

На правах рукописи



Лагош Антон Валерьянович

КАРБИДОКРЕМНИЕВЫЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ КЛЮЧИ

Специальность: 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано-электроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)».

Научный руководитель: Корляков Андрей Владимирович, доктор технических наук, директор НОЦ «Нанотехнологии», профессор кафедры микро- и наноэлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (г. Санкт-Петербург).

Официальные оппоненты: Тимошенко Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор, директор Института нано и микросистемной техники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (г. Москва).

Пятышев Евгений Нилович, кандидат физико-математических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией нано- и микросистемной техники ФГАОУ ВО «СПбПУ» (г. Санкт-Петербург).

Ведущая организация: Акционерное общество «Специальное конструкторско-технологическое бюро по релейной технике» (АО «СКТБ РТ») (г. Великий Новгород)

Защита состоится 16 ноября 2017 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д212.238.04 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте университета: <http://www.eltech.ru/>.

Автореферат разослан 14 сентября 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Мошников Вячеслав Алексеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Ключи являются классическими микромеханическими устройствами для ВЧ приложений. В этих устройствах механическое движение используется для замыкания или размыкания ВЧ линии передач (для заданной полосы частот). Другими словами, полное входное сопротивление ВЧ линии передачи управляется механическими движениями подвижного элемента микромеханического ключа.

Микромеханические ключи подходят для использования в ВЧ системах с низким уровнем потерь, которые не требуют высокой скорости переключения [1], поскольку обладают следующими достоинствами по сравнению с твердотельными аналогами:

- низкое энергопотребление;
- низкие вносимые потери во включенном состоянии;
- хорошая изоляция в выключенном состоянии;
- высокая коммутируемая мощность;
- линейность (низкие интермодуляционные искажения).

К недостаткам микромеханических ключей относятся:

- низкая скорость переключения (15...200 мкс);
- высокое напряжение переключения (40...100 В);
- надежность [2].

На сегодняшний день практически единственным коммерчески доступным микромеханическим ключом для ВЧ применения является устройство компании Radant MEMS (США). Данные ключи характеризуются хорошими ВЧ параметрами и высокой коммутируемой мощностью. Однако, управляющее напряжение составляет величину в 90 В, что значительно усложняет процесс интеграции с другими электронными компонентами.

Улучшение электромеханических параметров микромеханического ключа является актуальной проблемой. Электромеханические параметры взаимосвязаны и улучшение одних может привести к ухудшению других. Для оценки соотношения и оптимизации параметров микромеханических ключей, и сравнения различных конструкций необходимо определить комплексный критерий оптимизации.

Одним из перспективных материалов для подвижных элементов в микромеханических структурах является карбид кремния, обладающий отличными механическими свойствами [3]. Данный материал характеризуется хорошей стойкостью в условиях агрессивной внешней среды. Использование карбида кремния в качестве материала подвижного элемента в микромеханических ключах позволило бы не только улучшить электромеханические параметры, но и расширить область применения таких устройств, снизив влияние деградиационных эффектов.

Пленки карбида кремния обладают существенными механическими напряжениями, что приводит к нежелательным деформациям и изгибам микромеханических структур [4] и это необходимо учитывать при проектировании конструкций и разработке технологий микромеханических устройств на его основе.

### **Цель работы**

Разработка карбидокремниевых микромеханических ключей и исследование возможности улучшения их электромеханических параметров.

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

1. Определение критерия оптимизации параметров микромеханического ключа.
2. Аналитическое и численное моделирование работы микромеханического ключа.
3. Проектирование и оптимизация конструкций карбидокремниевых микромеханических ключей.
4. Разработка и совершенствование технологического процесса создания карбидокремниевых микромеханических ключей.
5. Исследование возможности управления изгибом подвижного элемента на основе пленки карбида кремния.
6. Изготовление экспериментальных образцов карбидокремниевых микромеханических ключей.
7. Исследование параметров экспериментальных образцов карбидокремниевых микромеханических ключей.

### **Научная новизна работы**

1. Предложен комплексный критерий оптимизации конструкции микромеханических ключей, позволяющий реализовать конструкцию с лучшим соотношением электромеханических параметров в рамках конкретного технологического процесса.
2. Установлено, что изгибом подвижного элемента на основе пленки карбида кремния, возникающим из-за неравномерного по времени процесса плазмо-стимулированного окисления, можно управлять путем изменения давления остаточной атмосферы в процессе осаждения пленки.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработаны аналитические модели расчета электромеханических параметров микромеханических ключей, которые хорошо согласуются с численным моделированием в ПО COMSOL Multiphysics.

2. Спроектирована и оптимизирована конструкция микромеханического ключа с подвижным элементом на основе пленки карбида кремния с двумя устойчивыми состояниями и «внутренним» закреплением торсионных подвесов. Показано, что соотношение электромеханических параметров в такой конструкции лучше, чем в типовых конструкциях микромеханических ключей.

