

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

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Шашкин Владимир Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Амиров Эльдар Искандерович,
зав. лаб. ЯФ ФТИАН РАН

доктор физико-математических наук
Мионов Виктор Леонидович,
в. н. с. ИФМ РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики"
МГТУ МИРЭА

Защита состоится 28 июня 2012 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 при Институте физики микроструктур РАН (607680, Нижегородская обл., Кстовский район, д. Афоноино, ул. Академическая, д. 7).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН.

Автореферат разослан 28 мая 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

К.П.Гайкович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Предсказанная Фейнманом микроминиатюризация [1] 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.

Важнейшей задачей этого направления 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 заметными 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 [6]. 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 акселеромера.

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

Цель 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 ~ 100 В, ток ~ 100 нА при зазоре между электродами ~ 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 на-

пряжения обнаружено взаимно противоположное движение микроконсолей 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 $2,2 g/\sqrt{Гц}$, частота собственного резонанса находится в диапазоне нескольких МГц.

Научная и практическая значимость работы

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 скрепленных 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 $10^{-4} g/\sqrt{Гц}$ 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.

Основные 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.

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 [A1,A2,A6-A10] вклад автора является определяющим с точки зрения изготовления объекта исследования, построения измерительных систем, проведения измерений, в работах [A3-A5, A11-A14] – равноценным.

Апробация работы

Основные результаты представлялись на следующих семинарах и конференциях:

- International Workshop “Scanning Probe Microscopy – 2004”, Nizhny Novgorod, 2-6 May 2004;
- 7th Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technologies, EXMATEC'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.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего в себя список цитированной литературы и списка 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.

Основное 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.

В разделе 2.1 сделаны вводные замечания о существующих на сегодняшний день конструкциях туннельных и эмиссионных акселерометров.

В разделе 2.2 произведены 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, поэтому 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.

В разделе 2.3 предложен способ реализации квазиплоской геометрии электродов путём сближения двух скрещенных гладких металлизированных цилиндров на расстояние много меньше их радиуса. Взаимное расположение электродов показано на рис. 1. В области протекания эмиссионного тока

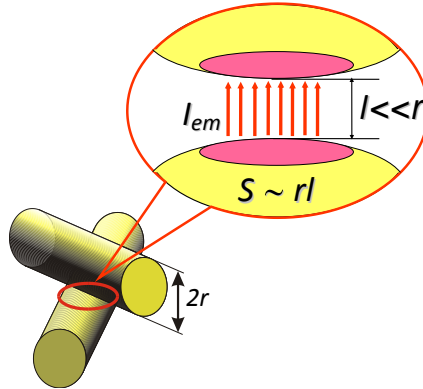


Рис.1. Реализация квазиплоской геометрии токопереноса при помощи скрещенных цилиндрических электродов, расположенных на расстоянии много меньше их радиуса ($l \ll r$).

площадью $S \sim rl$ геометрия электродов близка к геометрии плоского конденсатора. В качестве цилиндров выбраны покрытые золотом стеклянные оптические волокна диаметром 120 мкм, представляющие собой почти идеальные цилиндры с гладкой поверхностью. Разработан и создан макет миниатюрного акселерометра с такими электродами, способного работать как в режиме туннельного тока, так и в режиме тока холодной эмиссии электронов в вакуум. Поведены измерения разрешающей способности акселерометра от частоты в туннельном и эмиссионном режиме с помощью калиброванного вибростенда. Зависимость разрешения от частоты для различных режимов приведена на рис. 2. Видно, что на частотах до 6 кГц в туннельном режиме (напряжение смещения $V = 0,1$ В) датчик имеет разрешение не хуже чем $10^{-4} g / \sqrt{\Gamma\dot{\gamma}}$ и в режиме тока холодной эмиссии (напряжение смещения $V = 100$ В) не хуже чем $10^{-3} g / \sqrt{\Gamma\dot{\gamma}}$. Повышение разрешения датчика во всех режимах на частоте около 3,5 кГц связано с резонансными свойствами пьезодвигателя датчика.

