

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
Российской академии наук

На правах рукописи

Щаврук Николай Васильевич

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ НА
ПОДЛОЖКАХ GaAs ДЛЯ СВЧ ДИАПАЗОНА**

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро-
и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
профессор, д.т.н. Мальцев П.П.

Москва – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Варианты конструктивных решений по созданию СВЧ коммутаторов сигналов на основе арсенида галлия по технологии МЭМС.....	11
1.1. Варианты конструктивных решений СВЧ коммутаторов сигналов.....	11
1.1.1 СВЧ коммутаторы.....	11
1.2 Типы твердотельных МЭМС коммутаторов.....	13
1.2.1 Влияние типа контакта на характеристики переключателя.	13
1.2.2 Характерные причины отказа МЭМС переключателей.....	17
1.3 Электростатические МЭМС переключатели.....	18
1.4 Термомеханические МЭМС переключатели.....	21
1.5 Пьезоэлектрические МЭМС переключатели.....	24
1.6 Электромагнитные МЭМС переключатели.....	25
Выводы из первой главы.....	27
Глава 2. Моделирование и расчет МЭМС переключателя.....	30
2.1 Постановка задачи.....	30
2.2 Электромеханическая модель МЭМС переключателя.....	31
2.2.1 Расчет напряжения срабатывания.....	31
2.2.2 Коэффициент упругости мембраны.....	33
2.2.3 Внутренние напряжения в мембране.....	36
2.3 Создание и моделирование эквивалентной электрической схемы.....	37
2.4 Проектирование конечного варианта узкополосного шунтирующего МЭМС переключателя.....	44
2.5 Расчет напряжения срабатывания узкополосного шунтирующего МЭМС переключателя.....	48
Выводы из второй главы.....	50

Глава 3. Изготовление МЭМС переключателя.....	51
3.1 Основные этапы изготовления МЭМС переключателя на подложке GaAs.....	51
3.2 Изготовление МЭМС переключателя.....	52
3.3 Удаление «жертвенного слоя» при изготовлении МЭМС переключателя.....	56
3.3.1 Удаление «жертвенного слоя» жидкостными методами....	57
3.3.2 Сухое травление.....	59
3.4 Технологические процессы для удаления «жертвенного слоя».....	59
3.4.1 Удаление «жертвенного слоя» в кислородной плазме.....	59
3.4.2 Удаление «жертвенного слоя» сублимационной сушкой..	60
3.5 Этапы изготовления МИС на основе арсенида галлия и МЭМС переключателей.....	62
Выводы из третьей главы.....	64
Глава 4. Исследование и измерение СВЧ параметров и напряжения срабатывания изготовленных макетов МЭМС переключателей.....	65
4.1 Измерение вольт-фарадных характеристик переключателя сигнала.....	65
4.2. Методика экспериментального исследования МЭМС устройств в динамическом режиме.....	66
4.3. Измерения вольт-фарадных и S-параметров переключателей, «жертвенный слой» которых удален при помощи кислородной плазмы.....	69
4.3.1 Вольт-фарадные характеристики СВЧ коммутаторов сигналов.....	69
4.3.2. S-параметры СВЧ МЭМС переключателей.....	74
4.4 Измерения вольт-фарадных и S-параметров	

переключателей, «жертвенный слой» которых удален при помощи сублимационной сушки.....	77
4.4.1 Измерения вольт-фарадных характеристик СВЧ МЭМС переключателей.....	77
4.4.2. S-параметры СВЧ МЭМС переключателей.....	79
4.5 Влияние процесса изготовления мембраны на ее емкостные характеристики.....	80
4.6 Влияние процесса сублимационной сушки на основные характеристики СВЧ транзисторов, изготавливаемых на основе арсенида галлия.....	88
4.7 . Сравнительный анализ полученных результатов.....	91
Оптимизация конструкции ёмкостного СВЧ МЭМС переключателя сигнала на основе GaAs.....	
Выводы из четвертой главы.....	93
Заключение.....	95
Список литературы.....	97
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Изготовление фотошаблонов МЭМС переключателя.....	106
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Последовательность технологических операций при изготовлении макетных образцов (СВЧ коммутаторы сигналов на основе арсенида галлия по технологии МЭМС).....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Последовательность технологических операций при изготовлении ИС МШУ на базе AlGaAs/InGaAs/GaAs.....	121
Приложение Г. Опубликованные работы по теме диссертации в виде интеллектуальной собственности	125
Приложение Д. Акт об использовании результатов работы....	130

ВВЕДЕНИЕ.

Актуальность темы

Необходимость в снижении размеров и веса СВЧ устройств, расширении их динамического диапазона частот, уменьшении потребляемой мощности и стоимости, наращивании их интеграции и функциональных возможностей при росте рабочих частот требует от разработчиков максимального использования опыта и технологических приемов создания интегральных схем (ИС) на подложках Si, GaAs и GaN.

Одной из проблем возникающей при разработке СВЧ устройств является создание переключателей сигналов. В настоящее время наиболее распространены СВЧ переключатели двух типов:

- электромеханические;
- электронные (на дискретных приборах).

Задачей настоящей работы является разработка и создание СВЧ переключателей, объединяющих лучшие характеристики обоих вышеупомянутых типов. Это возможность коммутации высоких мощностей, присущих электромеханическим переключателям, и высокое быстродействие при низком собственном энергопотреблении в сочетании с малыми габаритами, присущее твердотельным переключателям на дискретных электронных приборах. При интеграции активных элементов с пассивным переключателем на одной подложке и (или) в одном корпусе, будет решена проблема снижения потерь на межкомпонентных соединениях.

Для переключения СВЧ сигналов наиболее перспективными являются переключатели на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС), поскольку они удовлетворяют нижеперечисленным требованиям:

- позволяют получать переключатели СВЧ сигналов с нулевым энергопотреблением в состоянии покоя;
- позволяют снизить размеры и вес СВЧ устройств;

- позволяют снизить энергопотребление СВЧ устройств (мощность, необходимая на переключение коммутатора, порядка 1 нВт);
- значительно уменьшают время переключения по сравнению с механическими СВЧ переключателями;

Из всего многообразия типов СВЧ МЭМС переключателей наиболее распространенным является электростатический тип. Это обусловлено тем, что для его создания можно использовать технологию изготовления интегральных схем. Кроме того, МЭМС переключатели электростатического типа обладают меньшими размерами, более высоким быстродействием и потребляемой мощностью, близкой к нулю, по сравнению с термомеханическими, электромагнитными, пьезоэлектрическими МЭМС переключателями.

Основным недостатком СВЧ МЭМС переключателей электростатического типа являются высокие управляющие напряжения (до 80 В), управляющие напряжения остальных типов МЭМС переключателей лежат в диапазоне от 3 до 20 В.

Настоящая работа посвящена разработке и созданию электростатических СВЧ МЭМС переключателей с использованием технологии, применяемой при изготовлении активных компонентов ИС на основе арсенида галлия с возможностью их последующей интеграции.

Целью работы является:

- разработка методики расчета и проектирования для СВЧ МЭМС переключателей сигналов с низкими потерями и высокой изоляцией СВЧ сигнала, изготовление и оптимизация технологии изготовления СВЧ МЭМС переключателей, которая обеспечивает возможность интеграции в технологию изготовления СВЧ МИС на основе арсенида галлия.

Для достижения поставленной цели **решались следующие задачи:**

- исследовались различные типы СВЧ МЭМС переключателей, сравнивались их конструкторские и технологические характеристики с целью выбора оптимальной конструкции;
- проводилось механическое и электрофизическое моделирование переключателей с различными топологиями, по результатам которого предложена топология переключателей для диапазона 10-12 ГГц;
- проводился комплекс экспериментальных исследований для оптимизации технологии изготовления СВЧ МЭМС переключателей;
- изготавливались СВЧ МЭМС переключатели по разработанной технологии и исследовались их характеристики для анализа соответствия заданным требованиям;
- выполнялся анализ основных факторов, влияющих на характеристики СВЧ переключателей, исходя из результатов измерения их характеристик.

Научная новизна работы

1. Разработана методика расчета и проектирования СВЧ МЭМС переключателя применительно к ограничениям, накладываемым технологией изготовления МИС на арсениде галлия.
2. Разработана технология удаления «жертвенного слоя», с использованием циклогексана, впервые примененного для сублимационной сушки мембран МЭМС переключателей.
3. Впервые разработан базовый технологический маршрут для изготовления СВЧ МЭМС переключателей и МИС на основе арсенида галлия в едином цикле изготовления приборов.
4. Разработана оригинальная методика измерения СВЧ параметров МЭМС переключателей.
5. Изготовлены СВЧ МЭМС переключателей на основе арсенида галлия и исследованы их характеристики .

Научная и практическая значимость работы

1. Предложена модель, позволяющая оценить основные параметры электростатических СВЧ МЭМС переключателей. По предложенной модели была выбрана оптимальная конструкция СВЧ МЭМС переключателя для частот 10-12 ГГц с напряжением срабатывания 17,2В.
2. Разработана методика измерения конструкторских параметров металлической мембраны, учитывающая влияние на СВЧ характеристики переключателя.
3. Разработан технологический маршрут изготовления СВЧ МЭМС переключателей, произведен анализ и оптимизация процесса удаления «жертвенного слоя» с целью улучшения параметров металлических мембран.
4. Созданы образцы СВЧ МЭМС переключателей емкостного типа с металлической мембраной на подложках GaAs и исследованы их характеристики: вносимые потери 0,5 дБ; развязка до 50 дБ; рабочий диапазон 13-15 ГГц; напряжение срабатывания составило 19В;
5. Изготовленные в работе СВЧ МЭМС переключатели с высоким отношением потерь к изоляции СВЧ сигнала могут быть использованы для разработки и создания перспективных приемо-передающих модулей класса «система-на-кристалле» (СнК) для широкого применения в современных системах беспроводной передачи данных, спутниковой навигации, связи и радиолокации.

Результаты работы были использованы при выполнении научно-исследовательских работ «Исследования по разработке базовых технологий изделий микроэлектроники: систем на кристалле, в том числе в гетероинтеграции сенсорных и исполнительных элементов (СВЧ коммутаторы сигналов и варакторы)» (государственный контракт от «01» июня 2011 г. № 16.426.11.0032), проводимой в рамках Федеральной целевой программы

«Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008-2015 годы и «Разработка базовой технологии создания МИС усилителей мощности и малошумящих усилителей на нитридных наногетероструктурах для приемо-передающих модулей на частоту 8-12 ГГц» (шифр заявки «2014-14-579-0003-063») №14.607.21.0011

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика расчета и проектирования электростатических СВЧ МЭМС переключателей с рабочим элементом на основе металлической мембраны.
2. Технология удаления «жертвенного слоя», с использованием циклогексана, впервые примененного для сублимационной сушки мембран МЭМС переключателей.
3. Технологический маршрут изготовления СВЧ МЭМС переключателей с режимами выполнения технологических операций, входящих в состав данного маршрута, позволяющий изготавливать компоненты на основе МЭМС технологии в едином технологическом цикле с МИС на основе арсенида галлия.

Достоверность научных положений, результатов и выводов

Достоверность проведенных исследований и представленных в работе экспериментальных результатов обеспечивается компьютерным моделированием при помощи САПР AWR и ADS, а также совпадением теоретических и экспериментальных результатов, имеющих в отечественной и зарубежной литературе, а также апробацией работы на 6 конференциях и семинарах.

Личный вклад соискателя

Соискатель принимал активное участие во всех стадиях работы. Был выполнен анализ литературных источников по теме диссертации, выполнен предварительный электрофизический расчет СВЧ МЭМС переключателей, выполнено механическое моделирование МЭМС переключателей, проведены измерения электрофизических параметров и вольт-фарадных характеристик

МЭМС переключателей. Соискатель также исследовал влияние процесса зачистки в аргоновой плазме на шероховатость фоторезиста, разработал процесс сублимационного удаления жертвенного слоя.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и научных сессиях:

- XV Международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (Ульяновск 2012)
- Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2013» (Москва 2013)
- 4-ой Международной научно-технической конференции «Технологии микро- и наноэлектроники в микро- и наносистемной технике» (Москва 2014)
- 2-ой, 3-ей, 4-ой научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ электроники «Мокеровские чтения» (Москва, 2012, 2013, 2014 г.г.).

Публикации

Основные научные и практические результаты работы опубликованы в 13 печатных работах, включая 4 работы, опубликованные в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, получены 4 свидетельства о государственной регистрации топологии интегральных схем.

Глава 1. ВАРИАНТЫ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПО СОЗДАНИЮ СВЧ КОММУТАТОРОВ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ МЭМС.

В настоящее время технология МЭМС нашла широкое применение при разработке изделий радио- и СВЧ-диапазона. Наиболее важными требованиями, предъявляемыми к современным и перспективным изделиям СВЧ техники, является снижение их веса, объёма, потребляемой мощности и стоимости одновременно с повышением их функциональности, рабочей частоты и уровня интеграции. Реализацию данных требований обеспечивают новые СВЧ компоненты, изготовленные по технологии МЭМС с использованием системного подхода к построению их архитектуры [1, 2].

1.1. Варианты конструктивных решений СВЧ коммутаторов сигналов

1.1.1. СВЧ коммутаторы

В настоящее время широко применяются СВЧ переключатели трех типов: электромеханические, твердотельные (полупроводниковые) и МЭМС переключатели. Электромеханические переключатели превосходят все остальные по коммутируемой мощности – до нескольких киловатт на частоте 1 ГГц [3], имеют потери 0,1–0,3 дБ и изоляцию сигнала 60–80 дБ. Но при этом электромеханические коммутаторы имеют высокую потребляемую мощность – до 10 Вт (для мощных переключателей), время переключения 10–20 мс, и относительно низкий срок службы – порядка 1 млн циклов [3,4]. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики полупроводниковых коммутаторов на основе PIN-диодов, полевых транзисторов и МЭМС переключателей СВЧ сигнала [3] и электромеханических СВЧ переключателей [4].

Параметр	СВЧ МЭМС	PIN-диод	Полевой транзистор
Напряжение (В)	20-80	±3-5	3-5
Ток (мА)	0	3-20	0
Энергопотребление (мВт)	0,05-0,1	3-20	0,05-0,1
Время переключения	1-300 мкс	1-100 нс	1-100 нс
Граничная частота (ТГц)	20-80	1-4	0,5-2
Изоляция (1-10 ГГц)	Оч. высокая	Высокая	Средняя
Изоляция (10-40 ГГц)	Оч. высокая	Средняя	Низкая
Изоляция (40-100 ГГц)	Высокая	Средняя	Нет
Потери (1-100 ГГц, дБ)	0,05-0,2	0,3-1,2	0,4-2,5
Переключаемая мощность (Вт)	> 10	<10	<10

Таблица 1. Характеристики переключателей на основе МЭМС, PIN-диодах, полевых транзисторах

Из таблицы 1 видно, что МЭМС переключатели имеют преимущества перед твердотельными СВЧ переключателями: высокое соотношение потерь к изоляции в разомкнутом и замкнутом состоянии, практически нулевое потребление мощности в замкнутом состоянии. Но при этом имеют и недостатки: низкое быстродействие по сравнению с полупроводниковыми переключателями. Для управления необходимо формировать импульс переключающего напряжения от 6 до 80 В. Следует отметить, что срок службы МЭМС переключателей составляет порядка 10^{10} циклов [5]. Следовательно, можно сказать, что МЭМС переключатели объединили в себе лучшие черты твердотельных и электромеханических переключателей – малые габаритные размеры, высокое быстродействие при низком собственном энергопотреблении, большой срок службы (присуще твердотельным переключателям), при этом появляется возможность коммутации СВЧ сигнала высокой мощности (до 10 Вт) [6] (присуще электромеханическим переключателям). Следует отметить,

что МЭМС переключатели могут требовать вакуумного корпусирования, что, в свою очередь, позволяет увеличить быстродействие и значительно продлить их срок службы.

1.2 Типы твердотельных МЭМС коммутаторов

МЭМС переключатели различаются как по механизму управления мембраной (электростатическим, электромагнитным, пьезоэлектрическим и термическими полями), так и по типу контакта – с омическим или емкостным контактом [7,8].

1.2.1 Влияние типа контакта на характеристики переключателя

Как правило, ключи с омическим контактом используют в широком диапазоне частот от 0 до 50 ГГц как в последовательном, так и в шунтирующем исполнении; сопротивление контакта омического ключа на основе золота, как правило, лежит в диапазоне 0,15-0,4 Ом; контактное усилие на площадке составляет от 80 до 500 мкН [6, 9-12].

Основным критерием при создании переключателей резистивного типа является площадь контакта. Большие области контакта обладают меньшим сопротивлением и, соответственно, меньшей температурой контактного пятна. Истинная площадь контакта определяется, прежде всего, прикладываемой силой и твердостью материала, а также его способностью формировать поверхностный слой с большим сопротивлением. Также необходимо учитывать силу адгезии в контактном пятне – кантилевер или мембрана переключателя должны быть достаточно жесткими, чтобы преодолеть силу адгезии после снятия управляющего напряжения [5]. Как видно из рис. 1 [13,14], при создании переключателей с низким управляющим напряжением, а значит и малой силой упругости подвижного электрода, наиболее подходящим материалом для омического контакта является золото – благодаря низкой твердости, очень

низкому контактному сопротивлению, высокой температуре плавления (среди мягких металлов).

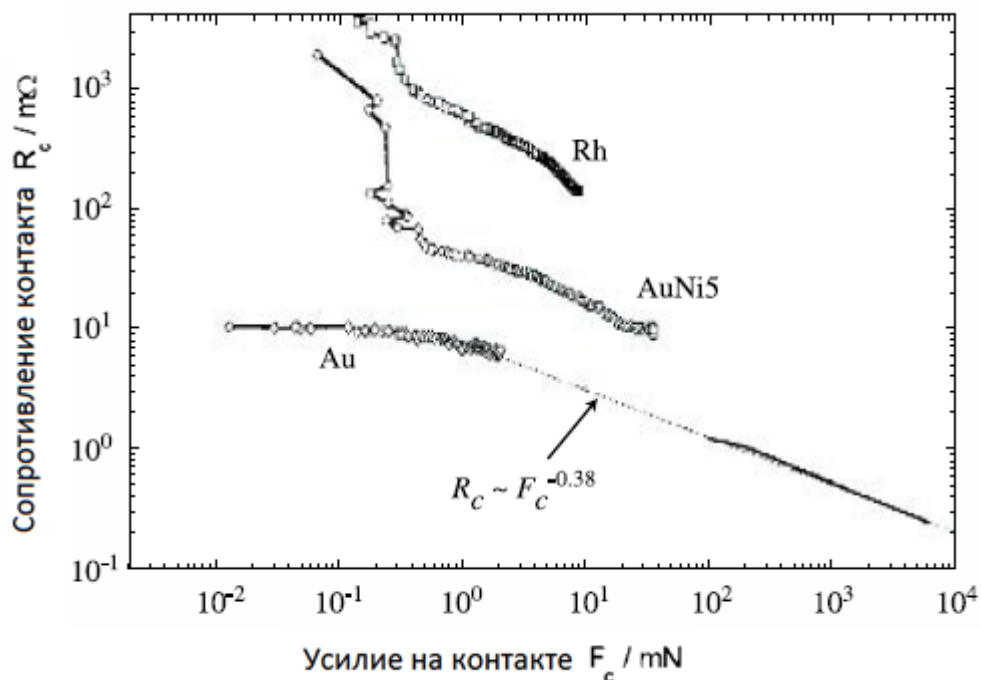


Рис. 1. Зависимость сопротивления контакта от усилия на контакте

На рис. 2 представлены схема СВЧ МЭМС переключателя в последовательном исполнении и геометрическая схема контактной площадки последовательного переключателя [15], на которой видна особенность резистивного переключателя – контактный вывод в виде бугорка. Эта форма контакта необходима для формирования пятна контакта и повышения контактного усилия в пятне, что, как сказано выше, значительно снижает температуру контактной площадки и тем самым повышает срок службы резистивного переключателя. Отсюда вытекает и вторая особенность резистивных переключателей – для работы резистивного переключателя с электростатическим механизмом управления необходимо подавать достаточно высокое напряжение – от 60 до 80 Вольт [6, 9-12].

Ключи с емкостным контактом работают за счет изменения емкости между волноводами или волноводом и заземленным электродом. Как правило, переключатели с емкостным контактом используют в качестве шунтирующих

переключателей [13] с рабочими частотами от 10 до 100 ГГц [16-20]. Как правило, такие МЭМС переключатели имеют потери 0.2 дБ, коэффициент изоляции от 15 до 35 дБ для рабочих частот (в зависимости от конструкции).

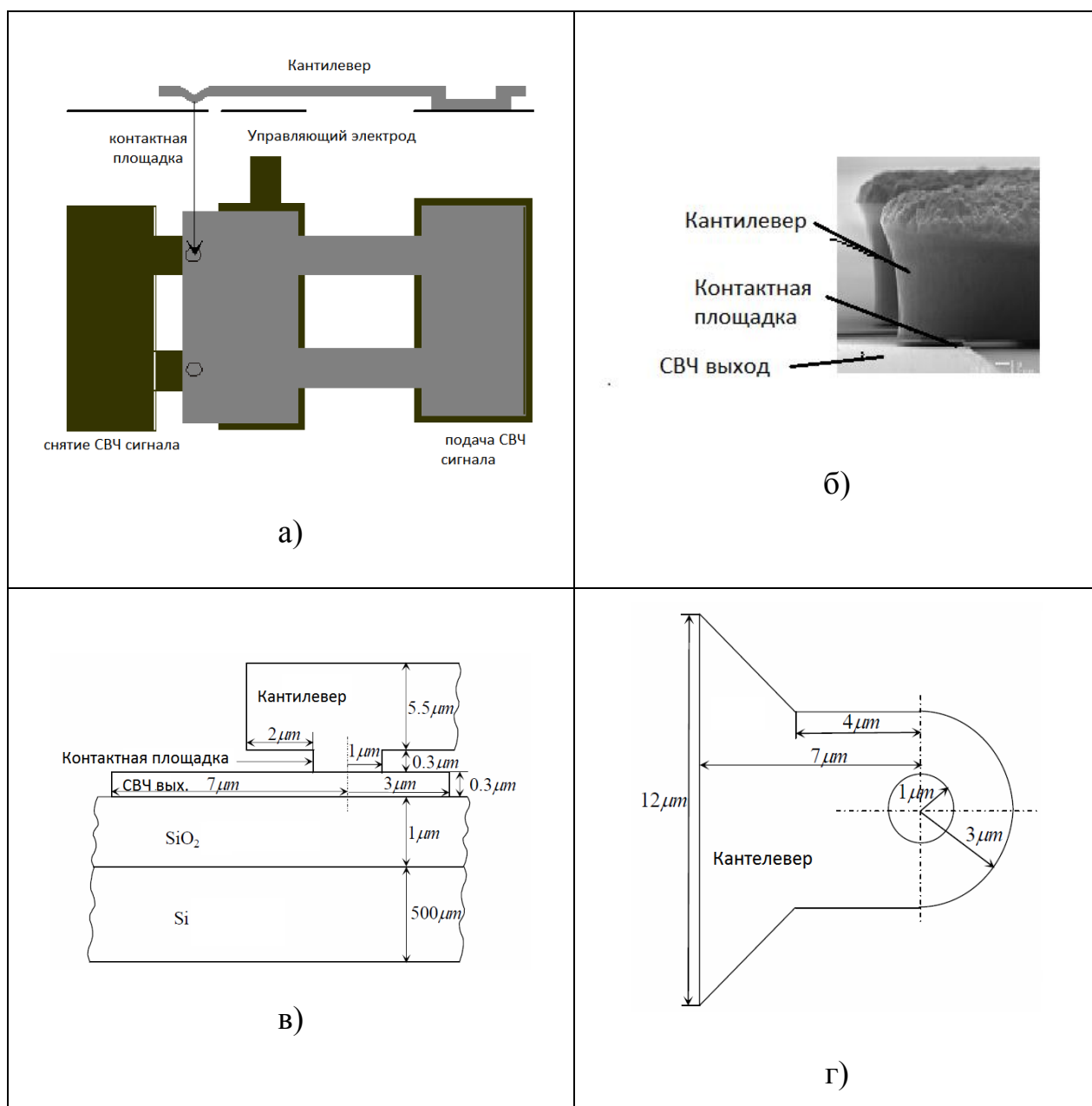


Рис. 2. Схема последовательного МЭМС переключателя резистивного типа с контактной площадкой, где а – схема переключателя с омическим контактором, б – снимок электронно-лучевого микроскопа контактной площадки, в, г – эскиз контактной площадки

Основным преимуществом емкостных МЭМС переключателей является возможность создания переключателей с низким рабочим напряжением, так как нет необходимости в приложении значительного усилия при создании пятна контакта. Но при этом МЭМС устройства данного типа очень чувствительны к шероховатости поверхности и внутренним напряжениям в мембране [21] вследствие возникновения дополнительного воздушного зазора, значительно влияющего на соотношение емкостей во включенном и выключенном состоянии переключателя. Переключаемая мощность емкостных переключателей не превышает 7 Вт, поскольку плотность тока может превышать критическое значение (для алюминия или золота $0,5 \text{ MA/cm}^2$) вследствие большего сопротивления крепления мембраны по сравнению с переключателями резистивного типа [5]. Это связано с тем, что при проектировании крепления мембран переключателей емкостного типа уделяют большее внимание уменьшению напряжения срабатывания, и, как следствие, сопротивление между СВЧ электродом мембраны и заземляющим электродом больше, чем у переключателей с омическим контактом.

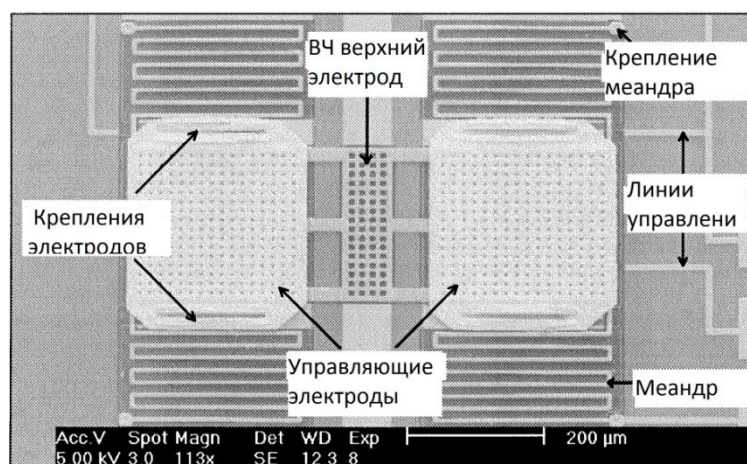


Рис. 3. Пример конструкции емкостного СВЧ МЭМС переключателя

На рис. 3 приведен пример емкостного шунтирующего МЭМС переключателя с напряжением срабатывания менее 6 В [22]. Низкое напряжение срабатывания обеспечивается креплением мембраны в виде меандра. При подаче напряжения между управляющими электродами и заземленным электродом происходит срабатывание МЭМС переключателя,

емкость между заземляющим электродом и ВЧ электродом резко возрастает, и СВЧ сигнал переключается на заземленный электрод.

Емкостный переключатель выдерживает сопоставимое количество рабочих циклов с резистивными переключателями. Так, по данным компании Raytheon[23], срок службы емкостного МЭМС переключателя составил 10^4 - 10^8 циклов, переключаемая мощность составляла до 4 Вт на частоте 10 ГГц, время переключения 10 мкс, с собственными потерями 0,07 дБ и изоляцией до 35 дБ.

1.2.2 Характерные причины отказа МЭМС переключателей

Для емкостного типа контакта при низких мощностях (1 мВт и ниже) основной механизм отказа – зарядка диэлектрика. Решением данной проблемы является повышение качества диэлектрика и использование напряжения срабатывания с переменной полярностью. Для переключателей средней мощности (10-100 мВт) основные механизмы отказа – зарядка диэлектрика и выход из строя из-за высокой плотности тока. Решение проблемы, связанной с зарядкой диэлектрика, описано выше. Проблема высокой плотности тока обычно решается увеличением толщины металлической мембраны и ее креплений. Для переключателей высокой мощности (свыше 100 мВт) основные механизмы отказа – самопроизвольное срабатывание и высокая плотность тока, о которой сказано выше. Самопроизвольное срабатывание переключателя возникает при напряжении в ВЧ электроде, сравнимом с напряжением срабатывания или отпускания, следовательно, решением этой проблемы будет увеличение жесткости структуры переключателя и (или) управление при помощи электродов отдельных от ВЧ электрода.

Для омического контакта при низких мощностях (менее 1 мВт) основными механизмами отказа являются эрозия, упрочнение контактов и образование диэлектрических пленок на контакте. Решение этой проблемы заключается в подборе металлов с лучшими характеристиками контакта. Переключатели средней мощности (10–100 мВт) выходят из строя из-за

высокой плотности тока в контакте и переносе материала между контактами; эта проблема решается подбором металлов с лучшими характеристиками контакта и большим усилием контакта. Для мощных переключателей (от 100 мВт и выше) основным механизмом отказа является повышение температуры, плотности тока и перенос материала в контакте. Эта проблема решается проведением работы по охлаждению контактной площадки, увеличением прижимающей силы контактов и подбором материала, из которого сделаны контакты [13].

1.3 Электростатические МЭМС переключатели

Электростатические МЭМС переключатели являются наиболее распространенными среди МЭМС переключателей на сегодняшний день [9-14, 16-20, 24-25]. Это связано с практически нулевой потребляемой энергией во включенном состоянии, малыми размерами элемента, совместимости процесса изготовления устройства с технологическими процессами кремниевой технологии и технологии на основе $A^{III}B^V$, относительной простотой в изготовлении и малым временем переключения.

Электростатические МЭМС ключи в свою очередь подразделяются на два типа – кантилеверные и мембранные. Рассмотрим оба типа емкостных ключей подробнее:

а) Кантилеверные электростатические МЭМС переключатели.

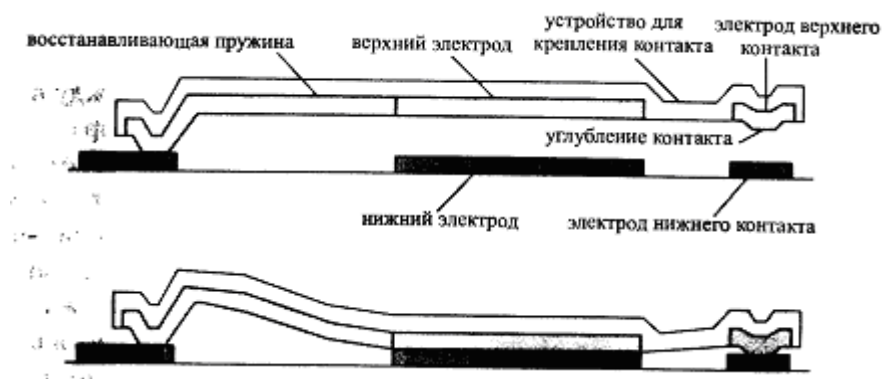


Рис. 4. Контактный кантилеверный последовательный емкостной МЭМС переключатель

Кантилеверные электростатические переключатели (рис. 4) состоят из двух важных механических элементов – тонкой балки, закрепленной на анкре слева от нижнего электрода, используемого для подачи управляющего напряжения и верхнего контактного электрода, подвешенного над разомкнутой ВЧ линией, которую он замыкает. Механизм срабатывания микропереключателя может быть описан уравнениями механики для изгибаемой балки.

При подаче напряжения смещения между верхним и нижним электродами происходит перераспределение зарядов, приводящее к появлению электростатических сил между металлическими поверхностями. Эти силы заставляют свободно подвешенный контакт двигаться по направлению к нижнему электроду. Поскольку кантилевер начинает изгибаться, в нем возникают силы упругости, направленные в противоположном направлении относительно электростатических сил. Как только напряжение достигает порогового значения, т.е. электростатические силы становятся больше силы упругости, балка кантилевера резко падает на нижний электрод, замыкая при этом ВЧ контакты. Консоль возвращается в прежнее положение после того, как приложенное напряжение станет ниже порогового значения размыкания, которое много ниже напряжения срабатывания (рис 5.).

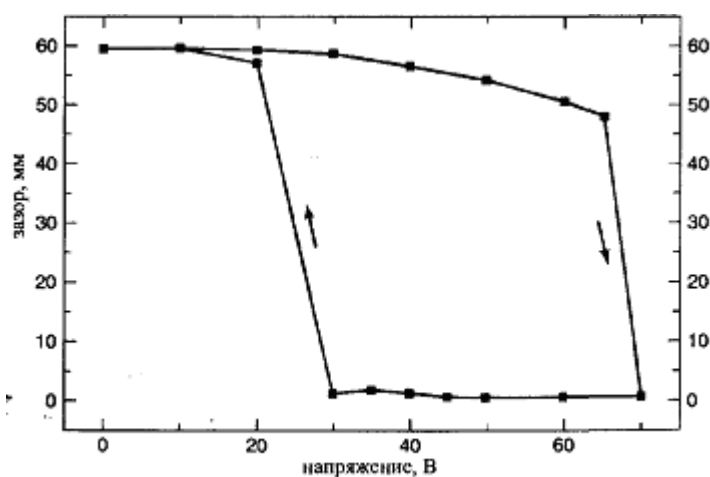


Рис. 5. Зависимость изменения размеров зазора от приложенного напряжения, измеренная при увеличении и уменьшении напряжения

Это связано с тем, что приложенное напряжение приводит к появлению электростатической силы, которая имеет обратную квадратичную зависимость от расстояния между пластинами управляющего конденсатора, что можно записать в виде следующей формулы:

$$F = \frac{\varepsilon_0 AV^2}{2g^2}$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость, A – эффективная площадь конденсатора, g – расстояние между пластинами, V – прикладываемое напряжение.

Эквивалентная механическая схема, показанная на рис. 6, представляет собой ключ в виде конденсатора, у которого одна из параллельных пластин подвешена при помощи идеальной линейной пружины над второй фиксированной и заземленной пластиной. Такая система имеет только одну степень свободы – расстояние между верхней подвижной пластиной и нижней закрепленной пластиной.

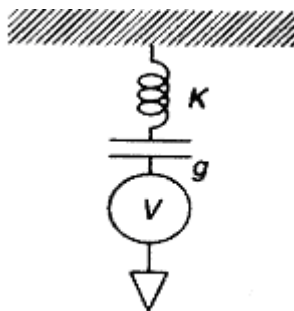


Рис. 6. Эквивалентная механическая модель, в которой g – зазор между электродами, K – модуль упругости, V – напряжение.

б) Мембранные электростатические МЭМС переключатели

На рис. 7 показана схема мембранного емкостного СВЧ переключателя с омическим контактом [26]. Ключ состоит из металлической мембраны, которая управляется за счет электростатической силы одним или двумя

изолированными электродами. При подаче напряжения смещения между мембраной и нижними управляющими электродами происходит перераспределение зарядов, приводящее к появлению электростатических сил между металлическими поверхностями.



Рис. 7. Мембранный емкостной переключатель.

Эти силы заставляют мембрану двигаться по направлению к нижним электродам. Как и в случае кантилеверного ключа, модель мембранного переключателя может быть представлена в виде конденсатора, у которого одна из параллельных пластин подвешена при помощи идеальной пружины над закрепленной нижней пластиной (см. рис. 6)

1.4 Термомеханические МЭМС переключатели.

Термомеханические переключатели работают за счет разности коэффициентов термического расширения разных материалов или за счет уменьшения намагниченности термочувствительных магнитных статоров. Основное преимущество данного типа ключей – высокое контактное усилие, но есть два очень существенных недостатка:

- самая высокая потребляемая мощность;
- самое низкое время срабатывания.

В качестве примера приведен ключ типа ТСМА [27] (термически управляемый магнитный ключ) и комбинированный термоэлектростатический МЭМС переключатель мембранного типа [28, 29]. Принцип действия термического привода ТСМА показан на рис. 8. Привод состоит из постоянных магнитов, якоря, выполненного из мягкого магнитного материала, и статоров, изготовленных из термочувствительных магнитных материалов с низкой точкой Кюри. При нагреве одного из статоров уменьшается его намагниченность. При этом, возникает градиент магнитного поля, вызывающий изменение силы действующей между статорами, в результате - второй статор притягивает к себе якорь.

