

На правах рукописи



Эннс Яков Борисович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОЙ
МИКРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ**

Специальность 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена на кафедре «Физико-химия и технологии микросистемной техники» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: **Пятышев Евгений Нилович**, к. ф.-м. н., заведующий лабораторией «Нано- и микросистемной техники», Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Официальные оппоненты: **Корляков Андрей Владимирович**, д. т. н., директора НОЦ «Нанотехнологии», профессора кафедры микро- и наноэлектроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова», г. Санкт-Петербург.

Дзюбаненко Сергей Владимирович, к. т. н., начальник отдела «Центр микросистемотехники» открытого акционерного общества «Авангард». г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Акционерное общество «ГИРООПТИКА». г. Санкт-Петербург

Защита состоится «30» мая 2019 г. в «___» часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.02, созданного на базе ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

Автореферат разослан «___» _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.х.н.

Семенча Александр Вячеславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Основными элементами микроэлектромеханических систем (МЭМС) являются упругие подвесы в виде балок и мембран. В последнее десятилетие большое внимание приобрели нелинейные элементы жёсткости, что обусловлено особенностью их частотных характеристик и возможностью формирования мультистабильных систем на их основе. Особое внимание уделяется аркообразным подвесам, профиль которых определяется формой потери механической устойчивости. Нелинейность таких подвесов обусловлена резким возрастанием аксиальной нагрузки при действующей на балку или мембрану поперечной нагрузке. При этом наблюдается скачкообразное изменение профиля подвеса при достижении критической аксиальной нагрузки, то есть происходит механическая потеря устойчивости упругого подвеса. Подобная структура имеет два минимума механической энергии, что обеспечивает наличие двух стабильных состояний.

Изначальный профиль аркообразной балки и внешние или внутренние аксиальные нагрузки являются ключевыми факторами, определяющими характер поведения и нелинейные свойства аркообразной балки. Существует два основных технологических подхода к формообразованию нелинейных микромеханических структур: использование объёмной технологии микрообработки кремния с прямым контролем изначальной формы балки и изготовление с применением поверхностной технологии, где форма профиля балки определяется остаточными продольными внутренними напряжениями. Поверхностный метод остаётся малоизученным из-за невозможности прямого контроля профиля балки. Решение данной задачи требует проведения исследований, направленных на формообразование внеплоскостных плёночных структур посредством контроля внутренних напряжений.

Другой проблемой бистабильных микромеханических устройств с аркообразными подвесами является малая механическая устойчивость второго стабильного состояния. Это объясняется остаточным вращательным моментом, действующим после перехода. Для решения данной проблемы необходимо исследование критериев, влияющих на устойчивость второго стабильного состояния, и оптимизация геометрических параметров упругого подвеса.

Особенности нового класса МЭМС устройств, включающих применённый в микроразмерах принцип потери устойчивости, требуют разработки новых способов управления. Так, для оптимизации управления могут быть использованы динамические методы. Наличие нелинейных АЧХ и отсутствие достаточных сведений о динамическом поведении данных систем требуют детального теоретического и экспериментального их изучения.

Нелинейные микромеханические структуры могут быть использованы для создания энергоэффективных микроэлектромеханических устройств, имеющих два или более стабильных состояния и не требующих энергии для поддержания этих состояний. К этим устройствам относятся мем-конденсаторы и настраиваемые LC-схемы, реле и переключатели, элементы памяти, фокусирующие микролинзы. В ходе работы проведено всестороннее рассмотрение тонкоплёночных мультстабильных систем, включающее в себя как теоретический анализ, так и экспериментальные исследования. Получены новые данные, позволяющие увеличить стабильность устойчивых состояний и повысить эффективность управления переходами между ними.

Цель и задачи диссертационной работы. Цель работы состоит в разработке конструкции, методов управления и технологии изготовления нелинейных микромеханических структур с потерей устойчивости, а также исследование их статического и динамического поведения.

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

1. Исследование влияния внутренних напряжений на формообразование внеплоскостных плёночных микроэлектромеханических элементов и анализ технологических методов формирования нелинейных микромеханических структур с проявлением потери устойчивости;

2. Разработка численной модели поведения аркообразных упругих подвесов и выявление критериев, влияющих на механическую устойчивость стабильных состояний, таких как геометрические параметры и внутренние напряжения;

3. Получение данных о динамическом поведении систем с аркообразными упругими элементами под действием различных типов нагрузок;

Объекты и методы исследования. В ходе проведения диссертационного исследования были измерены упругие свойства напылённых металлических плёнок и объемных кремниевых балок, а также изучены статические и динамические характеристики поведения нелинейных микросистем основанных на потере устойчивости.

Для исследования упругих свойств полученных плёнок применялись:

- оптические методы измерения кривизны кантилевера и топологии структур;
- методы растровой электронной микроскопии (РЭМ) для определения геометрических параметров изготовленных тестовых образцов и изучения морфологии структурных слоёв;
- конфокальная микроскопия («Keyence VK-9700») для определения кривизны поверхности плёночных элементов

- методы лазерной доплеровской микроскопии и стробоскопической видеомикроскопии («Polytec MSA-500») для высоколокального измерения динамических характеристик нелинейных резонаторов
- численные методы моделирования с использованием метода конечных элементов (МКЭ) с последующей верификацией разработанной модели
- методы дифференциального измерения ёмкости для определения статического отклика и переходных процессов при потере механической устойчивости нелинейной микромеханической структуры под действием постоянного напряжения, путем измерения электрических сигналов осциллографом.