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

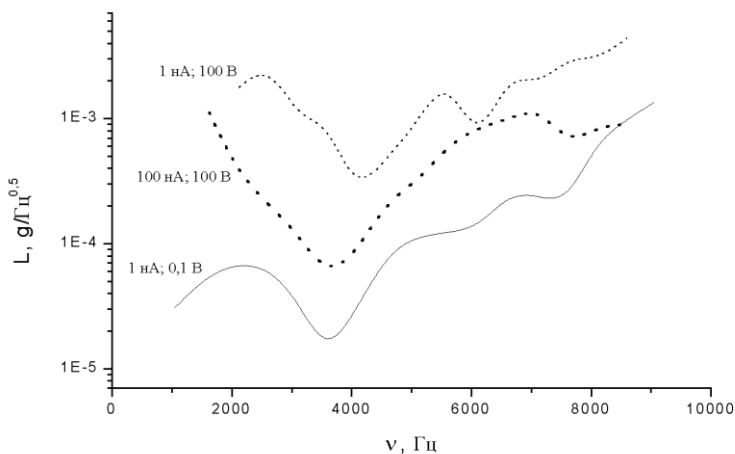


Рис.2. Зависимость разрешения акселерометра от частоты для различных режимов работы.

несильных вибрациях. Для проверки этой гипотезы в одном эксперименте обратная связь была отключена. Electroды сближались в ручном режиме путём подачи постоянного напряжения на пьезодвигатель до возникновения эмиссионного тока. Оказалось, что заданный таким образом 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. 3 показаны вольтамперные характеристики датчика без обратной связи при двух разных расстояниях между электродами 90 и 120 нм. Видно, что данные ВАХ хорошо совпадают с теоретическими зависимостями Фаулера-Нордгейма, что свидетельствует об эмиссионном характере тока.

В разделе 2.4 сделаны заключительные выводы о характеристиках высокочувствительного туннельно-эмиссионного акселерометра с обратной связью и о возможности создания эмиссионного акселерометра без обратной связи.

Третья глава посвящена проблеме получения и исследования конструктивных элементов МЭМС – микроконсолей, а также управлению их пространственным положением.

В разделе 3.1 сделаны вводные замечания об элементах конструкции МЭМС – микроконсолях и мембранах, способах их изготовления и способах управления их пространственным положением.

В разделе 3.2 описана технология изготовления микроконсолей при помощи фотолитографии и последующего селективного вытравливания жертвенного слоя из под консоли. Микроконсоли изготавливались из двух типов

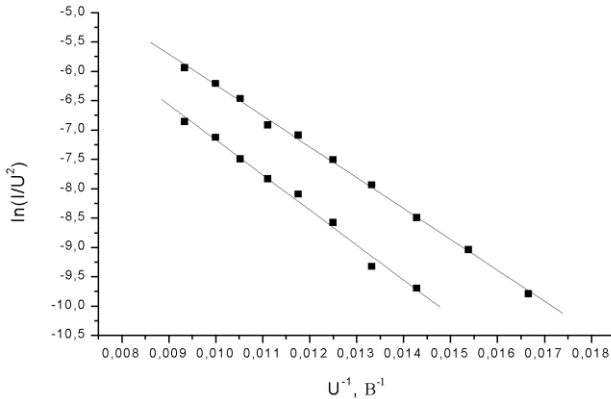


Рис.3. ВАХ акселерометра с отключенной обратной связью при двух разных расстояниях между электродами 90 и 120 нм.

материалов: монокристаллического GaAs с жертвенным слоем AlAs на подложке GaAs и поликристаллического Ta₂O₅ с жертвенным слоем ванадия на ситаловой подложке. Были изготовлены микроконсоли длиной 50 мкм, шириной 5 мкм и толщиной 200 нм.