3. Разработана технология изготовления микромеханических ключей с подвижным элементом на основе пленки карбида кремния.

4. Изготовлены экспериментальные образцы карбидокремниевых микромеханических ключей с двумя устойчивыми состояниями и «внутренним» закреплением торсионных подвесов подвижного элемента, а также на основе типового варианта конструкции.

5. Разработана методика и исследованы параметры экспериментальных образцов карбидокремниевых микромеханических ключей.

6. Показано преимущество использования карбида кремния в качестве материала подвижного элемента по сравнению с традиционно используемыми в технологиях микромеханических ключей.

7. Практическая реализация конструкции ключа с подвижным элементом с двумя устойчивыми состояниями и с «внутренним» закреплением торсионных подвесов позволила экспериментально показать ее преимущество в сравнении с типовым вариантом конструкции.

## **Внедрение**

Результаты диссертационной работы непосредственно использованы при выполнении ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ИЦ ЦМИД и НОЦ «Нанотехнологии»: НИР «Электрон-Снасть» (№ 2011/508 (7092/НОЦ НТ - 22) от 12.12.11 г.), ОКР «Ключ-ЛЭТИ» (договор № 33/190-12 от 27.06.12 г.) и ОКР «Электрон-1П» (государственный контракт № 2014/221(14-7/НОЦ НТ - 27) от 14.02.2014 г.). Исследования также проводились в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», проект №14.578.21.0120 от 27.10.2015 «Комплекс беспроводных энергонезависимых датчиков температуры и деформаций для бортовой аппаратуры управления и контроля на основе радиочастотной идентификации». Результаты работы внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» подготовки бакалавров по направлению 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника».

## **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Установлено, что в рамках предложенного критерия оптимизации, уменьшение управляющего напряжения и повышение быстродействия, при заданной толщине, плотности материала подвижного элемента и величине зазора

между управляющими электродами, достигается за счет использования конструкции микромеханического ключа с двумя устойчивыми состояниями и торсионными подвесами.

2. Плазмо-стимулированное окисление поверхности и изменение парциального давления кислорода в процессе роста пленки карбида кремния обеспечивают возможность управления изгибом подвижного элемента на ее основе.

### **Методы исследования**

Для проектирования конструкций микромеханических ключей использовались ПО COMSOL Multiphysics и ПО CST Microwave Studio на основе метода конечных элементов.

Технологический процесс изготовления карбидокремниевых микромеханических ключей был реализован в чистых помещениях НОЦ «Нанотехнологии» СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Использовалось следующее оборудование:

- участок теххимии для химической обработки и очистки пластин;
- участок фотолитографии для формирования микроструктур;
- участок электронно-ионного нанесения металлических пленок для формирования металлизации и контактов;
- участок ионно-химического осаждения пленок SiC и AlN для получения функциональных и жертвенных слоев и композиций;
- участок плазмохимических процессов для сухого травления и микропрофилирования пленок SiC, удаления жертвенных слоев и формирования структур с низким уровнем механических напряжений;
- участок оптической микроскопии для контроля размеров и топологии микроструктур;
- участок сборки для реализации финишных операций разделения кристаллов, контроля и разварки контактов.

Величина изгиба поверхности микромеханических подвижных структур определялась при помощи контрольно-диагностических приборов:

- цифрового оптического микроскопа для 2D и 3D измерений «HIROX 7700»;
- растрового электронного микроскопа «Quanta Inspect».

Исследование параметров экспериментальных образцов карбидокремниевых микромеханических ключей осуществлялось при помощи зондовой станции прецизионного позиционирования «Cascade Microtech M150» с ВЧ и DC зондами.

### **Апробация результатов**

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- 15-ая научная молодежная школа с международным участием "Физика и технология микро- и наносистем. Карбид кремния и родственные материалы", г. Санкт-Петербург, Россия, 8 – 9 октября 2012 г.;
- 66-ая научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета, г. Санкт-Петербург, Россия, 1 – 8 февраля 2013 г.;
- Юбилейная научно-техническая конференция, посвященная 70-летию ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино, Россия, 15 – 16 мая 2013 г.;
- IX научно-техническая конференция молодых специалистов по радиоэлектронике, г. Санкт-Петербург, Россия, ОАО «Авангард», 21 апреля 2016 г.
- 4th International School and Conference "Saint-Petersburg OPEN 2017", г. Санкт-Петербург, Россия, апрель 2017 г.;
- VI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», г. Санкт-Петербург, Россия, май-июнь 2017 г.
- 24-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Вакуумная техника и технологии – 2017», г. Санкт-Петербург, Россия, июнь 2017 г.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, из них 5 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, также получено свидетельство о государственной регистрации топологии интегральных микросхем.

### **Степень достоверности результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается аналитическим и численным моделированием и их корреляцией с проведенными экспериментами. Литературные данные из отечественных и зарубежных источников также подтверждают полученные результаты.

