

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт Физики Микроструктур  
Российской Академии Наук**

*На правах рукописи*

Вопилкин Евгений Александрович

**Туннельные и эмиссионные акселерометры на основе  
микроэлектромеханических систем**

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

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук  
В.И.Шашкин

Нижний Новгород - 2012

## Содержание

Введение	4
Глава 1. Микроэлектромеханические системы для датчиков физических величин (обзор литературы)	
1.1. Введение	14
1.2. Технология МЭМС	15
1.3. МЭМС двигатели	17
1.4. Модель акселерометра	18
1.5. Виды акселерометров	21
1.6. Туннельный МЭМС сенсор	22
Глава 2. Датчики туннельно-эмиссионных акселерометров	
2.1. Введение	26
2.2. Обсуждение конструкции и оптимальной геометрии электродов эмиссионного акселерометра	27
2.3. Экспериментальные исследования эмиссионного акселерометра	31
2.4. Выводы	40
Глава 3. Изготовление и исследование микроконсолей для применений в МЭМС датчиках физических величин	
3.1. Введение	41
3.2. Изготовление микроконсолей на основе материалов с различным кристаллическим совершенством	42
3.3. Изучение механических свойств микроконсолей с помощью атомно-силового микроскопа	46
3.4. Обращение изгиба микроконсоли при введении дополнительных упруго-напряженных слоёв	52
3.5. Изгиб микроконсолей при изменении температуры	55

3.6. Исследование электромеханических свойств МЭМС с электростатическим управлением	56
3.7. Выводы	66
Глава 4. Анизотропный пьезоэффект в микроэлектромеханических системах на основе эпитаксиальных гетероструктур GaAs/AlAs и Al <sub>0,5</sub> Ga <sub>0,5</sub> As/AlAs	
4.1. Введение	69
4.2. Пьезоэффект в кристалле GaAs(001)	70
4.3. Формирование пьезоэлектрических микроконсолей для МЭМС	80
4.4. Исследование статических и динамических смещений консолей	84
4.5. Выводы	91
Глава 5. Микроэлектромеханический туннельный датчик для акселерометра	
5.1. Введение	93
5.2. Изготовление МЭМС структуры с туннельным зазором	94
5.3. Исследование характера токопереноса через зазор в МЭМС на основе структуры кремний на изоляторе	98
5.4. Исследование электромеханических свойств МЭМС с туннельным зазором	98
5.5. Выводы	104
Приложение 1. Технология критического высушивания	105
Приложение 2. Методика измерения разрешения акселерометра	108
Заключение	109
Список цитированной литературы	111
Список работ автора по теме диссертации	121

What are the possibilities of small but movable machines? They may or may not be useful, but they surely would be fun to make.

*Richard P. Feynman 1959*

## **Введение**

В своем выступлении в Калифорнийском технологическом институте на ежегодной встрече Американского физического общества 29 декабря 1959 года Ричард Фейнман предсказал огромные возможности, которые открывает микроминиатюризация элементной базы. Выступление называлось «There's Plenty of Room at the Bottom» – «Там внизу полно места» [1]. В этой лекции он сказал, что если использовать для записи одного бита информации 100 атомов, то для записи всех книг, написанных человечеством, потребуется кубик размером в одну двухсотую дюйма – это пылинка, которую еле различает человеческий глаз. Эти его предсказания уже во многом сбылись. Развитие микроэлектроники привело к широкому распространению компьютеров. Первые компьютеры, основанные на лампах, занимали целые здания и нуждались в огромном энергопотреблении. Современные компьютеры, обладающие несравненно большей вычислительной мощностью, являются компактными и питаются от аккумулятора. Миниатюризация элементной базы привела к появлению принципиально новых систем передачи и хранения информации. Микроминиатюризация происходит не только в электронике. Вслед за микроэлектроникой появилась и микромеханика, представленная микроэлектромеханическими системами – МЭМС. Возможно, в недалеком будущем получат распространение ещё более миниатюрные наноэлектромеханические системы – НЭМС.

## **Актуальность темы**

Важнейшей задачей микромеханики является создание и развитие элементной базы МЭМС и изучение основных физических принципов функционирования этих систем. В отличие от макроскопических систем, в МЭМС большое значение имеют силы Ван-дер-Ваальса, капиллярные силы, упругие напряжения, могут оказаться заметны квантовые эффекты. Поэтому нельзя создать прямые МЭМС аналоги макроскопических механизмов путем

простого масштабирования. Способы создания МЭМС так же радикально отличаются от привычной механической обработки. На сегодняшний день МЭМС представлены на рынке в основном микропереключателями [2], варакторами [3] и датчиками физических величин [4] – давления, ускорения и гироскопами. Все эти элементы выполняются интегрированными в микросхемы (in chip), что приводит к существенной экономии места и удешевлению прибора. Конструктивными элементами этих устройств являются микроразмерные балки, консоли и мембраны, изготовленные методами литографии и селективного травления [5]. Актуальной задачей является создание высокочувствительных МЭМС акселерометров, гироскопов и датчиков давления для применений в автомобилестроении, робототехнике, гидроакустике, системах навигации и др. Высокой чувствительностью к смещению обладают датчики, использующие туннельный ток для регистрации расстояния между электродами. Туннельный акселерометр, созданный группой Kenny et. al. [6] в 2001 году продемонстрировал разрешение  $2 \cdot 10^{-8} \text{ г/Гц}^{1/2}$  на частотах до 1,5 кГц. Характерные значения туннельного тока составляют величину порядка 1 нА при напряжениях порядка 0,1 В и расстоянии 1 нм между электродами. В макроскопических системах такое расстояние между подвижными электродами не может существовать продолжительное время из-за термодрейфов, вибраций и акустических шумов. Это хорошо известно из опыта эксплуатации сканирующих туннельных микроскопов. Поэтому, для поддержания неизменной величины туннельного зазора приходится использовать двигатель и петлю обратной связи по току. При микроминиатюризации такого датчика и переходе к МЭМС смещения за счет термодрейфов и термических градиентов уменьшаются пропорционально размеру. Это может позволить в перспективе отказаться от использования двигателя и петли обратной связи, что должно сильно упростить и удешевить конструкцию акселерометра. Но при переходе к МЭМС возникает ряд других проблем, таких, как рост влияния термомеханического шума с уменьшением размера [7], утечки тока, залипание подвижных электродов из-за сил Ван-дер-Ваальса и других, не характерных для макроскопических систем. Рассмотрению актуальных на сегодняшний день физических принципов создания базовых

элементов МЭМС и исследованию их свойств посвящена данная диссертационная работа.

### **Цель работы**

Целью диссертационной работы состояла в разработке физических основ технологий и экспериментальном исследовании физических свойств базовых элементов МЭМС, предназначенных для применений в первичных датчиках акселерометров.

### **Научная новизна**

Научная новизна работы определяется оригинальностью поставленных экспериментов, полученными новыми результатами, и заключается в следующем.

1. Показано, что в режиме регистрации автоэмиссионного тока чувствительность акселерометра пропорциональна току, который при плоскопараллельных электродах пропорционален их площади, в отличие от традиционных эмиссионных игольчатых катодов. При этом, зависимость тока от расстояния между электродами является экспоненциальной. Впервые показано, что для обеспечения максимальной чувствительности акселерометра, работающего в режиме эмиссионного тока, следует отказаться от традиционных эмиссионных игольчатых катодов и использовать плоские электроды.
2. Впервые изготовлен датчик акселерометра с квазиплоскими электродами, работающий в туннельном и эмиссионном режимах протекания тока. Порог обнаружения составил менее  $10^{-4} g/\sqrt{Гц}$  в первом режиме и менее  $10^{-3} g/\sqrt{Гц}$  во втором режиме в диапазоне частот до 6 кГц. Показано, что эмиссионный режим (напряжение смещения  $\sim 100$  В, ток  $\sim 100$  нА при зазоре между электродами  $\sim 100$  нм) сохраняется десятки минут в лабораторных условиях при разомкнутой обратной связи.
3. Впервые проведены прямые статические измерения проявлений поперечного пьезоэлектрического эффекта в микроконсолях, направленных по ортогональным диагональным осям  $[110]$  и  $[1\bar{1}0]$ , изготовленных на

основе эпитаксиальных слоёв GaAs и AlGaAs. При подаче постоянного напряжения обнаружено взаимно противоположное движение микроконсоль длиной до 100 мкм, определены константы пьезоэлектрического модуля, совпадающие по величине со справочными значениями, что служит доказательством пьезоэлектрической природы функционирования микродвигателя.

4. Впервые создан макет акселерометра с пассивным туннельным датчиком смещения вместо традиционной конструкции с двигателем и обратной связью по току [6]. Технология основана на разрезании сфокусированным ионным пучком тонкого кремниевого моста в структуре кремний на изоляторе (КНИ) с последующим напылением платины в зону микроконтактов. Разрешающая способность акселерометра не хуже  $2,2 g / \sqrt{\Gamma\text{ц}}$ , частота собственного резонанса находится в диапазоне нескольких МГц.

### **Научная и практическая ценность**

1. Оптимизирована конструкция эмиссионного акселерометра. Предложена плоскопараллельная геометрия электродов для эмиссионного акселерометра, позволяющая достигнуть максимальной чувствительности. Техническое решение защищено патентом Российской Федерации.
2. Предложен способ реализации квазиплоских электродов на основе скрещенных цилиндрических кварцевых волокон, покрытых золотом и расположенных друг от друга на расстоянии много меньше их радиуса. Разработан и создан макет высокочувствительного туннельно-эмиссионного акселерометра с активной системой поддержания тока, имеющий разрешение не хуже  $10^{-4} g / \sqrt{\Gamma\text{ц}}$  на частотах до 6 кГц.
3. Показана возможность создания датчика смещения туннельно-эмиссионного акселерометра без активной системы поддержания тока.
4. Предложена методика измерения жёсткости кантилеверов и оценки упругих напряжений в тонких металлических плёнках на поверхности

микроконсолей. В частности, показана возможность создания металлической плёнки (Ni) на поверхности GaAs с малыми упругими напряжениями.

5. Создан макет переменного конденсатора на основе МЭМС, представляющий собой подвижную золотую мембрану расположенную над металлизированной подложкой GaAs.
6. Разработан и изготовлен макет МЭМС биморфного пьезодвигателя на основе микроконсолей GaAs или AlGaAs. Направление изгиба микроконсолей зависит от их ориентации на плоскости GaAs(001). Максимальное статическое смещение достигает 60 нм при частоте низшей резонансной моды около 160 кГц.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Геометрия квазиплоских электродов обеспечивает максимальную чувствительность эмиссионного датчика смещения.
2. Изгибом микроконсолей, изготовленных из монокристаллических и поликристаллических материалов, можно управлять путём магнетронного напыления на их поверхность металлических плёнок с различными внутренними упругими напряжениями. Напыление Ta изгибает микроконсоль вниз, а Cr - вверх. Напыление Ni оказывает минимальное воздействие.
3. На основе эпитаксиальных структур GaAs и AlGaAs возможно создание МЭМС биморфного пьезодвигателя. Величина максимального смещения такого двигателя определяется электрическим полем пробоя материала. Микроконсоли, ориентированные вдоль ортогональных осей [110] и  $[1\bar{1}0]$ , смещаются в противоположные стороны, что увеличивает величину их взаимного относительного перемещения в 2 раза.
4. Возможно создание датчика смещений на основе МЭМС с нанометровым зазором между электродами, обеспечивающим протекание туннельного/эмиссионного тока, при сохранении заметной подвижности электродов относительно друг друга без применения активной системы поддержания величины туннельного/эмиссионного зазора.



## **Апробация работы**

Основные результаты диссертации были представлены на следующих отечественных и зарубежных конференциях:

- International Workshop “Scanning Probe Microscopy – 2004”, Nizhny Novgorod, 2-6 May 2004;
- 7th Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technologies, ЕХМАТЕС'04, Montpellier, France, June 1-4, 2004;
- I Международном Форуме по Нанотехнологиям “Rusnanotech08”, Москва 3-15 декабря 2008;

а также на внутренних семинарах ИФМ РАН.

## **Публикации**

По теме диссертации имеется 14 работ, из них 10 статей в отечественных и зарубежных реферируемых журналах и сборниках, один патент на изобретение и 3 тезиса в сборниках докладов и трудов конференций.

## **Личный вклад автора в проведенные исследования**

Диссертант принимал участие в постановке и решении задач, проведении измерений, обработке и обсуждении полученных результатов, а также в комплексном анализе влияния технологических факторов на всех стадиях формирования структур для оптимизации процессов с целью достижения их наилучших характеристик. В работах [А1,А2,А6-А10] вклад автора является определяющим с точки зрения изготовления объекта исследования, построения измерительных систем, проведения измерений, в работах [А3-А5, А11-А14] – равноценным.

## **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего в себя список цитированной литературы и список работ автора по теме диссертации. В начале каждой главы дается краткий обзор состояния соответствующих исследований. Общий объем диссертации составляет 122 страницы, включая 90 страниц основного текста, 77 рисунков,

размещенных на 42 страницах, список цитированной литературы из 102 наименований и список работ автора по теме диссертации из 14 наименований.

### **Содержание работы**

Во введении к диссертации обоснована актуальность темы исследований, показана ее научная значимость, сформулированы цели работы, представлены сведения о структуре и содержании работы, а так же приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны принципы работы и устройства акселерометров. Представлен обзор работ, демонстрирующих широкие возможности МЭМС технологии в создании высокочувствительных первичных датчиков физических величин.

Вторая глава посвящена проблеме создания и исследования высокочувствительных туннельных и эмиссионных акселерометров. Разработан и создан макет миниатюрного акселерометра, способного работать как в режиме туннельного тока, так и в режиме тока холодной эмиссии электронов в вакуум. Проведены теоретические расчёты оптимальной формы электродов для эмиссионного акселерометра. Показано, что оптимальной геометрией, для реализации максимальной чувствительности эмиссионного тока к смещению, является геометрия плоского конденсатора, обеспечивающая экспоненциальную зависимость тока от расстояния между электродами. Предложенная квазиплоская геометрия электродов реализована путём сближения двух скрещенных гладких металлизированных цилиндров на расстояние много меньше их радиуса. В качестве цилиндров выбраны стеклянные оптические волокна диаметром 120 мкм. Проведены измерения разрешающей способности акселерометра от частоты в туннельном и эмиссионном режиме. Показано, что на частотах до 6 кГц в туннельном режиме датчик имеет разрешение не хуже чем  $100 \text{ мкг/Гц}^{1/2}$  и в режиме тока холодной эмиссии не хуже чем  $1 \text{ мг/Гц}^{1/2}$ . Экспериментально показано, что такой датчик может работать в эмиссионном режиме без обратной связи. Расстояние между электродами при этом сохраняется неограниченно долго. Проведены измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) для двух

расстояний 90 и 120 нм без обратной связи. Эти ВАХ в осях Фаулера-Нордгейма являются прямыми, что свидетельствует об эмиссионном характере протекания тока.

Третья глава посвящена проблеме получения и исследования конструктивных элементов МЭМС – микроконсолей, а так же управлению их пространственным положением. Разработана технология изготовления микроконсолей из двух типов материалов: монокристаллического GaAs с жертвенным слоем AlAs и поликристаллического Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> с жертвенным слоем ванадия. Были изготовлены микроконсоли длиной 50 мкм, шириной 5 мкм и толщиной 200 нм. С помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) были исследованы механические свойства этих микроконсолей. Измерена статическая жёсткость и резонансная частота колебаний. По данным измерений вычислен модуль Юнга для Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Получено значение модуля Юнга  $E = 127,3$  ГПа, что близко к справочным данным для этого материала [8]. Описаны эксперименты по управлению изгибом микроконсолей путём напыления на них различных металлов. Показано, что при напылении тантала консоль отгибается вниз, при напылении хрома – вверх. Изгиб является обратимым – каждое последующее напыление металла меняет изгиб в соответствующую сторону. Описан эксперимент по изменению изгиба биморфной микроконсоли в зависимости от температуры. Показано, что микроконсоль из Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> с напылённым на её поверхность слоем никеля толщиной 50 нм является тепловым биморфным двигателем. При нагревании от комнатной температуры на 142<sup>0</sup>С, её конец смещался на 0,5 мкм.

Изготовлена микроэлектромеханическая система на подложке арсенида галлия, представляющая собой подвижную золотую мембрану толщиной 1,5 мкм размером 100x100 мкм с электростатическим управлением. Исследованы статические электрофизические и резонансные колебательные свойства данной системы. Произведена оценка возможности использования его в качестве емкостного акселерометра, кулоновского двигателя и варактора.

Четвёртая глава посвящена исследованиям пьезоэлектрического эффекта в микроконсолях GaAs и AlGaAs. Приводится теоретическое описание поперечного

пьезоэлектрического эффекта в арсениде галлия и теоретические расчёты смещения биморфной пьезоэлектрической микроконсоли, состоящей из двух слоёв GaAs толщиной по 1 мкм. Описывается технология изготовления микроконсоли на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs для использования в качестве биморфного пьезодвигателя. Исследуются механические и электрофизические свойства полученных микроконсолей. Измеряются ВАХ пьезоэлектрического слоя консолей. Ток утечки не превышает  $10^{-7}$  А. С помощью интерферометра белого света измеряется резонансная частота микроконсолей, путём подачи переменного напряжения на пьезоэлектрический слой и сканирования по частоте. Резонанс обнаруживается по размыванию интерференционных полос за счёт роста амплитуды колебаний на резонансной частоте. Измеренная частота 160 кГц совпадает с расчетной. Измеряется зависимость смещения конца микроконсоли от приложенного напряжения. Максимальное смещение составляет 60 нм. Описывается эксперимент, демонстрирующий анизотропию пьезоэффекта в AlGaAs. Две консоли на одном основании, ориентированные по ортогональным кристаллографическим осям смещаются в противоположном направлении, что свидетельствует о пьезоэлектрическом характере работы данного двигателя.

Пятая глава посвящена проблеме исследования возможности создания МЭМС туннельного акселерометра без двигателя и петли обратной связи, поддерживающих туннельное расстояние между электродами. Описывается технология изготовления микроконсолей на основе структуры кремний на изоляторе (КНИ) с толщиной кремния и окиси кремния по 1 мкм. Полученные методом фотолитографии и селективного жидкостного травления микробалки длиной 20 мкм разрезаются сфокусированным ионным пучком (FIB) с шириной разреза менее 100 нм. После чего на полученные микроконсоли напыляется слой платины толщиной 50 нм. Исследуется ВАХ туннельного зазора и проводится сравнение с теоретической ВАХ, рассчитанной по формуле для туннельного тока с учётом сил изображения [9]. Наилучшее совпадение с экспериментом даёт расстояние 3 нм между электродами. Ток поддерживается неограниченное время без системы обратной связи. Проводится качественное измерение

вибросенситивности датчика путём ударного возбуждения механического резонатора. Количественное измерение разрешающей способности акселерометра проводится на калиброванном вибростенде. Измеренное разрешение акселерометра составляет  $2 \text{ g/Гц}^{1/2}$  на частоте до 3 кГц. Теоретически оценивается резонансная частота микроконсоли датчика – порядка 2 МГц и рассчитывается разрешение, которое можно получить при понижении резонансной частоты в килогерцовую область за счёт увеличения инерционной массы.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Заканчивая введение, хочу поблагодарить моего научного руководителя д.ф.-м.н. Владимира Ивановича Шашкина под чутким руководством и при непосредственном участии которого были выполнены работы, представленные в диссертации. Автор хотел бы искренне поблагодарить сотрудников ИФМ РАН и соавторов, без совместной работы и общения с которыми данная работа не могла бы состояться. Особо хочу поблагодарить своих коллег:

д.ф.-м.н., с.н.с. Ю.Н. Дроздова за рентгеновские исследования структуры образцов, полезные обсуждения и критические замечания;

вед. инж. А.Ю. Климова, вед. инж.-тех. В.В. Рогова за изготовление разнообразных экспериментальных микроструктур;

вед. инж. И.Ю. Шулешову за помощь в разработке методики травления;

к.ф.-м.н., н.с. В.М. Данильцева, н.с. О.И. Хрыкина за изготовление серии экспериментальных гетероструктур;

вед. инж. Д.Г. Волгунова за изготовление электронных усилителей;

к.ф.-м.н., н.с. Н.В. Востокова за измерения на атомно-силовом микроскопе;

к.ф.-м.н., с.н.с. С.А. Гусева и м.н.с. Е.В. Скороходова за исследования образцов методом электронной микроскопии и изготовление образцов с помощью сфокусированного ионного пучка;

к.х.н., н.с. Д.А. Пряхина за изготовление микроструктур с помощью метода плазмо-химического травления.

нач. лаб. ФГУП «Салют» Ю.И. Чеченина и нач. лаб. ФГУП «Салют»

Н.Г. Бронникову за изготовление образцов.

## **Глава 1. Микроэлектромеханические системы для датчиков физических величин (обзор литературы)**

### **1.1. Введение**

Первый микроакселерометр был разработан в 1979 в Стэнфордском университете, но прошло 15 лет до того, как такие устройства стали широко распространенными приборами, используемыми для большого числа применений [10]. В начале 1990-ых МЭМС акселерометры произвели революцию в производстве автомобильных подушек безопасности. С тех пор они использовались для различных применений, начиная от защиты жесткого диска на ноутбуках и до игровых контроллеров. Позже, та же самая технология датчиков стала доступной в полностью интегрированных, полнофункциональных устройствах, пригодных для промышленного использования [11].

Микроакселерометры - чрезвычайно перспективная технология с огромным коммерческим потенциалом. Они обеспечивают сочетание низкого энергопотребления, компактности и устойчивой чувствительности. Датчики часто делают комбинированными из нескольких отдельных, чтобы обеспечить чувствительность по нескольким осям или большую точность измерений [12].

Потребности в высокочувствительных МЭМС акселерометрах и гироскопах огромны. Помимо упомянутых применений в гидроакустике и автомобилестроении, это аэрокосмическая отрасль, для которой критическое значение имеют как массогабаритные характеристики датчиков, так и низкое энергопотребление. Акселерометры и гироскопы необходимы для системы стабилизации платформы в авиации [13]. Так, например, американский транспортный вертолёт УН-64 «Блэк Хок» только для стабилизации платформы использует три гироскопа [13]. МЭМС акселерометры и гироскопы необходимы так же для систем инерциальной навигации наземной транспортной и боевой техники, авиации, управляемого оружия и даже для перспективной персональной системы навигации для пехоты [13]. Однако существующие на сегодняшний день МЭМС акселерометры не удовлетворяют требованиям по точности измерений, необходимым для успешного их применения и массового производства.

## 1.2. Технология МЭМС

В качестве материалов для МЭМС используются различные кристаллические, поликристаллические и аморфные материалы [14]. К кристаллическим материалам относятся кремний, нитрид алюминия, арсенид галлия и AlGaAs, к поликристаллическим – кремний и различные металлы, к аморфным окись тантала и кремния и различные полимеры.

Современные МЭМС компоненты изготавливаются с применением методов формирования металлических и диэлектрических слоев на поверхности диэлектрической или полупроводниковой пластины, которые имеют широкое распространение в технологии микроэлектроники, а также с использованием широкопрофильной технологии (Lithographie, Galvanoformung, Abformung – LIGA) основанной на литографии и гальванопластике [15].

Основными конструктивными элементами МЭМС являются микроразмерные балки [16,17], консоли [18,19] и мембраны [20,21]. Изготавливаются они при помощи планарной технологии, путём вытравливания жертвенного слоя из-под балки.

Технология изготовления элементов МЭМС сопряжена с определёнными технологическими трудностями. Одной из серьёзных проблем МЭМС является проблема залипания микроконсолей [22]. При касании консоли и подложки консоль может прилипнуть к ней за счёт сил Ван-дер-Ваальса, что приводит к необратимому выходу устройства из строя. Такая проблема возникает, как правило, в процессе производства микроконсолей, на этапе сушки после высвобождения консоли методом селективного жидкостного травления. При сушке образца под консолью остается жидкость, которая смачивает подложку и консоль. При уменьшении объёма жидкости консоль притягивается к подложке за счёт капиллярных сил вплоть до касания и залипания за счёт сил Ван-дер-Ваальса. Одним из решений этой проблемы является отказ от жидкостного травления жертвенного слоя и замена его сухим плазмохимическим травлением. Если такой способ травления не возможен, то такая проблема решается путём критического высушивания после жидкостного травления (П.1).

Одной из важных задач в построении МЭМС является задача создания и поддержания нанометрового вакуумного зазора между подвижными электродами.

Казалось бы, она имеет очевидное решение. Известно, что в монокристаллической гетероструктуре, например, GaAs/AlAs/GaAs, при селективном вытравливании жертвенного слоя нанометровой толщины образуется нанометровый зазор. Такая технология была использована в работах [23-25] для создания нанометрового зазора между двумя неподвижными металлическими электродами. Если одним из электродов будет проводящая балка или консоль, а другим – проводящая подложка, то получится нанометровый зазор между подвижными электродами, через который может течь туннельный ток. На практике при этом неизбежно возникнет проблема утечек. В области основания балки или консоли обязательно будет находиться контактная площадка, с достаточно большой площадью, на которой проводящие слои будут разделены барьером нанометровой толщины. Токи через эту область будут превышать туннельный ток через вакуум. Поэтому нанометровый зазор между электродами следует делать с учётом проблемы утечек, обеспечивая хорошую электрическую развязку.

Важную роль играет позиционирование электродов, то есть управление их пространственным положением. Есть несколько путей решения этой задачи. Это, во-первых, изготовление МЭМС из ненапряжённых монокристаллических материалов. Этот путь требует создания гетероструктуры с нулевыми напряжениями, что довольно сложно реализовать на практике. Другое решение – это создание самопозиционирующихся систем на основе напряжённых структур. Для этого выращиваются структуры с заданным профилем упругих напряжений. После высвобождения структуры она изгибается и принимает свою окончательную форму. Работы в этом направлении велись группой Принца [26-37]. Были использованы сильно напряжённые плёнки InGaAs, которые при высвобождении сворачивались в трубки с различным диаметром, начиная от нескольких десятков нм. В одной из работ этой группы [28] описан туннельный контакт, полученный на разломе напряжённой плёнки, но подвижность этого контакта в работе не изучалась. В другой работе [38] был создан нанометровый зазор в месте разрыва напряжённой балки из арсенида галлия, но подвижность балки в работе не исследовалась и токовые измерения не проводились. Метод создания нанометрового зазора с помощью напряжённых структур требует очень высокой точности контроля напряжений при выращивании гетероструктуры.



Существуют и другие способы управления внутренними напряжениями в микроконсолях, и соответственно, их пространственным положением. На принципиальную возможность внешнего управления напряжениями в металлических плёнках указывает результат работы [39]. В этой работе описываются микроконсоли, изготовленные из кремния на изоляторе (КНИ), на поверхность которых нанесен слой палладия. Известно, что палладий способен поглощать водород и увеличиваться при этом в объёме. Поэтому напряжения в этих консолях зависят от концентрации водорода в окружающей атмосфере. При повышении концентрации водорода консоли гнутся вниз вплоть до появления электрического контакта с подложкой. Такая система может использоваться в качестве чувствительного элемента МЭМС в датчике водорода.

### **1.3 МЭМС двигатели**

Основным способом управления пространственным положением МЭМС является использование микродвигателей (актуаторов), которые могут перемещать элементы МЭМС. Они необходимы для управления варакторами, для систем обратной связи в туннельных акселерометрах и для создания микропереключателей с высоким качеством коммутации и низким энергопотреблением.

На сегодняшний день наиболее распространёнными являются кулоновские [40,41], биморфные тепловые [42,43] и пьезоэлектрические [44,45] микродвигатели. Тепловые биморфные двигатели могут изготавливаться из различных материалов и могут развивать значительные смещения. Они имеют заметную чувствительность к температуре и большие времена реагирования, что ограничивает полосу рабочих частот. Кроме того они требуют для управления довольно больших токов, что приводит к заметному энергопотреблению для поддержания рабочего режима.

Пьезоэлектрические двигатели могут изготавливаться только из кристаллических материалов, обладающих пьезоэлектрическим эффектом – пьезоэлектриков. Энергопотребление их не велико. Пьезоэлектрический двигатель управляется напряжением с небольшими токами утечки и выполняется из достаточно жестких конструкционных элементов, что позволяет ему работать на высоких частотах вплоть до мегагерцового диапазона. Основным недостатком

МЭМС-пьезодвигателя является малая величина пьезомодуля материалов, из которых возможно изготовление МЭМС, и, соответственно, малая величина достижимых смещений.

Одним из наиболее распространенных видов МЭМС двигателей является кулоновский, использующий силу электростатического притяжения пластин плоского конденсатора. Кулоновские двигатели управляются напряжением с небольшими токами утечки и имеют небольшое энергопотребление, и при этом реализуют достаточно большие смещения. Эти двигатели могут изготавливаться из различных материалов, включая металлы. Особенностью их является то, что из-за слабости электростатических сил, для достижения необходимого перемещения, систему подвеса приходится делать сравнительно мягкой, что ограничивает диапазон их применимости низкими частотами.

Устройство кулоновского двигателя позволяет использовать его так же в качестве варактора. Преимуществами МЭМС – варакторов являются высокая добротность, высокая линейность при больших мощностях сверхвысокочастотных сигналов и возможность изготовления их на кремниевых, кварцевых и керамических подложках [46].

Кроме датчиков на основе МЭМС технологий производятся варакторы, емкостные и контактные переключатели. Пассивные электронные МЭМС компоненты (конденсаторы, индуктивности, ключи [47]) широко применяются в радиотехнических системах гражданского и военного назначения. Эти компоненты являются базовыми для создания различных узлов: частотных фильтров, линий задержки, фазовращателей, которые, в свою очередь, входят в состав приемопередающих устройств систем радиолокации, связи и пр. МЭМС компоненты легко интегрируются с активными компонентами на одном полупроводниковом кристалле, образуя монолитную интегральную схему (МИС) с новыми радиотехническими параметрами.

#### **1.4. Модель акселерометра**

Акселерометр – это измерительное устройство, предназначенное для измерения ускорений [48]. Измеряемые ускорения могут быть статическими, как

постоянная гравитация, или переменными - вызванными ускорением или вибрацией акселерометра.

Основными характеристиками акселерометра являются: динамический диапазон измеряемых ускорений, частотный диапазон и разрешающая способность.

В общем случае акселерометр представляет собой механическую колебательную систему, оснащенную датчиком смещения инерционной массы. Такой акселерометр схематично показан на рис. 1.1. Это пружинный маятник, состоящий из инерционной массы  $m$ , подвешенной на пружине, жёсткостью  $k$ , имеющий диссипацию, показанную элементом механического сопротивления (демпфером)  $R$ . Резонансная частота низшей моды такого осциллятора равна:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{k/m}. \quad (1.1)$$

Добротность резонанса

$$Q = \frac{\omega_0 m}{R}. \quad (1.2)$$

Инерционная масса оснащена датчиком смещения. При ускорении корпуса акселерометра вдоль оси  $x$  его инерционная масса смещается относительно корпуса датчика на величину  $x$ , которая определяется условием равновесия  $ma=kx$ :

$$x = a / \omega_0^2. \quad (1.3)$$

Спектральная плотность смещения равна:

$$|Z_s(f)| = a / \omega_0^2. \quad (1.4)$$

Спектральная плотность силы термомеханического шума механического сопротивления равна:

$$F_n = \sqrt{4k_B T R}. \quad (1.5)$$

Где  $T$  – температура,  $k_B$  – постоянная Больцмана. Спектральная плотность смещения под действием термомеханического шума на частотах много ниже резонансной частоты низшей моды выражается формулой [7]:

$$|Z_n(f)| = \sqrt{4k_B T R} / k. \quad (1.6)$$

Соотношение спектральной плотности мощностей сигнал/шум запишется в виде:

$$|Z_s / Z_n|^2 = a^2 m Q / 4k_B T \omega_0. \quad (1.7)$$

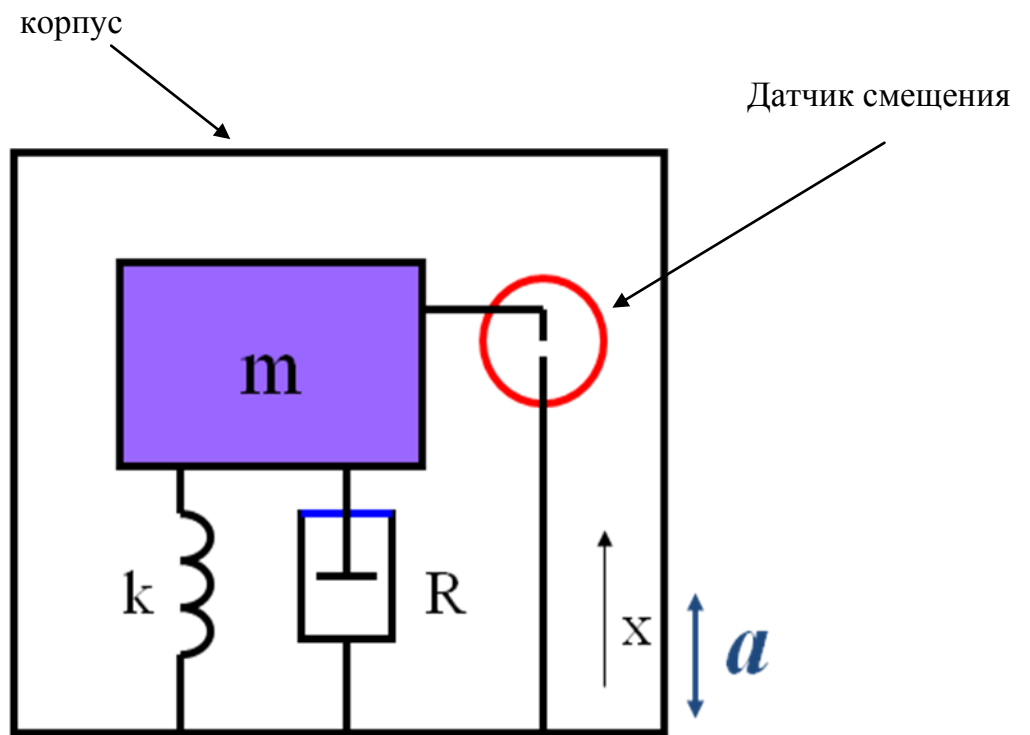


Рис. 1.1. Схема акселерометра:  $m$  – инерционная масса,  $k$  – упругий элемент,  $R$  – эквивалентное механическое сопротивление (демпфер).