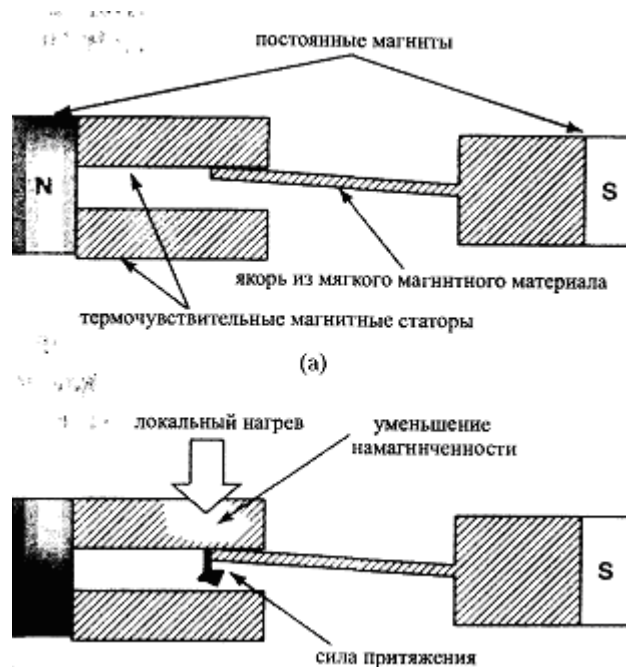


Рисунок 8. Принцип действия термического магнитного термореле:

а – без нагрева, б - с нагревом

На рис. 9 представлен комбинированный термоэлектростатический МЭМС переключатель мембранного типа [28, 29]. Его основные характеристики:

- управляющее напряжение снижено на управляющем конденсаторе до 15-20 вольт,

- потребляемая мощность для разогрева терморезистора в мембране составляет всего 2-4 мВт,

- скорость переключения 250-400 мкс.

Основная особенность конструкции данного ключа в том, что используют различные слои нитрида кремния, полученного плазмохимическим методом, с различными механическими напряжениями – как сжимающими, так и растягивающими, в результате чего, возникает вертикальный градиент механических напряжений. Когда на резистивный нагреватель подается напряжение, то мембрана изгибается вниз (из-за разности коэффициента температурного расширения различных слоев) и замыкает ВЧ линию верхним металлическим контактом. В нижнем положении мембрана удерживается за счет электростатических сил притяжения двумя управляющими электродами.

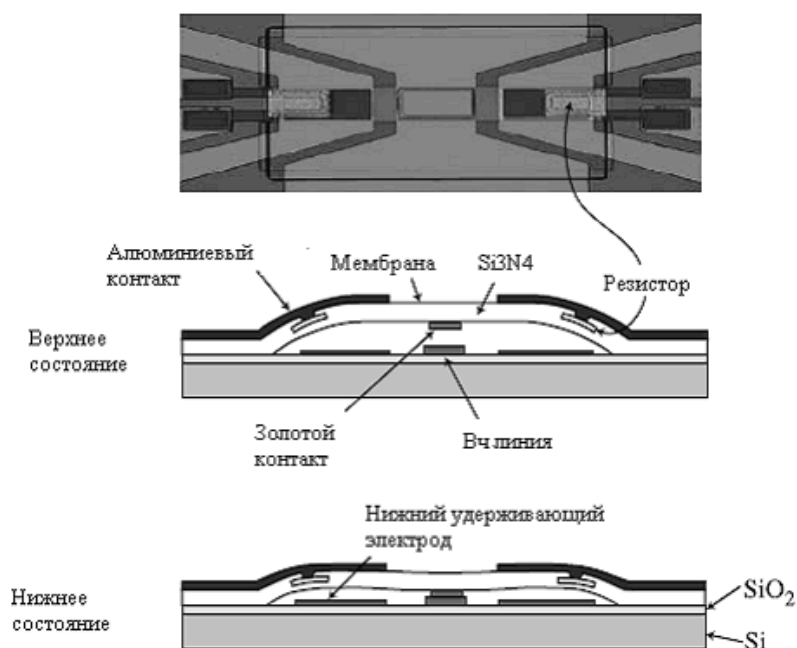


Рис. 9. Комбинированный термоэлектростатический МЭМС переключатель мембранного типа

Основное преимущество данного типа переключателей – высокое контактное усилие, но есть ряд существенных недостатков – это самая высокая

потребляемая мощность (2 - 4 мВт) и самое низкое время срабатывания (300 мс) [30, 31]. Кроме того, и самая малая наработка на отказ – 57 млн циклов [9].

1.5 Пьезоэлектрические МЭМС переключатели.

В основе работы пьезоэлектрических МЭМС переключателей лежит физическое явление – механическое изменение размеров кристалла при подаче электрического напряжения на его поверхность. Одна из конструкций переключателя этого типа представлена на рис. 10 [32] – это переключатель мембранного типа. Его основные параметры:

- срабатывание при напряжении до 5 В;
- контакты прижимаются с силой 1-2 мкН;
- отклонение мембраны порядка 3-4 мкм.

Основные достоинства пьезоэлектрического переключателя:

- низкое напряжение срабатывания позволяет избежать электростатических наводок;
- при толщине пьезоэлектрика всего 3000-5000 Å достигаются перемещение мембраны 3-4 мкм;
- достигаемая сила контакта (1-2 мкН) позволяет использование таких конструкций для переключения переменного и постоянного сигнала средней мощности;
- зависимость направления силы пьезоэлектрического слоя от полярности напряжения.

Зависимость направления силы пьезоэлектрического слоя от полярности напряжения помогает смягчить проблему трения покоя при контакте металл-металл. Но при всех преимуществах есть серьёзный недостаток, ограничивающий распространение коммутаторов на основе пьезоэлектриков – это необходимость наносить слои со сложным составом в процессе напыления пленки пьезоэлектриков, что требует дополнительного оборудования,

отсутствующего в стандартных линейках по производству микроэлектронных компонентов на основе кремниевой технологии и на соединениях $A^{III}B^V$.

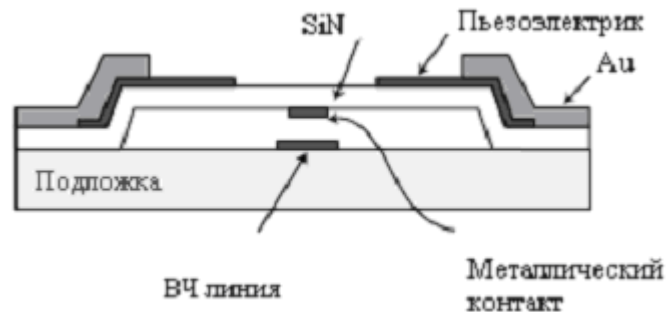


Рис. 10. Пьезоэлектрический МЭМС переключатель мембранного типа

1.6 Электромагнитные МЭМС переключатели

Электромагнитные переключатели работают по принципу действия традиционных электромагнитных реле. Основное их преимущество заключается в том, что управление осуществляется за счет подачи напряжения 3-10 В. Кроме того, постоянные магниты и электромагнитные материалы позволяют создать реле с функцией самозащелкивания.

1. Электромагнитные МЭМС переключатели с функцией самозащелкивания.

Рассмотрим в качестве примера кантилеверный переключатель, изготовленный J. Shen и др. [33]. Переключатель работает за счет намагничивания пермалоевого кантилевера в постоянном внешнем магнитном поле. Переключение между двумя стабильными состояниями совершается за счет коротких импульсов напряжения в катушке находящейся под кантилевером.

Данный переключатель имеет следующие характеристики: время переключения – 200 мкс, управляющее напряжение - 5 В, размеры 800×200 мкм, мощность переключения – 100 мкДж.

Taylor и др [34] в 1997 году изготовили и протестировали полностью интегрированное электромагнитное МЭМС реле. Такой тип реле обладает минимальными размерами, и при его производстве не требуется никаких операций по монтажу катушек, что особенно важно при использовании для его создания стандартной планарной технологии.

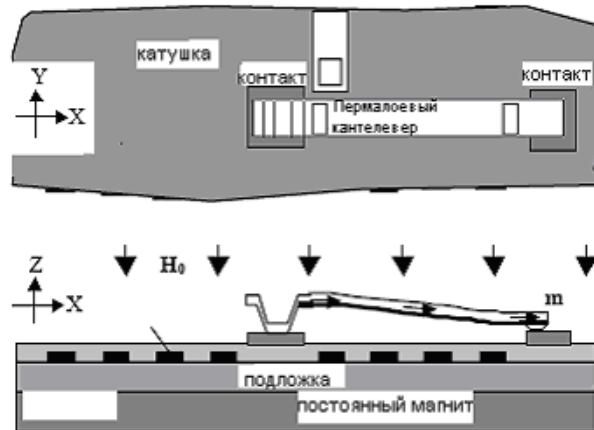


Рис. 11. Электромагнитный MEMS переключатель с функцией самозащелкивания.

Форма катушки в виде меандра и исключение промежуточных соединений позволяют получить катушку, обладающую низким сопротивлением. На рис. 12 показана схема электромагнитного реле консольного типа с нормально открытыми контактами. Реле данного типа срабатывает при протекании через катушку тока достаточной величины. При этом возникает магнитный поток, концентрируемый на нижней стороне магнитных сердечников, который приводит к возникновению силы, действующей на верхнюю магнитную пластину. Эта сила заставляет верхнюю пластину опуститься вниз к электромагниту, замыкая контакты А и В, в результате чего реле приходит в выключенное состояние. Поскольку верхняя пластина изготовлена из проводящего материала, ток через нее может протекать от одного контакта к другому. Когда в катушке перестает течь ток, контакты размыкаются, и реле переходит в выключенное состояние.

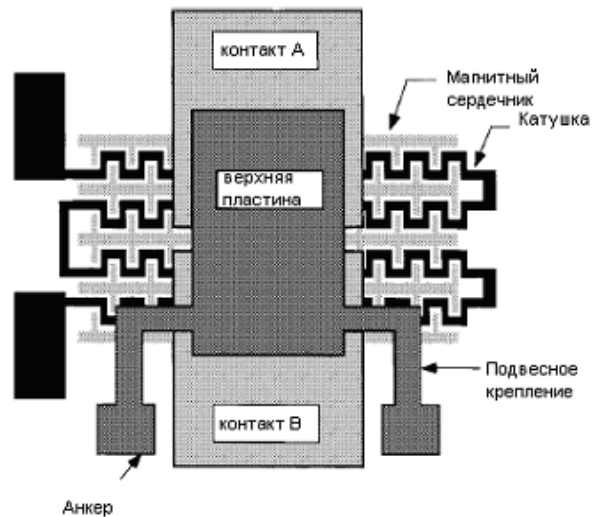


Рис. 12. Схема микрореле с однослойной катушкой

Выводы из первой главы

Для изготовления мощных СВЧ переключателей (от 100 мВт и выше) наиболее подходящим типом контакта является омический контакт. Это вызвано необходимостью применения мембран с жестким креплением для емкостного типа контакта из-за эффектов самопроизвольного срабатывания и высокой плотности тока, что нивелирует их преимущества перед переключателями с омическим типом контакта.

Для изготовления переключателей средней и малой мощности (до 100 мВт), переключатель с емкостным типом контакта имеет важное преимущество – возможность изготовления переключателя с низким напряжением срабатывания, что позволяет использовать единую цепь питания как для полупроводниковых приборов, так и для управления переключателями.

В таблице 2 приведены различные по типу действия МЭМС устройства:

Таблица 2 Сравнение МЭМС устройств с различным механизмом работы

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

Как видно из таб. 2 электростатические реле наиболее пригодны для использования в МЭМС переключателях в виду того, что:

- потребляемая мощность близка к нулю;
- малый размер МЭМС переключателя;
- при изготовлении используется хорошо разработанная планарная технология;
- наиболее быстрое время переключения;
- для срабатывания реле достаточно 50-200 мкН;
- при использовании LC развязки возможна подача управляющего напряжения через ВЧ волновод.

Единственным серьёзным недостатком является необходимость использовать управляющего напряжения 20-80 В, в то время когда большинство цепей управляются при помощи 3-5 В.

Следует отметить, что в зависимости от условий эксплуатации у каждого типа МЭМС переключателя может найтись своя область применения, но у электростатических она шире, не только из-за вышеперечисленных преимуществ, но также из-за возможности использования при изготовлении

переключателя хорошо известной технологии производства полупроводниковых приборов на основе соединений $A^{III}B^V$ [35,36].

Глава 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МЭМС ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

2.1 Постановка задачи

Для выбора диапазона рабочих частот СВЧ МЭМС переключателей остановимся на уже существующих модулях система-на-кристалле (СнК) [37], которые рассчитаны на диапазон 10-12 ГГц.

При разработке модели МЭМС переключателя были приняты следующие требования:

Узкополосный МЭМС переключатель:

- Вносимые потери не более 0,5 дБ;
- Развязка принимаемого и передающего сигнала не хуже 30 дБ;
- Напряжение питания не более 30 В;
- Рабочий диапазон частот 10-12 ГГц;
- Развязка по постоянному напряжению питания и СВЧ сигналу.

Для реализации всех вышеперечисленных требований был выбран шунтирующий МЭМС переключатель с электростатическим типом управления мембраной и емкостным контактом.

Основной особенностью шунтирующего МЭМС переключателя с электростатическим управлением мембраной является возможность совмещения СВЧ электрода с управляющим электродом, что значительно уменьшает геометрические размеры переключателя. Использование LC-развязки предотвращает проникание постоянного напряжения в СВЧ тракт, и СВЧ сигнала в схему управления постоянным напряжением.

2.2 Электромеханическая модель МЭМС переключателя

2.2.1. Расчет напряжения срабатывания

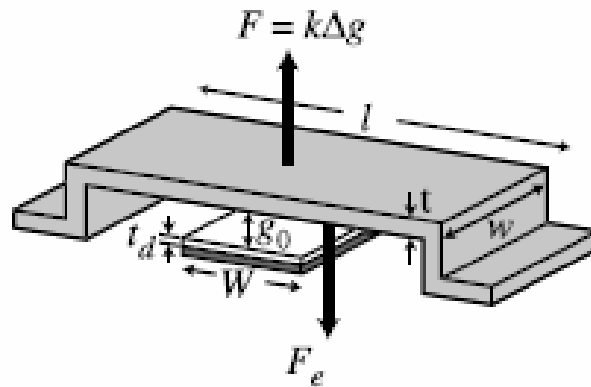


Рис. 13. Геометрическая схема МЭМС переключателя

На перемещение мембраны влияют две противоборствующие силы: электростатическая сила и сила упругости. При использовании конструкции с малыми отклонениями, что реализуется в большинстве МЭМС переключателях, можно описывать механическое поведение мембраны, используя линейный коэффициент упругости k (Н/м). Таким образом, можно оценить напряжение срабатывания переключателя и напряжение, при котором мембрана из нижнего положения вновь вернется в исходное положение под действием силы упругости. Для этого пренебрежем влиянием слоя диэлектрика над управляющим электродом. Силы электростатического притяжения мембраны (F_e) и сила упругости ($F_{упр}$) должны быть равны:

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 W w V^2}{g^2} \quad (1)$$

$$F_{упр} = k(g_0 - g) \quad (2)$$

Приравняем обе взаимодействующие силы и выразим поданное напряжение через смещение балки:

$$V(g) = \sqrt{\frac{2kg^2(g_0 - g)}{\varepsilon_0 Ww}} \quad (3)$$

При повышении напряжения сила электростатического притяжения растет по квадратичному закону - и мембрана опускается ниже. В то же время, сила упругости является линейной функцией. В некоторый момент рост силы упругости не может компенсировать рост силы электростатического притяжения - и мембрана резко «падает» на нижний электрод. Этот момент можно вычислить, если продифференцировать формулу (3):

$$\sqrt{\frac{2k}{\varepsilon_0 Ww}} \left(\sqrt{g_0 - g} - \frac{g}{2\sqrt{g_0 - g}} \right) = 0 \quad (4)$$

Откуда следует, что $g = \frac{2}{3}g_0$ и, подставив это значение в выражение (3), получим значение напряжения срабатывания МЭМС переключателя:

$$V_{сраб} = \sqrt{\frac{8kg_0^3}{27\varepsilon_0 Ww}} \quad (5)$$

Напряжение, при котором мембрана «поднимется» за счет силы упругости определяется:

$$V_{отт} = \sqrt{\frac{2t_d^2 k g_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_d Ww}} \quad (6)$$

Как видно из формулы (5), $V_{сраб}$ можно снизить несколькими способами. Например, при снижении расстояния между мембраной и управляющим электродом снижается как напряжение срабатывания мембраны, так и уменьшаются отношения ёмкостей управляющего переменного конденсатора, что сильно сказывается на соотношении вносимых потерь и изоляции сигнала шунтирующего переключателя.

Увеличение площади мембраны, как правило, влечет за собой следующие проблемы:

- возрастание собственных потерь в переключателе из-за возросшей емкости переключателя в выключенном состоянии;
- металлические мембраны, как правило, изготавливаются с некоторыми остаточными напряжениями, следовательно, чем больше размеры мембраны, тем большие деформации она будет иметь после удаления «жертвенного слоя».

Таким образом, остаётся третий вариант, который предлагает снижение жесткости крепления мембраны. Крепления мембраны с различной геометрией позволяют гибко решать поставленную задачу в различных частотных диапазонах и для различных напряжений срабатывания.

2.2.2. Коэффициент упругости мембраны.

Известны различные варианты крепления мембраны, которые используются для снижения константы упругости мембраны МЭМС переключателя. Наиболее часто используемые типы крепления мембраны приведены на рис. 14. Выражения коэффициента упругости, для каждого типа крепления мембраны, представлены ниже. Стоит отметить, что данные выражения не включают в себя остаточные напряжения в мембране.

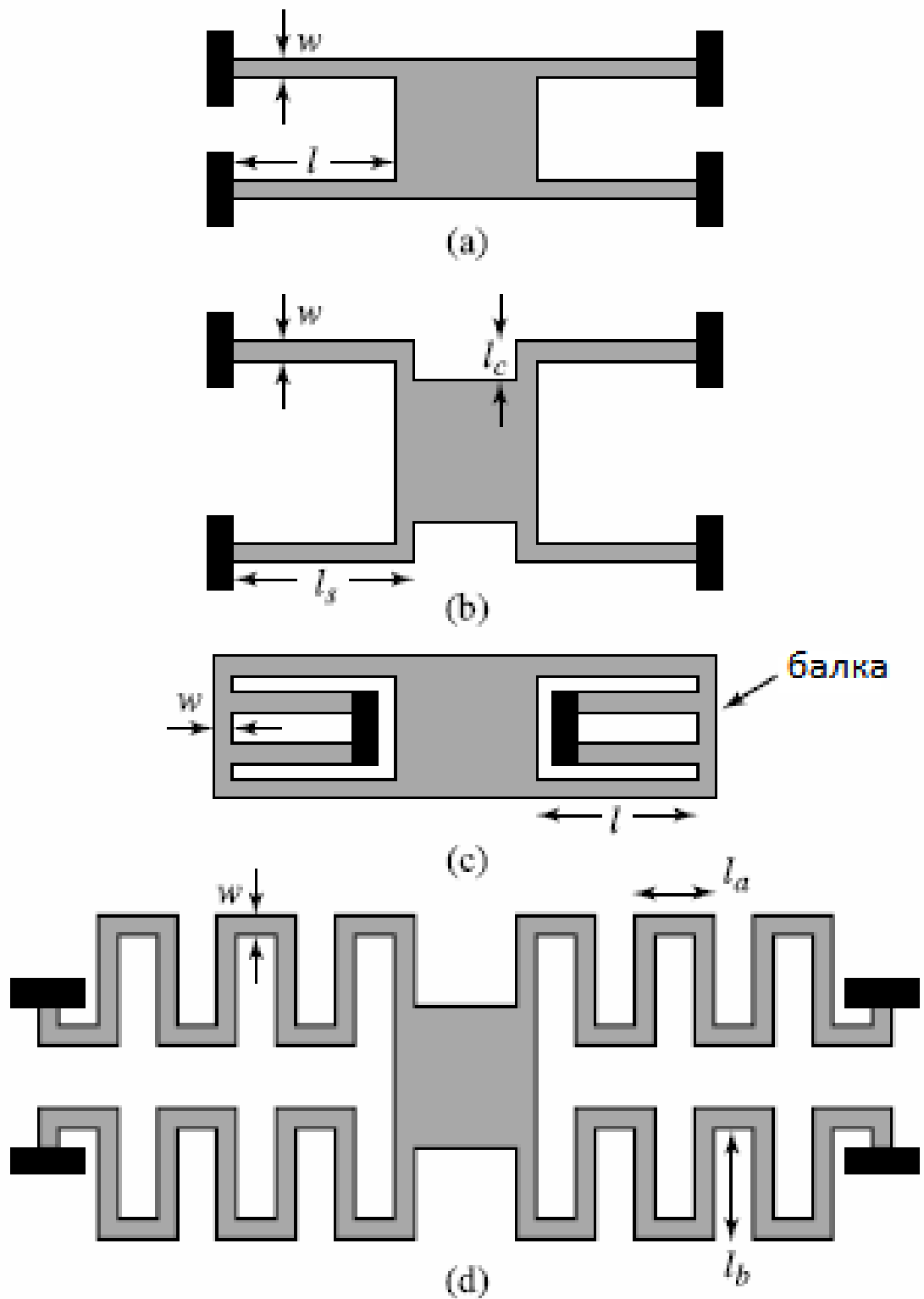


Рис. 14. Различные типы крепления балки, используемые для уменьшения коэффициента упругости. а) И-образное крепление, б) крабообразное крепление, с) согнутое крепление, д) серпантинное крепление.

Выражения для коэффициентов упругости крепления мембран представлены в таблице:

Крепление мембраны	Коэффициент упругости
Н-образное крепление [38]	$k = 4Ew \left(\frac{t}{l}\right)^3$
Крабообразное крепление [39]	$k = \frac{4Ew \left(\frac{t}{l_c}\right)^3}{1 + \frac{l_s}{l_c} \left[\left(\frac{l_s}{l_c}\right)^2 + 12 \frac{1+\nu}{1 + \left(\frac{w}{t}\right)^2} \right]}$ $\approx 4Ew \left(\frac{t}{l_s}\right)^3 \text{ для } l_s \gg l_c$
Согнутое крепление [40]	$k \approx 2Ew \left(\frac{t}{l}\right)^3$ <p style="text-align: center;">для очень жесткой балки</p> $k \approx \frac{48GJ}{l_a^2 \left(\frac{GJ}{EI_x} l_a + l_b\right) n^3}$
Серпантинное крепление [41]	<p>При</p> $n \gg \frac{3l_b}{\frac{GJ}{EI_x} l_a + l_b}$

Где n – число меандров в серпантинном креплении, $G=E/2(1+\nu)$ – модуль упругости при кручении, $I_x=wt^3/12$ – момент инерции, постоянная кручения равна:

$$J = \frac{1}{3} t^3 w \left(1 - \frac{192t}{\pi^5 w} \sum_{i=1, n}^{\infty} \frac{1}{i^5} \tanh\left(\frac{i\pi w}{2t}\right) \right)$$

Если $l_a \gg l_b$ то коэффициент упругости серпантинного крепления становится равен $k \approx 4Ew \left(\frac{t}{nl_a}\right)^3$

2.2.3. Внутренние напряжения в мембране.

Внутренние напряжения влияют на геометрию мембраны и коэффициент упругости крепления мембраны. Для уменьшения внутренних напряжений, эффекта дребезжания и повышения времени переключения применяют перфорацию мембраны отверстиями диаметром 3-8 мкм. Площадь отверстий может достигать до 60% от общей площади мембраны. Перфорация мембраны характеризуется эффективной связкой $\mu=l/\text{шаг}$, определяемой отношением оставшейся ширины (l) на шаг между отверстиями (рис. 15). Отверстия уменьшают внутренние напряжения в мембране и уменьшают модуль Юнга мембраны [42].

Уменьшение внутренних напряжений примерно равно $\sigma=(1-\mu)\sigma_0$, где σ_0 внутренние напряжения мембраны без отверстий. Модуль Юнга мембраны снижается примерно на 25% для $\mu=0,625$. Отверстия также служат для лучшего удаления «жертвенного слоя» из-под мембраны.

Влиянием отверстий при поднятой мембране можно пренебречь, если диаметр отверстий меньше чем 3-4 величины зазора между поднятой мембраны и управляющим электродом. Но отверстия также влияют и на емкость в нижнем положении мембраны, уменьшая её.

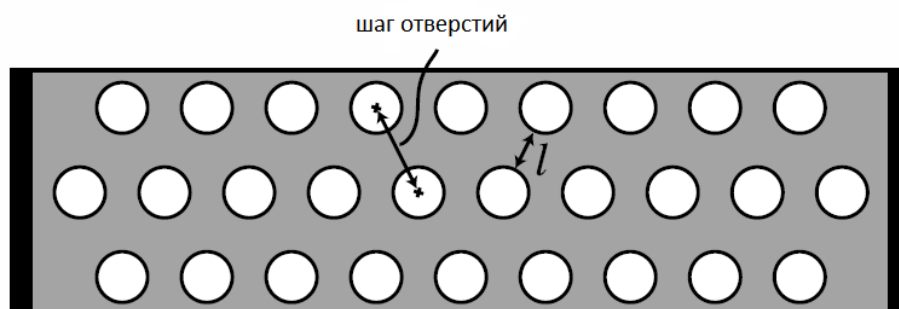


Рис. 15. Параметры эффективной связки на мембране с отверстиями

2.3 Создание и моделирование эквивалентной электрической схемы

Для моделирования МЭМС переключателей был выбран шунтирующий тип переключателя, и использовалась программа AWR Design Environment 2008. Шунтирующий переключатель размещается между СВЧ линией и заземляющим электродом. При подаче постоянного напряжения на СВЧ линию за счет сил электростатического притяжения, мембрана опускается - ёмкость между заземленным электродом и СВЧ электродом резко возрастает и СВЧ сигнал стекает на землю. На рис. 16 представлена геометрическая схема шунтирующего переключателя и его эквивалентная схема.

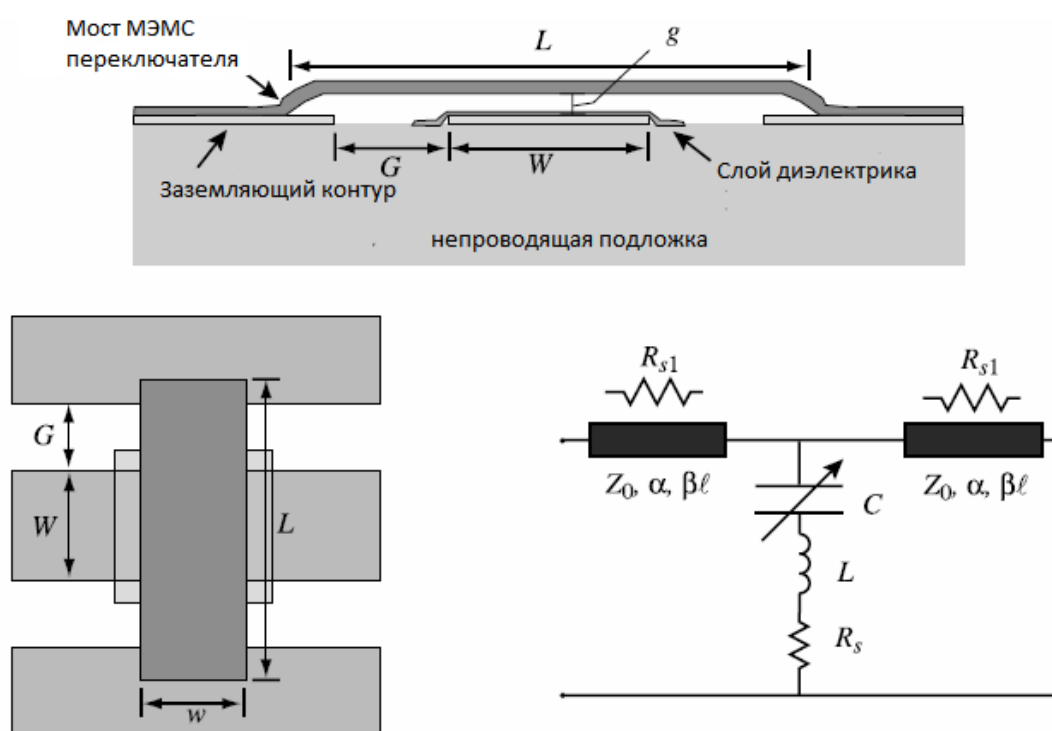


Рис. 16. Геометрическая и эквивалентная электрическая схема шунтирующего МЭМС переключателя

Для данного переключателя электрический импеданс будет равен:

$$Z = R_s + i\omega L + \frac{1}{i\omega C} \quad (7)$$

где C будет равняться C_v и C_n в зависимости от положения мембраны переключателя. Для данной LC-цепи резонансная частота будет равняться:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

Таким образом, сопротивления переключателя можно представить как:

$$Z = \begin{cases} \frac{1}{i\omega C} & \text{для } f \ll f_0 \\ R_s & \text{для } f = f_0 \\ i\omega L & \text{для } f \gg f_0 \end{cases} \quad (9)$$

Крепления мембраны играет важную роль для ВЧ параметров коммутатора, так как они обладают индуктивностью и сопротивлением, влияющие на прохождения СВЧ сигнала на заземленный электрод.

Индуктивность крепления мембраны и её сопротивление зависят от геометрии крепления, поэтому при проектировании рассмотрим несколько типов крепления мембраны с известными индуктивностями крепления мембраны, представленными на рис. 17 [5].

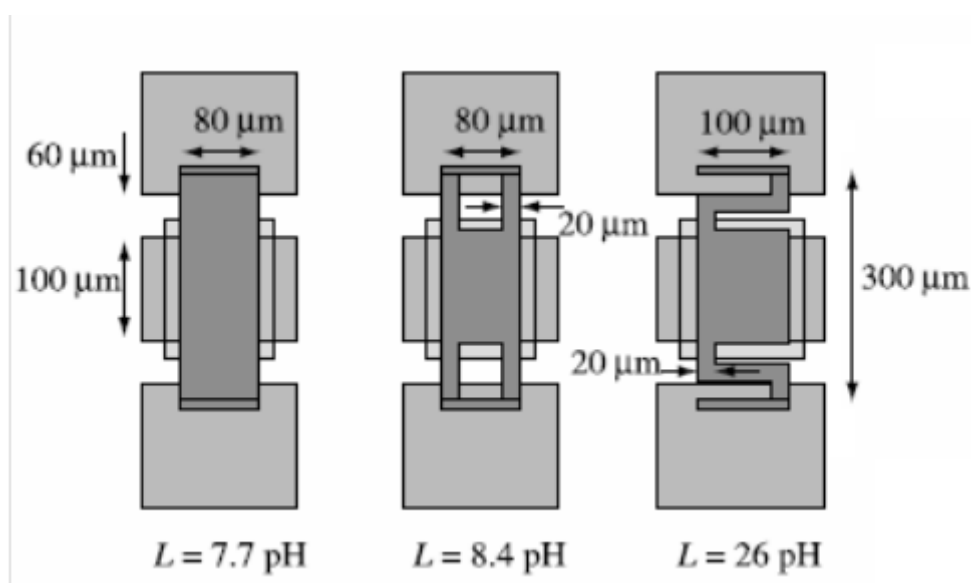


Рис. 17. Расчетная индуктивность МЭМС переключателей с низким коэффициентом упругости крепления мембраны

Проведем моделирование шунтирующего МЭМС переключателя, учтя расчетную индуктивность мембран из рис. 4, сопротивление крепления

мембран, примем равным 0,5 Ом. Для расчета ёмкости конденсатора воспользуемся формулой (10).

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{g_0 + \frac{h_d}{\varepsilon_d}} \quad (10)$$

Толщину диэлектрика примем равным 120 нм, высоту мембраны над управляющим электродом примем равным 2 мкм, размеры мембраны над СВЧ электродом составляют 100×80 мкм и 100×100 мкм. Соответственно ёмкость конденсатора для случаев 1 и 2 МЭМС переключателя при опущенной мембране равна 4,425 пФ, при поднятой мембране - 0,035 пФ; для 3 случая крепления мембраны ёмкости равны 5,531 пФ и 0,044 пФ соответственно при поднятой и опущенной мембране. На рис. 18 изображена эквивалентная электрическая схема переключателя, по которой проводилось электротехническое моделирование прохождения СВЧ сигнала в диапазоне 0-50 ГГц. Результаты моделирования отображены на рис. 19-26.

