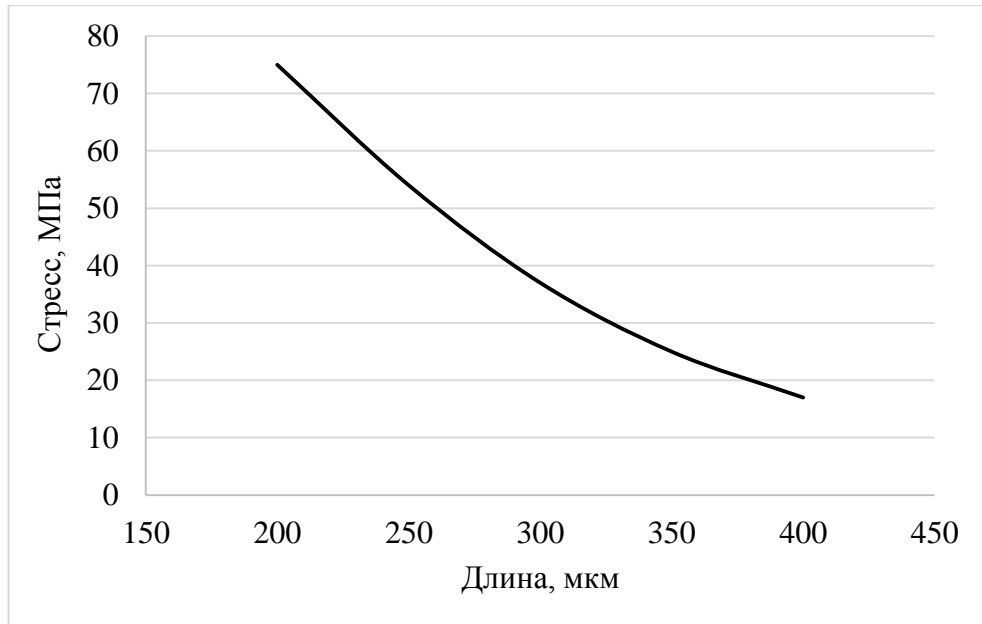


Рисунок 3.2 – Зависимость максимального напряжения в балке от длины

На рисунке 3.3 представлена зависимость максимального напряжения по Мизесу в балке от толщины балки при её длине 400 мкм (рисунок 3.3).

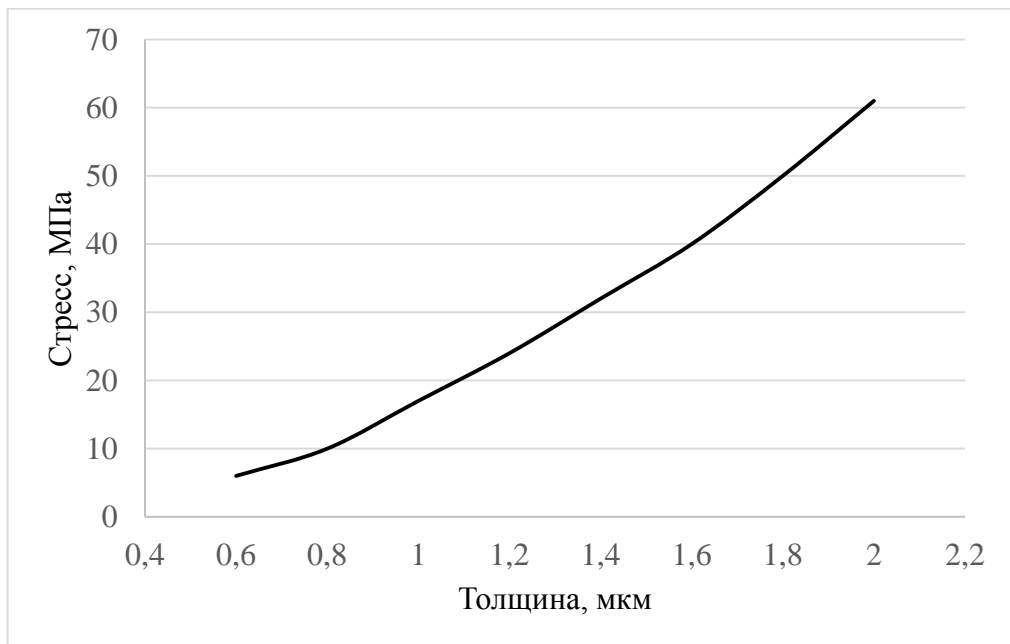


Рисунок 3.3 – Зависимость максимального напряжения в балке от толщины

На основе проведенного моделирования был построен 3D график, который отображает влияние толщины и длины балки на максимальные возникающие напряжения (рисунок 3.4)

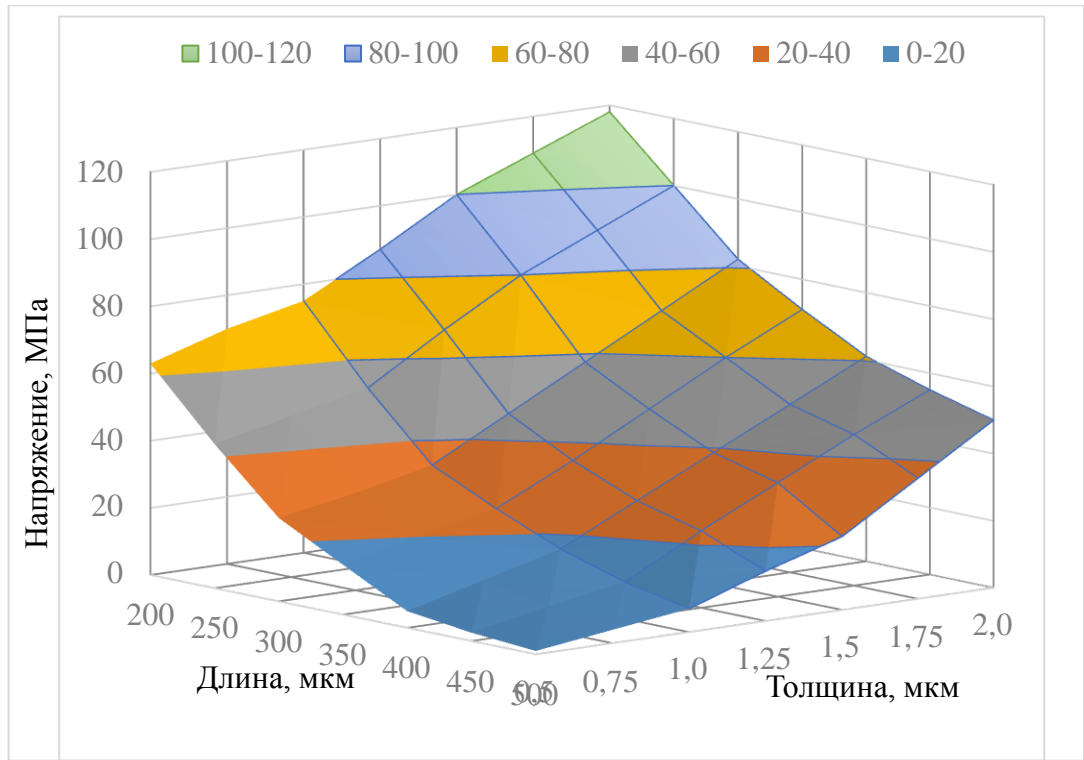


Рисунок 3.4 – Поверхность зависимости максимального напряжения в балке от длины и толщины балки

Так как балка должна быть выполнена в виде МДМ структуры (рисунок 3.5), то было определено влияние диэлектрика на надежность.

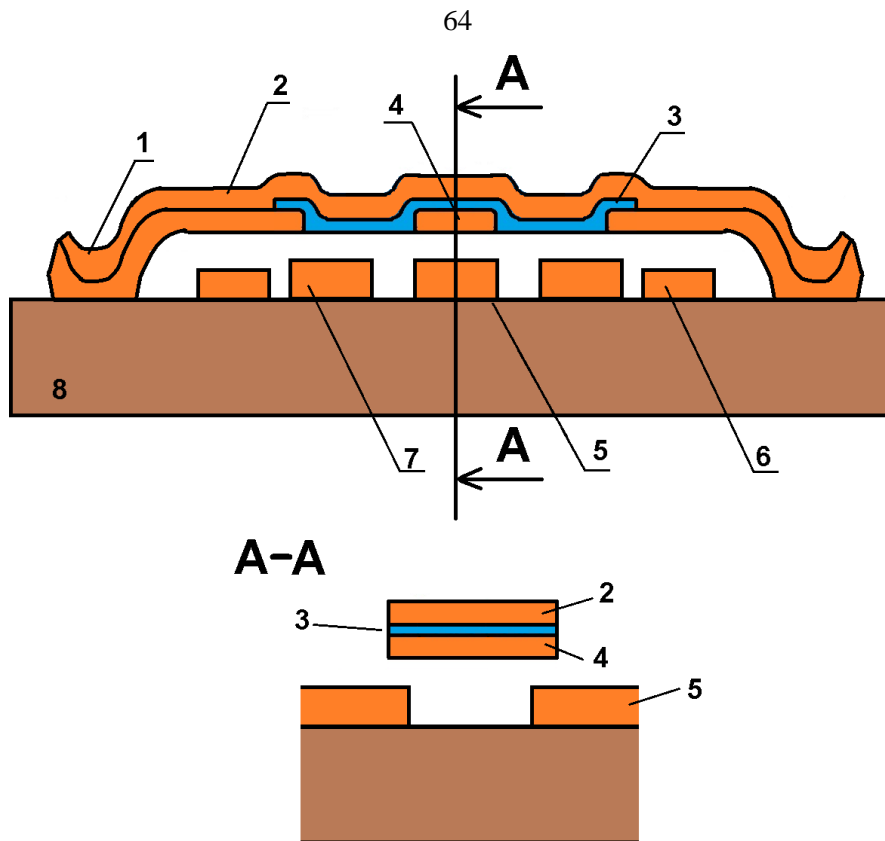


Рисунок 3.5 – Схематическое изображение балки МЭМ ключа

- 1 – Опора балки МЭМ ключа; 2 – Основная металлизация балки МЭМ ключа;  
 3 – Диэлектрический изолирующий слой; 4 – замыкающий электрод;  
 5 – Сигнальный электрод; 6 – Управляющий электрод;  
 7 – Заземляющий электрод.

В качестве диэлектрика использовались тонкие пленки  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Выбор диэлектриков основывался на возможности получение тонких диэлектрических пленок методом электронно-лучевого напыления в вакууме [70]. На рисунке 3.6 представлен график отображающий максимальный изгиб балки на основе композиции  $\text{Cu-SiO}_2$ ,  $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$  и балки без использования диэлектрика.



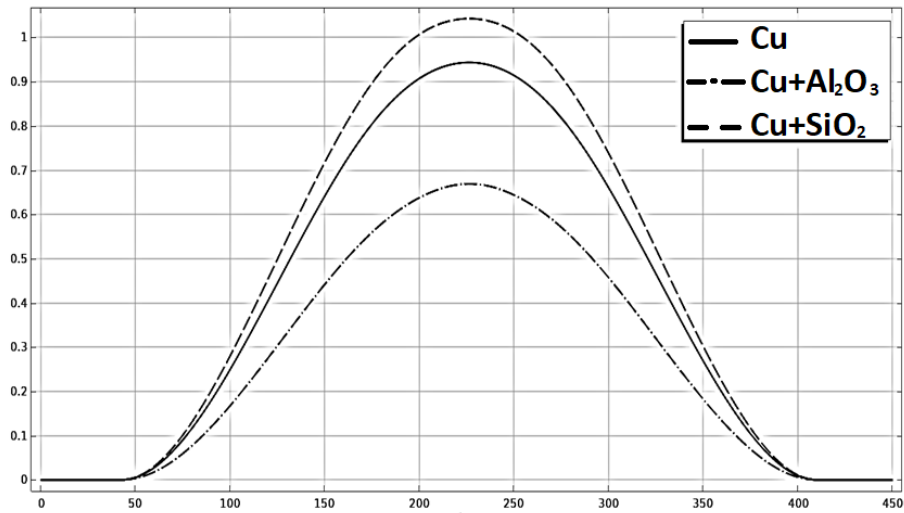


Рисунок 3.6 – График зависимости изгиба балки от координаты

Толщина медного слоя составляла 1 мкм, толщина диэлектрического слоя определялась частотными параметрами (расчет представлен в главе 3.7.1) и слоя составляла 200 нм.

Для оценки времени включения, разрабатываемого МЭМ ключа была построена зависимость максимального смещения балки от времени при приложенном управляющем напряжении равным 25 В (рисунок 3.7).

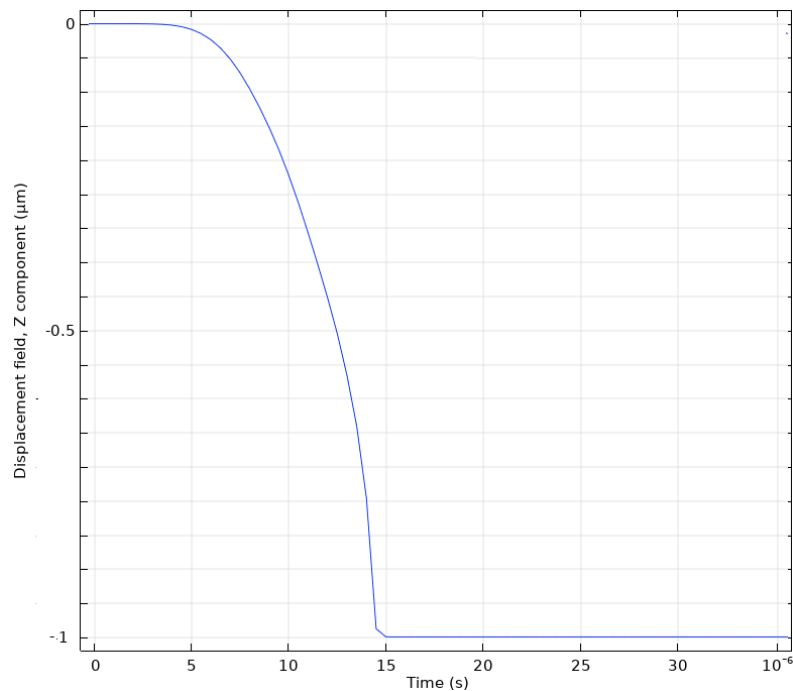


Рисунок 3.7 – График зависимости максимального смещения балки от времени.

Из графике на рисунке 3.7 видно, что максимальное отклонение балки на 1 мкм от исходного положения при приложенном напряжении происходит за 15 мксек.

### 3.4. Исследование модели балки МЭМ ключа с реальной геометрией

#### 3.4.1. Исследование влияние рельефа жертвенного слоя на надежность балки МЭМ ключа

Так как балка МЭМ ключа изготавливается по технологии с использованием жертвенного слоя (см. раздел 2.2), в геометрии балки возникает рельеф (рисунок 3.8), который может так же повлиять на механические свойства балки и распределение возникающих напряжений в балке.

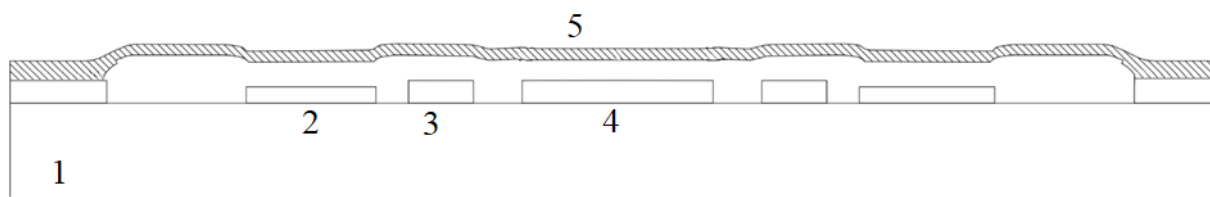


Рисунок 3.8 – Схематическое изображение реальной геометрии балки:

1 – Подложка; 2 – Управляющий электрод; 3 – Заземляющий электрод;  
4 – Электрод сигнальной линии; 5 – Балка МЭМ ключа

В связи с этим, для исследования влияния рельефа балки на ее механические свойства, было проведено моделирование возникающего напряжения в балке с учетом технологических особенностей геометрии (рисунок 3.9).