Из этой формулы видно, что для улучшения соотношения сигнал/шум нужно увеличивать добротность осциллятора, уменьшать его резонансную частоту и увеличивать инерциальную массу, что так же приведет к понижению резонансной частоты. Увеличение массы противоречит миниатюризации. Снижение резонансной частоты уменьшает диапазон рабочих частот. Увеличение добротности предъявляет повышенные требования к динамическому диапазону и приводит к большому времени задержки при быстром изменении сигнала. Все эти факторы необходимо учитывать при проектировании и изготовлении МЭМС акселерометров.

### **1.5 Виды акселерометров**

Существует множество различных типов чувствительных элементов, на основе которых изготавливаются акселерометры. Это емкостные, пьезоэлектрические, пьезорезистивные, туннельные, эмиссионные и другие типы датчиков.

Пьезоэлектрические датчики, использующие для измерения смещения пьезоэлектрический эффект являются наиболее распространенными [49-52]. Эти датчики имеют широкий спектр технических характеристик, функционального назначения, габаритов и масс: миниатюрные (весом несколько десятых грамма), низкочастотные (от сотых долей герца), высокочастотные (до нескольких мегагерц), криогенные (до  $-196^{\circ}\text{C}$ ), высокотемпературные (до  $+1000^{\circ}\text{C}$ ), широкого применения, одно- и многокомпонентные, со встроенной микроэлектронной схемой и без таковой и многие другие. Такие датчики не требуют электрического питания, имеют невысокую чувствительность и могут использоваться на достаточно высоких частотах (до нескольких мегагерц) за счёт большой жесткости пьезокерамик и пьезокристаллов.

Пьезорезистивные датчики [53-56] могут иметь различные конструкции. Принцип действия их основан на эффекте изменения сопротивления пьезорезистора при изменении его объёма. Один из вариантов представляет собой субмиллиметровую консольно закрепленную балку с пьезорезистивным элементом в месте наибольшего изгиба. Сопротивление этого элемента измеряется внешней

цепью, что требует постоянного тока питания. Чувствительность пьезорезистивных датчиков соизмерима с чувствительностью пьезоэлектрических.

Емкостные датчики представляют собой переменные конденсаторы, ёмкость которых меняется при изменении расстояния между обкладками [57-63]. Ёмкость конденсатора измеряется с помощью тока высокой частоты, что требует соответствующего типа питания датчика. Размеры этих датчиков могут меняться в зависимости от назначения от нескольких метров, как например, в английском высокочувствительном подземном сейсмометре GURALP [57] до субмиллиметровых размеров. Ёмкостные МЭМС акселерометры уже производятся интегрированными в микросхемы например ADXL05 фирмы Analog Devices. Чувствительность емкостных датчиков варьируется в широких пределах, достигая на установке сейсмометра GURALP рекордных  $10^{-9}$  г/Гц<sup>1/2</sup>. Стоит отметить, что установка GURALP, имеющая такое разрешение, имеет массу, равную нескольким тоннам и объём несколько кубометров.

Чувствительность емкостных, пьезоэлектрических и пьезорезистивных датчиков является недостаточной для многих применений. Более высокую чувствительность обеспечивает создание МЭМС туннельного акселерометра.

## **1.6 Туннельный МЭМС сенсор**

Туннельные датчики используют экспоненциальную зависимость туннельного тока в вакууме от расстояния между электродами [64]. Такие датчики фактически представляют собой упрощенный вариант сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) [65], лишённого системы горизонтального сканирования. Благодаря небольшим размерам области протекания туннельного тока туннельные датчики имеют высокий потенциал миниатюризации. Как и СТМ, туннельные датчики обладают высокой чувствительностью к смещению и имеют характерное расстояние между электродами 1 нм, при рабочем токе 1 нА и напряжении 0,1 В. Но для поддержания постоянного туннельного зазора они, как и СТМ, нуждаются в двигателе и петле обратной связи по току, что усложняет и удорожает конструкцию датчика.

В качестве двигателя обратной связи СТМ обычно используется шаговый пьезодвигатель. В работе [66] авторы предлагают конструкцию МЭМС

туннельного акселерометра с консольным пьезодвигателем и приводят расчёт его характеристик, но на практике такой датчик до сих пор не создан. Проблема его создания состоит в том, что пьезодвигатели имеют недостаточную величину перемещения. В работе [45] консоль на основе арсенида галлия длиной в 100 мкм развивала максимальное смещение конца консоли 100 нм. Такого смещения недостаточно для поддержания рабочего режима датчика, так как при высвобождении консоли с металлической пленкой на поверхности, они, как правило, изгибаются. Для консоли длиной 100 мкм смещение её конца может составлять несколько мкм. Очевидно, что такое смещение нельзя скомпенсировать перемещением пьезодвигателя на 100 нм. Одним из возможных решений этой проблемы является создание пьезоструктур со встречными симметричными консолями одинаковой длины. Такие консоли из нитрида алюминия были описаны в работе [67]. Консоли одинаковой длины отгибались вверх на одинаковое расстояние, поэтому зазор между их концами сохранялся неизменным. Это позволило получить расстояние между электродами на концах консолей меньше чем смещение пьезодвигателя. Таким образом был создан МЭМС ключ с пьезоэлектрическим двигателем. Возможно, на тех же принципах можно создать туннельный акселерометр с пьезоэлектрическим биморфным двигателем обратной связи.

Наиболее распространенным способом создания МЭМС датчиков с туннельным зазором является кулоновский двигатель обратной связи.

Несколько групп исследователей работали над созданием МЭМС туннельных датчиков с кулоновским двигателем. Группа H.Dong et al. [68] создала датчик с кулоновским двигателем и игольчатым электродом. Инерциальная масса этого датчика представляет собой квадратную пластину со стороной равной 970 мкм, подвешенную за углы на четырёх мягких балках. Датчик состоит из двух частей, изготовленных отдельно, поэтому в процессе его изготовления присутствует микросборка. Размеры датчика близки к 1 мм.

Другой тип МЭМС туннельного акселерометра был создан группой J.H.Daniel [69] на основе структуры КНИ. Латеральный размер структуры датчика порядка 400 мкм. Авторам удалось исключить микросборку из процесса производства. Акселерометр изготовлен методом селективного травления, туннельный контакт

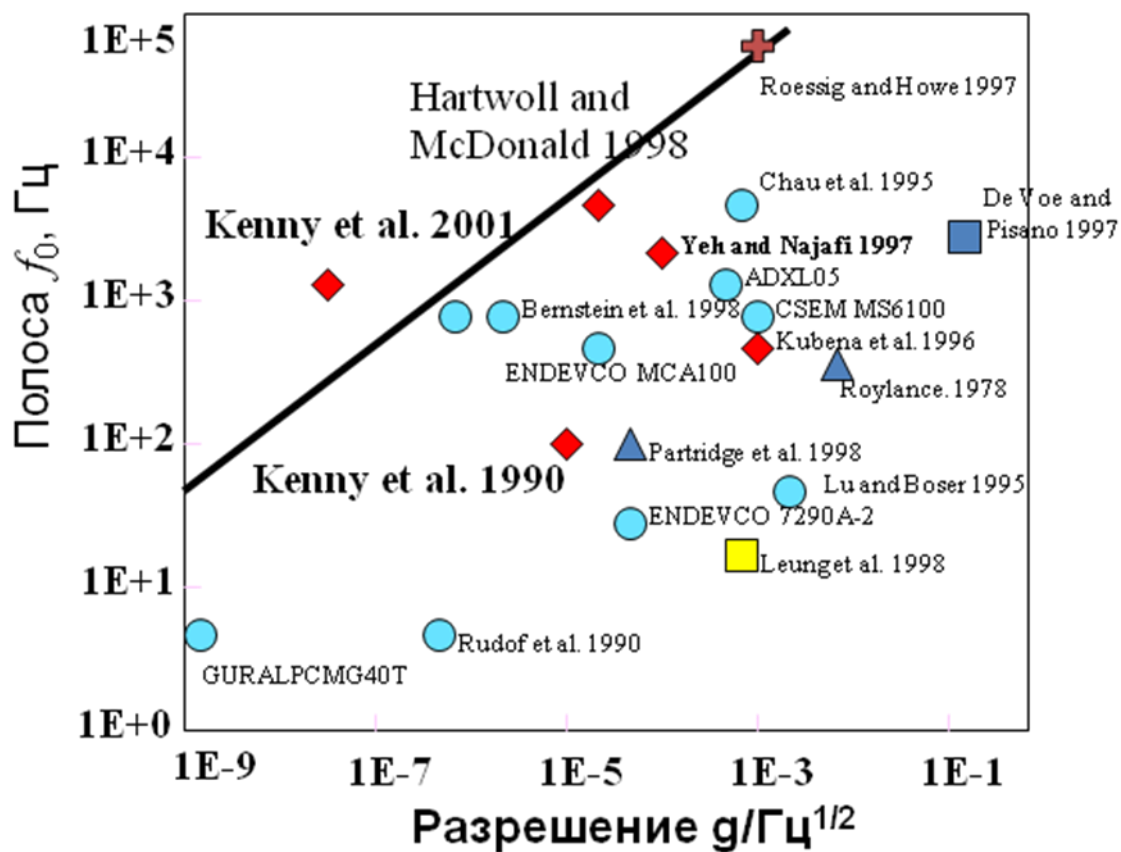


Рис. 1.2. Сравнение характеристик различных акселерометров по литературным данным. ● – емкостные, ■ – пьезоэлектрические, ▲ – пьезорезистивные  
 ■ – термальные, ⊕ – резонансные, ◆ – туннельные.



формируется путем разрезания кремниевой балки сфокусированным ионным пучком (FIB). Датчик, созданный группой Kenny et al. [6,70] путем монтажа из макроскопических кремниевых деталей, изготовленных методом травления, для применения в гидроакустике с характерными размерами инерциальной массы 7 мм, имел разрешение  $2 \cdot 10^{-8} g / \sqrt{Гц}$  на частоте 1500 Гц.

Различные типы акселерометров можно сравнить по положению на диаграмме рис. 2 [6]. По горизонтальной оси отложено разрешение датчика, измеряемое в  $g / \sqrt{Гц}$ , по вертикальной оси - резонансная частота низшей моды механического осциллятора в Гц.

Линия с наклоном 2 показывает, как будет меняться разрешение датчика при изменении его резонансной частоты в соответствии с формулой (1.4).

В обзорах по МЭМС [71,72] постоянно указывается, что актуальной задачей является создание дешевого, надежного и высокочувствительного акселерометра. Путём для решения этой задачи является микроминиатюризация датчика акселерометра, позволяющая интегрировать акселерометр в микросхему. Для этого необходимо перейти от монтажа к изготовлению микроэлектромеханических систем с помощью планарных технологий.

Таким образом, обзор современного состояния исследований в области МЭМС- структур показывает, что нерешенными остаются важные задачи управления пространственным положением элементов МЭМС с целью получения контролируемого нанометрового зазора между подвижными друг относительно друга электродами для создания высокочувствительного МЭМС сенсора. Настоящая работа посвящена исследованию физических принципов построения таких МЭМС и управления их положением с целью изучения возможности создания МЭМС туннельного акселерометра.

## Глава 2. Датчики туннельно-эмиссионных акселерометров

### 2.1. Введение

Экспоненциальная зависимость туннельного тока от расстояния между металлическими электродами может быть использована для измерений их малых взаимных перемещений. В последние годы появился ряд работ, использующих этот эффект для создания сверхчувствительных туннельных акселерометров [6,69,70,73-75]. Эти устройства имеют предел обнаружения до  $2 \cdot 10^{-8} \text{ г/Гц}^{1/2}$  на частотах менее 1 кГц. Основным фактором, ограничивающим чувствительность туннельных акселерометров, являются шумы фликкерного и термомеханического происхождения [7]. Принципиальной особенностью туннельных акселерометров является наличие петли обратной связи для управления двигателем, поддерживающим неизменным туннельный зазор. В обычных условиях характерное расстояние между туннельными контактами составляет 1 нм, ток – 1 нА при напряжениях порядка 1 В. Для регистрации модуляции тока относительно небольшой величины требуется предусилитель, расположенный вблизи туннельного промежутка для минимизации шумов и наводок. В принципе, нельзя исключить возможность изготовления системы с относительно более или менее подвижными туннельными контактами, сохраняющими достаточное время режим протекания туннельного тока без дополнительного устройства сближения/разведения контактов и системы обратной связи, хотя и в этом случае существуют проблемы с адсорбируемыми на контакты частицами, которые могут давать “лжесигнал” эквивалентный некоторому смещению контактов [76]. Можно ли сделать такие контакты сколько-нибудь подвижными друг относительно друга, сохранив при этом характер токопереноса, чувствительность и стабильность в обычных внешних условиях (акустические шумы, термодрейф из-за вариаций и градиентов температуры, изменение туннельной прозрачности из-за адсорбции на контакты и пр.) остаётся неясным. Представляется, что решение этой задачи возможно, но достаточно сложно с технической точки зрения.

В то же время существует ряд работ [77,78], где для измерения малых смещений в высокочувствительных датчиках давления используется ток

холодной эмиссии электронов, имеющий тоже достаточно сильную зависимость от расстояния между контактами. Таким образом, априори можно надеяться на возможность создания эмиссионного акселерометра с достаточно высокой чувствительностью. Характерные токи и расстояния между электродами в таком устройстве уже при напряжении  $\leq 100$  В могут оказаться существенно больше, чем в туннельных датчиках. Это позволило бы конструировать датчик, осуществляющий долговременное удержание электродов на заданном расстоянии без обратной связи, расширило бы динамический диапазон, а так же снизило бы требования к предусилителю и экранировке входной электрической цепи. Основной задачей исследований, представленных в первой главе диссертации, является проверка перечисленных предположений.

В данной главе приводятся теоретические расчёты оптимальной формы электродов эмиссионного акселерометра, обеспечивающих максимальную чувствительность к смещению. Предлагается способ реализации квазиплоской геометрии электродов путём сближения скрещенных гладких металлизированных цилиндров на расстояние много меньше их радиуса. Описывается конструкция акселерометра, разработанного и созданного таким способом. Исследуется разрешение данного датчика в зависимости от частоты в различных режимах протекания тока – туннельном и эмиссионном. Приводится экспериментальное доказательство возможности сохранения эмиссионного тока в датчике без обратной связи. Расстояние между электродами при этом оценивалось как 100 нм. Результаты опубликованы в работах [A1,A2,A5,A6,A12,A14,A15].

## **2.2. Обсуждение конструкции и оптимальной геометрии электродов эмиссионного акселерометра**

Плотность тока автоэлектронной эмиссии из металлического электрода при достаточно низких температурах определяется формулой Фаулера – Нордгейма [79]:

$$j(E) = A(E) \cdot E^2 \cdot \exp\left[-\frac{B(E) \cdot \varphi^{3/2}}{E}\right], \quad (2.1)$$

где

$$A(E) = e^3 \cdot \left[ 16 \cdot \pi^2 \cdot h \cdot \phi \cdot t^2 \left( \frac{\sqrt{e^3 \cdot E}}{\phi} \right) \right]^{-1}, \quad B(E) = \frac{4}{3} \cdot e \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot m}{h^2}} \cdot v^2 \left( \frac{\sqrt{e^3 \cdot E}}{\phi} \right),$$

$$v(y) \equiv \left\{ L \left[ \sqrt{\frac{1-y}{1+y}} \right] - y \cdot K \left[ \sqrt{\frac{1-y}{1+y}} \right] \right\} \cdot \sqrt{1+y},$$

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} (1 - k^2 \cdot \sin^2 \Theta)^{-1/2} d\Theta, \quad L(k) = \int_0^{\pi/2} (1 - k^2 \cdot \sin^2 \Theta)^{1/2} d\Theta - \text{эллиптические интегралы,}$$

$$t(y) \equiv v(y) - \frac{2}{3} \cdot y \cdot \frac{dv}{dy},$$

$E$  – электрическое поле на поверхности металлического электрода,  $\phi$  – работа выхода. Важнейшей характеристикой акселерометра является его чувствительность – отношение изменения тока  $I$  текущего между электродами к изменению расстояния  $l$  между ними:  $\frac{\Delta I}{\Delta l}$ . Для качественного анализа

зависимости изменения тока от малых изменений расстояния между электродами  $\Delta l \ll l$ , воспользуемся (2.1), где будем считать, что  $A$  не зависит от  $E$ , так как функция  $t \approx 1$  во всем диапазоне полей [79]. Тогда:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I}{\Delta l} &\approx \frac{dI}{dl} = \int \frac{dj}{dl} dS = \int j \cdot \left( \frac{1}{E^2} \cdot \frac{d(E^2)}{dl} - \phi^{3/2} \cdot \frac{d(B/E)}{dl} \right) dS = \\ &= - \int j \cdot \left( 2E + \frac{4e\phi^{3/2} \sqrt{2m}}{3h} s \left( \frac{\sqrt{e^3 E}}{\phi} \right) \right) \cdot \frac{d}{dl} \left( \frac{1}{E} \right) dS. \end{aligned}$$

Интеграл берется по площади поверхности катода. Здесь:

$$s(y) = v(y) - \frac{y}{2} \cdot \frac{dv}{dy}.$$

Функция  $s \approx 1$  во всем диапазоне полей [79]. При типичных значениях работы выхода составляющих единицы эВ, величина  $\frac{4e\phi^{3/2} \sqrt{2m}}{3h}$  – десятки В/нм, что много больше, чем  $2E$  (единицы В/нм), поэтому первым слагаемым в скобках можно пренебречь. Величина производной  $\frac{d}{dl} \left( \frac{1}{E} \right)$  слабо меняется вдоль поверхности катода по сравнению с  $j$ , поэтому, вынося ее из-под интеграла получаем:

$$\frac{\Delta I}{\Delta l} \approx -I \cdot \frac{4e\varphi^{3/2} \sqrt{2m}}{3h} \cdot \frac{d}{dl} \left( \frac{1}{E_{\max}} \right),$$

где  $E_{\max}$  – максимальное поле на катоде,  $E_{\max} = \frac{V}{f}$  и  $f$  – функция, определяемая формой и расположением электродов,  $V$  – напряжение между электродами. Подставив выражения приходим к оценке:

$$\frac{\Delta I}{\Delta l} \approx -I \cdot \frac{4e\varphi^{3/2} \sqrt{2m}}{3h} \cdot \frac{1}{V} \cdot \frac{df}{dl}. \quad (2.2)$$

Как видно из (2.2), чувствительность эмиссионного акселерометра пропорциональна эмиссионному току и зависит от геометрии системы. Для понимания того, как геометрия электродов влияет на чувствительность, рассмотрим два случая:

1) Электроды представляют собой неплоские металлические поверхности, имеющие в области протекания тока минимальный радиус кривизны  $r \ll l$ . В этом случае  $f(r,l)$  слабо зависит от  $l$ ,  $\frac{df}{dl} \rightarrow 0$  и чувствительность стремится к

нулю, когда  $\frac{r}{l} \rightarrow 0$ . Если поверхности электродов представляют собой два параллельных бесконечных цилиндра с радиусом  $r$ , находящиеся на расстоянии  $l$  друг от друга, или являются двухполостным гиперболоидом вращения с расстоянием между полостями  $l$  и радиусом закругления в вершинах полостей  $r$ , то в том и другом случае, (когда  $r \ll l$ ):  $f \propto r \cdot \ln \frac{r}{l}$  и

$$\frac{df}{dl} \propto r/l \rightarrow 0, \text{ при } \frac{r}{l} \rightarrow 0.$$

2) Электроды представляют собой поверхности с радиусом кривизны  $r \gg l$ . Тогда  $f(r,l) \rightarrow l$ ,  $\frac{df}{dl} \rightarrow 1$ , когда  $\frac{r}{l} \rightarrow \infty$ . В предельном случае электродов в виде двух

бесконечных плоскостей ( $r \rightarrow \infty$ ):  $f = l$ ,  $\frac{df}{dl} = 1$ .

Таким образом, для обеспечения максимальной чувствительности эмиссионного акселерометра необходимо выполнение условия:  $r \gg l$ . То есть, в идеале электроды должны быть двумя параллельными плоскими площадками,

расположенными друг против друга на расстоянии много меньше их продольных размеров. Высоты шероховатостей электродов должны быть много меньше среднего расстояния  $l$ . Возможно, катод с такими шероховатостями может даже оказаться более эффективным и обеспечивающим большую плотность тока, чем идеально гладкий [79]. Выяснение этого вопроса требует дополнительных исследований.

Интересно сравнить чувствительности эмиссионного и туннельного акселерометра. Для малых напряжений зависимость туннельного тока от расстояния между электродами  $l$  наиболее сильная [80]:

$$I_t \propto \exp\left(-\frac{4\pi\sqrt{2m\bar{\varphi}}}{\hbar}l\right),$$

поэтому

$$\frac{\Delta I_t}{\Delta l} \approx -\frac{4\pi\sqrt{2m\bar{\varphi}}}{\hbar}I_t,$$

где  $\bar{\varphi}$  - средняя высота туннельного барьера с учётом потенциала сил изображений. То есть, чувствительность туннельного акселерометра пропорциональна туннельному току. Для характерных туннельных расстояний  $l \sim 1$  нм, коэффициент пропорциональности  $\frac{4\pi\sqrt{2m\bar{\varphi}}}{\hbar} \sim 10 \text{ нм}^{-1}$ .

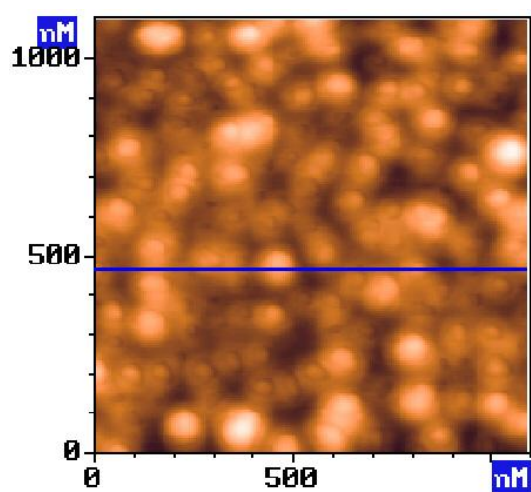
Чувствительность эмиссионного акселерометра, как видно из формулы (2.2), так же пропорциональна току. Коэффициент пропорциональности для плоской геометрии электродов ( $\frac{df}{dl} = 1$ ) и  $\varphi = 5$  эВ,  $V=100$  В примерно равен  $0,8 \text{ нм}^{-1}$ , что более чем на порядок меньше, чем в туннельном случае. Однако, эмиссионные токи могут быть значительно больше туннельных, как за счёт большей плотности тока, так и за счёт большей площади контакта. Это в конечном итоге может обеспечить большую чувствительность эмиссионных акселерометров по сравнению с туннельными.

### 2.3. Экспериментальные исследования эмиссионного акселерометра

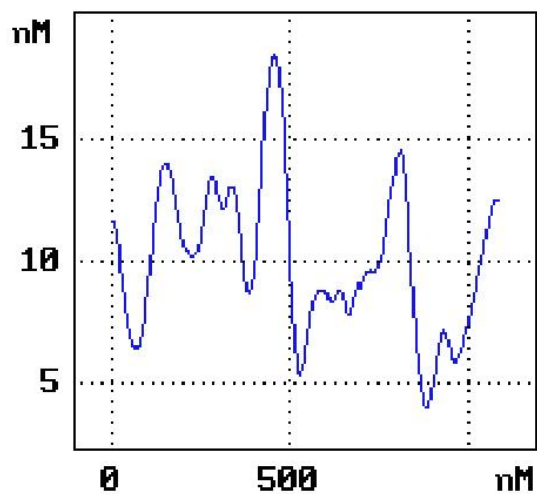
Исходя из вышеизложенных соображений, был разработан датчик с плоскопараллельной геометрией электродов. Реализовать геометрию, близкую к

геометрии плоского конденсатора, можно, если две гладкие поверхности приблизить друг к другу на расстояние много меньше радиуса их кривизны, но много больше характерного масштаба шероховатости. Для выполнения условия  $r \gg l$  в разработанном датчике в качестве электродов были выбраны покрытые пленкой золота оптические волокна из кварца. Золото было выбрано в качестве материала покрытия по причине его химической стойкости. Другие материалы контактов при работе на воздухе могут подвергаться окислению, что приводит к нестабильности в токе и к быстрому выходу устройства из рабочего режима. Форма волокон близка к идеальному цилиндру с радиусом  $r = 60$  мкм. Шероховатость поверхности металлизированных волокон была оценена с помощью атомно-силового микроскопа. Полученное в АСМ изображение поверхности волокна, покрытого золотом, показано на рис. 2.1. Видно, что поверхность гладкая. Оценка шероховатости дает величину около 3 нм.

Взаимное расположение электродов показано на рис. 2.2. Туннельный или эмиссионный контакт образуется в месте пересечения скрещенных цилиндрических электродов. Скрещенные электроды сближались до появления туннельного тока, то есть до расстояний порядка нескольких нм, что много меньше их радиуса. Таким образом в области скрещивания электродов с площадью  $S \sim r l$ , то есть в области протекания тока, электрическое поле близко к однородному. При изготовлении электродов использовались так же материалы с более низкой работой выхода, такие, как нитрид титана. При этом нитридом титана покрывался только катод, а анод покрывался золотом, чтобы избежать анодного окисления. Это позволяло получить датчик с меньшей работой выхода, устойчивый к деградации на воздухе. Схема устройства датчика с такими электродами показана на рис. 2.3. Металлизированные оптические волокна (1) приклеены к стеклянным основаниям (2) при помощи токопроводящего клея (3). Этим же клеем к ним приклеены провода, идущие на предварительный усилитель тока. Одно стеклянное основание приклеено к корпусу, а второе к мембране



а



б

Рис. 2.1. Изображение поверхности металлизированного оптического волокна полученное с помощью атомно-силового микроскопа - а), профиль высот вдоль линии на изображении - б).



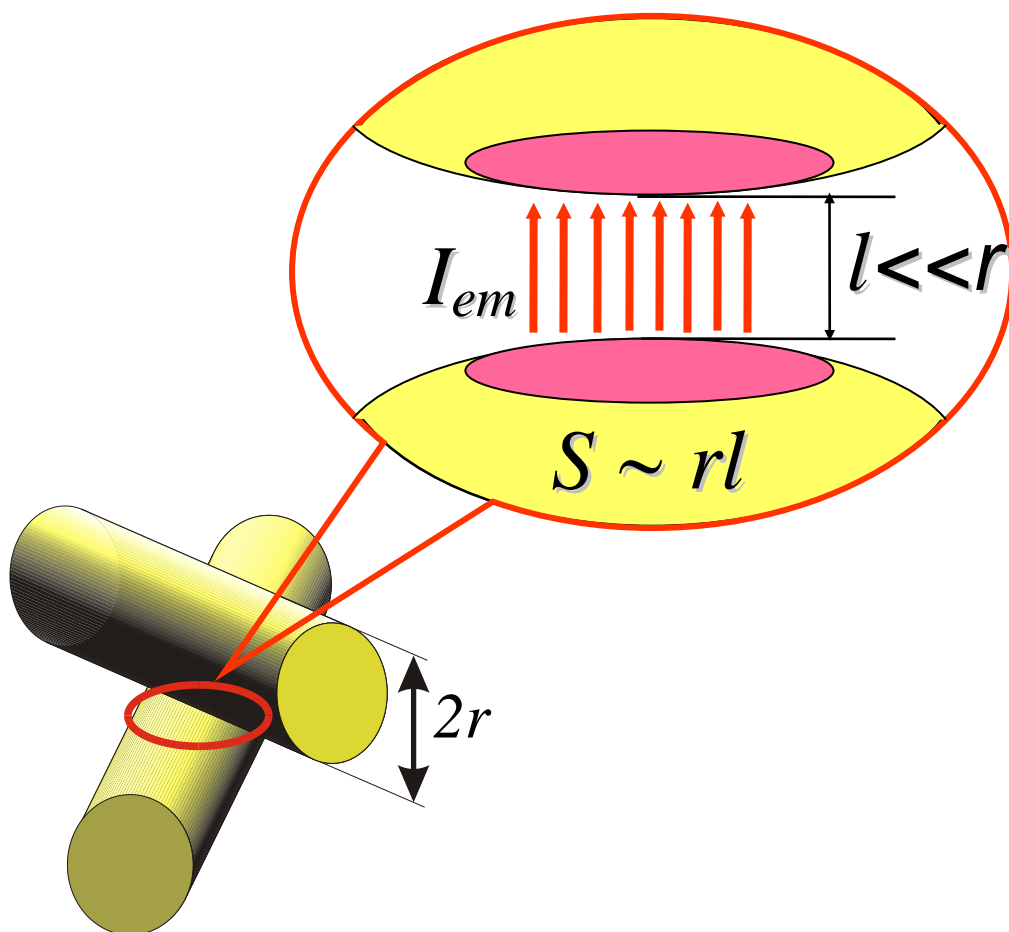
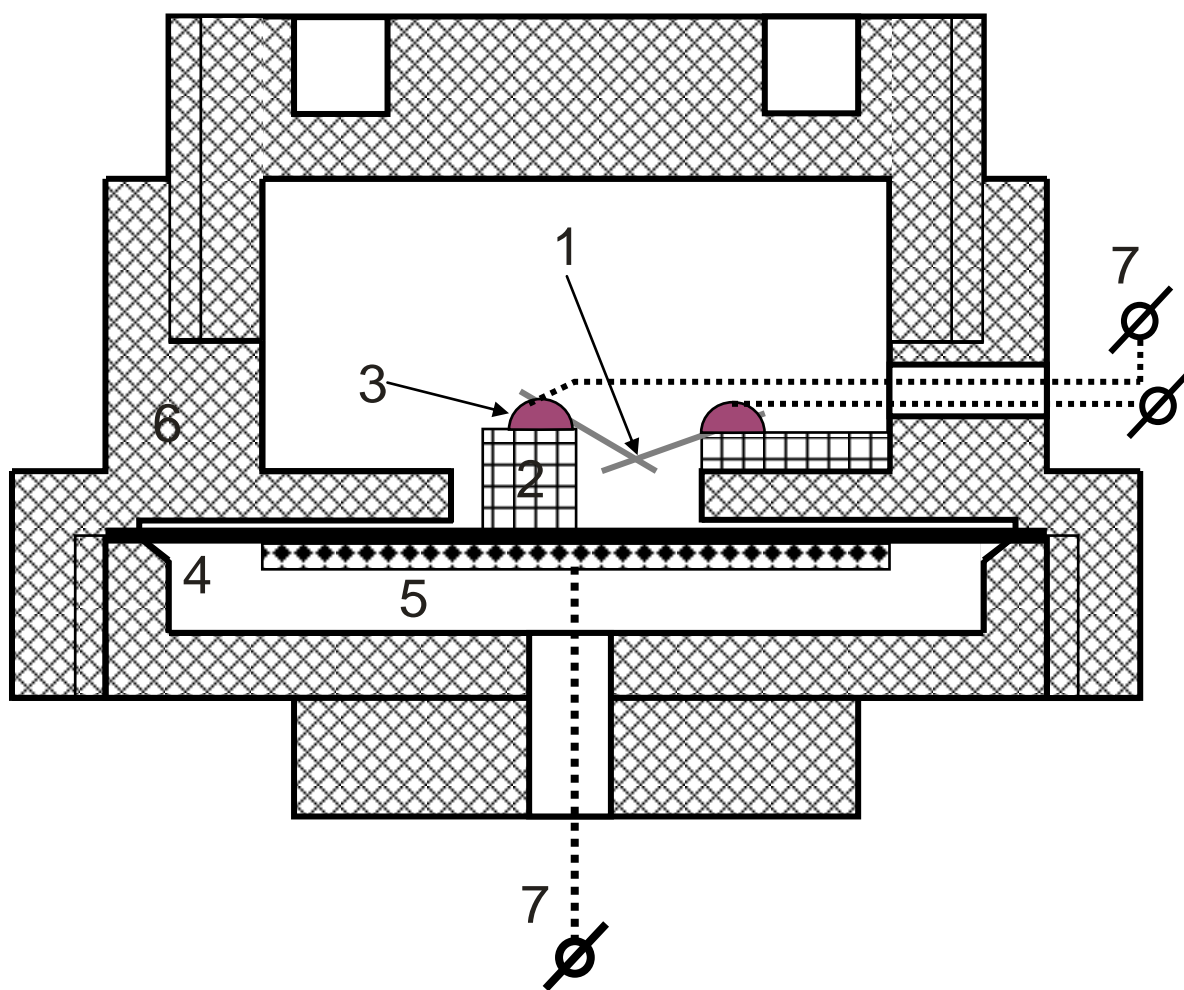


Рис. 2.2. Реализация квазиплоской геометрии токопереноса при помощи скрещенных цилиндрических электродов, расположенных на расстоянии много меньше их радиуса ( $l \ll r$ ).