Все результаты были представлены на научно-технических конференциях и школах всероссийского и международного уровня, а также опубликованы в рецензируемых научных журналах. Результаты работы подтверждены актами о внедрении.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора заключается в создании аналитических моделей расчета, проектировании конструкций карбидокремниевых микромеханических ключей и численном моделировании их работы, разработке технологии изготовления и корпусирования, а также методик исследования их параметров. Автор принимал активное участие в изготовлении экспериментальных образцов на

всех стадиях. Автор лично проводил измерения параметров экспериментальных образцов.

### Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и библиографического списка, включающего 61 наименование. Диссертация содержит 151 страницу машинописного текста, включая 70 рисунков и 15 таблиц.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** представлен обзор современного состояния разработок микромеханических ключей. Рассмотрены основные механизмы управления переключением микромеханических ключей, а также базовые технологии их изготовления. Выделено несколько основных направлений улучшения электромеханических параметров микромеханических ключей. Рассмотрены области применения микромеханических ключей. На основе сделанных выводов определены цель и основные задачи данной диссертационной работы.

**Во второй главе** представлены методики расчета электромеханических параметров, напряжения включения и времени переключения, и параметров передачи ВЧ сигнала.

На примере типовой конструкции микромеханического ключа, определен комплексный критерий оптимизации электромеханических параметров:

$$\frac{1}{t_{пер}^2 \cdot U_{вкл}^2} = \frac{f_0^2}{U_k^2} = C_k \frac{\epsilon_0}{y_0^3 \rho \cdot h}, \quad (1)$$

где  $t_{пер}$  – время переключения,  $U_{вкл}$  – используемое рабочее напряжение включения,  $f_0$  – резонансная частота механических колебаний подвижной массы,  $U_k$  – критическое напряжение включения,  $C_k$  – коэффициент, характеризующий тип конструкции подвижного элемента,  $y_0$  – зазор между управляющими электродами,  $\rho$  – плотность материала подвижного элемента,  $h$  – толщина подвижного элемента.

Согласно (1), можно выделить следующие пути оптимизации:

1. уменьшение зазора между управляющими электродами;
2. уменьшение толщины подвижного элемента;
3. замена типа конструкции;
4. выбор материала с более низкой плотностью.



Толщина пленки влияет на жесткость подвеса, виброустойчивость и прочность конструкции. Жесткость подвеса пропорциональна кубу толщины конструкции, поэтому при чрезмерном уменьшении толщины можно оказаться за пределами требуемого диапазона значений времени переключения. Более того, при малой жесткости конструкции повышается вероятность самопроизвольного замыкания ключа при коммутации мощного ВЧ сигнала. Жесткость конструкции при малых толщинах можно увеличить, используя материал с высоким значением модуля упругости.

Размер воздушного зазора между управляющими электродами наиболее сильно влияет на критерий (1), его наименьшее значение определяется, в первую очередь, желаемым значением изоляции в выключенном состоянии, а также технологическими ограничениями, связанными с вытравливанием жертвенного слоя из-под подвижного механического элемента. Рекомендуемый диапазон значений толщин подвижного элемента и жертвенного слоя составляет 1...2 мкм.

Что касается замены типа конструкции, то расчеты показали, что использование конструкции с двумя устойчивыми состояниями и торсионными подвесами [5] позволяет улучшить соотношение электромеханических параметров, по сравнению с использованием подвижных элементов типовой конструкции [3] и с нелинейными характеристиками [6]. Первое «холодное» включение в такой конструкции будет характеризоваться критическим напряжением включения  $U_k$  при достижении вращающимся элементом угла поворота критического значения. При снятии напряжения  $U_k$  конструкция переключается во второе положение проходя по инерции положение равновесия, при этом достаточно подать на вторую пару обкладок напряжение удержания  $U_{уд}$ , которое существенно меньше  $U_k$ . При переключении из второго положения в первое также достаточно снять управляющее напряжение со второй пары обкладок и подать напряжение  $U_{уд}$  на первую пару обкладок. Таким образом, переход ключа из первого положения во второе (и наоборот) будет определяться напряжением удержания  $U_{уд}$ , а не критическим напряжением включения  $U_k$ . Выигрыш достигается за счет замены в критерии оптимизации критического напряжения включения  $U_k$  на напряжение удержания  $U_{уд}$ . Можно утверждать, что даже в рамках одной технологии использование подвижного элемента с двумя устойчивыми состояниями на основе торсионных подвесов предпочтительнее.

В сравнении с традиционно используемыми материалами подвижных элементов микромеханических ключей (Рисунок 1), карбид кремния обладает следующими достоинствами:

- высокое значение модуля упругости и, как следствие, повышенная жесткость конструкции;
- низкая плотность (по сравнению с металлами) обеспечивает высокую резонансную частоту  $f_0$  конструкции и, как следствие, высокое быстродействие;
- высокие значения теплопроводности и температуры Дебая позволяют

значительно расширить диапазон рабочих температур.