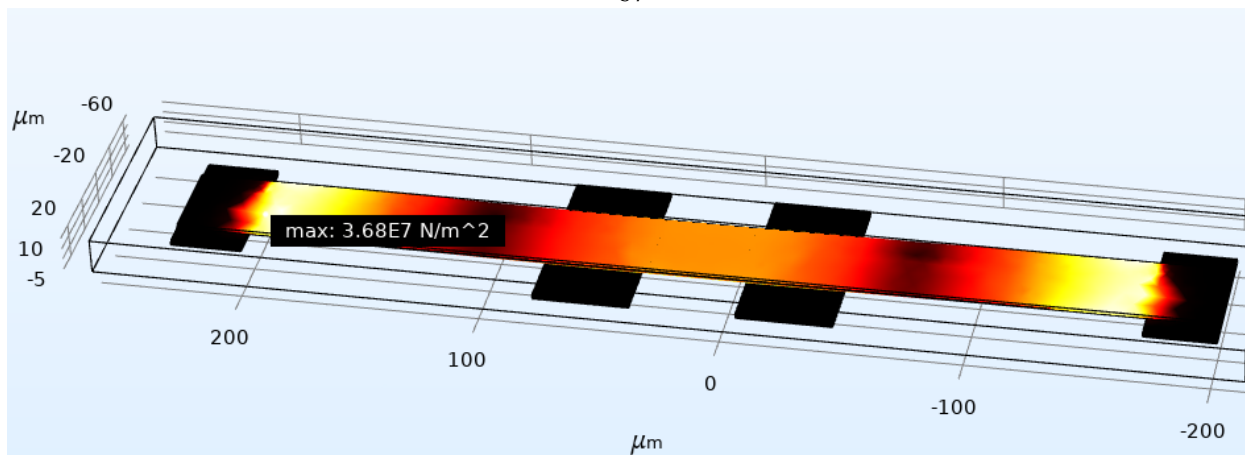


Рисунок 3.9 – Результат моделирования механических напряжений в рельефной балке СВЧ МЭМ ключа

Как видно из результатов моделирования, максимальное возникающее напряжение составило 36 МПа, что не превышает предельное напряжение.

Для оценки влияния рельефа балки на ее изгиб, проведено моделирование изгиба балки с рельефной геометрией в сравнении с ее идеализированной геометрией (рисунок 3.10).

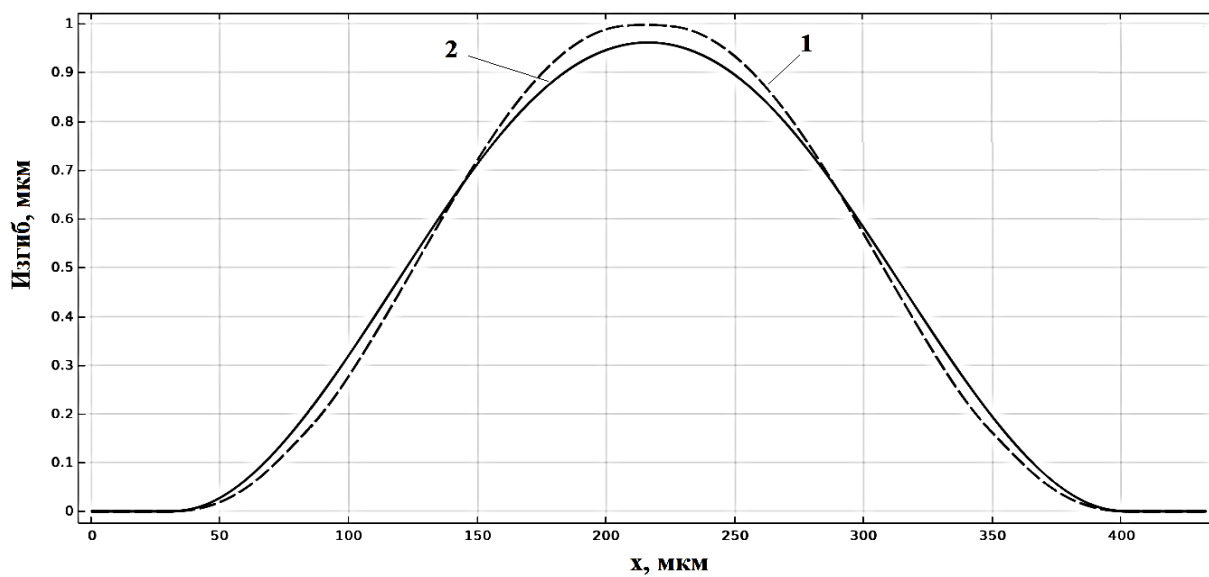


Рисунок 3.10 – Результат моделирования изгиба рельефной и идеализированной балки:

1 - Изгиб рельефной балки; 2 – Изгиб идеализированной балка

Из рисунка 3.10 видно, что технологический рельеф балки не оказывает существенного влияния на величину ее изгиба и, следовательно, на величину управляющего напряжения переключателя.

### 3.5 Разработка электрической модели область электрического контакта балки МЭМ ключа

Основной вклад на надежность разрывного контакта вносит износостойкость. Наиболее простым способом увеличить износостойкость разрывного контакта, без замены материалов, является уменьшение площади контакта, подвергаемой износу [71]. Уменьшение площади электрического контакта влияет на его сопротивление, что негативно сказывается на характеристиках прибора. В связи с этим, был предложен способ уменьшения площади контакта, при этом сохранив его электрические характеристик.

Уменьшение площади контакта возможно за счет замены плоскостного контакта на множество точечных контактов посредством выполнения контактной стороны мембраны в виде полусфер (рисунок 3.11).

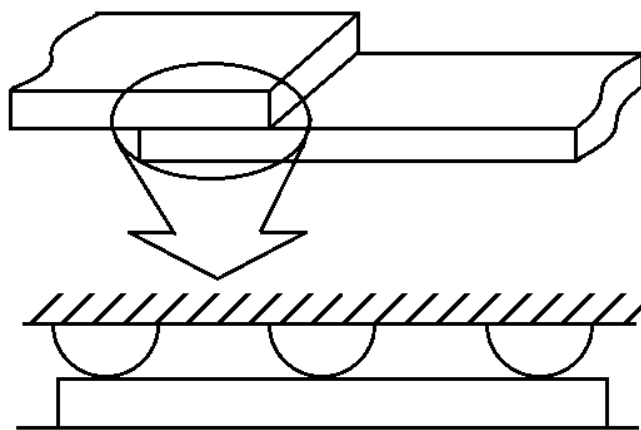


Рисунок 3.11 – Схематическое представления способа уменьшения площади электрического разрывного контакта:

Радиус таких полусфер задавался исходя из возможностей литографического процесса и составил 400 нм, период полусфер 1200 нм.

Количество полусфер определялось длиной перекрытия  $b$  замыкающего электрода с сигнальной линией (рисунок 3.12) и шириной сигнальной линии 2.

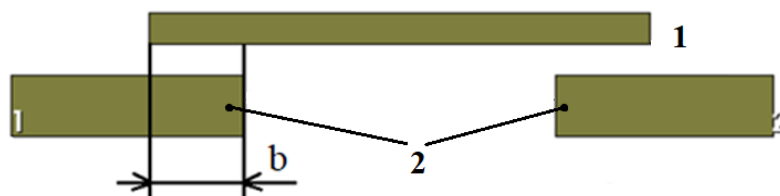


Рисунок 3.12 – Поясняющий рисунок для расчета области электрического контакта:

1 – Замыкающий электрод; 2 – Сигнальная линия.

Сопротивление одной полусферы рассчитывалось по формуле стекания [72]:

$$R_{\text{ст}} = \frac{\rho}{2an}$$

$$a = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_k \cdot r}{E}}$$

где:  $a$  – радиус площадки фактического касания

$n$  – число точек касания

$\rho$  – удельное сопротивление материала

$E$  – модуль Юнга

$F_k$  – контактное нажатие

$r$  – эмпирический коэффициент

На рисунке 3.13 представлен график зависимости сопротивления контактного перехода от величины перекрытия ( $b$ ) электрического контакта (1) с сигнальной линией (2).

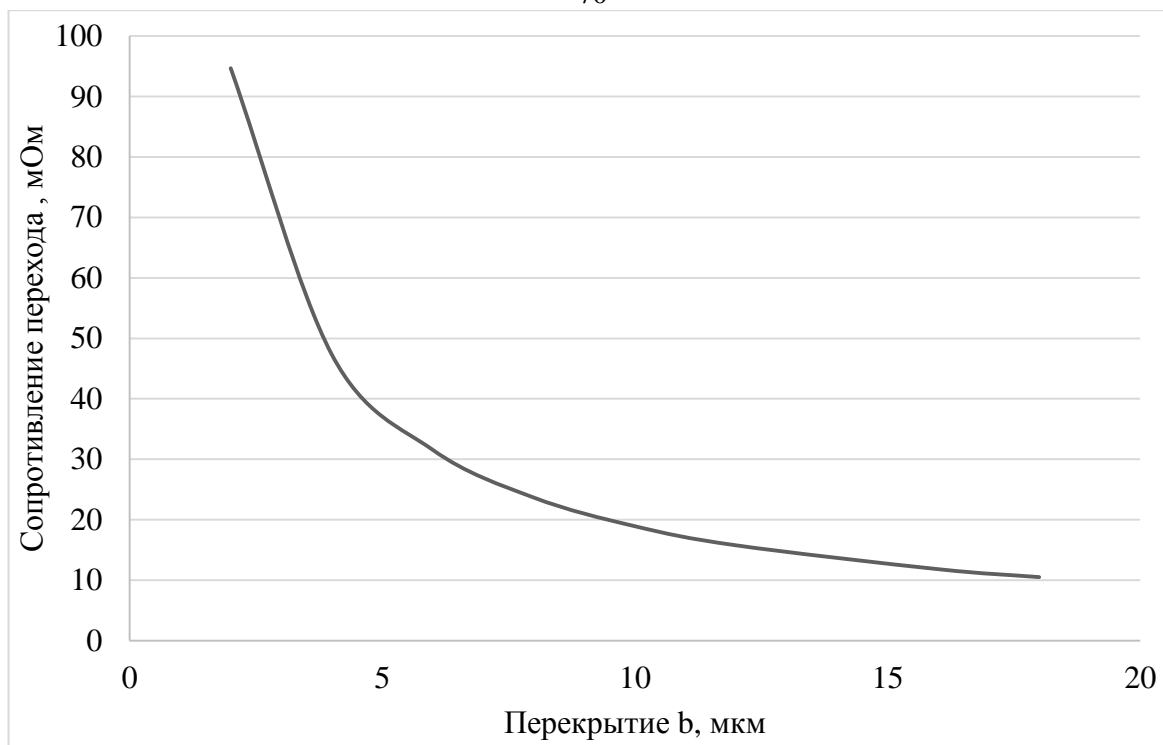


Рисунок 3.13 – График зависимости сопротивления контактного перехода от величины перекрытия электрического контакта с сигнальной линией.

Из рисунка 3.13 видно, что при перекрытия  $b$  менее 5 мкм происходит резкое увеличение сопротивления контактного перехода. Так как для увеличения изоляции СВЧ МЭМ ключа в закрытом состоянии необходимо использовать минимальное перекрытие, то рабочая величина перекрытия  $b$  была выбрана 8 мкм.

### 3.6. Разработка модели корпуса МЭМ ключа

Для гетероинтеграции СВЧ МЭМ ключей и GaAs СВЧ МИС на одной полупроводниковой подложке, необходимо проведения герметизации МЭМ ключа на уровне пластины, в едином технологическом цикле. Для реализации герметизации МЭМ ключа был предложен и разработан способ основанный тонкопленочном методе корпусирования WL $\mu$ E, который позволил провести технологический процесс герметизации полностью совместимый с технологическим процессом изготовления GaAs СВЧ МИС.

По разработанному способу над поверхностью МЭМ ключа формируется тонкопленочный металлический каркасный слой определенной структуры. Структура каркасного слоя должна позволять беспрепятственно удалять ранее сформированные жертвенные слои фоторезиста. В то же время, должна быть непроницаемой для герметизирующего материала. Сочетания этих свойств было достигнуто благодаря использованию ячеистой структуры в виде треугольников.

### 3.6.1 Исследование механики корпуса МЭМ ключа

Одна из основных задач каркасного слоя является обеспечение механической поддержки вышележащему слою герметизирующего материала. В данной работе были построены модели каркасного слоя с различной геометрией. Варианты геометрии каркасного слоя представлены на рисунке 3.14.

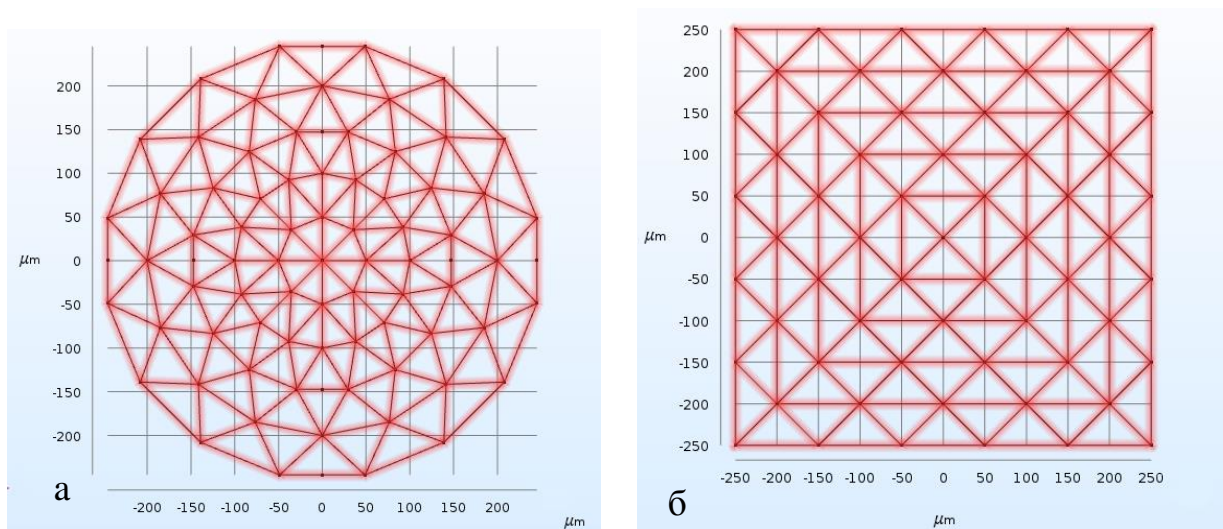


Рисунок 3.14 – Геометрия **круглой**[B3] (а) и квадратной (б) пространственных рам.

Высота каркаса в максимальной точке определялась толщиной жертвенного слоя фоторезиста и составляла 10 мкм. Результаты расчета деформации круглой и квадратной пространственных рам под нагрузкой

герметизирующего слоя ВСВ в 100 мг представлены на рисунках 3.15 и 3.16 соответственно [73].

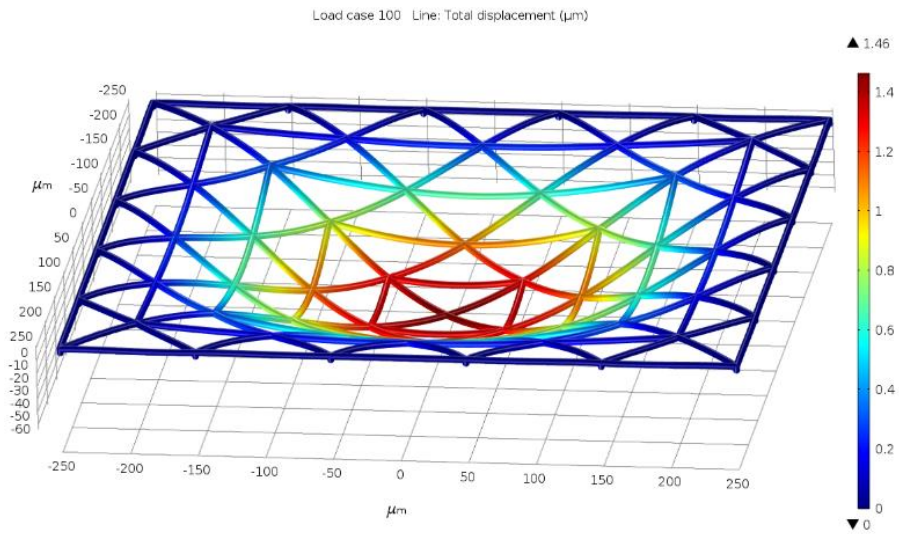


Рисунок 3.15 – Деформация пятирусной квадратной рамы

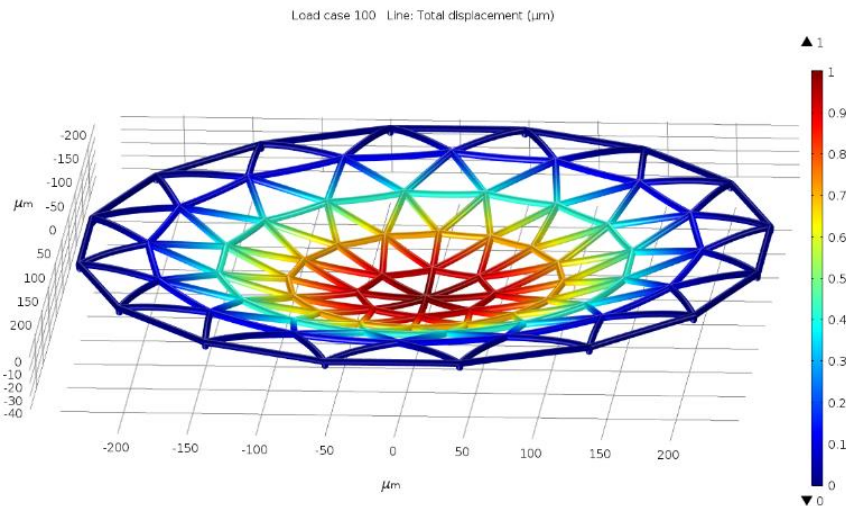


Рисунок 3.16 – Деформация пятирусной круглой рамы

Так же было проведено моделирование возникающих механических напряжений для данных типов рам. На основе полученных данных можно заключить, что пространственная рама круглой формы обладает большей устойчивостью по сравнению с квадратной, однако механические напряжения в структурах имеют значения, близкие к предельным  $\sigma=50$  МПа.