пьезодвигателя (4). Пьезодвигатель состоит из медной мембраны (4) и пьезокерамики (5), на которую и подаётся управляющее напряжение.

Был изготовлен макет датчика. На рис. 2.4 представлена его фотография. Датчик может работать как в туннельном, так и в эмиссионном режиме токопереноса. Выбор режима определяется заданием тока и напряжения. Удержание осуществляется системой обратной связи по току при помощи биморфного пьезодвигателя. Для исследования свойств датчика в режиме холодной эмиссии он помещался в вакуум  $P=2 \cdot 10^{-4}$  Тор. Разрешающая способность измерялась с помощью калиброванного вибростенда. Методика измерения описана в Приложении 2. Зависимость разрешения от частоты для различных режимов приведена на рис. 2.5. Видно, что на частотах до 6 кГц датчик имеет разрешение порядка  $10^{-4}$  г/Гц<sup>1/2</sup> в туннельном режиме (напряжение смещения  $V = 0,1$  В) и порядка  $10^{-3}$  г/Гц<sup>1/2</sup> в эмиссионных режимах (напряжение смещения  $V = 100$  В). Понижение разрешения датчика во всех режимах на частоте около 3,5 кГц связано с резонансными свойствами пьезодвигателя датчика. Для обеспечения механического коэффициента связи близкого к единице корпус датчика приклеивался к вибростенду. Вышеприведенные значения разрешения являются характеристикой системы датчик плюс измерительная система. Измерения чувствительности и уровня шумов производились при помощи спектроанализатора (Bruel&Kjer, type 2033) без дополнительного малошумящего усилителя. Шум спектроанализатора определял разрешение в режиме малых туннельных токов. В режиме больших токов ( $\sim 100$  нА) шум рос при увеличении тока, следовательно шум собственно датчика был выше шума спектроанализатора. Спектр шума на экране спектроанализатора имел фликкерный характер вплоть до 10 кГц. При работе датчика в эмиссионном режиме, расстояние между электродами оказывается существенно больше, чем в туннельных режимах. Можно ожидать, что рабочий режим акселерометра может долго сохраняться при не очень сильных вибрациях. Для проверки этой гипотезы в одном эксперименте обратная связь была отключена. Электроды сближались в ручном режиме путём подачи постоянного напряжения на пьезодвигатель до возникновения эмиссионного тока. Оказалось, что заданный таким образом









- 1 — — - металлизированные оптические волокна
- 2  - стекло
- 3  - токопроводящий клей
- 4  - медная подвижная мембрана
- 5  - пьезокерамика
- 6  - латунный корпус
- 7  - электрические выводы

Рис. 2.3. Конструкция туннельно-эмиссионного датчика.



Рис. 2.4. Внешний вид туннельно-эмиссионного датчика.

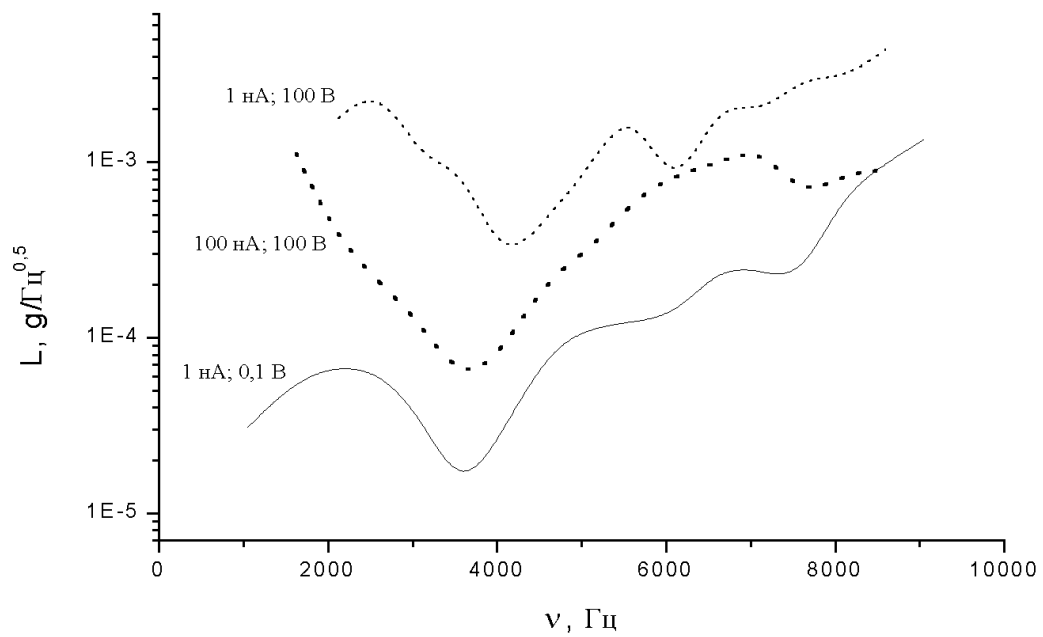


Рис. 2.5. Зависимость разрешения акселерометра от частоты для различных режимов работы.

рабочий ток может сохраняться по крайней мере в течение десятков минут, без специальных мер вибро- и шумоизоляции и термостатов, несмотря на то, что данная конструкция датчика не была оптимизирована для работы без обратной связи. На рис. 2.6. показаны вольтамперные характеристики датчика без обратной связи при двух разных расстояниях между электродами ( $l_1$  и  $l_2$ ). Видно, что данные ВАХ хорошо совпадают с теоретическими зависимостями Фаулера-Нордгейма, что свидетельствует об эмиссионном характере тока. Разницу в расстояниях  $\Delta l = l_2 - l_1$  можно измерить по разнице напряжений на пьезодвигателе (для прямых на рис. 2.6  $\Delta l = 14$  нм). Используя соотношение [79]:

$$\frac{d[\ln(j/E^2)]}{d[E^{-1}]} \approx -0,683 \cdot \phi^{3/2},$$

(в нем плотность тока подставляется в А/см<sup>2</sup>, поле в В/ангстрем, работа выхода – в эВ) и считая, что  $j = \frac{I}{S}$ ;  $S \approx \pi \cdot r \cdot l$ ;  $E \approx \frac{V}{l}$ , где  $r$  – радиус волокон, получим:

$$\frac{d[\ln(I/V^2)]}{d[V^{-1}]} \cdot \ln\left(\frac{l}{0,06}\right) \cdot \frac{1}{l} = K \cdot \ln\left(\frac{l}{0,06}\right) \cdot \frac{1}{l} = -0,06 \cdot \phi^{3/2}.$$

Здесь  $K$  – наклон прямых Фаулера Нордгейма на рис. 2.6.,  $l$  – в ангстремах,  $I$  – в наноамперах,  $V$  – в вольтах. Решив систему уравнений:

$$K_1 \cdot \ln\left(\frac{l_1}{0,06}\right) \cdot \frac{1}{l_1} = -0,06 \cdot \phi^{3/2}$$

$$K_2 \cdot \ln\left(\frac{l_2}{0,06}\right) \cdot \frac{1}{l_2} = -0,06 \cdot \phi^{3/2}$$

$$l_2 - l_1 = 140$$

получим и работу выхода и оценку расстояний между электродами:  $\phi = 4$  эВ,  $l_1 = 93$  нм,  $l_2 = 107$  нм.

Таким образом можно сделать вывод, что зазор порядка 100 нм между подвижными электродами в системе с характерным размером в несколько миллиметров может сохраняться без обратной связи неограниченно долго. Наличие термодрейфов и тепловых градиентов не приводит к выходу из рабочего режима. Значит можно предположить, что при уменьшении размеров датчика в

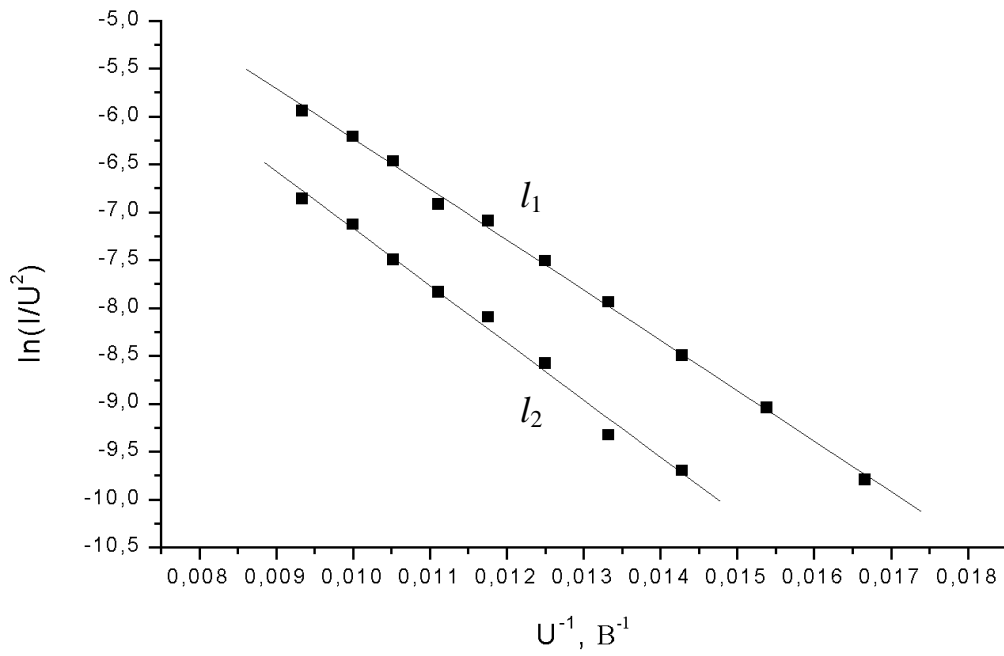


Рис. 2.6. ВАХ акселерометра с отключенной обратной связью при двух разных расстояниях между электродами  $l_1$  и  $l_2$ .

100 раз столь же устойчиво будет существовать нанометровый зазор между электродами, необходимый для протекания туннельного тока. При этом размеры системы электродов должны составлять десятки микрометров, что делает невозможным их создание обычными методами монтажа. Для этого необходимо использовать планарные технологии МЭМС.

## 2.4 Выводы

Показано, что для обеспечения максимальной чувствительности акселерометра при работе в режиме эмиссионного тока, следует отказаться от традиционной для эмиссионных устройств геометрии с игольчатыми катодами и использовать плоские электроды.

Получен патент РФ на эмиссионный датчик физических величин с плоскими электродами.

Предложен способ реализации системы квазиплоских электродов на основе скрещенных оптических волокон, покрытых золотом, расположенных друг от друга на расстоянии много меньше их радиуса.

Изготовлен макет туннельно-эмиссионного датчика с разрешением менее  $10^{-4} g/\sqrt{Гц}$  в туннельном режиме и менее  $10^{-3} g/\sqrt{Гц}$  в эмиссионном режиме в диапазоне частот до 6 кГц. Данная конструкция может быть усовершенствована и использована в системе с обратной связью для различных специальных применений, например, для применения в гидроакустике.

Показано, что при работе датчика в эмиссионном режиме при напряжениях смещения около 100 В через контакты могут протекать токи  $\sim 100$  нА. Характерные расстояния между контактами при этом  $\sim 100$  нм. Такой рабочий режим без особых мер предосторожности сохраняется в лабораторных условиях достаточно долгое время (десятки минут) при разомкнутой петле обратной связи, обеспечивающей поддержание постоянного расстояния между контактами и тока. В случае микроминиатюризации подобной системы появляется принципиальная возможность изготовления дешевого и надежного датчика акселерометра.



## **Глава 3. Изготовление и исследование микроконсолей для применений в МЭМС датчиках физических величин**

### **3.1. Введение**

Начало нового века ознаменовалось бурным развитием нового направления микроэлектромеханических систем, объединивших множество технических областей: от микроинструмента до микромашин. Важное место в МЭМС занимают интегральные датчики первичной информации. Наиболее ответственным узлом интегральных датчиков является чувствительный элемент. Микрогабаритные консоли (микроконсоли, cantilever, microbeam) являются основными конструктивными элементами, целого ряда микроэлектромеханических сенсоров. Микроконсоли изготавливаются, как правило, при помощи планарной технологии и селективного травления [81]. Однако, одной только планарной технологии часто бывает недостаточно для получения необходимой трехмерной структуры. В ряде случаев необходимо изменить пространственное положение микрообъекта, например, сблизить консоль и подложку. Для решения этой задачи используются, так называемые, самопозиционирующиеся системы [82]. Они реализуются при изготовлении микроконсолей из напряженных пленок с последующим травлением и высвобождением пленки, которая приобретает после этого новое равновесное положение. Основные принципы этого подхода можно использовать для получения технологии управляемого изгиба микрообъектов. Часто целесообразно использовать консоли, сформированные из изначально ненапряженных материалов. На верхнюю сторону сформированной микроконсоли можно напылять различные металлы. Используя различие упругих напряжений, можно отгибать консоль в заранее выбранную сторону. Кроме того, можно надеяться, что изгиб консоли будет обратимым. То есть, последующее напыление сможет скорректировать изгиб или даже изменить его на противоположный предыдущему. Данная глава посвящена экспериментальной проверке этой гипотезы. В ней приводятся результаты экспериментов по изготовлению микроконсолей из арсенида галлия и окиси тантала. Механические свойства этих консолей – резонансная частота и статическая жёсткость исследуются с помощью

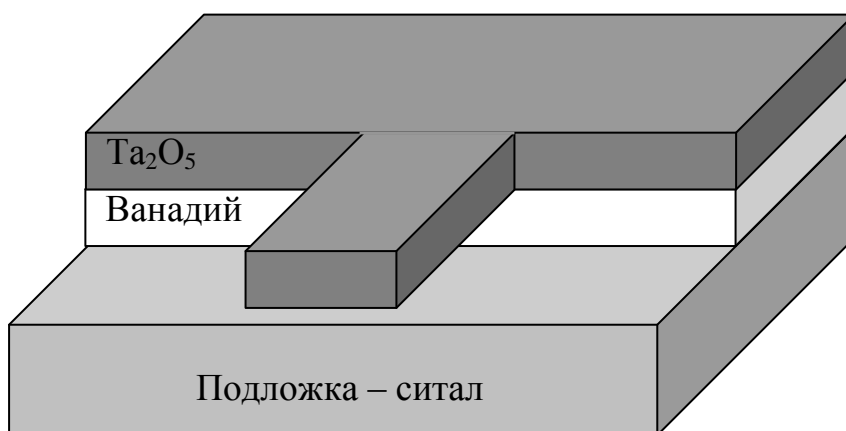
атомно-силового микроскопа. Приводятся результаты экспериментов по управлению их изгибом путем напыления на неё тонких слоёв тантала, хрома и никеля. Так же описывается эксперимент по управлению изгибом биморфной микроконсоли путём изменения её температуры. Так же описываются эксперименты по созданию и исследованию МЭМС кулоновского двигателя. МЭМС, созданная на подложке арсенида галлия, представляет собой подвижную золотую мембрану толщиной 1,5 мкм размером 100x100 мкм с электростатическим управлением. Исследуются статистические электрофизические и резонансные колебательные свойства данной системы. Произведена оценка возможности использования его в качестве емкостного акселерометра, кулоновского двигателя и варактора. Результаты исследований опубликованы в работах [A3-A5,A11,A13-A15].

### **3.2. Изготовление микроконсолей на основе материалов с различным кристаллическим совершенством**

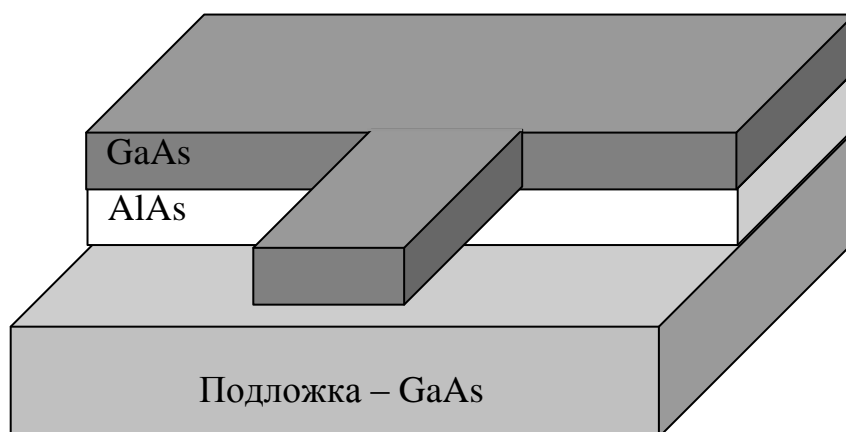
В качестве аморфного материала для изготовления консоли I типа была использована окись тантала  $Ta_2O_5$ . Последовательность операций состояла в следующем. Сначала на ситалловую подложку методом магнетронного распыления был нанесен слой ванадия толщиной 400 нм. Поверх него был нанесен слой  $Ta_2O_5$  толщиной 200 нм, на котором методом взрывной фотолитографии формировался рисунок консоли. Слой  $Ta_2O_5$  наносился методом реактивного магнетронного распыления в смеси аргона с кислородом. После формирования рисунка на слое  $Ta_2O_5$  производилось травление ванадия в растворе перекиси водорода. Способ критической сушки микроконсолей после травления подробно описан в приложении 1.

Для изготовления микроконсоли II типа из кристаллического материала использовалась технология эпитаксии гетероструктур на основе GaAs. На подложку GaAs методом металлоорганической газофазной эпитаксии был нанесен слой AlAs толщиной 150 нм и слой GaAs толщиной 1,3 мкм, на котором методом фотолитографии и травления формировалась мезоструктура будущей консоли. После этого производилось селективное вытравливание слоя AlAs в растворе HF из-под консоли.

На рис. 3.1 показано схематическое изображение микроконсоли. Это ожидаемый вид микроструктуры, которая должна получиться в том случае, если в слое  $Ta_2O_5$  или GaAs нет упругих напряжений. На рис. 3.2 приведено изображение микроконсоли из  $Ta_2O_5$ , полученное с помощью отраженных электронов в электронном микроскопе LEO EVO 40. Поскольку микроконсоль и подложка являются диэлектриками, наблюдение равновесной формы такого объекта в электронном микроскопе представляет определенную сложность, связанную с накоплением полем обзора электрического заряда, возникающего в результате сканирования электронным пучком. Для уменьшения этого эффекта используются различные способы [83]: напыление на объект тонких проводящих пленок, что наиболее эффективно предотвращает эффекты зарядки, получение изображения при пониженном ускоряющем напряжении или в низком вакууме, что способствует стеканию заряда. В данном случае напыление проводящей пленки не проводили. Приведенные на рис. 3.2 микрофотографии микроконсоли I типа получены без какой-либо предварительной ее подготовки с применением режима снижения уровня вакуума при ускоряющем напряжении 20 кВ. Как видно из приведенных микрофотографий, полностью избавиться от электростатических эффектов при получении изображения не удалось. Под действием электронного пучка массивная подложка и тонкая консоль приобретают различный по знаку заряд. Чем больше доза облучения электронами, тем больше величина заряда, и соответственно сила взаимного притяжения микроконсоли и подложки. Поэтому видимая в электронном микроскопе форма консоли зависит от скорости сканирования зондом при получении изображения, для чего следует сравнить рис. 3.2а и рис. 3.2б. При медленном сканировании консоль сильно прижата к подложке, а при максимальной скорости сканирования консоль лишь слегка касается подложки свободным концом. Исходя из этого, можно предположить, что равновесное положение консоли близко к идеальному, изображенному на рис. 3.1, то есть она прижата к подложке не более, чем это видно из рис. 3.2б.

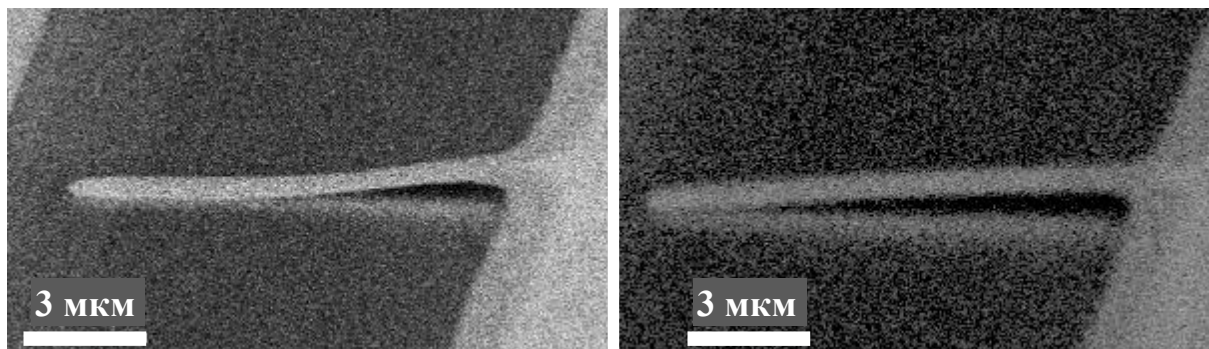


а



б

Рис. 3.1. Вид микроструктуры с ненапряженным слоем микроконсоли а) - I типа на основе  $Ta_2O_5$ , б) - II типа на основе GaAs,



а

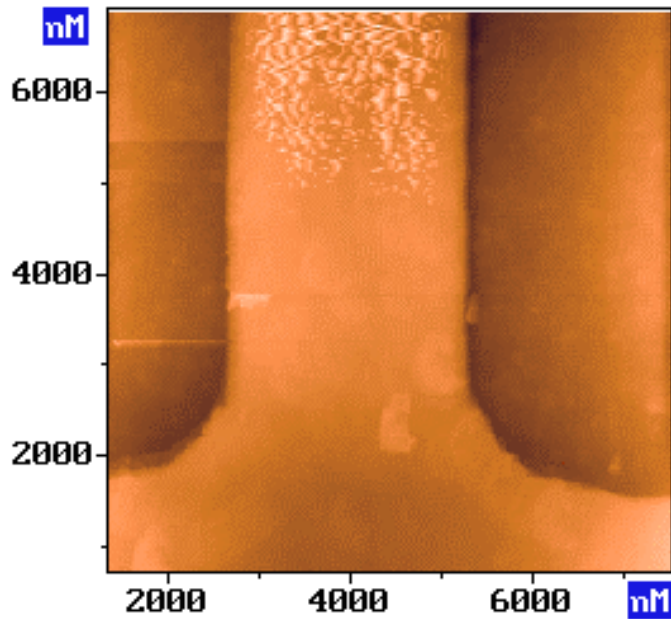
б

Рис.3.2. Вид микроконсоли  $Ta_2O_5$  при разных скоростях сканирования электронного пучка: а) – медленная скорость, б) – быстрая скорость.

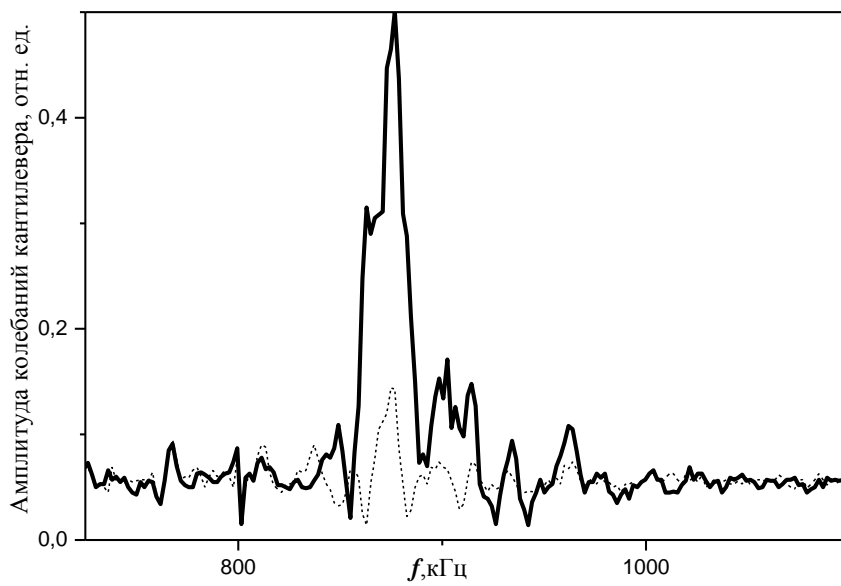
### 3.3. Изучение механических свойств микроконсолей с помощью атомно-силового микроскопа

Для измерения резонансной частоты микроконсоли зонд кантилевера АСМ в полуконтактном режиме позиционировался на поверхность микроконсоли вблизи основания, а также на поверхность основания в нескольких микрометрах от края. На рис. 3.3а. приведено изображение основания микроконсоли, полученное в АСМ. В обоих случаях, без изменения положения зонда, режим удержания над поверхностью изменялся на контактный. После этого на пьезокерамическую пластину в держателе кантилевера подавался возбуждающий сигнал с цифрового синтезатора, под действием которого она вибрировала и заставляла вибрировать кантилевер, находящийся в контакте с поверхностью. Производилось сканирование возбуждающего сигнала по частоте. Переменная составляющая сигнала с четырехсекционного фотодиода в АСМ, обусловленная колебаниями кантилевера, усиливалась и попадала на вход синхронного детектора, который формировал измеряемый сигнал, пропорциональный амплитуде колебаний. В том случае, когда зонд находился в контакте с поверхностью микроконсоли, колебания кантилевера передавались ей. Меняя частоту этих колебаний, фиксировали резонансную частоту микроконсоли. Для сравнения, та же процедура проделывалась на неподвижном участке поверхности – на основании вдали от его края, чтобы отличить резонанс микроконсоли от других возможных резонансов механической системы. Полученные данные приведены на рис. 3.3б. Сплошной линией показана амплитудо-частотная характеристика (АЧХ) кантилевера на микроконсоли, прерывистой линией – на основании. Из рисунка видно, что основной резонанс микроконсоли из  $Ta_2O_5$  наблюдается вблизи частоты  $f_0 = 876975$  Гц. Присутствие некоторой особенности на той же частоте в случае, когда зонд находится в контакте с основанием, можно объяснить существованием слабой акустической связи между прижатым к основанию зондом и микроконсолью, так как в этом случае расстояние от точки контакта до начала микроконсоли составляло всего несколько микрометров.

Поскольку микроконсоль имеет форму балки с прямоугольным поперечным сечением, то используя формулу для нижней резонансной частоты такой консоли [84]:



а



б

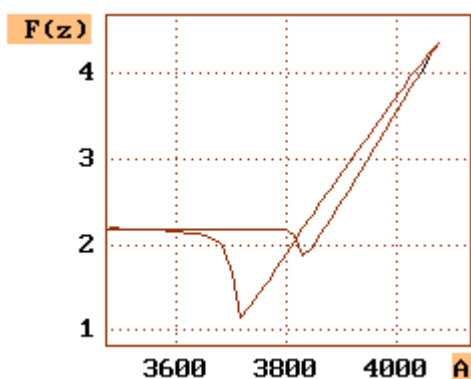
Рис. 3.3. АСМ-изображение консоли – а), амплитудно-частотная характеристика колебаний кантилевера – б), прижатого к микроконсоли  $Ta_2O_5$  – сплошная линия, и прижатого к поверхности основания – прерывистая линия.

$$f_0 = \frac{0,88h}{\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho}} \quad (3.1)$$

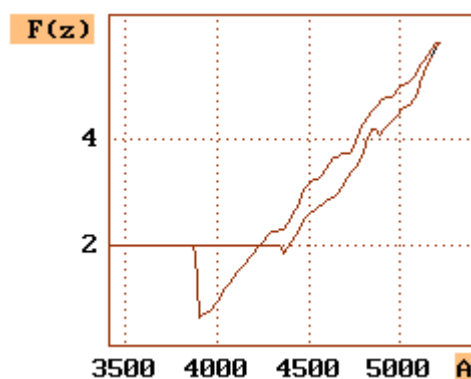
где  $h = 200$  нм – толщина консоли,  $l = 12$  мкм – длина консоли,  $\rho = 8,35 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – плотность Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,  $E$  – модуль Юнга и подставляя в нее измеренное значение резонансной частоты, получим для модуля Юнга Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> значение  $E = 127,3$  ГПа, что близко к справочным данным для этого материала [8]. Резонансная частота микроконсоли из GaAs была так же измерена и составляла  $f_0 = 818580$  Гц, что так же близко к расчетному значению (800 кГц), вычисленному исходя из справочных данных [8].

Для измерения жесткости микроконсоли из Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> зонд в полуконтактном режиме позиционировался последовательно в трех точках поверхности микроконсоли на разных расстояниях от ее начала, а также на поверхность основания в нескольких микрометрах от края. После позиционирования в каждую из точек, режим удержания над поверхностью изменялся на контактный. Затем, отключалась обратная связь, и сканер АСМ перемещал образец, удаляя его от зонда. При этом изгиб кантилевера менялся, отраженный от кантилевера луч лазера, попадающий на четырехсекционный фотодиод, смещался и менялся усиленный разностный сигнал фотодиода. Этот сигнал регистрировался и позволял определять угловое отклонение кантилевера, пропорциональное действующей на него силе изгиба. На рис. 3.4 показаны зависимости силы изгиба кантилевера (в относительных единицах) от величины смещения сканера для разных положений зонда: а) – зонд на подложке, б) – зонд на микроконсоли на расстоянии 4,7 мкм от основания, в) зонд на микроконсоли на расстоянии 6,7 мкм от основания, г) – зонд на микроконсоли на расстоянии 8,7 мкм от основания. Величина смещения сканера отсчитывалась от максимально удаленного от поверхности положения зонда. Горизонтальные участки на графиках соответствуют ситуации отсутствия касания зонда к поверхности образца. При дальнейшем движении сканера АСМ зонд входит в контакт с поверхностью и кантилевер начинает гнуться. Две ветки, на графике соответствуют прямому и обратному движению сканера. Проседание сигнала ниже уровня, соответствующего отсутствию контакта зонда с поверхностью, которое видно на ветке обратного хода сканера, может быть вызвано залипанием зонда на

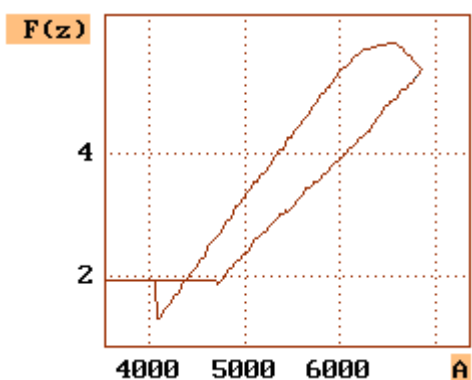




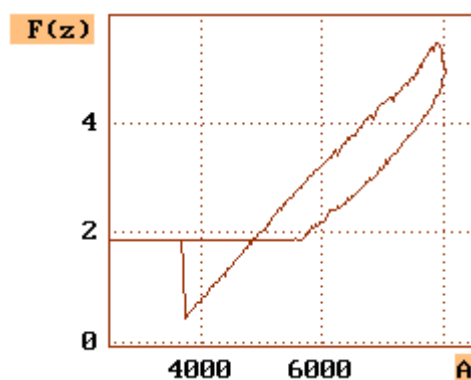
а



б



в



г

Рис. 3.4. Зависимости силы, действующей на кантилевер (в относительных единицах), от смещения сканера вдоль оси  $z$  в разных точках микроконсоли: а) – зонд на подложке, б) – зонд на микроконсоли на расстоянии 4,7 мкм от основания, в) зонд на микроконсоли на расстоянии 6,7 мкм от основания, г) – зонд на микроконсоли на расстоянии 8,7 мкм от основания.

поверхности. Залипание может быть вызвано силами Ван-дер-Ваальса, электростатическими или капиллярными силами [85]. Измеряя наклон участков изгиба, показанных на рис. 3(б) – 3(г) мы получаем жесткость системы микроконсоль плюс кантилевер  $k$  в относительных единицах. Жесткость микроконсоли  $k_m$  можно вычислить через измеренную жесткость системы микроконсоль плюс кантилевер  $k$  и жесткость кантилевера  $k_c$ , используя формулу для жесткости последовательно соединенных пружин:

$$k_m = \left( \frac{1}{k} - \frac{1}{k_c} \right)^{-1} \quad (3.2)$$

Используя жесткость кантилевера в относительных единицах и зная реальную жесткость кантилевера, можно перевести относительные единицы в размерные (Н/м). По данным производителя кантилеверов (NT-MDT, г. Зеленоград) его жесткость может составлять от 20 до 90 Н/м. На рис. 3.5 представлены значения  $k_m$  вычисленные для случая  $k_c = 20$  Н/м – квадратные метки и  $k_c = 90$  Н/м – треугольные метки, при трех различных расстояниях от точки касания зонда до начала микроконсоли. Зависимость жесткости микроконсоли от длины выражается формулой [84]:

$$k_m = \frac{E h^3 d}{l^3}, \quad (3.3)$$

где  $d = 2$  мкм – ширина консоли. Рассчитанная по этой формуле зависимость показана на рис. 3.5 сплошной линией. Модуль Юнга  $\text{Ta}_2\text{O}_5$   $E=127,3$  ГПа в этом расчете взят из результатов резонансных измерений. Наилучшее совпадение вычисленной из данных измерений жесткости  $k_m$  с этой линией получается для жесткости кантилевера  $k_c = 30,4$  Н/м – круглые метки на рис. 3.4, что попадает в диапазон значений, заявленный производителем. Таким образом, данные резонансных измерений совместно с измерением жесткости микроконсоли простой формы с известными размерами, позволяет также с хорошей точностью определить жесткость кантилевера. Точное знание жесткости кантилевера бывает необходимо для измерений жесткости подвижных элементов МЭМС со сложной геометрией системы подвеса.