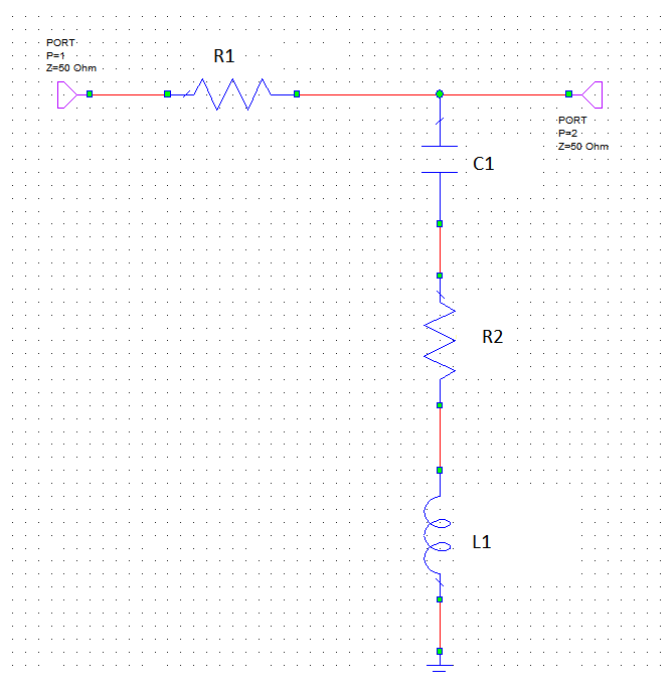


Рис. 18. Эквивалентная электрическая схема МЭМС переключателя
где: R1 – сопротивление ВЧ линии, C1 – ёмкость мембраны, R2 –
сопротивление крепления мембраны, L1 – индуктивность крепления мембраны

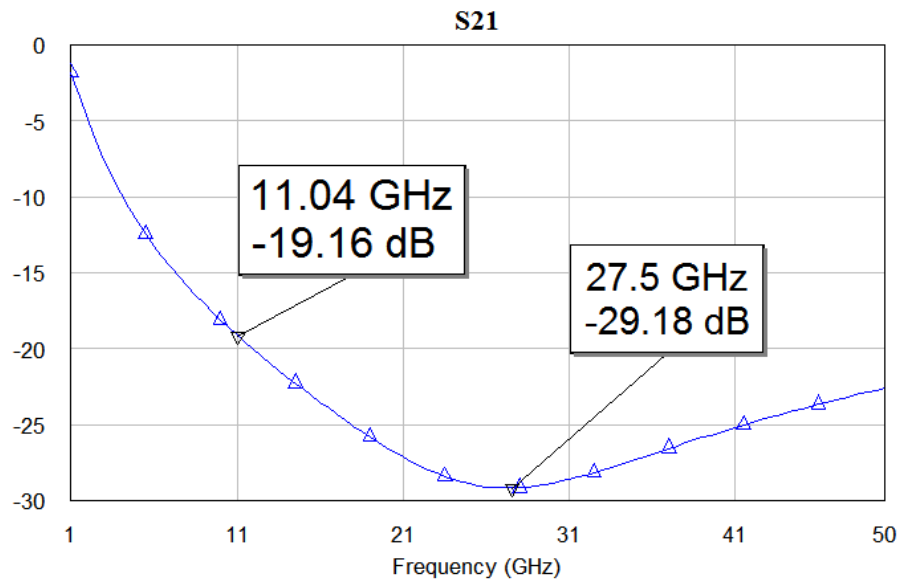


Рис. 19. Прохождение СВЧ сигнала через первый тип переключателя при опущенной мембране

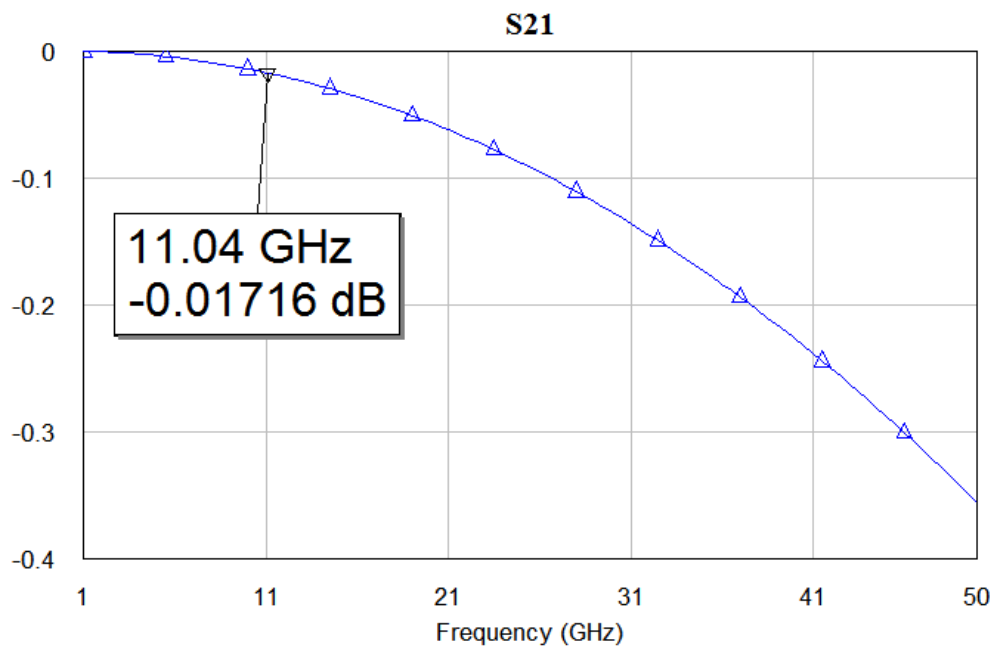


Рис. 20. Прохождение СВЧ сигнала через первый тип переключателя при поднятой мембране

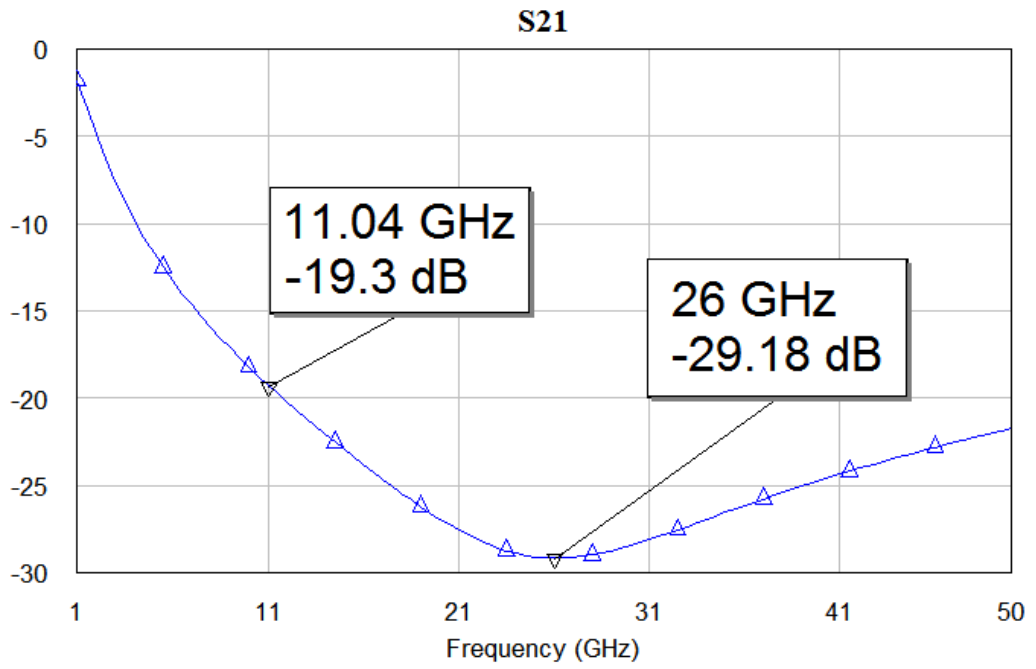


Рис. 21. Прохождение СВЧ сигнала через второй тип переключателя при опущенной мембране

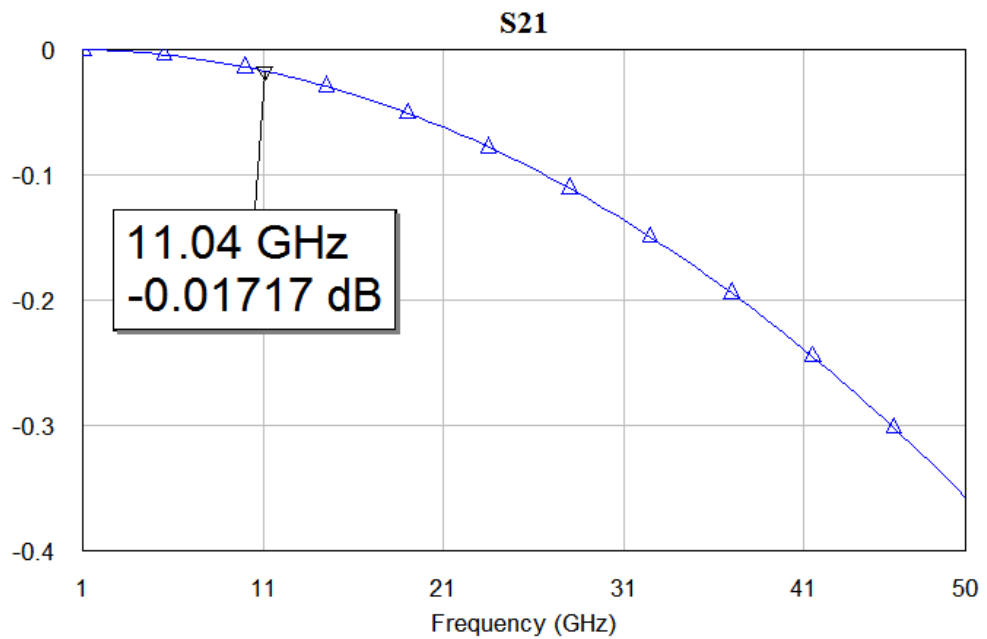


Рис. 22. Прохождение СВЧ сигнала через второй тип переключателя при поднятой мембране

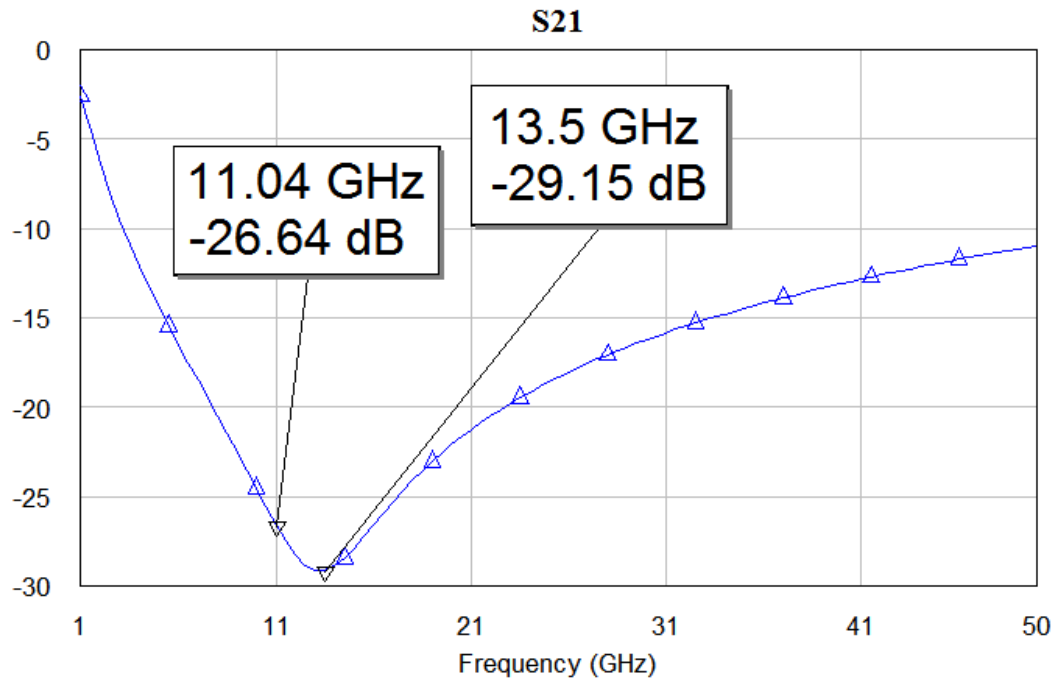


Рис. 23. Прохождение СВЧ сигнала через третий тип переключателя при опущенной мембране

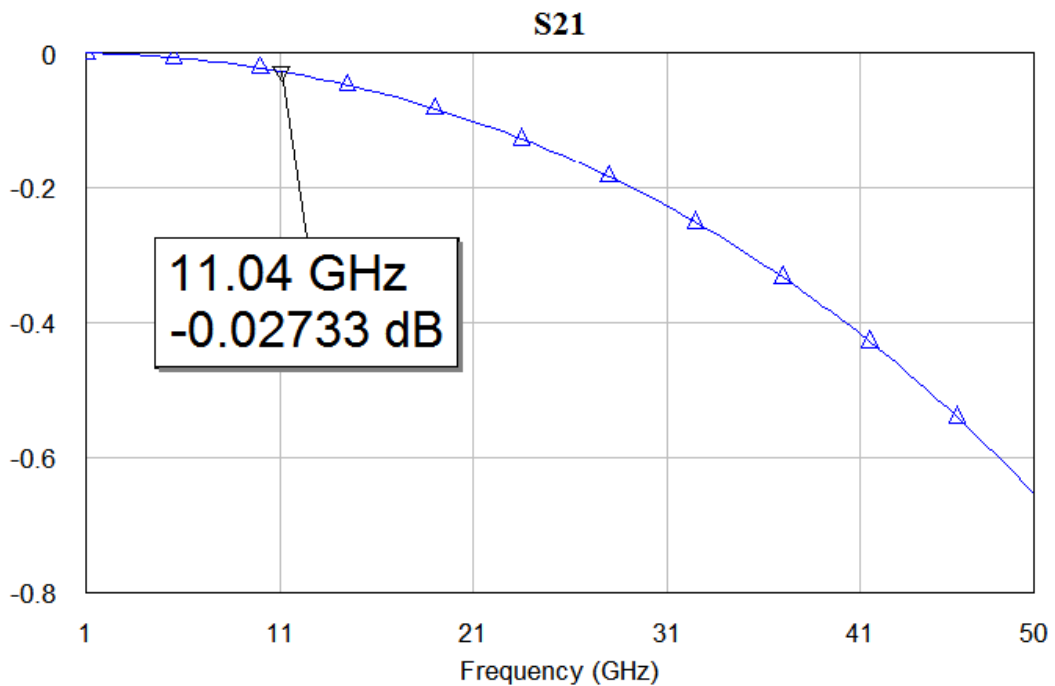


Рис. 24. Прохождение СВЧ сигнала через третий тип переключателя при поднятой мембране

По результатам электротехнического моделирования характеристики наиболее приближенные к заявленным требованиям узкополосного МЭМС

переключателя показал тип 3. Поэтому на базе этого переключателя следует разрабатывать искомый переключатель.

Для расчета топологии МЭМС переключателя уточним принципиальную схему переключателя, представленную на рис. 25, введя элементы LC развязки (C1, C2, C4, C5) для управляющего напряжения от СВЧ сигнала, реализуемые непосредственно на топологии – емкости расположенные на СВЧ волноводе и на креплении мембраны, разделяющие постоянное управляющее напряжение от СВЧ сигнала. Индуктивности, препятствующие прохождению СВЧ сигнала в блок питания, расположены вне схемы.

С целью увеличения индуктивности крепления мембраны был добавлен дополнительный сегмент меандра. Для расчета индуктивности крепления мембраны (L1, L2) МЭМС переключателя были использованы формулы (11) [43] и (12) [44]. Формула (11) использовалась для вычисления общей индуктивности крепления, а формула (12) учитывала взаимную индуктивность параллельных сегментов меандра. Значение влияния взаимной индуктивности бралось с отрицательным значением, учитывая противоположные направления протекания электрического сигнала в креплении мембраны. Для достижения наименьшего размера МЭМС переключателя длина крепления в виде меандра была равной длине самой мембраны.

$$L = 0.002l \left(\ln \left(\frac{2l}{w+t} \right) + 0.50049 + \frac{w+t}{3l} \right) \quad (11)$$

где: L – индуктивность мкГн, l – длина проводника см, w – ширина проводника, t – толщина проводника.

$$M_c(l, r) = \pm \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot l \cdot \left[\ln \left(\frac{l}{r} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{r} \right)^2} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{l} \right)^2} + \frac{r}{l} \right] \quad (12)$$

где: l – длина проводников, r – расстояние между ними.

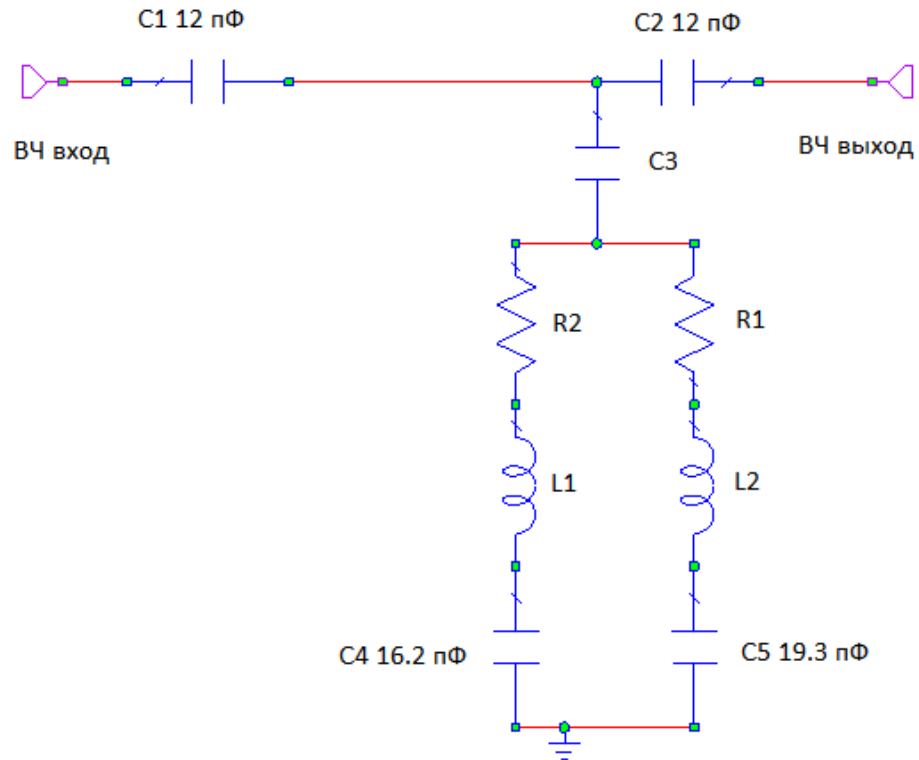


Рис. 25. Принципиальная схема СВЧ МЭМС переключателя с LC развязкой управляющего сигнала

При расчете переключателя сопротивление индуктивности рассчитывались по формуле (13).

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (13)$$

где: ρ – удельное сопротивление золота, L – длина проводника, S – площадь проводника.

В результате расчетов были найдены параметры принципиальной схемы СВЧ МЭМС переключателя, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3. Расчетные значения параметров принципиальной схемы МЭМС переключателя

Элементы переключателя		Параметры элементов переключателя
Индуктивность		0,11 нГн
Сопротивление		0,15 Ом
Емкость мембраны	вкл	5,531 пФ
	выкл	0,0439 пФ

Результаты моделирования прохождения СВЧ сигнала через МЭМС переключатель представлены на рис. 26 и рис. 27. Резонансная частота для данного переключателя составила 10 ГГц. В принципиальной схеме рассчитывались идеальные элементы, не отражающие поведение схемы на высоких частотах из-за возникновения паразитных емкостей и индуктивностей [43-48] в распределенных элементах. Для учета этих эффектов было проведено электрофизическое моделирование данной схемы [49,50], которое заключалось в том, что расчет СВЧ характеристик топологии осуществлялся в широком частотном диапазоне, при этом непосредственно учитывалось влияние топологии на прохождение СВЧ сигнала. По результатам электрофизического моделирования проводилась конечная оптимизация топологии и перерасчет скорректированной топологии.

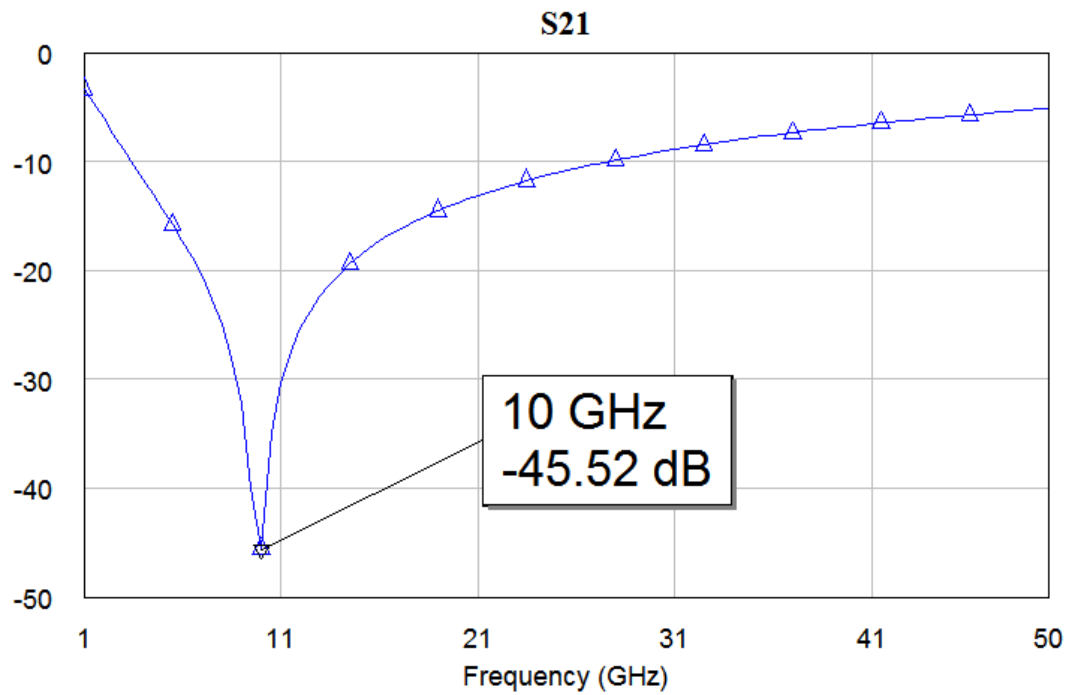


Рис. 26. Прохождение СВЧ сигнала через переключатель с опущенной мембраной

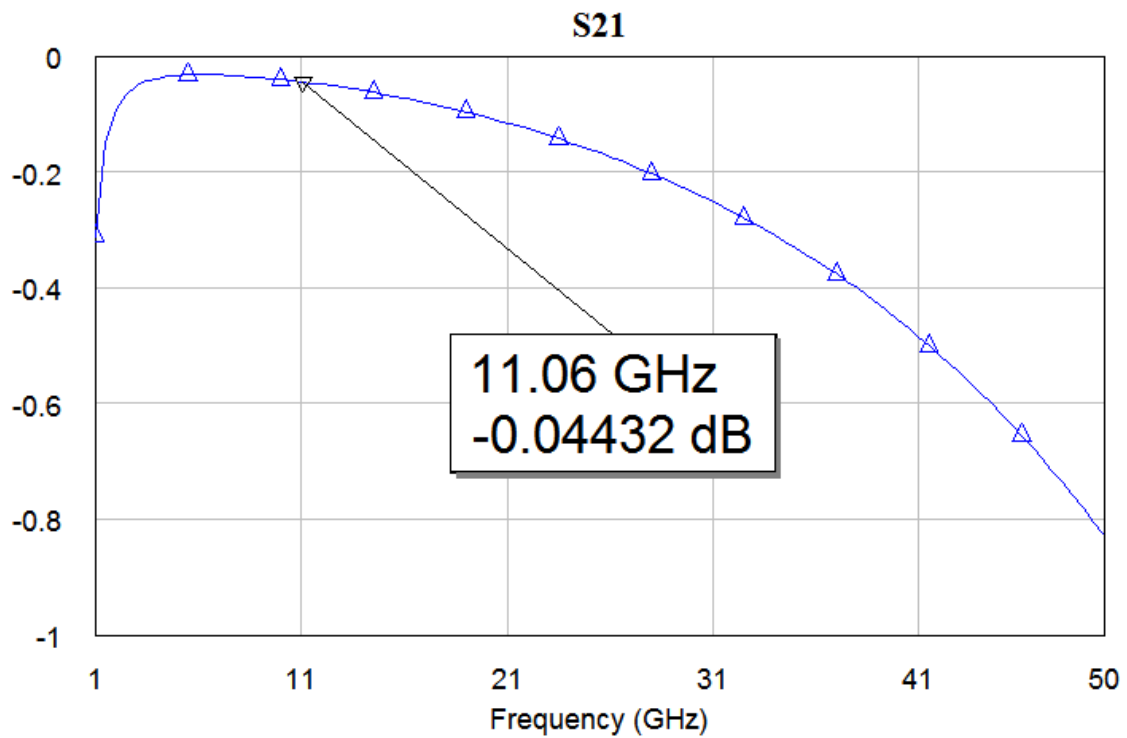


Рис. 27. Прохождение СВЧ сигнала через переключатель с поднятой мембраной

Для развязки ВЧ сигнала от управляющего постоянного напряжения применялась ёмкостная развязка, расположенная на СВЧ электроде и на заземленном электроде. Развязку блока питания от ВЧ осуществлялась посредством внешней индуктивности. Работа по оптимизации конструкции МЭМС переключателя проводилась в программе ASD (Advanced Design Systems). Топология получившегося переключателя представлена на рис. 28, расчет переключателя представлен на рис. 29.

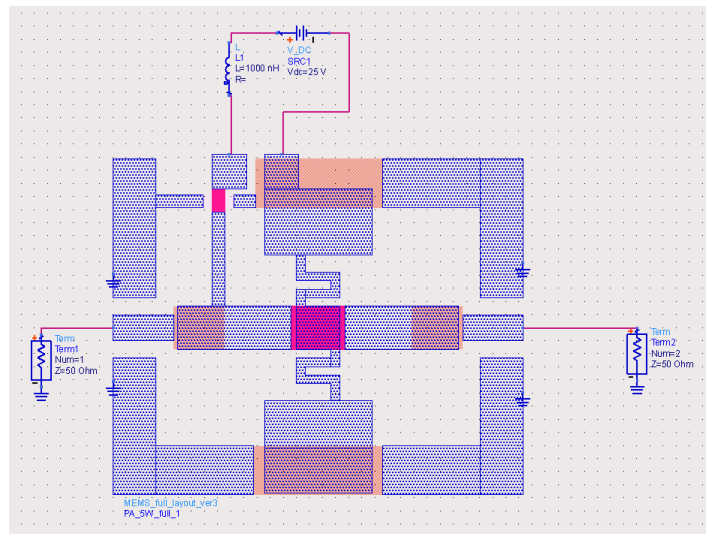


Рис. 28. Схема включения ёмкостного шунтирующего МЭМС переключателя с креплением мембраны в виде меандра

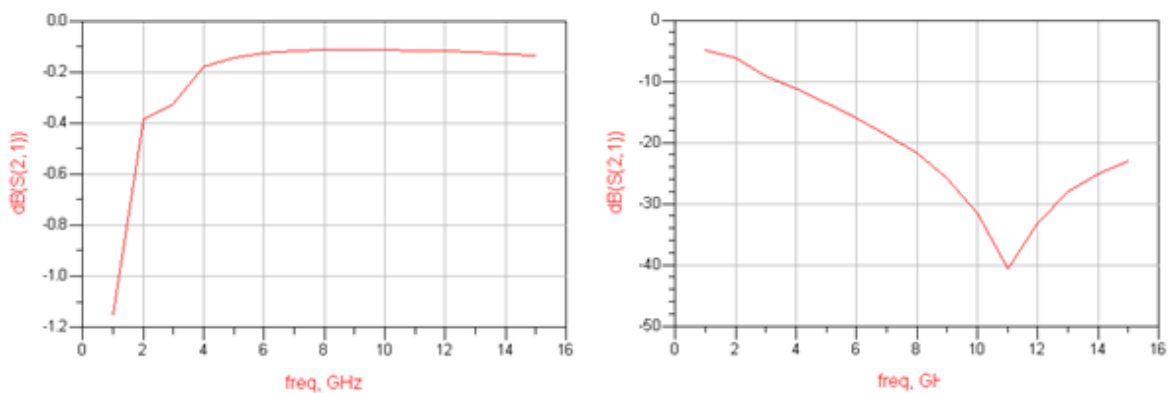


Рис. 29. Электрофизический расчет шунтирующего МЭМС переключателя с креплением мембраны в виде меандра

2.4 Расчет напряжения срабатывания узкополосного шунтирующего МЭМС переключателя.

Размеры крепления мембраны представлены на рис. 30. Мембрана состоит из 0,5 мкм золота напыляемого термически и 1,5 мкм золота осаждаемого гальванически. Расстояние от мембраны до управляющего электрода 2 мкм. Размер управляющего конденсатора 100×100 мкм, толщина диэлектрика 120 нм.

Приближенная формула, указанная для серпантинного крепления, не подходит, так как не выполняется условие:

$$n \gg \frac{3l_b}{\frac{GJ}{EI_x} l_a + l_b}$$

Поэтому воспользуемся точной формулой расчета коэффициента упругости крепления мембраны (14) приведенной в работе [51].

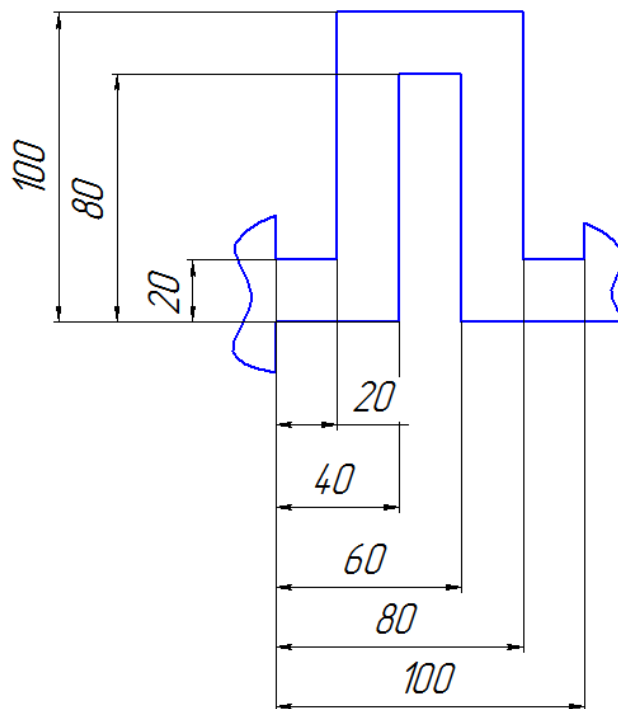


Рис. 30. Чертеж крепления мембраны. Все размеры даны в микрометрах

$$k = \left(\frac{8N^3 a^3 + 2Nb^3}{3EI_x} + \frac{abN(3b + (2N+1)(4N+1)a)}{3GJ} - \frac{Na^2 \left(\frac{2Na}{EI_x} + \frac{(2N+1)b}{GJ} \right)^2}{2 \left(\frac{a}{EI_x} + \frac{b}{GJ} \right)} - \frac{Nb^2}{2} \left(\frac{a}{GJ} + \frac{b}{EI_x} \right) \right)^{-1} \quad (14)$$

Где:

Ширина меандра (a)	40 мкм
Длина меандра (b)	80 мкм
Толщина мембраны (t)	2 мкм
Ширина крепления (w)	20 мкм
Модуль Юнга для золота (E)	79 ГПа
Коэфф. Пуассона для золота (ν)	0,42
Модуль сдвига (G)	E/(2(1+ν))
Момент инерции по оси x (Ix)	wt ³ /12
Момент инерции по оси z (Iz)	tw ³ /12
Постоянная кручения (J)	0.413(Ix+Iz)
Количество меандров в креплении мембраны (N)	1

Расчет напряжения срабатывания предлагается проводить, используя формулу (5). Тогда получаем:

$$V_{\text{сраб}} = \sqrt{\frac{16k g_0^3}{27 \varepsilon_0 W w}} \quad (15)$$

где: k – коэффициент упругости крепления мембраны; g_0 - высота зазора между мембраной и управляющим электродом; ε_0 - диэлектрическая

постоянная; W – ширина управляющего электрода; w – ширина мембраны над управляющим электродом.

Подкоренное выражение в формуле (15) увеличено вдвое по сравнению с формулой (5) из-за того, что жесткость крепления мембраны в два раза больше жесткости меандра, так как имеются 2 крепления мембраны. Для расчета конечных значений использовалась программа Mathcad. В результате расчета получим напряжение срабатывания равным 17,2 Вольта.

Выводы из второй главы

Крепление мембраны МЭМС переключателя имеет определяющее значение для его электрофизических и механических свойств. Так, в данном разделе были рассмотрены четыре типа крепления мембраны и выбран наиболее подходящий тип как с точки зрения электрофизических, так и с точки зрения механических свойств.

Предложена принципиальная электрическая схема МЭМС переключателя, которая хорошо описывает электрофизические параметры МЭМС переключателя, что подтверждается согласованием результатов расчетов в программе AWR2008 с электрофизическим моделированием в программе ADS.

Произведено моделирование и оптимизация топологии узкополосного шунтирующего МЭМС переключателя в программе ADS. Результаты моделирования – вносимые потери менее 0,4 дБ, а изоляция сигнала не менее 32 дБ в диапазоне 10-12 ГГц, что удовлетворяет поставленной задаче.

Проведен расчет напряжения срабатывания мембраны по формуле, позволяющей точно рассчитать коэффициент упругости крепления мембраны в виде меандра произвольной формы.

Напряжение срабатывания мембраны получилось равным 17,2 В.

Все расчетные параметры удовлетворяют значениям данных при постановке задачи.

Глава 3. Изготовление МЭМС переключателя

3.1 Основные этапы изготовления МЭМС переключателя на подложке GaAs

Лабораторная технология представляет последовательность технологических операций при изготовлении макетных образцов СВЧ коммутаторов сигналов и варакторов на основе арсенида галлия по технологии МЭМС и позволяет изготавливать макетные образцы с требуемыми параметрами. Ниже схематически на рис. 31 и рис. 32 представлены основные этапы и их последовательность при изготовлении требуемых МЭМС устройств [48,49].

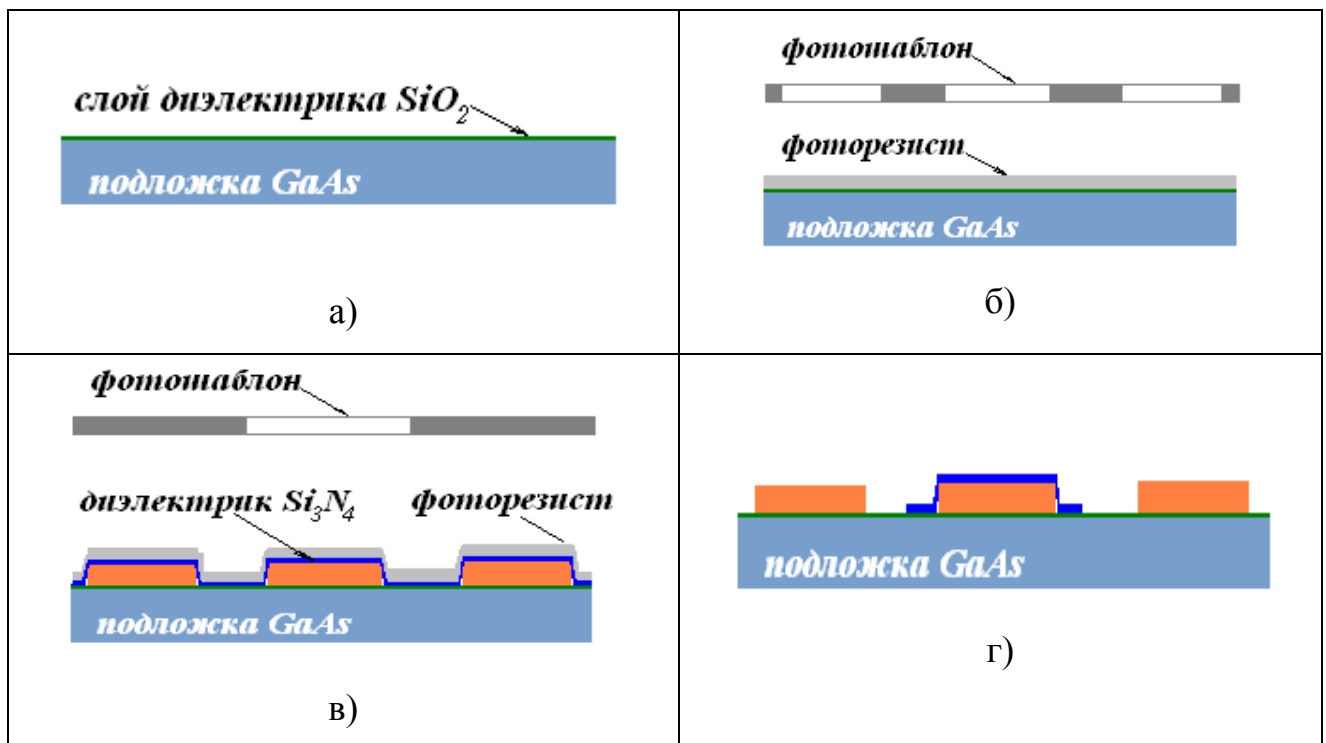


Рис. 31. Основные этапы изготовления СВЧ коммутаторов сигнала на основе GaAs по технологии МЭМС.

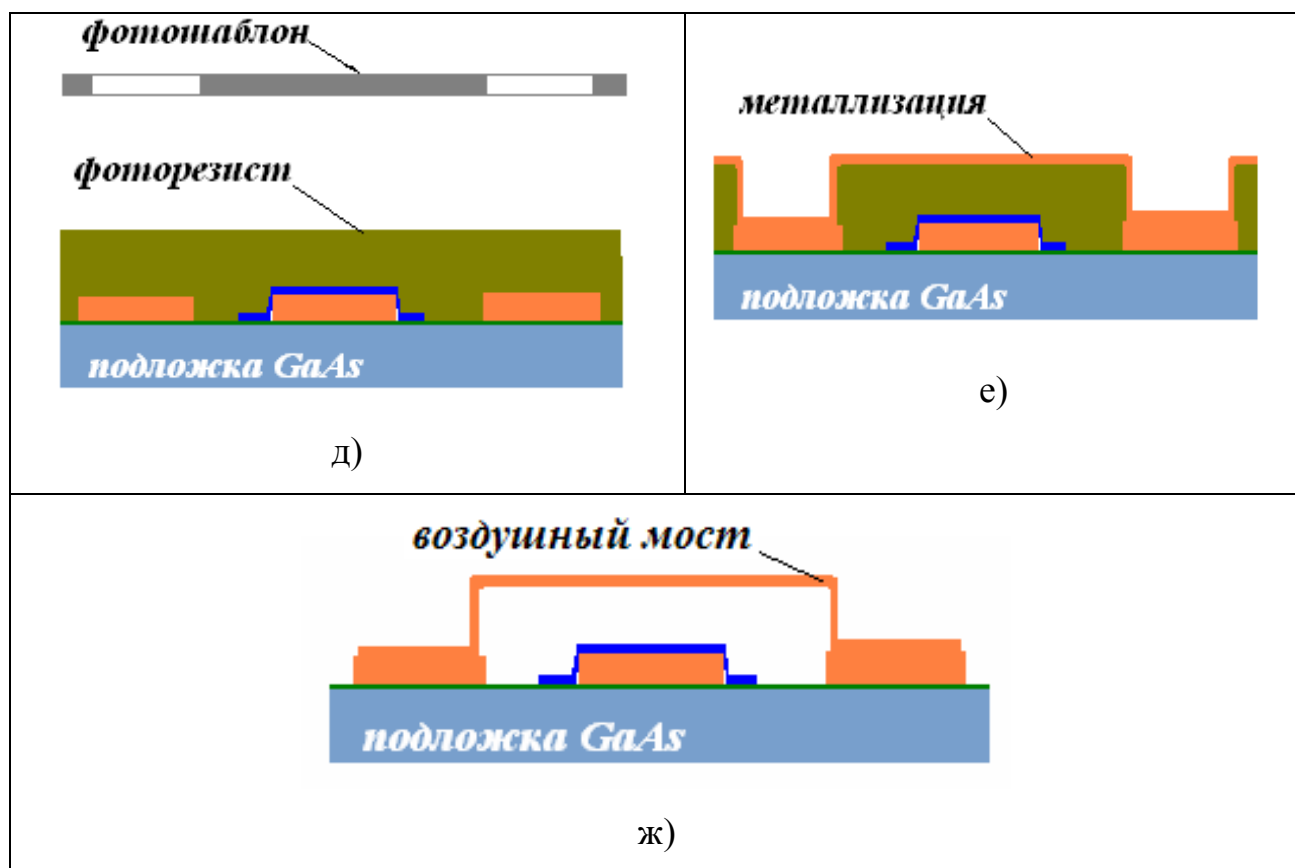


Рис. 32. Основные этапы изготовления СВЧ коммутаторов сигнала на основе GaAs по технологии МЭМС.