Добиться значительного снижения напряжений и деформаций помогает применение переменного сечения рамы. Результаты моделирования такой рамы представлены на рисунках 3.17 и 3.18.



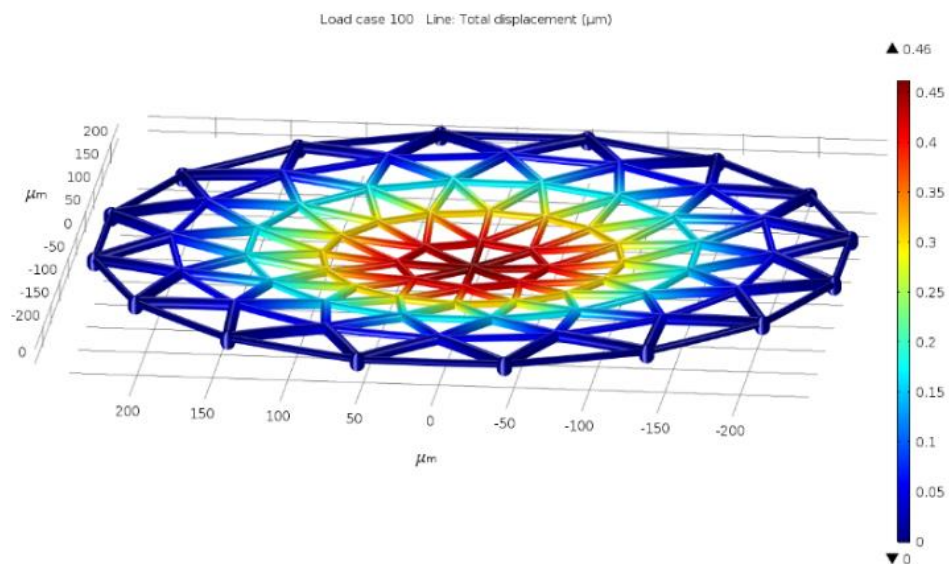


Рисунок 3.17 – Деформация круглой рамы с переменным сечением

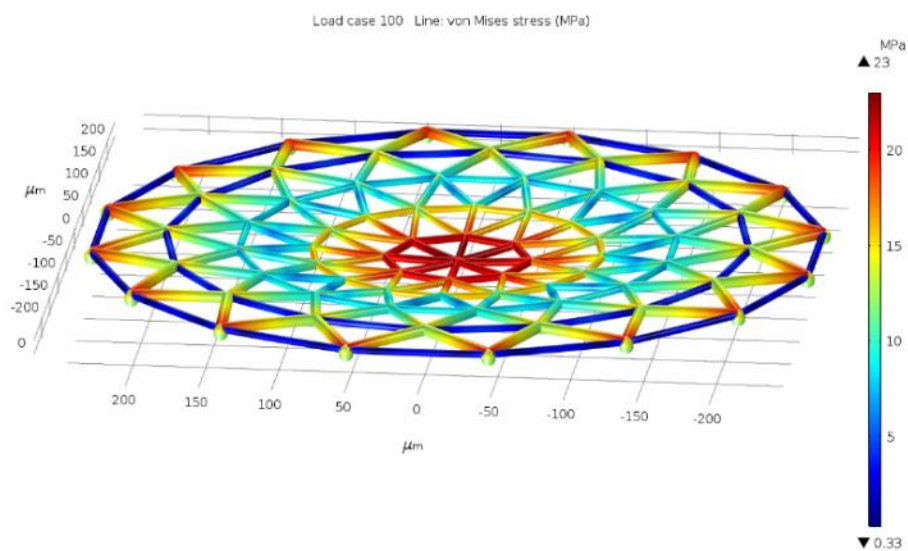


Рисунок 3.18 – Напряжения в круглой раме с переменным сечением

Также была рассмотрена зависимость механических напряжений от плотности сетчатой [B4]структуры рамы. Результаты моделирования двух-, трех-, четырех и десяти ярусных рам приведены на рисунках 3.19-3.22.

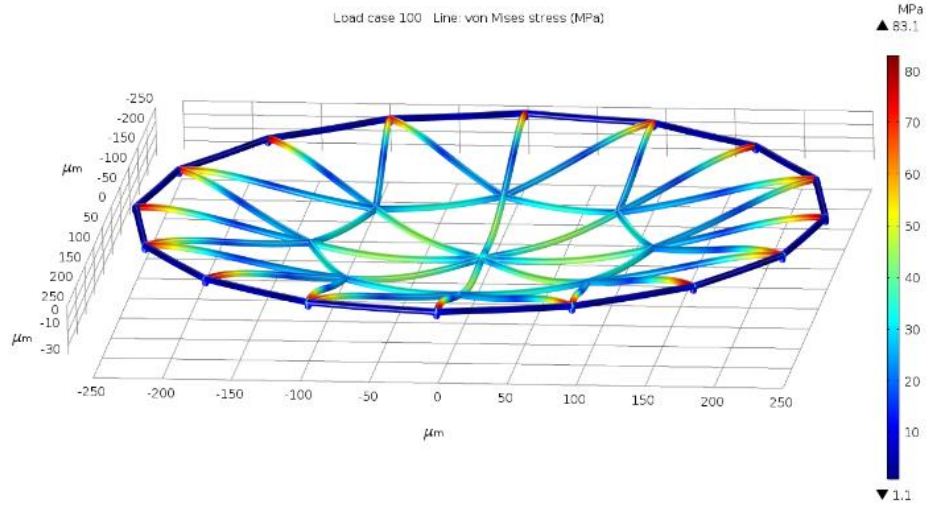


Рисунок 3.19 – Напряжения в двухъярусной круглой раме

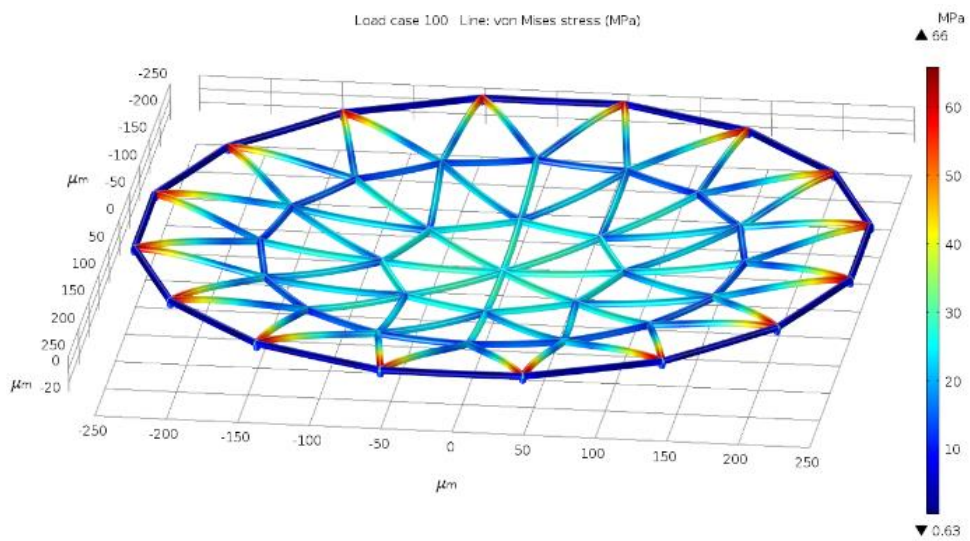


Рисунок 3.20 – Напряжения в трехъярусной круглой раме

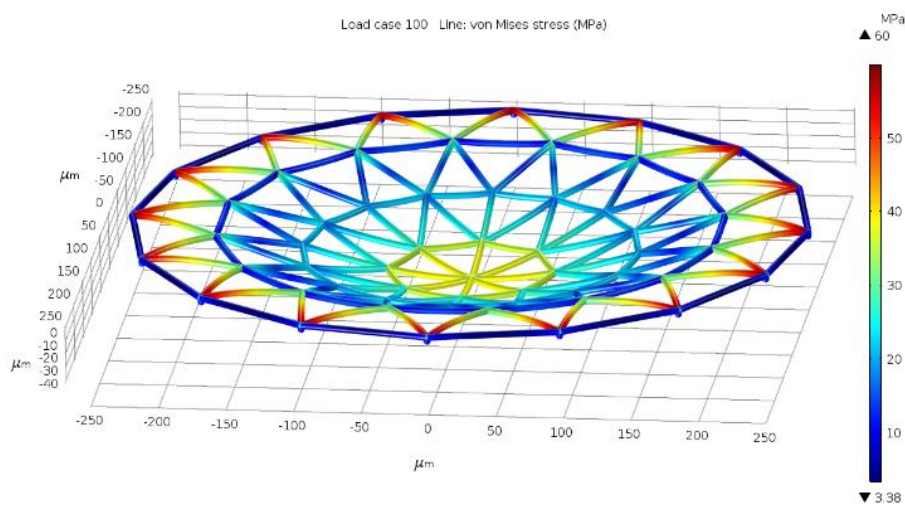


Рисунок 3.21 – Напряжения в четырёхъярусной круглой раме

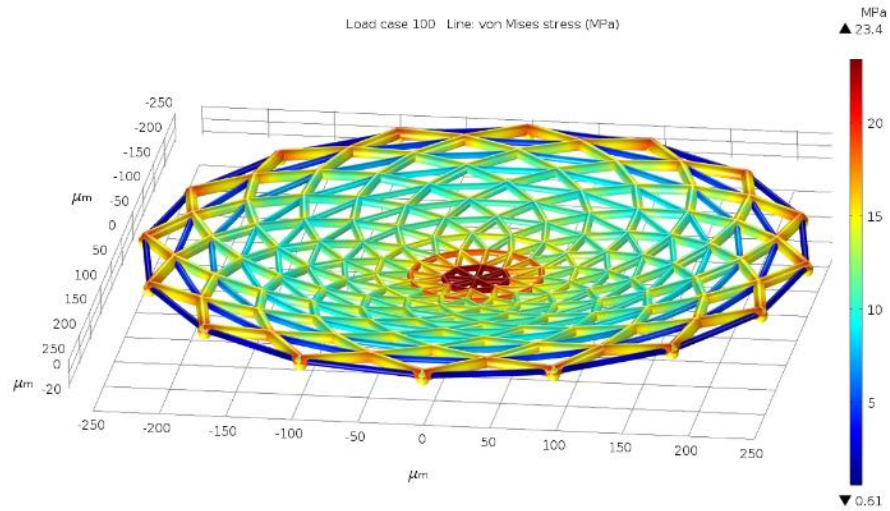


Рисунок 3.22 – Напряжения в десятирусной круглой раме

Кроме того, было проведено исследование модели рамы на возможность выборочного удаления элементов несущей конструкции с минимальной потерей в прочности. Результаты моделирования различных рам приведены на рисунках 3.23-3.26.

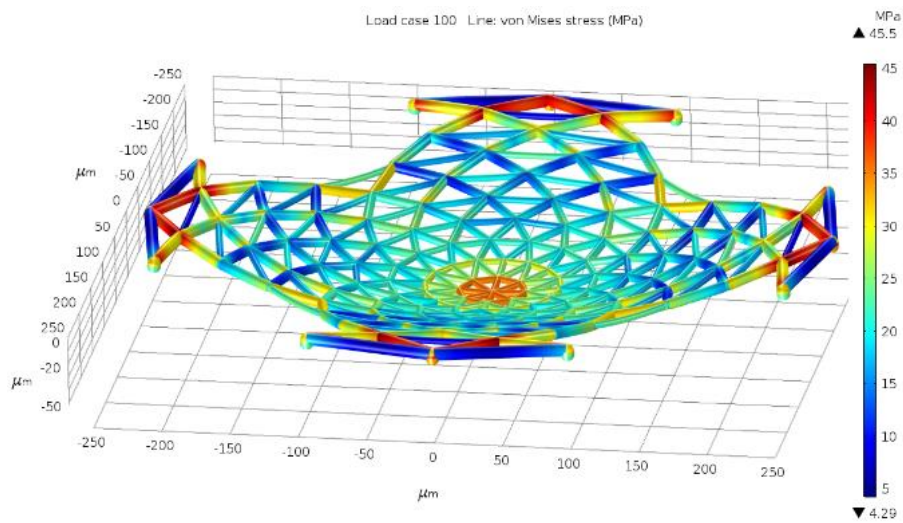


Рисунок 3.23 – Напряжения в круглой раме конфигурации №1

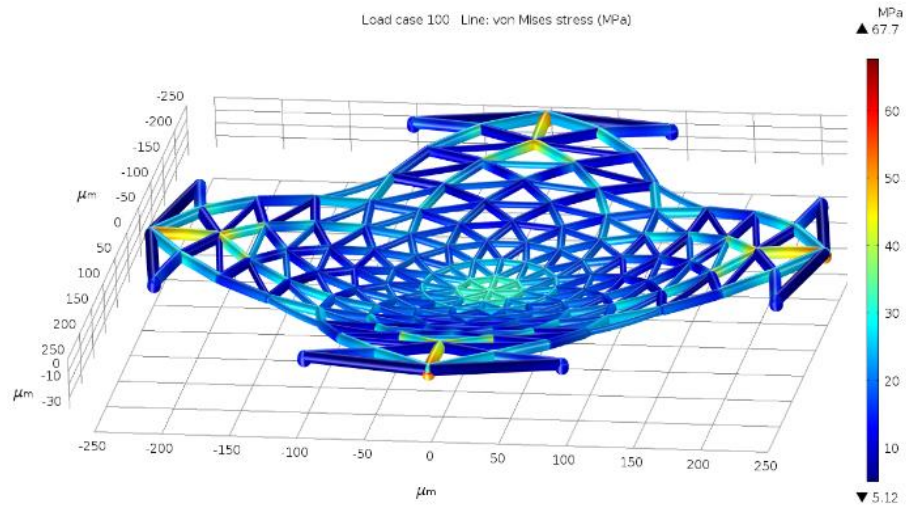


Рисунок 3.24 – Напряжения в круглой раме конфигурации №2

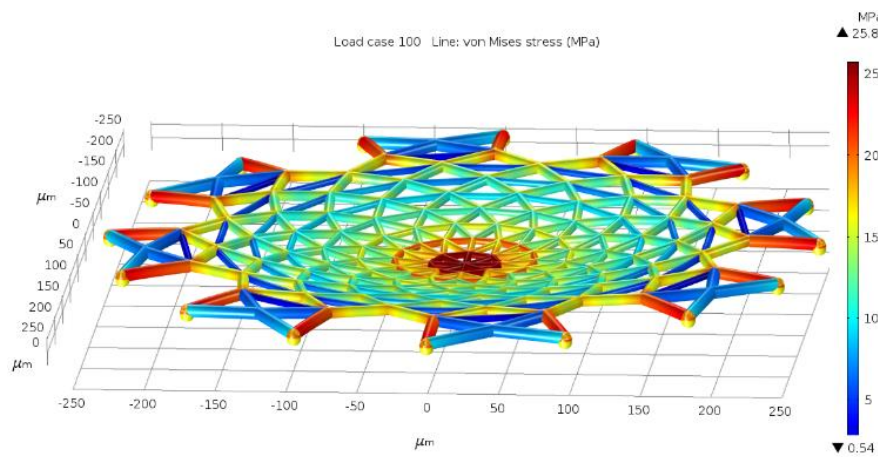


Рисунок 3.25 – Напряжения в круглой раме конфигурации №3

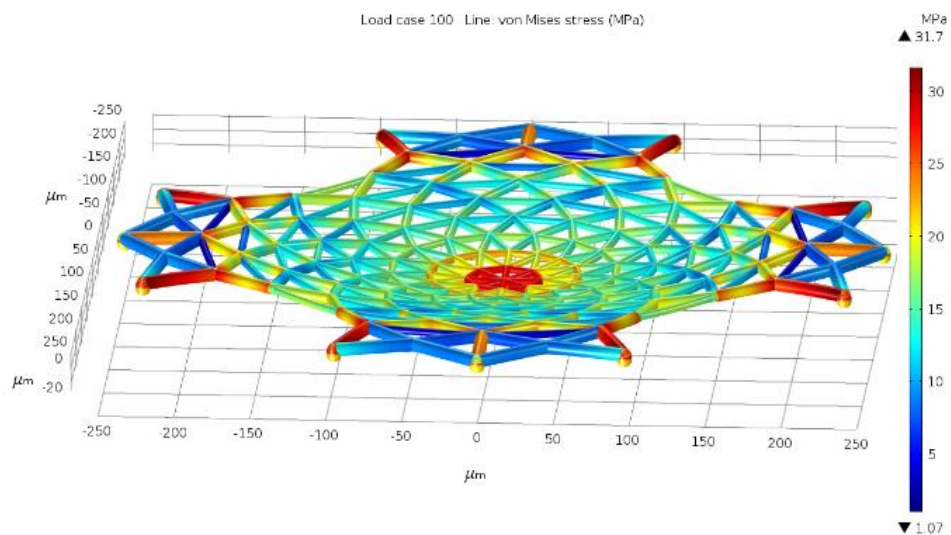


Рисунок 3.26 – Напряжения в круглой раме конфигурации №4

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что наибольшей механической устойчивостью обладает каркасная рама круглой

формы с переменным сечением балок. Применение рамы с переменным сечением позволяет снизить механические напряжения и деформацию в 2,8 и 2,2 раза соответственно. Исследование модели на возможность выборочного удаления элементов несущей конструкции с минимальной потерей в прочности показало, что оптимальной с данной точки зрения является конфигурация пространственной рамы номер 3.