Научная новизна результатов диссертационной работы.

1 Получены новые данные о влиянии структурных дефектов в осаждённых магнетронным напылением плёнках Cr-Cu-Cr на упругие свойства пленок и величину внутренних механических напряжений.

2 Выявлены критерии, оказывающие доминирующее влияние на наличие бистабильного поведения нелинейных микромеханических структур, обусловленного потерей механической устойчивости.

3 Предложен и экспериментально проверен новый конструкционный метод повышения устойчивости стабильных состояний, основанный на локальном увеличении жёсткости для снижения проявления несимметричных форм переходов аркообразных упругих микромеханических структур.

4 Экспериментально определены амплитудные и фазовые характеристики микромеханических резонаторов с параллельно объединенными аркообразными упругими элементами при возбуждении их колебаний в условиях высокого и низкого вязкоупругого демпфирования.

5 Разработана и экспериментально продемонстрирована новая схема управления переходами между двумя устойчивыми состояниями нелинейной микромеханической структуры с применением частотного возбуждения колебаний и смещения резонансной частоты постоянной нагрузкой.

Научная и практическая значимость диссертационной работы.

1 Получены экспериментальные данные о степени влияния структурных дефектов и морфологии поверхности на упругие свойства осаждённых магнетронным напылением плёнок Cr-Cu-Cr, которые имеют значение для разработки и изготовления внеплоскостных микроэлектромеханических систем, формируемых по технологиям поверхностной микрообработки.

2 Определена зависимость линеаризации потенциальной энергии нелинейной микромеханической структуры от геометрических параметров упругих элементов и установлена степень влияния несимметричных форм потери устойчивости на сохранение бистабильного поведения.

3 Продemonстрировано, что применение модуляции профиля аркообразного упругого элемента прямоугольной функцией приводит к увеличению относительной глубины потенциальной ямы деформационно-энергетической зависимости и снижает влияние несимметричных форм потери устойчивости, то есть позволяет повысить устойчивость стабильных состояний нелинейной микромеханической структуры.

4 Установлено, что повышение добротности нелинейных резонаторов с аркообразными упругими элементами при резонансном возбуждении приводит к существенному увеличению скорости изменения фазы колебаний, однако наблюдаемое возрастание амплитуды колебаний имеет ограничение.

5 Продemonстрировано, что снижение электрического напряжения управления бистабильным микромеханическим приводом может быть достигнуто при возбуждении вынужденными колебаниями с частотой ниже его резонансной частоты и постоянном напряжении, приводящим к смещению его резонансной частоты до частоты возбуждения. При этом вакуумирование микроэлектромеханической системы приводит к увеличению эффективности данного метода.

6 Разработан комплекс методик определения упругих свойств плёночных механических структур и методик измерения нелинейных механических характеристик МЭМС.

7 Разработаны конструкции и технологии изготовления поверхностных и объёмных нелинейных микромеханических структур для применения в таких МЭМС, как энергонезависимые оптоэлектромеханические переключатели для широкополосной связи, контактные электромеханические реле для коммутации сигналов силовой электроники, вибрационные микромеханические гироскопы (датчики силы Кориолиса) для малогабаритных бесплатформенных навигационных систем.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ:

– составная часть ОКР «Разработка и изготовление оптических модулей на основе оптических ключей, разветвителей и коллиматорных соединителей, выполненных на базе объёмной и поверхностной технологии микромеханики»;

– составная часть НИР "Исследование возможности создания ряда энергонезависимых модулей хранения информации, стойких к СВВФ, по технологии LTCC";

– ПНИЭР «Разработка конструкции и технологии производства микромеханических чувствительных элементов для навигационных систем повышенной точности» (ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным

направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы" (RFMEFI57815X0123) № 14.578.21.0123).

Научные положения, выносимые на защиту:

1 Рост дефектов в ходе непрерывного послойного осаждения тонкопленочных покрытий Cr-Cu-Cr приводит к снижению модулей Юнга меди и хрома до 60 ГПа и 120 ГПа соответственно.

2 Основным фактором, определяющим величину внутренних напряжений тонкопленочных покрытий Cr и Cu, сформированных в ходе магнетронного осаждения, является давление рабочего газа, при этом в диапазоне давлений аргона от 1,5 до 3 мТорр происходит переход от сжимающих напряжений к растягивающим.

3 Снижение отношения высоты арочного прогиба упругой балки к толщине её профиля ниже значения 3,4 : 1 приводит к сглаживанию потенциальной ямы в области второго стабильного состояния, при этом возникновение несимметричных форм потери устойчивости приводит к линейаризации потенциальной энергии уже при значении вышеназванного отношения 5,1 : 1.

4 Модуляция профиля аркообразного упругого элемента (увеличение жёсткости в центральных областях плеч балки) приводит к увеличению относительной глубины потенциальной ямы, при этом модуляция прямоугольной функцией позволяет увеличить относительную глубину потенциальной ямы в два раза при повышении силы реакции балки, соответствующей переходу во второе устойчивое состояние, в 1,4 раза.

5 Действие постоянной нагрузки на нелинейную микромеханическую структуру с упругим элементом в виде аркообразной балки приводит к изменению частоты собственных колебаний, при этом колебания, возбуждаемые переменной нагрузкой на частоте, лежащей в полосе пропускания резонатора, приводят к скачкообразному переходу между устойчивыми состояниями при снижении напряжения управления до двух раз в зависимости от добротности механического резонатора.