В разделе 3.3 описано исследование механических свойств полученных микроконсолей с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). Была измерена их статическая жёсткость и резонансная частота низшей моды колебаний. По данным измерений был вычислен модуль Юнга для Ta₂O₅. Получено значение модуля Юнга $E = 127,3$ ГПа, что близко к справочным данным для этого материала [8].

В разделе 3.4 описаны эксперименты по управлению изгибом микроконсолей путём напыления на них различных металлов: тантала, хрома и никеля. Изображение микроконсоли из Ta₂O₅, после напыления металлов, полученное в электронном микроскопе с помощью вторичных электронов, приведено на рис. 4. Из рисунка видно, что при напылении тантала консоль отгибается вниз, при напылении хрома – вверх. Изгиб является обратимым – каждое последующее напыление металла меняет изгиб в соответствующую сторону.

В разделе 3.5 описан эксперимент по изменению изгиба биморфной микроконсоли в зависимости от температуры. Показано, что микроконсоль из Ta₂O₅ с напылённым на её поверхность слоем никеля толщиной 50 нм является тепловым биморфным двигателем. При нагревании от комнатной температуры на 142°C её конец смещался на 0,5 мкм.

В разделе 3.6 описано изготовление МЭМС с электростатическим управлением и исследование её электромеханических свойств. Изготовлена микроэлектромеханическая система на подложке арсенида галлия, представляющая

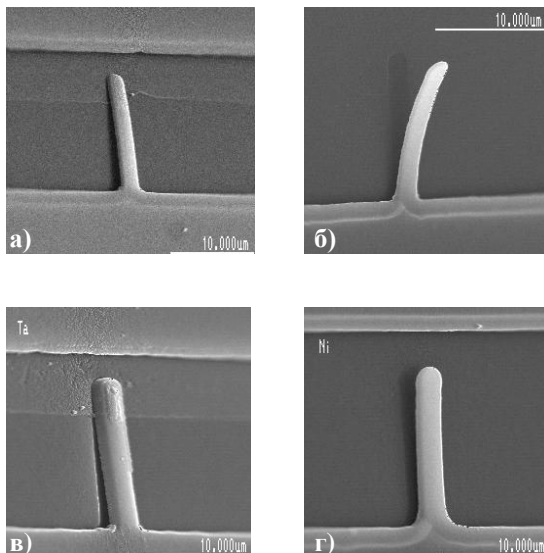


Рис.4. Вид микроконсоли из Ta_2O_5 : а) - после напыления 30 нм Ta, б) - после напыления 30 нм Cr дополнительно, в) - после напыления 100 нм Ta дополнительно, г) - после напыления 20 нм Ni.

собой подвижную золотую мембрану толщиной 1,5 мкм размером 100x100 мкм с электростатическим управлением. На рис. 5 показано изображение этой структуры, полученное в оптической измерительной системе (интерферометр белого света) Talysurf CCI 2000. Исследованы статические электрофизические и резонансные колебательные свойства данной системы. Резонансная частота низшей моды составила 18 кГц. Ёмкость МЭМС конденсатора при подаче постоянного смещения на обкладки 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 составляет 1,4 мкм, что примерно соответствует толщине зазора между верхней обкладкой и диэлектриком.

В разделе 3.7 сделаны заключительные выводы о методике измерения жёсткости кантилеверов и - с их помощью - измерения жёсткости элементов упругой подвески МЭМС. Сделаны оценки упругих напряжений в тонких металлических плёнках на поверхности микроконсолей. Предложены способы управления пространственным положением микроконсолей путём напыления на них различных металлов. Показана возможность использования таких микроконсолей в качестве теплового биморфного двигателя. Приведены характеристики МЭМС с электростатическим управлением и продемонстрированы пути использования её для различных применений.