где: а) подготовка подложки (нанесение непроводящего слоя, либо жидкостное химическое травление (ЖХТ) проводящих слоев); б) формирование нижнего электрода и опор воздушного моста; в) пассивация нижнего электрода; г) реактивное ионное травление диэлектрика и снятие фоторезиста; д) формирование «жертвенного слоя»; е) формирование воздушного моста; ж) удаление «жертвенного слоя» и лишнего металла ЖХТ.

3.2 Изготовление МЭМС переключателя

На основе имеющихся лабораторных технологий и комплекта фотошаблонов, приведенных в приложении А, а также на основании расчетов, приведенных в предыдущей части работы были изготовлены макеты МЭМС переключателей. Маршрут изготовления макетов приведен в приложении Б.

В ходе изготовления МЭМС переключателей были проведены необходимые измерения, а также, выполнены соответствующие снимки на оптическом и электронном микроскопах.

а) Подготовка подложки (нанесение непроводящего слоя, либо жидкостное химическое травление (ЖХТ) проводящих слоев).

Подготовка подложки к технологическому процессу включала в себя удаление окислов с поверхности пластины. Для этого применялся раствор $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}=1:40$, в котором пластины отмывались в течении 2х минут, а затем сушились при помощи центрифуги.

б) Формирование нижнего электрода и опор воздушного моста.

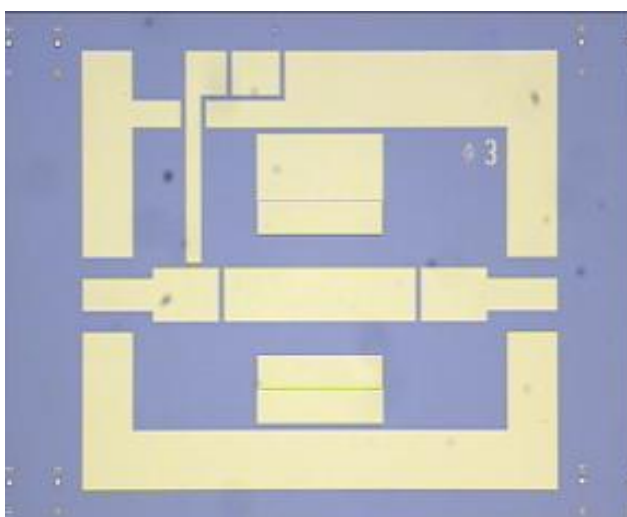


Рис. 33. Снимок после формирования нижних электродов, контактных площадок и нижних обкладок развязывающих конденсаторов со сформированными опорами моста.

Рисунок нижнего электрода и опор воздушного моста формировался на пластине с использованием фоторезиста. Систему фоторезистов наносили методом центрифугирования, формировали рисунок методом оптической фотолитографии на установке контактной фотолитографии МJB-4, затем проявляли и высушивали пластину с фоторезистом. Далее напыляли слои металла Ti (500\AA) – Au (3000\AA) на установке УВН-2М резистивным методом.

Далее происходил взрыв фоторезиста в растворе диметилформамида и ацетона, результат операции показан на рис. 33.

в) Пассивация нижнего электрода,

г) Реактивное ионное травление диэлектрика и снятие фоторезиста.

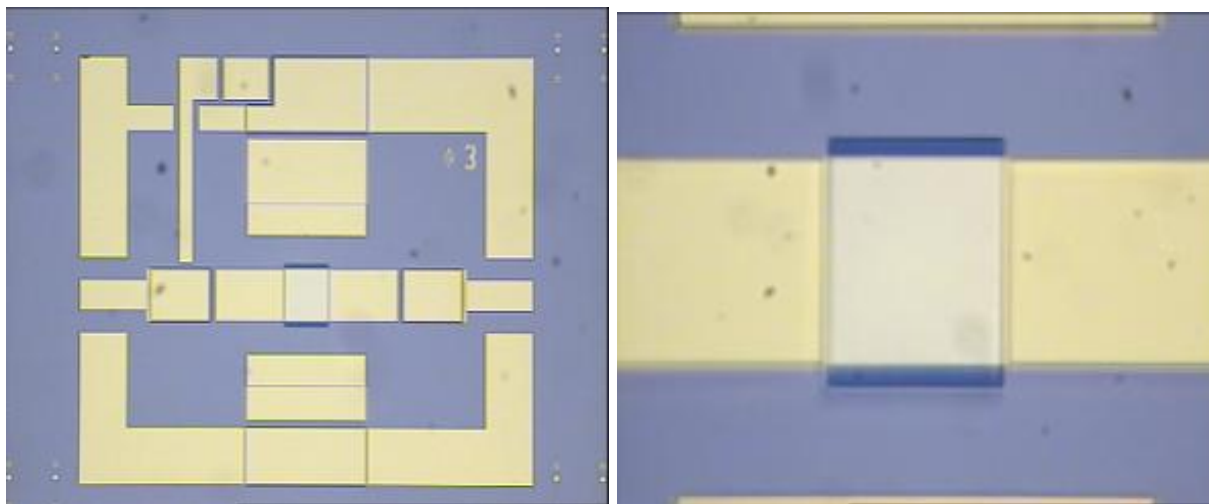


Рис. 34 Снимок после пассивации СВЧ линии с нижними электродами и сформированными верхними обкладками развязывающих конденсаторов и утолщениями опор моста.

Для выполнения развязки по постоянному управляющему напряжению наносился слой диэлектрика Si_3N_4 толщиной 0,12 мкм на установке PlasmaLab 100 (температура нанесения 280°C, газовая смесь SiH_4/N_2). Затем наносился фоторезист для формирования рисунка пассивирующего слоя с последующим травлением в индуктивно-связанной плазме в установке травления SI-500 (Рис. 34). После этого проводилась операция по формированию верхних обкладок конденсаторов, развязывающих управляющий сигнал от СВЧ линии с помощью напыления металлов Ti (500Å) – Au(5000Å) на установке УВН-2М резистивным методом.

д) Формирование «жертвенного слоя».

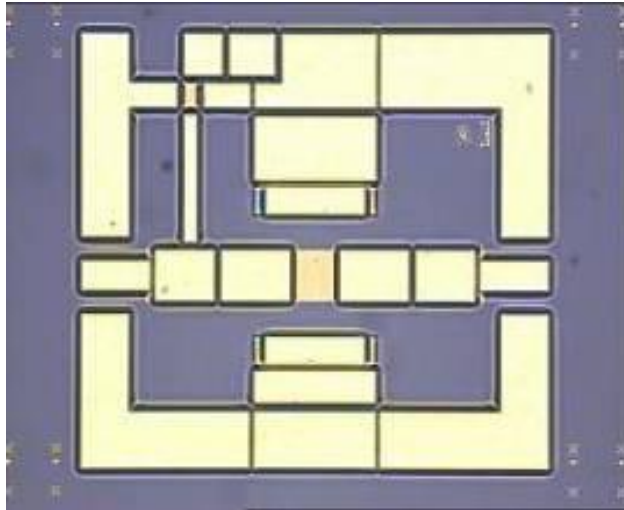


Рис. 35. Снимок после формирования «жертвенного слоя».

«Жертвенный слой» формировался с помощью позитивного фоторезиста S1815 толщиной 2.5 мкм.

е, ж) Формирование воздушного моста и удаление «жертвенного слоя» и лишнего металла посредством жидкостного химического травления (ЖХТ).

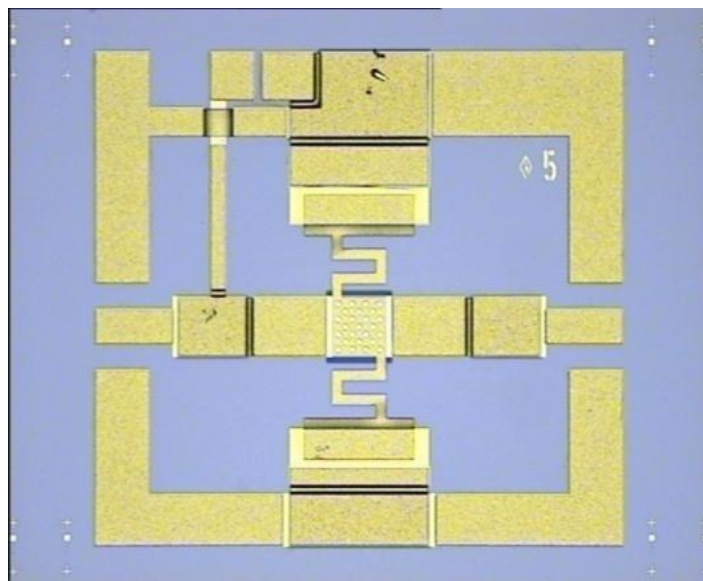


Рис. 36. Фотография изготовленного СВЧ МЭМС коммутатора сигнала с толщиной мембраны 2 мкм.

После формирования «жертвенного слоя» напылялся затравочный слой Ti-Au-Ti, на который гальванически через фоторезистивную маску осаждался слой золота толщиной 1,5 мкм. Далее наносилась фоторезистивная маска и формировалась мембрана с отверстиями за счет травления затравочного слоя.

«Жертвенный слой» на последних стадиях удалялся из под металла (затравочного слоя), что необходимо для обеспечения требуемого зазора между мембраной и нижними электродами. Удаление «жертвенного слоя» является главной особенностью изготовления МЭМС переключателей в процессе изготовления полупроводниковых приборов на основе GaAs. Следует отметить, что при изготовлении воздушных мостов при удалении «жертвенного слоя» не возникает эффекта слипания за счет большей жесткости конструкции воздушных мостов.

3.3 Удаление «жертвенного слоя» при изготовлении МЭМС переключателя

При жидкостном удалении «жертвенного слоя» возникает проблема так называемого залипания мембран. Это связано с тем, что во время сушки капиллярные силы притягивают мембрану к подложке и вызывают прилипание мембраны к подложке за счет сил водородных связей (сил Ван-дер-Ваальса). Также прилипание мембраны к основанию может возникать при конденсации воды на шероховатостях мембраны и подложки и последующего возникновения капиллярного эффекта (рис. 37).

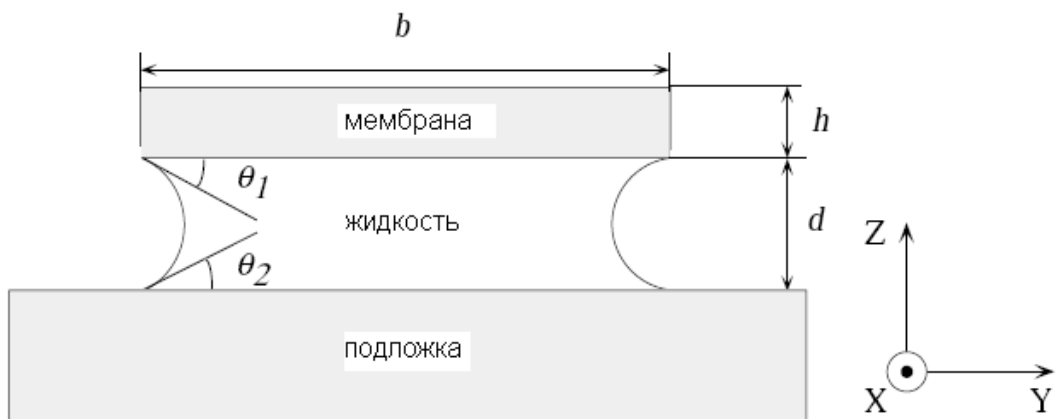


Рис. 37. Сечение МЭМС переключателя при сушке.

3.3.1 Удаление «жертвенного слоя» жидкостными методами

После жидкостного удаления «жертвенного слоя» для предотвращения слипания мембран за счет Ван-дер-Ваальсовских сил притяжения мембраны к подложке применяют сублимационную сушку и сушку при критической температуре. При сублимационной сушке, для устранения капиллярного эффекта, органический растворитель удаляется при помощи замещением промывкой другим химическим реактивом который, в свою очередь, удаляется при помощи замораживания с последующей сублимацией раствора в вакуумной камере. Этот метод впервые применен Guckel и Burns [52]. Известным недостатком метода сублимационной сушки является то, что промывочный раствор может подвергаться значительным изменениям объема при замораживании, что может вызвать напряжения, достаточные для разрушения образца.

Наиболее часто применяются реактивы для сублимационной сушки, представленные в таблице 4.

Таблица 4. Характеристики химических реактивов используемых для сублимационной сушки.

Вещество	Температура плавления (°C)	Давление насыщенных паров при температуре плавления (торр)
Трет бутильный спирт	25,5	
Циклогексан	6,6	40
Смесь воды и метанола (10%) [50]	-10	1,95

Смесь воды и метанола используется для уменьшения коэффициента расширения воды при замерзании, поэтому у этого метода есть существенный

недостаток – возможно оттаивание образца в ходе сушки и возникновение капиллярного эффекта. Также возможно повреждение мембраны при замерзании данной смеси.

Трет бутыловый спирт [53] и циклогексан менее подвержены этому недостатку, поскольку их температура плавления значительно выше, кроме того, циклогексан обладает некоторыми преимуществами: благодаря тому, что при температуре 6,6 °С он имеет очень высокое давление насыщенных паров (40 мм. рт. ст) [54] и сублимируется очень быстро, при этом являясь пластичным материалом. Он не разрушает и не вносит внутренние напряжения в мембраны МЭМС переключателей, обеспечивая высокий процент выхода годных при удалении растворителя «жертвенного слоя» МЭМС переключателей.

При использовании метода сушки при критической температуре, промывочный раствор постепенно заменяется жидким CO_2 при повышенном давлении внутри камеры высокого давления [37, 38]. Затем давление и температуру изменяют так, что CO_2 находится в критической точке, где нет границы раздела между жидкостью и газом.

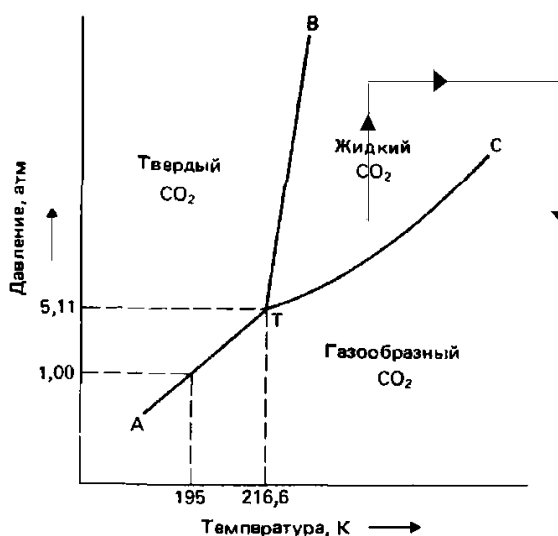


Рис. 38. Фазовая диаграмма диоксида углерода и ход сверхкритической сушки

Этот метод является весьма успешным, выход годных достигает 100%. Коммерчески применяется уже более 20 лет, при этом доступны установки для любого размера пластин. Основная сложность технологии – это обеспечение безопасности, так как для достижения критической точки требуется высокое давление (более 72 атм) и работа с диоксидом углерода, выброс которого в малом объёме помещения может угрожать жизни персонала [55].

3.3.2 Сухое травление

При изготовлении некоторых МЭМС используется технология сухого травления «жертвенного слоя» [56]. Операция жидкостного травления затруднена, если «жертвенный слой» содержит кремний (например, диоксид кремния), так как требуются сильные травители, которые не имеют хорошей селективности по отношению к материалам стоп-слоя. Так же, сухое травление наиболее часто применяется при травлении «жертвенного слоя» на основе полимеров в кислородной плазме, которая не оказывает разрушающего воздействия на другие материалы. Но стоит учесть, что при частичном удалении «жертвенного слоя» из-под мембраны ухудшается отвод тепла от поверхности металлической мембраны вглубь полупроводниковой пластины. Из-за этого металлическая мембрана начинает неконтролируемо разогреваться, что может привести к короблению мембраны.

3.4 Технологические процессы для удаления «жертвенного слоя»

При создании МЭМС переключателя использовались два метода удаления «жертвенного слоя»:

- удаление полимера в кислородной плазме;
- метод сублимационной сушки.

3.4.1 Удаление «жертвенного слоя» в кислородной плазме

Для удаления «жертвенного слоя» в кислородной плазме использовалась установка 08ПХО-100Т. Параметры процесса использовались стандартные, для

операции зачистки в кислородной плазме - $P_{\text{раб.}} - 50$ Па, среда O_2 , мощность 150 Вт. Процесс проводился циклически: время воздействия кислородной плазмы составляло 10 минут, после чего разряд выключался, напускался азот до давления 300 Па в течение 10 минут, и далее снова зажигался разряд. Такой процесс позволял уменьшить тепловое воздействие на мембраны, так как пластина охлаждалась между воздействиями на нее кислородной плазмой.

Основными недостатками данного процесса является значительная продолжительность во времени – около 3-х часов в пересчете на непрерывную обработку плазмой, и сложности удаления остатков фоторезиста из-под сплошных мембран из-за уменьшения интенсивности поступления радикалов и ионов кислорода вглубь зазора между металлической мембраной и управляющим электродом. Кроме этого, металлические мембраны МЭМС переключателей коробились из-за нагрева в ходе процесса, как это будет показано ниже.

3.4.2 Удаление «жертвенного слоя» сублимационной сушкой

Удаление «жертвенного слоя» сублимационной сушкой выполняется в ходе следующей последовательности операций:

- Очистка кислородной плазмой - 08ПХО-100Т, $P_{\text{раб.}} - 50$ Па, среда O_2 , мощность 150 Вт, время 8 минут
- Травление во фторсодержащей плазме – SI500 SF_6 15 см³/мин, O_2 4 см³/мин, $P_{\text{раб.}} - 6,2$ Па, $ICP_{\text{мощность}} - 200$ Вт, время 90 сек.
- Очистка кислородной плазмой - 08ПХО-100Т, $P_{\text{раб.}} - 50$ Па, среда O_2 , мощность 150 Вт время 8 минут
- Снятие фоторезиста – N-метилпирролидон (ч.д.а.), 80 °С, 10 минут
- Промывка в изопропиловом спирте (о.с.ч.)
- Промывка в циклогексане (ч.д.а.) и смена циклогексана на свежий

- Замораживание циклогексана при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, и сублимационная сушка, окончание процесса – падение давления до 10 Па
- Очистка кислородной плазмой - 08ПХО-100Т, $P_{\text{раб.}} - 50\text{ Па}$, среда O_2 , мощность 150 Вт, время 4 минуты

Первые три операции плазменного травления «жертвенного слоя» связаны с модификацией поверхности фоторезиста в процессе напыления затравочного слоя металла и последующих процессов выращивания гальванического слоя золота и химического травления затравочного слоя металла. Далее фоторезист удалялся в N-метилпирролидоне при температуре $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, после чего пластина промывалась изопропиловым спиртом и далее изопропиловый спирт замещался циклогексаном.

Одним из наиболее важных моментов удаления «жертвенного слоя» являлась тщательная отмывка в циклогексане от изопропилового спирта и остатков N-метилпирролидона в промежутке между мембраной и управляющим электродом. При плохой промывке циклогексаном, остатки растворителя вызовут капиллярный эффект при сублимации циклогексана, и последующее ее слипание мембраны с управляющим электродом.

Основное преимущество циклогексана в том, что при комнатной температуре он находится в жидкой фазе. Благодаря этому, и смешиваемости со спиртами [54] и N-метилпирролидоном [57] возможна более тщательная отмывка. При использовании третбуанола, с температурой плавления $25,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ приходилось разогревать жидкость предназначенную для сублимационной сушки мембран. Разогрев сублимационной жидкости влечет за собой ее более интенсивное испарение и некоторые трудности при промывке пластины.

Заключительным этапом процесса удаления «жертвенного слоя» является удаление остатков органических веществ, с поверхности пластины, при помощи кратковременного воздействия в кислородной плазме. Далее изготовленные приборы проверялись на работоспособность на LCR-метре.

3.5 Этапы изготовления МИС на основе арсенида галлия и МЭМС переключателей.

В приложении Б дана последовательность технологических операций при изготовлении МЭМС переключателя, в приложении В дана последовательность технологических операций при изготовлении макетных образцов СнК со встроенными МШУ на гетероструктурах AlGaAs/InGaAs/GaAs [58,59]. Проведем в таблице 5 сравнение основных этапов изготовления обоих полупроводниковых приборов для оценки совместимости маршрутов и возможности унификации.

Таблица 5. Сравнение технологических маршрутов изготовления МШУ на основе гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs и технологического маршрута изготовления МЭМС переключателя.

<p align="center">Последовательность технологических операций при изготовлении МЭМС переключателя</p>	<p align="center">Последовательность технологических операций при изготовлении макетных образцов СнК со встроенными МШУ на гетероструктурах AlGaAs/InGaAs/GaAs</p>
Подготовка поверхности пластины	Приборная изоляция
Формирование нижнего электрода, контактных площадок и нижних обкладок развязывающих конденсаторов	Омические контакты
	Формирование затвора длиной <0,15 мкм

Таблица 5 (продолжение). Сравнение технологических маршрутов изготовления МШУ на основе гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs и технологического маршрута изготовления МЭМС переключателя.

<p align="center">Последовательность технологических операций при изготовлении МЭМС переключателя</p>	<p align="center">Последовательность технологических операций при изготовлении макетных образцов СнК со встроенными МШУ на гетероструктурах AlGaAs/InGaAs/GaAs</p>
Формирование опор моста	
Формирование пассивации СВЧ линии и нижних электродов	Пассивация активных поверхностей
Формирование верхних обкладок развязывающих конденсаторов и утолщения опор моста.	Формирование первого уровня электрических межсоединений
<p>Формирование «жертвенного слоя» Гальваническое утолщение элементов конструкции МЭМС устройств. Обтрав лишнего металла и формирование отверстий в мембране</p>	Металлизация контактных площадок с «воздушными» мостами

Как видно из таблицы 5 маршрут изготовления дискретных электронных компонентов прекрасно согласуется с маршрутом изготовления МЭМС переключателя, а отличаются они только наличием операции формирования

затворов и операции формирования опор моста. Это показывает возможность изготовления СВЧ МЭМС переключателя в едином цикле совместно с МИС на базе AlGaAs/InGaAs/GaAs [60].

Выводы из третьей главы

В данной главе рассмотрена технология МЭМС переключателя, показаны основные технологические операции изготовления МЭМС переключателя, а именно:

- подготовка подложки;
- формирование нижнего электрода и опор воздушного моста;
- пассивация нижнего электрода, и реактивное ионное травление диэлектрика и снятие фоторезиста;
- формирование «жертвенного слоя»;
- удаление «жертвенного слоя».

По этой технологии изготовлены МЭМС переключатели с различными типами мембран (с отверстиями в мембране и без таковых), а также с различной толщиной мембраны – 2 мкм и 0,5 мкм (0,5 мкм золота напылялось термически, 1,5 мкм золота осаждалось гальванически). Отверстия в мембране изготавливались с целью уменьшения внутренних напряжений и для лучшего удаления «жертвенного слоя».

Основным важным отличием процесса изготовления СВЧ МЭМС устройств от стандартной технологии изготовления дискретных полупроводниковых приборов на GaAs является удаление «жертвенного слоя» из-под мембраны МЭМС переключателя. Данная проблема решалась при помощи выжигания остатков фоторезиста из-под мембраны в кислородной плазме, процессом жидкостного удаления полимера в растворителе и последующей сублимационной сушке в циклогексане.

Сравнение базовых операций изготовления МШУ на AlGaAs/InGaAs/GaAs и МЭМС переключателей показали возможность

изготовления МЭМС переключателя и полупроводниковых приборов на базе арсенида галлия в едином технологическом цикле.

Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ СВЧ ПАРАМЕТРОВ И НАПРЯЖЕНИЯ СРАБАТЫВАНИЯ ИЗГОТОВЛЕННЫХ МАКЕТОВ МЭМС ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ.

По описанному в приложении Б маршруту были изготовлены макеты сверхвысокочастотных коммутаторов сигналов на основе арсенида галлия (GaAs) по планарной технологии. В данном разделе проведены исследования полученных макетов и по результатам исследования оценен предложенный маршрут и топология, изготовленных макетов.

Для оценки напряжения срабатывания, изменения емкости полученных СВЧ коммутаторов сигналов на подложках арсенида галлия производились измерения вольт-фарадных характеристик.

Для оценки вносимых потерь и изоляции СВЧ сигнала коммутаторы сигнала на подложках арсенида галлия были сняты их S-параметры, в верхнем и нижнем положениях.

4.1 Измерение вольт-фарадных характеристик переключателя сигнала

Измерения проводились на зондовой станции, подсоединенной к CLR-метру Hewlett Packard 4284A. При этом CLR-метр подсоединялся к компьютеру для записи и обработки полученных результатов. По измеренным вольт-фарадным характеристикам оценивалось изменение емкости при приложении напряжения между управляющим и верхним электродами, которое за счет электростатических сил приводило к изменению расстояния между этими электродами. Так же по вольт-фарадным характеристикам оценивались рабочие напряжения МЭМС устройства. CLR-метр позволяет производить измерения до 32,5 В. Измерительный стенд представлен на рис. 39.



Рис. 39. Внешний вид измерительного стенда для снятия вольт-фарадных характеристик

До снятия вольт-фарадных характеристик проводилась калибровка прибора. После этого зонды устанавливались на исследуемую структуру и производились измерения при заранее заданных значениях напряжений с определенным шагом. Подача управляющего напряжения на исследуемую структуру осуществлялась непосредственно через зонды. Результаты измерения сохранялись в персональном компьютере, в котором с помощью соответствующего программного обеспечения производилась обработка и визуализация результата измерения.

4.2 Методика экспериментального исследования МЭМС устройств в динамическом режиме.

Основной способ исследования МЭМС устройств в динамическом режиме заключается в измерении малосигнальных S-параметров. При этом важным фактором является возможность проведения так называемых зондовых измерений, т.е. измерений, выполняемых непосредственно на неразрезанной

полупроводниковой пластине при помощи СВЧ зондов. Такой способ измерений позволяет проводить оперативную аттестацию и отбор изделий непосредственно после изготовления без необходимости выполнения операций по резке, разварке и корпусированию, а в некоторых случаях проводить контроль изделий в процессе изготовления. Таким образом, появляется возможность анализа S-параметров исследуемых образцов сразу после изготовления без влияния на их работоспособность посторонних факторов.

Для проведения зондовых измерений малосигнальных S-параметров был собран измерительный стенд (рис. 40). В состав стенда входят:

- векторный анализатор PNA E8361A производства фирмы Agilent technologies;
- СВЧ зонды I67-A-GSG-150 производства фирмы Cascade Microtech (рис. 46, 47);
- зондодержатели MPH производства фирмы Cascade Microtech;
- зондовый стол ЭМ-6030;
- источники постоянного напряжения;
- персональный компьютер со специализированным программным обеспечением.

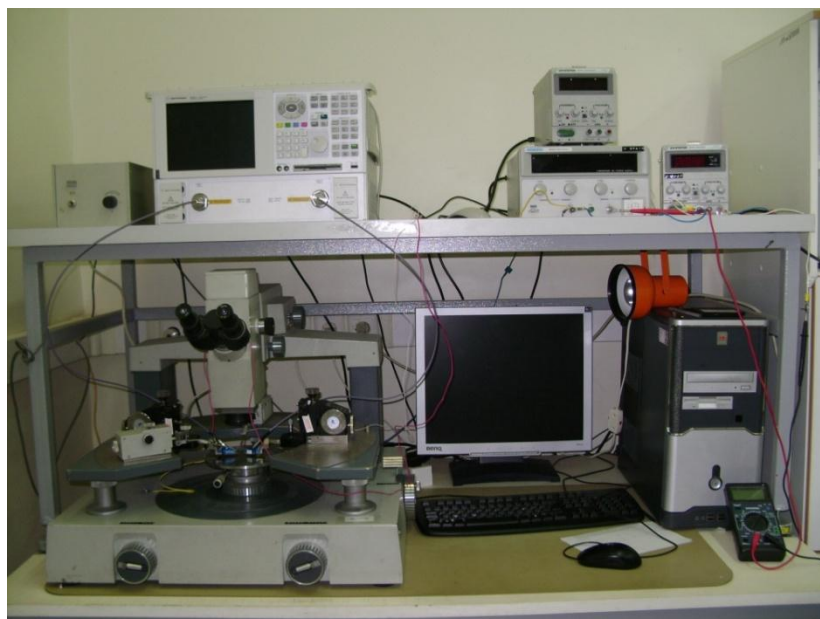


Рис. 40. Измерительный стенд

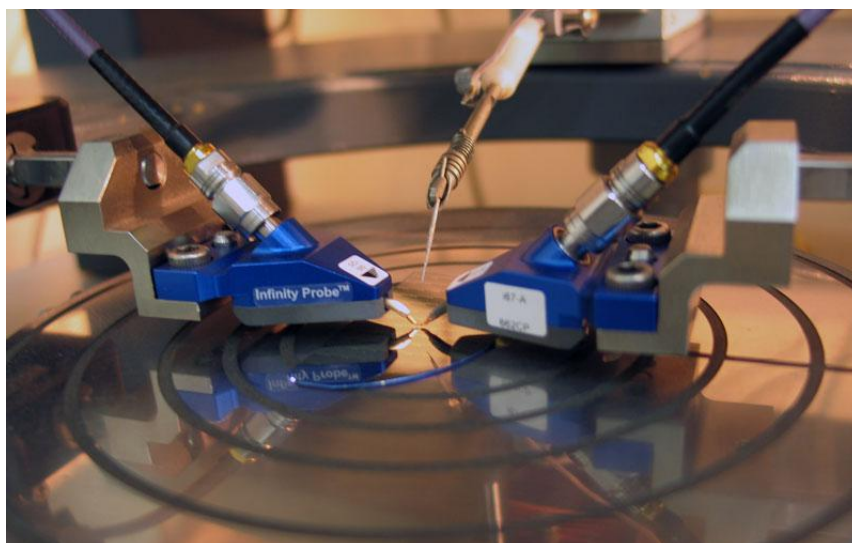


Рис. 41. Приборный столик с измеряемой пластиной, СВЧ зондами и иглой для подачи постоянного напряжения питания.



Рис. 42. Зонды Infinity I67-A-GSG-150, используемые при измерениях.

Прежде чем приступить к измерениям, необходимо выполнить калибровку. Для устранения одной или нескольких систематических ошибок измерений проводилась калибровка измерительного стенда. Точность калибровки зависит от качества мер из калибровочного комплекта и от того, насколько точно калибровочные меры описываются моделью в файле определения калибровочного комплекта. Калибровка позволяет векторному анализатору выставить референсную плоскость измерения S -параметров в произвольном месте цепи прохождения сигнала. Как правило, при зондовых измерениях, этой позицией является плоскость игловок зонда. Методы калибровки подразумевают проведение измерений определенного набора калибровочных мер (находящихся, например, на специальных пластинах калибровочных мер -

impedance standard substrate (ISS)). Стандартные калибровочные меры включают в себя линии передачи, нагрузки, элементы «короткое замыкание» и «холостой ход».

4.3 Измерения вольт-фарадных и S-параметров переключателей, «жертвенный слой» которых удален при помощи кислородной плазмы.

4.3.1 Вольт-фарадные характеристики СВЧ коммутаторов сигналов

Показанный выше, на рис. 36, СВЧ переключатель сигнала исследовался на измерительном стенде для снятия вольт-фарадных характеристик. По результатам измерения вольт-фарадных характеристик оценивались напряжение срабатывания и влияющий на емкость воздушный зазор между сработавшей мембраной и управляющим электродом. Используемый стенд имеет ограничение по управляющему напряжению до 32,5 В.

Для определения факторов вносящих решающий вклад в ёмкостную составляющую СВЧ коммутатора сигналов были проведены измерения CV-характеристик на LCR-метре HP4284A в диапазоне от 0 до 30 В с шагом в 1 В. В этом диапазоне напряжений происходило срабатывание мембраны и изменение ёмкости переменного конденсатора до значения, которое в дальнейшем считали рабочей ёмкостью. Мембраны были изготовлены из золота толщиной 2 мкм, 1 мкм и 0,5 мкм. При этом 0,5 мкм слой золота был напылен термически в качестве затравочного слоя, а 1,5 мкм или 0,5 мкм золота были осаждены гальваническим методом. Результаты измерений представлены на рис. 43 – 47.