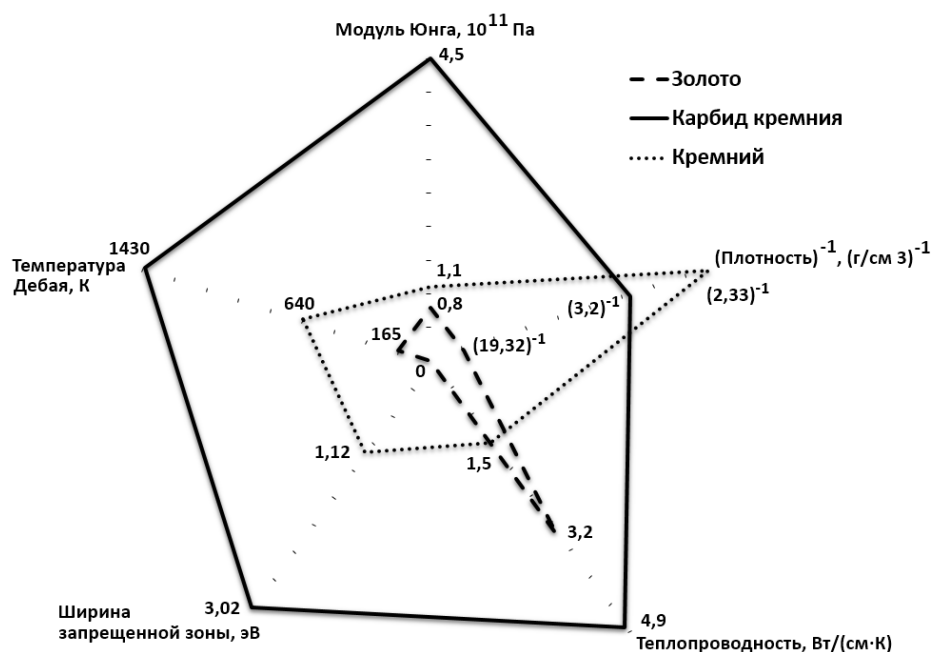


Рисунок 1. Сравнение основных свойств карбида кремния, золота и кремния, как базовых материалов подвижного элемента микромеханического ключа

В Таблице 1 представлены расчетные значения электромеханических параметров микромеханического ключа с подвижным элементом типовой конструкции на основе пленок различных материалов. Так, при использовании карбида кремния значение критерия (1) в 6 раз выше, чем при использовании золота. Стоит отметить, что у кремния плотность материала ниже, чем у карбида кремния и согласно (1) соотношение электромеханических параметров выше. Однако, за счет высокого значения модуля упругости пленки карбида кремния появляется возможность уменьшения толщины конструкции при сохранении жесткости.

Таблица 1 – Электромеханические параметры типовой конструкции подвижного элемента на основе различных материалов

	Численное моделирование в ПО COMSOL Multiphysics			Аналитический расчет		
	SiC	Si	Au	SiC	Si	Au
Материал кантилевера	SiC	Si	Au	SiC	Si	Au
Критическое напряжение включения (В)	10,6	5	3,2	11,7	5,6	3,6
Время переключения (мкс)	15,8	28,6	126,6	15,4	27,4	123,5
Критерий оптимизации, $10^{-5} (\text{В}^{-2} \cdot \text{мкс}^{-2})$	3,6	4,9	0,6	3,1	4,3	0,5

Использование пленки карбида кремния в качестве материала подвижного элемента накладывает дополнительные ограничения на конструкцию. Известно, что композиция «карбид кремния на изоляторе» обладает отрицательными (сжимающими) механическими напряжениями при формировании ее методом магнетронного осаждения [7]. При использовании типовой конструкции данные напряжения могут привести к сильному изгибу конструкции и увеличению начального зазора и, как следствие, значительному изменению электромеханических параметров.

Для компенсации отрицательных напряжений было разработано конструктивно-технологическое решение на основе конструкции с двумя устойчивыми состояниями и с «внутренним» закреплением торсионных подвесов (Рисунок 2).