Степень достоверности результатов и обоснованность выводов полученных в диссертационной работе, определяется комплексным использованием современных экспериментальных, аналитических и численных методик, соответствием полученных экспериментальных и расчётных результатов, их воспроизводимостью и корреляцией с данным из литературных источников.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах и школах: Семинар «Конструктоско-технологическое проектирование» (Санкт-Петербург, 2015); 18 всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике

(Санкт-Петербург, 2016); X Всероссийский форум студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и инновации в технических университетах" (Санкт-Петербург, 2016); V международная школа-конференция «Saint-Petersburg OPEN 2018» по Оптоэлектронике, Фотонике, Нано- и Нанобиотехнологиям (Санкт-Петербург, 2017); XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (Санкт-Петербург, 2017); Семинар с международным участием «Seminar on MEMS based sensitive elements» (Ганновер, Германия, 2017); Международная конференция «MikroSystemTechnik Kongress 2017» (Мюнхен, Германия, 2017); V международная школа-конференция «Saint-Petersburg OPEN 2018» по Оптоэлектронике, Фотонике, Нано- и Нанобиотехнологиям (Санкт-Петербург, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них: 3 статьи в научном журнале, рекомендованном ВАК, 2 патента на полезную модель, 8 статей в научных журналах, индексируемых «SCOPUS»

Личный вклад автора имеет определяющее значение в постановке цели и задач, в выборе объектов и методов исследования. Изготовление образцов, их теоретическое и экспериментальное исследование, а также анализ полученных результатов, проводились лично автором или совместно с соавторами.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и библиографического списка, включающего 90 наименований. Диссертация содержит 155 страницы машинописного текста, включая 80 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показаны актуальность выбранного направления исследований и степень его разработанности, раскрыта научная новизна, сформулированы цель и основные задачи работы, приведены объекты и методы исследования, научная и практическая значимость, а также изложены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит аналитический обзор современного состояния исследований по теме диссертации. Показано, что нелинейные микромеханические структуры с потерей устойчивости привлекают внимание исследователей благодаря комплексу практически важных свойств, обуславливающих их применение в качестве функциональных элементов как микроприводов, требующих наличия стабильных состояний, так и резонансных датчиков, требующих расширения частотного диапазона. Рассмотрены основные теоретические и численные модели описания поведения аркообразных упругих элементов, а также технологии их изготовления. Сформулирована проблема обеспечения устойчивости второго стабильного состояния. Критический анализ

опубликованных данных показал недостаточную изученность технологии изготовления тонкоплёночных аркообразных упругих элементов и нелинейных динамических характеристик данных структур. На основании выполненного анализа опубликованных сведений сформулированы актуальность, цель и задачи исследования.

В главе 2 представлен анализ технологий изготовления аркообразных упругих элементов и аспектов проявления потери устойчивости, вызванной внутренними напряжениями осаждённых плёнок. В главе рассматриваются технологические проблемы формирования внеплоскостных микроэлектромеханических структур методами поверхностной микрообработки и особенности технологии изготовления подобных нелинейных структур методами объёмной микрообработки с использованием глубокого плазмохимического травления (ГПХТ).

Ключевой особенностью изготовления внеплоскостных плёночных структур является технологическое управление внутренними напряжениями, возникающими в процессе формирования структурных механических слоёв плёнок. Было показано, что для формирования нелинейных микромеханических структур, профиль которых имеет вид арки, необходимо обеспечение внутренних растягивающих напряжений, превышающих критические значения, приводящие к потере устойчивости. В работе продемонстрировано, что такое управления внутренними напряжениями быть достигнуто посредством изменения давления рабочего газа в ходе магнетронного напыления некоторых металлических плёнок.

Было проведено исследование, направленное на выявление закономерностей формирования внутренних напряжений в многослойных плёночных структурах, полученных методом магнетронного напыления. В качестве объекта исследования была выбрана упругая механическая структура типа «кантилевер» (балка с консольной заделкой). В подобной структуре внутренние напряжения приводят к возникновению вращательного момента, приводящего к скручиванию свободного профиля кантилевера. При этом искривление механической структуры будет проявляться вне зависимости от знака действующих напряжений и не будет иметь точек бифуркации, в отличие от механической структуры типа «мостик» (балка с закреплёнными концами). Данные структуры были изготовлены при разном давлении рабочего газа (рис. 1а, б), где для кантилеверов, напылённых при давлении рабочего газа ниже 3,4 мТорр (рис.1б), наблюдается отрицательная величина кривизны поверхности, свидетельствующая о растягивающих напряжениях в структуре. В качестве структурных слоёв данного элемента была выбрана многослойная комбинация Cr-Cu-Cr, осаждённая на кремниевую подложку с изоляционным слоем SiO₂. Профиль искривленной структуры, полученный с использованием оптических методов и методов конфокальной

микроскопии на микроскопе «Keyence VK-9700», был использован для расчета величин внутренних напряжений в слоях при помощи численного моделирования.

