

*На правах рукописи*



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

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

Щаврук Николай Васильевич

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники

Российской академии наук

Научный  
руководитель: Мальцев Петр Павлович  
доктор технических наук, профессор

Официальные  
оппоненты: Тимошенко Сергей Петрович  
доктор технических наук, профессор, зав. каф.  
микроэлектроники, Национальный  
исследовательский университет «Московский  
институт электронной техники» (НИУ МИЭТ)

Амеличев Владимир Викторович  
кандидат технических наук, начальник отдела  
микросистемной техники, федеральное  
государственное бюджетное учреждение «Научно-  
производственный комплекс «Технологический  
центр» МИЭТ»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный университет  
информационных технологий, радиоэлектроники и  
электроники (МИРЭА)

Защита диссертации состоится 17 декабря 2015 в 15 часов на заседании диссертационного совета Д002.204.01 при Физико-технологическом институте Российской академии наук по адресу: г. Москва, Нахимовский проспект 36 к 1, 6 этаж, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технологического института РАН.

Автореферат разослан «\_\_» октября 2015 года. Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв, заверенный печатью организации, по адресу 117218 г. Москва, Нахимовский проспект 36 к 1.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.204.01  
кандидат физико-математических наук



Вьюрков В.В.

## Общая характеристика работы

### 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 [а].

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 [12]. Это обусловлено тем, что для его создания можно использовать технологию изготовления интегральных схем [2]. 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 [6].

Основным недостатком СВЧ МЭМС переключателей электростатического типа являются высокие управляющие напряжения (до 80 В) [3], 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 ИС 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 приемопередающих 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.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация содержит 106 страниц машинописного текста, включая 67 рисунков и 11 таблиц.



## Основное содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и вытекающие из нее задачи исследований. Изложены научная новизна и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводится анализ состояния разработок в области СВЧ переключателей сигналов по отечественным и зарубежным литературным источникам. Рассмотрены основные типы СВЧ переключателей сигналов.

Типы СВЧ переключателей сигнала можно разделить на три группы:

- электромеханические;
- переключатели на основе дискретных полупроводниковых приборов;
- МЭМС переключатели.

Электромеханические переключатели превосходят все остальные по коммутируемой мощности – до нескольких киловатт при частотах 1 ГГц, имеют низкие потери – до 0,2 дБ и высокие параметры изоляции – до 80 дБ. Но при этом, имеют самое высокое время переключения – порядка 10 мс, высокую потребляемую мощность и относительно низкий срок службы – около 1 млн циклов и высокие массо-габаритные параметры. Переключатели на основе дискретных полупроводниковых приборах (PIN-диоды, полевые транзисторы) имеют самое низкое время переключения – 1-100 нс, низкую потребляемую мощность – от 0,05 мВт (PIN-диоды) до 20 мВт (полевые транзисторы), при этом основным недостатком данных переключателей является сложность изготовления и высокие потери – от 0,3 до 2,5 дБ. МЭМС переключатели объединяют в себе лучшие черты упомянутых выше переключателей: возможность коммутации достаточно высоких мощностей СВЧ сигнала – до 10 Вт, малое время переключения – 1-300 мкс, низкое энергопотребление – менее 2 мкВт при частоте переключения 1 кГц, высокая изоляция сигнала и низкие потери (40 дБ и 0.05-0.8 дБ соответственно), малые массо-габаритные характеристики и возможность интеграции в ИС на одном кристалле и (или) в одном корпусе [10].

В свою очередь, МЭМС переключатели делятся на четыре типа по принципу срабатывания: электростатические, термомеханические, электромагнитные и пьезоэлектрические. Основные характеристики данных МЭМС переключателей приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение МЭМС переключателей с различным механизмом работы

МЭМС	$V_{упр}$ (В)	$I_{упр}$ (мА)	P (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 таблицы 1, МЭМС переключатели на основе электростатического механизма срабатывания наиболее пригодны для использования в качестве СВЧ МЭМС переключателей ввиду того, что:

- их потребляемая мощность близка к нулю;
- имеют малый размер;
- обладают наименьшим временем срабатывания;
- при их изготовлении используется планарная технология, позволяющая интегрировать МЭМС переключатель с ИС с минимальными затратами.

Данный тип СВЧ переключателя имеет и свой недостаток, который заключается в необходимости использования высокого управляющего напряжения (до 80 В). В то время, управляющие напряжения остальных типов МЭМС переключателей лежат в диапазоне от 3 до 20 В.

**Вторая глава** посвящена моделированию и расчету МЭМС переключателей для диапазона частот 10-12 ГГц. В данной главе рассмотрены

электромеханическая и электрофизическая модели МЭМС переключателей [1,4].

Шунтирующий МЭМС переключатель представляет собой подвижную металлическую мембрану, расположенную над СВЧ линией и закрепленную на заземленном электроде. При подаче постоянного управляющего напряжения на СВЧ электрод за счет сил электростатического напряжения мембрана опускается на СВЧ электрод, емкость между заземленными электродами и СВЧ линией резко возрастает, и СВЧ сигнал переключается на заземленный электрод.

Электрофизическая модель переключателя представлена на рис. 1.