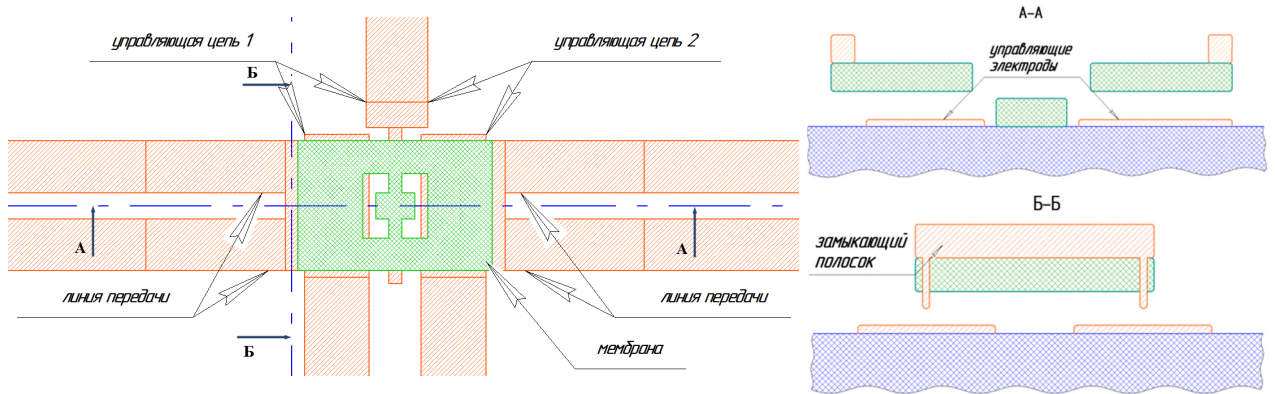


Рисунок 2. Конструкция ключа с двумя устойчивыми состояниями и с «внутренним» закреплением торсионных подвесов:  
а – вид сверху; б – боковые сечения

Также для сравнительного анализа была спроектирована типовая конструкция карбидокремниевого микромеханического ключа. Кристалл ключа представляет собой копланарную волноводную линию на подложке сапфира. Схематическое изображение конструкции представлено на Рисунке 3.

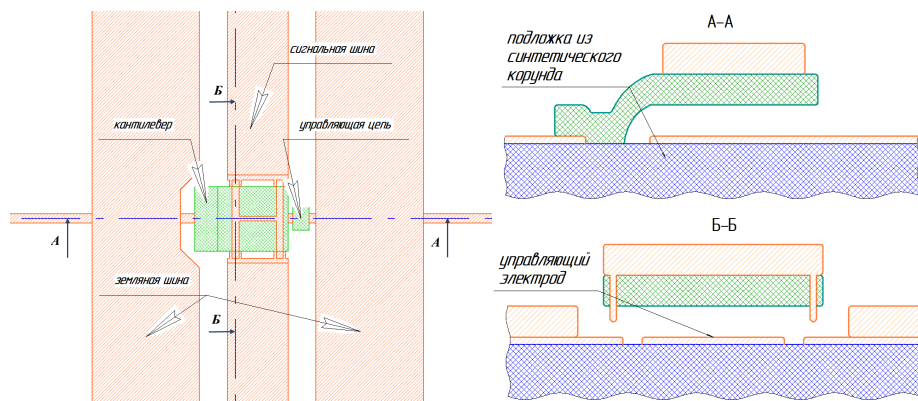


Рисунок 3. Типовая конструкция карбидокремниевого микромеханического ключа:  
а – вид сверху; б – боковые сечения

Результаты численного моделирования в ПО COMSOL Multiphysics показали, что при равномерном распределении остаточных механических напряжений по толщине пленки карбида кремния использование конструкции, изображенной на Рисунке 2, позволяет уменьшить изменение зазора в контактной области в 2,8 раза, по сравнению с типовой конструкцией.

В Таблице 2 указаны результаты аналитического расчета и численного моделирования в ПО COMSOL Multiphysics параметров для карбидокремниевых микромеханических ключей. В Таблице 2 ключ №1 – карбидокремниевый микромеханический ключ с подвижным элементом типовой конструкции. Ключ №2 – карбидокремниевый микромеханический ключ с подвижным элементом с двумя устойчивыми состояниями и с «внутренним» закреплением торсионных подвесов.

Таблица 2 – Расчетные значения электромеханических параметров карбидокремниевых микромеханических ключей

Параметр	Аналитический расчет		Численное моделирование	
	Ключ №1	Ключ №2	Ключ №1	Ключ №2
Критическое напряжение включения (В)	9,6	3,3	9	3,4
Время переключения (мкс)	17,3	32,9	18,7	34,9
Критерий оптимизации, $10^{-5}$ (В <sup>-2</sup> ·мкс <sup>-2</sup> )	3,6	8,1	3,5	7,1

Показано, что соотношение электромеханических параметров в конструкции с двумя устойчивыми состояниями и с «внутренним» закреплением торсионных подвесов лучше, чем в типовой конструкции микромеханического ключа.

Что касается параметров передачи ВЧ сигнала, то спроектированные карбидокремниевые микромеханические ключи представляют собой последовательные контактные системы, способные коммутировать сигнал вплоть до 20 ГГц. На частоте 20 ГГц при помощи ПО CST Microwave Studio были получены следующие значения ВЧ параметров: изоляция не менее 28 дБ, потери на отражение не более –15 дБ и вносимые потери менее 0,15 дБ.

**В третьей главе** представлена разработка и совершенствование технологии изготовления карбидокремниевых микромеханических ключей, а также метода их корпусирования.