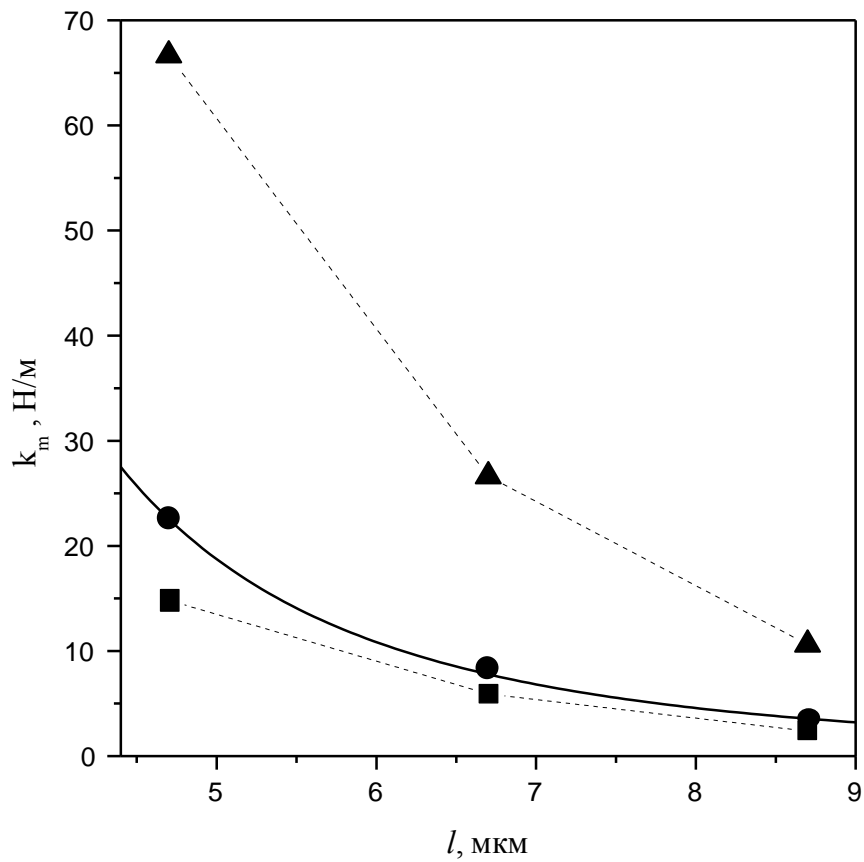
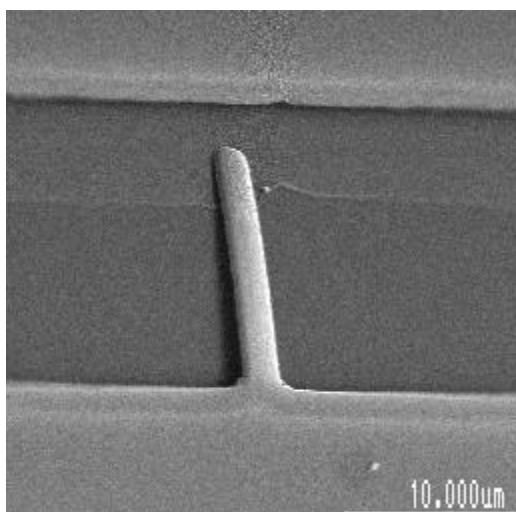


Рис. 3.5. Значения жесткости микроконсоли  $Ta_2O_5$   $k_m$ , вычисленные для значений  $k_c$  20 Н/м (квадраты), 90 Н/м (треугольники) и 30,4 Н/м (кружки), при трех различных расстояниях от точки касания зонда до основания микроконсоли. Сплошная линия – зависимость, рассчитанная по формуле (3.3).

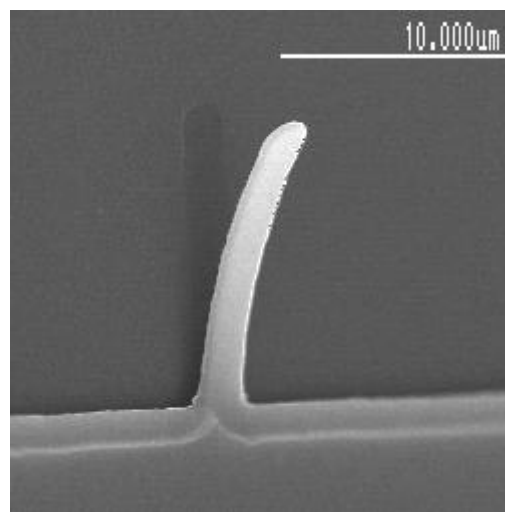
### 3.4. Обращение изгиба микроконсоли при введении дополнительных упруго-напряженных слоёв

Важно иметь возможность варьировать кривизну и направление изгиба микроконсоли. Это достигается напылением дополнительных слоёв, вносящих упругие напряжения. С целью получения изгиба по направлению к подложке на консоль из  $Ta_2O_5$  методом магнетронного напыления был нанесен слой тантала толщиной 30 нм. Толщина этой металлической пленки значительно превышает необходимую толщину проводящего слоя (обычно 5-7 нм), который наносят на непроводящие объекты для предотвращения электростатических эффектов зарядки при электронно-микроскопических исследованиях. Изображение системы, полученное в электронном микроскопе с помощью вторичных электронов, приведено на рис. 3.6а. В данном случае консоль отогнута в сторону подложки и касается ее свободным концом не за счет электростатических сил, а за счет упругих напряжений, возникающих в биморфной системе Ta/ $Ta_2O_5$ . Нанесением материала с другими упругими напряжениями можно поменять направление изгиба консоли. Для проверки этого поверх слоя тантала был нанесен слой хрома толщиной 30 нм. Изображение этой трехслойной структуры, полученное в сканирующем электронном микроскопе, показано на рис. 3.6б. Хорошо видно, что микроконсоль сильно отогнута вверх от подложки. Расстояние между свободным концом консоли и подложкой составляет более 8 мкм. Далее можно опять вернуть микроконсоль в исходное, как на рис. 3.6а, положение. Для этого поверх слоя хрома был нанесен слой тантала толщиной 100 нм. Микрофотография полученной в результате структуры показана на рис. 3.6в. Видно, что консоль вернулась в положение, в котором она была после нанесения первого слоя тантала (рис. 3.6а). Варьируя толщину наносимого слоя, легко управлять и радиусом изгиба. На рис. 3.6г приведена микрофотография консоли с одиночным слоем никеля толщиной 20 нм. В этом случае консоль лишь слегка отогнута вверх, что свидетельствует о небольших упругих напряжениях в этом случае.

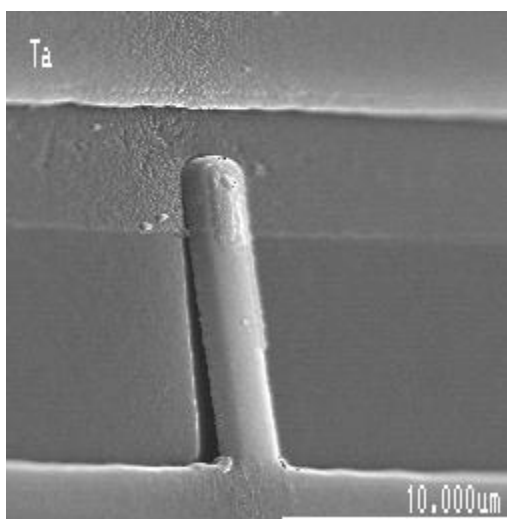
Аналогичная процедура была проделана для микроконсоли из арсенида галлия. На рис. 3.6 показано изображение этой консоли, полученное в электронном микроскопе после последовательного напыления на нее различных



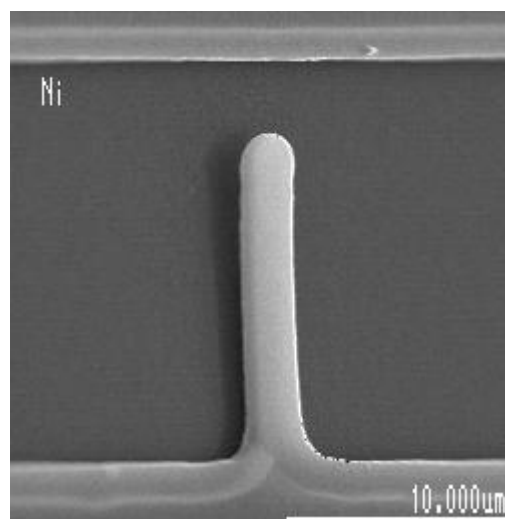
а



б

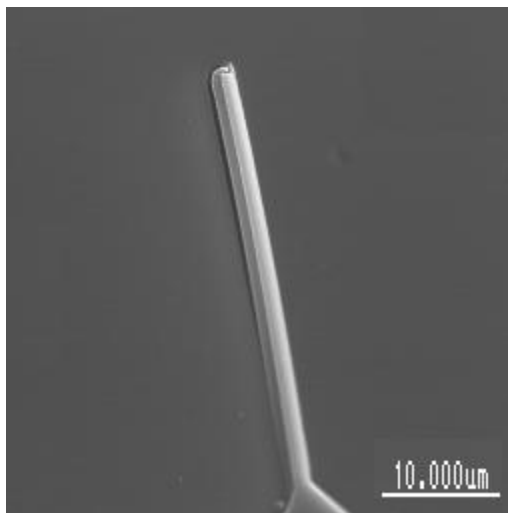


в



г

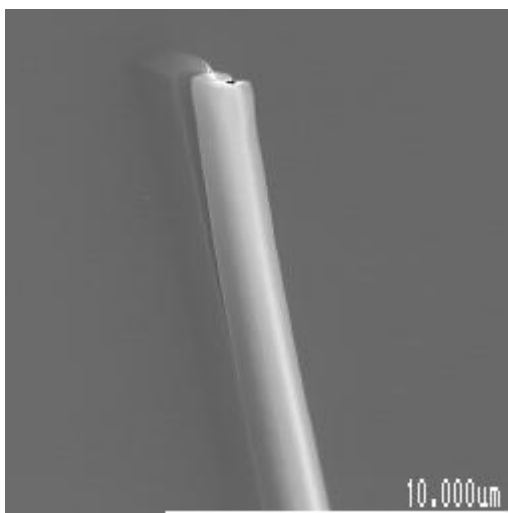
Рис. 3.6. Вид микроконсоли из  $Ta_2O_5$ : а) - после напыления 30 нм Ta, б) - после напыления 30 нм Cr дополнительно, в) - после напыления 100 нм Ta дополнительно, г) - после напыления 20 нм Ni.



а



б



в

Рис. 3.7. Вид микроконсоли GaAs: а) - после напыления 20 нм Ni, б) - после напыления 30 нм Cr дополнительно, в) -  $Ta_2O_5$  после напыления 100 нм Ta дополнительно.

металлических слоев. Сначала методом магнетронного напыления был нанесен слой никеля толщиной 5 нм, который, как видно из рис. 3.7а, не вызвал изгиба микроконсоли. Поверх этого слоя никеля был напылен слой хрома толщиной 30 нм. Результат показан на рис. 3.7б. Видно, что консоль сильно отогнута вверх, от подложки. Расстояние между свободным концом консоли и подложкой составляет более 10 мкм. Далее можно опять вернуть микроконсоль в исходное, как на рис. 3.7а положение. Для этого поверх слоя хрома был нанесен слой тантала толщиной 100 нм. Микрофотография полученной в результате структуры показана на рис. 3.7в. Видно, что консоль вернулась в положение, в котором она была после нанесения первого слоя никеля (рис. 3.7а).

Таким образом, экспериментальные результаты показывают, что путем напыления на микроконсоли тонких слоёв различных металлов можно менять пространственное положение консолей. Подбирая толщину металлических слоев, можно точно регулировать направление, кривизну изгиба консолей и расстояние между свободным концом консоли и подложкой. Таким образом, при достаточной точности задания толщины слоёв можно надеяться в перспективе получить зазор между металлическими электродами шириной менее ста нанометров. Через такой зазор может протекать ток холодной эмиссии, обладающий сильной зависимостью от расстояния между электродами. Получение такого контролируемого нанометрового зазора необходимо для создания МЭМС датчика смещения, на основе которого могут быть реализованы первичные датчики физических величин.

### **3.5. Изгиб микроконсолей при изменении температуры**

Измерения изгиба микроконсоли из  $Ta_2O_5$  при изменении окружающей температуры проводились для структуры, показанной на рис. 3.6г. Коэффициент теплового расширения никеля много больше, чем коэффициент теплового расширения окиси тантала, поэтому при нагревании микроконсоль должна отгибаться в сторону подложки. Для этого образец приклеивался к нагревателю и помещался в интерферометр МИИ-4М. Нагревание производилось до тех пор, пока микроконсоль не оказывалась параллельна подложке. Разница температур между комнатой и нагревателем регистрировалась с помощью термопары. Эта

разница составляла  $142^0$  С. Ожидаемую зависимость отклонения от длины за счет теплового изгиба  $z(x)$  данной биморфной консоли можно оценить, решая уравнение [86]:

$$\frac{d^2z}{dx^2} = 6 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \left( \frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K} \right) (T - T_0), \quad (3.4)$$

где  $K = 4 + 6n + 4n^2 + \varphi n^3 + (\varphi n)^{-1}$ ,  $\alpha_1, \alpha_2$  - коэффициенты теплового расширения,  $t_1, t_2$  - толщины слоев,  $n = t_1/t_2$ ,  $\varphi = E_1/E_2$  - отношение модулей Юнга. Решая это уравнение с граничными условиями в точке  $x=0, z=0, dz/dx=0$  получим зависимость:

$$z(x) = c \cdot x^2, \text{ где } c = 3 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \left( \frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K} \right) (T - T_0). \quad (3.5)$$

Подставляя значения  $t_1=20$  нм,  $t_2=200$  нм,  $T-T_0=142$  К,  $E_1=200$  ГПа,  $E_2=127,3$  ГПа,  $\alpha_1=13 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>,  $\alpha_2=0,8 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup> (1- Ni, 2 - Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), получим для  $x=l=12$  мкм,  $z=0,4$  мкм. Это значение совпадает с экспериментально наблюдаемым изгибом. Свободный конец микроконсоли отогнут приблизительно на 0,5 мкм относительно уровня основания, а в результате нагрева он отгибается обратно, до этого уровня. Повторение циклов нагрева и охлаждения приводит к воспроизводимым результатам.

### **3.6. Исследование электромеханических свойств МЭМС с электростатическим управлением**

Был исследован кулоновский двигатель-переменный конденсатор электростатическим управлением. Макет устройства был изготовлен на подложке i-GaAs. Сначала на ней методом магнетронного напыления и обратной фотолитографии был сформирован нижний электрод в форме копланарного волновода из слоёв титана и золота толщиной 0,5 мкм, затем в области под будущим верхним электродом осажден из моносилана диэлектрический слой SiO<sub>2</sub> толщиной 0,4 мкм. Затем был нанесён жертвенный слой фоторезиста толщиной 1,5 мкм. Далее в вакууме был напылен резистивный слой металла толщиной 0,1 мкм, в котором был фотолитографическим методом сформирован рисунок верхнего электрода с последующим гальваническим наращиванием слоя золота толщиной 1,5 мкм. После этого слой фоторезиста из под верхнего электрода был



вытравлен в кислородной плазме. Последовательность операций при формировании МЭМС структуры показана на рис. 3.8. На рис. 3.9 показано изображение этой структуры, полученное в оптической измерительной системе (интерферометр белого света) Talysurf CCI 2000. Линиями на рис. 3.9 показаны сечения, представленные на рис. 3.10 Вертикальное на рис. 3.10а и горизонтальное на рис. 3.10б. Видно, что в результате получена МЭМС, представляющая собой плоский конденсатор с подвижной верхней обкладкой, подвешенной на четырех балках. Зависимость положения верхней обкладки от напряжения между обкладками исследовалась при помощи интерферометра Talysurf CCI 2000 путём снятия (вертикальных по рис. 3.9) профилей при напряжениях до 20 В. На рис. 3.11 показаны профили верхней пластины при различных напряжениях. Так же была измерена CV-характеристика этого варактора на установке Keithley (mod.590 CV-Analyzer). CV-характеристики при изменении напряжения от 0 до 20 В и обратно для обеих полярностей представлены на рис. 3.12. Видно, что эти характеристики симметричны для разных полярностей напряжения и имеют гистерезис. Это свидетельствует о наличии обратимого залипания верхнего электрода, по-видимому, за счёт сил Ван-дер-Ваальса.

Зависимость смещения верхней обкладки от напряжения и CV характеристика приведены на рис. 3.13. В качестве точки измерения положения верхней обкладки выбрана верхняя точка, показанная стрелкой на рис. 3.11. Видно, что верхняя обкладка имеет три стабильных положения – верхнее, среднее и нижнее. Верхнее стабильное положение (группа профилей 1 на рис. 3.11.) соответствует нулевому напряжению, при котором пластина верхней обкладки выгнута вверх. Второе стабильное положение (группа профилей 2 на рис. 3.11.) соответствует напряжению около 10,5 В, при котором пластина выгнута вниз. Третье стабильное положение (группа профилей 3 на рис. 3.11.) соответствует напряжениям более 15 В, при которых пластина лежит на диэлектрике. Из рис. 3.13. видно, что при переходе от одного стабильного положения к другому высота измеряемой точки и ёмкость меняются скачкообразно. При этом ёмкость конденсатора перестраивается в 1,6 раза: с 0,744 пФ при нулевом напряжении до 1,19 пФ при 20 В. Смещение верхней обкладки до касания диэлектрического слоя

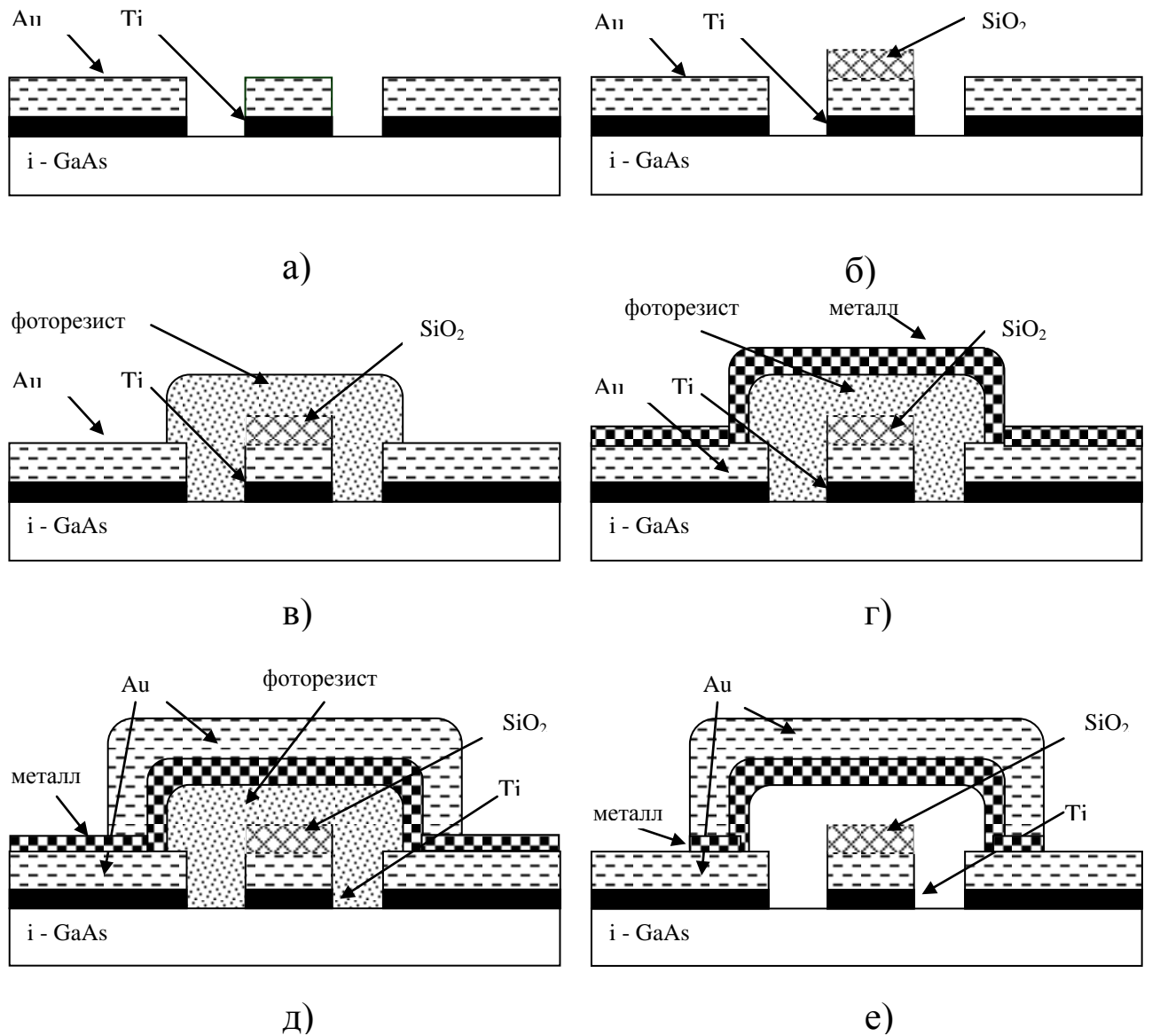


Рис. 3.8. Последовательность формирования МЭМС структуры конденсатора:  
 а) вакуумное напыление и обратная фотолитография элементов копланарного волновода (толщина 0,5 мкм);  
 б) осаждения слоя двуокиси кремния из моносилана (толщина 0,4 мкм) и прямая фотолитография;  
 в) осаждение слоя фоторезиста толщиной 1,5 мкм;  
 г) вакуумное напыление резистивного слоя металла (толщина 0,1 мкм);  
 д) гальваническое осаждение слоя золота (толщина 1,5 мкм);  
 е) удаление подслоя металла и фоторезиста в плазме; окончательная МЭМС структура.

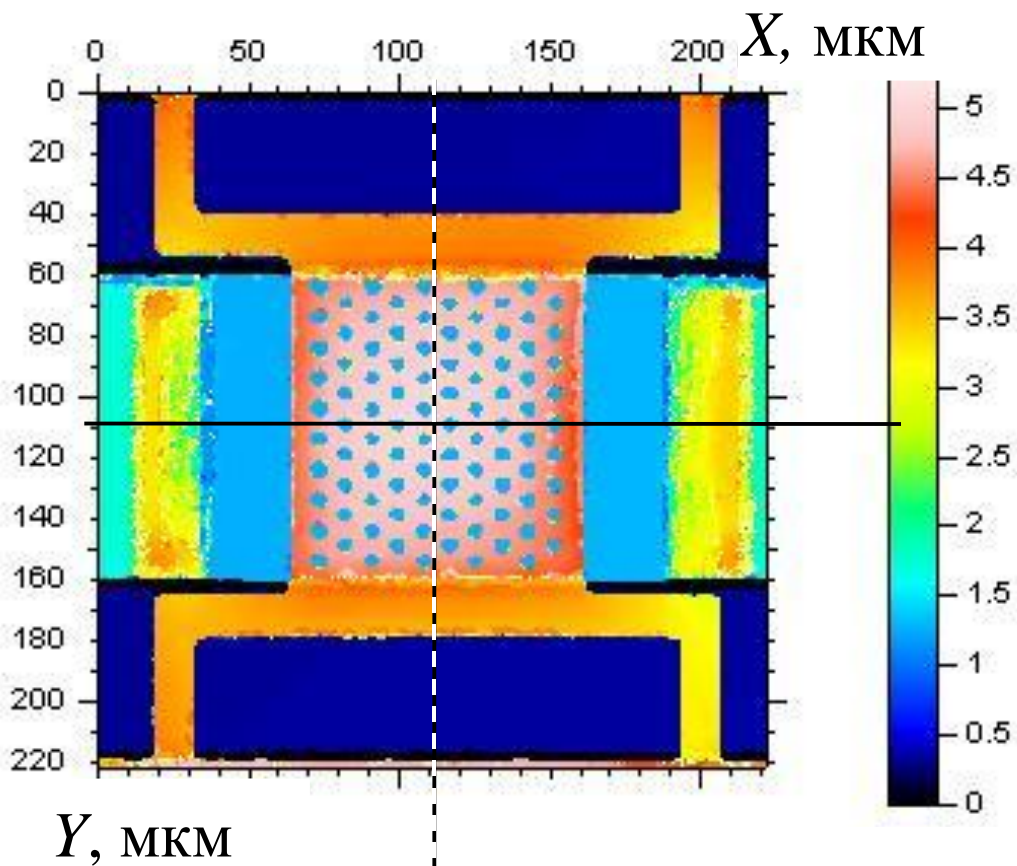
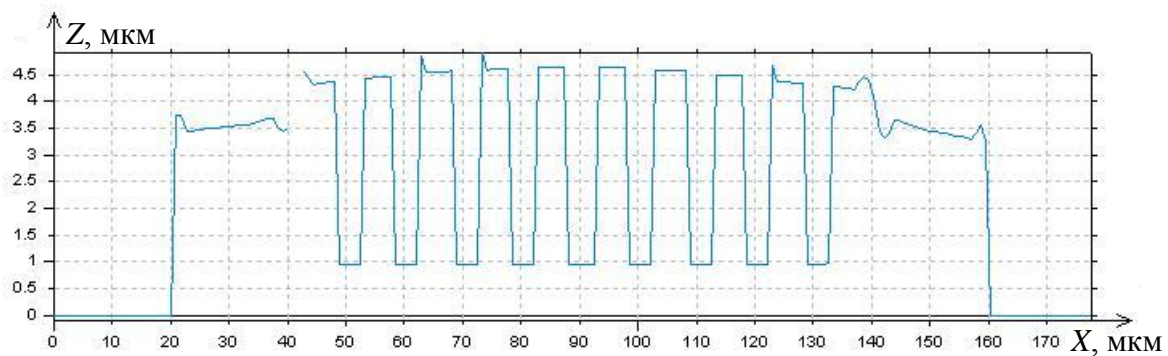
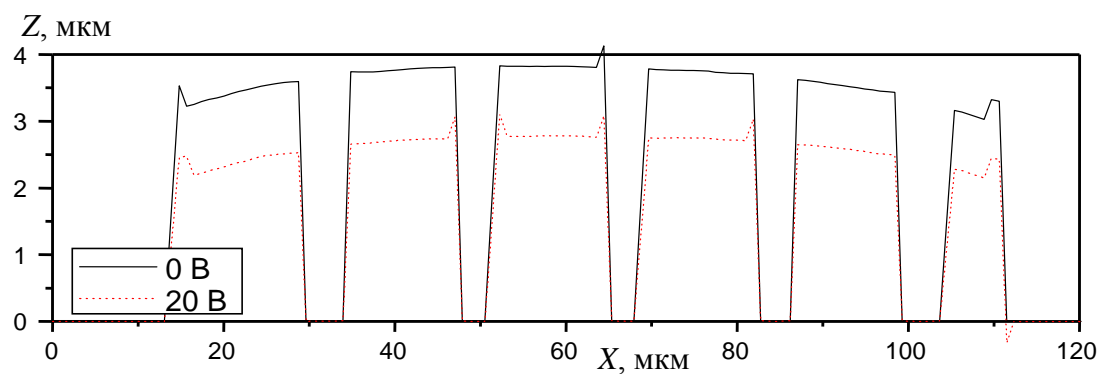


Рис. 3.9. Изображение структуры, полученное в оптической измерительной системе Talysurf CCI 2000. Линиями показаны сечения, представленные на рис. 3.10.

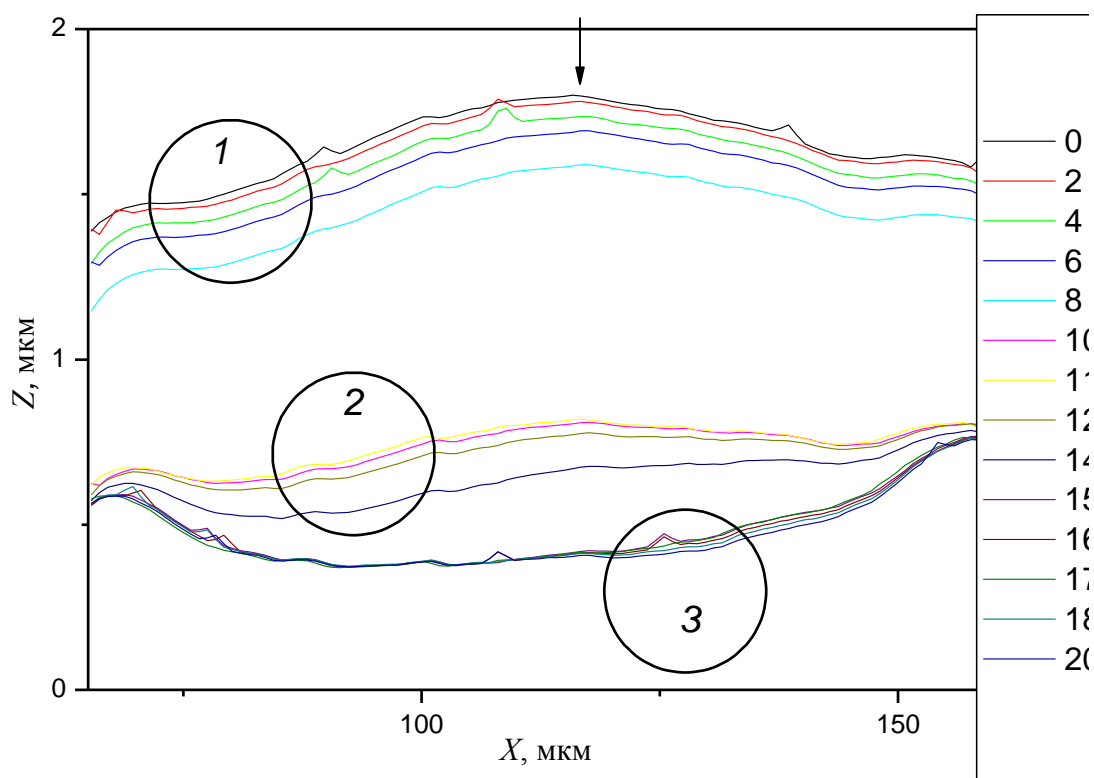


a)

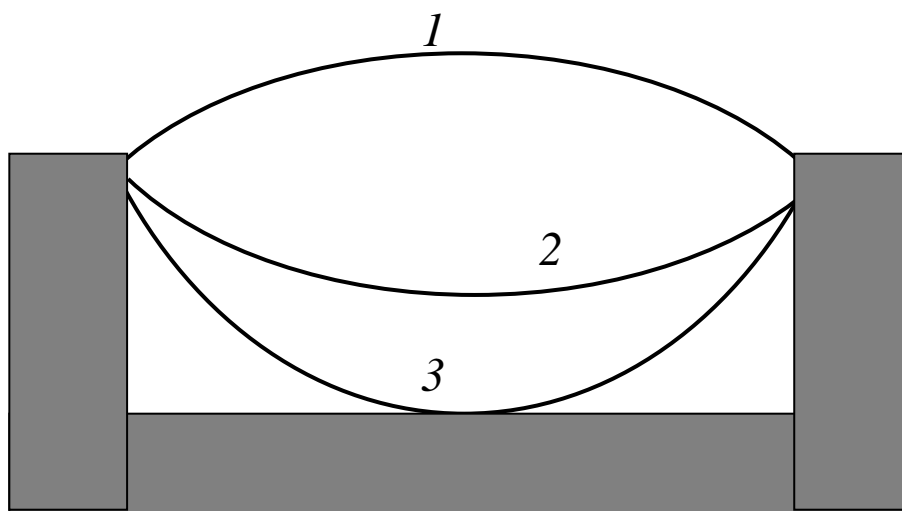


б)

Рис. 3.10. Сечения, показанные на рис.2 линиями. а) вертикальное, б) горизонтальное при напряжениях 0 В и 20 В.



a)



б)

Рис. 3.11. Профили верхнего электрода при напряжениях от 0 до 20 В. - а), схематичное изображение положений мембраны - б) Три устойчивые состояния соответствуют напряжениям 1 – от 0 В до 10 В, 2 – от 10 В до 15 В, 3 – выше 15 В.