### **3.6.2 Исследование гидродинамики корпуса МЭМ ключа**

Кроме механической поддержки, каркасный слой должен обладать структурой, позволяющей беспрепятственно проникать растворителю (N-метилпирролидон) и удалять жертвенные слои на основе фоторезиста. В тоже время структура данного слоя должна быть непроницаемой для герметизирующего материала бизбензоциклобутена (BCB). Структура в виде сетки при соответствующем подборе размера ячейки, вязкости растворителя и герметизирующего слоя может удовлетворить данным требованиям [74].

Для выбора оптимального размера ячейки на первом этапе методом математического моделирования был проведен подбор размеров ячейки сетки, при котором существует возможность проникновения растворителя через ячейки каркаса, а возможность проникновения герметизирующего слоя BCB исключается. На рисунке 3.27-А представлен результат моделирования распределения фракций BCB и воздуха через 0,1 секунды после нанесения слоя BCB на каркасный слой, а на рисунке 3.27-Б распределения фракций BCB и воздуха спустя 10 секунд.

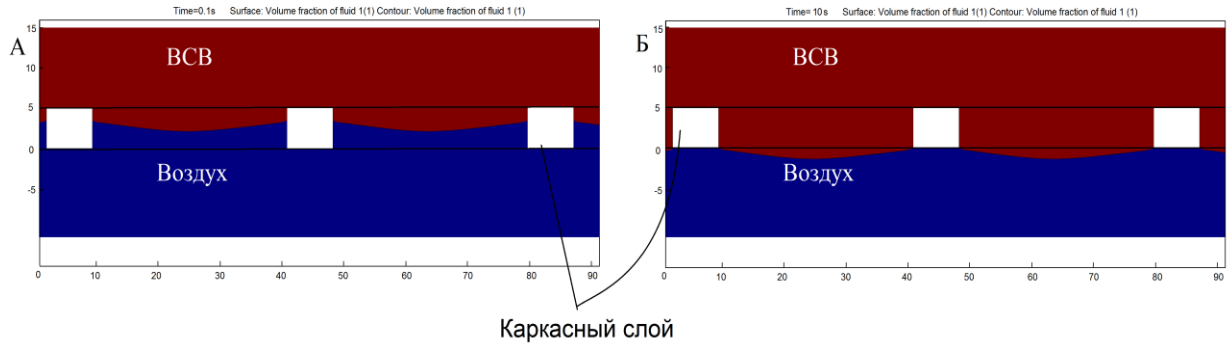


Рисунок 3.27 – Распределение фракций ВСВ и воздуха на каркасном слое

Хорошо видно, что для ячейки размером 30 мкм ВСВ проникает внутрь полости ячейки, но не проходит глубже.

Результаты математического моделирования двухфазной системы N-метилпирролидона и воздуха приведены на рисунке 3.28. Видно, что N-метилпирролидон беспрепятственно проникает сквозь ячейки.

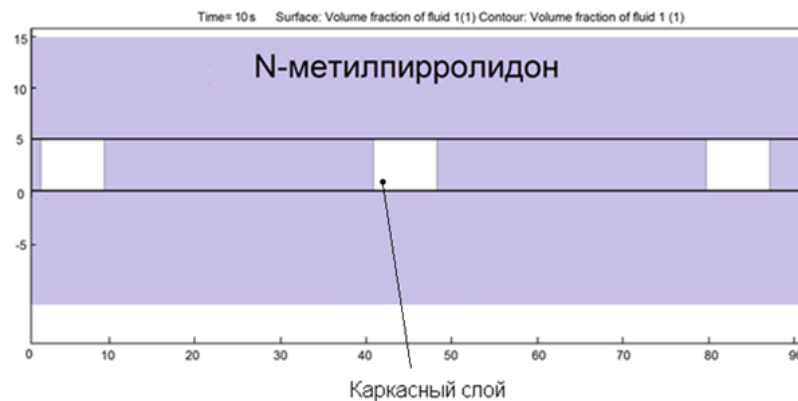


Рисунок 3.28 – Распределение фракций растворителя и воздуха через 10 секунд после нанесения

В результате можно заключить, что согласно проведенному моделированию, 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.

### 3.7 Исследование СВЧ модели МЭМ ключа

#### 3.7.1 Исследование СВЧ характеристик копланарной линии с разрывом

Исследование проводилось в диапазоне частот от DC до 40 ГГц. Ширина сигнальной линии  $W$ , зазор между сигнальной линией и заземляющими электродами  $G$ , при толщине металлизации 2 мкм, рассчитывались на волновое сопротивление 50 Ом с помощью программы TXLINE пакета САПР MW Office, и составили  $W=15$  мкм,  $G=22,5$  мкм. Выбора необходимых СВЧ характеристик копланарной линии основывался на характеристиках СВЧ МЭМ ключей, имеющих на рынке, представленные в таблице 3.1 [75, 76].

Таблица 3.1 – Параметры СВЧ МЭМ ключей, представленные на рынке.

Производитель	$U_{упр}$ , В	S21 (Off)/ S21 (On), dB				Материал контактов
		5 ГГц	10 ГГц	15 ГГц	20 ГГц	
Raytheon	50	-23/ 0,2	-18/ 0,25	-15/ 0,3	-13/ 0,35	Золото
Omron. Co	40	-40/ 0,5	-35/ 1	-30/ 1,5	-	Золото
Radant MEMS	90	-26/ 0,33	-20/ 0,36	-17/ 0,4	-15/ 0,4	Золото
MEMtronics	50	-25/ 0,3	-20/ 0,5	-15/ 0,6	-13/ 0,8	Золото

На рисунке 3.29 представлено схематическое изображение копланарной линии, поясняющее проводимые исследования.

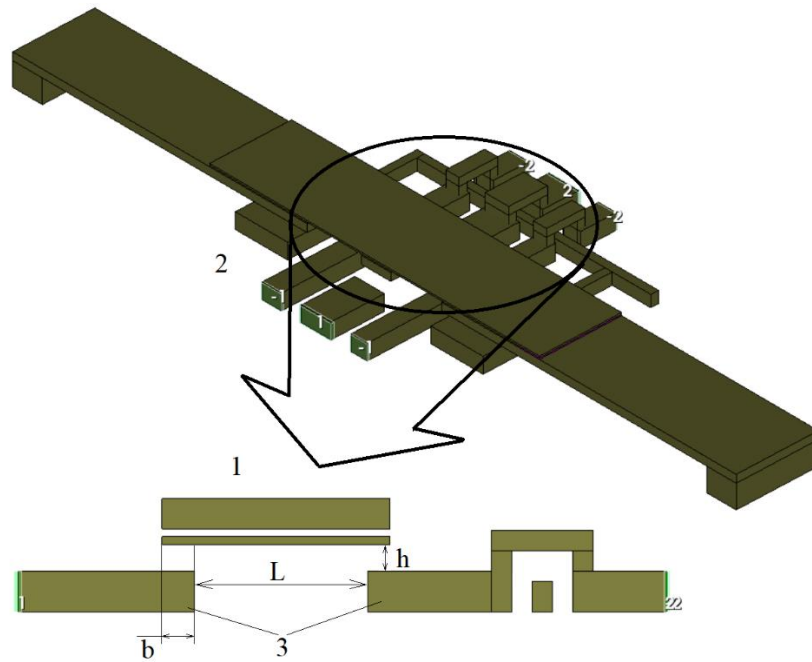


Рисунок 3.29 – Поясняющее схематическое изображение исследуемой копланарной линии:

- 1 – Балка МЭМ ключа; 2 – Заземляющий электрод;  
3 – Электрод сигнальной линии.

На первом этапе исследования копланарной линии определялся оптимальный зазор разрыва  $L$  в сигнальной линии (рисунок 3.1). На рисунке 3.30 приведен график зависимости коэффициента изоляции  $S_{21}$  от разрыва в сигнальной линии  $L$ .

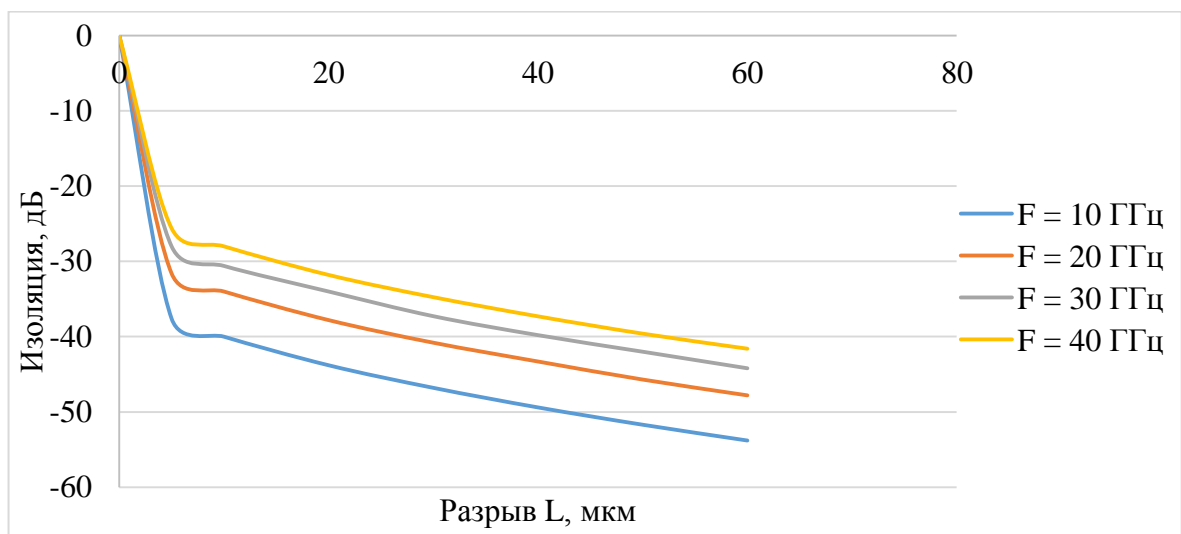


Рисунок 3.30 – График зависимости коэффициента изоляции  $S_{21}$  от разрыва в сигнальной линии  $L$



Из графиков видно, что с увеличением разрыва в сигнальной линии коэффициент изоляции между входом и выходом повышается. На частоте 40 ГГц коэффициент изоляции составил -41,6 дБ.

На втором этапе исследования копланарной линии определялось влияние величины перекрытия  $b$  (рисунок 3.29) замыкающего электрода с сигнальной линией, при разрыве в сигнальной линии равным 60 мкм. На рисунке 3.31 представлен график зависимости коэффициента изоляции  $S_{21}$  от перекрытия между сигнальной линией и замыкающим электродом.

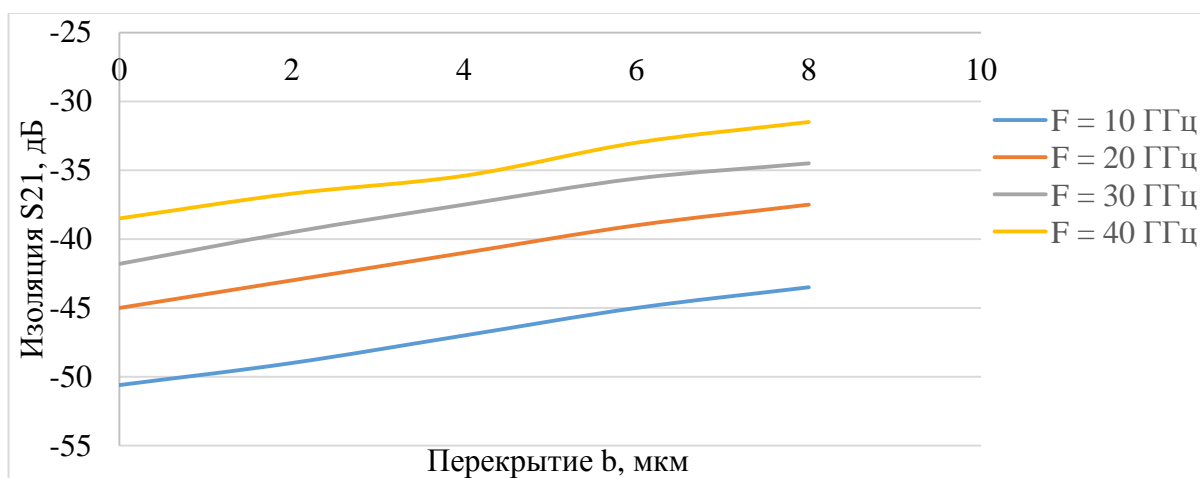


Рисунок 3.31 - График зависимости коэффициента изоляции  $S_{21}$  от перекрытия между сигнальной линией и замыкающим электродом

Результаты исследования показали, что уменьшение величины перекрытия позволяет повысить коэффициент изоляции.

На третьем этапе исследования определялась влияние толщины воздушного зазора  $h$  (рисунок 3.1) между сигнальной линией и замыкающего электрода. Исследование проводилось при перекрытии  $b=10$  мкм, разрыве  $L=60$  мкм. На рисунке 3.32 представлен график зависимости коэффициента изоляции от величины воздушного зазора между сигнальной линией и замыкающим электродом.

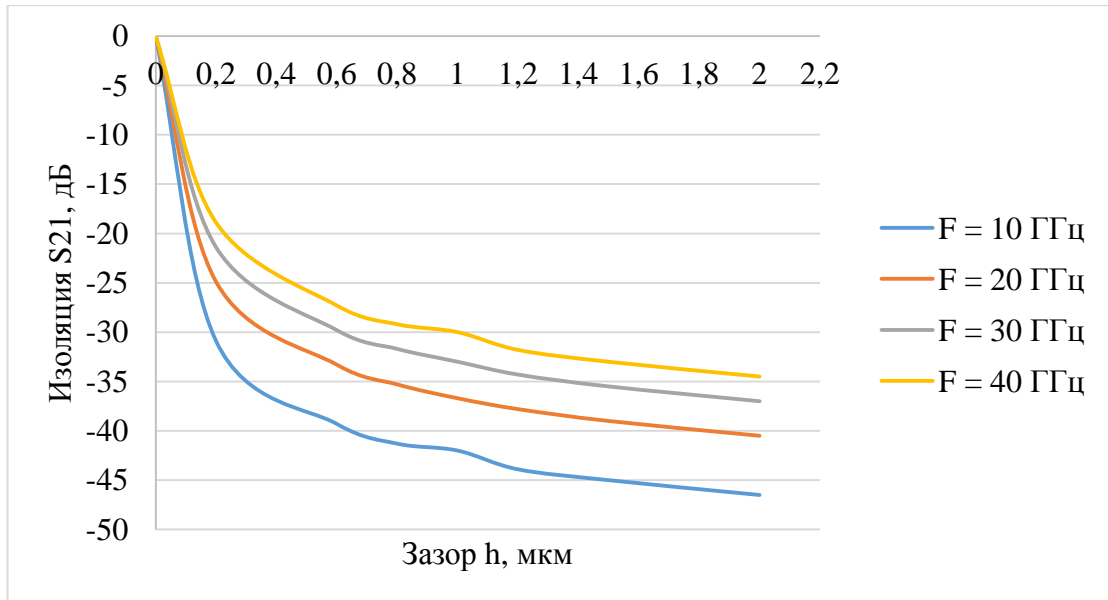


Рисунок 3.32 – График зависимости коэффициента изоляции от величины воздушного зазора между сигнальной линией и замыкающим электродом

На рисунке 3.33 представлен график зависимости коэффициента изоляции от толщины диэлектрического слоя в структуре балки на частоте 40 ГГц.