Разработанная технология изготовления микромеханических ключей с подвижным элементом на основе пленки карбида кремния (Рисунок 4) имеет следующие основные особенности:

- изолирующая подложка с двусторонней полировкой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4" 0,5 мм;
- 4 операции фотолитографии;
- один двухуровневый жертвенный слой SiO<sub>2</sub>: 0,6 – 1,2 мкм;
- подвижный элемент: пленка SiC 1 мкм;
- газовое (HF) вытравление жертвенного слоя;
- контакт Au (1,2 мкм).

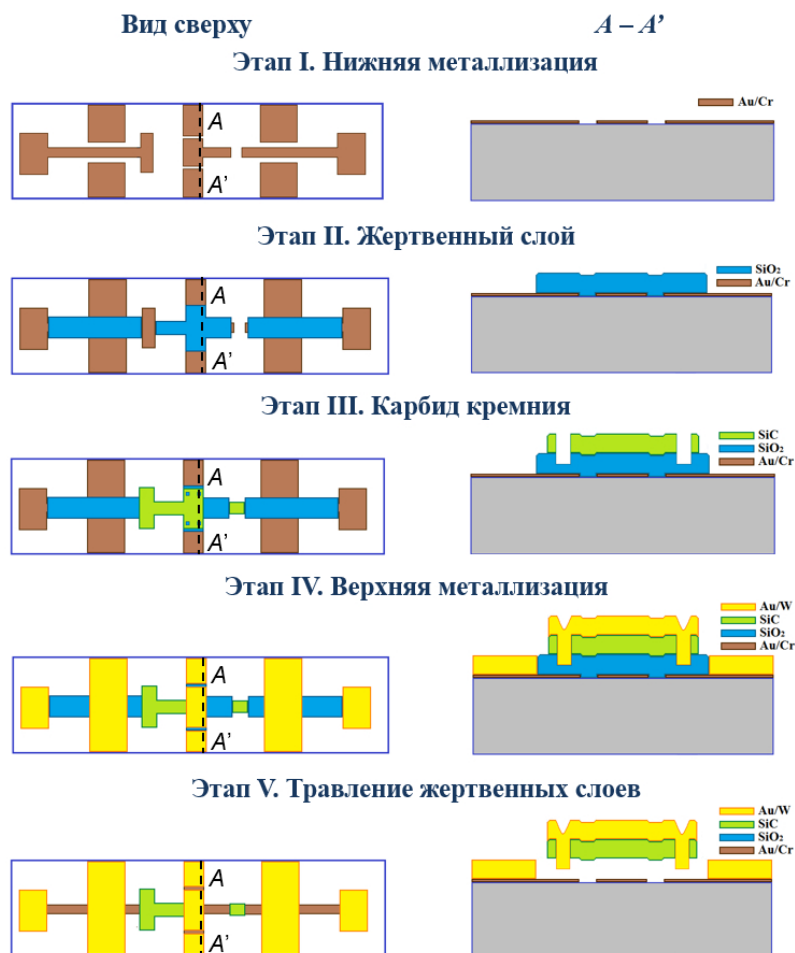


Рисунок 4. Последовательность технологических операций изготовления карбидокремниевых микромеханических ключей на подложке кремния

Также представлен разработанный метод корпусирования, основанный на технологии склеивания двух подложек диаметром 100 мм. Пластина с крышками изготавливалась на основе кремниевой подложки с слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 1,6 мкм на обратной стороне. Для склеивания подложек использовался клеящий состав на основе Norland Optical Adhesive 89. Разработанный метод обеспечивает герметичное корпусирование микромеханических ключей в вакууме при давлении порядка  $10^{-3}$  Па.

В ходе реализации технологии было установлено, что подвижные элементы на основе пленки карбида кремния изгибаются после вытравливания жертвенных слоев и освобождения от подложки.

Зарегистрированные изгибы подвижных элементов приводят к повышению управляющего напряжения, снижению быстродействия и надежности. Измерения величины прогиба проводились с использованием трехмерной модели, построенной при помощи оптического микроскопа Nirox KH-7700.

Радиус кривизны поверхности карбидокремниевых подвижных элементов составил 2,1 мм. При этом максимальный зазор 12,5 мкм для типовой конструкции и 15 мкм для конструкции с двумя устойчивыми состояниями.

Показано, что прогиб происходит из-за возникновения высоких сжимающих механических напряжений в пленке карбида кремния, а также их неравномерного распределения по толщине. Условия формирования пленки карбида кремния магнетронным методом определяют величину и неравномерность остаточных механических напряжений.

Одним из основных механизмов формирования механических напряжений является плазмостимулированное окисление растущей пленки. Данный процесс происходит неравномерно по времени в процессе магнетронного осаждения пленки. Действительно, было отмечено, что в начале процесса формирования пленки остаточное давление значительно выше, чем по завершении, что свидетельствует о разных условиях роста пленки на разных этапах ее формирования.