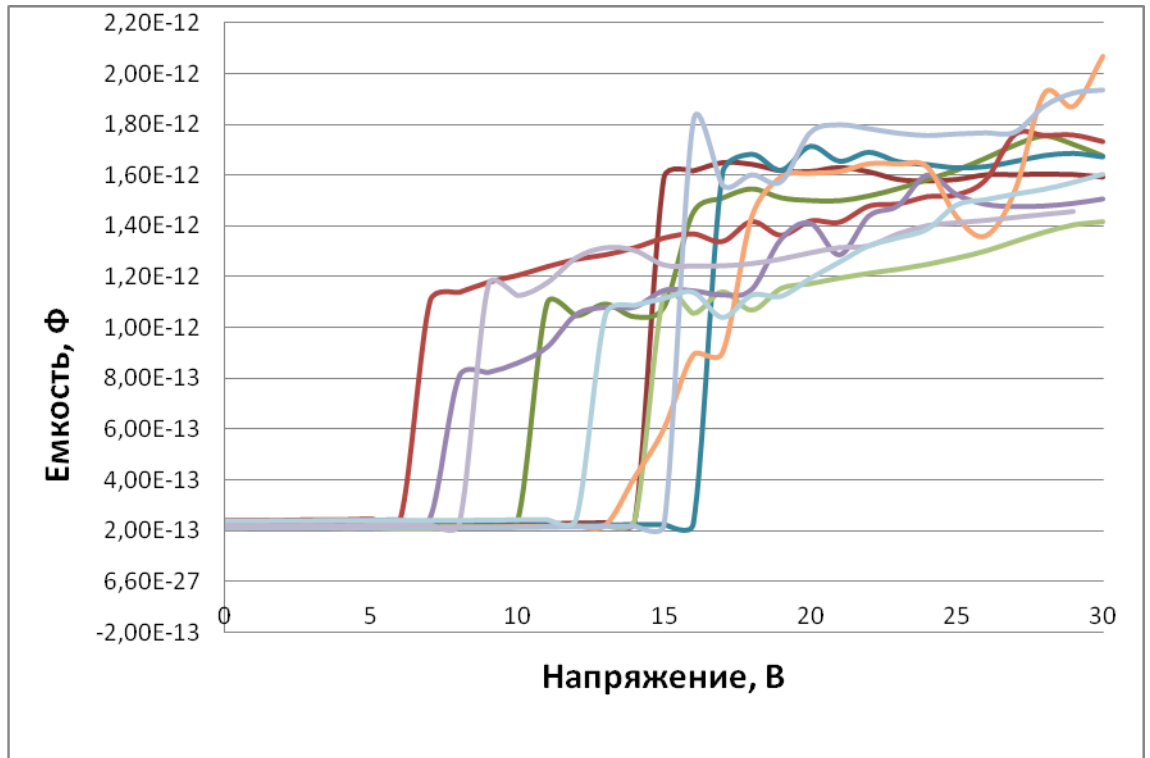


Рис. 43. CV-характеристики 5 типа СВЧ коммутатора сигналов с мембраной с гальваническим покрытием 1.5 мкм без отверстий

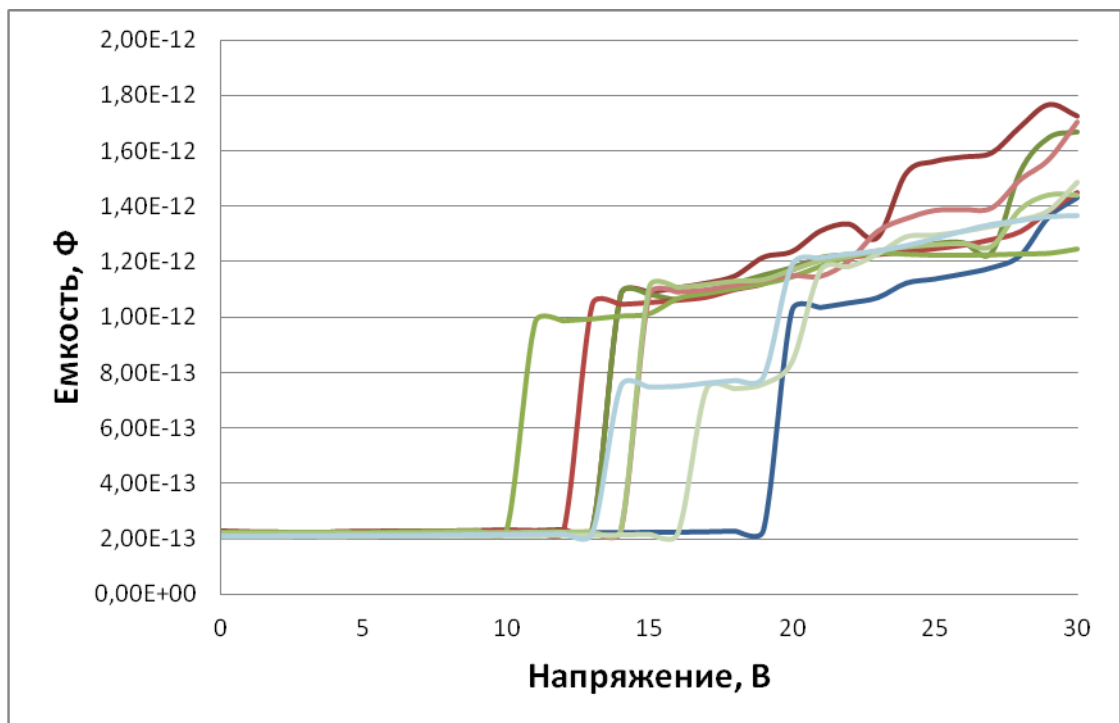


Рис. 44. CV-характеристики 5 типа СВЧ коммутаторов сигналов с мембраной с гальваническим покрытием 1.5 мкм с отверстиями

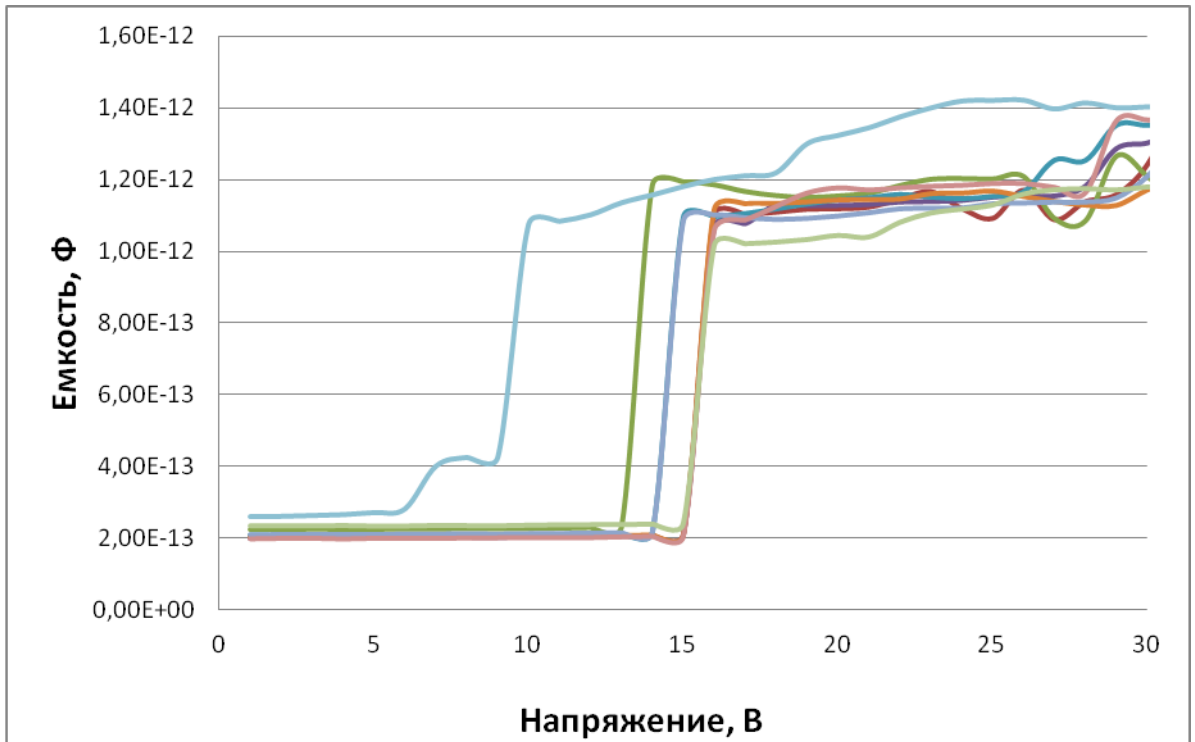


Рис. 45. CV-характеристики 5 типа СВЧ коммутаторов сигналов с мембраной с гальваническим покрытием 0.5 мкм с отверстиями

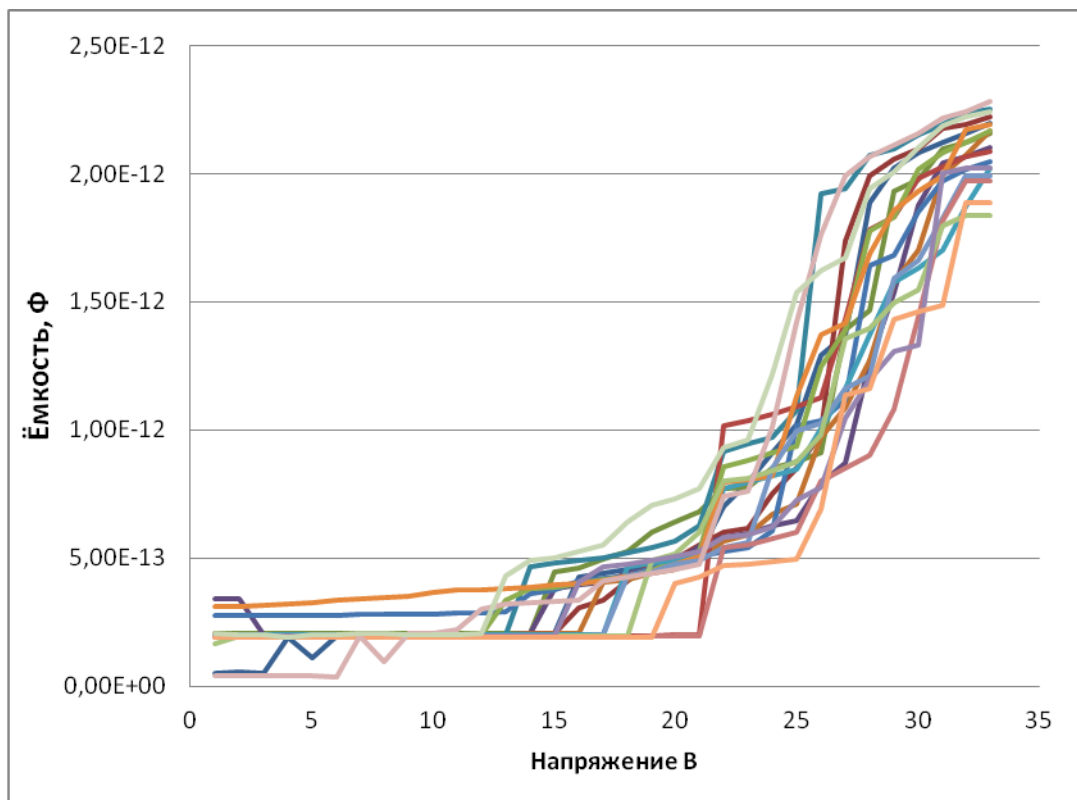


Рис. 46. CV характеристики 5 типа СВЧ коммутаторов сигналов с мембраной без гальванического покрытия и с отверстиями

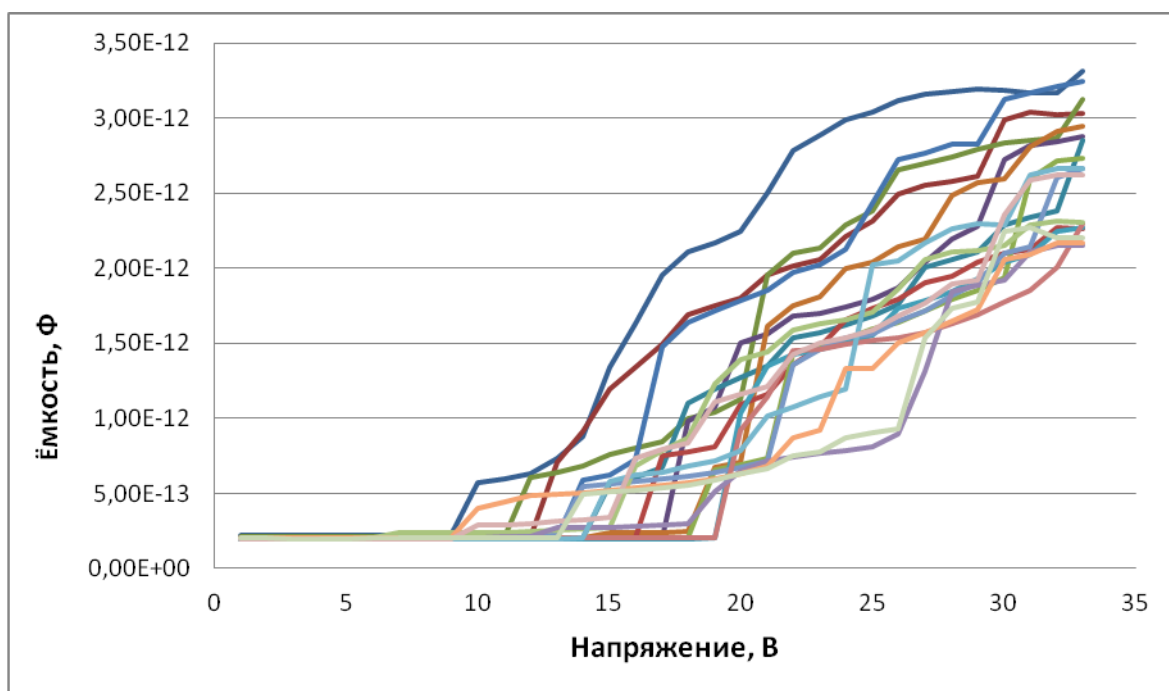


Рис. 47. CV характеристики 5 типа СВЧ коммутаторов сигналов с мембраной без гальванического покрытия и без отверстий в мембране

Напряжение срабатывания МЭМС переключателей не превысило 20 В.

В таблице 6 приведены средние емкости мембран при управляющем напряжении 30 В и максимальное напряжение срабатывания для МЭМС переключателей с различной толщиной мембраны.

Таблица 6. Среднее значение емкости мембран и напряжение срабатывания, по данным вольт-фарадных характеристик

Тип мембраны		Средняя емкость пФ, при 30 В	Напряжение срабатывания, В
Толщина 2 мкм	с отверстиями	1,58	19
	без отверстий	1,69	16
Толщина 1 мкм	с отверстиями	1,3	15
Толщина 0.5 мкм	с отверстиями	2,13	21
	без отверстий	2,75	19

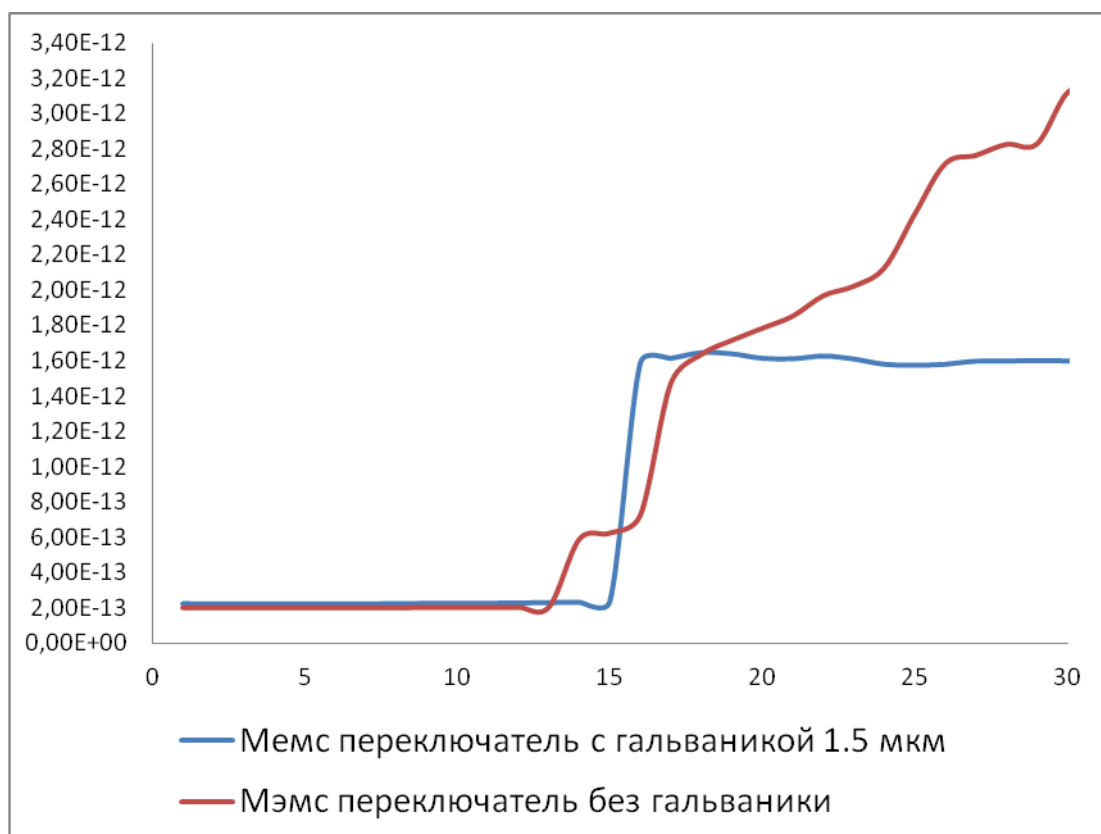


Рис. 48. Сравнение характерных вольт-фарадных характеристик мембран с различной толщиной

На рис. 48 после срабатывания МЭМС переключателя видно, что напряжение срабатывания мембраны с гальваническим покрытием (толщина 1,5 мкм) составило 15 В, после чего ёмкость мембраны сохранялась практически постоянной до напряжения 30 В. У МЭМС переключателя без гальванического покрытия (толщина 0,5 мкм) напряжение срабатывания составило 13 В и начиная с 13 В емкость монотонно возрастает.

Причиной является коробление мембраны в переключателях без гальванического покрытия за счет меньшей жесткости самой мембраны и наличия внутренних напряжений в мембране. При срабатывании переключателя притянутая мембрана к электроду начинает расправляться на электроде, значительно увеличивая емкость.

Но для применения переключателя необходимо, чтобы емкость сработавшего переключателя была стабильна. Из этого следует, что для мембран толщиной 0,5 мкм необходимо подавать напряжение выше

напряжения срабатывания для стабилизации значения емкости, что неприемлемо при изготовлении переключателей емкостного типа с малыми напряжениями срабатывания. Кроме того, малая толщина мембраны, и, как следствие, крепления мембраны значительно повысит резистивную составляющую между СВЧ электродом и землей, что значительно снизит возможную мощность управляемого сигнала и понизит коэффициент изоляции сигнала.

4.3.2. S-параметры СВЧ МЭМС переключателей.

Все изготовленные варианты СВЧ коммутаторов сигналов изготовлены с площадками под зонды Infinity I67-A-GSG-150, используемые при измерениях S-параметров. Схема измерения с контактными площадками представлена на рис. 49. Ниже представлены измеренные S-параметры СВЧ МЭМС переключателей с отверстиями и без отверстий в мембране. Так как толщина мембраны не влияет на S-параметры, то на рисунках представлены характеристики СВЧ коммутаторов сигналов в разомкнутом состоянии для одного из вариантов (одинаковы для всех вариантов) и при опущенной мембране с отверстиями и без них. При этом варианты с отверстиями и без отверстий отличаются друг от друга, так как изменяется перекрываемая площадь и, следовательно, емкость мембрана - нижний электрод. Это видно на представленных кривых на рис. 50-51.

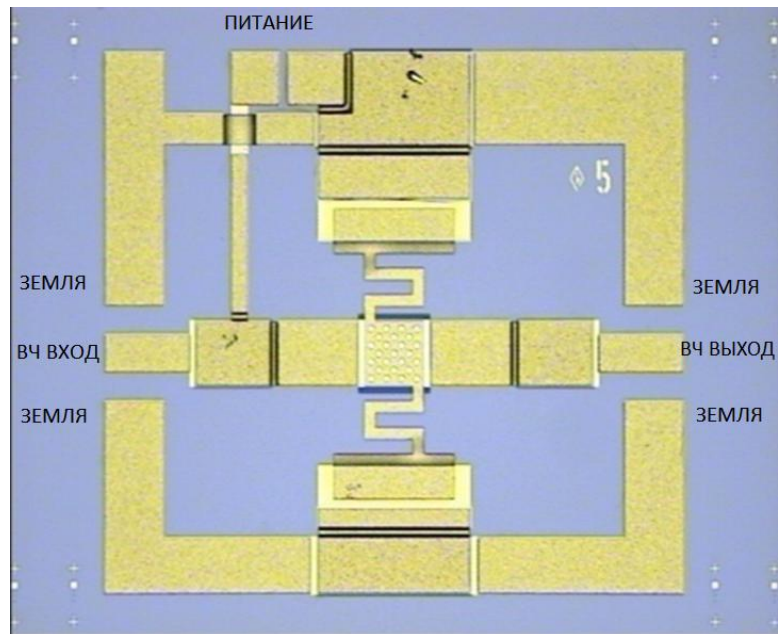


Рис. 49. Схема расположения контактных площадок

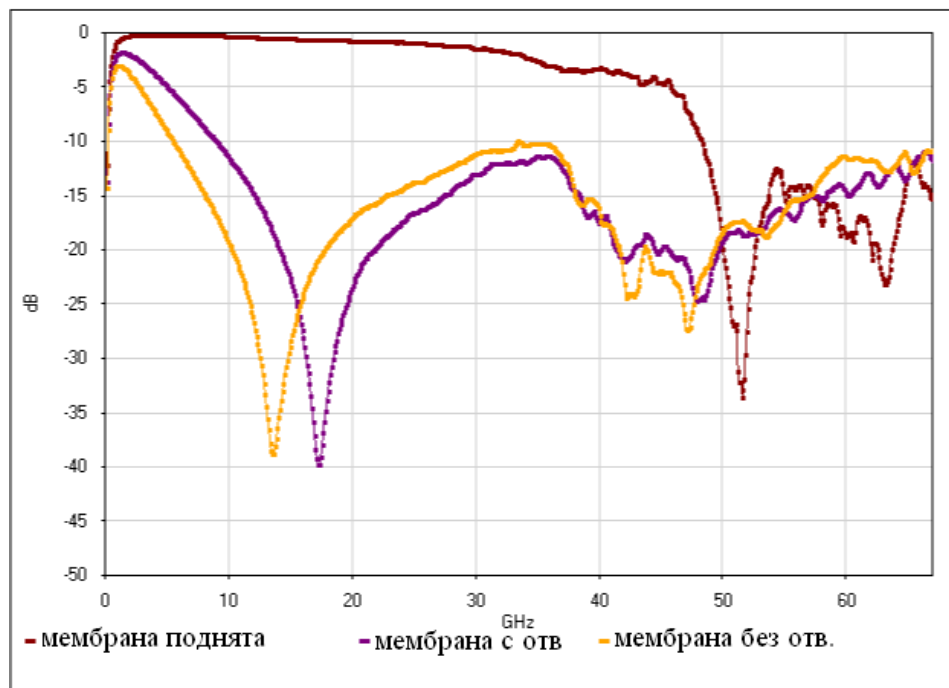


Рис. 50. S-параметры узкополосного типа СВЧ коммутатора сигналов с поднятой и залипшей мембранами

Для узкополосных переключателей получены следующие значения: коэффициент изоляции на 17 ГГц при опущенной мембране с отверстиями – 40

дБ, коэффициент изоляции на 13 ГГц при опущенной мембране без отверстий – 37 дБ, вносимые потери – 0,2 дБ.

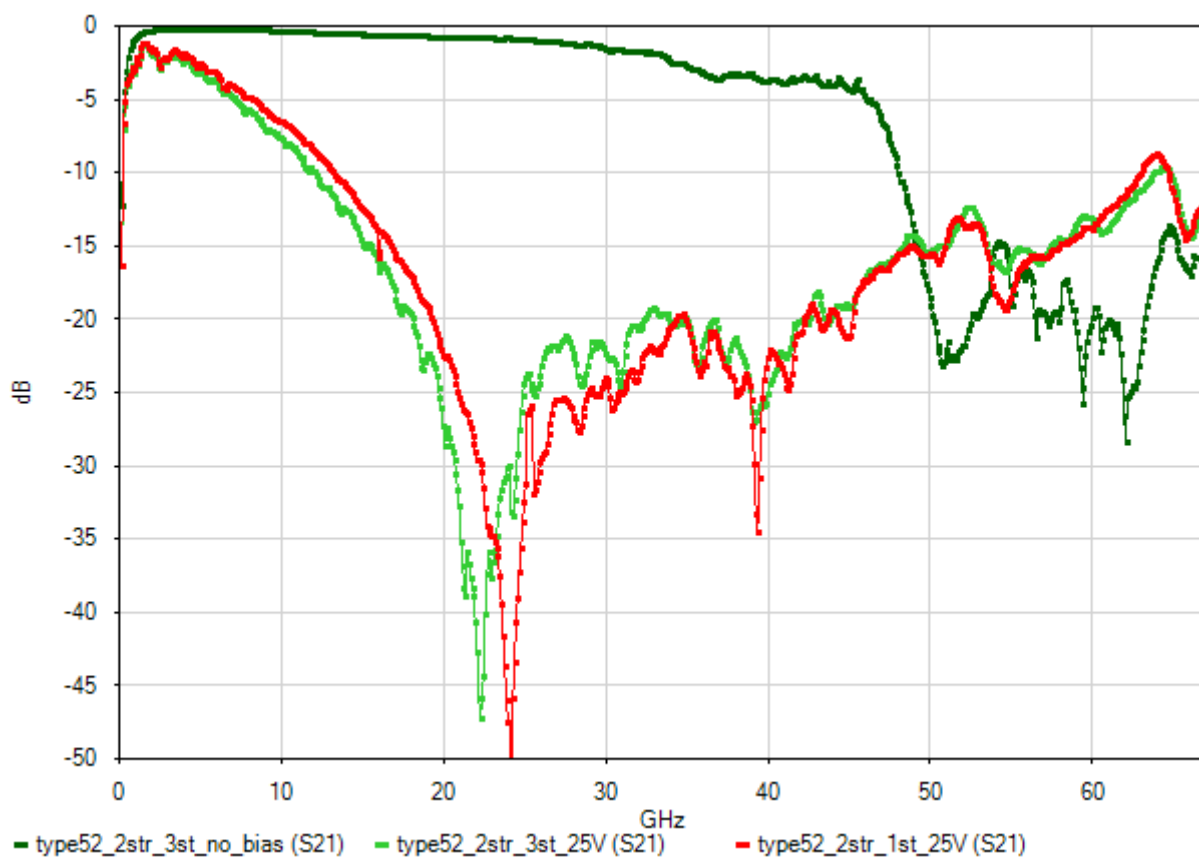


Рис. 51. Измеренная зависимость изоляции узкополосных СВЧ коммутатора от частоты для двух СВЧ коммутаторов сигналов

После изготовления СВЧ МЭМС коммутаторов измеренные резонансные частоты составила 22,2 ГГц и 24 ГГц (рис. 50). На данных частотах коэффициент изоляции составил 45 – 50 дБ, но для заданного диапазона (10-12 ГГц) коэффициент изоляции составил от 8 до 10 дБ. Несовпадение расчетных и полученных значений коэффициента изоляции в диапазоне 10-12 ГГц обусловлено, как показано выше, уменьшением емкости управляющего конденсатора.

4.4 Измерения вольт-фарадных и S-параметров переключателей, «жертвенный слой» которых удален при помощи сублимационной сушки.

4.4.1 Измерения вольт-фарадных характеристик СВЧ МЭМС переключателей

Показанный на рис. 49 СВЧ переключатель сигнала исследовался на измерительном стенде для снятия вольт-фарадных характеристик. По результатам измерения вольт-фарадных характеристик оценивались напряжение срабатывания и влияющий на емкость воздушный зазор между сработавшей мембраной и управляющим электродом.

Для определения факторов вносящих решающий вклад в ёмкостную составляющую СВЧ коммутатора сигналов были проведены измерения CV-характеристик на LCR метре HP4284A в диапазоне от 0 до 25 В с шагом в 1 В, с частотой измеряемого сигнала 1 МГц. В этом диапазоне напряжений происходило срабатывание мембраны и изменение ёмкости переменного конденсатора до значения, которое в дальнейшем считали рабочей ёмкостью. Мембраны были изготовлены из золота толщиной 2 мкм и 0,5 мкм. При этом, 0,5 мкм слой золота был напылен термически в качестве затравочного слоя, а 1,5 мкм золота были осаждены гальваническим методом. Из-за ошибки при травлении затравочного слоя золота, размеры мембран составили 87×87 мкм, толщина диэлектрика составила 1000 Å, мембраны с отверстиями не получились из-за растрыва мембраны. Результаты измерений представлены на рис. 52 и 53.

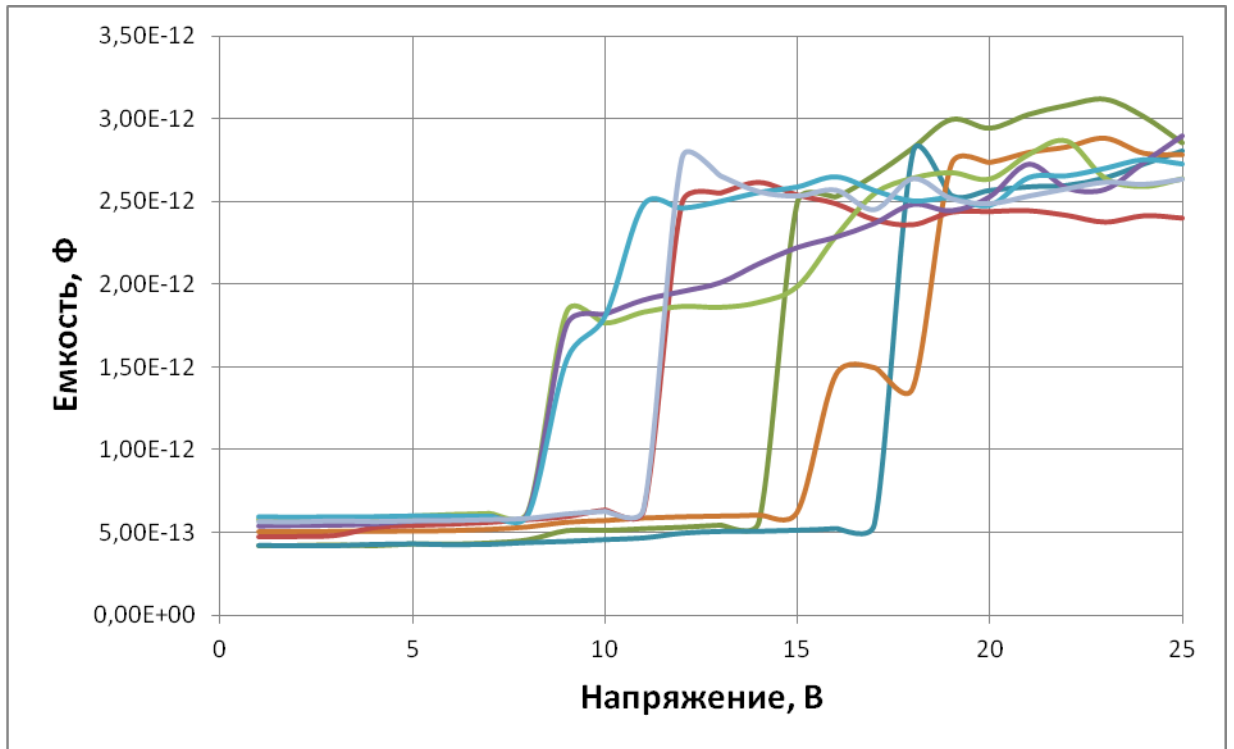


Рис. 52. Вольт-фарадные характеристики переключателя с мембраной толщиной 2 мкм

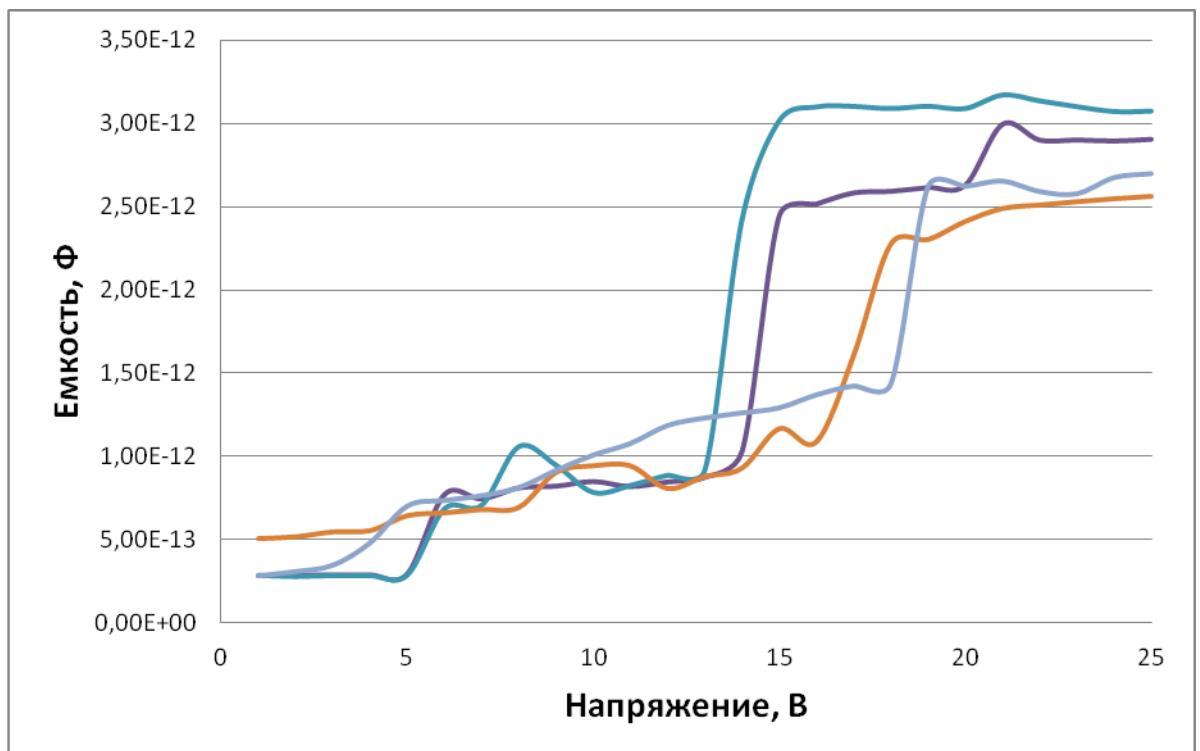


Рис. 53. Вольт-фарадные характеристики переключателя с мембраной толщиной 0,5 мкм

На рис. 52 и 53 видно, что мембраны с гальваническим покрытием золотом и без него, имеют сопоставимые емкости – среднее значение емкости мембран с гальваническим покрытием составило 2,66 пФ, а без гальванического покрытия 2,68 пФ. Напряжение срабатывания не превысило 18 В для двух типов мембран.

4.4.2. S-параметры СВЧ МЭМС переключателей.

Схема измерения с контактными площадками представлена на рис. 48. На рис. 54 представлены измеренные S-параметры СВЧ МЭМС переключателей без отверстий во включенном и выключенном состоянии.

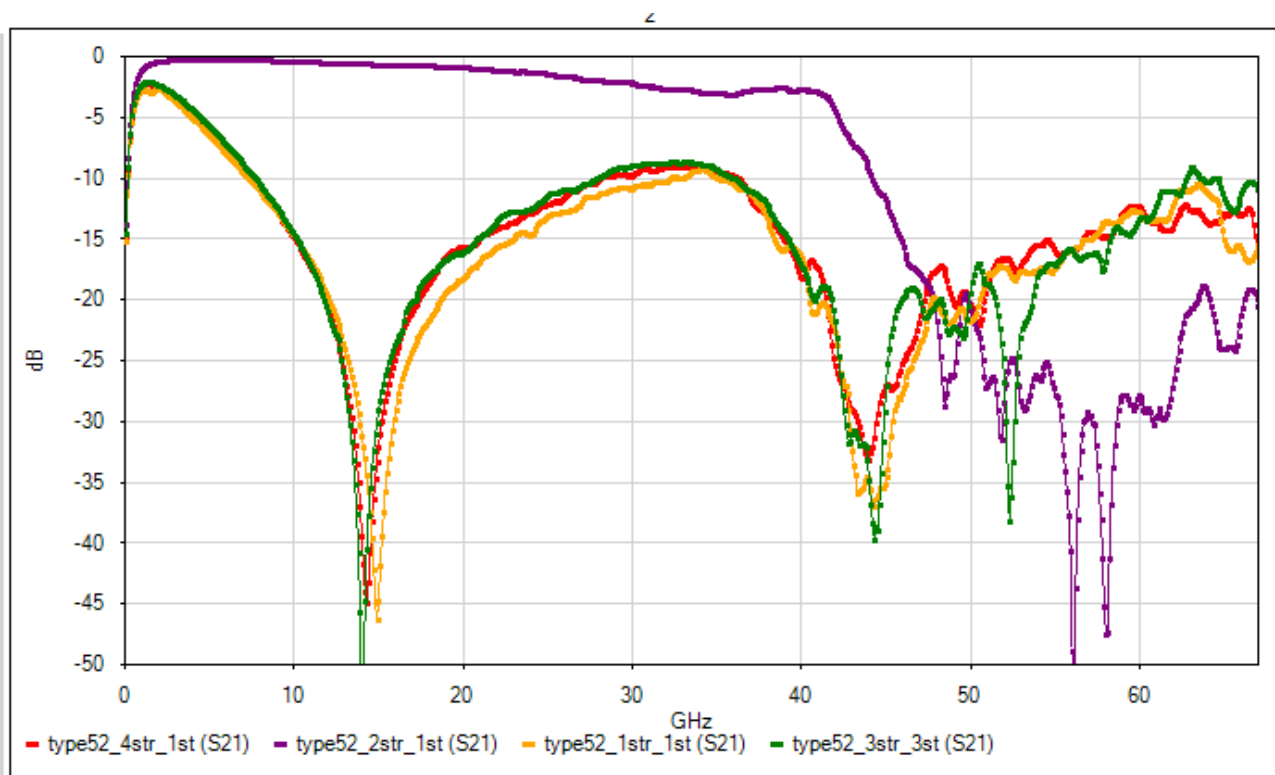


Рис. 54. Измеренная зависимость изоляции узкополосных СВЧ коммутатора от частоты для двух СВЧ коммутаторов сигналов

После изготовления СВЧ МЭМС коммутаторов методом сублимационной сушки, измеренные резонансные частоты лежат в диапазоне от 13,9 до 14,9 ГГц (рис. 54). На данных частотах коэффициент изоляции составил 45 – 50 дБ, собственные потери составили 0,49 дБ.