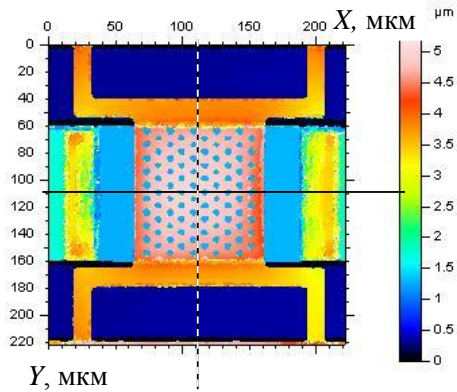


Рис.5. Изображение структуры, полученное в оптической измерительной системе Talysurf CCI 2000.

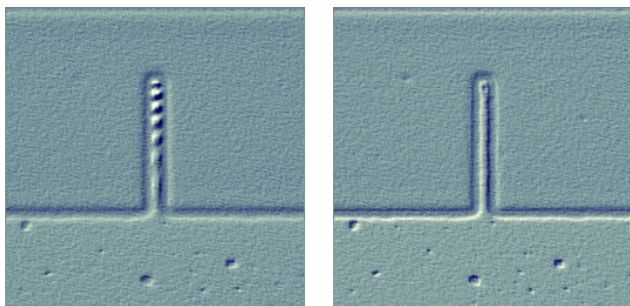
Четвёртая глава посвящена исследованиям проявлений пьезоэлектрического эффекта в микроконсолях GaAs и AlGaAs.

В разделе 4.1 сделаны вводные замечания о возможностях существующих на сегодняшний день МЭМС двигателей различных конструкций.

В разделе 4.2 приводится теоретическое описание поперечного пьезоэлектрического эффекта в арсениде галлия и теоретические расчёты смещения биморфной пьезоэлектрической микроконсоли, состоящей из двух слоёв GaAs: сильно легированного и нелегированного толщиной по 1 мкм.

В разделе 4.3 описана технология изготовления микроконсоли на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs для использования в качестве биморфного пьезодвигателя. Гетероструктуры были выращены на подложках GaAs методом металлоорганической газовой фазной эпитаксии. Микроконсоли формировались 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. С целью прямого сравнения движений были изготовлены микроконсоли двух направлений ориентации, I – вдоль $[110]$ и II – вдоль $[\bar{1}\bar{1}0]$.

В разделе 4.4 описаны исследования механических и электрофизических свойств полученных микроконсолей. Были измерены ВАХ пьезоэлектрического слоя консолей. Ток утечки не превышал 10^{-7} А. С помощью интерферометра белого света Talysurf CCI 2000 в режиме микроскопа была измерена резонансная частота микроконсолей в воздухе (измерения в вакууме проводились ранее группой Masmanidis et. al. [9]) путём подачи переменного напряжения на пьезоэлектрический слой и сканирования по частоте. Изображение микроконсоли, полученное в этом режиме, показано на рис. 6а. На консо-



а

б

Рис.6. Изображение микроконсоли полученное в режиме микроскопа на интерферометре Talysurf CCI 2000: а) – вне резонанса, б) - в резонансе.

ли видны интерференционные полосы. Резонанс обнаруживался по размыванию интерференционных полос за счёт роста амплитуды колебаний на резонансной частоте. Изображение микроконсоли в резонансе показано на рис. 6б. Измеренная резонансная частота $f_0=160$ кГц совпадает с расчетной.

Измерена зависимость статического смещения концов микроконсолей от приложенного напряжения. Результаты измерений показаны на рис. 7. Максимальное смещение составляет 60 нм. Описан эксперимент, демонстрирующий анизотропию пьезоэффекта в AlGaAs. Две консоли на одном основании,

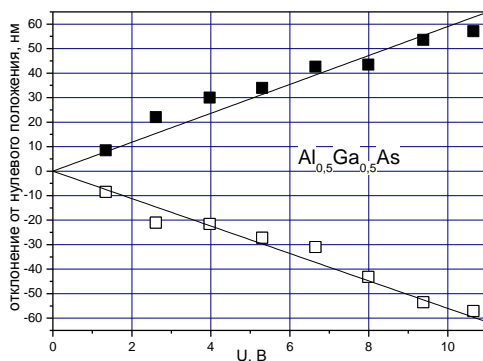


Рис.7. Отклонение концов двух консолей от исходного состояния в зависимости от приложенного напряжения. ■ – I консоль, ориентированная вдоль $[110]$, отгибается вверх, □ - II консоль, ориентированная вдоль $[1\bar{1}0]$, отгибается вниз.