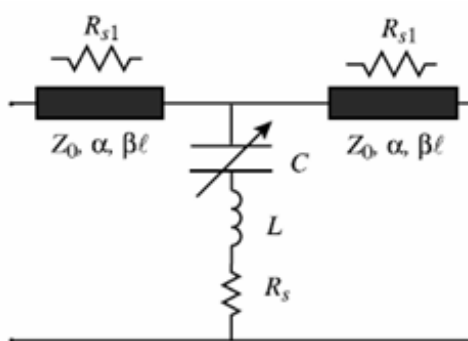


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема шунтирующего СВЧ МЭМС переключателя

Для СВЧ МЭМС переключателя электрический импеданс равен:

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

Для данной LC-цепи резонансная частота равна:

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

Таким образом, импеданс переключателя можно представить как:

$$Z = \begin{cases} \frac{1}{i\omega C} & \text{для } f \ll f_0 \\ R_s & \text{для } f = f_0 \\ i\omega L & \text{для } f \gg f_0 \end{cases} \quad (3)$$

Отсюда следует, что вблизи резонансной частоты импеданс сработавшего СВЧ МЭМС переключателя определяется сопротивлением крепления мембраны, что позволяет повысить коэффициент изоляции СВЧ МЭМС переключателя. Индуктивность крепления мембраны и ее сопротивление зависят от геометрии крепления.

На основании эквивалентной электрической схемы МЭМС переключателя, представленной на рис. 1, произведено моделирование прохождения ВЧ сигнала через переключатель с использованием программы AWR Design Environment. Были рассмотрены три типа крепления мембраны с разной индуктивностью. По результатам моделирования был выбран тип крепления мембраны, наиболее полно отвечающий поставленной задаче, - крепление в форме меандра. Предварительная оценка параметров переключателя основывалась на эквивалентной схеме переключателя, представленной на рис. 2.

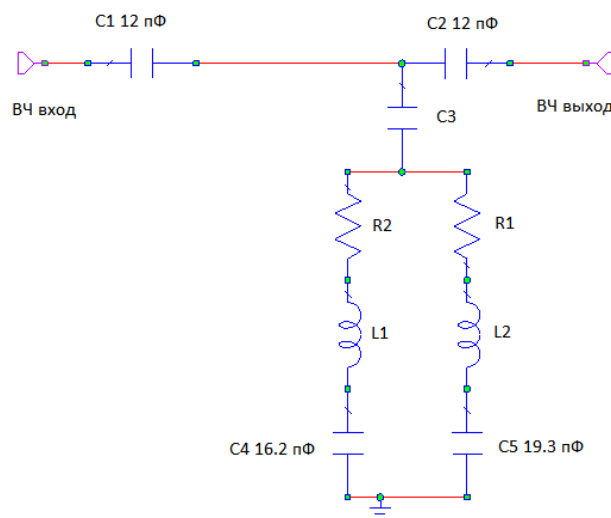


Рис. 2. Эквивалентная схема СВЧ МЭМС переключателя

В эквивалентной схеме МЭМС переключателя отображены элементы LC развязки управляющего сигнала от СВЧ сигнала. Дроссели, препятствующие прохождению СВЧ сигнала в цепь питания, располагаются вне переключателя. Емкости LC развязки, препятствующие прохождению управляющего напряжения в СВЧ цепь, реализованы непосредственно в конструкции переключателя (конденсаторы C1, C2, C4, C5). Для достижения наименьшего

размера МЭМС переключателя длина крепления в виде меандра была равна длине самой мембраны. Общая индуктивность рассчитывалась как индуктивность проводника (4) с учетом взаимной индукции параллельных сегментов меандра (5):

$$L=0.002 \cdot l \cdot \left( \ln \left( \frac{2l}{w+t} \right) + 0.50049 + \frac{w+t}{3l} \right) \quad (4)$$

где  $L$  – индуктивность мкГн,  $l$  - длина проводника (см),  $w$  – ширина проводника (см),  $t$  – толщина проводника (см);

$$M_c(l, r) = \pm \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot l \cdot \left[ \ln \left( \frac{l}{r} + \sqrt{1 + \left( \frac{l}{r} \right)^2} \right) - \sqrt{1 + \left( \frac{r}{l} \right)^2} + \frac{r}{l} \right] \quad (5)$$

где  $l$  – длина проводников,  $r$  – расстояние между проводниками

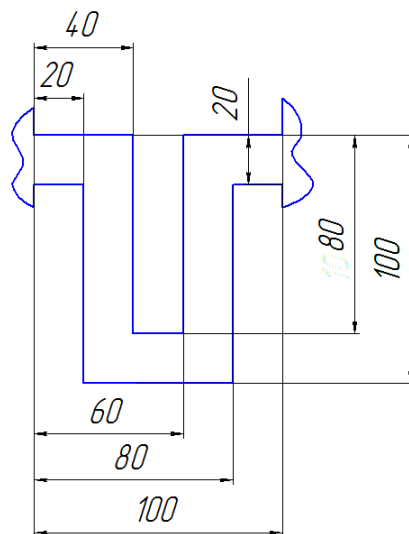


Рис. 3. Крепление мембраны МЭМС переключателя в виде меандра, все размеры в мкм.