4.5 Влияние процесса изготовления мембраны на ее емкостные характеристики

Уменьшение емкости МЭМС переключателя может быть обусловлено следующими факторами – шероховатостью поверхности между диэлектрическим слоем и низом мембраны и короблением самой мембраны.

Для определения вклада в воздушный зазор шероховатости мембраны были проведены работы по измерению шероховатости поверхности фоторезиста используемого в качестве жертвенного слоя. Измерения шероховатости проводились на профилометре Dektak XT в пяти точках на пластине на длине 100 мкм, что соответствует размерам мембраны, для оценки шероховатости поверхности задубленного фоторезиста и после операции зачистки в аргоновой плазме, которая идет непосредственно перед напылением металла. Результаты измерений представлены на рис. 55-57.

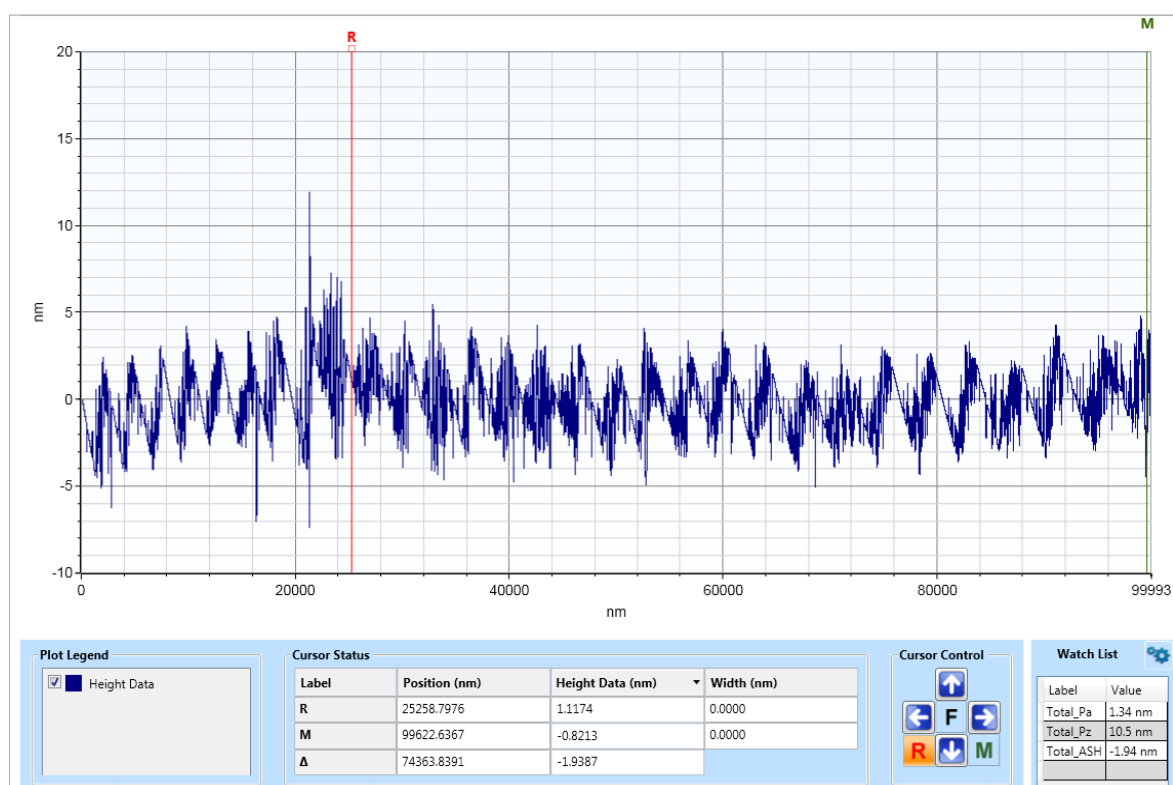


Рис. 55. Шероховатость задубленного резиста.

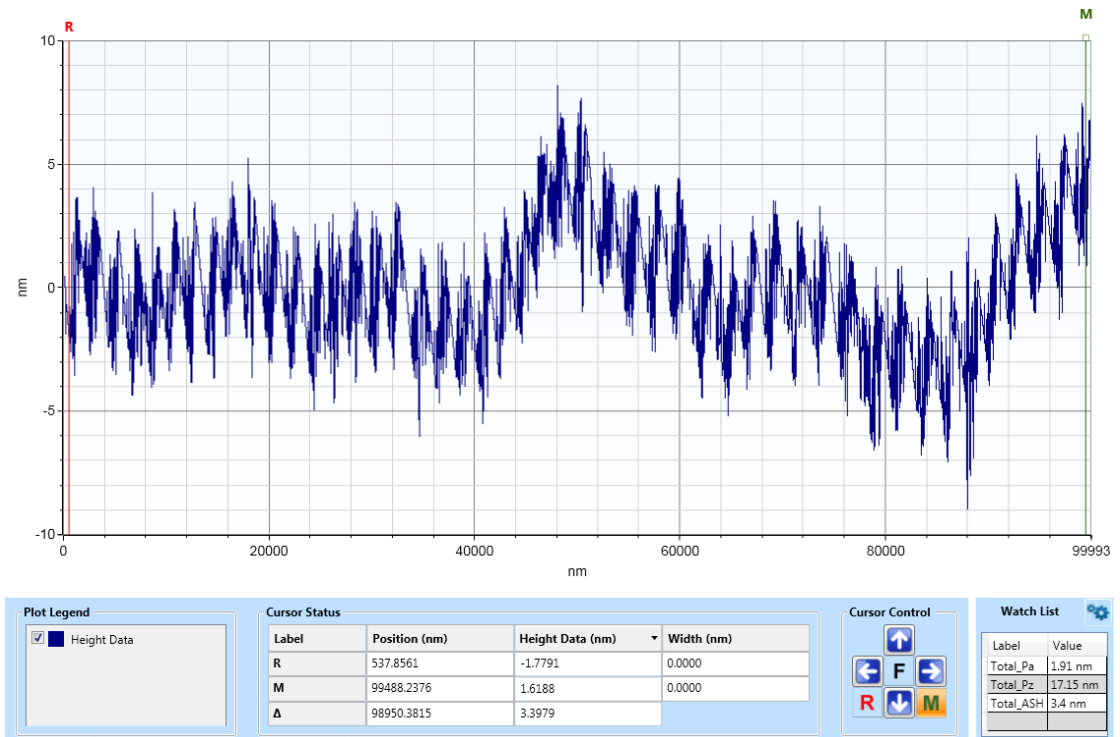


Рис. 56. Шероховатость фоторезиста после обработки в аргонной плазме в течение 15 секунд.

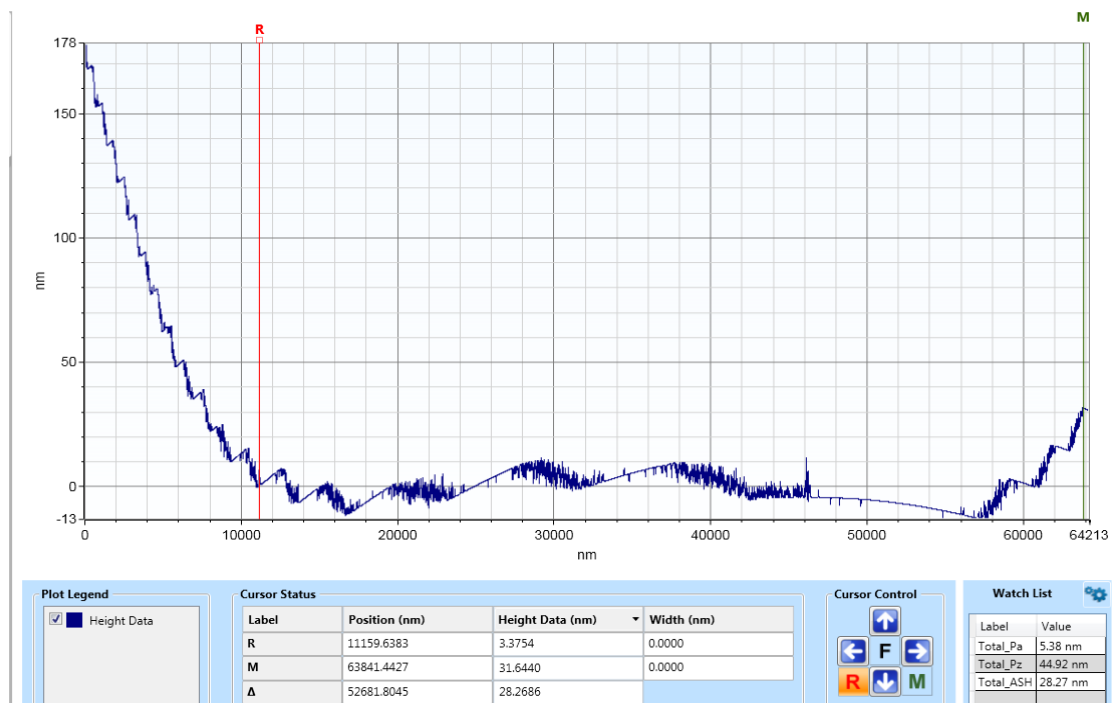


Рис. 57. Шероховатость фоторезиста после обработки в аргонной плазме в течение 30 секунд.

Из данных измерения шероховатости видно, что шероховатость увеличивается при увеличении времени зачистки плазмой поверхности пластины. Но при этом имеет начальное значение R_z равное 10 нм, R_a равное 1.34 нм, при зачистки плазмой 15 секунд R_z и R_a становятся равными соответственно 17 нм и 1.91 нм, при продолжении зачистки плазмой в течении 30 секунд R_z равен 44.9 нм, R_a 5.38 нм. Из рисунков так же видно, что шероховатость имеет периодичность с амплитудой, не превышающей 10 нм.

Также измерялся профиль фоторезиста после проявления окон перед нанесением затравочного слоя золота. После проявления окон, резист нагревают до температуры 150°C, чтобы края фоторезиста «оплыли» (рис. 58) и золото напылялось без серьёзных утоньшений и (или) разрывов.

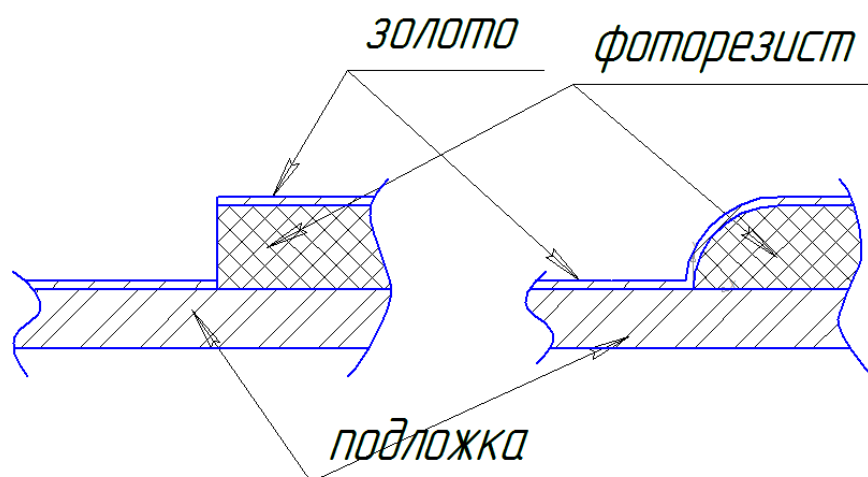


Рис. 58. Форма ступеньки фоторезиста до и после нагрева.

При измерении ступеньки (см. рис. 59) видно, что при нагреве фоторезиста края его образуют «горб», который попадает на край мембраны МЭМС переключателя, что так же приводит к дополнительному воздушному зазору. Для устранения этого дефекта необходимо оставлять с каждого края мембраны не менее 40 мкм фоторезиста.

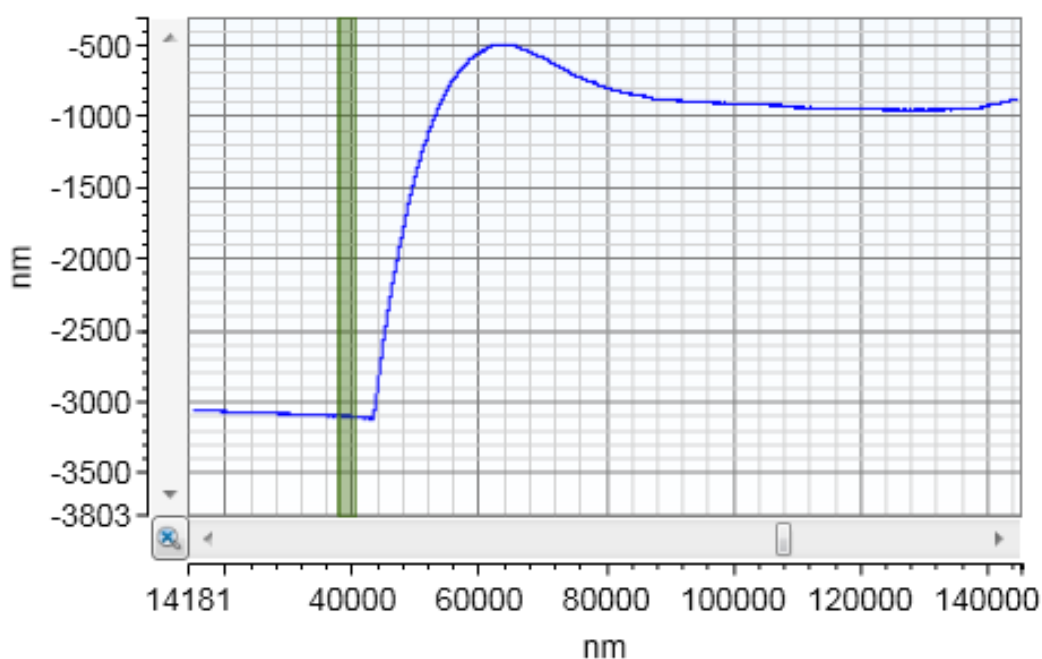


Рис. 59. Профиль ступеньки фоторезиста после задубливания.

Для оценки влияния шероховатости поверхности МЭМС переключателей были получены слипшиеся мембраны при «мокроем» процессе удаления фоторезиста без каких-либо действий по предотвращению слипания мембран. Слипание мембран происходит во время сушки из-за возникновения капиллярного эффекта и дальнейшего возникновения водородных связей между нижним слоем мембраны и поверхностью диэлектрика.

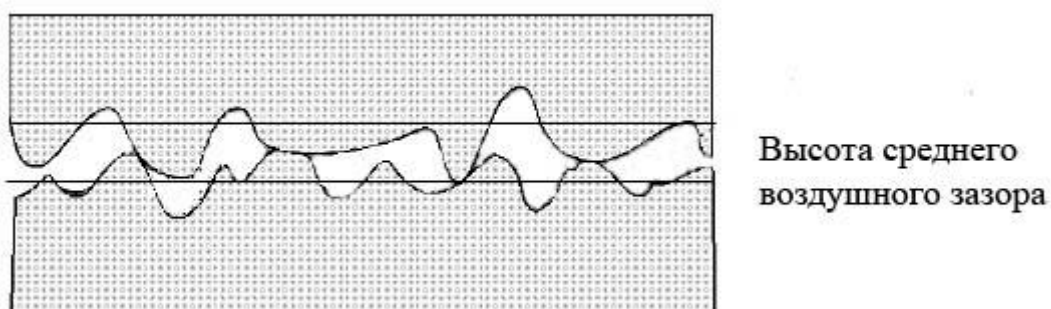


Рис. 60. Высота среднего воздушного зазора между мембраной и диэлектриком.

Таким образом, получался «идеальный» контакт, в котором расстояние между мембраной и диэлектриком ограничивается шероховатостью поверхности (рис. 60) и в меньшей степени деформацией мембраны.

Результаты измерения емкости слипшихся мембран и воздушного зазора рассчитанного при помощи формулы (16) представлены в таблице 7. При этом площадь конденсатора принималась равной 10^4 мкм², толщина нитрида кремния 1200 Å и диэлектрическая проницаемость нитрида кремния 7,5. Отверстия в мембране учитывались введением поправочного коэффициента 0.84.

Таблица 7. Измеренные ёмкости слипшихся мембран и определенные воздушные зазоры. Где тип 1 – мембраны с гальваникой и отверстиями, тип 2 – с гальваникой и без отверстий, тип 3 – без гальваники с отверстиями и тип 4 – без гальваники и без отверстий.

тип 1	Ёмкость, пФ	2.06	2.04	2.40	2.01	2.06	2.80	1.92	1.78	1.70
	зазор, нм	20.09	20.44	14.98	20.99	20.09	10.55	22.72	25.76	27.73
тип 2	Ёмкость, пФ	3.55	3.50	3.48	3.53	3.53	3.23	3.48	2.34	3.35
	зазор, нм	8.93	9.29	9.43	9.07	9.07	11.40	9.43	21.82	10.42
тип 3	Ёмкость, пФ	2.24	2.00	2.08	2.05	2.04	1.94	1.91	1.74	2.70
	зазор, нм	17.19	21.17	19.74	20.26	20.44	22.32	22.92	26.72	11.53
тип 4	Ёмкость, пФ	3.66	3.53	3.67	3.58	3.53	3.46	3.46	3.72	3.51
	зазор, нм	8.18	9.07	8.11	8.72	9.07	9.58	9.58	7.79	9.21

Средние арифметические значения зазора для мембраны с гальваническим покрытием и отверстиями составило 19.65 нм, с гальваническим покрытием и без отверстий – 10.56 нм, без гальванического покрытия с отверстиями – 19.78 нм и для мембран без гальванического покрытия и без отверстий – 8.8 нм. Это показывает, что, обусловленный шероховатостью, зазор между низом металлической мембраны и поверхностью диэлектрика, изолирующего мембрану от управляющего электрода, составляет 10 нм.

Мембраны с отверстиями, под действием сил внутреннего напряжения, деформируются, и изгиб около отверстий образует «ребро жесткости», которое не позволяет плотно прижиматься мембране к диэлектрику под действием капиллярных сил и препятствует образованию водородных связей.

$$g_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{C} - \frac{h_d}{\varepsilon_d} \quad (16)$$

где g_0 – воздушный зазор, ε_0 - электрическая постоянная, S – площадь обкладок конденсатора, C – емкость конденсатора, h_d - толщина диэлектрика, ε_d - диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Можно сделать вывод, что уменьшение емкости слипшихся мембран действительно вызвано шероховатостью поверхностей между слоем диэлектрика и металлической мембраной.

Так же, используя формулу (16), найдем среднее значение воздушного зазора для свободных мембран МЭМС переключателей, опираясь на данные ёмкости МЭМС переключателей с мембраной без отверстий и с отверстиями при напряжении 25 В. Воздушный зазор рассчитывался при помощи формулы (16). Результаты расчета представлены ниже в таблицах 8 и 9.

Таблица 8. Воздушный зазор МЭМС переключателей без отверстий в мембране, полученных удалением «жертвенного слоя» в кислородной плазме.

Расположение переключателя на пластине	1ст4стр	1ст6стр	1ст7стр	2ст2стр	2ст3стр	2ст5стр	2ст6стр	3ст6стр	3ст7стр	4ст2стр	4ст3стр	4ст4стр	4ст6стр	4ст7стр	1ст2стр
Ёмкость при 25В, пФ	1.58	1.62	1.22	1.63	1.677	1.52	1.32	1.27	1.52	1.43	1.76	1.22	1.41	1.48	1.29
Воздушный зазор, нм	39.9	38.6	56.3	38.2	36.7	42.1	50.9	53.4	42.1	45.7	34.2	56.3	46.5	43.7	52.6

Таблица 9. Воздушный зазор МЭМС переключателей с отверстиями в мембране, полученных удалением «жертвенного слоя» в кислородной плазме.

Расположение переключателя на пластине	1ст2стр	1ст3стр	1ст4стр	1ст5стр	2ст2стр	2ст3стр	2ст4стр	3ст2стр	3ст3стр	3ст5стр	3ст8стр	4ст2стр	4ст4стр	4ст5стр	4ст7стр
Ёмкость при 25В, пФ	1.13	1.56	1.27	1.29	1.33	1.25	1.22	1.38	1.26	1.39	1.44	1.30	1.28	1.19	1.40
Воздушный зазор, нм	49.3	31.6	42.6	41.8	40.1	43.6	44.7	37.7	42.9	37.2	35.6	41.3	42.0	46.5	36.9

Табличные данные ёмкости и зазора округлялись до двух значащих знаков, при этом, величина воздушного зазора вычислялась без округления значения ёмкости конденсатора. Среднее значение воздушного зазора для мембран с отверстиями получилось равным 40.9 нм, для мембран без отверстий воздушный зазор составил 45.1 нм. Следовательно, процесс зачистки фоторезиста в аргоновой плазме не вносит решающий вклад в воздушный зазор у переключателей полученных методом удалением «жертвенного слоя» в кислородной плазме. Для переключателей полученных этим методом воздушный зазор определяется, главным образом, короблением мембраны. Бóльший зазор между сплошной мембраной и управляющим электродом объясняется наличием бóльших внутренних напряжений в сплошной мембране. Как уже упоминалось в разделе 2.2.3, отверстия в мембране уменьшают внутренние напряжения в самой мембране.

Определение воздушного зазора у переключателей, полученных методом химического удаления «жертвенного слоя» и последующей сушкой в циклогексане, производилось так же, как и у переключателей, полученных удалением «жертвенного слоя» в кислородной плазме. Параметры переменного конденсатора составили 7569 мкм², толщина диэлектрика составила 1000Å, диэлектрическая проницаемость нитрида кремния равнялась 7,5. Вычисление

воздушного зазора проводилось по формуле (16), результаты вычислений представлены в таблице 10.

Таблица 10. Воздушный зазор МЭМС переключателей с мембраной без отверстий полученных методом сублимационной сушки

Расположение переключателя на пластине	1ст2стр	1ст3стр	1ст4стр	2ст1стр	2ст2стр	2ст3стр	2ст4стр	3ст2стр
Емкость при 25В, пФ	2,86	2,8	2,79	2,4	2,64	2,9	2,73	2,64
Воздушный зазор, нм	10	10,6	10,7	14,6	12	9,8	11,2	12

Среднее значение воздушного зазора для мембран, полученных методом сублимационной сушки, составило 11.4 нм, что сопоставимо с воздушным зазором слипшихся мембран. Следовательно, основной вклад в воздушный зазор мембран полученных методом химического удаления фоторезиста и последующей сублимационной сушкой в циклогексане определяется шероховатостью поверхности между мембраной и слоем диэлектрика. Коробление мембраны не наблюдается из-за более мягкого температурного режима удаления «жертвенного слоя» – при удалении фоторезиста в кислородной плазме возникает неконтролируемый нагрев металлической мембраны. Теплоотвод от металлической мембраны осуществляется переносом тепловой энергии молекулами газа, который при низком давлении пренебрежимо мал. Как следствие этого, температура металлической мембраны резко возрастает, и при разогреве мембраны возникают внутренние напряжения.

4.6 Влияние процесса сублимационной сушки на основные характеристики СВЧ транзисторов, изготавливаемых на основе арсенида галлия

Для оценки влияния процесса сублимационной сушки на рабочие характеристики СВЧ МИС на основе арсенида галлия был взят тестовый модуль с изготовленными на нем базовыми СВЧ транзисторами, входящими в схему СВЧ МИС. После измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзисторов и зависимости коэффициента усиления по току от частоты (Ft) был проведен процесс сублимационной сушки с последующей обработкой в кислородной плазме. После обработки с транзисторов повторно снимались ВАХ и Ft. Вольт-амперные характеристики снимались на приборе Tectronix 370A, зависимость коэффициента усиления по току от частоты снималась на векторном анализаторе Agilent Technologies PNA E8361A. Тестовый модуль содержит три двухпальцевых транзистора с шириной затвора 50 мкм и длиной 0,2 мкм. Результаты измерений приведены на рис. 61-63, при этом для удобства сравнения ВАХ левый рисунок – до обработки, правый после.

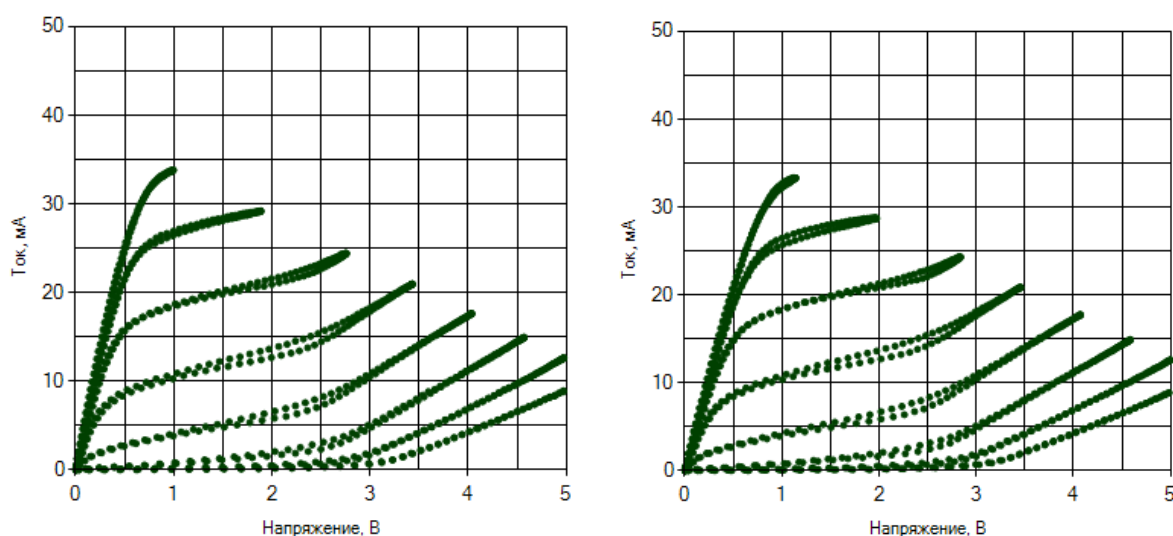


Рис. 61. ВАХ правого транзистора до и после обработки.

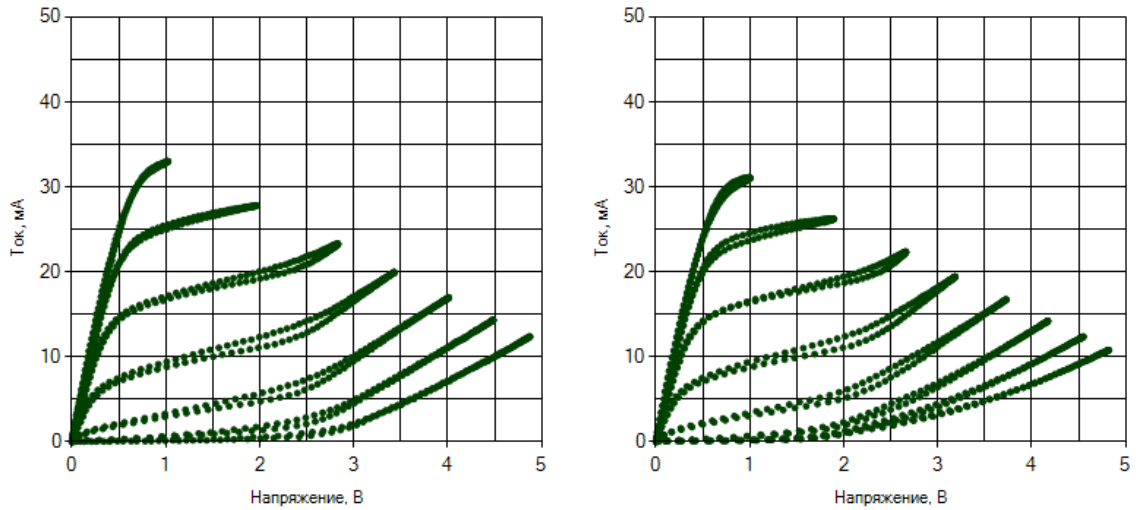


Рис. 62. ВАХ среднего транзистора до и после обработки.

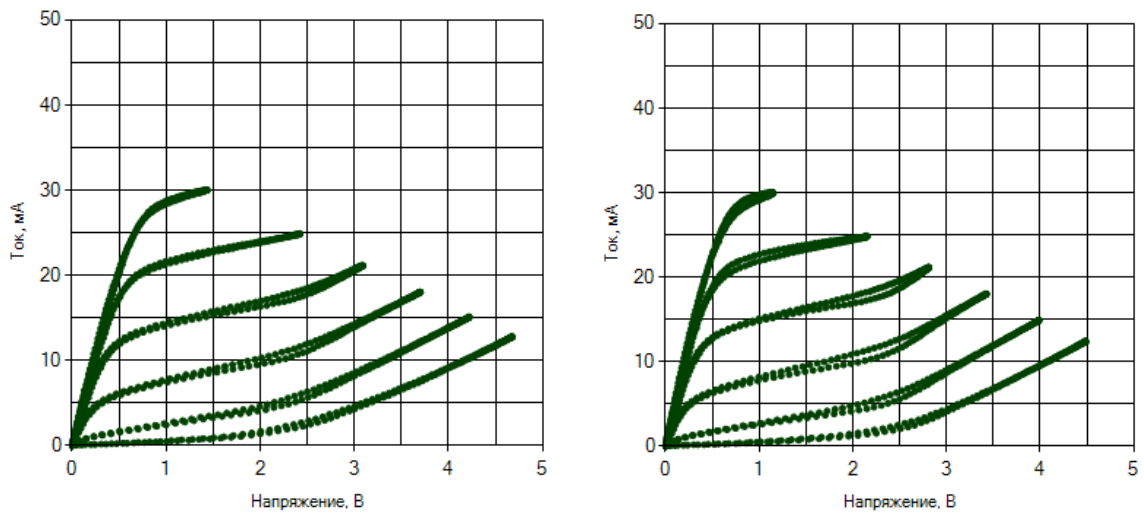


Рис. 63. ВАХ левого транзистора до и после обработки.

Как видно из рис. 61-63 процесс сублимационной сушки не оказал заметного влияния на вольт-амперные характеристики базового СВЧ транзистора на основе арсенида галлия. Не произошло заметного изменения крутизны и максимального тока исток-сток при 0 В на затворе.

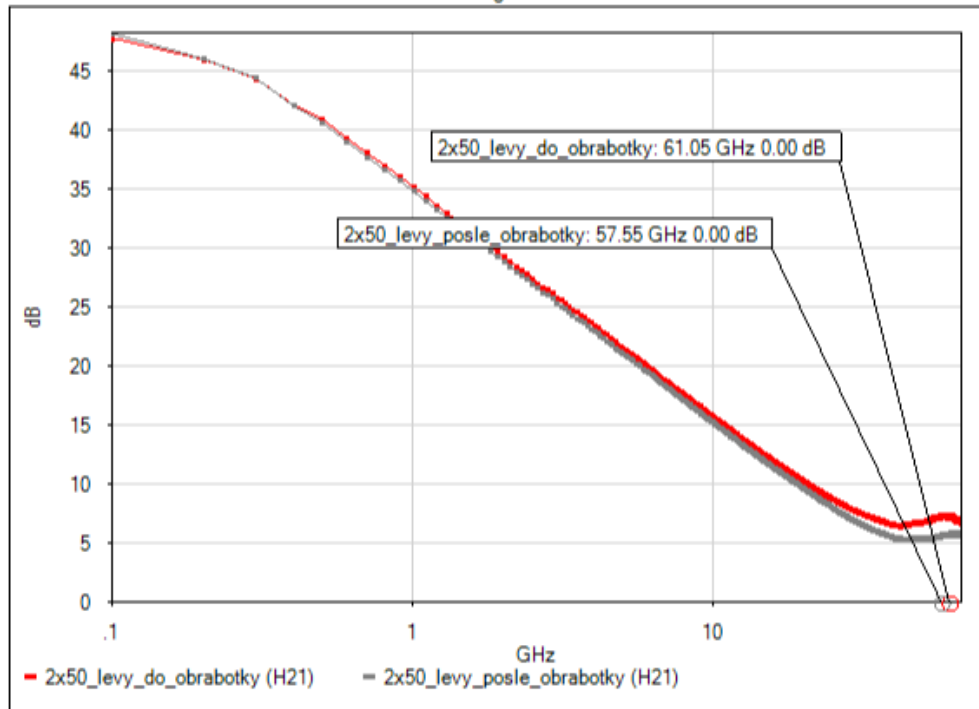


Рис. 64. Частотные характеристики левого транзистора до и после обработки.

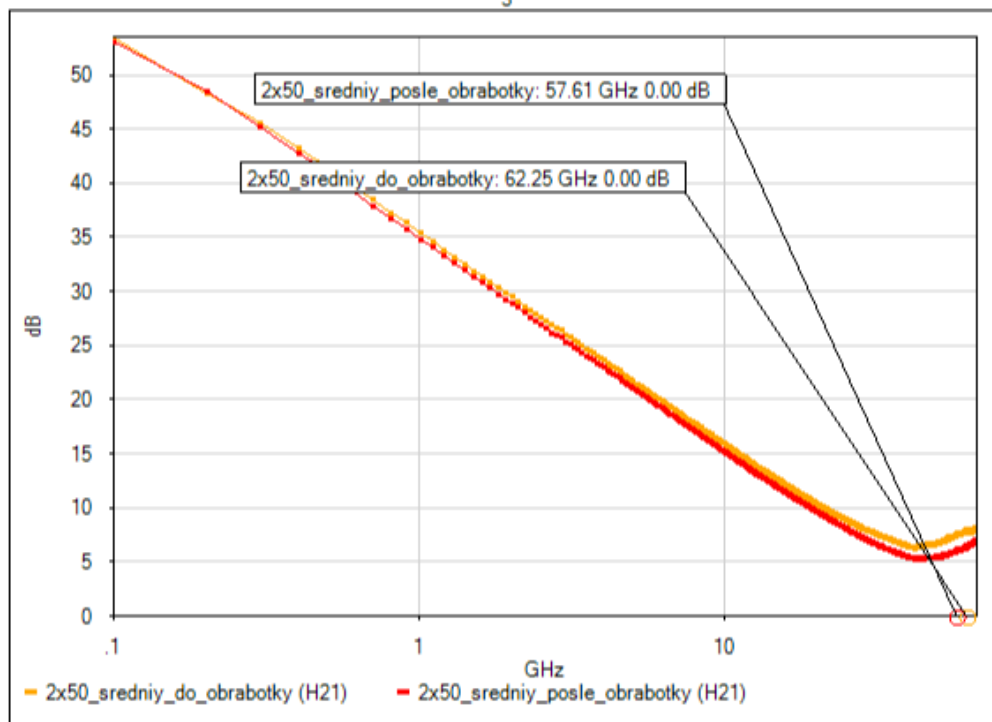


Рис. 65. Частотные характеристики среднего транзистора до и после обработки.

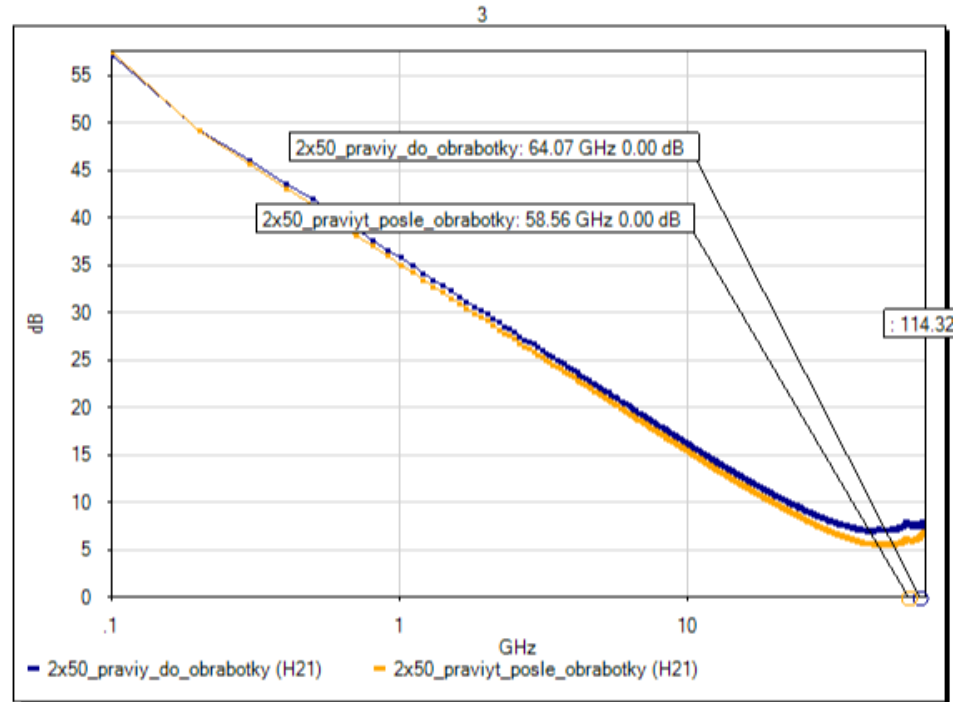


Рис. 66. Частотные характеристики правого транзистора до и после обработки.