Проведены эксперименты по оценке влияния других факторов технологического процесса осаждения пленки карбида кремния магнетронным методом, такие как температура нагревателя и расположение образца относительно области локализации плазмы. Однако, изменение данных факторов оказывало малое влияние на кривизну поверхности подвижного элемента.

Подвижные элементы на основе пленки карбида кремния были исследованы при помощи метода рентгеноспектрального микроанализа. Было установлено, что с нижней стороны подвижного элемента примеси кислорода значительно больше, чем с верхней поверхности.

Снижение давления остаточной атмосферы на начальном этапе процесса осаждения пленки карбида кремния позволило снизить влияние процесса плазмостимулированного окисления. При этом радиус кривизны подвижного элемента увеличился, а максимальный зазор уменьшился.

Процесс плазмостимулированного окисления поверхности и изменение парциального давления кислорода в процессе роста пленки карбида кремния магнетронным методом обеспечивают возможность управления изгибом подвижного элемента на ее основе.

**В четвертой главе** представлены методики измерения электромеханических и ВЧ параметров микромеханических ключей. Разработаны методики:

1. измерения параметров разделенных кристаллов микромеханических ключей и смонтированных на тестовую плату;
2. исследования параметров экспериментальных образцов непосредственно на пластине в процессе отработки технологии изготовления.

При помощи разработанных методик были измерены электромеханические параметры и параметры передачи ВЧ сигнала экспериментальных образцов карбидокремниевых микромеханических ключей. Также для сравнительного анализа были измерены параметры ключа RMSW201 компании Radant MEMS (США).

В результате измерений электромеханических параметров экспериментальных образцов карбидокремниевых микромеханических ключей было установлено, что напряжение включения больше расчетного. Это связано с изгибом подвижного элемента и увеличившимся зазором между управляющими электродами, вследствие неравномерного распределения механических напряжений по толщине пленки карбида кремния. Было установлено, что снижение факторов плазмо-стимулированного окисления поверхности и изменения парциального давления кислорода в процессе роста пленки карбида кремния приводит к уменьшению изгиба подвижного элемента на ее основе. Зазор между управляющими электродами становится величиной управляемой в широких пределах.

Численное моделирование работы подвижных элементов с изгибом поверхности заданного радиуса показало соответствие экспериментальным данным в пределах 10%. Также, в результате численного моделирования было установлено, что аналитические расчетные модели, представленные в Главе 2, справедливы и для подвижных элементов с изгибом поверхности заданного радиуса.

Для того, чтобы сравнить конструкции с разными зазорами между управляющими электродами и толщинами подвижных элементов определен приведенный критерий оптимизации:

$$\frac{\left(\frac{y_i}{y_0}\right)^3 \left(\frac{h_i}{h}\right)}{t_{пер}^2 \cdot U_{вкл}^2},$$

где  $y_0$  – заданное значение зазора между управляющими электродами (вблизи точки закрепления),  $h$  – заданное значение толщины подвижного элемента,  $y_i$  – фактическое значение зазора между управляющими электродами,  $h_i$  – фактическое значение толщины подвижного элемента.

В Таблице 3 представлены измеренные напряжение включения, время переключения, изоляция и вносимые потери экспериментальных образцов карбидокремниевых микромеханических ключей и ключа RMSW201 компании Radant MEMS (США). Также в Таблице 3 указаны значения критерия оптимизации, приведенного к заданным значениям зазора (1,2 мкм) и толщины (1 мкм).

Измеренные значения времени переключения в карбидокремниевых микромеханических ключах отличаются от расчетных примерно в 2 раза. Это связано с недостаточным вакуумированием в процессе корпусирования, которое приводит к повышению коэффициента демпфирования и увеличению времени переключения [8].

Таблица 3. Параметры микромеханических ключей

Параметр	RMSW201 (Radant MEMS)	Типовая конструкция	Конструкция с двумя устойчивыми состояниями
Напряжение включения, В	57	105	31
Время переключения, мкс	10	32	55
Приведенный критерий оптимизации, $(В \cdot мкс)^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$	$11,6 \cdot 10^{-6}$	$24,9 \cdot 10^{-6}$
Изоляция, дБ	18 (18 ГГц)	27,5 (20 ГГц)	
Потери, дБ	0,6 (18 ГГц)	0,32 (20 ГГц)	

Согласно приведенному критерию оптимизации, на примере типовых конструкций показано, что использование карбида кремния значительно улучшает соотношение электромеханических параметров. В рассматриваемом случае улучшение достигается с учетом использования возможности управления изгибом поверхности подвижного элемента на основе пленки карбида кремния.

Сравнивая карбидокремниевые микромеханические ключи можно сделать вывод, что практическая реализация конструкции ключа с подвижным элементом с двумя устойчивыми состояниями и с «внутренним» закреплением торсионных подвесов позволила экспериментально показать ее преимущество в сравнении с типовым вариантом конструкции.