Полученные в результате расчетов размеры крепления мембраны представлены на рис. 3. При этом размеры мембраны переменного конденсатора составили  $100 \times 100$  мкм с толщиной диэлектрика  $1200 \text{ \AA}$ , емкость во включенном состоянии составила  $5,5 \text{ пФ}$ , в выключенном –  $0,044 \text{ пФ}$ .

Результаты моделирования, представленные на рис. 4, показали возможность создания МЭМС переключателя с потерями менее 0,2 дБ и развязкой сигнала более 25 дБ для диапазона частот 10-12 ГГц.

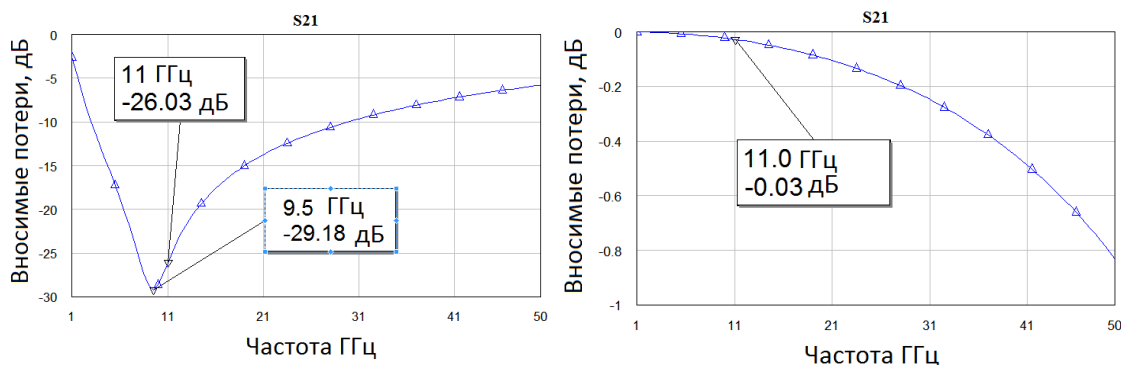


Рис. 4. Результаты моделирования прохождения СВЧ сигнала по эквивалентным схемам МЭМС переключателя во включенном и выключенном состоянии.

Для достижения большей точности расчета была построена топология СВЧ МЭМС переключателя (рис. 5) и проведено электрофизическое моделирование топологии, для полного учета влияния электромагнитных взаимодействий различных элементов переключателя друг на друга. Электрофизическое моделирование проводилось в программе Advanced Design System (ADS), результаты которого представлены на рис. 6.

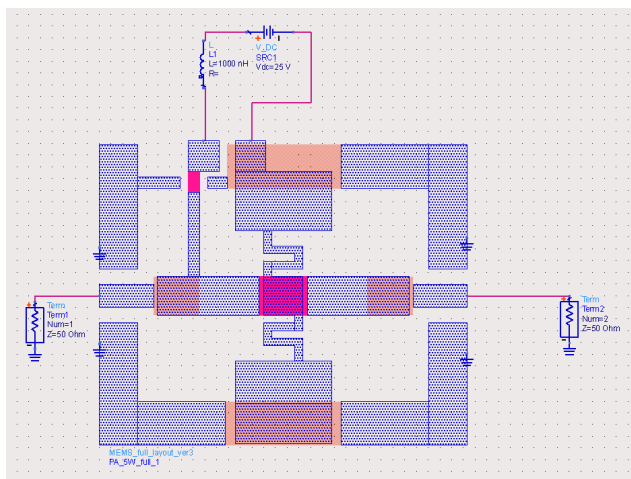


Рис. 5. Топология СВЧ МЭМС переключателя

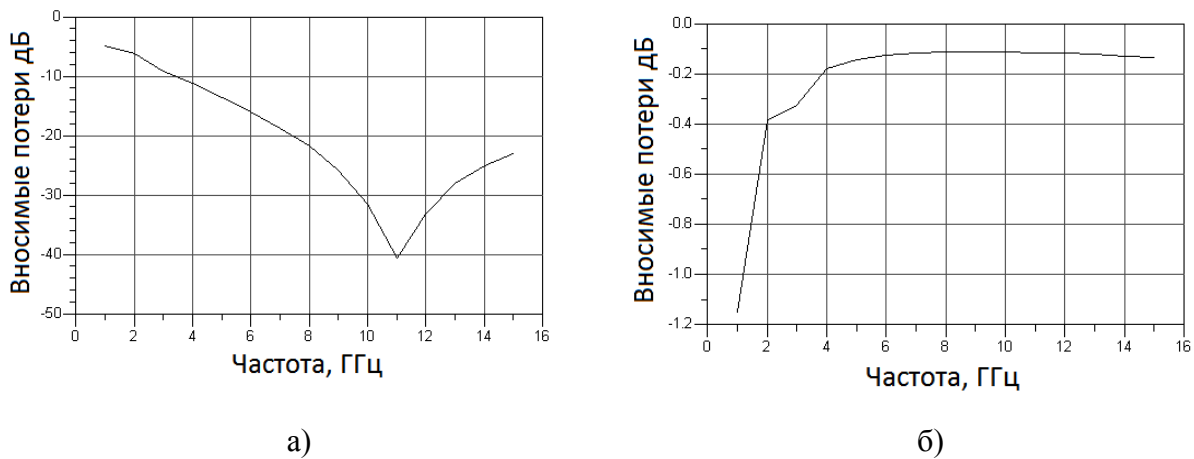


Рис. 6. Прохождение СВЧ сигнала через МЭМС переключатель во включенном (а) и выключенном состоянии (б).