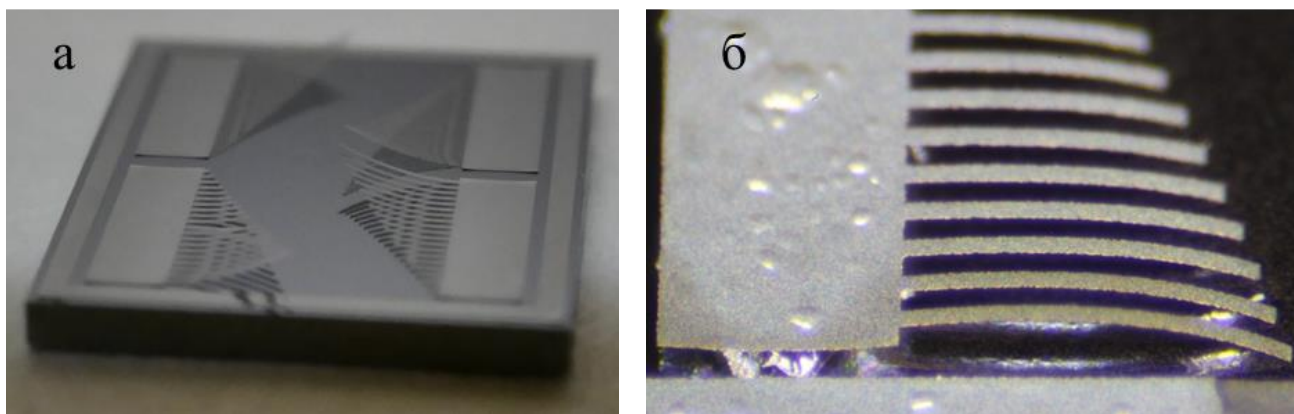


Рисунок 1– Фотография многослойных балок с консольным закреплением; давление рабочего газа: а – 1,2 мТорр; б – 3,4 мТорр

Для определения упругих параметров полученных металлических плёнок, использовались контактные методы с применением наноиндентора Nysitron. Полученные величины модуля Юнга для структурных слоёв Cu и Cr составили 60 ГПа и 184 ГПа соответственно, и отличаются от табличных значений практически в два раза. Это объясняется высокой плотностью дефектов и образованием объемных структурных неоднородностей, обнаруженных в ходе изучения морфологии методом растровой электронной микроскопии. Обнаруженные несовершенства структурных слоёв в первую очередь определяют величину и тип внутренних напряжений. Полученные величины упругих параметров были также оценены резонансными методами, в которых резонансные частоты кантилевера определялись с помощью лазерного доплеровского вибрметра (Laser Doppler Vibrometer) LDV Polytec вблизи свободного края кантилевера. Полученные АЧХ и ФЧХ хорошо согласуются с представленной численной моделью.

На основании полученных данных были изготовлены аркообразные структуры, пример профиля показан на рисунке 2а. Величина внутренних напряжений напылённых плёнок определялась расчётным способом, исходя из измеренных упругих параметров плёнок, кривизны балок и высоты арочного прогиба мостовых структур. На рисунке 2б представлена полученная зависимость внутренних напряжений структурных слоёв балочных элементов. Из рисунка видно, что внутренние напряжения слоёв хрома имеют сильную зависимость от давления рабочего газа, вплоть до изменения типа внутренних напряжений (сжатие / растяжение).

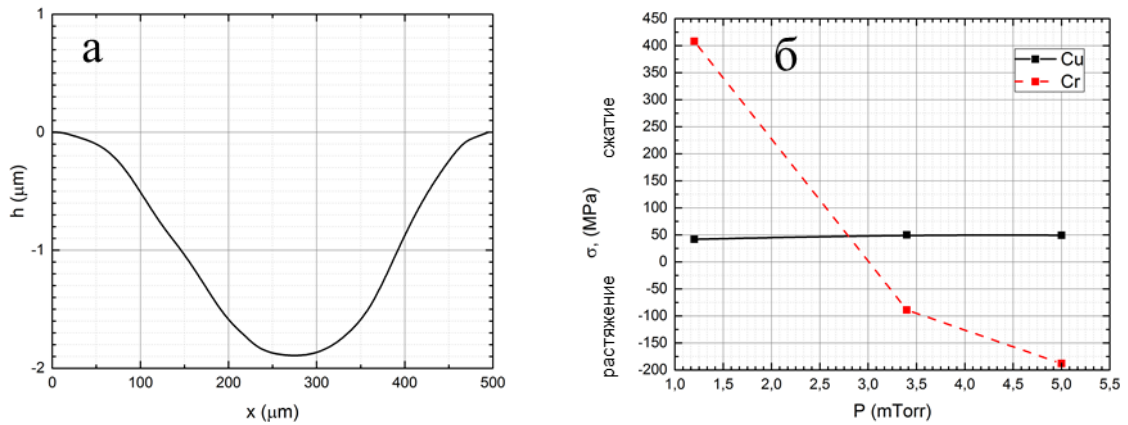


Рисунок 2 – Пример измеренного профиля «мостовых» структур длиной 500 мкм (а) и зависимость внутренних напряжений структурных слоёв балочных элементов от давления рабочего газа (Ar) (б)

В ходе данного этапа работы были исследованы внутренние напряжения и выявлены причины их возникновения на примере многослойной плёночной конструкции Cr-Cu-Cr. Определено, что доминирующим фактором образования внутренних напряжений в подобных слоях является рост дефектов и объёмных структурных неоднородностей высокой плотности. Однако сложность обеспечения воспроизводимости параметров полученных плёнок из-за чувствительности процесса к различным факторам и особенностям процесса и недостаточность информации о других комбинациях материалов требуют более детальных технологических исследований, выходящих за рамки данной работы. Для изучения поведения нелинейных микромеханических структур, основанных на проявлении в них потери устойчивости, целесообразнее использовать технологические методы, исключая столь высокое влияние несовершенства технологического процесса.