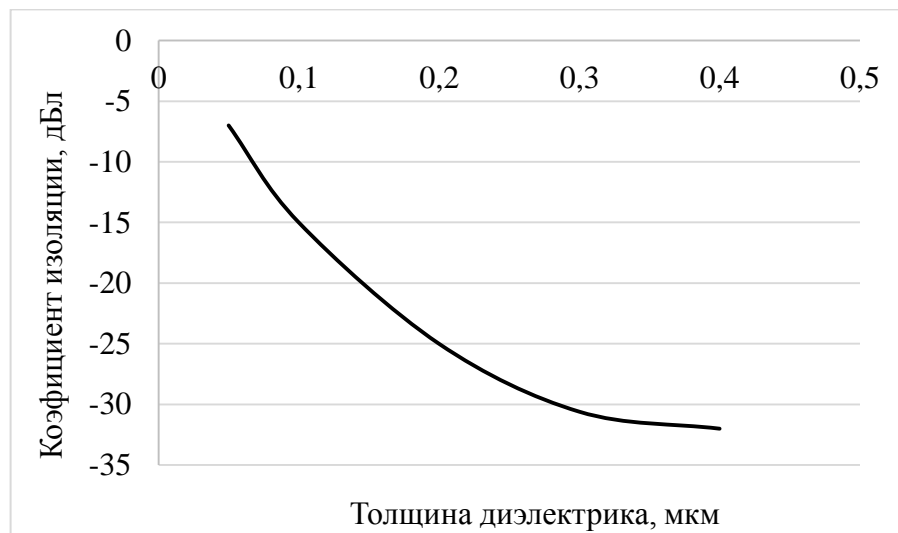


Рисунок 3.33 - График зависимости коэффициента изоляции от толщины диэлектрического слоя в структуре балки.

Для проектирования СВЧ МЭМ ключа на основе копланарной линии с разрывом 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.

### 3.7.2 Исследование СВЧ характеристик МЭМ ключа в виде копланарной линии

В процессе моделирования ключ рассматривался как копланарный волновод, а его конструкция оптимизировалась с целью достижения максимального согласования переключателя по входу и выходу с волновым сопротивлением 50 Ом. Данный подход позволил в дальнейшем отказаться от использования дополнительных согласующих элементов при включении МЭМ ключа в СВЧ цепь.

На рисунке 3.34 представлена спроектированная СВЧ модель МЭМ ключа.

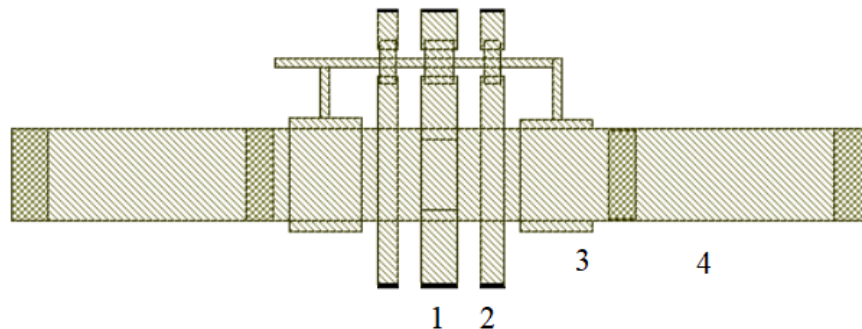


Рисунок 3.34 – 2D модель спроектированного СВЧ МЭМ ключа:

- 1 – Электрод сигнальной линии; 2 – Заземляющий электрод;
- 3 – Управляющий электрод; 4 - Балка МЭМ ключа.

Для анализа работы разработанной конструкции был проведен электромагнитный анализ. На рисунке 3.35 представлены частотные характеристики ключа в закрытом состоянии [77].

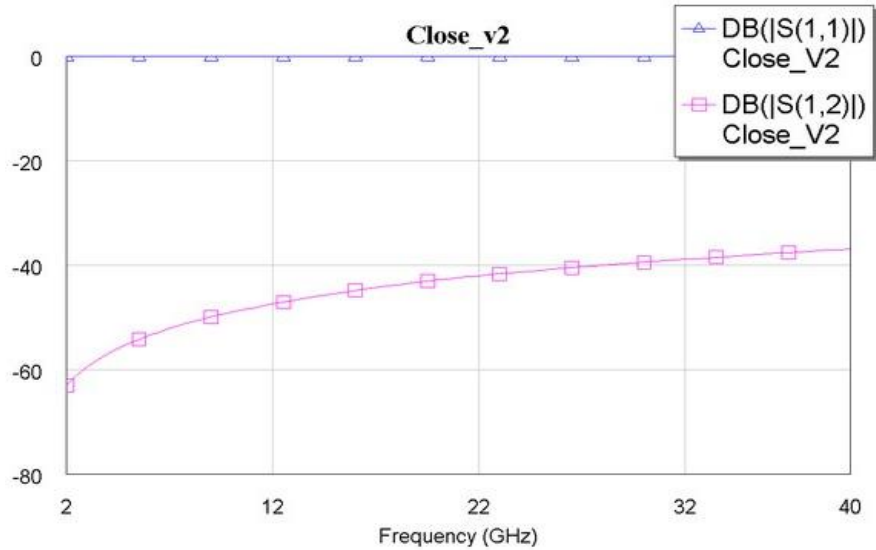


Рисунок 3.35 – S-параметры МЭМ ключа для закрытого состояния

На рисунке 3.36 представлены частотные характеристики ключа в открытом состоянии.

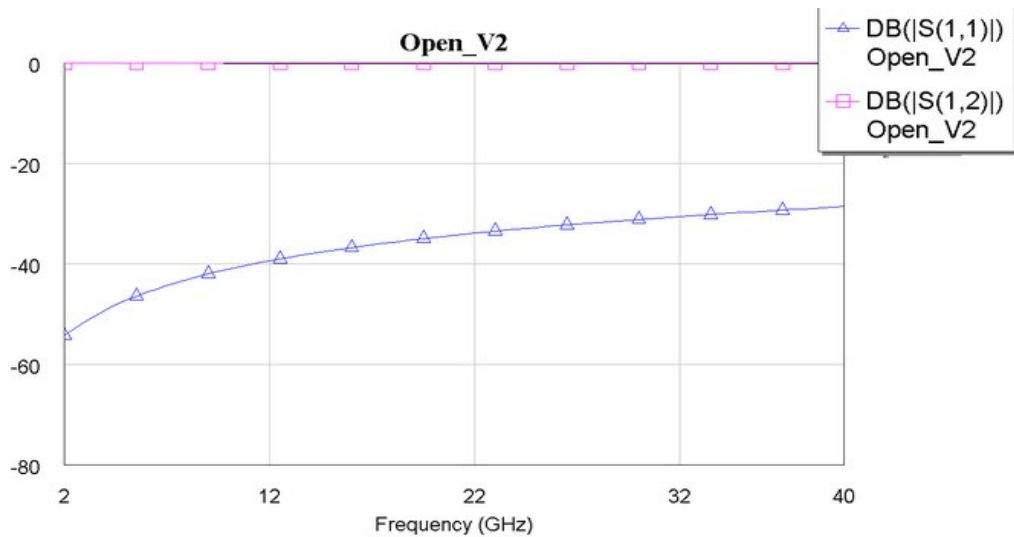


Рисунок 3.36 – S-параметры МЭМ ключа для открытого состояния

Проведенный электромагнитный анализ в диапазоне частот до 40 ГГц показал, что СВЧ МЭМ ключ по разработанной конструкции имеет в закрытом состоянии коэффициент изоляции не хуже -35 дБ, коэффициент вносимых потерь менее -0,5 дБ.

### 3.8 Исследование СВЧ модели МЭМ ключа в корпусе

Частотные зависимости S-параметров МЭМ ключа в корпусе представлены на рисунках 3.37 и 3.38.

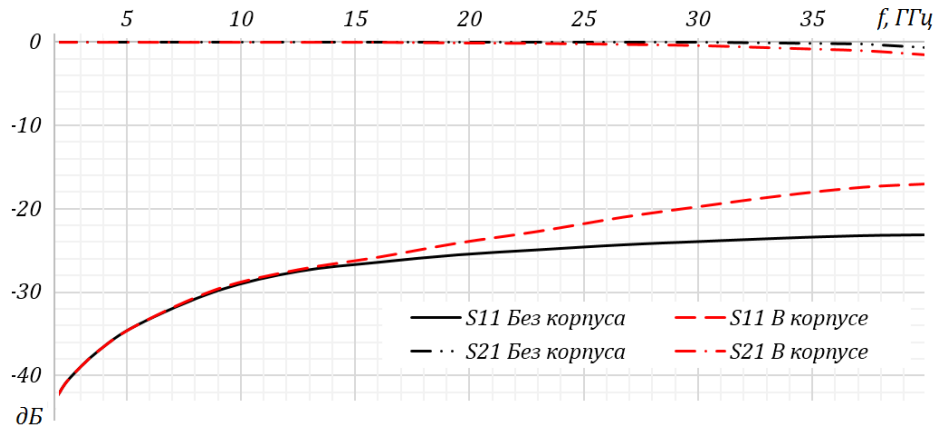


Рисунок 3.37 – Результаты моделирования S – параметров МЭМ ключа в открытом состоянии

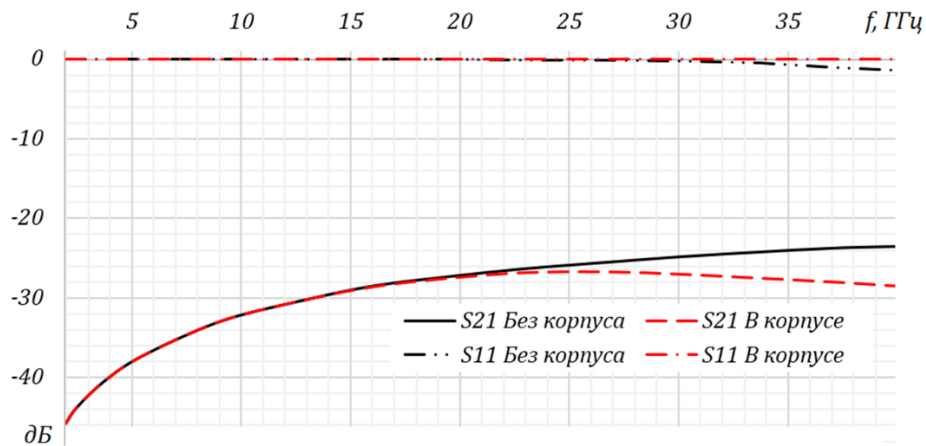


Рисунок 3.38 – Результаты моделирования S – параметров МЭМ ключа в закрытом состоянии

Из полученных характеристик следует вывод, что в открытом состоянии характеристики МЭМ ключа ухудшаются на 6,1 дБ, а в закрытом – улучшаются на 4,9 дБ, что объясняется отражением волны от металлической пространственной рамы.

### 3.10 Разработка модели секции аттенюатора на основе СВЧ МЭМ ключа

Разработка модели секции аттенюатора основывалась на проведении линейного моделирования и электромагнитного анализа [78]. Линейное моделирование осуществлялось на основе модели разработанного СВЧ МЭМ ключа, полученной по измеренным СВЧ характеристикам. Секция аттенюатора рассчитывалась на ослабление сигнала на 8 дБ, рабочий диапазон частот до 25 ГГц. На рисунке 3.39 представлена рассчитанная эквивалентная схема аттенюатора [79].

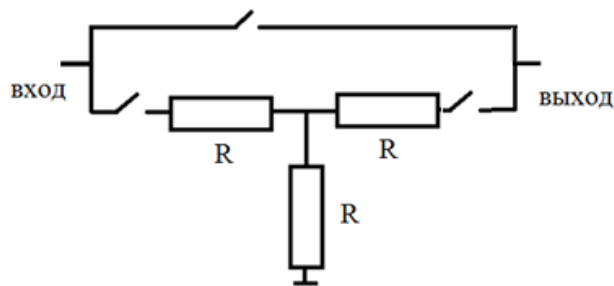


Рисунок 3.39 – Эквивалентная схема секции аттенюатора

По эквивалентной схеме была спроектирована геометрическая 2D+ модель, представленная на рисунке 3.40.

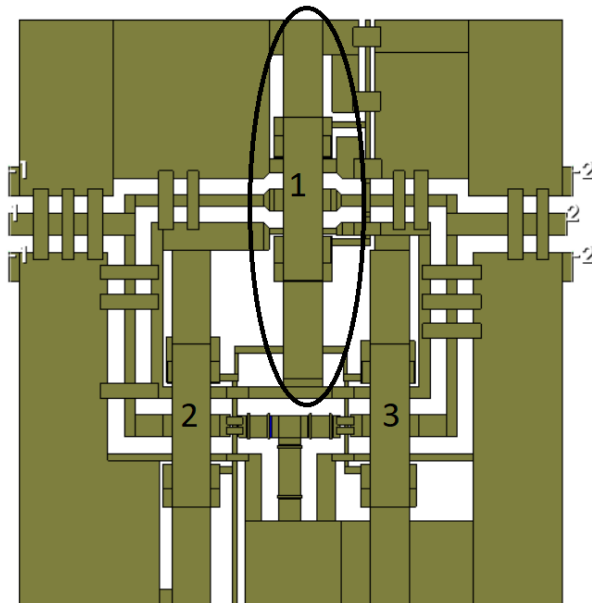


Рисунок 3.40 - Изображение геометрической модели разработанной секции аттенюатора на 1 бит 8 дБ.

На рисунке 3.41-3.43 представлены расчетные S-параметры аттенюатора.