На основании электромеханической модели, представленной на рис. 7, рассчитывалось напряжение срабатывания МЭМС переключателя. Для расчета напряжения срабатывания использовался метод малых отклонений.

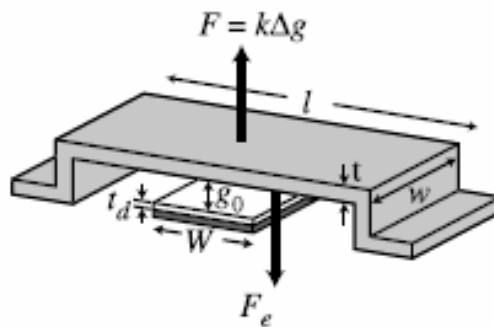


Рис. 7. Электромеханическая схема МЭМС переключателя

В результате расчетов была получена следующая формула, описывающая напряжение срабатывания:

$$V_{\text{сраб}} = \sqrt{\frac{8k g_0^3}{27 \epsilon_0 W w}} \quad (6)$$

где  $g_0$  - первоначальный зазор между мембраной и управляющим электродом,  $W$  – ширина управляющего электрода,  $w$  – ширина металлической мембраны,  $k$  – коэффициент упругости крепления мембраны.

Для вычисления коэффициента упругости меандра применялось следующее выражение:

$$k = \left( \frac{8N^3 a^3 + 2Nb^3}{3EI_x} + \frac{abN(3b + (2N + 1)(4N + 1)a}{3GJ} - \frac{Na^2 \left( \frac{2Na}{EI_x} + \frac{(2N + 1)b}{GJ} \right)^2}{2 \left( \frac{a}{EI_x} + \frac{b}{GJ} \right)} - \frac{Nb^2 \left( \frac{a}{GJ} + \frac{b}{EI_x} \right)}{2} \right)^{-1} \quad (7)$$

где  $a$  – ширина меандра,  $b$  – длина меандра,  $t$  – толщина меандра,  $w$  – ширина крепления,  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $G$  – модуль сдвига,  $I_x, I_y$  – момент инерции по оси  $x$  и  $y$ ,  $J$  – постоянная кручения,  $N$  – количество меандров в креплении мембраны.

В результате моделирования получен МЭМС переключатель со следующими характеристиками: напряжение срабатывания – 17,2 В, изоляция сигнала 30 дБ, потери менее 0,2 дБ для частотного диапазона 10-12 ГГц.

**Третья глава** посвящена изготовлению МЭМС переключателей. Для изготовления СВЧ МЭМС переключателей использовалась лабораторная технология изготовления ИС на основе дискретных полупроводниковых приборов на базе арсенида галлия. На рисунке 7 приведены основные этапы изготовления МЭМС переключателей и МИС на основе арсенида галлия. Как видно из рисунка 8, базовые операции изготовления МЭМС переключателей и МИС на основе арсенида галлия схожи и поддаются унификации. Единственным отличием предложенной технологии изготовления МЭМС переключателей от существующей лабораторной технологии является введение операции удаления «жертвенного слоя». Это обусловлено тем, что при удалении фоторезиста жидкостным растворителем и при последующей сушке пластины капиллярная сила притягивает мембрану к управляющему электроду, и мембрана прилипает к нему за счет сил водородных связей (сил Ван-дер-Ваальса). Для предотвращения данного эффекта применяют сушку при



критической температуре в  $\text{CO}_2$ , метод сублимационной сушки или удаление «жертвенного слоя» в кислородной плазме.

а) Подготовка поверхности пластины



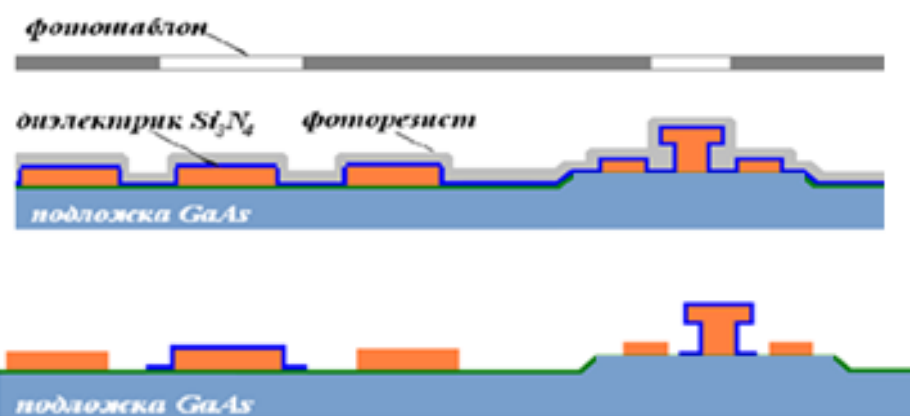
б) Формирование омических контактов транзистора и опор воздушного моста