ориентированные по ортогональным кристаллографическим осям I – вдоль [110] и II – вдоль $[1\bar{1}0]$ смещаются в противоположном направлении с одинаковой величиной смещения, что свидетельствует о пьезоэлектрическом характере работы данного двигателя. В разделе 4.5 сделаны заключительные выводы о пьезоэлектрическом характере работы биморфного МЭМС пьезодвигателя, описанного в главе.

Пятая глава посвящена проблеме создания МЭМС туннельного акселерометра без двигателя и петли обратной связи, поддерживающих туннельное расстояние между электродами.

В разделе 5.1 сделаны вводные замечания о возможности создания МЭМС туннельного акселерометра без обратной связи и о методах, которые могут быть использованы для его создания.

В разделе 5.2 описана технология изготовления микроконсолей на основе структуры кремний на изоляторе (КНИ) с толщиной слоёв кремния и окиси кремния по 1 мкм. Полученные методом фотолитографии и селективного жидкостного травления окиси кремния кремниевые микробалки длиной 20 мкм разрезались сфокусированным ионным пучком с шириной разреза менее 100 нм. После этого на микроконсоли напылялся слой платины толщиной 50 нм. Полученная структура МЭМС с нанометровым зазором между электродами показана на рис. 8.

В разделе 5.3 исследована ВАХ туннельного зазора и проведено сравнение с теоретической ВАХ, рассчитанной по формуле для туннельного тока между плоскими металлическими электродами с учётом сил изображения [9]. Наилучшее совпадение с экспериментом даёт расстояние 2,8 нм между электродами. Сравнение измеренной и теоретической ВАХ, рассчитанной для расстояния в 2,8 нм показано на рис. 9. Ток поддерживался неограниченное время без системы обратной связи.

В разделе 5.4 описано качественное измерение виброчувствительности датчика, которое проводилось путём ударного возбуждения механического резонатора, на поверхности которого был закреплён акселерометр. На частотах до 10 кГц наблюдался спектр из трёх мод механического резонатора. Количественное измерение разрешающей способности акселерометра проводилось на калиброванном вибростенде, к которому акселерометр был приклеен для обеспечения акустической связи. Измеренное разрешение акселерометра составило $2,2 \text{ g} / \sqrt{\text{Гц}}$ на частоте до 3 кГц.

Теоретически оценивалась резонансная частота микроконсоли датчика – порядка 2 МГц и рассчитывалось разрешение, которое можно получить при понижении резонансной частоты в килогерцовую область за счёт увеличения инерционной массы. При уменьшении собственной частоты исследуемого МЭМС датчика до 4 кГц его разрешение увеличится до $5,7 \times 10^{-6} \text{ g} / \text{Гц}^{1/2}$. Эта