Методы объёмной микрообработки с использованием ГПХТ позволяют непосредственно формировать нелинейные микромеханические структуры, профиль которых соответствует первой форме потери устойчивости. Для изучения поведения подобных структур была разработана технология и изготовлены тестовые образцы. В работе предложен профиль электростатического привода, позволивший снизить влияния аспектного отношения при ГПХТ. Полученный результат позволил добиться увеличения ёмкости гребенчатых электростатических структур. Это позволяет применить данные структуры для формирования электростатической нагрузки при исследовании статического и динамического поведения аркообразных упругих структур.

Разработанная технология является наиболее предпочтительной для проведения технологического моделирования за счёт возможности контролировать напрямую различные параметры и действующие нагрузки в нелинейных микромеханических структурах.

Глава 3 включает в себя теоретическое исследование нелинейного поведения арочных структур и возникающих неустойчивостей и определение степени влияния внутренних механических напряжений. Исследование включает в себя как аналитическое описание поведения данных систем, так и его численное моделирование в программной среде COMSOL Multiphysics.

В ходе теоретического анализа было подтверждено утверждение о высокой асимметрии переходных точек упругих сил балок, что говорит о малой глубине второго потенциального минимума и малой устойчивости второго стабильного состояния. Было определено, что отношение осевой и поперечной упругих сил арочного подвеса определяет устойчивость системы во втором стабильном состоянии. Это соотношение Q_{CR} может быть выражено как отношение высоты арочного прогиба h к толщине балки t . Так, при увеличении толщины балки при сохранении высоты арочного прогиба глубина минимума потенциальной энергии подвеса уменьшается, и линеаризуется.

В рамках экспериментального исследования было проведено технологическое моделирование с изготовлением прототипов аркообразных упругих структур (рис. 3а, 3б). Нелинейное статическое поведение при ассиметричных формах переходов, соответствующих второй форме потери механической устойчивости, определялось на структурах, состоящих из аркообразной балки и двух неподвижных электродов («Up» и «Down») (рис. 3а). Такое поведение для симметричных форм переходов, соответствующих третьей форме потери механической устойчивости, определялось на структурах, состоящих из двух параллельно объединённых аркообразных балок (рис. 3б).

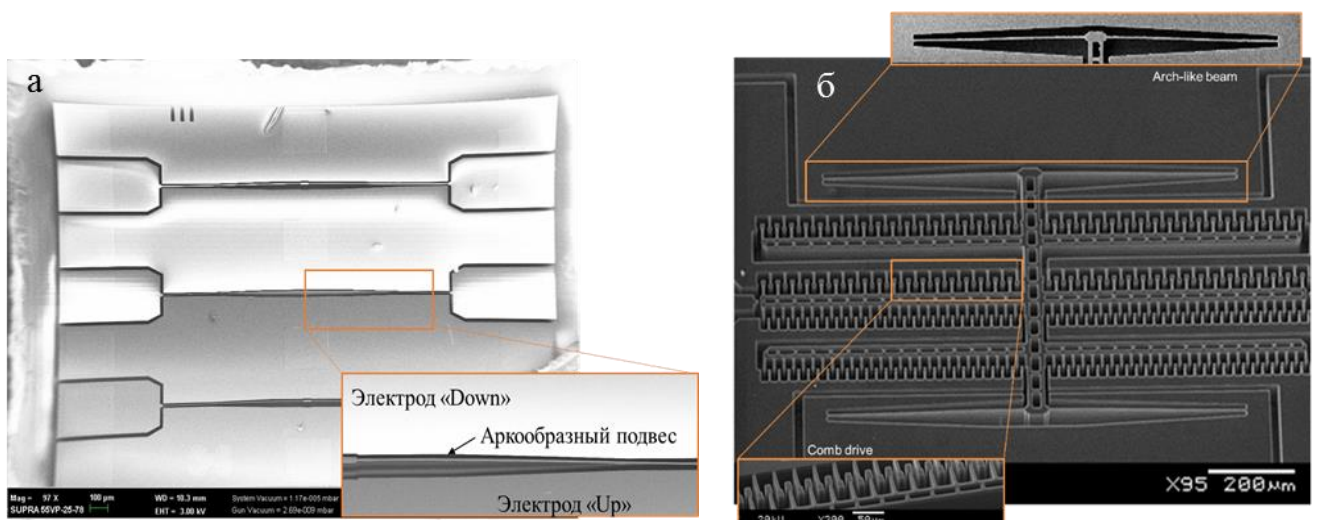


Рисунок 3 – РЭМ-изображение прототипа аркообразных структур (а) и структур с параллельным объединением аркообразных балок (б): толщиной 70 мкм с длиной балки 1,5 мм

Для подтверждения критериев линеаризации были определены величины электрических напряжений, при которых происходил скачкообразный переход. Силы реакции нелинейного подвеса определялись путём пересчёта управляющего

напряжения, исходя из параметров электростатической системы привода. Для упругой системы с высоким значением Q_{CR} результаты моделирования и аналитической оценки хорошо согласуются с результатами эксперимента. В ходе представленных в данной главе исследований были выявлены следующие критерии устойчивости нелинейных микромеханических систем:

- снижение отношения Q_{CR} ниже значения 3.4 : 1 приводит к сглаживанию потенциальной ямы в области второго стабильного состояния;
- проявление несимметричных форм потери устойчивости приводит к линеаризации потенциальной энергии балки уже при значении вышеназванного отношения 4.5 : 1;

В работе приведён метод снижения пороговых нагрузок перехода между устойчивыми состояниями аркообразных упругих структур с высоким значением Q_{cr} . Данный метод основан на снижении продольных сил при смещении упругого подвеса. Результаты экспериментального исследования переходных процессов показали снижение управляющего напряжения, при котором наблюдался скачкообразный переход, практически в два раза.