с) Формирование затвора транзистора



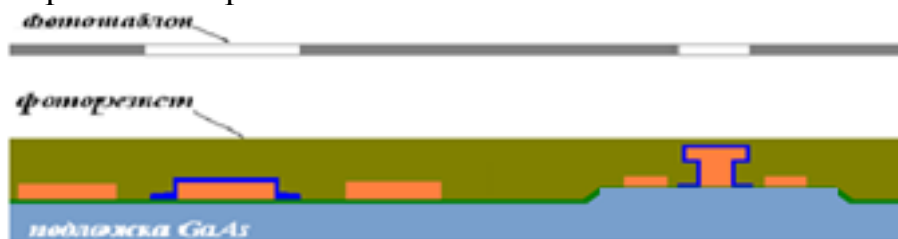
д) Пассивация затвора транзистора и нижнего электрода МЭМС-переключателя



е) Формирования слоя соединений



f) Формирование жертвенного слоя



g) Формирование воздушных мостов и мембраны МЭМС-переключателя



h) Удаление лишнего металла ЖХТ и удаление жертвенного слоя



Рис. 8. Технологический маршрут совместного изготовления МШУ на основе гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs и МЭМС переключателя

Несмотря на то, что метод сушки при критической температуре в  $\text{CO}_2$  себя прекрасно зарекомендовал и широко применяется при изготовлении приборов по МЭМС технологии, он не применялся ввиду необходимости использования дополнительного оборудования. В данной работе при изготовлении МЭМС переключателей «жертвенный слой» удалялся либо в кислородной плазме, либо химическими методами с применением сублимационной сушки с использованием циклогексана. Циклогексан обладает такими важными особенностями, как высокая температура плавления –  $6,6^\circ\text{C}$ , высокое давление насыщенных паров – 40 торр при температуре плавления. При замерзании он остается пластичным, при этом уменьшается вероятность повреждения мембран. Из-за высокого коэффициента упругости конструкции «воздушные» мосты в схемах МШУ не подвержены капиллярному эффекту.

Тем самым, показана возможность изготовления в едином технологическом цикле СВЧ переключателей и полупроводниковых приборов на основе арсенида галлия.

**Четвертая глава** посвящена измерениям характеристик полученных МЭМС переключателей, и сравнению их характеристик с зарубежными аналогами.

Для определения напряжения срабатывания и емкости СВЧ МЭМС переключателей производились измерения их вольт-фарадных характеристик на LCR-метре. Для определения собственных потерь и коэффициента изоляции МЭМС переключателей проводились измерения их  $S$ -параметров пропускания в верхнем и нижнем положениях мембраны на векторном анализаторе.

Результаты измерения вольт-фарадных характеристик переключателей, изготовленных по технологии удаления «жертвенного слоя» в кислородной плазме и методом сублимационной сушки, представлены на рисунках 9 и 10 соответственно. Из рисунков 9 и 10 видно, что значения емкости МЭМС переключателей ниже расчетных (5.5 пФ).

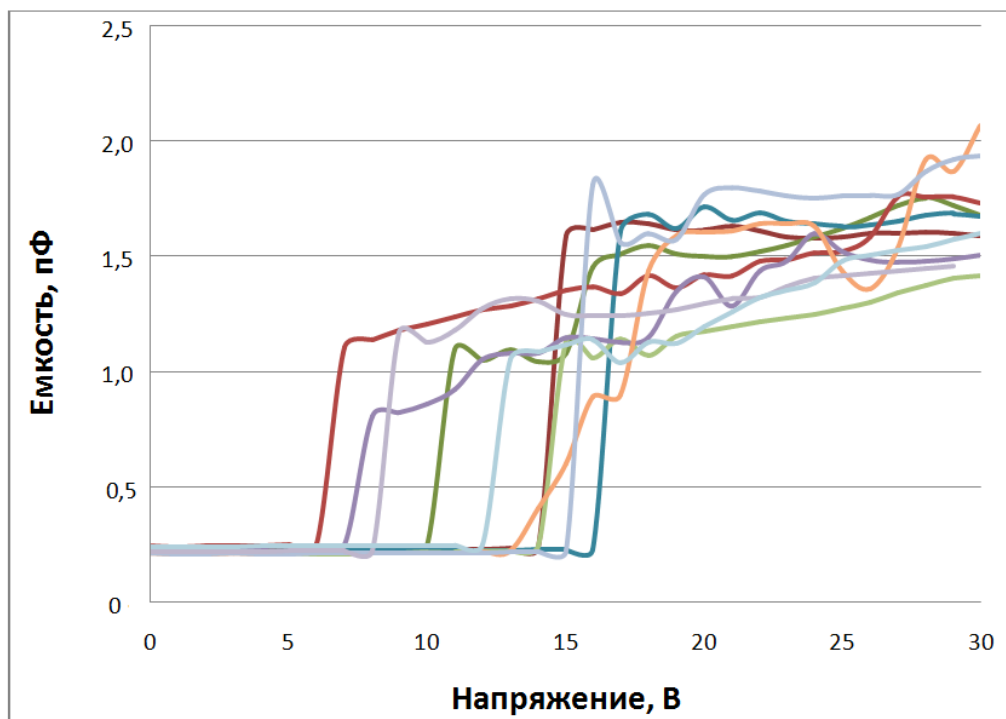


Рис. 9. Вольт-фарадные характеристики МЭМС коммутаторов. «Жертвенный слой» удалялся при помощи кислородной плазмы