Из рис. 64–66 видно, что процесс сублимационной сушки повлиял на частотные характеристики тестовых транзисторов на основе арсенида галлия. Наиболее значительное уменьшение зависимости коэффициента усиления по току показал правый транзистор. Наибольшее падение характеристики зависимости усиления по току от частоты сигнала составило 6 ГГц. Данное падение частотной характеристики можно признать незначительным, и, скорее всего, оно вызвано обработкой в кислородной плазме после процесса сублимационной сушки – кристалл тестового модуля имеет толщину порядка 100 мкм, следовательно, при обработке в кислородной плазме он мог подвергнуться перегреву, что и вызвало падение частотных характеристик тестового транзистора.

4.7 . Сравнительный анализ полученных результатов.

Основные параметры емкостного МЭМС переключателя, выполненного в ИСВЧПЭ РАН, и его зарубежных аналогов [61-72] для диапазонов 1-40 ГГц сведены в сравнительную таблицу 11. Их внешний вид представлен на рис. 67.

Таблица 11. Сравнительные характеристики МЭМС переключателей

Варианты СВЧ МЭМС	Размер, мкм	Напряжение, В	Время переключения, мкс	Емкость, пФ	Изоляция, дБ	Диапазон частот, ГГц	Потери, дБ	Материал подложки
ИСВЧПЭ РАН	440x100	10-20	-	2,9	-50 (14 ГГц)	13-15	-0.5	GaAs
Raytheon	310x120	30-50	3	6	-35 (30 ГГц)	10-40	-0.07	Si
Мичиганский Университет	600x250	6-20	20-40	3	-25 (30 ГГц)	1-40	-0.1	Si
Мичиганский Университет	300x90	15-25	6-15	3	-30 (10 ГГц)	10	-0.03	Si, GaAs

Несмотря на то, что МЭМС переключатель, изготовленный в ИСВЧПЭ РАН показал большие потери, чем остальные переключатели и меньшим частотным диапазоном, он выигрывает в изоляции сигнала, имея сопоставимые размеры и достаточно низкое напряжение срабатывания относительно остальных переключателей. Потери МЭМС переключателя вызваны наименьшей высотой мембраны среди рассматриваемых переключателей: она составила 2 мкм, что обусловлено высотой воздушного моста 2 мкм при изготовлении СВЧ МИС на основе арсенида галлия, тогда как у остальных переключателей составляет 3-5 мкм.

Таким образом, представленные в данной работе переключатели, имеют характеристики на уровне зарубежных аналогов ведущих мировых производителей, а по ряду критериев превосходят многие из них.

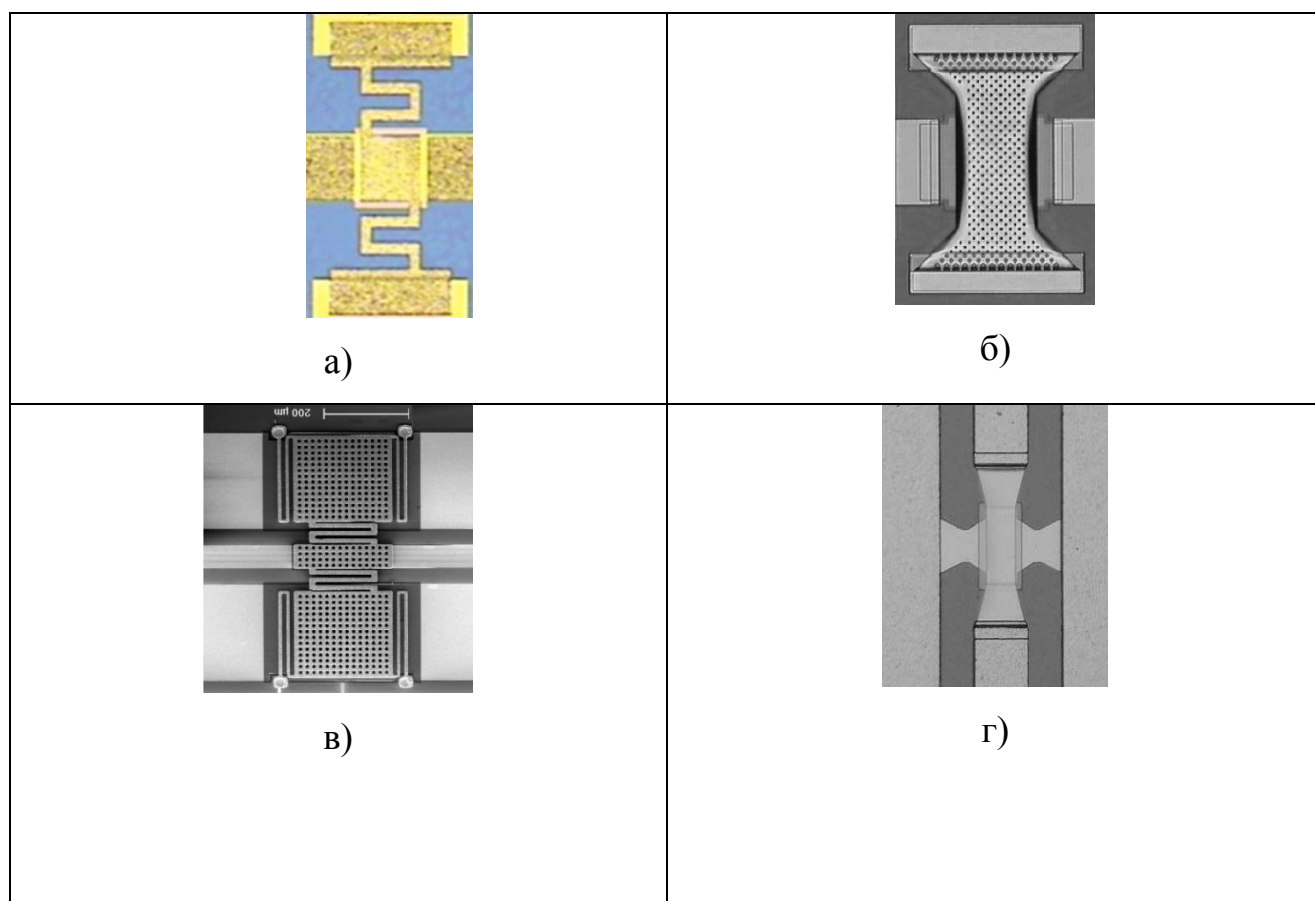


Рис. 67. Внешний вид СВЧ МЭМС коммутаторов (а – выполнен в ИСВЧПЭ РАН, б - компании Raytheon, в и г - Мичиганского Университета,

Выводы из четвертой главы.

В четвертой главе проведены измерения изготовленных МЭМС переключателей, полученных по маршруту, предложенному в третьей главе. Напряжение срабатывания измеренных МЭМС переключателей согласуется с расчетными данными.

Вольт-фарадные характеристики показали значительное уменьшение ёмкости МЭМС переключателей полученных методом удаления «жертвенного слоя» в кислородной плазме из-за воздушного зазора, возникающего между металлической мембраной и диэлектрическим покрытием на управляющем электроде, что обусловлено короблением мембраны за счет внутренних

напряжений для мембран. Так же измерения Вольт-Фарадных характеристик для МЭМС переключателей полученных методом химического удаления «жертвенного слоя» с последующей сублимационной сушкой в циклогексане определяется шероховатостью поверхности пленки диэлектрика и нижней поверхности металлической мембраны.

Показано, что метод сублимационной сушки не оказывает заметного влияния на полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия, что позволяет изготавливать СВЧ МЭМС переключатели и МИС на основе арсенида галлия одновременно.

Был проведен сравнительный анализ с иностранными аналогами. По результатам сравнения СВЧ МЭМС переключатель демонстрирует характеристики на уровне зарубежных аналогов, а по ряду параметров превосходит их.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выбрана конструкция МЭМС переключателей, наиболее подходящая для изготовления по технологическому маршруту дискретных полупроводниковых приборов на базе арсенида галлия.
2. Разработана методика расчета электростатических СВЧ МЭМС переключателей с металлической мембраной на основе существующей технологии изготовления «воздушных мостов» для СВЧ МИС.
3. Разработана технология удаления «жертвенного слоя», с использованием циклогексана, впервые примененного для сублимационной сушки мембран МЭМС переключателей. Удаление «жертвенного слоя» в циклогексане позволяет добиться наилучших параметров МЭМС переключателей и не влияет на характеристики монолитных интегральных схем (МИС) на основе арсенида галлия.
4. Разработан базовый технологический маршрут для производства СВЧ МЭМС переключателей совместно с МИС на основе арсенида галлия.
5. Разработана методика измерения конструкционных параметров металлической мембраны, учитывающая влияние на СВЧ характеристики переключателя.
6. Созданы образцы СВЧ МЭМС переключателей емкостного типа с металлической мембраной на подложках GaAs и исследованы их характеристики: вносимые потери 0,5 дБ; развязка до 50 дБ; рабочий диапазон 13-15 ГГц; напряжение срабатывания составило 19В;
7. Разработана методика расчета и проектирования СВЧ МЭМС переключателя применительно к ограничениям, накладываемым технологией изготовления МИС на арсениде галлия.
8. Разработана технология удаления «жертвенного слоя», с использованием циклогексана, впервые примененного для сублимационной сушки мембран МЭМС переключателей.

9. Впервые разработан базовый технологический маршрут для изготовления СВЧ МЭМС переключателей и МИС на основе арсенида галлия в едином цикле изготовления приборов.
10. Разработана оригинальная методика измерения СВЧ параметров МЭМС переключателей.

Список литературы:

1. Randy J. Richards, Héctor J. De Los Santos MEMS-for RF/microwave wireless applications: the next wave – Part 2. Microwave journal, March 2001, Horizon House Publications, Inc.
2. П.П. Мальцев, А.П. Лисицкий, А.Ю. Павлов, Н.В. Щаврук, Н.В. Побойкина, В.Д. Хачатрян Возможности формирования МЭМС-варакторов с электростатическим управлением в GaAs – технологии. Нано- и Микросистемная техника №9(146) 2012 С 28-33
3. <http://www.rlcelectronics.com> Сайт фирмы RLC Electronics
4. Переключатели сверхвысокочастотных сигналов/ Белов Л. - Электроника: Наука, Технология, Бизнес. №1/2006 М.: Техносфера, 2006. – с. 20-25
5. RF MEMS: Theory, Design, and Technology. Gabriel M. Rebeiz Copyright 2003 John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0-471-20169-3
6. A Packaged, High-Lifetime Ohmic MEMS RF Switch/ S. Majumder, J. Lampen, R. Morrison and J. Maciel - Microwave Symposium Digest, 2003 IEEE MTT-S International (Volume:3) pp 1935-1938
7. П.П. Мальцев, А.Ю. Павлов, Н.В. Щаврук. Электростатический СВЧ МЭМС коммутатор сигналов для частотного диапазона 10-12 ГГц на подложке GaAs. // Радиопромышленность 2012 вып.3 - С 142-148
8. Щаврук Н.В. Сравнение микроэлектромеханических переключателей для коммутации СВЧ сигнала // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы Международной научно – технической конференции «INTERMATIC – 2013», 2–6 декабря 2013 г., Москва. / Под ред. академика РАН А.С. Сигова. – М.: Энергоатомиздат, 2013, часть 1, с. 191-197.
9. RF MEMS Switches and Products Catalog 2013-2014- Radant MEMS – pp. 7-9

10. Yao J J and Chang M F 1995 A surface micromachined miniature switch for telecommunications applications with signal frequencies from DC up to 4 GHz Tech.Digest, 8th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators pp 384–387
11. Hyman D et al 1999 Surface-micromachined RF MEMS switches on GaAs substrates Int. J. RF Microwave CAE 9 348–361
12. Hyman D et al 1999 GaAs-compatible surface-micromachined RF MEMS switches Electron. Lett. 35 224–226
13. Thermal Characteristics of Microswitch Contacts
Xiaomin Yan, N. E. McGruer, G. G. Adams, S. Majumder, Proceedings of the National Association of Relay Manufacturer's (NARM) 49th Annual International Relay Conference, April 23-25, 2001
14. Schimkat J 1998 Contact materials for microrelays Proc.IEEE, 11th Ann. Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems pp 190–194
15. Sovero E A, Mihailovich R, Deakin D S, Higgins J A, Yao J J, DeNatale J F and Hong J H 1999 Monolithic GaAs PHEMT MMICs integrated with high performance
16. Randy J. Richards and Hector J. De Santos MEMS for RF/Microwave Wireless Applications: The Next Wave / MICROWAVE JOURNAL March 2001
17. Muldavin J B and Rebeiz G M 1999 30 GHz tuned MEMS switches Tech. Digest, IEEE Microwave Theory and Techniques Symp. pp 1511–14
18. Goldsmith C, Lin T-H, Powers B, Wu W-R and Norvell B 1995 Micromechanical membrane switches for microwave applications Tech. Digest, IEEE Microwave Theory and Techniques Symp. pp 91–4
19. J. B. Muldavin and G. M. Rebeiz, High isolation MEMS shunt switches; Part 1: Modeling, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 48, No. 6, pp. 1045–1052, June 2000.

20. J. B. Muldavin and G. M. Rebeiz, Inline capacitive and DC-contact MEMS shunt switches, *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, Vol. 11, No. 8, pp. 334–336, August 2001.
21. Haslina Jaafar, Othman Sidek, Azman Miskam and Shukri Korakkottil, Design and Simulation of Microelectromechanical System Capacitive Shunt Switches / *American J. of Engineering and Applied Sciences* 2 (4): 655-660, 2009
22. P. Blondy, D. Mercier, D. Cros, P. Guillon, P. Rey, P. Charvet, B. Diem, C. Zanchi, L. Lapierre, J. Sombrin, and J. B. Quoirin, Packaged mm-wave thermal MEMS switches, in 31st European Microwave Conference, London, UK, September 2001, Vol. 1, pp. 283–286.
23. 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*, vol. 1, pp. 227-230, May 2001.
24. Dimitrios Peroulis, Sergio P. Pacheco, Kamal Sarabandi, Linda P. B. Katehi. Electromechanical Considerations in Developing Low-Voltage RF MEMS Switches/ *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, VOL. 51, NO. 1, JANUARY 2003 pp 259-270
25. Щаврук Н.В. Узкополосный СВЧ переключатель на подложке GaAs для частотного диапазона 10-12 ГГц на основе микроэлектромеханических систем // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы Международной научно – технической конференции «INTERMATIC – 2013»*, 2–6 декабря 2013 г., Москва. / Под ред. академика РАН А.С. Сигова. – М.: Энергоатомиздат, 2013, часть 1, с. 198-203.
26. Соловьев Ю. В., Волков В. В., Александров С. Е., Спешилова А. Б. МЭМС-переключатель резистивно-емкостного типа Нано- и микросистемная техника №7(84) 2007 год стр.65

27. Thermally controlled magnetic actuator (TCMA) using thermosensitive magnetic materials', in Proceedings of IEEE Microelectromechanical Systems Workshop, 1994, IEEE, Piscataway, NJ, USA: 108–113, by permission of IEEE
28. P. Blondy, D. Mercier, D. Cros, P. Guillon, P. Rey, P. Charvet, B. Diem, C. Zanchi, L. Lapierre, J. Sombrin, and J. B. Quoirin, Packaged mm-wave thermal MEMS switches, in 31st European Microwave Conference, London, UK, September 2001, Vol. 1, pp. 283–286.
29. P. Blondy, D. Cros, P. Guillon, P. Rey, P. Charvet, B. Diem, C. Zanchi, and J. B. Quoirin, Low voltage high isolation MEMS switches, in Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, Ann Arbor, MI, 2001, pp. 47–49
30. Y. Wang, Z. Li, D. T. McCormick, and N. C. Tien, Low-voltage lateral-contact microrelays for RF applications, in 15th IEEE International Conference on Micro-Electro-Mechanical Systems, January 2002, pp. 645–648.
31. Guerre, R. Drechsler, U.; Bhattacharyya, D.; Rantakari, P.; Stutz, R.; Wright, R.V.; Milosavljevic, Z.D.; Vaha-Heikkila, T.; Kirby, P.B.; Despont, M., Wafer-Level Transfer Technologies for PZT-Based RF MEMS Switches Microelectromechanical Systems, Journal of (Volume:19, Issue: 3), June 2010, c.- 548 – 560
32. Kousuke, M.; Moriyama, M.; Esashi, M.; Tanaka, S. Low-voltage PZT-actuated MEMS switch monolithically integrated with CMOS circuit Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2012 IEEE 25th International Conference Jan. 29 2012-Feb. 2 2012 c.-1153 - 1156
33. M. Ruan, J. Shen, and C. B. Wheeler, Latching Micromagnetic Relays, IEEE J. Microelectromech. Systems, Vol. 10, pp. 511–517, December 2001.
34. Fully Integrated Magnetically Actuated Micromachined Relays William P. Taylor, Oliver Brand, and Mark G. Allen, JOURNAL OF

MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 7, NO. 2, JUNE 1998
с.- 181-191

- 35.Щаврук Н.В. СВЧ микроэлектромеханические переключатели – типы, характеристики, особенности. // Оборонная техника. – 2013. - №11-12. – кол. стр. 13, депонированная статья, рег. № 139/32
- 36.Майтама М.В., Мальцев П.П., Павлов А.Ю., Щаврук Н.В. Возможность изготовления электростатических МЭМС коммутаторов совместно с СВЧ МИС // Опто-, наноэлектроника, наноматериалы и микросистемы: Труды XV международной конференции. Ульяновск: УлГУ, 2012. С. 339-340.
- 37.РАЗРАБОТКА БАЗОВЫХ СЕРИЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ: СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ, В ТОМ ЧИСЛЕ В ГЕТЕРОИНТЕГРАЦИИ СЕНСОРНЫХ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (СВЧ - УСИЛИТЕЛИ И ВСТРОЕННЫЕ АНТЕННЫ) Итоговый отчет. Государственный контракт от «31» мая 2011 г. № 16.426.11.0031
- 38.R. J. Roark and W. C. Young, Formulas for Stress and Strain, 6th edition, McGraw-Hill, New York, 1989.
- 39.W. Yun, A Surface Micromachined Accelerometer with Integrated CMOS Detection Circuitry, Ph.D. thesis, University of California at Berkeley, Berkeley, CA, 1992.
- 40.G. K. Fedder, Simulation of Microelectromechanical Systems, Ph.D. thesis, University of California at Berkeley, Berkeley, CA, 1994.
- 41.Kenneth L. Kaiser, Electromagnetic compatibility handbook, CRC Press, 2004 ISBN 0-8493-2087-9.
- 42.V. L. Rabinov, R. J. Gupta, and S. D. Senturia, The effect of release etch-holes on the electromechanical behavior of MEMS structures, in International Conference on Solid-State Sensors Actuators, Chicago, IL, June, 1997, pp. 1125–1128.

43. Goran Stojanovic¹, Ljiljana Živanov², Mirjana Damjanovic, Compact Form of Expressions for Inductance Calculation of Meander Inductors, SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING Vol. 1, No. 3, November 2004, 57 – 68
44. Gerald W. Dahlmann, Eric M. Yeatman: Microwave characteristics of meander inductors fabricated by 3D self-assembly, 8th IEEE International Symposium on High Performance Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications, 13-14 November 2000, pp. 128-133
45. G. K. Fedder, Simulation of Microelectromechanical Systems, Ph.D. thesis, University of California at Berkeley, Berkeley, CA, 1994.
46. Kenneth L. Kaiser, Electromagnetic compatibility handbook, CRC Press, 2004 ISBN 0-8493-2087-9.
47. Karl Lark-Horovitz, Vivian Annabelle Johnson, Methods of experimental physics: Solid state physics, Academic Press, 1959 ISBN 0-12-475946-7.
48. Max W., Jr. Medley Microwave and RF Circuits: Analysis, Synthesis, and Design
49. Мальцев П.П., Майтама М.В., Павлов А.Ю., Щаврук Н.В. Расчет и изготовление узкополосного СВЧ микроэлектромеханического переключателя для частотного диапазона 10-12 ГГц на подложках арсенида галлия. // Нано- и микросистемная техника - 2014. - №6. - С. 30-33
50. Щаврук Н.В. Изготовление СВЧ микроэлектромеханических переключателей на подложках GaAs для частотного диапазона 10-12 ГГц // Оборонная техника. – 2013. - №11-12. – кол. стр. 10, депонированная статья, рег. № 140/32
51. D. Peroulis et al., “Electromechanical considerations in developing low-voltage RF MEMS switches,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 51, pp. 259–270, Jan. 2003.

52. H. Guckel and D. W. Burns, "Fabrication of micromechanical devices from polysilicon films with smooth surfaces," *Sensors and Actuators*, vol. 20, pp. 117–122, 1989.
53. T. Inoue and H. Osatake, A new drying method of biological specimens for scanning electron microscopy: The t-butyl alcohol freeze drying method, *Arch. Histol. Cytol.*, Vol. 51, pp. 53–59, 1988.
54. "Справочник химика" т.2, Л.-М.: Химия, 1964 стр. 1096-1097
55. G. Mulhern, S. Soane, and R. Howe, Supercritical carbon dioxide drying for microstructures, in 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Yokohama, Japan, June 1993, pp. 296–299.
56. J. Y. Kim and C. J. Kim, Comparative study of various release methods for polysilicon surface micromachining, in 10th IEEE International Conference on Microelectromechanical Systems, Nagoya, Japan, January 1997, pp. 442–447.
57. Хейфец В. И., Пивоненкова Л. П., Любимова Т. Б., Альфа-пирролидон, М., 1976, с. 30-34
58. R. E. Williams, Gallium Arsenide Processing Techniques, Artech House, Dedham, MA, 1984.
59. РАЗРАБОТКА БАЗОВЫХ СЕРИЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ: СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ, В ТОМ ЧИСЛЕ В ГЕТЕРОИНТЕГРАЦИИ СЕНСОРНЫХ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (СВЧ - УСИЛИТЕЛИ И ВСТРОЕННЫЕ АНТЕННЫ)
Этап № 3 (промежуточный) Государственный контракт от «31» мая 2011 г. № 16.426.11.0031. –С 189-192
60. Мальцев П.П., Майтама М.В., Павлов А.Ю., Щаврук Н.В. Разработка узкополосного СВЧ микроэлектромеханического переключателя для частотного диапазона 10-12 ГГц на подложках арсенида галлия. // Известия вузов. Электроника" №5(109),2014 – С 81-88

61. C. L. Goldsmith, Z. Yao, S. Eshelman, and D. Denniston, Performance of lowloss RF MEMS capacitive switches, *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, Vol. 8, No. 8, pp. 269–271, August 1998.
62. Z. J. Yao, S. Chen, S. Eshelman, D. Denniston, and C. L. Goldsmith, Micromachined low-loss microwave switches, *IEEE J. Microelectromech. Systems*, Vol. 8, pp. 129–134, June 1999.
63. S. Pacheco, C. T. Nguyen, and L. P. B. Katehi, Micromechanical electrostatic K-band switches, in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Baltimore, MD, June 1998, pp. 1569–1572.
64. S. P. Pacheco and L. P. B. Katehi, Microelectromechanical K-band switching circuits, in *29th European Microwave Conference*, Munich, Germany, October 1999, pp. 45–48.
65. S. Pacheco, C. T. Nguyen, and L. P. B. Katehi, Design of low actuation voltage RF MEMS switch, in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Boston, MA, June 2000, pp. 165–168.
66. D. Peroulis, S. Pacheco, and L. P. B. Katehi, MEMS devices for high isolation switching and tunable filtering, in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Boston, MA, June 2000, pp. 1217–1220.
67. J. B. Muldavin and G. M. Rebeiz, High isolation MEMS shunt switches; Part 1: Modeling, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 48, No. 6, pp. 1045–1052, June 2000.
68. J. B. Muldavin and G. M. Rebeiz, High isolation MEMS shunt switches; Part 2: Design, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 48, No. 6, pp. 1053–1056, June 2000. BIBLIOGRAPHY 153
69. N. S. Barker and G. M. Rebeiz, Distributed MEMS true-time delay phase shifters and wideband switches, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 46, No. 11, pp. 1881–1890, November 1998.

70. J. B. Muldavin and G. M. Rebeiz, Inline capacitive and DC-contact MEMS shunt switches, *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, Vol. 11, No. 8, pp. 334–336, August 2001.
71. J. Y. Park, G. H. Kim, K. W. Chung, and J. U. Bong, Fully integrated micromachined capacitive switches for RF applications, in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Boston, MA, June 2000, pp. 283–286.
72. J. Y. Park, G. H. Kim, K. W. Chung, and J. U. Bong, Electroplated RF MEMS capacitive switches, in *IEEE International Conference Microelectromechanical Systems*, January 2000, pp. 639–644.

Приложение А

Изготовление фотошаблонов МЭМС переключателя

Предложенный топологический проект MEMS был реализован в виде набора стекол комплекта фотошаблонов. Комплект фотошаблонов содержит следующие стекла, в которых заложены конструктивные особенности МЭМС устройств:

1. стекло нижних электродов, контактных площадок и нижних обкладок развязывающих конденсаторов (рис. 68);
2. стекло формирования опор моста (рис. 69);
3. стекло формирования пассивации СВЧ линии и нижних электродов (рис. 70);
4. стекло формирования верхних обкладок развязывающих конденсаторов и утолщения опор моста (рис. 71);
5. стекло формирования жертвенного слоя (рис. 72);
6. стекло гальванического утолщения элементов конструкции МЭМС устройств (рис. 73);
7. стекло обтравы лишнего металла и формирования сквозных отверстий в мембране (рис. 74).

Ниже представлена топология модуля проекта MEMS послойно, представляющее собой отдельное стекло комплекта фотошаблонов MEMS.

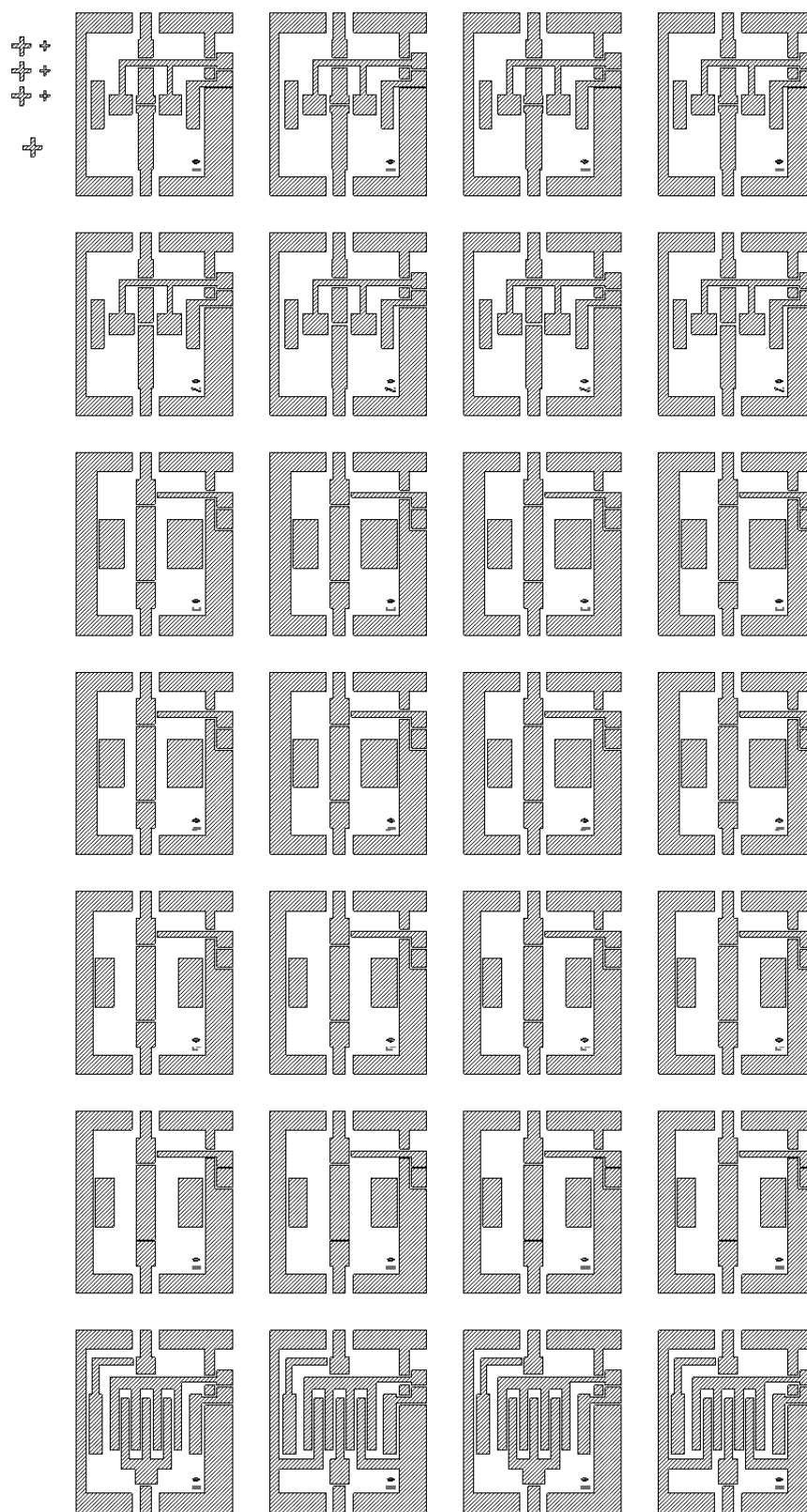


Рисунок 68. Слой нижних электродов, контактных площадок и нижних обкладок развязывающих конденсаторов

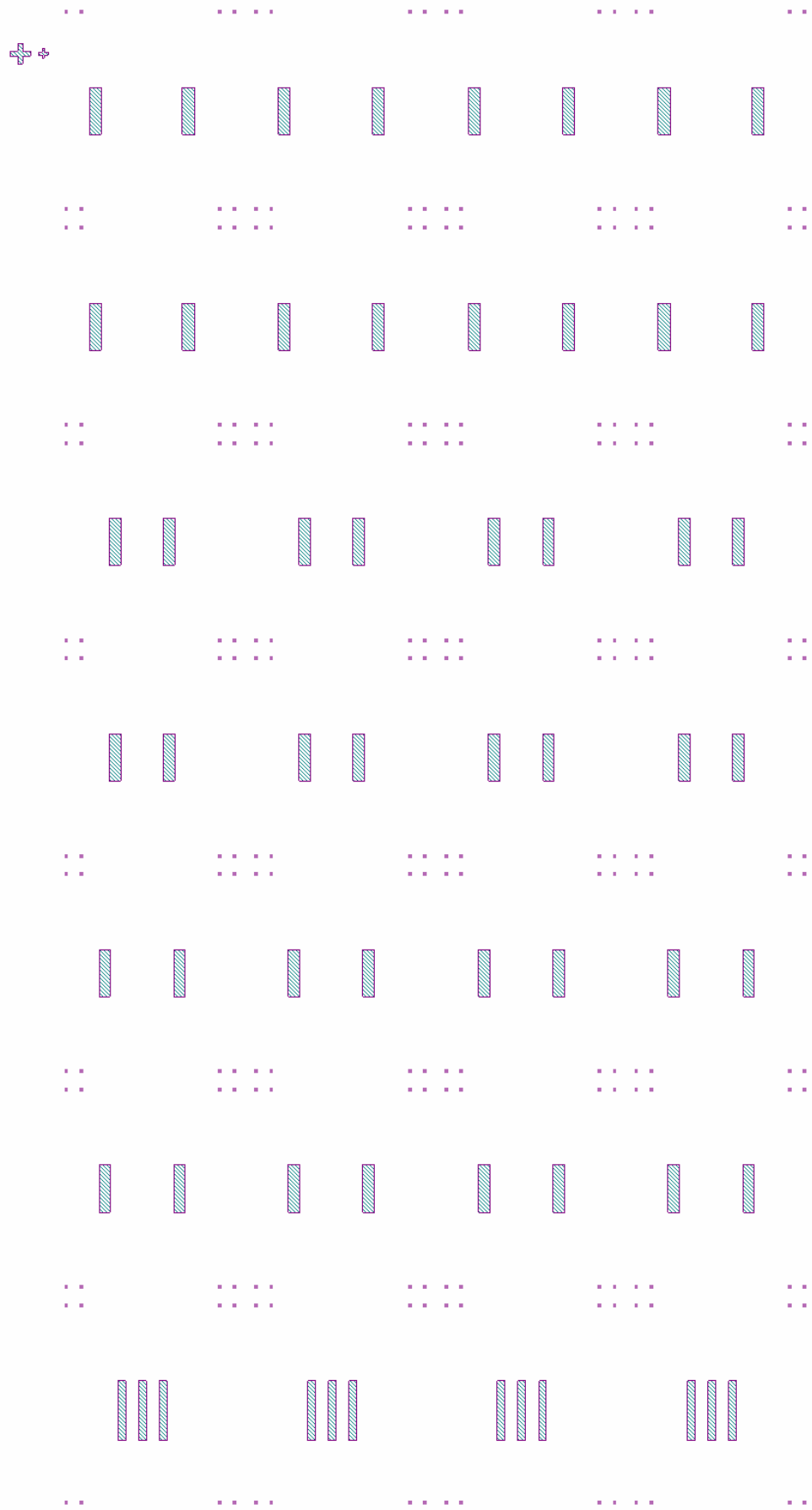


Рисунок 69. Слой формирования опор моста

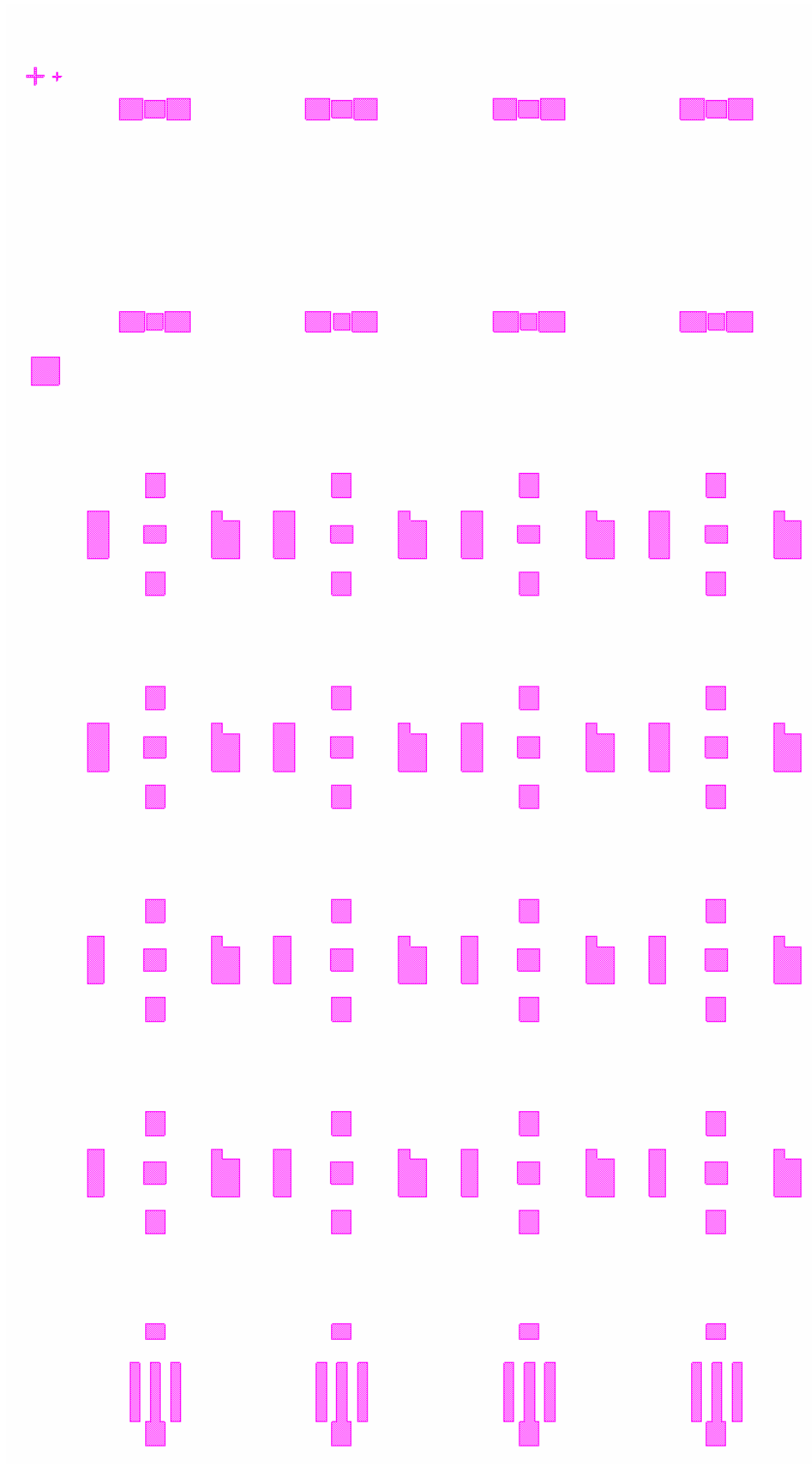


Рисунок 70. Слой формирования пассивации СВЧ линии и нижних электродов

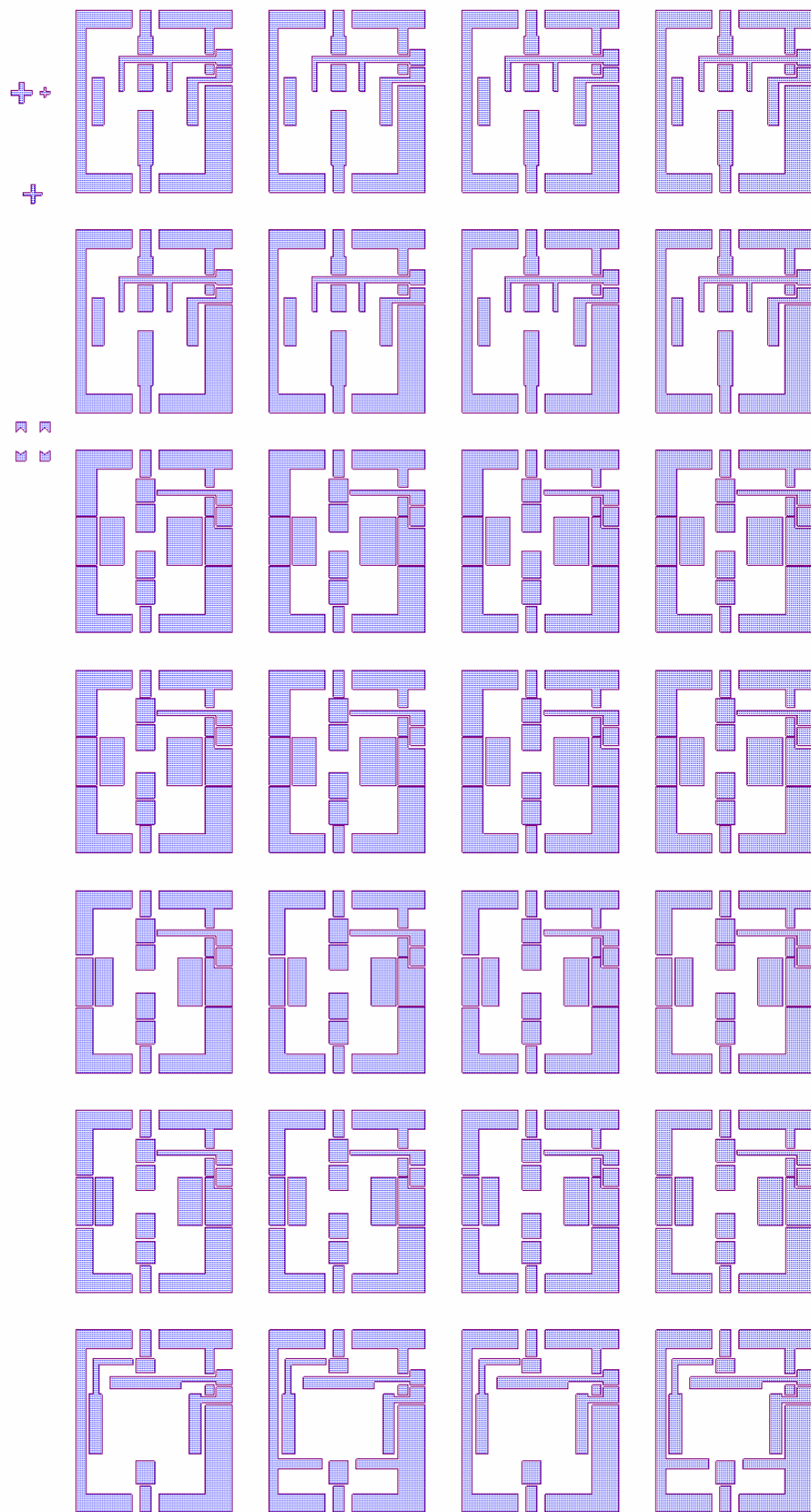


Рисунок 71. Слой формирования верхних обкладок развязывающих конденсаторов и утолщения опор моста