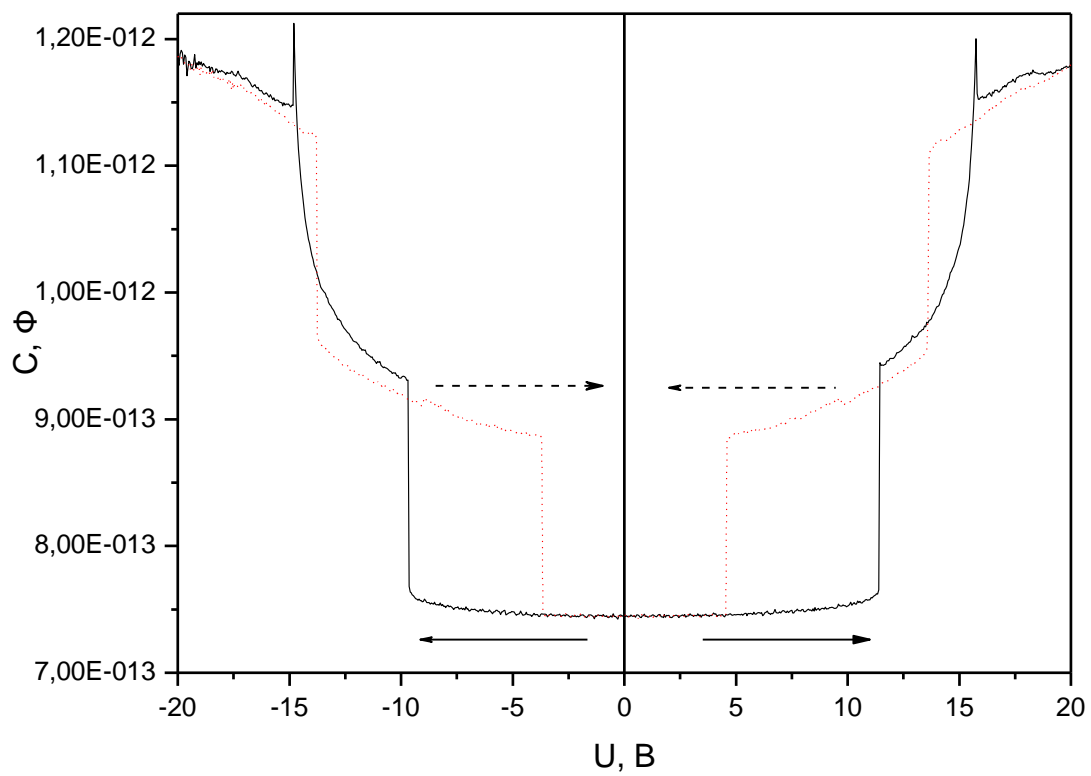
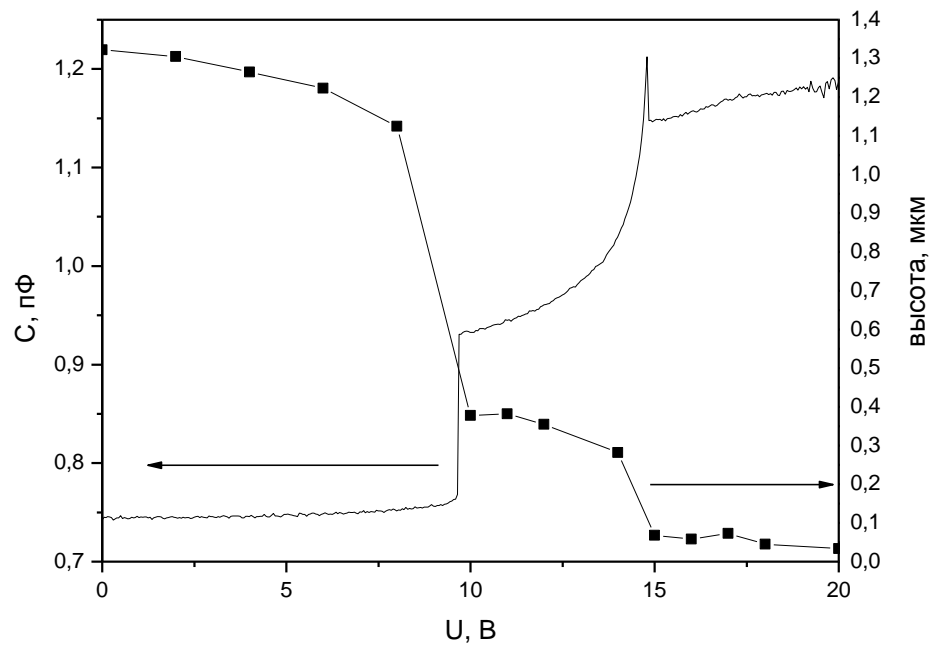
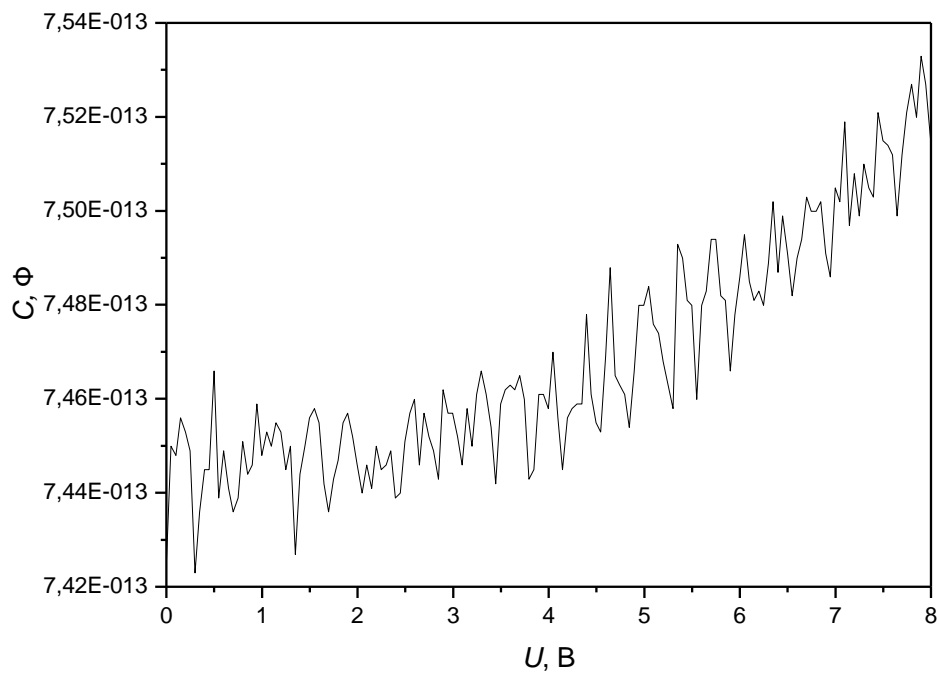


Рис. 3.12. CV характеристики при напряжениях от -20 до 20 В.



a)



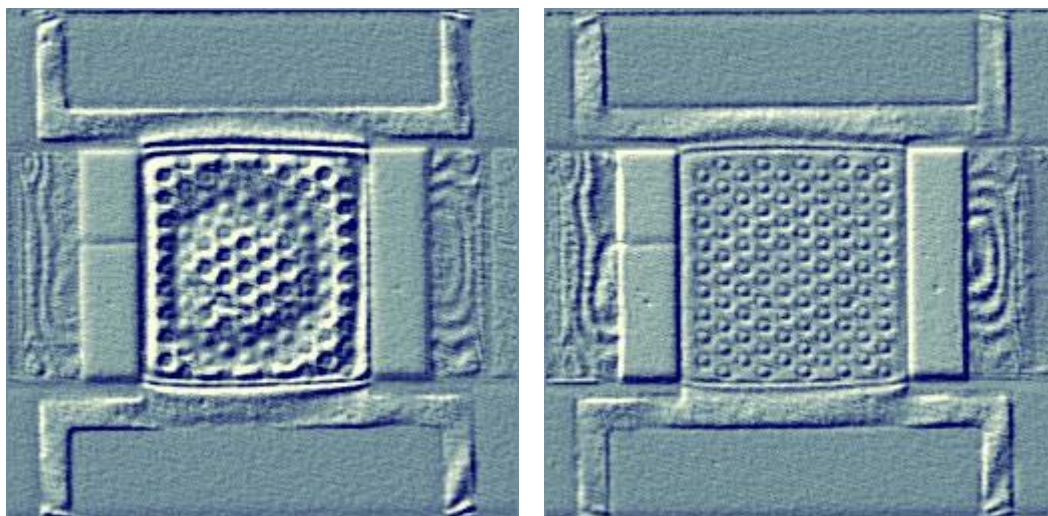
б)

Рис. 3.13. а) - Зависимость смещения верхней обкладки от напряжения и CV характеристика, б) - начальный участок CV характеристики

составляет 1,4 мкм, что совпадает с толщиной зазора между верхней обкладкой и диэлектриком. Собственная частота низшей моды механических колебаний верхней обкладки измерялась также с помощью интерферометра Talysurf CCI 2000. Регистрация одного кадра системы включает пошаговое перемещение объектива и обработку полного набора изображений. По времени она занимает около 1 минуты, что много больше периода колебаний верхней обкладки. Для поиска частоты резонансного раскачивания колебаний верхней обкладки использовали тот факт, что амплитуда качаний в резонансе становится столь большой, что размываются интерференционные полосы на изображении верхней обкладки при неподвижном объективе - в режиме интерференционного микроскопа. Методом наклона устанавливалось положение образца, при котором на верхней обкладке наблюдались интерференционные полосы (рис.3.14а). На электроды подавалось переменное напряжение с генератора амплитудой в 1 В, и проводилось сканирование по частоте, которая измерялась частотомером. При совпадении частоты генератора с собственной частотой низшей моды колебаний наблюдаемая картина менялась: исчезали полосы на верхней обкладке (рис. 3.14б). Резонансная частота, измеренная таким образом в воздухе, составила 18 кГц. Данный метод не позволяет точно измерить механическую добротность системы, давая возможность лишь грубо оценить её по ширине резонанса. Такая оценка даёт  $Q$  порядка 10. Как показывают результаты работы [87], более точные измерения добротности без вакуумирования системы не добавляют информации о свойствах самой системы, так как измеренная на воздухе добротность определяется не её качеством, а вязким трением о воздух.

Оценим чувствительность данной системы к ускорению на низких частотах при использовании её в качестве емкостного акселерометра. Смещение верхней обкладки детектируется путём измерения ёмкости конденсатора. При малых смещениях верхней обкладки с помощью установки Keithley (mod.590 CV-Analyzer) можно уверенно обнаружить изменение ёмкости, соответствующее напряжению 6 В на CV-характеристике (рис. 3.13б), что соответствует смещению верхней обкладки на 120 нм. При воздействии низкочастотного ускорения  $a$  на инерционную массу  $m$  её смещение  $x$  определяется формулой 1.3, которую удобно записать в виде:





*a)*

*б)*

Рис. 3.14. Фотография структуры в интерферометре Talysurf CCI 2000 в режиме интерференционного микроскопа при подаче переменного напряжения на электроды: а) - вне резонанса – на верхнем электроде видны интерференционные кольца, б) - в резонансе –  $f=18$  кГц - интерференция на верхнем электроде подавлена.

$$a = \frac{k}{m} x = \omega_0^2 x = 4\pi^2 f_0^2 x.$$

Подставляя в эту формулу измеренное значение собственной частоты  $f_0=18$  кГц и минимально измеримого смещения  $x=120$  нм, получим минимально измеримое ускорение  $a=156,6$  г на частотах много ниже резонансной. Это неудовлетворительная разрешающая способность, не позволяющая использовать данное устройство как емкостной акселерометр на постоянном ускорении. Для повышения чувствительности целесообразно использовать этот датчик на частоте механического резонанса, где его смещение возрастёт в  $Q$  раз. Для получения высокой механической добротности датчик должен быть вакуумирован. Добротность его на воздухе не превышает 10 и определяется трением о воздух, в то время, как в вакууме можно ожидать добротности в 1000 и более. При этом измерительный конденсатор должен быть включён в LC контур с собственной частотой много больше 18 кГц. Удобными являются частоты в несколько МГц. Тогда при воздействии на МЭМС-конденсатор ускорения на частоте 18 кГц его ёмкость, а соответственно и резонансная частота LC контура будет меняться с этой частотой и по изменению резонансной частоты LC контура можно будет определить ускорение с высокой точностью.

### 3.7. Выводы

Освоена лабораторная технология изготовления элементов конструкции МЭМС для двух типов материалов: монокристаллического – арсенида галлия и поликристаллического – окиси тантала. Технология основана на фотолитографии и селективном вытравливании жертвенного слоя.

Изготовлены микроконсоли из оксида тантала и арсенида галлия, предназначенные для чувствительных элементов сенсоров МЭМС. При помощи атомно-силового микроскопа измерена их резонансная частота  $f_0$  и статическая жесткость. Для GaAs эта частота  $f_0 = 818580$  Гц, для  $Ta_2O_5$  -  $f_0 = 876975$  Гц. Данные измерений резонансной частоты и модуля Юнга хорошо совпадают с расчетными.

Предложена методика измерения жёсткости кантилеверов и с их помощью измерения жёсткости элементов упругой подвески МЭМС, а так же методика

оценки упругих напряжений в тонких металлических плёнках на поверхности микроконсолей. В частности, показана возможность создания металлической плёнки (Ni) на поверхности GaAs с малыми упругими напряжениями.

Разработаны методы управления изгибом микроконсолей. Показано, что путем напыления различных металлов (Ta, Cr, Ni) на консоль можно управлять направлением и радиусом ее изгиба, причем, обратимым образом. Показана возможность оценки упругих напряжений в тонких металлических плёнках на поверхности GaAs по изгибу микроконсолей и возможность создания металлической плёнки на поверхности GaAs с упругими напряжениями близкими к нулю.

В экспериментах показано, что изгибом биморфной консоли можно управлять путем изменения окружающей температуры. Этот эффект можно использовать для измерения температуры. Данные методы могут быть использованы как самостоятельно, так и в сочетании с МЭМС двигателями – кулоновскими и пьезоэлектрическими для получения контролируемого нанометрового зазора между электродами, что необходимо для реализации различных первичных сенсоров.

Изготовлена микроэлектромеханическая система, на подложке арсенида галлия, представляющая собой подвижную золотую мембрану с электростатическим управлением.

Использование данной системы в качестве емкостного акселерометра на низких частотах не целесообразно ввиду низкой чувствительности. Данная система может быть использована как МЭМС варактор или как кулоновский двигатель для акселерометра. При этом может использоваться токовая система регистрации ускорения. В вакууме вблизи резонанса возможно использование емкостного способа регистрации. Система может так же использоваться в качестве логического элемента, так как имеет два устойчивые состояния, не чувствительные к шумам.

При формировании данной МЭМС структуры конденсатора не были использованы какие либо специально разработанные технологические операции, что позволяет изготавливать СВЧ монолитную интегральную схему (МИС) на

GaAs с МЭМС структурами и традиционными конструкциями элементов в едином технологическом цикле.

## Глава 4. Анизотропный пьезоэффект в микроэлектромеханических системах на основе эпитаксиальных гетероструктур GaAs/AlAs и Al<sub>0,5</sub>Ga<sub>0,5</sub>As/AlAs

### 4.1. Введение

Задачи дальнейшего развития техники МЭМС требуют создания микродвигателей (актюаторов) для этих систем. Они необходимы, например, для систем обратной связи в туннельных акселерометрах и для создания микропереключателей. На сегодняшний день известны кулоновские [40], тепловые биморфные [42,88] и пьезоэлектрические [44] микродвигатели. Кулоновские двигатели развивают относительно малые усилия, и для достижения приемлемых смещений (более 100 нм) упругие системы подвеса должны быть мягкими, что приводит к низкой резонансной частоте колебательной системы. Тепловые биморфные двигатели требуют точного управления температурой. Для них характерны большие времена отклика, что ограничивает полосу рабочих частот. Кроме того, они требуют для управления нагревом заметной мощности, что ограничивает область применения. Пьезоэлектрический двигатель управляется напряжением с небольшими токами утечки и может выполняться из достаточно жестких конструкционных элементов, что позволяет ему работать на высоких частотах вплоть до мегагерцового диапазона. Основным недостатком МЭМС-пьезодвигателя является малая величина пьезомодуля материалов, из которых возможно изготовление МЭМС, и, соответственно, малая величина смещения. Одним из возможных выходов является создание биморфного МЭМС пьезодвигателя, использующего изгиб микроконсоли за счет поперечного пьезоэффекта [45].

Для решения задачи создания микродвигателя перспективными считаются биморфные монокристаллические МЭМС на основе GaAs/AlGaAs, использующие пьезоэффект в активном слое [45,89,90]. При подаче электрического напряжения консольно закрепленная микробалка (микроконсоль) сечением несколько квадратных микрометров обратимо изгибается, что в перспективе может позволить создать на основе таких МЭМС малоинерционный пьезоэлектрический

двигатель с небольшими токами утечки, работающий на высоких частотах вплоть до мегагерц.

Измерения на микросистемах обычно связаны с экспериментальными трудностями, и могут иметь неоднозначную интерпретацию. Например, наблюдаемое колебание микроконсолей на собственной частоте механического резонанса не дает строгого доказательства пьезоэлектрической природы возбуждения колебаний, поскольку собственная частота связана лишь с механическими свойствами консоли. Несмотря на достаточно большое число работ, посвященных устройствам этого типа, в литературе [89,91] не было описано статических измерений, однозначно доказывающих пьезоэлектрическую природу движения микроконсоли.

В настоящей главе описан эксперимент, дающий такое доказательство. В нём используется структура GaAs(001) с двумя микроконсолями, ориентированными по ортогональным диагональным направлениям [110] и [110].

Приводится тензорное описание смещений такой консоли, которое оказалось необходимым, поскольку в большинстве опубликованных на эту тему работ пьезоэффект описывают с учетом анизотропии свойств GaAs, а механический изгиб – в приближении изотропных упругих свойств [45,92,93]. В таком подходе теряется различие свойств по направлениям [110] и [110].

С помощью интерферометра белого света Talysurf CCI 2000 в статическом режиме проведены измерения противоположного отклонения микроконсолей ориентированных ортогонально вдоль указанных направлений при приложении напряжения. Данные эксперимента согласуются с теоретическими оценками и служат доказательством того, что природой движения микроконсолей является пьезоэффект в AlGaAs. С помощью той же интерференционной системы оценена резонансная частота колебаний микроконсолей.

Результаты опубликованы в работах [A7-A9,A15].

#### **4.2. Пьезоэффект в кристалле GaAs(001)**

Описание смещений элементов МЭМС основано на уравнениях обратного пьезоэффекта в  $Al_xGa_{1-x}As$  и уравнениях механического равновесия

многослойной структуры. Электрическое поле, приложенное к кристаллу GaAs или AlAs, ведет к деформации кристалла, поскольку кристалл нецентросимметричный и обладает прямым и обратным пьезоэффектом, см. [94]. Обратный пьезоэффект описывается уравнением:

$$\varepsilon_{jk} = d_{ijk}E_i, \quad (4.1)$$

где  $\varepsilon_{jk}$  - тензор деформации;  $d_{ijk}$  - тензор пьезоэлектрических модулей;  $E_i$  - вектор напряженности приложенного электрического поля, индексы  $ijk = 1,2,3$ . В матричных обозначениях, с индексом  $m=1,\dots,6$ , уравнение (4.1) записывают в виде:

$$\varepsilon_m = d_{im}E_i, \quad (4.2)$$

где  $\varepsilon_m$  - коэффициенты, связанные с компонентами тензора деформации:

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_1; \varepsilon_{22} = \varepsilon_2; \varepsilon_{33} = \varepsilon_3; \varepsilon_{23} = \varepsilon_4/2; \varepsilon_{13} = \varepsilon_5/2; \varepsilon_{12} = \varepsilon_6/2; \quad (4.3)$$

$d_{im}$  - матрица пьезоэлектрических модулей, коэффициенты которой связаны с компонентами тензора пьезомодулей:

$$\begin{aligned} d_{ijk} &= d_{im}, \text{ если } m=1,2,3; \\ d_{ijk} &= d_{im}/2, \text{ если } m=4,5,6. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Вид матрицы определяется симметрией кристалла. Для кристалла с точечной группой симметрии  $\bar{4}3m$  матрица в кристаллографических координатных осях имеет вид:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} \end{pmatrix}, \quad (4.5)$$

где единственный независимый коэффициент  $d_{14} = -2,69 \cdot 10^{-12}$  м/В для GaAs и  $d_{14} = -3,82 \cdot 10^{-12}$  м/В для AlAs [95-97]. В случае твердого раствора обычно используют линейную зависимость коэффициента от  $x$  [95], тогда для  $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$  получаем  $d_{14} = -3,26 \cdot 10^{-12}$  м/В.

Если электрическое поле с напряженностью  $E$  приложено вдоль оси  $z$  кристалла,  $E_i = (0, 0, E)$ , то из (4.2) имеем единственную ненулевую компоненту

$$\varepsilon_6 = d_{36}E_3 = d_{14}E,$$

что приводит к тензору деформации следующего вида:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & \varepsilon_{12} & 0 \\ \varepsilon_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (4.6)$$

где

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_6/2 = d_{14}E/2. \quad (4.7)$$

Деформация (4.6) - это чистый сдвиг, при котором меняется лишь угол между осями  $x$  и  $y$  [78]. Если поворотом на  $45^\circ$  вокруг оси  $z$  перейти к диагональным осям

$$x' = (x - y)/\sqrt{2} \text{ - направление } [1 \bar{1} 0],$$

$$y' = (x + y)/\sqrt{2} \text{ - направление } [110],$$

то в этих осях деформация будет иметь характер "растяжение-сжатие".

Действительно, матрица преобразования системы координат имеет вид

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 0 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4.8)$$

Преобразование тензора  $\varepsilon_{ij}$  к новым осям

$$\varepsilon'_{ij} = A_{ij} A_{ik} \varepsilon_{kj}$$

приводит к виду:



$$\varepsilon'_{ij} = \begin{pmatrix} -\varepsilon_{12} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (4.9)$$

что означает при отрицательном значении  $\varepsilon_{12}$  - растяжение по направлению  $[1\bar{1}0]$  и сжатие по  $[110]$ .

Величина результирующего изгиба системы из двух слоев (рис. 4.1), один из которых деформирован, определяется условиями механического равновесия системы и граничными условиями.

Рассмотрим приближение, когда систему можно разделить на тонкие слои, в исходном состоянии перпендикулярные оси  $z$ , и упругие напряжения  $\sigma_g$  по оси  $g$ , ( $x'$  или  $y'$ ) в каждом из слоев линейно зависят от упругой деформации  $\varepsilon_g$  в этом слое вдоль оси  $g$ :

$$\sigma_g = G \varepsilon_g, \quad (4.10)$$

где  $G$  - некоторая комбинация упругих модулей, которая зависит от характера деформации, и которую мы не будем уточнять, так как значение  $G$  не войдет в окончательный результат. Отметим, что характер деформации отличается от обычных биметаллических систем и гетероэпитаксиальных композиций тем, что знаки деформации (и знаки радиусов изгиба) различны в двух ортогональных направлениях.

Этот вывод предсказывает взаимно противоположное движение микроконсолей, направленных по двум ортогональным диагональным направлениям на поверхности подложки GaAs(001). За счет пьезоэффекта возникает дополнительное рассогласование периодов решетки двух слоев AlGaAs и GaAs, что создает скачек упругих деформаций на границе. При сжатии верхнего слоя AlGaAs вдоль консоли консоль изогнется вверх, при растяжении – вниз, см. рис. 4.1.

Результат легко объясняется, исходя непосредственно из расположения атомов в структуре GaAs. Каждый анион ( $As^-$ ) окружен четырьмя катионами  $Ga^+$ , (с частичным замещением на  $Al^+$  в случае твердого раствора) координационный полиэдр - правильный тетраэдр, рис. 4.2. В электрическом поле, направленном по оси  $z$ , анион смещается относительно центра тетраэдра катионов в направлении к

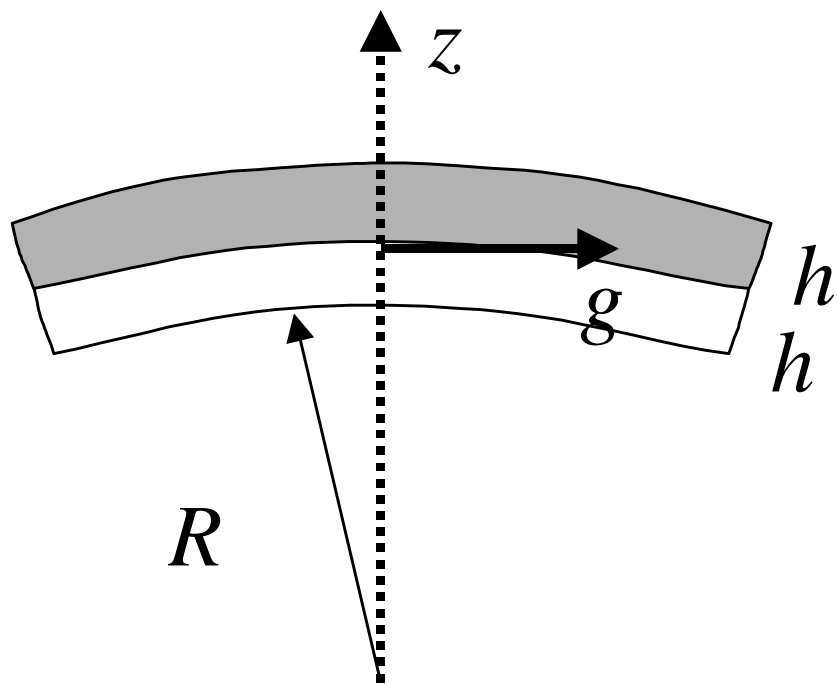


Рис. 4.1. Система из двух когерентно сопряжённых по кристаллическим решёткам пластин толщиной  $h$ , изогнувшаяся до радиуса  $R$  в плоскости  $zg$ .

нижнему ребру тетраэдра, "расталкивая" атомы Ga нижнего ребра. Нижнее ребро растягивается, верхнее сжимается. Все тетраэдры этого типа ориентированы в кристалле одинаково, что приводит к сжатию кристалла в направлении  $[110]$ , растяжению по  $[1\bar{1}0]$  и отсутствию осевых деформаций вдоль осей  $x$  и  $y$ .

Величина результирующего изгиба системы из двух слоев, один из которых деформирован, определяется условиями механического равновесия системы и граничными условиями. Верхний металлический контакт в нашем приближении - очень тонкий слой, не влияющий на деформацию консоли. Уравнения баланса сил и моментов по глубине структуры, [84], позволяют рассчитать равновесную кривизну системы и отклонение конца микроконсоли ( $\Delta$ ) в зависимости от приложенного напряжения ( $U$ ). За счет пьезоэффекта возникает начальное рассогласование периодов решетки двух слоев, что создает скачок упругих деформаций на границе

$$\Delta\varepsilon(z=0) = \varepsilon_{12} \quad (4.11)$$

Считаем, что эта величина не меняется при последующих изгибах, то есть скачок упругих напряжений на границе равен:

$$\Delta\sigma_g(z=0) = G \cdot \varepsilon_{12} = G \cdot d_{14} \cdot E/2. \quad (4.12)$$

Упругие напряжения в других сечениях по  $z$  (слоях) частично релаксируют за счет изгиба системы до механически равновесного состояния, когда выполняется баланс сил и моментов для двухслойной структуры в целом. Величина деформации с учетом изгиба легко записывается, если для каждого из 2-х слоев ввести положение  $z_0$  "нулевой плоскости", в которой упругие напряжения обращаются в ноль:  $\sigma_g(z_0) = 0$ .

Тогда деформация меняется по закону  $(z-z_0)/R$ , где  $R$ - радиус изгиба, а следовательно, и напряжения в слое будут иметь распределение

$$\sigma_d(z) = G \cdot (z-z_0)/R. \quad (4.13)$$

Прогибы под действием силы тяжести для микроконсоли не существенны, поэтому эта сила не учитывается. Длинная консоль должна быть уравновешена в каждом из своих сечений, возьмем сечение вдоль оси  $z$  на рис. 4.1. Если упругие напряжения распределены по  $z$  как  $\sigma(z)$ ,

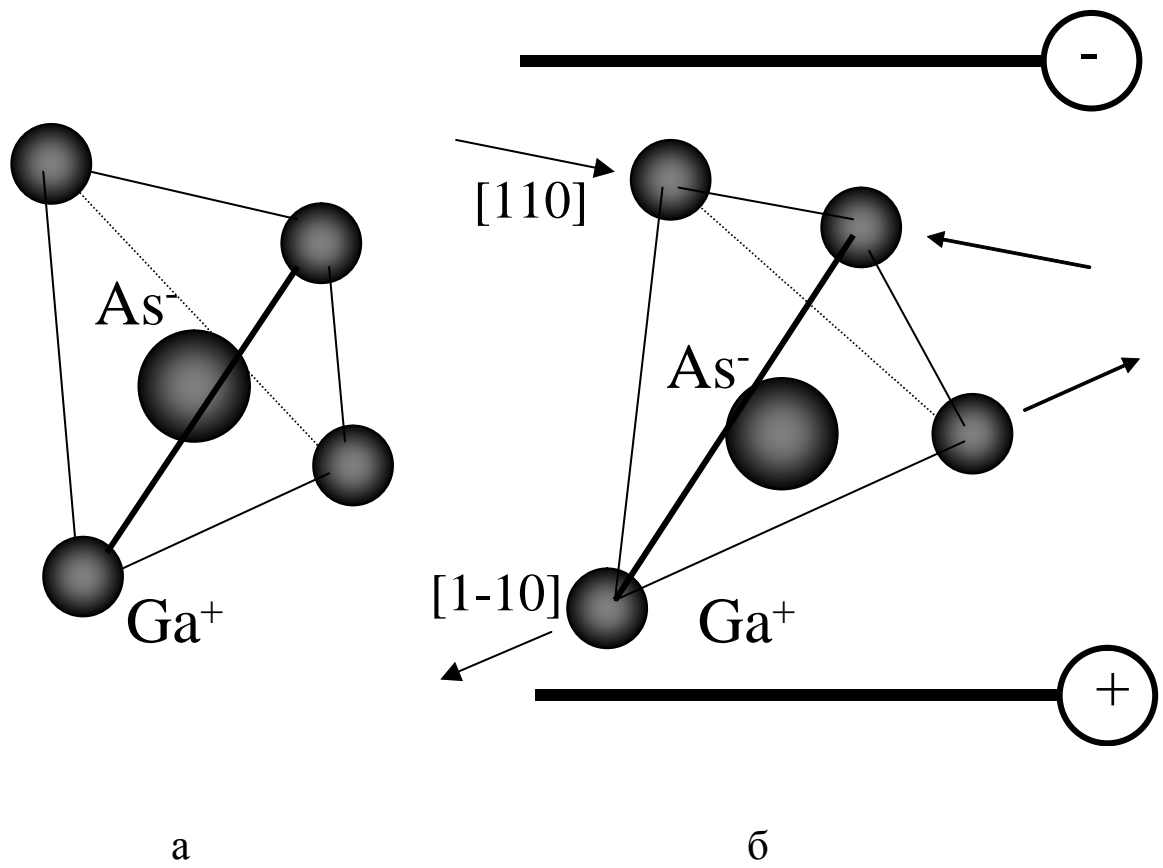


Рис. 4.2. Схема, иллюстрирующая природу деформации кристалла GaAs в электрическом поле, направленном вдоль оси z: а) – в отсутствии электрического поля, б) – при приложении электрического поля.

то должен выполняться баланс сил и моментов [94]:

$$\int_{-h}^h \sigma_d(z) dz = 0 \quad (4.14)$$

$$\int_{-h}^h \sigma_d(z) z \cdot dz = 0. \quad (4.15)$$

Результирующее распределение упругих напряжений вдоль оси  $z$  (эпюра напряжений) будет иметь вид, представленный на рис. 4.3. Две прямые имеют одинаковый наклон, поскольку радиус изгиба жестко связанных частей одинаков (из условий неразрывности). Эпюра симметрична относительно точки начала координат, поскольку по физическому смыслу задачи смена знака деформации вместе со сменой местами двух слоев на рис. 4.1 приводит к тем же условиям задачи. Смена знака соответствует отражению относительно оси  $z$ , а смена местами слоев - отражению относительно оси  $g$ .