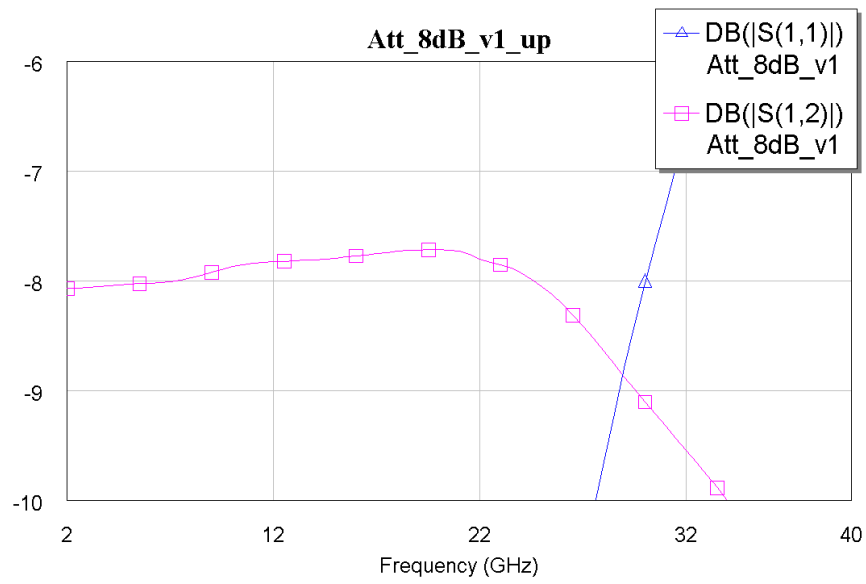


Рисунок 3.41 - Расчетные S-параметры аттенюатора в режиме ослабления

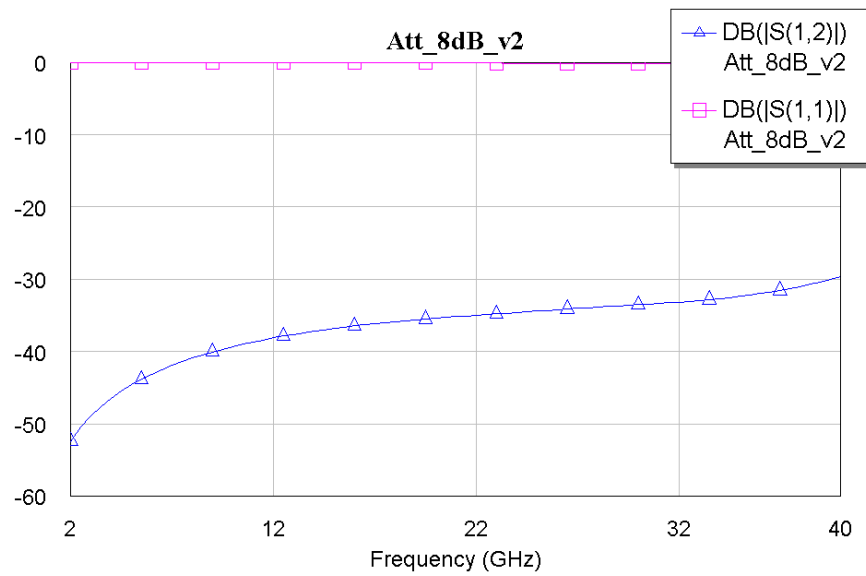


Рисунок 3.42 - Расчетные S-параметры аттенюатора в режиме холостого хода

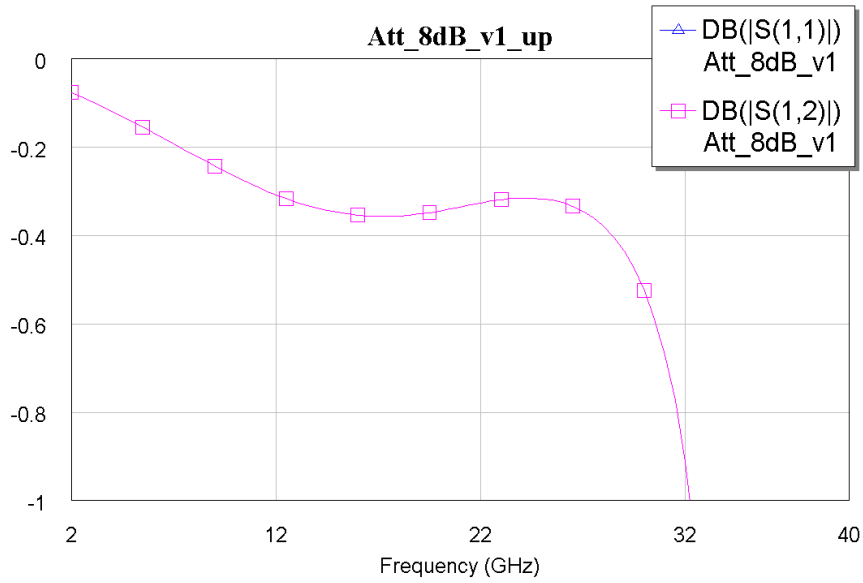


Рисунок 3.43 - Расчетные S-параметры аттенюатора в режиме на проход

Проведенный электромагнитный анализ показал, что спроектированный аттенюатор на основе СВЧ МЭМ ключей в диапазоне частот до 25 ГГц имеет коэффициент ослабления 8дБ.



## ГЛАВА 4. Технологические блоки и процессы формирования СВЧ МЭМ ключа и GaAs СВЧ МИС на его основе

### 4.1 Разработка технологического блока изготовления балки СВЧ МЭМ ключа на основе медной металлизации

#### 4.1.1 Формирование балки МЭМ ключа на основе медной металлизации по традиционной технологии изготовления воздушных мостов

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. Формирование металлизации балки методом гальванического осаждения, осуществлялось через окно в фоторезистивной маске S1818. Фоторезисты m-AP1225 и S1818 разделялись затравочным слоем Ti/Cu толщиной 20/80 нм, полученным методом электронно-лучевого испарения. Затравочный слой применяется для последующего гальванического осаждения меди (рисунок 4.1) [80].

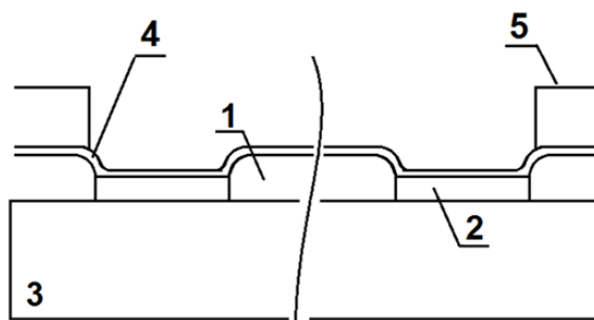


Рисунок 4.1 – Схематическое изображение технологического процесса для формирования балки МЭМ ключа методом гальванического осаждения:  
 1 – Фоторезист m-AP1225; 2 - опора балки МЭМ ключа; 3 – подложка GaAs;  
 4 - Затравочный слой Ti/Cu; 5 - Фоторезист S1818;

На рисунке 4.2 представлена фотография части изготовленной балки на краю электрода сигнальной линии и управляющего электрода.

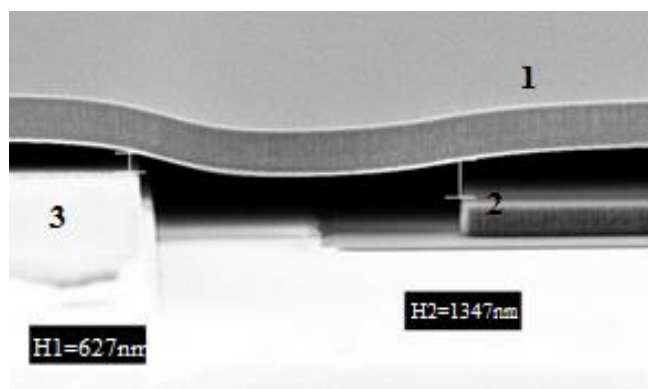


Рисунок 4.2 – Микрофотография части балки переключателя:

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.

#### **4.1.2 Формирование балки МЭМ ключа на основе медной металлизации по технологии 3D литографии**

Использование метода центрифугирования, при нанесении фоторезиста, как показано в разделе 4.1.1, не позволяет получать равномерный воздушный зазор между балкой и сигнальной линией с управляющими электродами. На рисунке 4.3 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 (рисунок 4.3 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 (рисунок 4.3, область 6) была удалена.

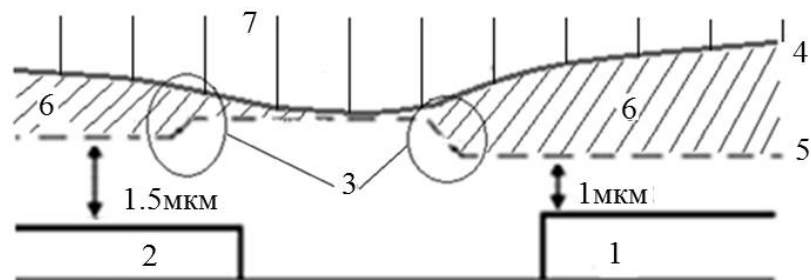


Рисунок 4.3 Схематическое изображение поперечного сечения структуры с

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) (рисунок 4.3 - 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, представленная на рисунок 4.4 [81].

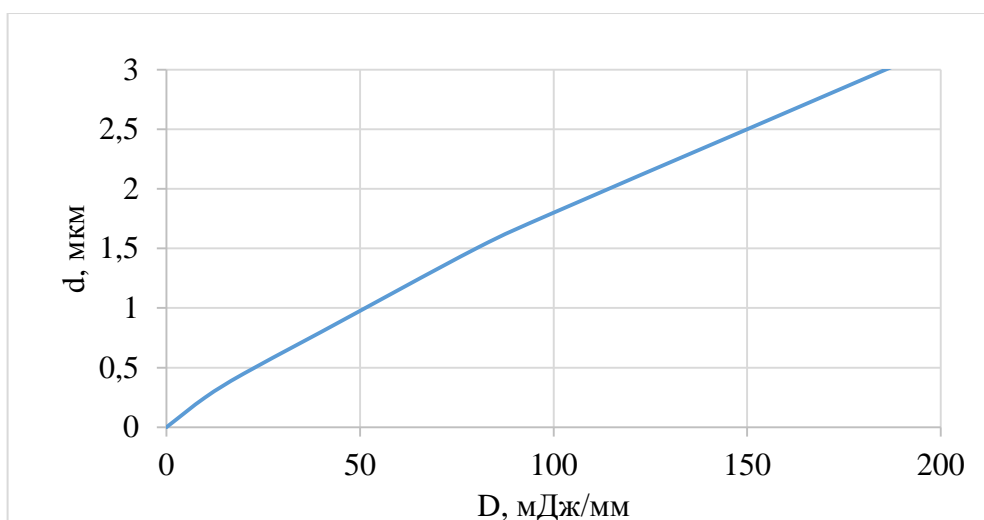


Рисунок 4.4 – Зависимость толщины удаляемого слоя фоторезиста от подпороговой дозы экспонирования

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%. Полученные соотношения являются оптимальными для получения требуемого профиля в жертвенном слое ФР при необходимой геометрии сигнальной линии и управляющего электрода.

Для исключения образования разрывов в металлизации балки в области перепада высоты (рисунок 4.3 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.

Установка лазерной литографии Heidelberg DWL 2000 в автоматическом режиме фокусирует лазерный луч на поверхности фоторезистивного слоя и позволяет в каждом пикселе топологического чертежа задавать смещение положение фокуса (дефокус) оптической системы вдоль вертикальной оси [82]. При положительном дефокусе

фокусировка лазерного излучения происходила в объеме фоторезиста, а при отрицательном дефокусе над поверхностью фоторезиста.

Для определения влияния дефокуса на наклон стенок в жертвенном слое фоторезиста, были проведены эксперименты. На рисунок 4.5 представлены результаты этих экспериментов.

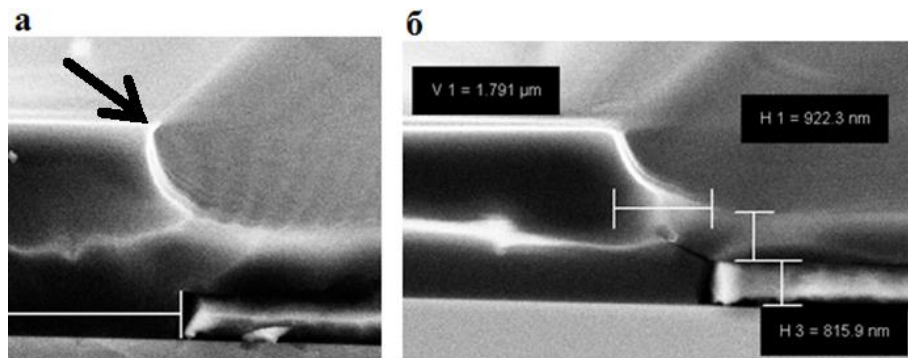


Рисунок 4.5 – Микрофотография, иллюстрирующая влияние дефокуса на наклон стенок в жертвенном слое фоторезиста:

- 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 рисунке 4.5а. При отрицательном дефокусе верхний край стенки фоторезиста сглажен (рисунок 4.5 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 [83] жертвенного слоя фоторезиста. На рисунок 4.6 представлена микрофотография профиля в жертвенном слое, полученного по разработанному алгоритму.

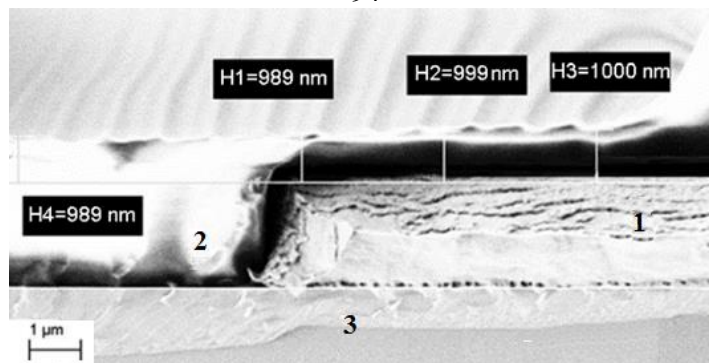


Рисунок 4.6 Микрофотография профиля в жертвенном слое фоторезиста m-AP 1240, полученного методом 3D литографии в оптимальных режимах:

- 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.

#### **4.2 Разработка технологического блока изготовления балки СВЧ МЭМ ключа на основе МДМ структуры**

В нормальнозакрытом 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 рисунке 4.7.

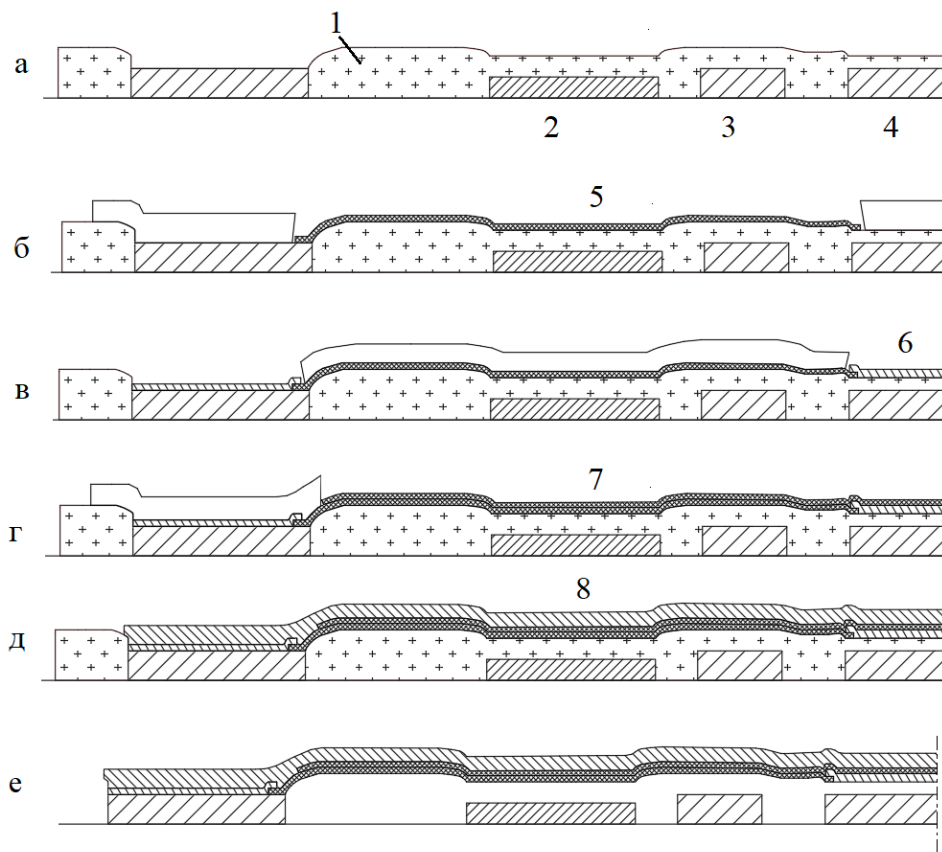


Рисунок 4.7 – Технологической маршрут изготовления балки МЭМ ключа в виде МДМ структуры:

- 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 (Рисунок 4.7 а).

Ключевым моментом при формировании балки, является формирование резистивных слоев, напыление металлических и диэлектрических пленок каждого слоя и удаление масок при этом сохранив жертвенный слой под балкой. Формирование пленок диэлектрического слоя  $\text{SiO}_2$  (Рисунок 4.7 б, г) и металлизации замыкающего электрода (Рисунок 4.7 в) толщинами до 300 нм, была использована литография на «взрыв» с однослойной фоторезистивной маской. Для формирования однослойной фоторезистивной

маски использовалась пленка ФР AZ 1525 толщиной 3 мкм. Перед этапом напыления тонких пленок, фоторезист экспонировался в ультрафиолетовой лампе. После этапа напыления, для исключения влияния растворителей на жертвенные слои, фоторезист удалялся в растворе ТМАН:Н<sub>2</sub>О в соотношении 1:10.

Последним этапом блока формирования балки является осаждение основной металлизации балки (Рисунок 4.7 д) и удаление жертвенного слоя фоторезиста в растворителе N-метилперролидон (Рисунок 4.7 е).

### **4.3 Разработка технологического блока корпусирования СВЧ МЭМ ключа**

Данный этап включал 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 верху маски балки МЭМ ключа и металлизации балки МЭМ ключа.

В жертвенном слое фоторезиста ma-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. Осаждение слоя Cu проводилось из электролита CuSO<sub>4</sub>: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH (100:70:10 г/л). При плотности тока осаждения 0,1 мА/мм<sup>2</sup>, скорость осаждения пленки Cu составляла около 0,2 мкм/мин, полученная пленка имела удельное сопротивление 0,021 мкОм·м [84]. На рисунке 4.8 представлено схематическое изображение технологического блока формирования металлизации корпуса СВЧ МЭМ ключа.