Исходя из полученных результатов теоретического и технологического моделирования, было определено, что для увеличения устойчивости второго стабильного состояния необходимо: увеличение отношения продольных и поперечных сил; снижение вращательных моментов. Это может быть достигнуто путём модуляции толщины профиля балки, приводящего к локальному увеличению жёсткости. Были изучены различные функции такой модуляции как гладкой, так и прямоугольной функциями. На рис. 4 представлен результат численного расчета силы реакции арочных структур.

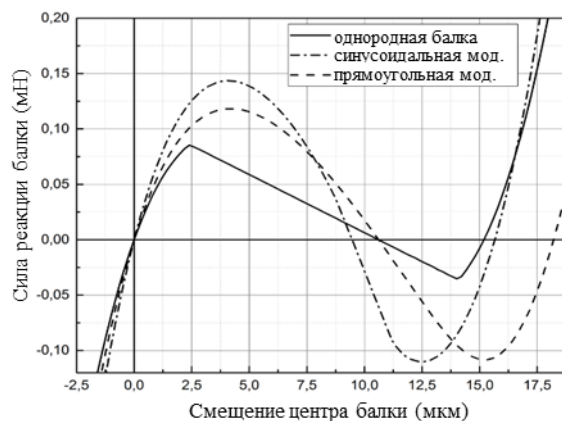


Рисунок 4 – Результаты численного моделирования силы реакции аркообразной балки: с однородной толщиной профиля; с модуляцией гладкой и прямоугольной функцией

Для проведения экспериментального исследования бистабильного привода с применением локального увеличения жёсткости были изготовлены тестовые образцы кремниевых актюаторов. Измеренные перемещения и действующие силы реакции упругого подвеса показаны на рисунках 5а и 5б. Результаты эксперимента

показали хорошую согласованность с аналитической зависимостью и численной моделью аркообразных упругих подвесов.

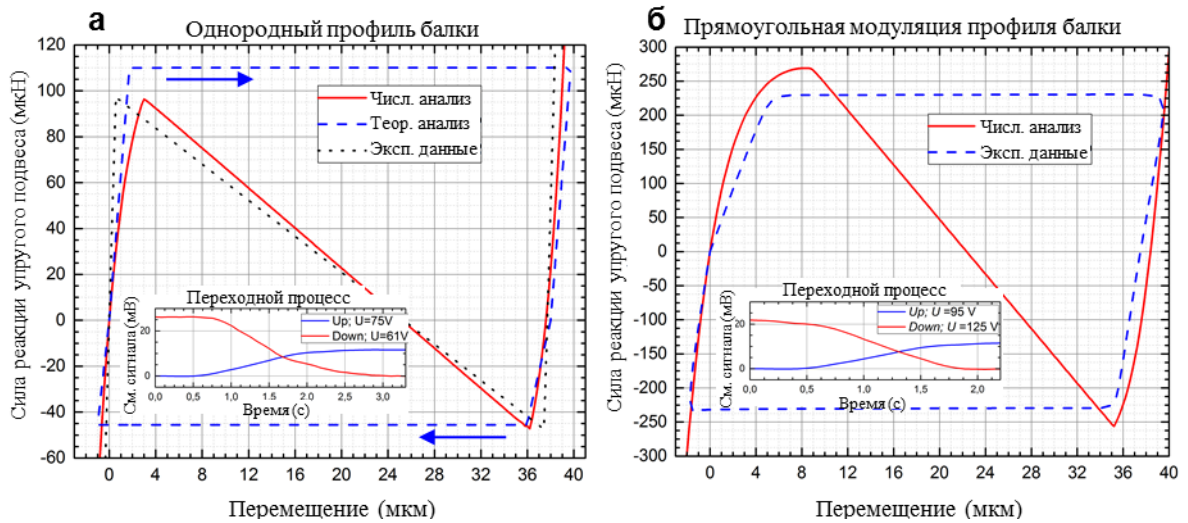


Рисунок 5 – Зависимость силы от перемещения и переходной процесс для аркообразной балки: с однородной толщиной профиля (а); с переменной толщиной профиля (б)

Использование переменного профиля балки (увеличение жёсткости в центральных областях плеч балки) позволило добиться увеличения относительной глубины потенциальной ямы, при этом модуляция прямоугольной функцией позволяет увеличить относительную глубину потенциальной ямы в 2 раза при повышении силы реакции балки, соответствующей переходу во второе устойчивое состояние, в 1.4 раза (рис. 5б).

Глава 4 содержит описание экспериментальных исследований динамического нелинейного поведения аркообразных подвесов, а также методов оптимизации управления переходом.

Снижение управляющего напряжения может быть достигнуто применением динамических методов переключения. Для управления приводом используется резонансное увеличение сигнала, возбуждённого переменным напряжением с добавлением постоянного напряжения смещения.

В рамках исследования динамических параметров нелинейной системы были определены частотные характеристики прототипов привода, представляющего собой кремниевый резонатор. Для обеспечения высокой добротности колебаний, актюатор помещался в вакуумную камеру. Экспериментально полученные характеристики (рис. 6) соответствуют теоретическим зависимостям, полученным в ходе численного моделирования.