Такая форма эпюры обеспечивает автоматическое выполнение условий (4.12) баланса сил и требует баланса моментов (4.13) внутри каждого из слоев по отдельности. Это условие дает уравнение относительно положения нулевой плоскости:

$$G \int_0^h \frac{z - z_0}{R} z \cdot dz = 0, \quad (4.16)$$

откуда получаем  $z_0 = 2h/3$ , что и изображено на рис. 4.2. Скачек упругих напряжений на гетерогранице, половина от выражения (4.10), относящаяся к 1 слою, определяет радиус изгиба из (4.14):

$$G(-2h/3)/R = Gd_{14}E/4, \quad (4.17)$$

Поскольку в эксперименте измеряется не сам радиус изгиба консоли, а отклонение одного конца при закрепленном втором конце, выразим эту величину через длину консоли  $L$  и радиус изгиба  $R$ . Схема эксперимента показана на рис. 4.4. Угол  $2\varphi = L/R$ , хорда  $AB = 2R\sin\varphi$ ,

$$x = AC = AB \cdot \sin\varphi = -2R\sin^2\varphi \approx -2R(L/2R)^2 = -L^2/2R. \quad (4.18)$$

Величина  $R$  обычно считается положительной для выпуклой поверхности, как на

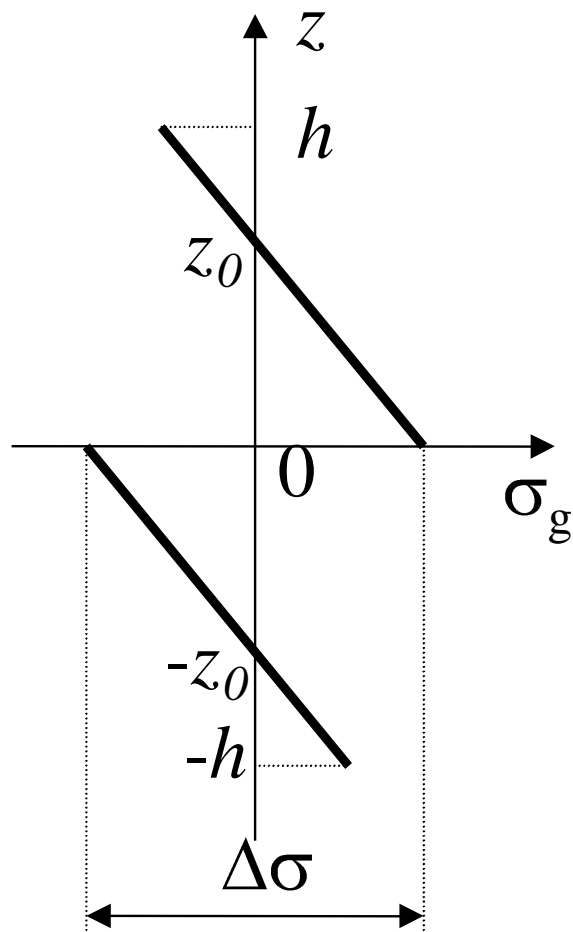


Рис. 4.3. Вид эпюры упругих напряжений в системе из двух одинаковых слоев.

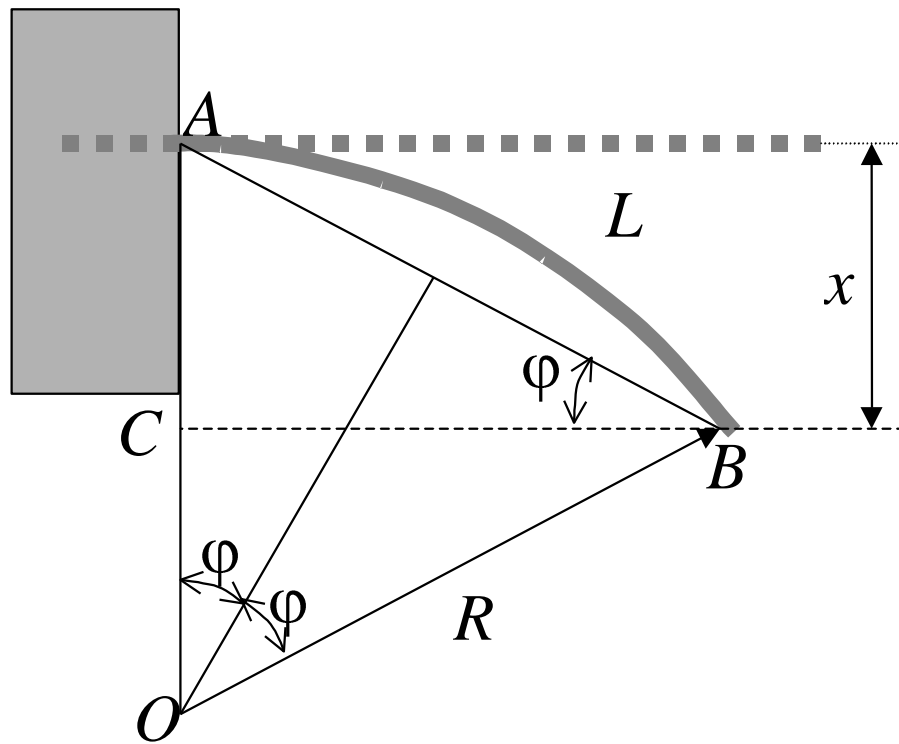


Рис. 4.4. Схема отклонения микроконсоли для вычисления величины отклонения  $x$  конца консоли длиной  $L$ , изогнутой по радиусу  $R$ , при закрепленном конце  $A$ :  $x \approx L^2/2R$ .

рис. 4.4. Величина  $x$  при этом отрицательна - смещение вниз. Подставляя радиус из (4.15), и выразив напряженность  $E$  через приложенное напряжение и толщину слоя  $E = U/h$ , получаем:

$$x = 3UL^2 d_{14}/(16h^2). \quad (4.19)$$

В расчете не учитывался верхний металлический контактный слой, который несколько изменяет уравнения равновесия. Вместе с другими использованными приближениями это делает полученное значение оценочным.

Частота низшей моды такой консоли в приближении одинаковых упругих модулей слоев определяется по формуле[84]:

$$\omega_0 = \frac{3.52}{L^2} \sqrt{\frac{EI_y}{\rho S}}. \quad (4.20)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $S = 2ha$  – площадь сечения,  $a$  – ширина консоли,  $I_y = a(2h)^3/12$  – момент инерции сечения. Подставляя в формулу (4.10) получим:

$$f_0 = \frac{0,88 \cdot 2h}{\pi L^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho}} \quad (4.21)$$

где  $\rho = 4,56 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – плотность  $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$ ;  $E = 121$  ГПа – модуль Юнга для одноосной деформации  $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$  в направлении  $[110]$  или  $[1\bar{1}0]$  при свободных от нагрузок боковых поверхностях микроконсоли, рассчитанный по методу [98].

Эти формулы позволяют нам спланировать эксперимент и оценить значения статического смещения конца консоли и её резонансную частоту.

### 4.3. Формирование пьезоэлектрических микроконсолей для МЭМС

В качестве материала для изготовления микроконсолей были спроектированы специальные гетероструктуры GaAs/GaAs/AlAs – (а) и  $Al_{0,5}Ga_{0,5}As/GaAs/AlAs$  – (б). На подложку GaAs методом металлорганической газофазной эпитаксии был нанесен слой AlAs. Затем были выращены слои легированного GaAs с n–типом проводимости и нелегированного GaAs (а) или  $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$  (б). Толщины всех слоёв были около 1 мкм. Согласно данным рентгенодифракционных исследований слои были монокристаллические, с когерентным сопряжением решеток на гетерограницах. На рис. 4.5 схематически



показана структура микроконсоли. Верхний электрод формировался путём термического напыления слоя золота толщиной 100 нм. Мезаструктура будущей консоли формировалась методом фотолитографии с последующим жидкостным травлением. Ширина микроконсоли около 10 мкм, длина - 100 мкм. Селективное вытравливание "жертвенного" слоя AlAs из-под консоли проводилось в растворе HF [A4]. Операция удаления жидкости из под консоли во избежание залипания производилась после травления и промывки деионизованной водой и ацетоном в системе критического высушивания CPD-13200 фирмы SPI путем замены ацетона на жидкий CO<sub>2</sub>. Подробно процесс сушки описан в Приложении 1.

Первоначально были созданы мезаструктуры с одной консолью, изготовленные из гетероструктуры типа (а). На рис. 4.6 показано изображение такой одиночной микроконсоли из GaAs, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа Supra 50VP.

Активным пьезоэлектрическим слоем является нелегированный слой GaAs (а) или Al<sub>0,5</sub>Ga<sub>0,5</sub>As (б). Нижним электродом служит легированный донорной примесью слой n<sup>+</sup> - GaAs, а верхним – слой металла. При приложении к верхнему металлическому электроду отрицательного смещения, в нелегированном слое GaAs (а) или Al<sub>0,5</sub>Ga<sub>0,5</sub>As (б) создается квазиоднородное электрическое поле, которое экранируется в нижнем слое n<sup>+</sup> - GaAs. Такой контакт металл-полупроводник известен как контакт Мотта [99]. Ток при этом остается пренебрежимо малым вплоть до пробоя обратно смещённого контакта Мотта.

С целью прямого сравнения движений микроконсолей двух направлений ориентации, I – вдоль [110] и II – вдоль [1 $\bar{1}$ 0], оба типа были сформированы на одной пластине, изготовленной из гетероструктуры на основе Al<sub>0,5</sub>Ga<sub>0,5</sub>As (б), как показано на рис. 4.7. Такой эксперимент обеспечивает одинаковые условия и приложенное напряжение, необходимые для количественного сравнения смещений микроконсолей различных ориентаций.

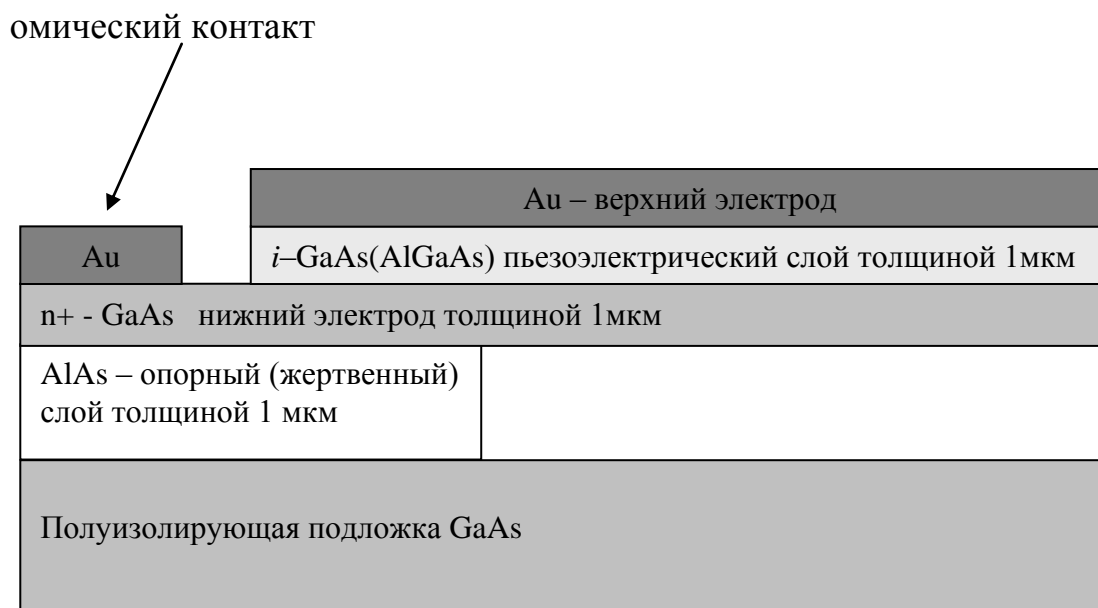


Рис. 4.5. Схема поперечного сечения гетероструктуры вдоль микроконсоли.

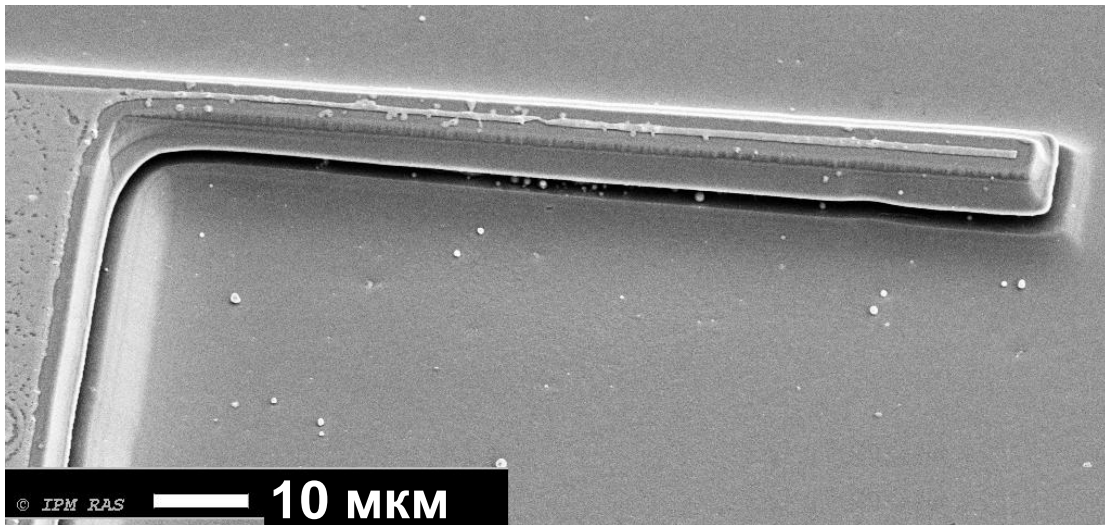


Рис. 4.6. Изображение одиночной микроконсоли на основе GaAs, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа.

#### 4.4. Исследование статических и динамических смещений консолей

Пространственное положение микроконсолей регистрировалось при помощи оптической интерферометрической системы Talysurf CCI 2000 (интерферометр белого света). Рис. 4.7 получен на этой системе в режиме микроскопа, рис. 4.8 показывает трехмерное изображение консоли, полученное прибором в результате обработки серии изображений при движении объектива. На электроды подавалось постоянное смещение величиной до 10 В для пьезоэлектрического слоя  $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$  и до 18 В для пьезоэлектрического слоя GaAs. Вольтамперные характеристики микроконсолей с пьезослоем GaAs и  $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$  показаны на рис. 4.9. Видно, что при обратном смещении ток не превышает  $10^{-5}$  А.

Далее проводилась съёмка с восстановлением трехмерной поверхности при каждом из напряжений. Для количественного измерения отклонений на каждом кадре выбирался одиночный профиль, идущий вдоль консоли с одними и теми же координатами, пунктирная линия на рис. 4.8. Эти профили, соответствующие разным значениям напряжения, показаны на рис. 4.10. На рис. 4.11 приведено отклонение свободного конца микроконсолей двух типов в зависимости от приложенного напряжения. Отсчет идет от их положения при нулевом смещении. Видно, что наклон этих зависимостей для консолей I и II противоположен по направлению и близок по абсолютной величине. Определенная из наклона чувствительность системы составляет около 5,7 нм/В для пьезоэлектрического слоя  $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$  и 3,5 нм/В для пьезоэлектрического слоя GaAs. Используя формулу (4.19), при  $U = 1$  В,  $L = 100$  мкм,  $h = 1$  мкм,  $d_{14} = -2.69 \cdot 10^{-12}$  м/В получаем  $x \approx 5$  нм, что совпадает с данными измерений.

Несмотря на достаточно большое число работ, посвященных МЭМС этого типа [45,87-89], в литературе не было прямых наблюдений взаимно противоположного отклонения ортогональных консолей.

Собственная частота низшей моды механических колебаний микроконсолей измерялась также с помощью интерферометра Talysurf CCI 2000. Регистрация одного кадра системы включает пошаговое перемещение объектива и обработку полного набора изображений. По времени она занимает около 1 минуты, что

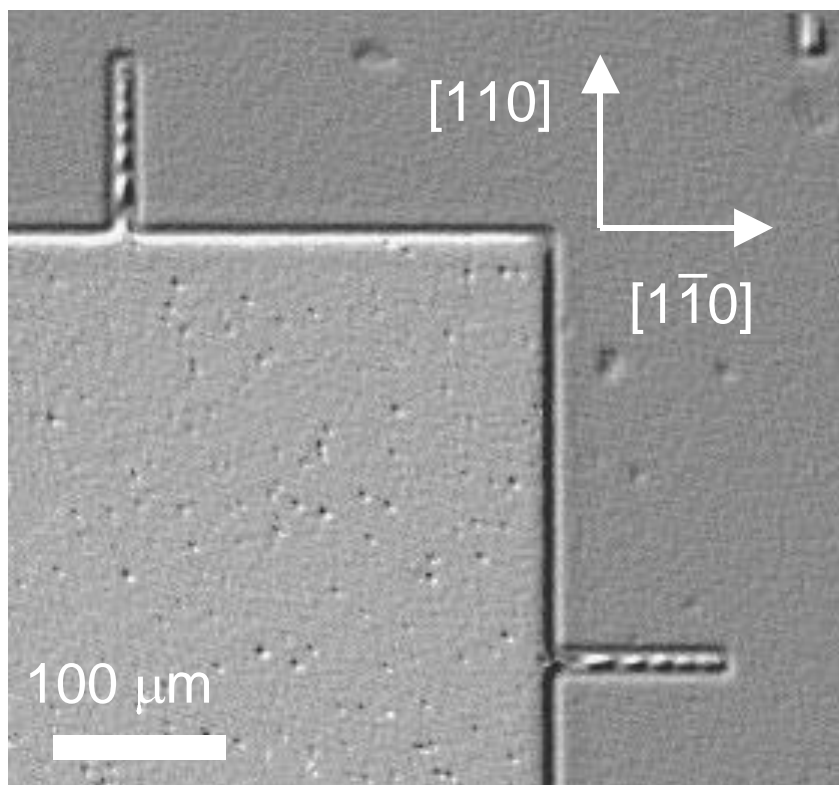


Рис. 4.7. Вид в интерференционном микроскопе Talysurf CCI 2000 части структуры с двумя микроконсолями, ориентированными ортогонально. Направление вверх –  $[110]$ , вправо -  $[1\bar{1}0]$ . Микроконсоли немного изогнуты вверх, на них видны интерференционные максимумы и минимумы.

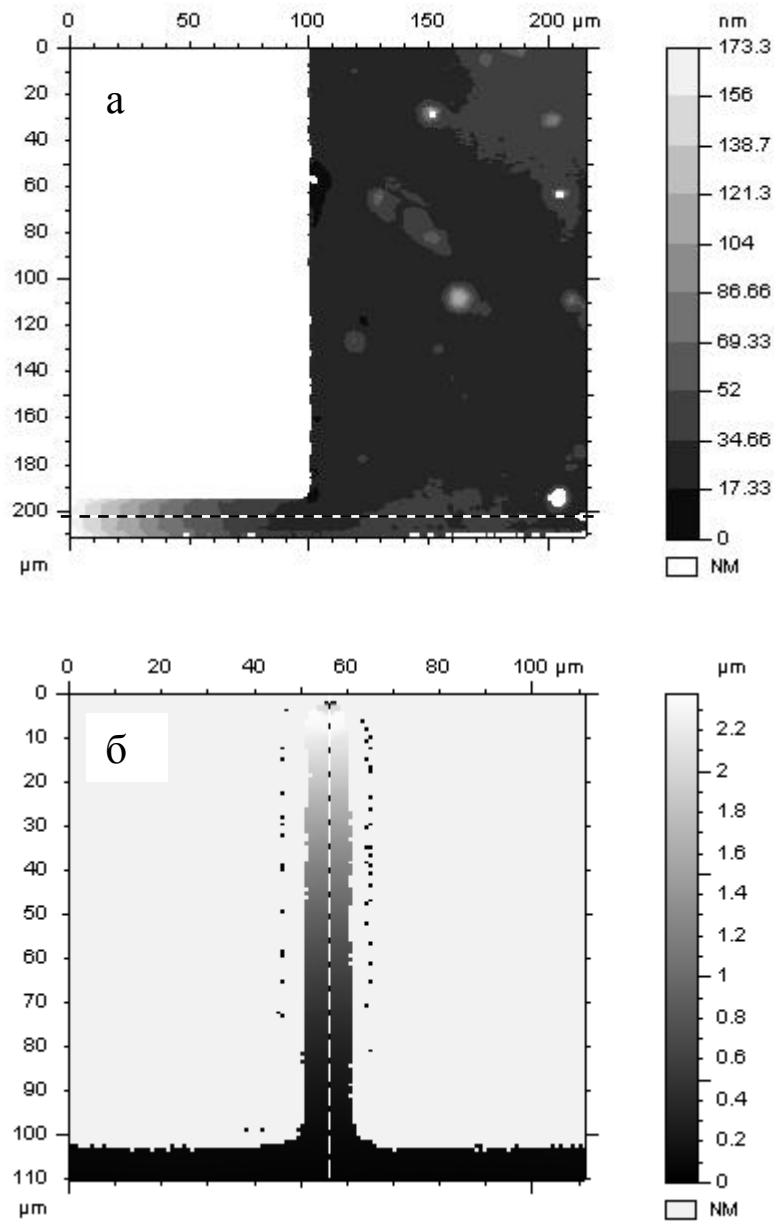
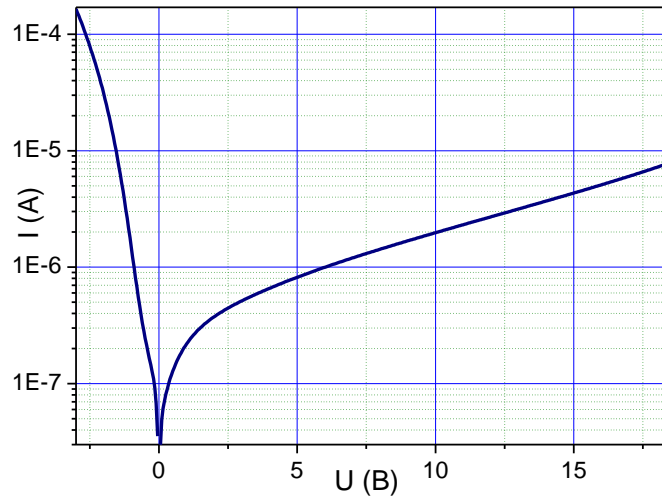
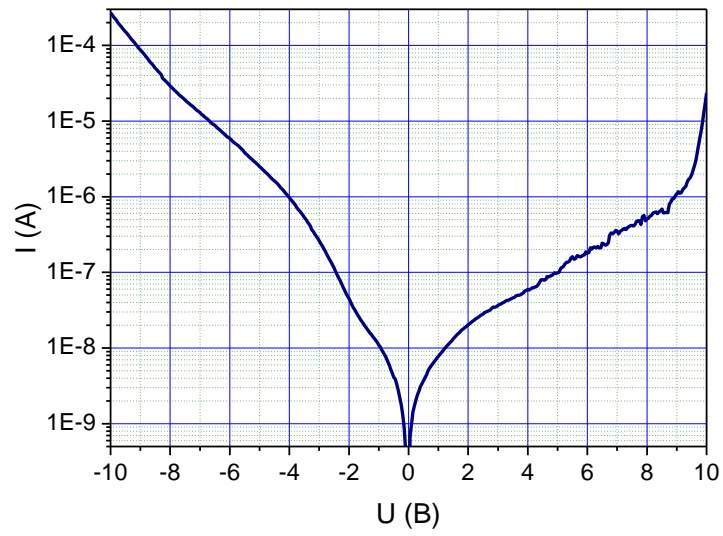


Рис 4.8. Трехмерное изображение поверхности с микроконсолью, полученное с помощью интерферометра: а) – структура с одной консолью на основе GaAs/GaAs/AlAs, б) - структура с двумя консолями на основе AlGaAs/GaAs/AlAs. Пунктирная линия показывает сечение одиночного профиля.



а



б

Рис. 4.9. ВАХ микроконсолей с пьезослоями: а) - GaAs и б) -  $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ .

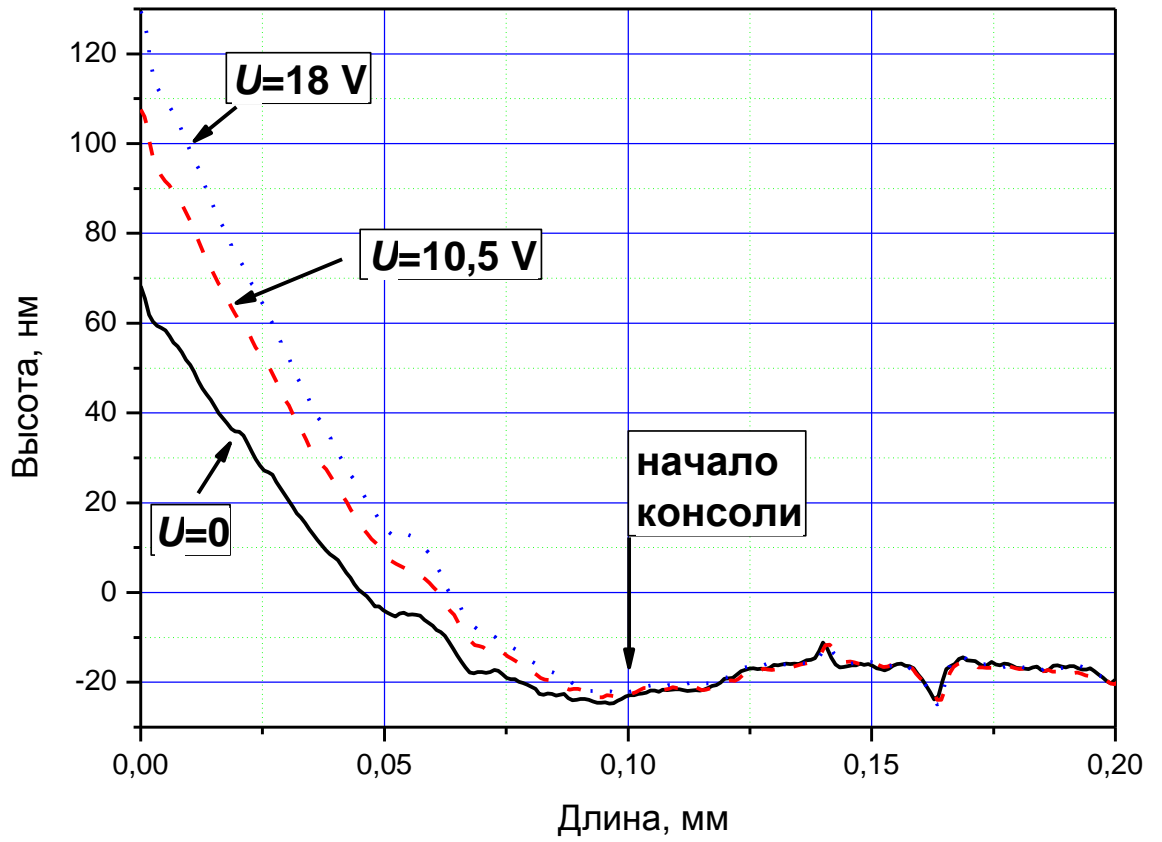
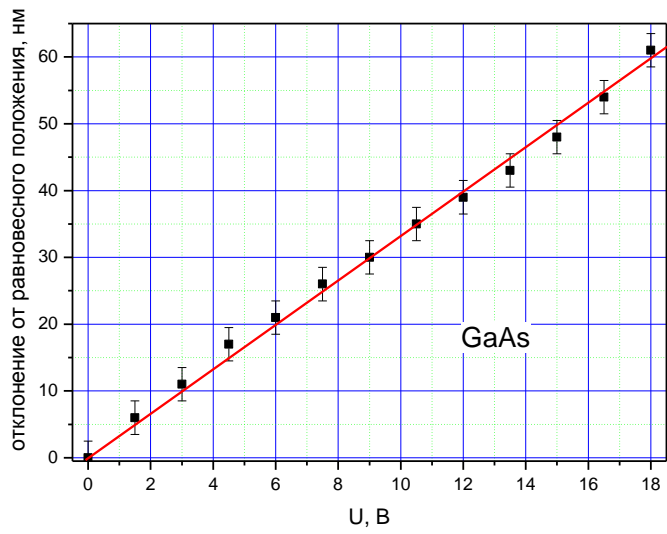
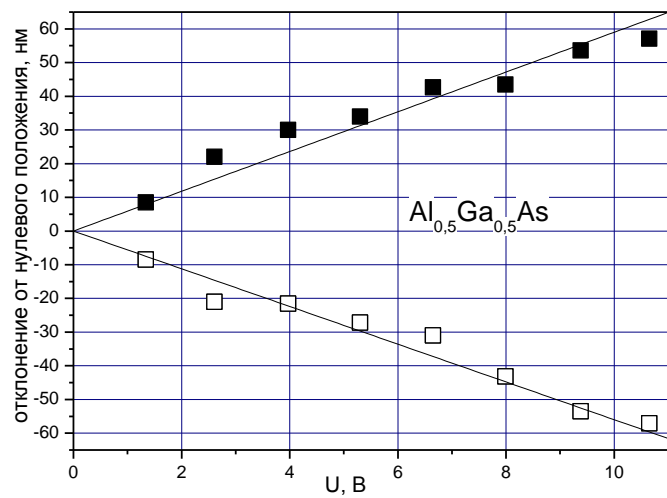


Рис.4.10. Продольные одиночные профили сечения микроконсоли вдоль линии на рис. 4.8 при различных напряжениях.



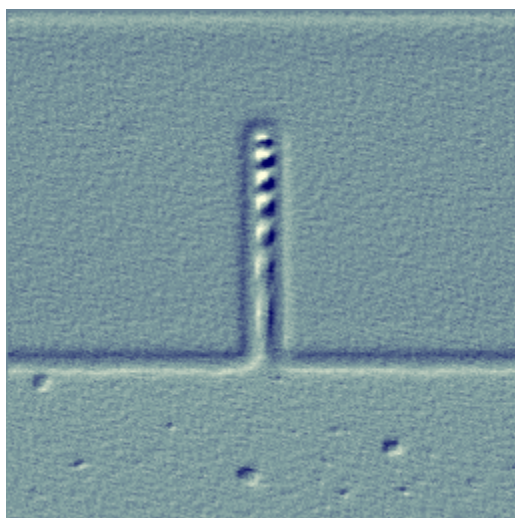


а

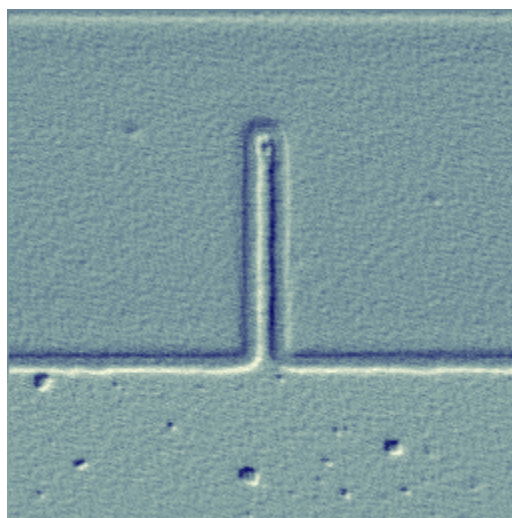


б

Рис. 4.11. Измеренное отклонение концов двух консолей от исходного состояния в зависимости от приложенного напряжения: а) – с пьезослоем GaAs, б) – с пьезослоем  $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$ . ■ – I консоль ориентированная вдоль [110] отгибается вверх, □ – II консоль ориентированная вдоль  $[1\bar{1}0]$  отгибается вниз.



а



б

Рис. 4.12. Изображение микроконсоли полученное в режиме микроскопа на интерферометре Talysurf CCI 2000: а) – вне резонанса, б) - в резонансе.

много больше периода колебаний микроконсоли. Для поиска частоты резонансного раскачивания микроконсоли использовали тот факт, что амплитуда качаний в резонансе становится столь большой, что размываются интерференционные полосы на изображении консоли при неподвижном объективе - в режиме микроскопа. Методом наклона устанавливалось положение образца, при котором на консоли наблюдались поперечные полосы (рис. 4.12а). На электроды подавалось переменное напряжение с генератора амплитудой около 1 В, и проводилась медленная перестройка по частоте, которая измерялась частотомером. При совпадении частоты генератора с собственной частотой нижней моды консоли наблюдаемая картина менялась - исчезали полосы на консоли (рис. 4.12б). Резонансные частоты, измеренные таким образом в воздухе, составили 160 кГц и 150 кГц для двух ориентаций. Это различие связано с несовпадением размеров. Используя формулу (4.10) получим для обеих микроконсолей  $f_0 \approx 166$  кГц. Таким образом, вычисленное значение собственной частоты колебаний консоли с хорошей точностью совпадает с измеренными значениями.

Данный метод не позволяет точно измерить добротность консоли, давая возможность лишь грубо оценить её по ширине резонанса. Такая оценка даёт  $Q \sim 100$ . Как показывают результаты работы [87], более точные измерения добротности без вакуумирования системы не добавляют информации о свойствах самой консоли, так как измеренная на воздухе добротность определяется не её качеством, а вязким трением о воздух. Амплитуда колебаний может быть оценена  $\sim 1$  мкм.

#### 4.5. Выводы

Освоена технология создания пьезоэлектрических микроконсолей на основе монокристаллических полупроводниковых гетероструктур GaAs/AlGaAs.

Разработаны и изготовлены слабонапряженные биморфные микроконсоли длиной 100 мкм с пьезоэлектрическим слоем GaAs и  $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$ , изгибом которых можно управлять за счёт поперечного пьезоэффекта. В статическом

режиме получено смещение конца микроконсоли 60 нм, в динамическом порядке 1 мкм. Резонансные частоты микроконсолей составляли 150 и 160 кГц.

Дана наглядная интерпретация эффекта анизотропии на основе кристаллической структуры GaAs. Дано теоретическое описание и экспериментально изучен эффект анизотропного движения микроконсолей, ориентированных вдоль ортогональных осей [110] и [110], однозначно доказывающий пьезоэлектрическую природу движения микроконсолей. Впервые измерен статический пьезоэффект в микроконсолях GaAs и AlGaAs.

Показана возможность создания МЭМС биморфного пьезоэлектрического двигателя на основе гетероструктур GaAs и AlGaAs. Такие двигатели могут быть использованы для создания и поддержания нанометрового зазора между электродами в МЭМС туннельном датчике смещения, необходимом для создания первичных датчиков физических величин.