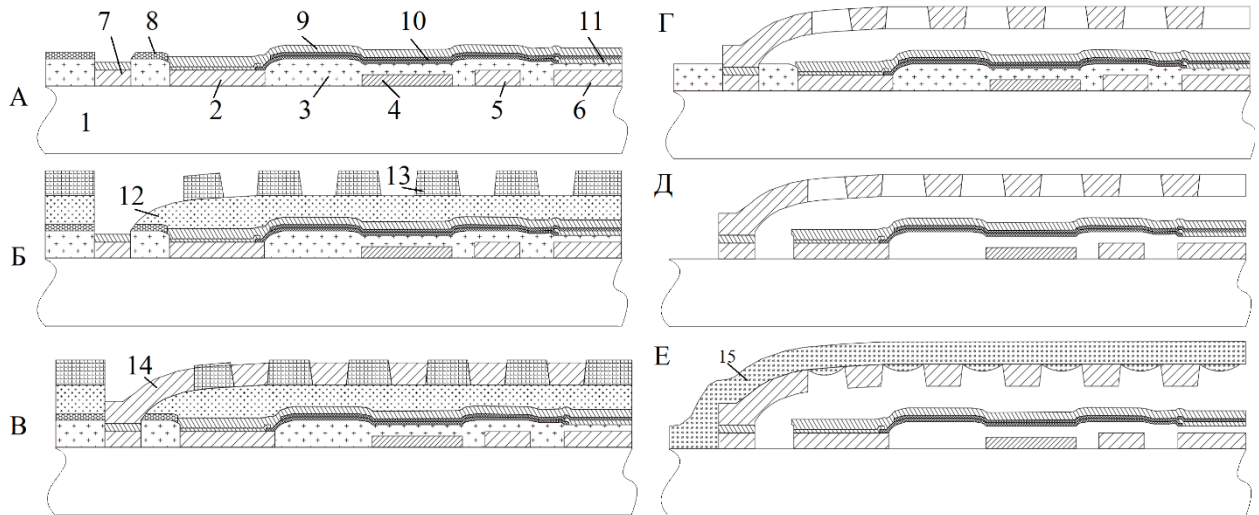


Рисунок 4.8 – Схематическое изображение технологического блока формирования корпуса СВЧ МЭМ ключа:

- 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  $\text{SiO}_2$ ; 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. Удаление разделительных и затравочных слоёв на основе медной металлизации осуществлялось с помощью жидкостного травления в растворе  $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$  (1:10) и концентрацией  $\text{FeCl}_3$  10 г/л [85]. Для травления тонкой пленки  $\text{Ti}$  был использован раствор (травитель) на основе воды и фторида аммония ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) в концентрации 15 г/л и  $\text{HCl}$  в концентрации 100 г/л. Используемые травители показывают высокую селективность при травлении.

Удаление фоторезистивных масок осуществлялось в растворителе N-метилперролидон с последующей промывкой в изопропиловом спирте.

После удаления всех затравочных и жертвенных слоев, полученная структура была герметизирована слоем бензоциклобутена Cyclotene 4024. На рисунке 4.9 представлена микрофотография герметизированного СВЧ МЭМ ключа.

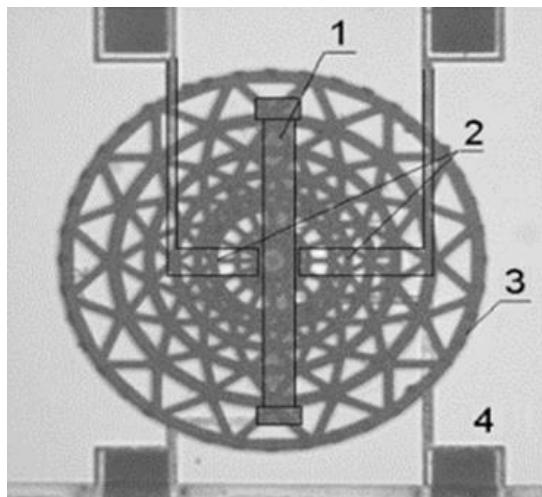


Рисунок 4.9 – Микрофотография СВЧ МЭМ ключа с сформированным корпусом на основе каркасной системы:

- 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.

#### 4.4 Формирования секции СВЧ аттенюатора на основе МЭМ ключей

Процесс формирования секции СВЧ аттенюатора на основе МЭМ ключа 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 рисунке 4.10 представлена микрофотография изготовленного аттенюатора на основе СВЧ МЭМ ключей с металлизацией на основе меди.

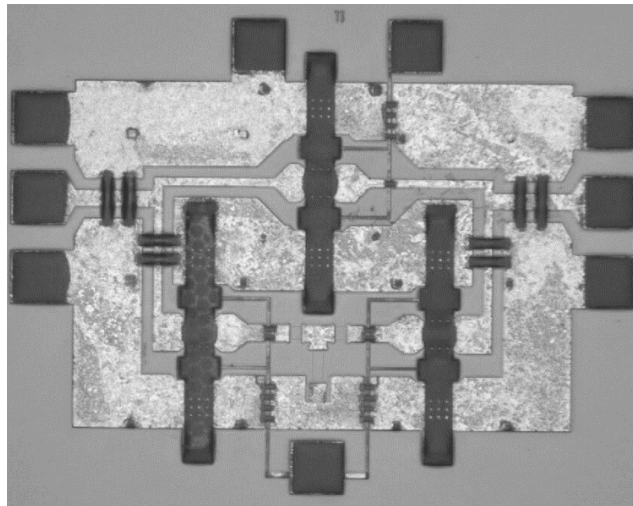


Рисунок 4.10 - Микрофотография изготовленного аттенюатора на основе СВЧ МЭМ ключей с металлизацией на основе меди

## 4.5 Выводы

- 1) Разработан технологический маршрут и технологические операции формирования балки МЭМ ключа на основе медной металлизации
- 2) Разработан технологический маршрут и технологические операции формирования балки МЭМ ключа на основе МДМ структуры
- 3) разработан технологический маршрут и блок технологических операций формирования тонкопленочного корпуса СВЧ МЭМ ключа.
- 4) Разработан и апробирован технологический маршрут формирования СВЧ аттенюатора на GaAs подложке на основе СВЧ МЭМ ключей.

## ГЛАВА 5 Исследование параметров СВЧ МЭМ ключа и GaAs СВЧ МИС на основе СВЧ МЭМ ключа с медной металлизацией

### 5.1 Исследование электрических характеристик по постоянному току СВЧ МЭМ ключа

На измерениях по постоянному току были сняты временные характеристики процесса включения СВЧ МЭМ ключа. На рисунке 5.1 представлена зависимость коммутирующего тока от времени.

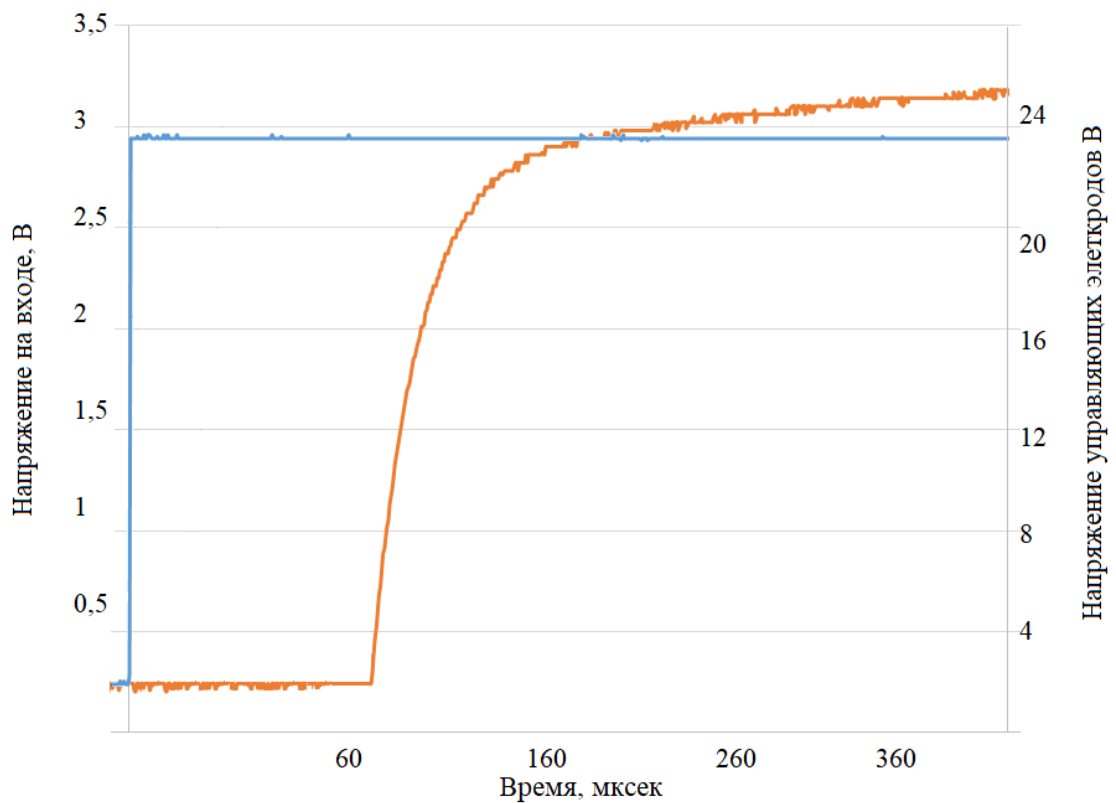


Рисунок 5.1 – Измерение времени включения СВЧ МЭМ ключа

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

На рисунке 5.2 представлена карта проводимых измерений контактного сопротивления МЭМ ключей в открытом состоянии по пластине.

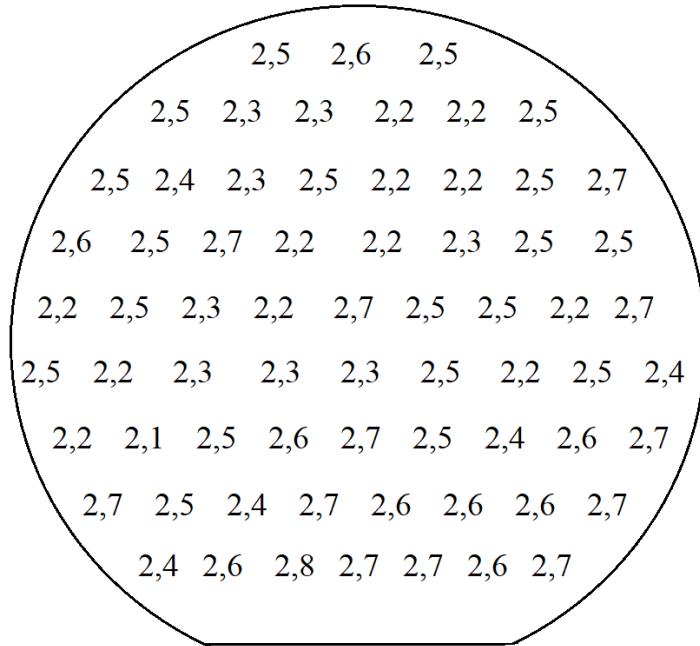


Рисунок 5.2 – Карта измерений контактного сопротивления СВЧ МЭМ ключа

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 % [86].

## 5.2 Исследование электрических характеристик по СВЧ сигналу СВЧ МЭМ ключа

Параметры изготовленных макетов МЭМС переключателей по СВЧ сигналу измерялись на векторном анализаторе цепей R&S ZVA-40. На рисунке 5.3-5.4 представлены результаты измерений  $S_{11}$  и  $S_{21}$  переключателя в открытом и закрытом состояниях.

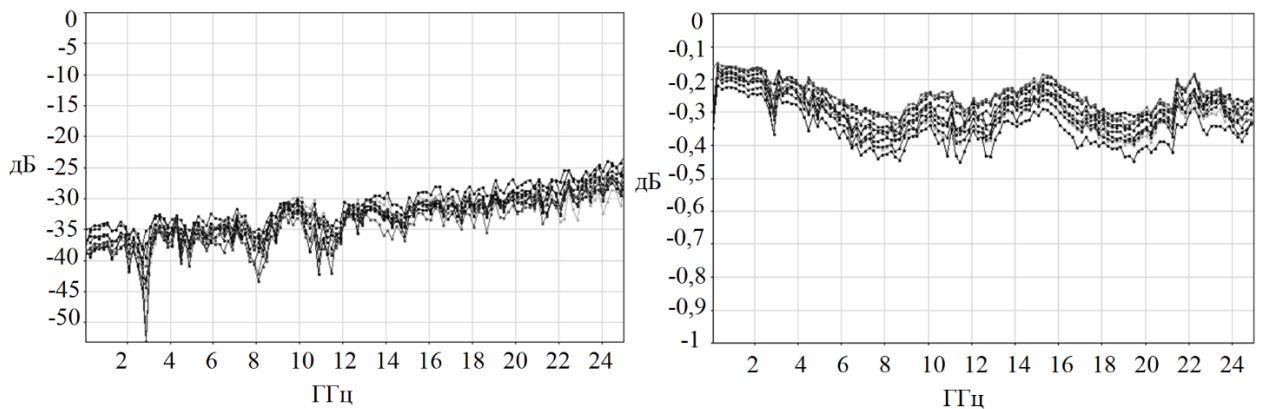


Рисунок 5.3– Измеренные коэффициенты  $S_{11}$  и  $S_{21}$  МЭМ СВЧ переключателей с металлизацией на основе меди в открытом состоянии

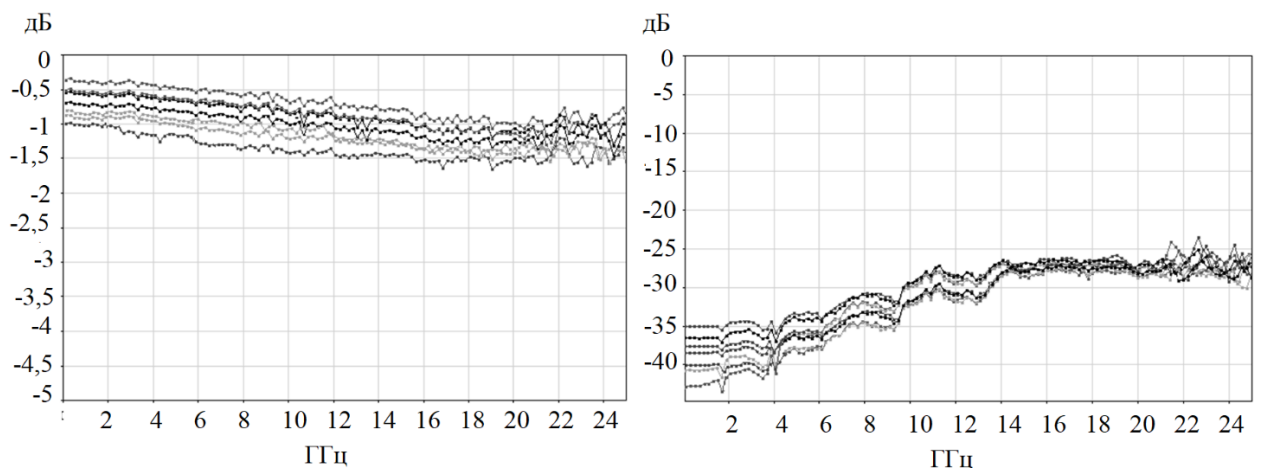


Рисунок 5.4 - Измеренные коэффициенты  $S_{11}$  и  $S_{21}$  МЭМ СВЧ переключателей с металлизацией на основе меди в закрытом состоянии

Для оценки полученных данных был проведен сравнительный анализ. В таблице 5.1 приставлены СВЧ характеристики разработанного СВЧ МЭМ

ключа, характеристики промышленных и лабораторных аналогов, и полупроводниковых ключей [87, 88,89].

Таблица 5.1 – Сравнительный анализ характеристик СВЧ МЭМ ключей

Производитель	U <sub>упр</sub> , В	S <sub>21</sub> (Off)/ S <sub>21</sub> (On), dB				Материал контактов
		5 ГГц	10ГГц	15ГГц	20ГГц	
Разработанный макет	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

### 5.5 Выводы к главе

1) Сравнительный анализ СВЧ МЭМ ключа на основе медной металлизации показал, что разработанный МЭМ ключ имеет характеристики не хуже зарубежных аналогов на основе золотой металлизации.

2) Среднее значение контактного сопротивления на полупроводниковой пластине составило 2,46 Ом.

3) Время включения СВЧ МЭМ ключа составило 80 мксек.