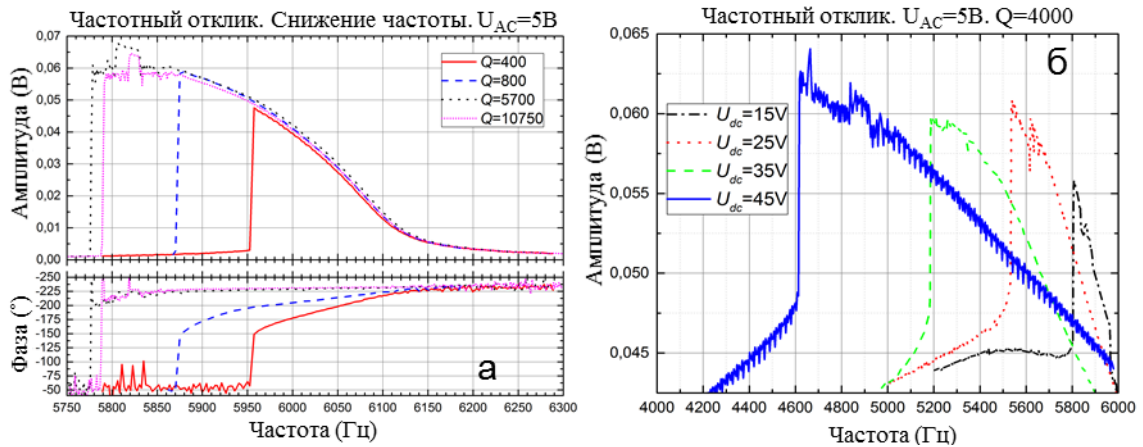


Рисунок 6 – Экспериментальные АЧХ и ФЧХ резонатора с нелинейными микромеханическими структурами: а – АЧХ и ФЧХ при разных значениях добротности; б – АЧХ при возбуждении колебаний постоянным и переменным напряжением

Характер полученных частотных зависимостей показал возможность снизить напряжение управления при возбуждении колебаний переменным напряжением с постоянным смещением. Нелинейный характер колебаний резонатора позволяет возбуждать его с частотой, удаленной от частоты собственных колебаний в линейной области. При отсутствии напряжения смещения вынужденные колебания не приводят к значительному росту колебаний резонатора, как и напряжение смещения не приводит к его переключению.

Эксперимент показал, что применение динамического метода переключения может позволить снизить управляющее напряжение бистабильного реле примерно в два раза. Эта особенность нелинейных систем, основанных на потере механической устойчивости является ключевой для изделий микросистемной техники, требующих объединить большое смещение и статическое удержание.

В **заключении** приведены основные научные и практические результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Исследования упругих свойств напылённых плёнок показал рост дефектов в металлических плёнках хрома и меди в ходе осаждения методами магнетронного напыления. Рост дефектов может быть объяснён как режимами осаждения структурных слоёв, так и морфологией поверхности жертвенного подслоя.

2 Формирование аркообразного профиля плёночных балочных структур может быть достигнуто путём технологического управления внутренними напряжениями. Основным фактором, определяющим величину внутренних напряжений тонкопленочных покрытий Cr и Cu, сформированных в ходе магнетронного осаждения, является давление рабочего газа, при этом в диапазоне давлений аргона от 1,5 до 3 мТорр происходит переход от сжимающих напряжений к растягивающим.

3 Теоретически обнаружено и экспериментально подтверждено, что снижение отношения высоты арочного прогиба упругой балки к толщине её профиля ниже значения $3,4 : 1$ приводит к сглаживанию потенциальной ямы в области второго стабильного состояния. Экспериментально установлено, что потеря механической устойчивости через несимметричные формы приводит к проявлению линеаризации уже при значении вышеназванного отношения $5,1 : 1$.

4 Разработанный и экспериментально проверенный метод повышения относительной глубины потенциальной ямы, позволил увеличить относительную глубину потенциальной ямы в два раза при повышении силы реакции балки, соответствующей переходу во второе устойчивое состояние, в 1,4 раза.

5 Экспериментально полученные АЧХ и ФЧХ резонаторов с аркообразными упругими микромеханическими структурами при возбуждении колебаний в разряженной среде показали, что повышение добротности нелинейных резонаторов при резонансном возбуждении приводит к существенному увеличению скорости изменения фазы колебаний, однако возрастание амплитуды колебаний имеет ограничение.

6 Разработанная новая схема управления переходами нелинейной микромеханической структуры с применением частотного возбуждения колебаний и смещением резонансной частоты постоянной нагрузкой, приводит к значительному снижению напряжения управления. Экспериментально установлено, что повышение добротности резонатора увеличивает эффективность данного динамического метода.

7 Разработанные конструкции и технологии поверхностных и объёмных нелинейных микромеханических структур применены при изготовлении энергонезависимых оптоэлектромеханических переключателей для широкополосной связи, контактных электромеханических реле для коммутации сигналов силовой электроники, вибрационных микромеханических гироскопов (датчиков силы Кориолиса) для малогабаритных бесплатформенных навигационных систем. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ:

- составная часть ОКР «Разработка и изготовление оптических модулей на основе оптических ключей, разветвителей и коллиматорных соединителей, выполненных на базе объёмной и поверхностной технологии микромеханики»;
- составная часть НИР "Исследование возможности создания ряда энергонезависимых модулей хранения информации, стойких к СВВФ, по технологии LTCC";
- ПНИЭР «Разработка конструкции и технологии производства микромеханических чувствительных элементов для навигационных систем повышенной точности» (ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным

направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы" (RFMEFI57815X0123)).