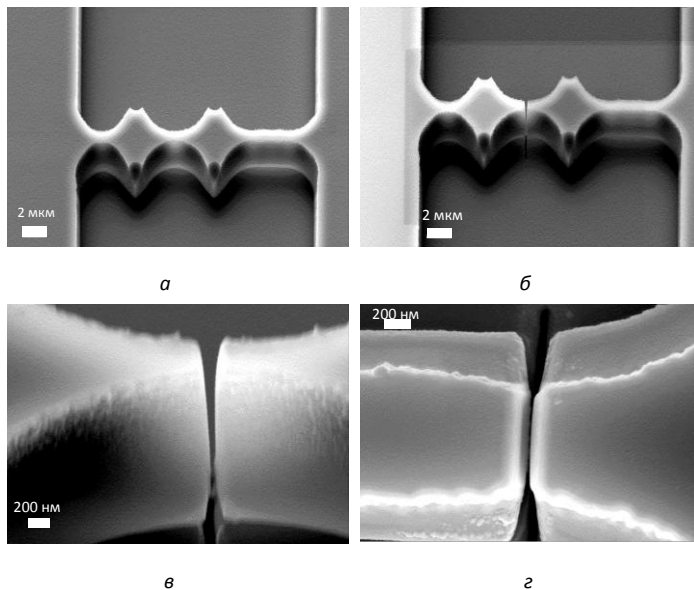


Рис.8. Изображение структуры, полученное в сканирующем электронном микроскопе Karl Zess Supra 50VP: а) до разрезания моста, б) и в) после разрезания моста (различаются масштабом), г) вид сверху после напыления платины.

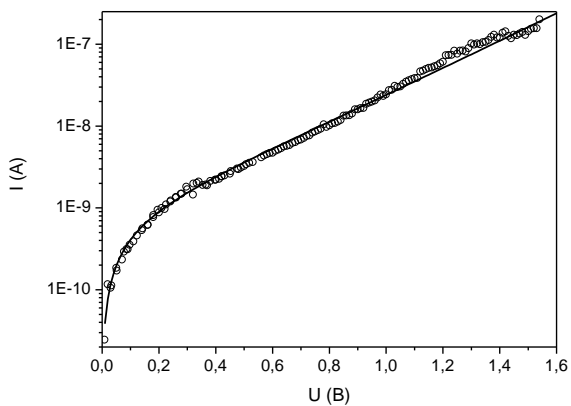


Рис.9. ВАХ туннельного зазора: кружки – данные измерений, линия – расчет для ширины туннельного зазора 2,8 нм.

оценка хорошо совпадает с разрешением туннельного датчика в главе 2, порядка $10^{-5} \text{ g}/\Gamma\text{ц}^{1/2}$ на частоте 4 кГц.

В разделе 5.5 сделаны заключительные выводы о возможности создания микроэлектромеханического туннельного датчика для акселерометра без двигателя и обратной связи по току.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты работы

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 $\sim 10^{-4} \text{ g}/\sqrt{\Gamma\text{ц}}$ в первом и $\sim 10^{-3} \text{ g}/\sqrt{\Gamma\text{ц}}$ во втором режиме в диапазоне частот до 6 кГц. В эмиссионном режиме характерные расстояния между электродами $\sim 100 \text{ нм}$, напряжения смещения $\sim 100 \text{ В}$ и ток $\sim 100 \text{ нА}$. 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 $\sim 60 \text{ нм}$ в статическом режиме и $\sim 1 \text{ мкм}$ вблизи резонансной частоты $f \approx 166 \text{ кГц}$.
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 ~ 2 МГц. В диапазоне частот до единиц кГц разрешение составило $2,2 \text{ г} / \sqrt{\text{Гц}}$.

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 /Jong-Man Kim, Sanghyo Lee, Jae-Hyoung Park, Chang-Wook Baek, Youngwoo Kwon and Yong-Kweon Kim //J. Micromech. Microeng. – 2010. – V.20. – N.9. – 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. - 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. – 7. - 3694
6. Liu C-H. A high-precision, wide-bandwidth micromachined tunneling accelerometer. /Cheng-Hsien Liu and Thomas W. Kenny. //J. of Microelectromech. System, - 2001. – 10. - P.425-433.
7. Gabrielson Thomas 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. 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.
10. John G. Simmons Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film //J. Appl. Phys. – 1963. – 34. - P.1793-1803.

Список публикаций 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. Вопилкин Е.А. Анизотропный пьезоэффект в микроэлектромеханических системах на основе эпитаксиальных гетероструктур $Al_{0,5}Ga_{0,5}As/AlAs$ //Е.А.Вопилкин, 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.Скорородов, 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.

Вопилкин Евгений Александрович

**ТУННЕЛЬНО-ЭМИССИОННЫЕ АКСЕЛЕРОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Автореферат

Подписано к печати 24 мая.2012 г. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН),
603950, г. Нижний. Новгород, ГСП-105