4) Управляющее напряжение составило 25 В.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

Автор выражает благодарность коллективу Научно-образовательного центра "Нанотехнологии" ТУСУР, 500м Технолоджис, Научно-производственному комплексу «Микроэлектроника» АО «НПФ«Микран» за предоставленное технологическое оборудование, за помощь в проведении измерений, за содействие и своевременную помощь в выполнении работы.

## Литература

1. Tsuneo Tokumitsu, M. Hirano, Keiichiro Yamasaki. Highly integrated 3-D MMIC technology being applied to novel masterslice GaAs- and Si-MMIC's. Conference: Gallium Arsenide Integrated Circuit (GaAs IC) Symposium. – 1996. – Technical Digest 1996., 18th Annual
2. Petrushkov M.O., Putyato M.A., Gutakovsky A.K. Impact of LT-GaAs layers on crystalline properties of the epitaxial GaAs films grown by MBE on Si substrates // Journal of Physics: Conference Series. – 2019.
3. Liliental-Weber Z. New Al-Ni-Ge contacts on GaAs; their structure and electrical properties / Z. Liliental-Weber, J. Washburn, // MRS Proceeding. – 1988. – Vol. 126. – P. 295–302.
4. Zuleeg R. Al-Ge ohmic contacts to n-type GaAs / R. Zuleeg, P. E. Friebertshauser, J. M. Stephens, S. H. Watanabe // IEEE El. Dev. Lett. – 1986. – Vol. 7. – no. 6. – P. 603–604.
5. M. Kim, J.B. Hacker, R.E. Mihailovich, J.F. DeNatale, «A monolithic MEMS switched dual-path power amplifier». IEEE Microwave & Wireless Comp. Lett. – 2001. – Vol. 11. – no. 7. – P. 285–286.
6. Майская В. МЭМС-технология завоевывает новые рубежи. – Электроника: НТБ. – 2013. – №1. – С.186–188.
7. Xin Guo, Zhuhao Gong, Qi Zhong, Zewen Liu Zewen Liu / A miniaturized reconfigurable broadband attenuator based on RF MEMS switches // Journal of Micromechanics and Microengineering 26(7). – 2016.
8. Мальцев П.П., Майтама М.В., Павлов А.Ю., Щаврук Н.В. Технологический маршрут изготовления МЭМС переключателя совместно с полупроводниковыми приборами на основе GaAs // В книге: МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ тезисы докладов 5-ой Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. – 2014. – С. 39–40.
9. Белов, Л. Переключатели сверхвысокочастотных сигналов // - Электроника: Наука, Технология, Бизнес. №1 М.: Техносфера. – 2006. – С. 20–25.

10. Колпаков, Ф.Ф. Микроэлектромеханические устройства в радиотехнике и системах телекоммуникаций: учебное пособие / Ф.Ф. Колпаков, Н.Г. Борзяк, В.И. Кортунов. – Харьков: ХАИ. – 2006. – С. 83.
11. Щаврук, Н.В Сравнение микроэлектромеханических переключателей для коммутации СВЧ сигнала / Н.В. Щаврук // «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC — 2013). – М.: МИРЭА. – 2013. – С. 191-197.
12. Варадан, В ВЧ МЭМС и их применение / В. Варадан, К. Виной, К. Джозе; пер. с англ. Ю.А. Заболотной. – М.: Техносфера. – 2004. – 528 с.
13. Шоффа, В.Н. Высокочастотные микроэлектромеханические переключатели / В. Н. Шоффа, Е. А. Коваленко // Электрические контакты и электроды. Сер.: Композиционные, слоистые и градиентные материалы и покрытия. – Киев: Ин-т проблем материаловед. им. И. Н. Францевича НАН Украины. – 2014. С. 220-228.
14. RF MEMS: Theory, Design, and Technology. Gabriel M. Rebeiz Copyright 2003 John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0-471-20169-3.
15. C. Goldsmith, J. Ehmke, A. Malczewski, B. Pillans, S. Eshelman, Z. Yao, J. Brank, and M. Eberly, "Lifetime Characterization Of Capacitive RF MEMS Switches," 2001 IEEE International Microwave Symposium. – 2001. vol. 1, P. 227-230.
16. Сысоева, С. Высокочастотные МЭМС-ключи. Технологии и применения / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2011. - № 11. – С. 29-36.
17. Витенберг М.И. Расчет электромагнитных реле для аппаратуры автоматики и связи. Энергия. 1966. С.724
18. Электронный справочник. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.atof.ru/pea/relay/rl\\_065.shtml](http://www.atof.ru/pea/relay/rl_065.shtml) (дата обращения: 05.02.2017).
19. Белоусов А.К., Савченко В.С. Электрические разъемные контакты в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Энергия, 1975. -315 с.
20. Ермолин Н.А., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. - Л.: Энергия, 1976. - 248 с
21. Уваров, И.В. Резонансные свойства трехслойных металлических кантилеверов наноразмерной толщины диссертация 05.27.01 Твердотельная

электроника, радиоэлектронные компоненты, микро-и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах Ярославль – 2013 автореферат

22. W. Ehrfeld, F. Gotz, D. Munchmeyer, W. Schelband, D. Schmidt, LIGA process: sensor construction techniques via X-ray lithography, Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, USA, 6-9 June 1988

23. Игловский И.Г., Владимиров Г.В. Справочник по слаботочным электрическим реле. Л.: Энергоатомиздат, 1990

24. Журнал РАДИОЛОЦМАН, 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=147959> (дата обращения: 05.05.2018).

25. P. Rai-Chokhury Handbook. Microlithography, Micromaching, and Microfabrication // v.2., SPIE, (1997), pp.302-303.

26. Ehrfeld W., Hessel V., Lowe H., Schulz Ch., Weber L. Material of LIGA technology // Microsystem Technologies.– 1999.– №5.– pp.105-112.

27. Junwen Liu Qing-An Huang, Jintang Shang, Jintang Tang Micromachining of Pyrex7740 glass and their applications to wafer-level hermetic packaging of MEMS devices // Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2010 IEEE

28. Franz Laermer, Kai Kolari Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies (Second Edition), 2015, P. 444-469

29. Najafi, K. Micropackaging Technologies for Integrated Microsystems : Applications to MEMS and MOEMS / K. Najafi // SPIE Micromachining and Microfabrication Symposium, 2003. – №4. – С. 1-19.

30. Kim, S.A. Fabrication and Characterization of a Low-Temperature Hermetic MEMS Package Bonded by a Closed Loop AuSn Solder-Line / S.A. Kim, Y.H. Sen, Y.H. Cho, G.H. Kim // IEEE MEMS Conference Proceedings, 2003. – pp. 614-617.

31. Harpster, T.J. Field-assisted bonding of glass to Si-Au eutectic solder for packaging applications // IEEE MEMS Conference Proceedings, 2003. – С. 630-633.

32. Viorel Dragoi, “From magic to technology: materials integration by wafer bonding,” Proc. of SPIE, Vol. 6123, 2006, pp. 1-15.

33. Gilleo, K. MEMS/MOEMS Packaging: Concepts, Designs, Materials and Processes / K. Gilleo. – New York, NY: McGraw-Hill, 2005. – 416 с.

34. S. Takyu, T. Kurosawa, N. Shimizu, and S. Harada, "Novel Wafer Dicing and Chip Thinning Technologies Realizing High Chip Strength," *Materials Research Society Symposium Proceedings*, vol. 970, pp. 0970, 2007.
35. Gooch, R. Wafer-level vacuum packaging for MEMS / R. Gooch, T. Schimert// *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1999. – №4. – P. 2295-2299.
36. Chen, M.X. Reliability of anodically bonded silicon-glass packages / M.X. Chen, X.J. Yi, Z.Y. Gan, S. Liu // *Sensors and Actuators*, 2005. – №4. – P. 291-295.
37. Bhusari, D. Fabrication of air-channel structures for microfluidic, microelectromechanical, and microelectronic applications / D. Bhusari, H.A. Reed, M. Wedlake, A.M. Padovani, // *J. Microelectromech. Syst.* – 2001. – C.400-408.
38. Schlesinger, M. *Modern Electroplating* / – John Wiley & Sons, 2010. – 737c.
39. Sobia Bushra Investigation of Wafer Level Au-Si Eutectic Bonding of Shape Memory Alloy (SMA) with Silicon. – 2011
40. Yang, H.A. Localized induction heating solder bonding for wafer level MEMS packaging / H.A. Yang, M. Wu, W. Fang // *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005. – № 6, C. 394-399.
41. Rendina, I. Porous silicon-based optical biosensors and biochips / I. Rendina, I. Rea, L. Rotiroti, L.D. Stefano // *Physica E*, 2007. – №9. – C. 188-192.
42. Mescheder, U.M. Local laser bonding for low temperature budget / U.M. Mescheder, M. Alavi// *Sensors and Actuators A*, 2002. – C. 422-427.
43. Zhang, Q. Thin-film encapsulation technology for above-IC MEMS wafer-level packaging / Q. Zhang, P.V. Cicek, F. Nabki, M. El-Gamal // *Electronic Components & Technology Conference*. 2014. – C. 23-33.
44. Nabki, F. Low-stress CMOS-compatible silicon carbide surface-micromachining technology –Part I: Process development and characterization / F. Nabki, T.A. Dusatko, S. Vengallatore, M. N. El-Gamal // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2011. – №3. – C. 720-729.
45. Rajaraman, V. Robust wafer-level thin-film encapsulation of microstructures using low stress PECVD silicon carbide / V. Rajaraman // *IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems*. – 2009. – C. 140-143.

46. Zhang, Q. Thin-film encapsulation technology for above-IC MEMS wafer-level packaging / Q. Zhang, P.V. Cicek, F. Nabki, M. El-Gamal // Electronic Components & Technology Conference. 2014. – C. 23-33.
47. Guo, B. Poly-SiGe-based MEMS thin-film encapsulation / B. Guo // J. Microelectromech. Syst. – 2012. – C. 110-120.
48. Zhang, Q. Thin-film encapsulation technology for above-IC MEMS wafer-level packaging / Q. Zhang, P.V. Cicek, F. Nabki, M. El-Gamal // Electronic Components & Technology Conference. 2014. – C. 23-33.
49. Verheijden, G.J.A.M. Wafer-level encapsulation technology for MEMS devices using an HF permeable PECVD SIOC capping layer / G.J.A.M. Verheijden, G.E.J. Koops, K.L. Phan // 21st IEEE Int. Conf. on Micro Electro. – 2008. – C. 798-801.
50. Lee, B.K. Use of nanoporous columnar thin film in the wafer-level packaging of MEMS devices / B.K. Lee, D.H. Choi // J. Micromech. Microeng. – 2010. – C. 20-29.
51. He, R.H. On-wafer monolithic encapsulation by surface micromachining with porous polysilicon shell // J. Microelectromech. Syst. – 2007. – C. 462-472.
52. Joseph, P.J. Wafer-level packaging of micromechanical resonators / P.J. Joseph, P. Monajemi, F. Ayazi P.A. Kohl // IEEE Trans. Adv. Packag. – 2007. – C. 19-26.
53. Shackelford, J.F. CRC materials science and engineering handbook, Third edition / J.F. Shackelford, W. Alexander. – CRC Press. – 2000. – 1980 с.
54. Guo, B. Poly-SiGe-based MEMS thin-film encapsulation / B. Guo // J. Microelectromech. Syst. – 2012. – C. 110-120.
55. Rajaraman, V. Robust wafer-level thin-film encapsulation of microstructures using low stress PECVD silicon carbide / V. Rajaraman // IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems. – 2009. – C. 140-143.
56. Oberhammer J. Novel RF MEMS switch and packaging concepts: Doctoral thesis: Engineering and Technology. – Stockholm, 2004. – 154 p.
57. Металлические конструкции: Общий курс: Учеб. для вузов / Г.С. Ведеников, Е.И. Беленя, В.С. Игнатьева и др.; Под ред. Г.С. Веденикова. - 7-е изд., перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 1998. - 760 с.

58. Электронный справочник Режим доступа: [https://ru.qwertyu.wiki/wiki/Von\\_Mises\\_yield\\_criterion](https://ru.qwertyu.wiki/wiki/Von_Mises_yield_criterion) (дата обращения: 20.02.2017)
59. Электронный справочник. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sniprf.ru/razdel-2/2-01-07-85> (дата обращения: 10.02.2017)
60. Электронный справочник. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://help.solidworks.com/2013/Russian/SolidWorks/cworks/r\\_Maximum\\_von\\_Mises\\_Stress\\_Criterion.htm](https://help.solidworks.com/2013/Russian/SolidWorks/cworks/r_Maximum_von_Mises_Stress_Criterion.htm) (дата обращения: 20.09.2018).
61. Сайт компании-разработчика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/mems-module> (дата обращения: 02.04.2018)
62. Красников, Г.Е Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics: уч. пособие для студентов вузов / Г.Е. Красников, О.В. Нагорнов, Н.В. Старостин – М.: МИФИ, 2012. – 184с.
63. Данилина, Т.И. Технология тонкопленочных микросхем: Учебное пособие. — Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2006. 164
64. Сайт компании-разработчика. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.awr.com/ru/products/microwave-office> (дата обращения: 02.10.2017)
65. 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
66. Электронный справочник. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.lesker.com/newweb/deposition\\_materials/materialdepositionchart.cfm?pgid=0](https://www.lesker.com/newweb/deposition_materials/materialdepositionchart.cfm?pgid=0) (дата обращения: 20.12.2017)
67. Валуева Н.А. Повышение износостойкости коммутирующих контактных устройств. Трение и износ, 1981, т.П, № I, с. 166-169.
68. Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов / Под ред. Ю. К. Розанова. –2-е изд., испр. и доп. – М.: Информэлектро, 2001. – 420 с.: ил.
69. Мухтеев Р.Н. Разработка технологии упаковки элементов GaAs МИС в тонкопленочный пространственный корпус, Диссертация на соискание степени магистра, Томск. 2018.

70. 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.

71. Сайт производителя. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.radantmems.com](http://www.radantmems.com). (дата обращения: 23.06.2017)

72. Сайт производителя. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://eu.mouser.com/pdfdocs/Omron\\_RFMEMSSwitch\\_Whitepaper\\_finalsm-3.pdf](http://eu.mouser.com/pdfdocs/Omron_RFMEMSSwitch_Whitepaper_finalsm-3.pdf) (дата обращения: 20.02.2018)

73. Сигута Т.В. Разработка и исследование СВЧ МЭМС ключа с металлизацией на основе меди. Диссертация на соискание степени магистра, Томск. 2017

74. 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.

75. 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.

76. 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.

77. 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.

78. 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.



79. Сайт производителя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://heidelberg-instruments.com/en/products/dwl-2000-4000.html> (дата обращения: 15.03.2017)
80. 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.
81. Ерофеев Е. В. Разработка GaAs СВЧ-транзисторов с металлизацией на основе пленок Al и Cu / Е. В. Ерофеев, А. И Казимиров // Доклады ТУСУРа. – 2012. – Т. 26. – вып. 2. – ч. 1. – С. 47–52.
82. Moffat, T.P. Superconformal Electrodeposition of Copper / T.P. Moffat, D. Wheeler, W.H. Huber, // *Electrochem Solid-State Lett.* 2001. – №4. – pp. 26–29.
83. Ишуткин С. В. Конструктивно-технологические особенности изготовления СВЧ GaAs монолитной интегральной схемы малошумящего усилителя с 205 медной металлизацией лицевой стороны / С. В. Ишуткин, В. А. Кагадей, Е. В. Ерофеев // *Микроэлектроника.* – 2015. – Т. 44. – вып. 6. – С. 428–436.
84. Кулинич И.В., Кагадей В.А., МЭМС СВЧ переключатель с металлизацией на основе меди/ VI общероссийской научно-технической конференции, Омск 2016. С. 245-249.
85. Сайт производителя. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mmic.niipp.ru/catalog/subcat/8> (дата обращения: 10.06.2017).
86. Лагош А.В. Карбидокремниевые микроэлектромеханические ключи. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина). Санкт-Петербург, 2017
87. Щаврук Н.В. Узкополосный СВЧ переключатель на подложке GaAs для частотного диапазона 10-12 ГГц на основе микроэлектромеханических систем // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения «INTERMATIC – 2013»*, 2–6 декабря 2013 г., Москва. / Под ред. академика РАН А.С. Сигова. – М.: Энергоатомиздат, 2013, часть 1, с. 198-203.
88. Гуртов, В.А. Микро электромеханические системы / В.А. Гуртов, М.А. Беляев, А.Г. Бакшеева – Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2016. – 171 с.

89. Кулинич, И.В. МЭМС СВЧ переключатель с медной металлизацией / И.В. Кулинич, В.А. Кагадей // Материалы VI общероссийской науч.-техн. конференции «СВЧ-2016» – Омск, 2016. – С. 245-249