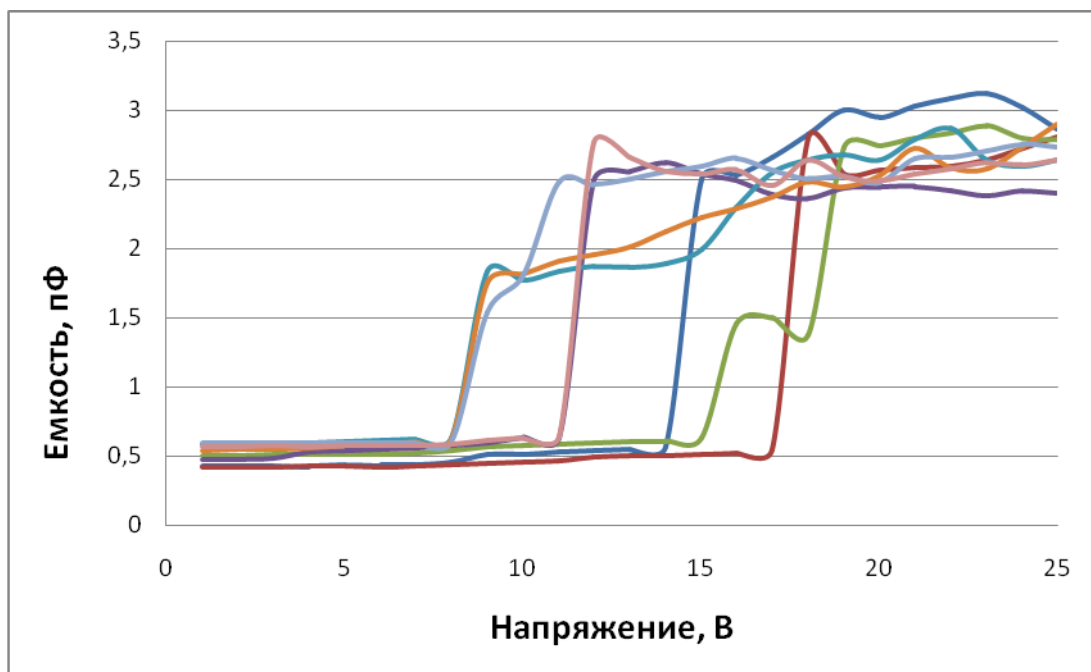


Рис. 10. Вольт-фарадные характеристики МЭМС коммутаторов. «Жертвенный слой» удалялся химическими методами при помощи сублимационной сушки

Это объясняется наличием дополнительного «воздушного зазора» между сработавшей мембраной и диэлектриком, осажденным на управляющий электрод. Возникновение «воздушного зазора» обусловлено двумя факторами – шероховатостью поверхностей диэлектрического слоя и нижней стороны металлической мембраны, а также короблением мембраны, вызванным внутренними напряжениями в металле.

Вклад шероховатости поверхностей мембраны и диэлектрика оценивался по изменению емкости слипшихся мембран и измерением шероховатости поверхности «жертвенного слоя» непосредственно перед напылением золота. Среднее отклонение профиля «жертвенного слоя» составило 5,38 нм, «воздушный зазор» по результатам измерения слипшихся мембран, составил 10 нм. «Воздушный зазор» сплошных мембран, изготовленных методом удаления «жертвенного слоя» в кислородной плазме, составил 40,9 нм. Мембраны, полученные методом сублимационной сушки, имели «воздушный зазор» 11,4 нм. Следовательно, вклад в возникновение дополнительного «воздушного зазора» при удалении «жертвенного слоя» в кислородной плазме вносит

коробление мембран за счет внутренних напряжений в металле, возникающих из-за перегрева мембран в ходе процесса удаления «жертвенного слоя». Для мембран, полученных с помощью удаления «жертвенного слоя» химическими методами с последующей сушкой при сублимации циклогексана, «воздушный зазор» определяется шероховатостью поверхности мембраны и диэлектрического слоя.

Частотные характеристики МЭМС переключателей представлены на рисунках 11 и 12.