## Глава 5. Микроэлектромеханический туннельный датчик для акселерометра

### 5.1. Введение

Одной из важных задач физики МЭМС является исследование возможности создания микромеханического туннельного акселерометра [100,101]. Ранее предпринимались попытки создать МЭМС туннельный акселерометр с использованием кулоновского двигателя для поддержания туннельного зазора между электродами [68].

В Главе 2 высказывалось предположение о том, что при миниатюризации датчика туннельное расстояние может существовать и без системы поддержания туннельного зазора, что даст возможность отказаться от двигателя и петли обратной связи. При уменьшении размеров системы уменьшается влияние термодрейфов, но растёт влияние термомеханического шума пропорционально уменьшению массы [7], поэтому вопрос о возможности реализации такой системы остаётся открытым.

Если взять за точку отсчёта эмиссионный датчик без обратной связи, описанный в Главе 2, то характерная длина консолей туннельного датчика должна составлять десятки микрометров. Такая длина позволит так же минимизировать изгиб консолей за счёт упругих напряжений при напылении металла. Для реализации такого датчика важно, чтобы материал, из которого он изготавливается, не имел внутренних напряжений, вызывающих изгиб консоли при её высвобождении. Как показали предварительные исследования, наименьшими внутренними напряжениями из доступных нам структур обладают гетероструктуры «кремний на изоляторе» (КНИ). Кроме того технологии обработки таких структур хорошо развиты, так как этот материал является одним из основных материалов микроэлектроники. В качестве способа создания нанометрового зазора между электродами была выбрана технология травления с помощью сфокусированного ионного пучка (Focused Ion Beam - FIB). Этот способ является доступным, технология резки кремния хорошо отработана и позволяет получить разрезы шириной в десятки нанометров.

Данная глава посвящена проверке перечисленных предположений. В ней приводится способ изготовления и конструкция макета «жесткого» МЭМС туннельного акселерометра, который не нуждается в управлении по петле обратной связи и сохраняет туннельное расстояние при ускорениях  $\geq 1g$ . Приводятся результаты измерений ВАХ туннельного зазора и с помощью теоретической модели туннельного тока с учётом сил изображения оценивается расстояние между электродами – порядка 3 нм. Исследуется чувствительность датчика к вибрации и теоретически оценивается его резонансная частота. Результаты исследований опубликованы в работе [A10].

## **5.2. Изготовление МЭМС структуры с туннельным зазором**

Исходя из соображений, изложенных во введении к Главе 5, была спроектирована структура макета акселерометра. Это микромост из КНИ длиной 20 мкм, который должен быть разрезан сфокусированным ионным пучком вблизи середины, чтобы минимизировать расхождение краёв разреза при напылении металла [67]. Чтобы при ускорении системы края разреза смещались друг относительно друга, полученные консоли должны иметь разные резонансные частоты. Для обеспечения этого условия на консолях предусмотрены боковые выступы, расположенные на разном расстоянии от основания и играющие роль утяжелителей, которые должны понизить собственную частоту одной из консолей. Данная структура не является оптимальной с точки зрения чувствительности к ускорению и выбрана из-за простоты реализации, исходя из существующих технологических возможностей. Задача оптимизации геометрии структуры должна решаться в ходе дальнейших работ по созданию датчиков в зависимости от конкретных требований к их характеристикам.

Макет датчика МЭМС был изготовлен на основе структуры кремний на изоляторе с толщиной слоя кремния и оксида кремния по 1 мкм. Последовательность операций при формировании МЭМС структуры показана на рис. 5.1. Сначала на поверхности структуры методом фотолитографии был сформирован фоторезистивный рисунок структуры в виде моста длиной 20 мкм и шириной 3 мкм между двумя квадратными площадками со стороной 0,5 мм. По

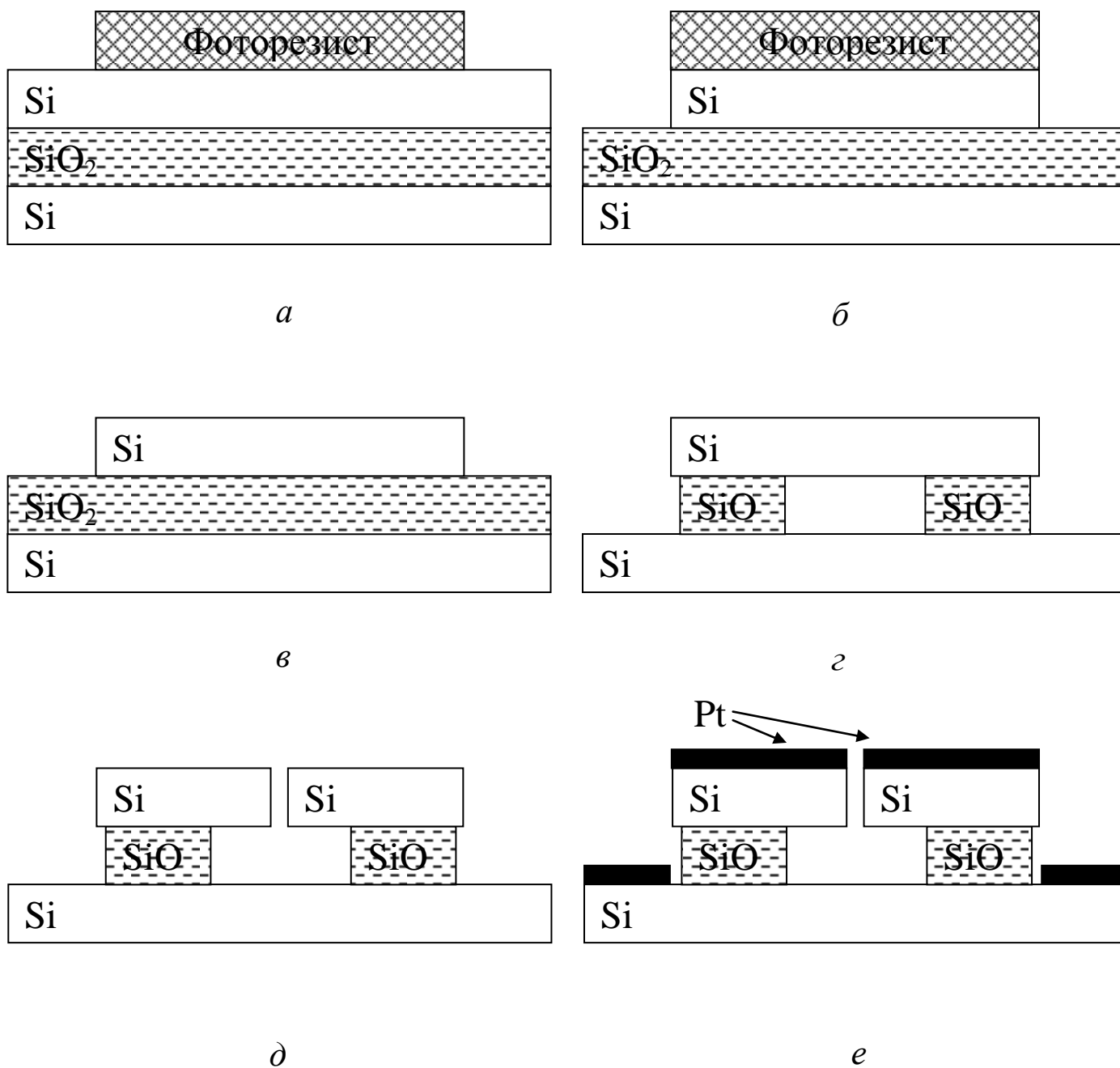


Рис. 5.1. Последовательность формирования МЭМС структуры датчика:

- а) - формирование рисунка фоторезистивной маски для травления в плазме;
- б) - плазмохимическое травление верхнего слоя кремния в смеси  $SF_6$  и  $CHF_3$ ;
- в) - травление фоторезиста в кислородной плазме;
- г) - селективное жидкостное травление слоя окиси кремния в растворе  $HF$ ;
- д) - разрезание балки сфокусированным ионным пучком;
- е) нанесение слоя Pt толщиной 50 нм.

бокам моста имелись симметричные относительно оси квадратные выступы утяжелители с литографическими размерами 3 мкм. Затем в этой фоторезистивной маске было проведено плазмохимическое травление верхнего слоя кремния в смеси SF<sub>6</sub> и CHF<sub>3</sub>. После этого фоторезистивная маска была удалена в кислородной плазме. Затем было произведено селективное вытравливание жертвенного слоя оксида кремния из под балки в растворе плавиковой кислоты. Изображение структуры на этой стадии получено в сканирующем электронном микроскопе Karl Zess Supra 50VP и приведено на рис. 5.2а. После этого полученные мосты были разрезаны поперек с помощью сфокусированного ионного пучка на установке Karl Zeiss Neon 40 EsB. На рис. 5.2б и 5.2в показан вид разреза.

Далее на структуру методом магнетронного распыления был нанесен слой платины толщиной 50 нм. На рис. 5.2г показан вид разреза после напыления металла. Платина была выбрана в качестве материала покрытия по причине ее химической стабильности в устройствах с электрическими контактами. Другие материалы контактов при работе на воздухе могут подвергаться окислению, что приводит к нестабильности тока и возможной деградации туннельного контакта.

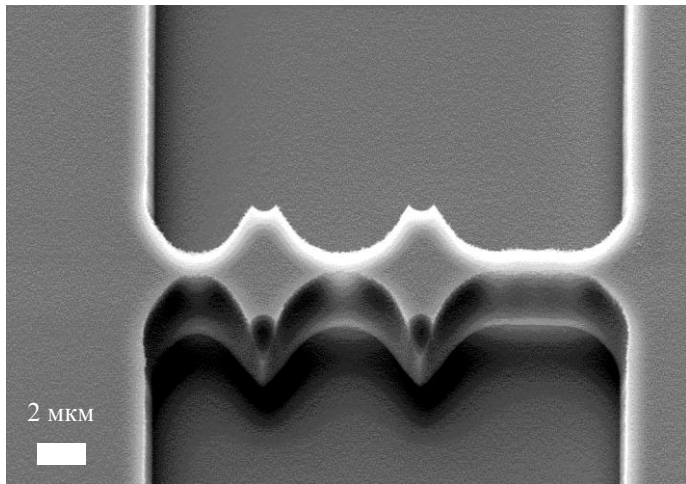
Для оценки частоты низшей моды полученной микроконсоли воспользуемся приближенной формулой для консоли с расширением на конце (Г-образной) [102]:

$$f_{\sigma} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{L^3(m_b + 0,2357 m_a)}}, \quad (5.1)$$

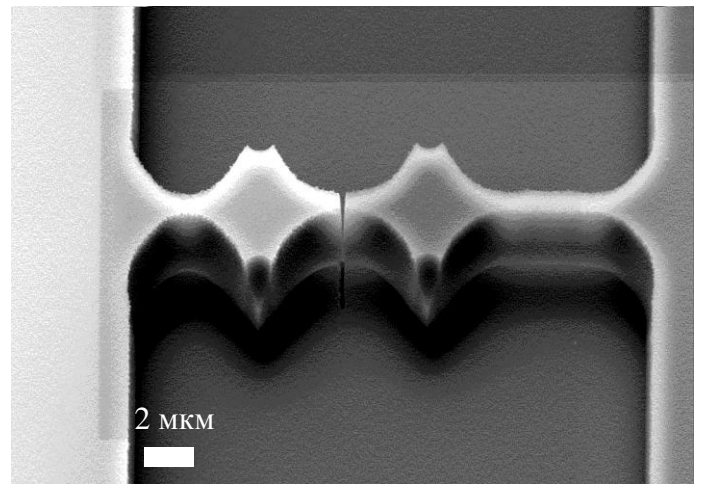
где  $L = L_a + L_b / 2$ ,  $I = \frac{d_a t^3}{12}$ ,  $m_a = d_a L_a t \rho$ ,  $m_b = d_b L_b t \rho$ ,

модуль Юнга кремния  $E=160$  ГПа,  $\rho=2330$  кг/м<sup>3</sup>, толщина консоли  $t=1$  мкм, длина консоли  $L_a=12$  мкм, длина расширения  $L_b=3$  мкм, ширина консоли  $d_a=1$  мкм, ширина расширения  $d_b=9$  мкм. Подставив эти данные в формулу (1) получим  $f_0=2,5$  МГц. Это значение следует воспринимать как грубую оценку, так как формула написана для прямоугольной консоли с прямоугольным расширением, тогда как реальная консоль имеет более сложную форму.

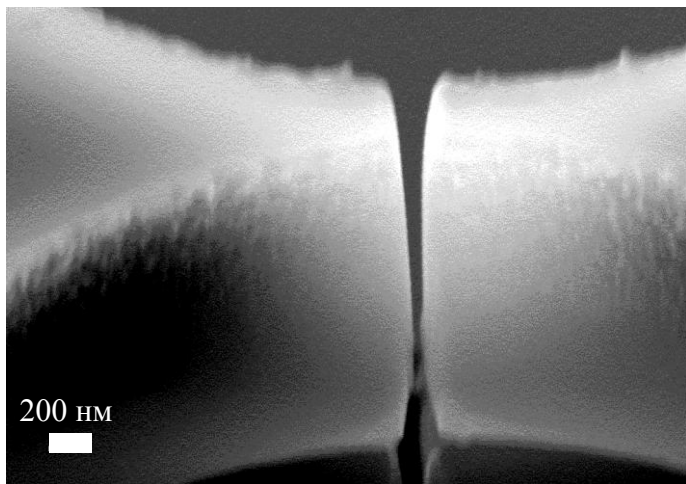




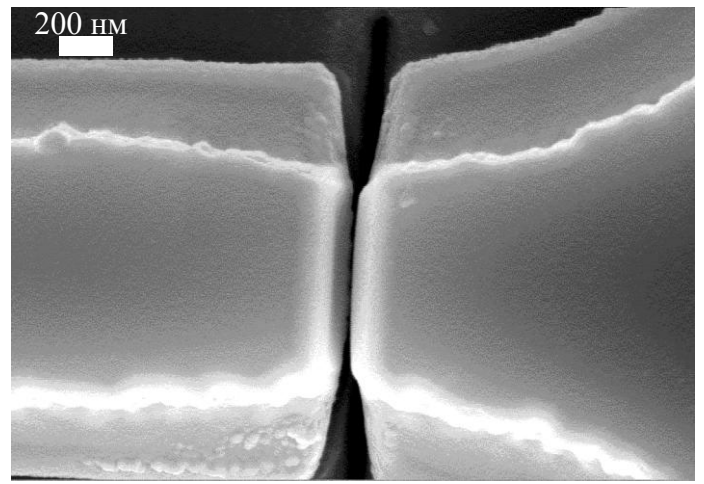
*a*



*б*



*в*



*г*

Рис.5.2. Изображение структуры полученное в сканирующем электронном микроскопе Karl Zess Supra 50VP: а) - до разрезания моста, б) - и в) - после разрезания моста (различаются масштабом), г) вид сверху после напыления платины.

### 5.3. Исследование характера токопереноса через зазор в МЭМС на основе КНИ

Вольтамперная характеристика данной структуры измерялась с помощью прибора Keithley 4200. Для исключения влияния тока утечек на результаты измерений было проведено измерение тока утечки на структуре с удаленной (сломанной) балкой. В отсутствие балки ток между контактными площадками не регистрировался на уровне  $10^{-12}$  А. На рис. 5.3 показана ВАХ датчика в полулогарифмических осях. Эта ВАХ представляет собой характеристику туннельного промежутка между платиновыми электродами, поскольку измеряемые токи много больше  $10^{-12}$  А. По наклону этой ВАХ можно оценить расстояние между электродами. Для этого воспользуемся формулой для туннельного тока в плоскопараллельном контакте с учетом сил изображения [9]. В удобных для расчета единицах плотность тока пропорциональна:

$$j \propto \frac{1}{\Delta s^2} \{ \varphi \exp[-1,025 \Delta s \varphi^{1/2}] - (\varphi + V) \exp[-1,025 \Delta s (\varphi + V)^{1/2}] \}, \quad (5.2)$$

где  $\Delta s = s_2 - s_1$ ,

$$\varphi = \varphi_0 - \frac{V}{2s} (s_1 + s_2) - \frac{5,75}{s_2 - s_1} \ln \left( \frac{s_2 (s - s_1)}{s_1 (s - s_2)} \right),$$

$$s_1 = \frac{6}{\varphi_0}, \quad s_2 = s \left[ 1 - \frac{46}{3\varphi_0 s + 20 - 2Vs} \right] + s_1, \quad \text{для } V < \varphi_0$$

$\varphi_0 = 5,32$  эВ – работа выхода электрона из платины,  $s$  – ширина зазора в ангстремах. Подставляя в эту формулу значение  $s = 28 \text{ \AA}$ , получим зависимость, показанную линией на рис. 5.3, которая достаточно хорошо описывает экспериментальную ВАХ. Следовательно, ток в зазоре имеет туннельный характер, расстояние между электродами может быть оценено как 2,8 нм.

### 5.4. Исследование электромеханических свойств МЭМС с туннельным зазором

Полученный туннельный зазор может обладать чувствительностью к вибрации за счет подвижности электродов. В целях исключения возможности

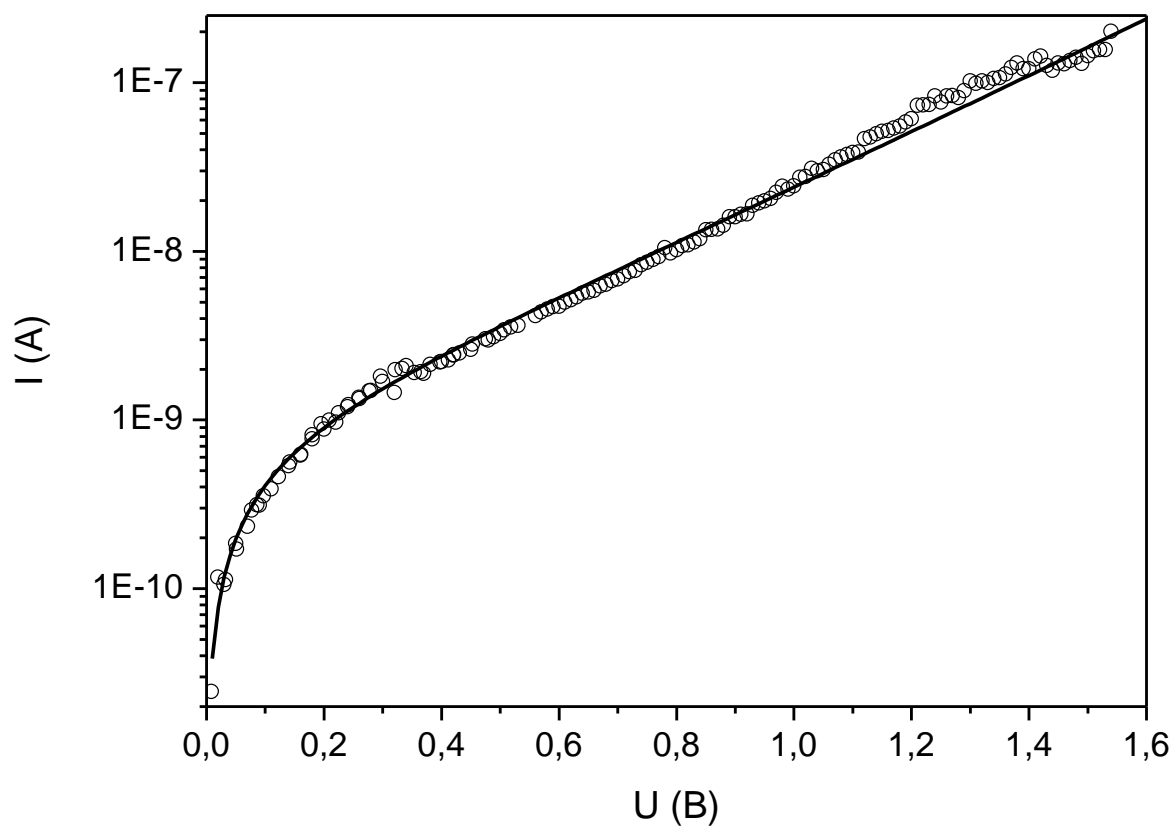


Рис. 5.3. ВАХ туннельного зазора: кружки – данные измерений, линия – расчет для ширины туннельного зазора 2,8 нм.

получения ложного сигнала от электромагнитной наводки из цепи питания вибростенда, были проведены качественные исследования чувствительности датчика к вибрации. Для этого датчик приклеивался к поверхности металлического акустического резонатора звукового диапазона акустических колебаний. Производилось ударное возбуждение механических колебаний в резонаторе путем нанесения по нему ударов стальным бойком. Ток фиксировался цифровым осциллографом. Характерный вид полученного сигнала показан на рис. 5.4. На рис. 5.5 показан спектр полученного сигнала. Видно, что ряд низших мод резонатора имеют резонансные частоты 2109 Гц, 4218 Гц и 5625 Гц соответственно.

Для того, чтобы уменьшить наводки, количественные измерения порога обнаружения датчика проводились на экранированном вибростенде. Качество экранировки проверялось путем изменения механического коэффициента связи датчика с вибростендом. В отсутствие механической связи сигнал отсутствовал. Для обеспечения механического коэффициента связи близкого к единице корпус датчика приклеивался к вибростенду. На рис. 5.6 показана картина сигнала, наблюдавшаяся на экране спектроанализатора. На низшей механической резонансной частоте вибростенда, равной 3,17 кГц датчик имеет порог обнаружения порядка  $2,2 \text{ g/Гц}^{1/2}$  (напряжение смещения  $U = 0,657 \text{ В}$ ). Добротность этого резонанса  $Q \sim 24$ . Вне механических резонансов вибростенда сигнал был ниже уровня шумов. Вышеприведенный порог обнаружения является характеристикой системы датчик и измерительная система. Измерения чувствительности и уровня шумов производились при помощи цифрового спектроанализатора. Измерение разрешающей способности датчика на более высоких частотах было невозможно из-за ограничения, связанного с полосой усилителя приблизительно равной 10 кГц, что много ниже резонансной частоты самого датчика – 2,5 МГц, поэтому измерения на одной частоте 3,17 кГц вполне достаточно, так как на низких частотах вдали от резонанса чувствительность слабо зависит от частоты. Измерения на других резонансных частотах вибростенда, на которых сигнал так же выше шума, не дают новой информации о самом датчике, так как так же далеки от его резонанса.

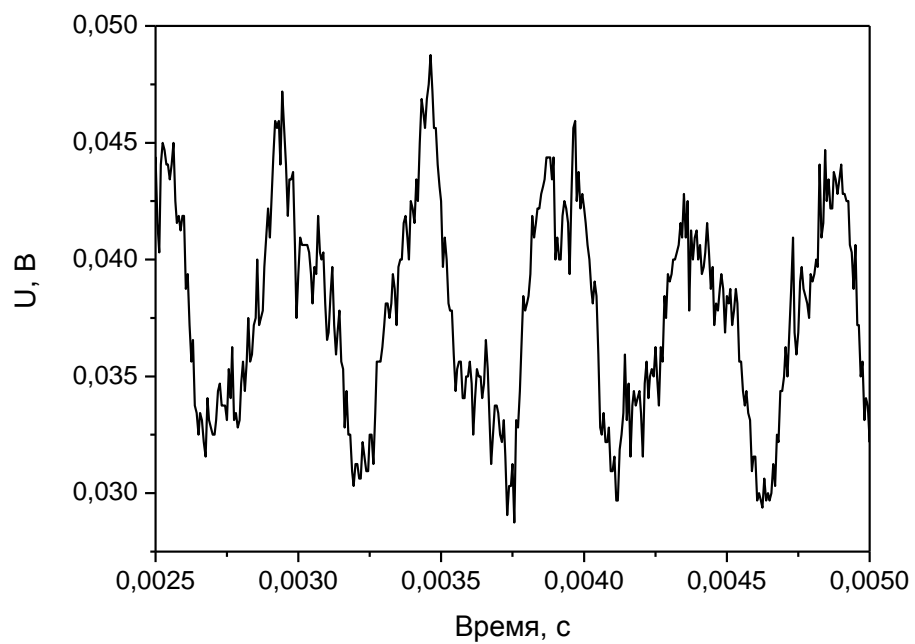


Рис. 5.4. Сигнал регистрируемый осциллографом при ударном возбуждении механического резонатора.

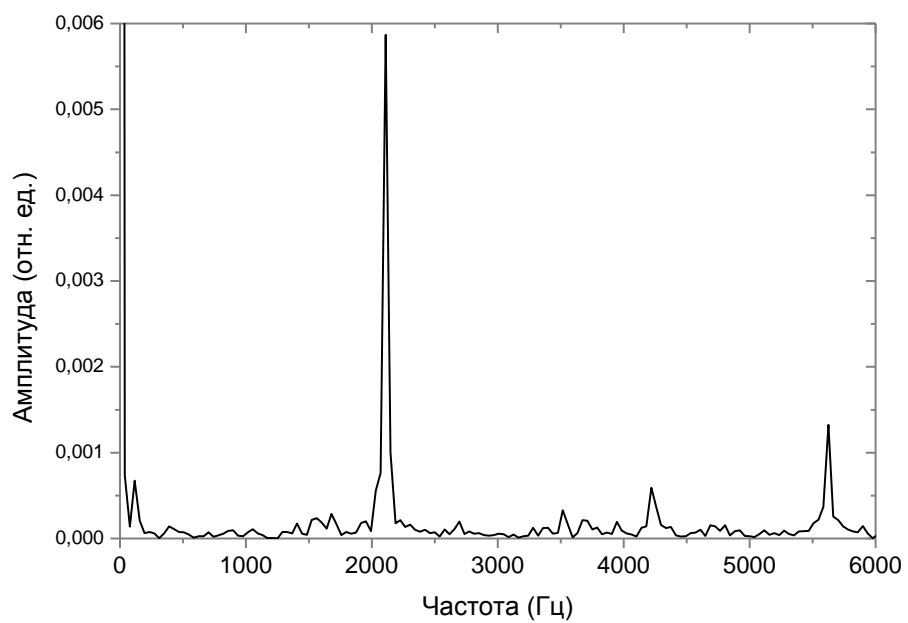


Рис. 5.5. Фурье-спектр колебаний механического резонатора.

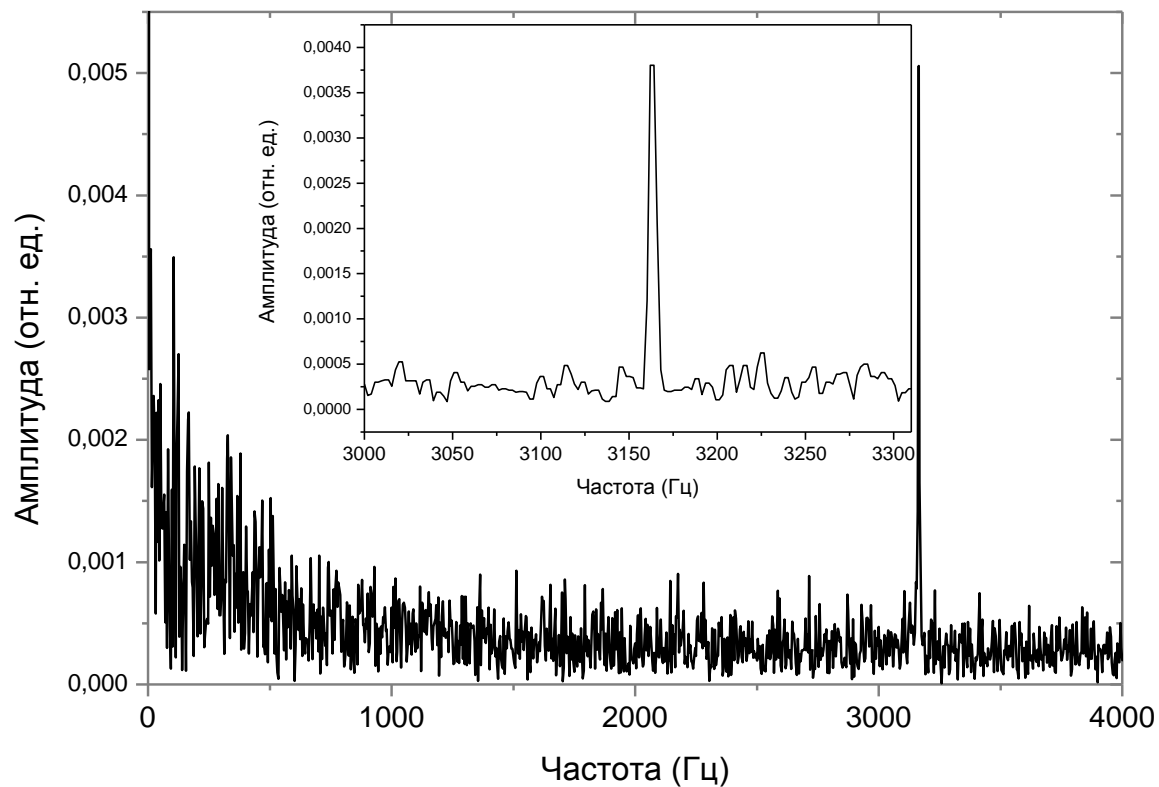


Рис. 5.6. Фурье-спектр сигнала при возбуждении вибростенда на частоте 3,17 кГц.  
Вставка – область спектра вблизи резонанса вибростенда.

Проведем сравнение с результатами главы 2, используя простую модель акселерометра, описанную в главе 1. Минимально измеримому смещению  $x_{\min}$  соответствует минимально измеримое ускорение  $a_{\min}$ . Поэтому уравнение (1.3) запишем в виде:

$$a_{\min} = 4\pi^2 f_0^2 x_{\min}. \quad (5.3)$$

Величина  $x_{\min}$  для нашего датчика определяется туннельным током и системой его регистрации, а от величины инерционной массы и жесткости пружины не зависит. Проведем мысленный эксперимент по увеличению инерциальной массы датчика, помещая на конец микроконсоли дополнительную точечную массу так, чтобы его резонансная частота стала равной  $f_{01}=4$  кГц. Используя полученные результаты измерений  $2,2 \text{ г/Гц}^{1/2}$  для  $f_0=2,5$  МГц и формулу (5,3), получим разрешение  $5,7 \times 10^{-6} \text{ г/Гц}^{1/2}$  для  $f_{01}=4$  кГц. То есть, если уменьшить собственную частоту исследуемого МЭМС датчика до 4 кГц, то его разрешение увеличится до  $5,7 \times 10^{-6} \text{ г/Гц}^{1/2}$ . Эта оценка хорошо совпадает с разрешением туннельного датчика в главе 2, равным  $10^{-5} \text{ г/Гц}^{1/2}$  на частоте 4 кГц. Собственная добротность МЭМС датчика при этом не учитывалась. Следовательно, исследуемый МЭМС датчик, имеющий тот же усилитель, что и в Главе 2, имеет значительный потенциал улучшения разрешения при уменьшении жёсткости.

## 5.5. Выводы

Впервые экспериментально продемонстрирована возможность создания микроэлектромеханического туннельного датчика для акселерометра без актуатора и обратной связи по току. Технология реализована для структуры кремний на изоляторе.

Изготовлен макет «жёсткого» туннельного акселерометра на основе МЭМС, где нанометровый туннельный зазор создан путём разрезания кремниевой балки сфокусированным ионным пучком с последующим напылением платины на края полученного разреза. На частоте до 3 кГц разрешающая способность акселерометра оказалась не хуже  $2,2 \text{ г/Гц}^{1/2}$ . Частота низшей моды механических колебаний датчика находится в диапазоне нескольких МГц.



## Приложение 1. Технология критического высушивания

При высвобождении микроконсолей путем селективного жидкостного травления жертвенного слоя возникает проблема прилипания микроконсолей к подложке. При обычной сушке находящаяся под консолью жидкость притягивает консоль к подложке за счёт капиллярных сил, в результате чего консоль касается подложки и прилипает к ней за счёт сил Ван-дер-Ваальса. Эта проблема решается с помощью технологии так называемой «критической» сушки. Суть метода состоит в том, чтобы сделать коэффициент поверхностного натяжения жидкости равным нулю. Для этого нужно перевести жидкость в критическое состояние. Это достигается после жидкостного травления и промывания в воде путем следующих операций:

1. Замена воды на ацетон путем промывания образца в ацетоне. Вода растворима в ацетоне.
2. Замена ацетона на жидкий углекислый газ. Для этого образец, залитый ацетоном, помещается внутрь установки критической сушки CPD-13200 фирмы SPI, показанной на рис. П.1. Она представляет собой цилиндр высокого давления с водяной рубашкой, необходимой для установления нужной температуры. После герметизации цилиндра в него при температуре 20° С заливается жидкий углекислый газ. Ацетон растворяется в жидком CO<sub>2</sub>. Устройство промывается жидким CO<sub>2</sub> для удаления ацетона. Это состояние соответствует точке А на рис. П.2.
3. Переход в критическое состояние. Осуществляется путем изохорного нагрева углекислоты горячей водой, протекающей по водяной рубашке. При 32°С углекислый газ переходит в критическое состояние, его коэффициент поверхностного натяжения становится равным нулю. Это состояние соответствует точке В на рис. П.2.
4. Изотермическое стравливание газа, проводится медленно, через игольчатый клапан, чтобы не допустить падения температуры и выпадения росы. Давление снижается до атмосферного. Это состояние соответствует точке С на рис. П.2. После этого установка охлаждается до комнатной температуры. Далее крышка открывается и образец извлекается.