**В заключении** представлены основные результаты, полученные в ходе выполнения работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен комплексный критерий оптимизации конструкции микромеханических ключей, позволяющий реализовать конструкцию с лучшим соотношением электромеханических параметров в рамках конкретного технологического процесса.

2. Разработаны аналитические модели расчета электромеханических параметров микромеханических ключей, которые хорошо согласуются с численным моделированием в ПО COMSOL Multiphysics.

3. Спроектирована и оптимизирована конструкция микромеханического ключа с подвижным элементом на основе пленки карбида кремния с двумя устойчивыми состояниями и «внутренним» закреплением торсионных подвесов. Показано, что соотношение электромеханических параметров в такой конструкции лучше, чем в типовых конструкциях микромеханических ключей.

4. Разработана технология изготовления микромеханических ключей с подвижным элементом на основе пленки карбида кремния.



5. Изготовлены экспериментальные образцы карбидокремниевых микромеханических ключей с двумя устойчивыми состояниями и «внутренним» закреплением торсионных подвесов подвижного элемента, а также на основе типового варианта конструкции.

6. Установлено, что изгибом подвижного элемента на основе пленки карбида кремния, возникающим из-за неравномерного по времени процесса плазмо-стимулированного окисления, можно управлять путем изменения давления остаточной атмосферы в процессе осаждения пленки.

7. Разработана методика и исследованы параметры экспериментальных образцов карбидокремниевых микромеханических ключей.

8. Показано преимущество использования карбида кремния в качестве материала подвижного элемента по сравнению с традиционно используемыми в технологиях микромеханических ключей.

9. Практическая реализация конструкции ключа с подвижным элементом с двумя устойчивыми состояниями и с «внутренним» закреплением торсионных подвесов позволила экспериментально показать ее преимущество в сравнении с типовым вариантом конструкции.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Лагош А.В. Механизмы деградации ВЧ МЭМС-ключей / Лагош А.В., Корляков А. В. // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – №5(18). С. 316-331.

2. Разработка и исследование термомеханического биморфного микроактюатора / Корляков А. В. [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – №12(185). – С. 56-62.

3. Микродвижители для микророботехники / Калёнов В. Е. [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – №12. – С. 41-46.

4. Микроэлектромеханический ключ для СВЧ-применения на основе пленок карбида кремния / Корляков А. В., Лагош А. В., Лучинин В. В. // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2013. – №3(518). С. 80-85.

5. Низкопотребляющие малогабаритные радиотехнические модули на основе микроэлектромеханических ключей / Бохов О. С. [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – №12. С. 60-71.

### **Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science**

6. Research of mechanical stresses in micromechanical structures based on silicon carbide films produced by magnetron sputtering / Mikhailova O. N., Korlyakov A. V., Lagosh A. V. // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 872(1). – P. 1-3.

### **Публикации в других изданиях**

7. Семейство карбидокремниевых твердотельных, вакуумных и

микромеханических ключей для экстремальных условий эксплуатации / Афанасьев А. В. [и др.] // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2017. – №1(1). – С. 80-84.

#### **Патенты и свидетельства**

8. Свид. ТИМС RU2016630165 РФ. Микроэлектромеханический ключ для сверхвысокочастотного применения / Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») - № RU 2016630114; Заявлено 12.10.2016; Оpubл. 20.12.2016. – 1 с.

### **СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Низкопотребляющие малогабаритные радиотехнические модули на основе микроэлектромеханических ключей / Бохов О. С. [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – №12. С. 60-71.

2. Лагош А.В. Механизмы деградации ВЧ МЭМС-ключей / Лагош А.В., Корляков А. В. // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – №5(18). С. 316-331.

3. Микроэлектромеханический ключ для СВЧ-применения на основе пленок карбида кремния / Корляков А. В., Лагош А. В., Лучинин В. В. // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2013. – №3(518). С. 80-85.

4. Асташенкова О. Н. Физико-технологические основы управления механическими напряжениями в тонкопленочных композициях микромеханики: автореф. дис. ...канд. тех. наук: 05.27.01. – СПб., 2015. – 18 с.

5. Design and development of a surface micro-machined push-pull-type true-time-delay phase shifter on an alumina substrate for Ka-band T/R module application / Dey S., Koul S. K. // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2012. – Vol. 22(12). – P. 1-20.

6. Пат. RU2406688 С1 РФ, В81В7/02. Микроэлектромеханический ключ / Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" – № RU 2009127086/28; Заявлено 16.07.2009; Оpubл. 20.12.2010. – 9 с.

7. Micromechanics based on silicon carbide / Astashenkova O. N., Korlyakov A. V., Luchinin V. V. // Materials Science Forum. – 2013. – Vol. 740-742. – P. 998-1001.

8. Rebeiz G. M. RF MEMS: theory, design, and technology. – John Wiley & Sons, 2003. – 512 p.