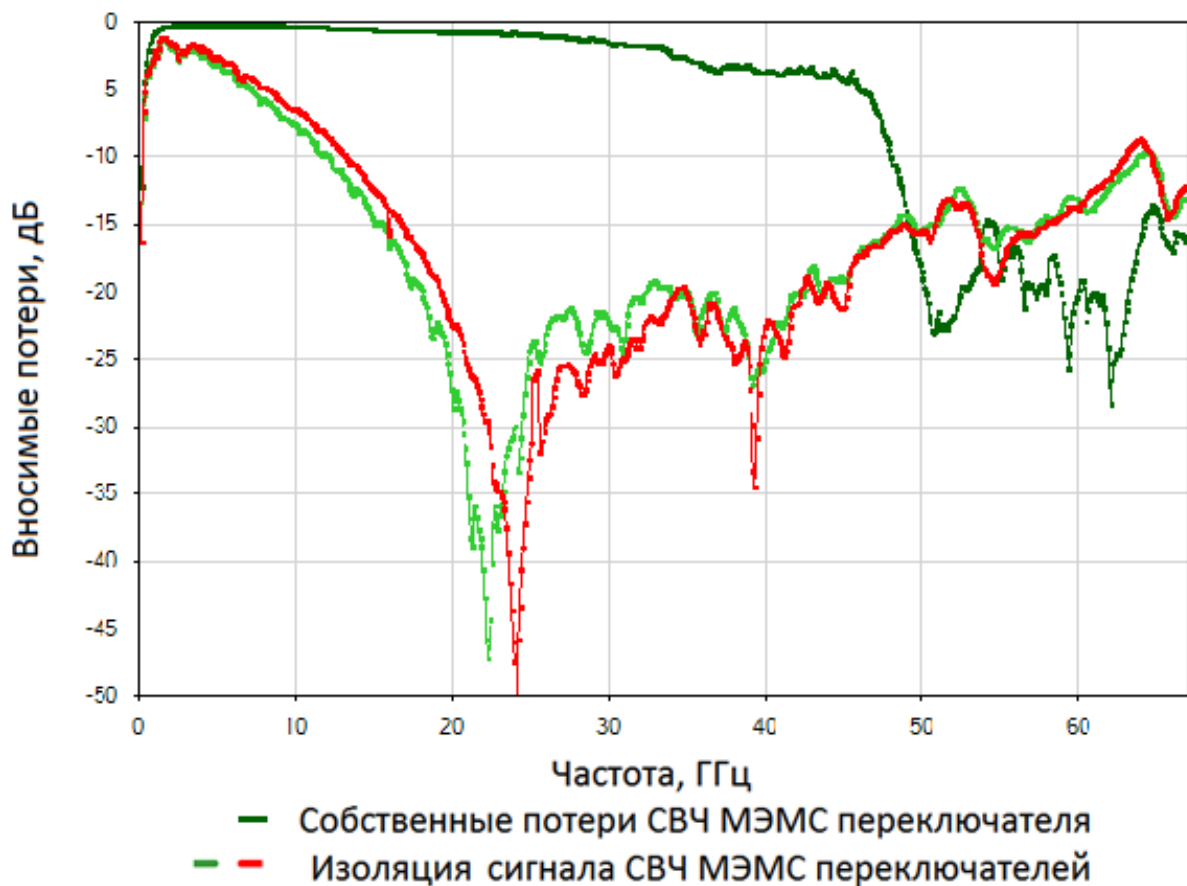


Рис. 11. S-параметры СВЧ МЭМС переключателей сигналов во включенном и выключенном состоянии. Жертвенный слой удалялся при помощи кислородной плазмы

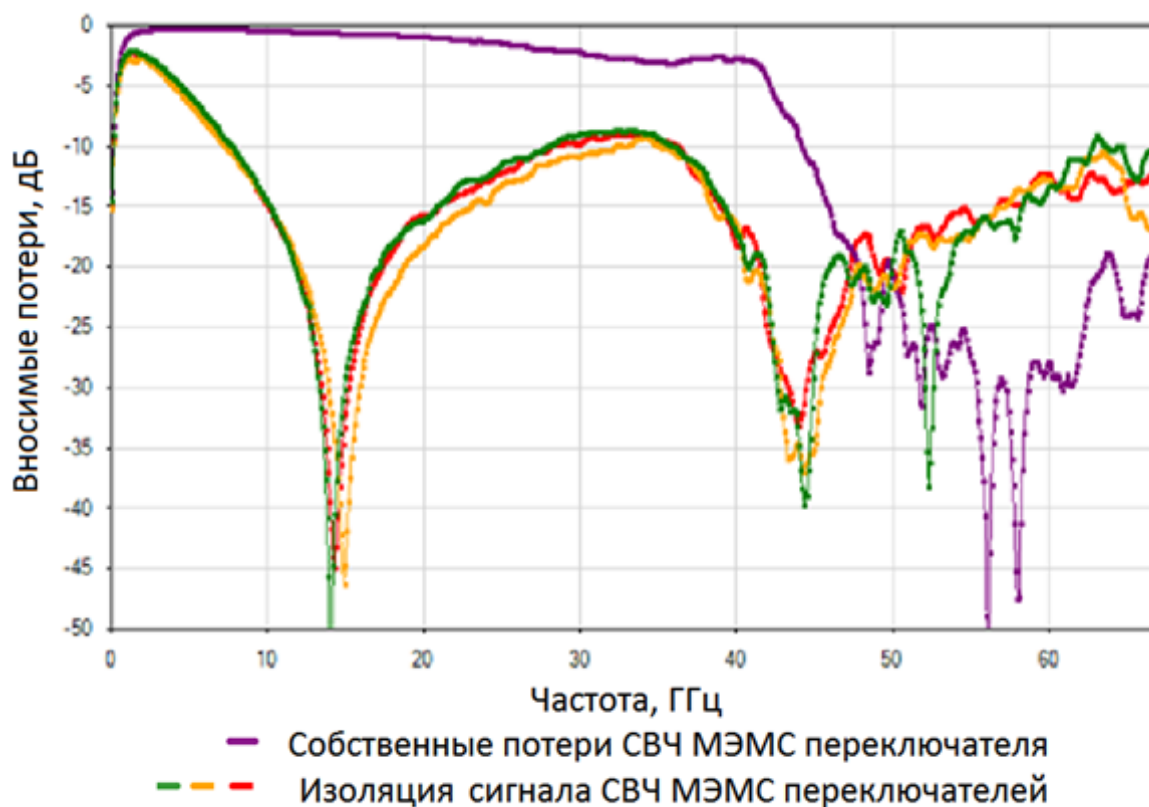


Рис. 12. S-параметры СВЧ МЭМС переключателей сигналов во включенном и выключенном состоянии. «Жертвенный слой» удалялся химическими методами при помощи сублимационной сушки

Из-за уменьшения емкости переключателя, относительно расчетной, произошло смещение рабочих частот. Частотные характеристики, наиболее близкие к расчетным, показали переключатели, изготовленные методом химического удаления «жертвенного слоя» с сублимационной сушкой. Это связано с тем, что метод сублимационной сушки позволяет получать мембраны МЭМС переключателей с минимальным «воздушным зазором».