Рис. П.1. Вид установки для критической сушки CPD-13200 фирмы SPI™.

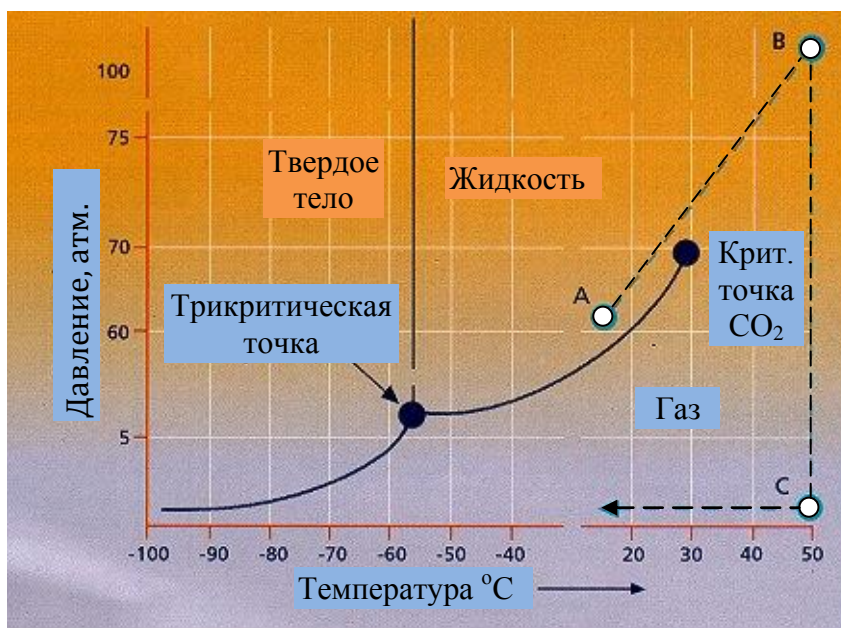


Рис. П.2. Фазовая диаграмма для углекислого газа.

## **Приложение 2. Методика измерения разрешения акселерометра**

Методика измерения разрешения акселерометра состоит в следующем:

Датчик акселерометра приклеивается к поверхности вибростенда для обеспечения акустической связи датчика с вибростендом. Вибростенд заранее откалиброван. Амплитуда и частота колебаний вибростенда задается путём задания амплитуды и частоты подаваемого на вибростенд напряжения. Таким образом задаётся ускорение датчика. Электронный блок акселерометра регистрирует ток датчика в режиме реального времени. Сигнал, пропорциональный току датчика, поступает на спектроанализатор. Фурье-спектр сигнала наблюдается на экране спектроанализатора. Уровень сигнала сравнивается с уровнем шума на экране спектроанализатора. Путём изменения амплитуды напряжения питания вибростенда определяется минимально обнаружимое ускорение, при котором уровень сигнала равен уровню шума.

## Заключение

В диссертации получены следующие основные результаты:

1. Показано, что максимальная чувствительность акселерометра в режиме регистрации эмиссионного тока достигается при квазиплоских, а не игольчатых электродах.
2. Изготовлен датчик акселерометра, который может работать в двух режимах протекания тока – туннельном и эмиссионном, с разрешением  $\sim 10^{-4} g/\sqrt{\Gamma\zeta}$  в первом и  $\sim 10^{-3} g/\sqrt{\Gamma\zeta}$  во втором режиме в диапазоне частот до 6 кГц. В эмиссионном режиме характерные расстояния между электродами  $\sim 100$  нм, напряжения смещения  $\sim 100$  В и ток  $\sim 100$  нА. Такой рабочий режим в лабораторных условиях сохраняется долгое время (десятки минут) при отключенной обратной связи.
3. Разработаны методы управления изгибом микроконсолей. При напылении различных металлов (Ta, Cr, Ni) на микроконсоль изменяется направление и радиус ее изгиба, причем, обратимым образом. Для биморфной микроконсоли есть дополнительная возможность прецизионного управления изгибом путем изменения ее температуры. Данные методы могут быть использованы для получения контролируемого субмикронного зазора между электродами в различных первичных сенсорах.
4. Исследовано проявление поперечного пьезоэлектрического эффекта в микроконсолях на основе GaAs и AlGaAs. На основе эпитаксиальных структур GaAs/AlGaAs(001) сформированы биморфные пьезоэлектрические микроконсоли, ориентированные вдоль ортогональных направлений  $[110]$  и  $[1\bar{1}0]$ . При подаче постоянного смещения происходит изгиб микроконсолей в противоположных направлениях. Смещение концов микроконсолей длиной 100 мкм достигает  $\sim 60$  нм в статическом режиме и  $\sim 1$  мкм вблизи резонансной частоты  $f \approx 166$  кГц.
5. Создан макет микроэлектромеханического туннельного датчика для акселерометра без активной системы поддержания величины туннельного тока. Туннельный зазор сформирован путем разрезания моста из кремния в

структуре КНИ сфокусированным ионным пучком и последующего напыления платины на электроды. Реализована конструкция с относительно жёсткими микроконсолями-электродами, имеющая частоту низшей моды механических колебаний  $\sim 2$  МГц. В диапазоне частот до единиц кГц разрешение составило  $2,2 \text{ g}/\sqrt{\text{Гц}}$ .

## Список цитированной литературы

1. Feynman Richard P. There's Plenty of Room at the Bottom //Caltech Engineering and Science. – V.23. – 5. – 1960. – P.22-36.
2. Kim J.M. Electrostatically driven low-voltage micromechanical RF switches using robust single-crystal silicon actuators /J.-M. Kim, S. Lee, J.-H. Park, C.-W. Baek, Y. Kwon and Y.-K. Kim //J. Micromech. Microeng. – 2010. – V.20. – N.9. – P.095007.
3. Verger A. Sub-hundred nanosecond electrostatic actuated RF MEMS switched capacitors /A. Verger, A. Pothier, C. Guines, A. Crunteanu, P. Blondy, J.-C. Orlianges, J. Dhennin, A. Broue, F. Courtade and O. Vendier //J. Micromech. Microeng. – 2010. – V.20. – N.6. – P.064011.
4. Телец В.А. Микроэлектромеханические инерционные преобразователи физических величин: типовые варианты исполнения. //МСТ. – 2004. – №2. – С.2-5.
5. Ilic B. Attogram detection using nanoelectromechanical oscillators /B. Ilic, H. G. Craighead, S. Krylov, W. Senaratne, C. Ober, and P. Neuzil //J. Appl. Phys. – 2004. – V.95. – No.7. – P.3694.
6. Liu C.-H. A high-precision, wide-bandwidth micromachined tunneling accelerometer. /C.-H. Liu and T. W. Kenny. //J. of Microelectromech. System, - 2001. – 10. - P.425-433.
7. Gabrielson T. B. Mechanical-thermal noise in micromachined acoustic and vibration sensors. //IEEE Transactions on Electron Devices. – 1993. – 40. - P.903-909.
8. Физические величины /Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова, - М. Энергоатомиздат 1991. 1232с.
9. Simmons J. G. Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film //J. Appl. Phys. – 1963. – V.34. - P.1793-1803.
10. Lee I. Development and analysis of thevertical capacitive accelerometer /I. Lee, G. H. Yoon, J. Park, S. Seok, K. Chun, K. Lee //Sensors and Actuators A. – 2005. – V.119. – P.8-18.

11. Chollet F. A (not so) short introduction to MEMS /F. Chollet, H. Liu,   
//(<http://memscyclopedia.org/introMEMS.html> (18.2.2008))
12. Beeby S. MEMS mechanical sensors /S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N.White,   
//Artech house inc.,USA, - 2004,
13. Вopилкин Е. А. Возможности микроэлектромеханических систем //HMCT –   
2009. - №1. – С.47-50.
14. Zorman C. Material Aspects of Micro- and Nanoelectromechanical Systems   
Springer Handbook of Nanotechnology. /Zorman C; Mehregany, //M. Springer-   
Verlag Berlin Heidelberg. – 2007. - P.299/
15. Вардан В. ВЧ МЭМС и их применение /В. Вардан, К. Виной, К. Джозе, //ИЦ   
“ТЕХНОСФЕРА”. – 2004. - 528 стр.
16. Ekinici K. L. Ultimate limits to inertial mass sensing based upon   
nanoelectromechanical systems /K. L. Ekinici, Y. T. Yang, and M. L. Roukes // J.   
Appl. Phys. – 2004. – V.95. – 5. – 2682.
17. Guangtao D. MEMS magnetic field sensor based on silicon bridge structure /D.   
Guangtao, C. Xiangdong, L. Qibin, L. Hui, G. Huihui//Journal of Semiconductors. –   
2010. – V.31. – No.10. – P.104011.
18. Zachary J. Aluminum nanocantilevers for high sensitivity mass sensors /J. D.   
Zachary and A. Boisen //Appl. Phys. Lett. – 2005. – V.87. – No.1. – P.013102.
19. Ilic B. Virus detection using nanoelectromechanical devices /B. Ilic, Y. Yang, and   
H. G. Craighead //Appl. Phys. Lett. – 2004. – V.85. – No.13. - P.2604.
20. Yamaguchi H. Application of InAs Freestanding Membranes to Electromechanical   
Systems /H. Yamaguchi, R. Dreyfus, S. Miyashita and Y. Hirayama //Jpn. J. Appl.   
Phys. – 2002. – V.41. – P.2519-2521.
21. Palego C. Robustness of RF MEMS Capacitive Switches With Molybdenum   
Membranes / C. Palego, J. Deng, Z. Peng, S. Halder, J.C.M. Hwang, D.I. Forehand,   
D. Scarbrough, C.L. Goldsmith, I. Johnston, S.K. Sampath, A. Datta //IEEE   
Transactions on Microwave Theory and Techniques. - 2009. - V.57. – No.12. -   
P.3262 – 3269.



22. Koppaka, S.B. Release processing effects on laser repair of stiction-failed microcantilevers. //Journal of Microelectromechanical Systems. – 2005. – V.14. – No.2. – P.410 – 418.
23. Lubber S.M. Nanometre spaced electrodes on a cleaved AlGaAs surface. / S. M. Lubber, S. Strobel, H.-P. Tranitz, W. Wegscheider, D. Schuh, M Tornow //Nanotechnology. – 2005. – V.16(8). - P.1182-1185.
24. Krahn R. Nanoparticles and nanogaps: controlled positioning and fabrication /R. Krahn, T. Dadoosh, Y. Gordin, A. Yacoby, H. Shtrikman, D. Mahalu, J. Sperling, I. Bar-Joseph //Physica E. – 2003. – V.17. – P.498-502.
25. Harrer, S. Technology Assessment of a Novel High-Yield Lithographic Technique for Sub-15-nm Direct Nanotransfer Printing of Nanogap Electrodes / S. Harrer, S. Strobel, G. Penso Blanco, G. Scarpa, G. Abstreiter, M. Tornow, P. Lugli //IEEE Transactions on Nanotechnology.- 2009. – V.8. – 6. – P.662-670.
26. Prinz V.Ya. Elastic silicon-film-based nanoshells: formation, properties, and application /V.Ya.Prinz, S.V.Golod //Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2006. – V.47(6). – P.868-878.
27. Prinz V.Ya. Precise, molecularly thin semiconductor shells: from nanotubes to nanocorrugated quantum systems //Phys. Stat. Sol. (b). – 2006. – V.243(13). – P.3333-3339.
28. Prinz V.Ya. Novel technique for fabrication of one- and two-dimensional systems /V.Ya. Prinz, V.A. Seleznev, A.K. Gutakovsky //Surface Science. – 1995. – V.331/362. - P.886–889
29. Принц В.Я. Упругие нанооболочки на основе кремниевых пленок: формирование, свойства и практическое применение /В.Я.Принц, С.В.Голод, //ПМФТ. – 2006. – V.47(6). – С.114-128.
30. Prinz V.Ya. Precise semiconductor, metal and hybrid nanotubes and nanofibers. In: "Nanoengineered Nanofibrous Materials" //NATO Science Series, II. Mathematics, Physics and Chemistry. – 2004. – V.169. P.47-63.
31. Prinz V.Ya. Precise semiconductor nanotubes and nanoshells fabricated on (110) and (111) Si and GaAs //Physica E. – 2004. – V.23. – P.260-268.

32. Prinz V. Ya. Precise semiconductor nanotubes and nanocorrugated quantum systems //Physica E. – 2004. – V.24. – P.54-62.
33. Принц В.Я. Самоформирующиеся полупроводниковые микро- и нанотрубки /В.Я.Принц, В.А.Селезнев, А.В.Чеховский //Микросистемная техника. – 2003. - № 6. - С.10-16.
34. Prinz A.V. Application of semiconductor micro- and nanotubes in biology /A.V. Prinz, V. Ya Prinz //Surface Science. – 2003. – V.911. – P.532-535.
35. Принц В.Я. Трехмерные самоформирующиеся наноструктуры на основе свободных напряженных гетеропленок //Известия ВУЗов, серия: Физика. – 2003. – Т.46. - С.35-43.
36. Vorob'ev A. B. Directional rolling of strained heterofilms /A. B. Vorob'ev and V. Ya. Prinz //Semicond. Sci. Technol. – 2002 – V.17. – P.614 – 616.
37. Prinz V. Ya. Free-standing and overgrowth InGaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays. /V. Ya. Prinz, V. A. Seleznev, A. K. Gutakovsky, A. V. Chehovskiy, V. // Physica E. – 2000. – V.6. – P.828 – 831.
38. Fernández-Martínez I. Parallel nanogap fabrication with nanometer size control using III–V semiconductor epitaxial technology /I. Fernández-Martínez, Y. González, F. Briones //Nanotechnology. – 2008. – V.19. – P.275302.
39. Kiefer T. Large arrays of chemo-mechanical nanoswitches for ultralow-power hydrogen sensing /T Kiefer, A Salette, L G Villanueva and J Brugger //J. Micromech. Microeng. - 2010 – V.20. - N. 10. – P.105019.
40. Grade, J.D. Design of large deflection electrostatic actuators / J.D.Grade, H.Jerman, T.W. Kenny //Journal of Microelectromechanical Systems. – 2003. – V.12. – No.3. - P.335–343.
41. Hassanzadeh, A. Design considerations for basic MEMS electrostatic actuators /41st Southeastern Symposium on System Theory, SSST 2009: Proceedings, March 15-17, 2009. – P. 271–273.
42. Zine-El-Abidine I. Tunable radio frequency MEMS inductors with thermal bimorph actuators /I. Zine-El-Abidine, M. Okoniewski, J. G. McRory //J. Micromech. Microeng. – 2005. – V.15. – No.11. - P.2063.

43. Kah How Koh Development of CMOS MEMS thermal bimorph actuator for driving microlens / Kah How Koh, C. Lee, J.-H. Lu, C.-C. Chen //International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics: Conference Publications, Istanbul, Turkey, August 8-11, 2011. – P.153–154.
44. Conway N.J. A strain amplifying piezoelectric MEMS actuator /N. J Conway, Z. J. Traina and S.-G. Kim //J. Micromech. Microeng. – 2007. - V.17. - P.781–787.
45. Ongkodjojo, A. Micromachined III-V multimorph actuators for MOEMS applications - concept, design, and model /A. Ongkodjojo, F.E.H. Tay, R. Akkipeddi, //Journal of Microelectromechanical Systems. – 2005. – V.14. – No.3. P.610-618.
46. Rebeiz G M RF MEMS Theory, Design and Technology – 2003. - Hoboken NJ: Wiley.
47. Rebeiz G M Tuning in to RF MEMS /G. Rebeiz, M. Entesari, K.Reines //IEEE Microw. Mag. – 2009. – V.10. – P.55–72.
48. ГОСТ 18955-73 Акселерометры низкочастотные линейные. Термины и определения //1973 – Издательство стандартов – Москва.
49. DeVoe D.L. A fully surface-micromachined piezoelectric accelerometer /D.L.DeVoe and A.P.Pisano //Proc. Solid-State Sensors and Actuators. – 1997. - P.1205-1208.
50. DeVoe D.L. Surface micromachined piezoelectric accelerometers (PiXLs) /D. L. DeVoe, and A. P. Pisano //J. Microelectromech. Syst. – 2001. - V.10. - No.2. - P.180-186.
51. deReus R. Fabrication and  $\gamma$  characterization of a piezoelectric accelerometer /R.deReus, J.O.Gullov, and P.R.Scheeper //J. Micromech. Microeng. – 1999. - V.9. - P.123-126.
52. Tadigadapa S. Piezoelectric MEMS sensors:state-of-the-art and perspectives / S.Tadigadapa and K. Mateti //Meas. Sci. Technol. – 2009. – V.20. – P.092001.
53. Plaza J. Piezoresistive accelerometers for MCM package /J. Plaza, A. Collado, E. Cabruja, and J. Esteve, //J. Microelectromech. Syst. – 2002. - V.11. No.6. - P.794–801.

54. Partridge A. A High-Performance planar piezoresistive accelerometer /A.Partridge, J.K.Reynolds, B.W.Chui, E.M.Chow, A.M.Fitzgerald, L.Zhang, S.R.Cooper and T.W.Kenny //Proc. Solid-State Sensors and Actuators Workshop (Hilton Head'98) - 1998. - P.59-64.
55. Lim M.K. A micromachined piezoresistive accelerometer with high sensitivity: design and modelling /M.K.Lim, H.Du, C.Su, W.L.Jin //Microelectronic Engineering. – 1999. – V.49. - P.263-272.
56. Xue C. Development of a novel two axis piezoresistive micro accelerometer based on silicon /C. Xue, S. Chen, H. Qiao, W. Zhang, J. Xiong, B. Zhang, and G. Zhang, //Sens. Lett. – 2008. - V.6. - P.149-158.
57. GURALP Broadband Seismometer, Guralp Systems Ltd. U.K.
58. Chau K.L. An integrated force-balanced capacitive accelerometer for low-g applications. /K.L.Chau, S.R.Lewis, Y.Zhao, R.T.Howe, S.F.Bart, and R.G.Marcheselli //Proc. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'95). - 1995. - P.593-596.
59. Bernstein J.W. Low-noise MEMS vibration sensor for geophysical application /J.W.Bernstein, R.Miller, W.Kelley, and P.Ward //Proc. Solid-State Sensors and Actuators Workshop (Hilton Head'98). – 1998. P.55-58.
60. Готлиб В.М. Высокочувствительный кварцевый акселерометр для измерения малых ускорений космических аппаратов /Готлиб В.М., Евланов Е.Н., Зубков Б.В., Линкин В.М., Манукин А.Б., Подколзин С.Н., Ребров В.И. //Космические исследования. – 2004. - Т.42. - №1. - С.57-62.
61. Chae J. A monolithic three-axis micro-g micromachined silicon capacitive accelerometer /J. Chae, H. Kulah, and K. Najafi J. //Microelectromech. syst. 2005. - V.14. - No.2. - P.235-242.
62. Farahani H. Design, fabrication and analysis of micromachined high sensitivity and 0% cross-axis sensitivity capacitive accelerometers /H. Farahani, J. K. Mills, and W. L. Cleghorn //Microsyst. Technol. – 2009. - V.15. - P.1815-1826.
63. Biswas K. MEMS capacitive accelerometers /K. Biswas, S. Sen, and P. K. Dutta //Sens. Lett. – 2007. - V.5. - P.471-484.

64. Boser B.E. Surface micromachined accelerometers /B.E.Boser and R.T.Howe //IEEE J. Solid-State Circuits – 1996. - V.31. - No.3. - P.366-375.
65. Scanning Tunneling Microscopy and Related Methods /Edited by R.J.Behm, N.Garcia, H.Rohrer. – Kluwer Academic Publishers, 1990 – 525c.
66. Tahmasebi A. Studying of a Tunneling Accelerometer with Piezoelectric Actuation and Fuzzy Controller /A. Tahmasebi M.Y. Kanani, B. Tousi, A. Motalebi, G. Rezazadeh //Sensors & Transducers Journal. – 2008. - V.89. – No.3. - P.17-29.
67. Mahameed R. Dual-beam actuation of piezoelectric AlN RF MEMS switches monolithically integrated with AlN contour-mode resonators /R. Mahameed, N. Sinha, M.B. Pisani and G. Piazza //J. Micromech. Microeng. – 2008. – V.18. – N.9. – P.105011.
68. Dong H. A novel out-of-plane MEMS tunneling accelerometer /H. Dong, Y. Jia, Y. Hao, S. Shen //Sensors and Actuators A. – 2005. – V.120. - P.360–364.
69. Daniel J.H. A microaccelerometer structure fabricated in silicon-on-insulator using a focused ion beam process. /J.H.Daniel, D.F.Moore //Sensors and Actuators – 1999. – V.73. - P.201-209.
70. Liu C.H. Characterization of high-sensitivity micromachined tunneling accelerometer with micro-g resolution. /C.H.Liu, A.M.Barzilai, J.K.Reynolds, A.Partridge, T.W.Kenny, J.D.Grade, H.K.Rockstad //J. of Microelectromech. Systems – 1998. – V.7. – No.2. - P.235-243.
71. Boisen A. Cantilever-like micromechanical sensors /A. Boisen, S. Dohn, S. Sylvest Keller, S. Schmid and M. Tenje //Rep. Prog. Phys. – 2011. – V.74. – P.036101.
72. Dragoman D. Micro/nano-optoelectromechanical systems /D. Dragoman, M. Dragoman //Progress in Quantum Electronics. – 2001. – V.25. – P.229–290.
73. Zavracky P.M. Design and process considerations for a tunneling tip accelerometer. /P.M.Zavracky, B.McClennand, K.Warner, J.Wang, F.Hartley, B.Dolgin //J. Micromech. Microeng. – 1996. - V.6. - P.352-358.
74. McCord M.A. The micromechanical tunneling transistor. /M.A.McCord, A.Dana, R.F.W.Pease //J. Micromech. Microeng. – 1998. – V.8. - P.209-212.

75. Kubena B.L. A new miniaturized surface micromachined tunneling accelerometer. /B.L.Kubena, G.M.Atkinson, W.P.Robinson, F.P.Stratton //IEEE Electron Dev. Lett. – 1996. - V.17. – No.6. - P.306-308.
76. Vatannia S. Resonant tunneling displacement transducer /S. Vatannia, J.L.Schiano, G.Gildenblat, D.M.Ginsberg //IEEE Transactions on Electron Devices – 1998. – V.45. – No.7. - P.1616-1619.
77. Marques M.I. Modeling of a pressure sensor based on an array of wedge emitters /M.I.Marques, P.A.Serena, D.Nicolaescu, J.Itoh //Applied Surface Science – 1999. - V.146. - P.239-244.
78. Nicolaescu D. Modeling of the field emitter triode (FET) as a displacement/pressure sensor //Applied Surface Science – 1995. - V.87/88. - P.61-68.
79. Модинос А. Авто- термо- и вторично-электронная эмиссионная спектроскопия. – М.: Наука, 1990. 320с.
80. Туннельные явления в твёрдых телах /Под ред. Э. Бурштейна, С. Лундквиста. - М. Мир, 1973. – 424с.
81. Yamaguchi H. Excellent electric properties of free-standing InAs membranes. /H.Yamaguchi, R.Dreyfus, Y.Hirayama //Appl. Phys. Lett. – 2001. - V.78. - No.16. - P.2372-2374.
82. Nikishkov G.P. Finite element analysis of self-positioning microstructures and nanostructures. /G.P.Nikishkov, I.Khmyrova, V.Ryzhii //Nanotechnology – 2003. – V.14. - P.820-823.
83. Prack E.R. An introduction to process visualization in ESEM //Microscopy Research and Technique - V. 1993. – V.25. P.487-492.
84. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. - М.: Наука, 1965. 202с.
85. Kumada K. Characterization of electrical properties of micro-Schottky contacts on epitaxial lateral overgrowth GaN /K Kumada, T Murata, Y Ohno, S Kishimoto, K Maezawa, T Mizutani, N Sawaki //Japanese Journal of Applied Physics. – 2003. – V.42. – No.4B. – P.2250-2253.
86. Lai J. Optimization and performance of high-resolution micro-optomechanical thermal sensors. /J.Lai, T.Perazzo, Z.Shi, A.Majumdar //Sensors and Actuators A – 1997 – V.58. - P.113-119.

87. Abadal G. Electromechanical model of a resonating nano-cantilever-based sensor for high-resolution and high-sensitivity mass detection /G. Abadal, Z.J. Davis, B. Helbo, X. Borrísé, R. Ruiz, A. Boisen, F. Campabadal, J. Esteve, E. Figueras, F. Pérez-Murano, N. Barniol //Nanotechnology. - 2001. - V.12. - P.100-104
88. Jeon S. Instant curvature measurement for microcantilever sensor /S. Jeon, T. Thundat //Appl. Phys. Lett. – 2004. – V.85. – No.6. - P.1083-1084.
89. Masmanidis S.C. Multifunctional Nanomechanical Systems via Tunably Coupled Piezoelectric Actuation /S.C.Masmanidis, R.B.Karabalin, I.DeVlaminck, G.Borghs, M.R.Freeman, M.L.Roukes //Science. - 2007. - V.317. - P.780-783.
90. Kumar P. Fabrication of piezoelectric  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  microstructures /P. Kumar, L. Li, L. Calhoun, P. Bourdreaux, D. DeVoe //Sensors and Actuators A – 2004. – V.115. – No.1. - P.96-103.
91. Blencowe M. How to Strum a Nanobar //Science. – 2007. – V.10. – P.762-763.
92. Doll J.C. Aluminum nitride on titanium for CMOS compatible piezoelectric transducers /J. C. Doll, B. C. Petzold, B. Ninan, R. Mullapudi and B. L. Pruitt //J. Micromech. Microeng. – 2010. – V.20. – N.2. - P.025008.
93. Andreia A. AlN as an actuation material for MEMS applications: The case of AlN driven multilayered cantilevers /A. Andreia, K. Krupaa, M. Jozwika, P. Delobelleb, L. Hirsingerb, C. Goreckia, L. Nieradkoa, C. Meunier //Sensors and Actuators A. – 2008. – V.141. – No.2. – P.565–576.
94. Дж. Най. Физические свойства кристаллов. /Пер. с англ. – М. Мир. 1967. - 385с.
95. Adachi S. GaAs, AlAs and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ : Material parameters for use in research and device applications //J. Appl. Phys. – 1985. - V.58. - No.3. - P.R1-R30.
96. Hjort K. Gallium arsenide as a mechanical material /K. Hjort, J. Soderkvist, J.A. Schweitz. //J. Micromech. Microeng. - 1994. - V.4. - P.1-13.
97. Madelung O. Semiconductors: Data Handbook. 3<sup>rd</sup> edition. New York.: Springer-Verlag, 2003. - 691 p.
98. Brantley W.A. Calculated elastic constants for stress problems associated with semiconductor devices //J. Appl. Phys. - 1973. - V.44. - No.1. - P.534-535.

99. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов – 1973 – Москва – Энергия – 656 с,
100. Kordlar H. J. Modeling Open-Loop MEMS Tunneling Accelerometer Based on Circular Plate /H. J. Kordlar, G. Rezazadeh //Sensors & Transducers Journal. – 2007. – V.78. – No.4. - P.1083-1092.
101. Daniel J.H. A microaccelerometer structure fabricated in silicon-on-insulator using a focused ion beam process /J.H.Daniel, D.F.Moore //Sensors and Actuators. – 1999. - V.73. P.201-205.
102. Chuang Wen-Hsien Mechanical Property Characterization of LPCVD Silicon Nitride Thin Films at Cryogenic Temperatures /Wen-Hsien Chuang, T.Luger, R.K.Fettig and R. Ghodssi //J. of MEMS. – 2004. - V.13. - No.5. - P.870-879.



## Список работ автора по теме диссертации

- A1. Шашкин В.И. О возможных конструкциях датчиков туннельно-эмиссионных акселерометров /В.И.Шашкин, Н.В.Востоков, Е.А.Вопилкин, А.Ю.Климов, Д.Г.Волгунов, В.В.Рогов, С.Г.Лазарев. //Микросистемная техника. – 2003. – №5. - С.3-6.
- Шашкин В.И. О возможных конструкциях датчиков туннельно-эмиссионных акселерометров /В.И.Шашкин, Н.В.Востоков, Е.А.Вопилкин, А.Ю.Климов, Д.Г.Волгунов, В.В.Рогов, С.Г.Лазарев. //Мир электроники – нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам, под редакцией проф. П.П.Мальцева, 2005 – Москва. – “Техносфера” – С.445-451.
- A2. Shashkin V.I. High-Sensitivity Accelerometer Based on Cold Emission Principle. /Vladimir. I. Shashkin, Nikolai V. Vostokov, Evgeny A. Vopilkin, Alexandr Yu. Klimov, Dmitry G. Volgunov, Vladimir V. Rogov, Sergey G. Lazarev //IEEE Sensors Journal. - 2004. – Vol.4. – No.2. – P.211-215.
- A3. Shashkin V.I. AFM-Characterization of Microlevers. /V.I.Shashkin, E.A.Vopilkin, N.V.Vostokov, A.Yu.Klimov, V.V.Rogov, S.A.Gusev. //Phys. Low-Dim. Struct. – 2004/ – 1/2/ – P.41-46.
- A4. Шашкин В.И. Изготовление микроконсолей и управление их изгибом /В.И.Шашкин, Е.А.Вопилкин, Н.В.Востоков, А.Ю.Климов, В.В.Рогов, С.А.Гусев, И.Ю.Шулешова. //Микросистемная техника. – 2004 – №9. – С.22-26.
- A5. Shashkin V.I. Fabrication and characterization of stress-free microbeams for MEMS applications /V.I.Shashkin, N.V.Vostokov, E.A.Vopilkin, A.Yu.Klimov, V.M.Daniltsev, V.V.Rogov, S.G.Lazarev //Phys. Stat. Sol. (c) – 2 2005. – N.4. – P.1433-1437.
- A6. Vopilkin E.A. A nanomechanical system with piezoelectric actuation of a GaAs microbeam /E.A.Vopilkin, V.I.Shashkin, Y.N.Drozдов, V.M.Daniltsev, S.A.Gusev and I.Yu.Shuleshova //J. Micromech. Microeng. – 2008. – V.18. - N.9. – 095006(5pp)
- A7. Вопилкин Е.А. Биморфный пьезоэлектрический двигатель для МЭМС на основе GaAs //Е.А.Вопилкин, В.И.Шашкин, Ю.Н.Дроздов, В.М.Данильцев,

- С.А.Гусев, И.Ю.Шулешова //Нано- и Микросистемная техника. – 2008 - №10. – С.47-51.
- A8. Вopilкин Е.А. Анизотропный пьезоэффект в микроэлектромеханических системах на основе эпитаксиальных гетероструктур  $Al_{0,5}Ga_{0,5}As/AlAs$  //Е.А.Вopilкин, В.И.Шашкин, Ю.Н.Дроздов, В.М.Данильцев, А.Ю.Климов, В.В.Рогов, И.Ю.Шулешова //ЖТФ – 2009. – Т79. – Вып.10. – С.75-79.
- A9. Вopilкин Е.А. Микроэлектромеханический туннельный датчик для виброакселерометра //Е.А.Вopilкин, А.Ю.Климов, В.В.Рогов, И.Ю.Шулешова, Д.А.Пряхин, С.А.Гусев, Е.В.Скороходов, В.И.Шашкин. //Нано- и Микросистемная техника. – 2012. – 5. - С.48-53.
- A10. Вopilкин Е.А. МЭМС - переменный конденсатор с электростатическим управлением /Е.А.Вopilкин, Ю.И. Чеченин, Л.Н. Савицкая, Н.Г. Бронникова, В.И.Шашкин //МНСТ. – 2010. - №12. – С.30-34.
- A11. Патент № 2291449 “ЭМИССИОННЫЙ ДАТЧИК МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН” Шашкин В.И., Востоков Н.В., Вopilкин Е.А., Климов А.Ю., Рогов В.В., Лазарев С.Г. заявка № 2005109703, приоритет изобретения 29 ноября 2004 г., зарегистрировано 10 января 2007.
- A12. Shashkin V.I. AFM-Characterization of Microlevers /V.I.Shashkin, E.A.Vopilkin, N.V.Vostokov, A.Yu.Klimov, V.V.Rogov, S.A.Gusev. //Scanning Probe Microscopy – 2004”: proceedings, Nizhny Novgorod, 2-6 May 2004, P.239-241.
- A13. Shashkin V.I. Fabrication of high-sensitivity accelerometers and development of MEMS microconsoles /V.I.Shashkin, N.V.Vostokov, E.A.Vopilkin, A.Yu.Klimov, V.M.Daniltsev, V.V.Rogov, D.Volgunov, S.G.Lazarev //EXMATEC'04 - 7th Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technologies, Montpellier: Program and abstracts, France, June 1-4, 2004. - P.150.
- A14. Шашкин В.И. О возможных конструкциях туннельных и эмиссионных акселерометров /В.И.Шашкин, Е.А.Вopilкин //Международный Форум по Нанотехнологиям “Rusnanotech08”: сборник тезисов докладов научно-технологических секций, Москва, 3-15 декабря 2008, - Т2. - С.38-40.