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Залевская В.А. Проектирование МЭМС-компонентов коммутационной техники / Залевская В.А., Эннс П.Б., Эннс Я.Б., Фёдоров А.В., Шлеенкова Н.М. // Техника радиосвязи. 2014. № 2 (22). С. 83-90
2. Эннс Я.Б. Использование бистабильных систем в микромеханических гироскопах с гребенчатыми приводами / Эннс Я.Б., Клейманов Р.В., Казакин А.Н., Пятышев Е.Н., Коршунов А.В. // В сборнике: «Наука и инновации в технических университетах» Материалы Десятого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. 2016. С. 30-31
3. Эннс Я.Б. Моделирование вибрационных микромеханических гироскопов / Эннс Я.Б., Клейманов Р.В., Казакин А.Н., Пятышев Е.Н., Коршунов А.В. // В сборнике: «Наука и инновации в технических университетах» Материалы Десятого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. 2016. С. 31
4. Enns Y. B. The development of a bistable microdrive for the micromechanical gyroscopes / Y. B. Enns, R. V. Kleimanov, A. N. Kazakin, E. N. Pyatishev and A. V. Korshunov // Journal of Physics: Conference Series, Volume 816, Number 1, 2017 (<https://doi.org/10.1088/1742-6596/816/1/012042>)
5. Эннс Я. Б. Разработка бистабильного микропривода для микромеханических гироскопов / Я. Б. Эннс, А. Н. Казакин, Р. В. Клейманов, А. В. Коршунов, Е. Н. Пятышев // Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника: тезисы докладов 18-й всероссийской молодёжной конференции, 2016. С. 135
6. Эннс Я.Б. Моделирование бистабильного микропривода первичных колебаний микромеханического гироскопа / Я.Б. Эннс, Е.Н. Пятышев // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт металлургии машиностроения и транспорта. 2016. С. 97
7. Pyatishev E.N. A micromechanical gyroscope with bistable suspension of microdrive / E.N. Pyatishev, Ya.B. Enns, I.M. Komarevtsev, M. Wurz, A. Glukhovskoy // 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 2017. P 379-382
8. Pyatishev E.N. MEMS Gyro Comb-Shaped Drive with Enlarged Capacity Gradient / E.N. Pyatishev, Ya.B. Enns, A.N. Kazakin, R.V. Kleimanov, A.V. Korshunov, N.Yu. Nikitin // 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 2017. P 383-385
9. Enns Y.B. Bistable arch-like beams with modulated profile as perspective supporting structures of a microelectromechanical actuator / Y.B. Enns, E. N. Pyatishev, A.

Glukhovskoy // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 917 (2017) 082013 (doi :10.1088/1742-6596/917/8/082013)

10. Pyatishv E. Elektromechanischer Mikro-Biegeaktor als optischer Shutter (перевод. на англ. Electromechanical bending microactuator as optical shutter) / E. Pyatishv, M. Wurz, Y. Enns, A. Glukhovskoy, E. Fischer, A. Odintsov, R. Kleimanov // Proc. MikroSystemTechnik Kongress, 2017 , pp. 519-522

11. Патент РФ № 173867 РФ, МНК G01C 19/5621 «Вибрационный гироскоп LL-типа» / Акульшин Ю. Д., Казакин А.Н., Комаревцев И.М. и др. опубл.15.09.2017 Бюл. №26

12. Патент РФ № 173133 РФ, МНК G01C 19/5621 «Вибрационный гироскоп LL-типа» / Некрасов Я. А., Казакин А.Н., Комаревцев И.М. и др. опубл.28.04.2018

13. Pyatishv E.N. Increasing the capacity of micromechanical gyroscope comb actuator using bistable suspension / E.N. Pyatishv, Y.B. Enns, R.V. Kleimanov and et.al. // 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 2018, pp. 1-3, DOI: 10.23919/ICINS.2018.8405903

14. Pyatishv E.N. A Sensing element for a high-precision micromechanical LL-type gyroscope / E.N. Pyatishv, Y.B. Enns, Y.A. Nekrasov //25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 2018, pp. 1-5, doi: 10.23919/ICINS.2018.8405902

15. Пятышев Е.Н. Тонкоплёночный электромеханический оптический затвор / Е.Н. Пятышев, Я.Б. Эннс, Ю.Д. Акульшин, А.В. Одинцов // нано- и микросистемная техника. 2018. Том 20, № 10. С. 625-632. doi: 10:17587/nmst.20.625-632

16. Эннс Я.Б. Бистабильное микромеханическое реле на основе потери устойчивости нелинейных упругих структур / Я.Б. Эннс, Пятышев Е.Н., Ю.Д. Акульшин, П.Б. Эннс// нано- и микросистемная техника. 2018. Том 20, № 11. С. 688-695. doi: 10:17587/nmst.20. 688-695

17. Enns Y.B. The development of the bistable micromechanical actuator for optical relay / Y.B. Enns, E.N. Pyatishv, A.N. Kazakin// IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series №1124, 2018, pp. 1-6

18. Kleimanov R. Electromechanical bending microactuator as optical shutter / R. Kleimanov, Y. Enns, E. Pyatishv, I. Komarevtsev // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series №1124, 2018, pp. 1-5