Для таких переключателей резонансные частоты лежат в диапазоне от 12,9 до 13,9 ГГц, вносимые потери составляют 0,49 дБ, а коэффициент изоляции для них составляет 45 - 50 дБ.

Таблица 2. Сравнительные характеристики МЭМС переключателей

Варианты СВЧ МЭМС	Размер, мкм	Напряжение, В	Емкость, пФ	Изоляция, дБ	Диапазон частот, ГГц	Потери, дБ	Материал подложки
ИСВЧПЭ РАН	440x100	10-20	2,7	-50 (14 ГГц)	13-15	-0.49	GaAs
Raytheon	310x120	30-50	6	-15 (10 ГГц)	10-40	-0.07	Si
Мичиганский Университет	600x250	6-20	3	-25 (30 ГГц)	1-40	-0.1	Si, GaAs
Мичиганский Университет	300x90	15-25	3	-30 (10 ГГц)	10	-0.03	Si

Несмотря на то, что МЭМС переключатель, изготовленный в ИСВЧПЭ РАН, показал большие потери, чем остальные переключатели, он выигрывает в изоляции сигнала и имеет достаточно низкое напряжение срабатывания по сравнению с переключателями, представленными в таблице 2. Собственные потери СВЧ МЭМС переключателей, изготовленных в ИСВЧПЭ РАН, оказались выше по сравнению с аналогами. Это объясняется уменьшением высоты мембраны. Таким образом, представленные в данной работе переключатели имеют характеристики на уровне зарубежных аналогов ведущих мировых производителей.

### Основные результаты и выводы

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 параметров металлической мембраны, учитывающая влияние на СВЧ характеристики переключателя.
6. Созданы образцы СВЧ МЭМС переключателей емкостного типа с металлической мембраной с вносимыми потерями 0,5 дБ и развязкой до 50 дБ. Напряжение срабатывания макетных образцов составило 19В, для 14 и 14,3 ГГц вносимые потери - 0,5 дБ, изоляция - 45 - 50 дБ.

### **Список публикаций по теме диссертации**

#### **Список опубликованных работ по теме диссертации в журналах, вошедших в перечень ВАК:**

1. 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
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. – 2012. - №9. – С 28-33



3. 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.
4. 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

#### **Патенты и свидетельства:**

5. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной схемы №2012630175. Емкостной микроэлектромеханический шунтирующий переключатель для диапазона 3-25 ГГц. / А.А. Мельников, П.П. Мальцев, А.Ю. Павлов, Н.В. Щаврук, М.В. Майтама. Правообладатель – МГТУ МИРЭА; заявл. 30.10.2012, зарегистрирован 17.12.2012
6. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной схемы №2012630176. Емкостной микроэлектромеханический переключатель для диапазона 5-7 ГГц. / А.А. Мельников, П.П. Мальцев, А.Ю. Павлов, Н.В. Щаврук, М.В. Майтама. Правообладатель – МГТУ МИРЭА; заявл. 30.10.2012, зарегистрирован 17.12.2012
7. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной схемы №2012630161. Трехэлектродный СВЧ конденсатор переменной емкости для диапазона частот 10-12 ГГц. / А.А. Мельников, П.П. Мальцев, А.Ю. Павлов, Н.В. Щаврук, М.В. Майтама. Правообладатель – ИСВЧПЭ РАН; заявл. 27.09.2012, зарегистрирован 14.11.2012
8. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной схемы №2012630153. Емкостной микроэлектромеханический шунтирующий переключатель для диапазона 10-12 ГГц / П.П. Мальцев,

А.Ю. Павлов, Н.В. Щаврук, М.В. Майтама. Правообладатель – ИСВЧПЭ РАН; заявл. 13.09.2012, зарегистрирован 30.10.2012

**Список опубликованных работ по теме диссертации в других печатных изданиях:**

9. 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
- 10.Щаврук Н.В. СВЧ микроэлектромеханические переключатели – типы, характеристики, особенности. // Оборонная техника. – 2013. - №11-12. – кол. стр. 13, депонированная статья, рег. № 139/32
- 11.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.
- 12.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.
- 13.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.

## Список цитируемой литературы

- a) Randy J. Richards, Héctor J. De Los Santos MEMS-for RF/microwave wireless applications: the next wave – Part 1. Microwave journal, March 2001, Horizon House Publications, Inc.
- b) RF MEMS: Theory, Design, and Technology. Gabriel M. Rebeiz Copyright 2003 John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0-471-20169-3
- c) RF MEMS Switches and Products Catalog 2014-2015- Radant MEMS – pp. 7-

9