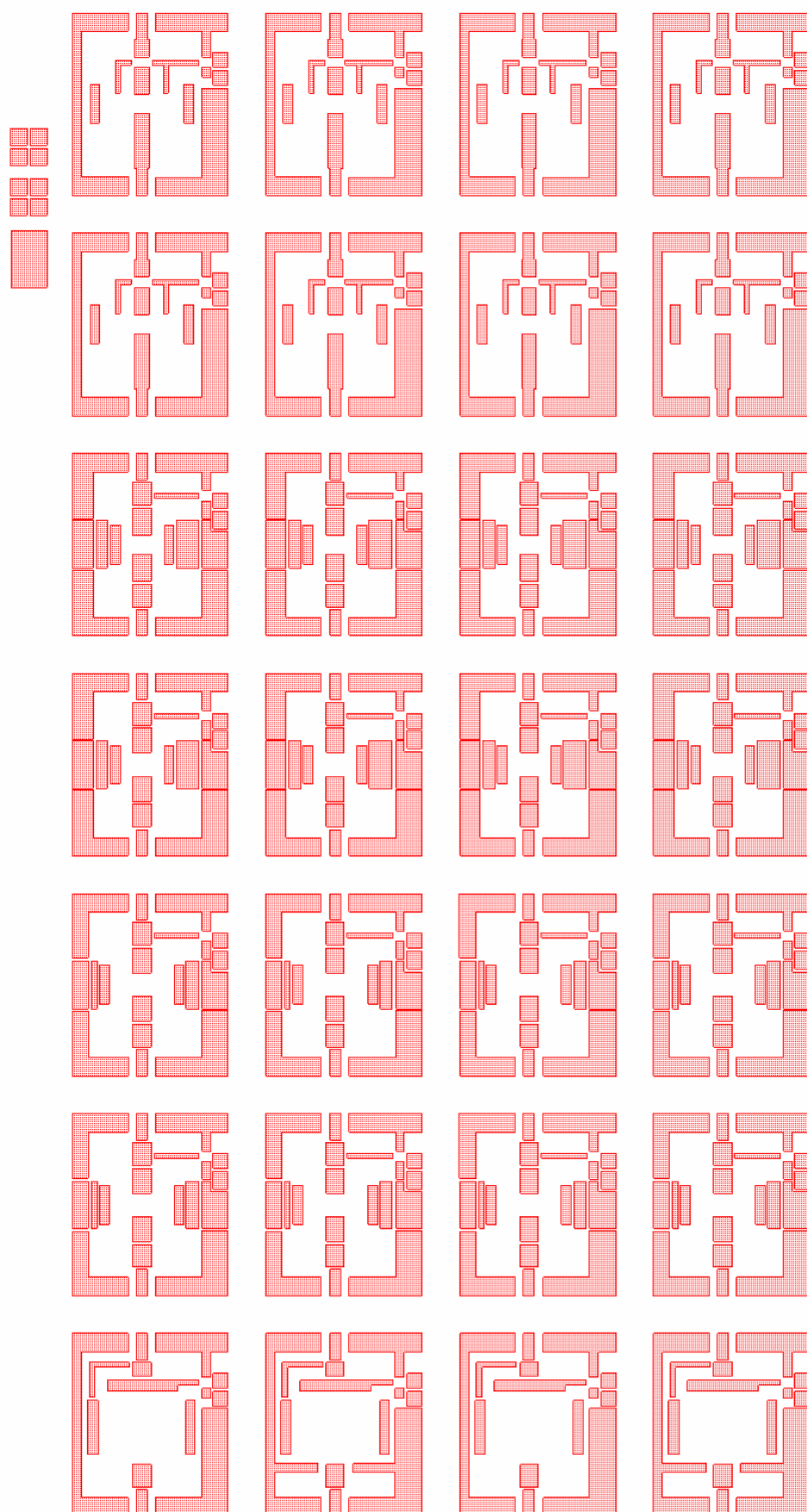


Рисунок 72. Слой формирования жертвенного слоя

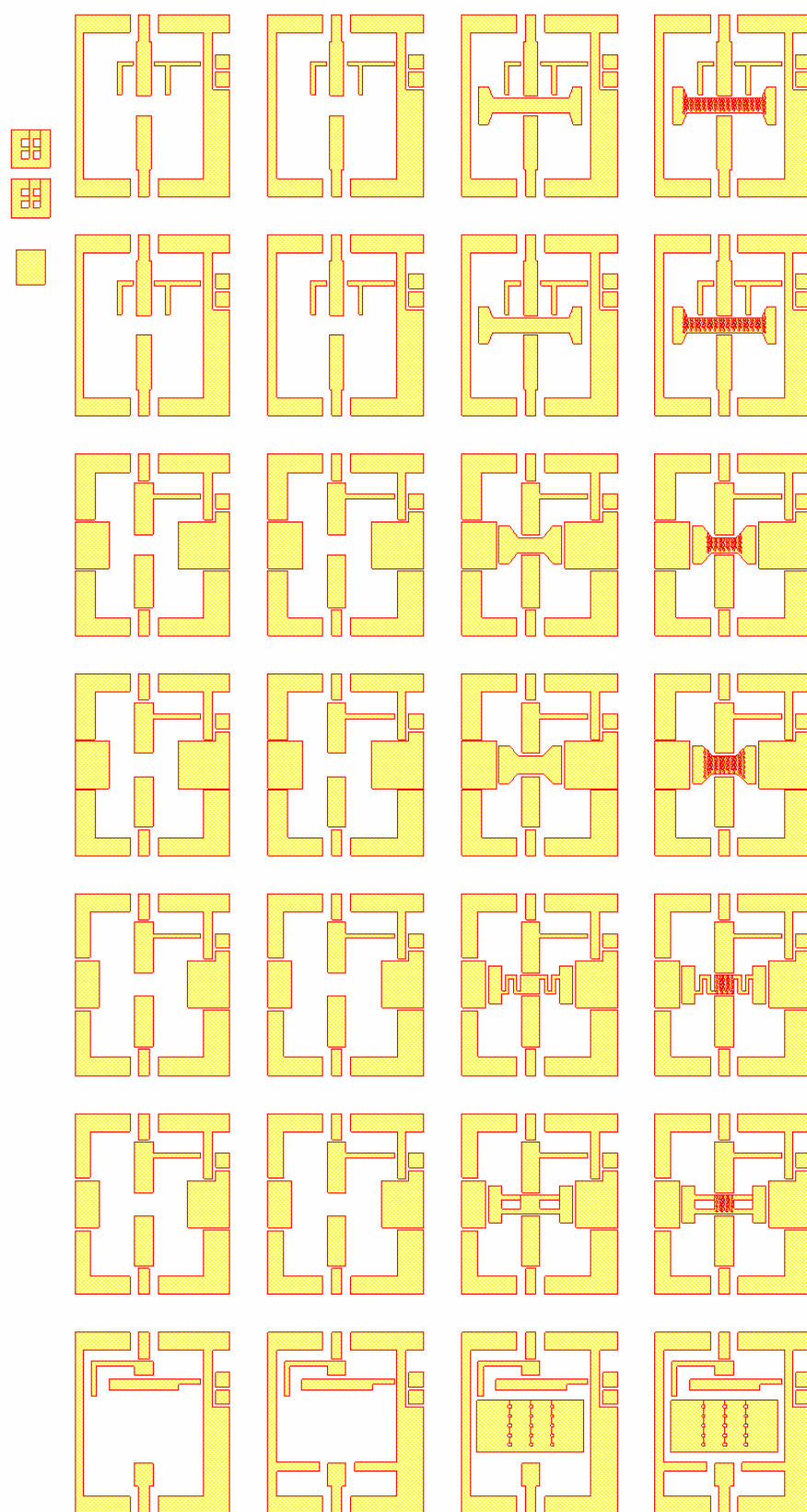


Рисунок 73. Слой гальванического утолщения элементов конструкции МЭМС устройств

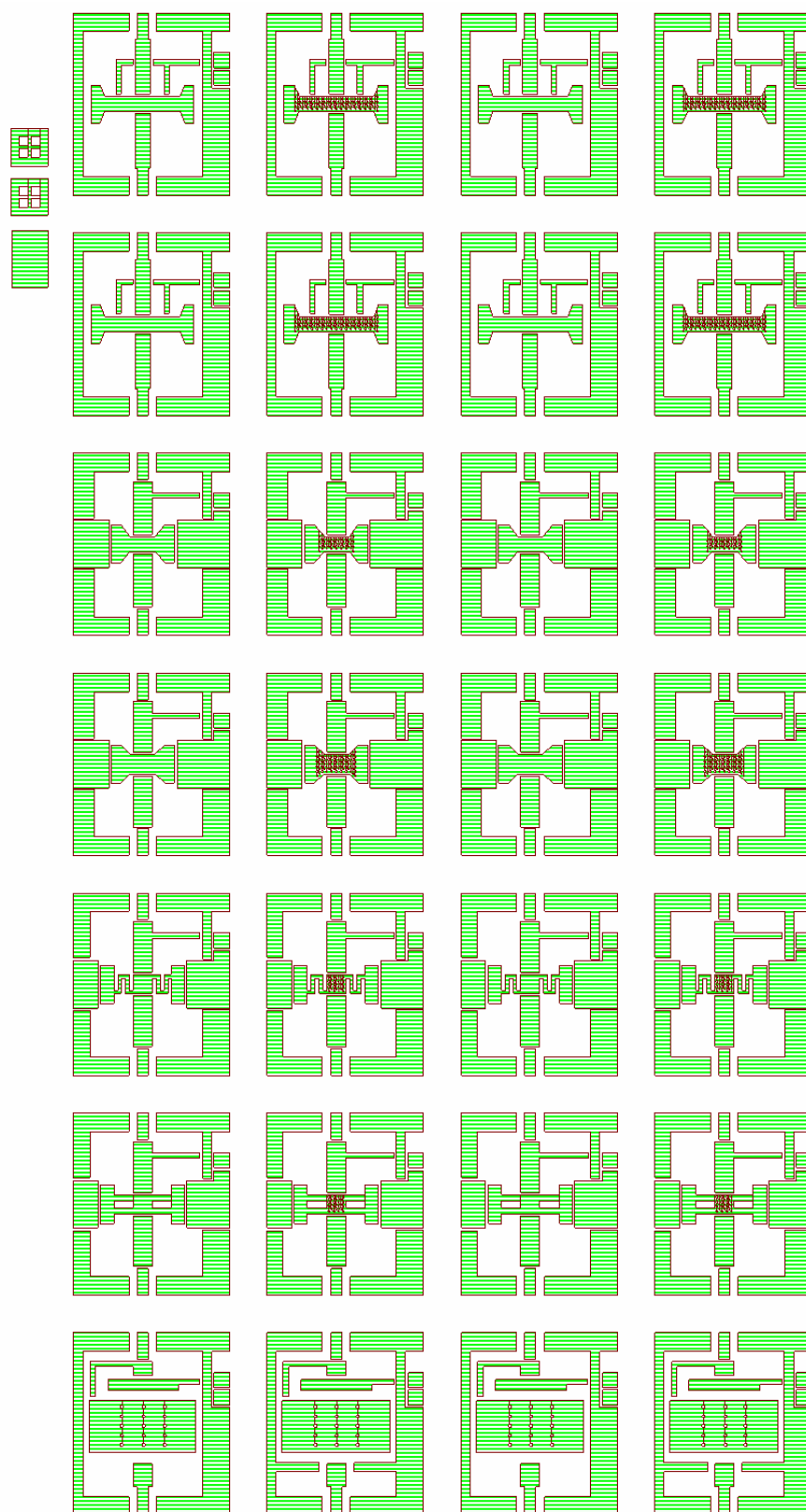


Рисунок 74. Слой обтрав лишнего металла и формирования сквозных отверстий в мембране

Все представленные на рисунках слои переносились и ретранслировались на стекло с нанесенным хромом. При этом стекла формирования пассивации СВЧ линии и нижних электродов, а также обтравка лишнего металла, формирования сквозных отверстий в мембране являются темными, а остальные светлыми. Полученный комплект стекол (фотошаблонов), использовался при создании МЭМС устройств на подложке арсенида галлия.

Приложение Б

**Последовательность технологических операций при изготовлении
макетных образцов (СВЧ коммутаторы сигналов на основе арсенида
галлия по технологии МЭМС)**

1. Подготовка поверхности пластины.

Отмывка пластины: $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}=1:40$, 2 мин, промывка в деионизованной воде 2 мин, сушка на центрифуге.

2. Формирование нижнего электрода, контактных площадок и нижних обкладок развязывающих конденсаторов.

- 2.1. Нанесение фоторезиста: двухслойная система фоторезистов – LOR10B-1,5 мкм + S1805-0,9 мкм
- 2.2. Фотолитография – установка контактной ультрафиолетовой фотолитографии SUSS MJB-4, время экспонирования 5 с.
- 2.3. Проявка фоторезиста: проявитель MF 319, время проявления 20 с.
- 2.4. Сушка фоторезиста: сушильный шкаф, время 15 мин., температура 115°C.
- 2.5. Внешний контроль: оптический микроскоп.
- 2.6. Зачистка в кислородной плазме: установка 08ПХО-100Т, $P_{\text{раб.}} - 50$ Па, среда O_2 , мощность 150 Вт, 1 минута.
- 2.7. Напыление металлов: установка вакуумного напыление УВН-2М (резистивный метод), $P_{\text{ост.}} - 8 \cdot 10^{-7}$ мм.рт.ст., металлы – Ti(500А)-Au(3000А).
- 2.8. Взрыв» фоторезиста: ацетон + диметилформамид.
- 2.9. Внешний контроль: оптический микроскоп.

3. Формирование опор моста

- 3.1. Нанесение фоторезиста: двухслойная система фоторезистов – LOR10B-1,5 мкм + S1805-0,9 мкм
- 3.2. Фотолитография – установка контактной ультрафиолетовой фотолитографии SUSS MJB-4, время экспонирования 5 с.
- 3.3. Проявка фоторезиста: проявитель MF 319, время проявления 20 с.
- 3.4. Сушка фоторезиста: сушильный шкаф, время 15 мин., температура 115°C.
- 3.5. Внешний контроль: оптический микроскоп.
- 3.6. Зачистка в кислородной плазме: установка 08ПХО-100Т, $P_{\text{раб.}} - 50 \text{ Па}$, среда O_2 , мощность 150 Вт, 1 минута.
- 3.7. Зачистка в аргоне: установка MIM-TLA, энергия ионов 180 эВ, время (30 с + 3 мин перерыв)х3 раза, $P_{\text{раб.}} - 8 \cdot 10^{-5} \text{ мм.рт.ст.}$, среда Ar.
- 3.8. Напыление металлов: установка вакуумного напыления УВН-2М (резистивный метод), $P_{\text{ост.}} - 8 \cdot 10^{-7} \text{ мм.рт.ст.}$, металлы – Ti(500А)-Au(5000А).
- 3.9. Взрыв» фоторезиста: ацетон + диметилформамид.
- 3.10. Внешний контроль: оптический микроскоп.

4. Формирование пассивации СВЧ линии и нижних электродов

- 4.1. Нанесение диэлектрика (Si_3N_4): установка низкотемпературного плазмохимического осаждения диэлектриков PlasmaLab 100; температура нанесения 280°C, газовая смесь SiH_4/N_2 , толщина 0.12 мкм.
- 4.2. Внешний контроль: оптический микроскоп.
- 4.3. Нанесение фоторезиста: позитивный фоторезист S1813, толщина 1,3 мкм.

- 4.4. Фотолитография пассивации: установка контактной ультрафиолетовой фотолитографии SUSS MJB-4, время экспонирования 3 с.
- 4.5. Проявка фоторезиста: проявитель MF 322, время проявления 30 с.
- 4.6. Сушка фоторезиста: сушильный шкаф, время сушки 10 мин., температура 120°C.
- 4.7. Внешний контроль: оптический микроскоп.
- 4.8. Зачистка в кислородной плазме: установка 08ПХО-100Т, $P_{\text{раб.}} - 50\text{Па}$, среда O_2 , мощность 150 Вт, 1 минута.
- 4.9. Плазмохимическое травление диэлектрика: установка травления в индуктивно-связанной плазме SI-500, фирмы Sentech, $P_{\text{раб.}} - 5\text{Па}$, мощность ISP – 150 Вт, мощность RF – 25 Вт, газовая смесь $SF_6/O_2=5:1$.
- 4.10. Внешний контроль: оптический микроскоп.
- 4.11. Снятие фоторезиста: диметилформамид 3 мин, промывка в деионизованной воде 2 мин, сушка на центрифуге.
- 4.12. Внешний контроль: оптический микроскоп.

5. Формирование верхних обкладок развязывающих конденсаторов и утолщения опор моста

- 5.1. Нанесение фоторезиста: двухслойная система фоторезистов – LOR10B-1,5 мкм + S1805-0,9 мкм
- 5.2. Фотолитография – установка контактной ультрафиолетовой фотолитографии SUSS MJB-4, время экспонирования 5 с.
- 5.3. Проявка фоторезиста: проявитель MF 319, время проявления 20 с.
- 5.4. Сушка фоторезиста: сушильный шкаф, время 15 мин., температура 115°C.
- 5.5. Внешний контроль: оптический микроскоп.
- 5.6. Зачистка в кислородной плазме: установка 08ПХО-100Т, $P_{\text{раб.}} - 50\text{ Па}$, среда O_2 , мощность 150 Вт, 1 минута.

- 5.7. Зачистка в аргоне: установка МИМ-TLA, энергия ионов 180 эВ, время (30 с + 3 мин перерыв)х3 раза, $P_{\text{раб.}}-8 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст., среда Ar.
- 5.8. Напыление металлов: установка вакуумного напыление УВН-2М (резистивный метод), $P_{\text{ост.}}-8 \cdot 10^{-7}$ мм.рт.ст., металлы – Ti(500А)-Au(5000А).
- 5.9. «Взрыв» фоторезиста: ацетон + диметилформамид.
- 5.10. Внешний контроль: оптический микроскоп.

6. Формирование жертвенного слоя

- 6.1. Нанесение фоторезиста: позитивный фоторезист S1815, толщина 2,5мкм.
- 6.2. Фотолитография мостов: установка контактной ультрафиолетовой фотолитографии SUSS MJB-4, время экспонирования 7 с.
- 6.3. Проявка фоторезиста: проявитель MF 322, время проявления 30 с.
- 6.4. Сушка фоторезиста: Hotplate, время сушки 3 мин., температура 150°C.
- 6.5. Внешний контроль: оптический микроскоп.
- 6.6. Зачистка в кислородной плазме: установка 08ПХО-100Т, $P_{\text{раб.}} - 50\text{Па}$, среда O_2 , мощность 150 Вт, 1 минута.
- 6.7. Зачистка в аргоне: установка МИМ-TLA, энергия ионов 180 эВ, время (30 с + 3 мин перерыв)х3 раза, $P_{\text{раб.}}-8 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст., среда Ar.
- 6.8. Напыление металлов: установка вакуумного напыления УВН-2М (резистивный метод), $P_{\text{ост.}}-8 \cdot 10^{-7}$ мм.рт. ст., металлы – Ti(500А)-Au(5000А)-Ti(250А)
- 6.9. Внешний контроль: оптический микроскоп.

7. Гальванического утолщения элементов конструкции МЭМС устройств

- 7.1. Нанесение фоторезист: фоторезист S1818, толщина 2,5 мкм.

- 7.2. Фотолитография для гальванического наращивания Au: установка контактной ультрафиолетовой фотолитографии SUSS MJB-4, время экспонирования 6 с.
- 7.3. Проявка фоторезиста: проявитель MF 322, время проявления 30 с.
- 7.4. Сушка фоторезиста: сушильный шкаф, время сушки 15 мин., температура 110°C.
- 7.5. Зачистка в кислородной плазме: установка 08ПХО-100Т, $P_{\text{раб.}} = 50$ Па, среда O_2 , мощность 150 Вт, 1 минута.
- 7.6. Жидкостное травление верхнего слоя Ti: «буферный» травитель на основе плавиковой кислоты, 1 мин.
- 7.7. Гальваническое осаждение золота: установка гальванического осаждения золота, толщина 1.8 мкм.
- 7.8. Внешний контроль: оптический микроскоп.
- 7.9. Контроль толщины гальванически осажденного слоя: профилометр - "Talystep".

8. Обтрав лишнего металла и формирование отверстий в мембране

- 8.1. Нанесение резиста: фоторезист S1818, толщина 2 мкм.
- 8.2. Фотолитография травления затравочного слоя и отверстий: установка контактной ультрафиолетовой фотолитографии SUSS MJB-4, время экспонирования 6,5 с.
- 8.3. Проявление фоторезиста: проявитель MF 322, время проявления 30 с.
- 8.4. Сушка фоторезиста: сушильный шкаф, время сушки 15 мин., температура 115°C.
- 8.5. Зачистка в кислородной плазме: установка 08ПХО-100Т, $P_{\text{раб.}} = 50$ Па, среда O_2 , мощность 150 Вт, 1 минута.
- 8.6. Жидкостное травление металла Au/Ti: «золотой» травитель, «буферный» травитель, время травления устанавливается визуально.

- 8.7. Удаление верхнего слоя фоторезиста в кислородной плазме: установка 08ПХО-100Т, $P_{\text{раб.}} - 50 \text{ Па}$, среда O_2 , мощность 150 Вт, 2 минута.
- 8.8. Удаление фоторезиста в жидкой химии: растворитель – N-метилпирролидон, температура травителя $90 \text{ }^\circ\text{C}$, время 20 мин.
- 8.9. Внешний контроль: оптический микроскоп.

9. Сублимационная сушка мембран

- 9.1 Промывкой в изопропиловом спирте.
- 9.2 Промывка в циклогексане и замораживание циклогексана до температуры 0°C .
- 9.3 Сублимационное удаление циклогексана в вакуумной камере, окончание процесса – падение давления ниже 50 Па.
- 9.4 Зачистка в кислородной плазме: установка 08ПХО-100Т, $P_{\text{раб.}} - 50 \text{ Па}$, среда O_2 , мощность 150 Вт, 1 минута.
- 9.5 Оптический контроль.

Приложение В

Последовательность технологических операций по изготовлению ИС МШУ на базе AlGaAs/InGaAs/GaAs

1 Приборная изоляция

2.1 Фотолитография – установка контактной ультрафиолетовой фотолитографии SUSS MJB-4, позитивный фоторезист;

2.2 После проявления резиста удаление остатков углеводов в кислородной плазме (установка типа GLEN1000);

2.3 Жидкостное травление в смеси $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (1:1:40) на глубину около 70 нм (в зависимости от толщин слоев гетероструктуры).

2.4 Удаление фоторезиста – диметилформаид 3 мин, промывка в деионизованной воде 2 мин, сушка на центрифуге;

2.5 Контроль глубины травления:

1.5.1 Профилометр - “Talystep”;

1.5.2 Тестовые электрические измерения – зондовая установка, измеритель параметров полупроводниковых приборов “370A” Tektronix.

2 Омические контакты

2.1 Фотолитография – SUSS MJB-4, двухслойная система фоторезистов: LOR5A-0,5 мкм + S1813-1,3 мкм; проявитель MF-322+MF-319; время проявления 80 сек;

2.2 После проявления резиста удаление остатков углеводов в кислородной плазме (установка типа GLEN1000);

2.3 Удаление окисла в смеси $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$ (1:10);

2.4 Термическое напыление системы металлов Ni/Ge/Au (10/20/350 нм)– установка вакуумного напыления «УВН»;

2.5 Удаление «лишнего» металла методом отслаивания фоторезиста («взрыва») - ацетон;

2.6 Термический отжиг в атмосфере азота – установка для вжигания контактов, 420°C, 6 мин;

2.7 Контроль контактного сопротивления:

2.7.1 Тестовые электрические измерения - “370А” Tektronix, метод длинной линии.

3 Формирование электронно-лучевого затвора длиной <0,15 мкм

3.1 Электронно-лучевая литография – электронно-лучевой нанолитограф RAITH-150TWO; трехслойная система электронных резистов на основе PMMA950/PMGI/PMMA для получения грибообразного профиля затвора; визуальный контроль проявления – ультрафиолетовый микроскоп Leica INM-100.

3.2 Термическое напыление системы металлов Ti 60 нм/Pd 20 нм/Au 600 нм – «УВН».

3.3 Удаление «лишнего» металла методом отслаивания фоторезиста («взрыва»)- ацетон.

3.4 Визуальный контроль – оптический микроскоп INM-100.

3.5 Тестовые электрические измерения - “370А” Tektronix.

4 Пассивация активных поверхностей

4.1 Плазмохимическое осаждение пленки нитрида кремния – установка низкотемпературного плазмохимического осаждения диэлектриков PlasmaLab 100; температура нанесения 280°C, SiH₄/NH₃

4.2 Фотолитография –SUSS MJB4, позитивный фоторезист.

4.3 Реактивно-ионное травление пленки нитрида кремния – установка реактивно-ионного травления на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), газ CHF₃

4.4 Визуальный контроль – оптический микроскоп.

5 Формирование первого уровня электрических межсоединений.

5.1 Фотолитография – SUSS “MJB4”, двухслойная система фоторезистов: LOR5A-0,5 мкм + S1813-1,3 мкм; проявитель MF-322+MF-319; время проявления 80 сек.

5.2 Термическое напыление системы металлов Ti 60 нм/Au 400 нм – «УВН».

5.3 Удаление «лишнего» металла методом отслаивания фоторезиста («взрыва») – ацетон .

5.4 Контроль внешнего вида.

6 Металлизация контактных площадок с «воздушными» мостами.

6.1 Фотолитография с «толстым» резистом «воздушного» моста – позитивный фоторезист S1815 толщиной 1,7 мкм, SUSS MJB4.

6.2 Термическая обработка резиста - 135°C, 3 мин.
термостабилизированный столик.

6.3 Термическое напыление подслоя Ti/Au/Ti – «УВН», 70нм/400нм/70нм

6.4 Фотолитография для гальванического наращивания Au – SUSS MJB4, фоторезист S1815, толщина 1,8 мкм.

6.5 Жидкостное травление верхнего слоя Ti – «буферный» травитель на основе плавиковой кислоты.

6.6 Гальваническое наращивание золота – установка гальванического осаждения металлов.

6.7 Фотолитография окон гальванически наращенного золота – SUSS MJB4, фоторезист S1813, толщина 1,3 мкм.

6.8 Жидкостное травление подслоя металла Au/Ti – «золотой» травитель, «буферный» травитель, время травления устанавливается визуально.

6.9 Удаление резистов в кислородной плазме – установка реактивно-ионного травления, кислород.

6.10 Удаление резистов в растворителе – N-метилпирролидон.

Приложение Г

Опубликованные работы по теме диссертации в виде интеллектуальной собственности

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации
топологии интегральной микросхемы
№ 2012630175

**Емкостной микроэлектромеханический шунтирующий
переключатель для диапазона 3-25 ГГц**

Правообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики» (МГТУ МИРЭА) (RU)*

Автор(ы): *Мельников Александр Александрович, Мальцев Петр Павлович, Павлов Александр Юрьевич, Щаврук Николай Васильевич, Майтама Максим Викторович (RU)*

Заявка № **2012630140**

Дата поступления **30 октября 2012 г.**

Зарегистрировано в Реестре топологий интегральных микросхем **17 декабря 2012 г.**

Дата начала срока действия исключительного права **17 декабря 2012 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Б.П. Симонов**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации
топологии интегральной микросхемы

№ 2012630176

Емкостной микроэлектромеханический переключатель
для диапазона 5-7 ГГц

Правообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики» (МГТУ МИРЭА) (RU)*

Автор(ы): *Мельников Александр Александрович, Мальцев Петр Павлович, Павлов Александр Юрьевич, Щаврук Николай Васильевич, Майтама Максим Викторович (RU)*

Заявка № 2012630141

Дата поступления 30 октября 2012 г.

Зарегистрировано в Реестре топологий
интегральных микросхем 17 декабря 2012 г.Дата начала срока действия исключительного права
17 декабря 2012 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации
топологии интегральной микросхемы

№ 2012630161

Трехэлектродный СВЧ конденсатор переменной
емкости для диапазона частот 10-12 ГГц

Привладелец(и): *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) (RU)*

Автор(ы): *Мальцев Петр Павлович, Мельников Александр Александрович, Павлов Александр Юрьевич, Щаврук Николай Васильевич, Майтама Максим Викторович (RU)*

Заявка № 2012630125

Дата поступления 27 сентября 2012 г.

Зарегистрировано в Реестре топологий
интегральных микросхем 14 ноября 2012 г.Дата начала срока действия исключительного права
14 ноября 2012 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.Л. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации
топологии интегральной микросхемы

№ 2012630153

Емкостной микроэлектромеханический шумящий
переключатель для диапазона 10-12 ГГц

Правообладатель(и): *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) (RU)*

Автор(ы): *Мальцев Петр Павлович, Павлов Александр Юрьевич, Щаврук Николай Васильевич, Майтама Максим Викторович (RU)*

Заявка № 2012630117

Дата поступления 13 сентября 2012 г.

Зарегистрировано в Реестре топологий
интегральных микросхем 30 октября 2012 г.Дата начала срока действия исключительного права
30 октября 2012 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.Н. Самойлов

Приложение Д



«УТВЕРЖДАЮ»
Врио директора ИСВЧПЭ РАН

[Signature] д. т. н. П.П. Мальцев

«30» *[Signature]* 2015 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
Щаврука Николая Васильевича

Комиссия в составе: председателя – заместителя директора по научной работе ИСВЧПЭ РАН к.ф.-м.н. Пономарева Дмитрия Сергеевича; членов комиссии: зав. лаб. 101 д. ф.-м. н. Галиева Галиба Бариевича; зав. лаб. 106 к. т. н. Павлова Александра Юрьевича, с. н. с., к. ф.-м. н. Климова Евгения Александровича составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Н.В. Щаврука «Проектирование и изготовление микроэлектромеханических переключателей на подложках GaAs для СВЧ диапазона», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в научных разработках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) при выполнении следующих НИР:

1. «Исследования по разработке базовых технологий изделий микроэлектроники: систем на кристалле, в том числе в гетероинтеграции сенсорных и исполнительных элементов (СВЧ коммутаторы сигналов и варакторы)» (государственный контракт от «01» июня 2011 г. № 16.426.11.0032), проводимой в рамках Федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008-2015 годы. №16.426.11.0032
2. «Разработка базовой технологии создания МИС усилителей мощности и малозумящих усилителей на нитридных наногетероструктурах для приемо-передающих модулей на частоту 8-12 ГГц» (шифр заявки «2014-14-579-0003-063») №14.607.21.0011

В указанных НИР были изготовлены макеты МЭМС переключателей СВЧ сигнала по разработанному маршруту в диссертационной работе.

Председатель комиссии,
зам. директора по научной работе, к.ф.-м.н.

[Signature]

Д.С. Пономарев

Члены комиссии:

зав. лаб. № 101, д. ф.-м. н.

[Signature]

Г.Б. Галиев

зав. лаб. № 106, к. т. н.

[Signature]

А.Ю. Павлов

старший научный сотрудник, к. ф.-м. н.

[Signature]

Е.А. Климов