

На правах рукописи

Уваров Илья Владимирович

РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА ТРЕХСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КАНТИЛЕВЕРОВ НАНОРАЗМЕРНОЙ ТОЛЩИНЫ

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ярославль – 2013

Работа выполнена в Ярославском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологического института РАН и на кафедре микроэлектроники Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова

Научный руководитель:

Амиров Ильдар Искандерович, доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Митрофанов Валерий Павлович

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики колебаний Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Журавлев Максим Николаевич

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук

Защита состоится 18 декабря 2013 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.204.01 при Физико-технологическом институте Российской академии наук по адресу: г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36, к. 1, 6 этаж, конференц-зал.

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.204.01

кандидат физико-математических наук



Вьюрков В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Кантилевер – балка, один конец которой закреплен – является одним из основных подвижных элементов микро- и наноэлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС). Широкий класс МЭМС/НЭМС составляют переключатели, среди которых наибольшее распространение получили устройства с электростатическим механизмом срабатывания. В таких ключах между кантилевером и управляющим электродом прикладывается напряжение, под действием электростатической силы кантилевер притягивается к управляющему электроду и при некотором значении напряжения, называемом напряжением срабатывания, соприкасается с контактным электродом, замыкая переключатель. Достоинства МЭМС/НЭМС-ключей электростатического типа (малые габариты, низкое энергопотребление и высокое отношение импеданса в замкнутом и разомкнутом состоянии) позволяют рассматривать их как возможную альтернативу традиционным полупроводниковым логическим элементам или как дополнение к ним [1]. Один из недостатков электромеханических ключей – высокое напряжение срабатывания. Современной тенденцией является переход от микро- к нанопереключателям с созданием ключей на основе наноразмерных кантилеверов. Целью такого подхода является уменьшение габаритов переключателя, снижение напряжения срабатывания и увеличение скорости переключения. Однако напряжение срабатывания современных ключей составляет несколько вольт и более и не позволяет широко использовать их в современных электронных схемах, обладающих низким энергопотреблением. Поэтому разработка МЭМС/НЭМС-переключателей с низким напряжением срабатывания является актуальной задачей.

Один из наиболее эффективных методов снижения напряжения срабатывания переключателя заключается в уменьшении упругости кантилевера. Для изготовления кантилевера, обладающего малой упругостью, целесообразно применять материалы с относительно малым модулем Юнга, к которым относятся металлы (Al, Au и др.) и полимеры (SU-8, полистирол). Однако для получения сверхмалых значений упругости необходимо уменьшать толщину кантилевера до наноразмерной величины, сохраняя длину на микронном уровне, т.е. увеличивать отношение длины к толщине. Для изготовления нанокантилеверов со сверхвысоким отношением длины к толщине (> 100) полимеры малоприменимы. Кроме того, кантилевер должен быть проводящим, поэтому для изготовления кантилевера МЭМС/НЭМС-переключателя целесообразно использовать металлы. Согласно литературным данным, наименьшим значением упругости обладают кантилеверы, изготовленные из композита Al-Mo, имеющие толщину 20 нм и отношение длины к толщине 400 [2].

Металл как материал кантилевера имеет ряд недостатков. Во-первых, для металлических пленок характерны остаточные напряжения, возникающие в процессе нанесения и приводящие к деформации кантилевера при

освобождении. Проблема изгиба кантилевера под действием остаточных напряжений может быть решена подбором технологических условий нанесения металлической пленки, выбором состава пленки (например, использование металлических композитов), термическим отжигом и др. Во-вторых, металлические пленки имеют поликристаллическую структуру и высокую шероховатость поверхности. От размеров зерна и морфологии поверхности существенным образом могут зависеть упругие свойства наноразмерного кантилевера, шероховатость поверхности влияет на свойства контакта металл/металл в переключателях.

Несмотря на описанные недостатки, металлы являются одними из наиболее широко используемых и перспективных материалов в МЭМС/НЭМС-отрасли. Особенно актуальным является изготовление металлических кантилеверов, обладающих сверхвысоким отношением длины к толщине. Данные кантилеверы обладают высокой электропроводностью и малой упругостью, поэтому перспективны для создания переключателей электростатического типа с низким напряжением срабатывания.

Для описания кантилевера как подвижного элемента МЭМС/НЭМС используются его резонансные свойства - резонансные частоты и добротности. Резонансные свойства определяются не только геометрическими размерами и параметрами среды, но также могут зависеть от неидеальности конструкции и морфологии поверхности кантилевера. Поэтому *целью работы* являлось комплексное исследование свойств металлических кантилеверов наноразмерной толщины, обладающих сверхвысоким отношением длины к толщине. Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие *задачи*:

1. Отработать технологию изготовления металлических кантилеверов наноразмерной толщины, обладающих сверхвысоким отношением длины к толщине (> 100).
2. Исследовать особенности конструкции кантилеверов, обусловленные технологией изготовления, изучить морфологию поверхности кантилеверов.
3. Отработать методику измерения резонансных характеристик кантилеверов.
4. Исследовать резонансные свойства кантилеверов и выявить закономерности, их определяющие.

Научная новизна работы

1. Впервые предложено использование симметричной трехслойной структуры кантилевера для избежания изгиба под действием остаточных напряжений. Внешние слои, материал которых обладает более высоким модулем Юнга, чем материал внутреннего слоя, служат для компенсации градиента остаточных напряжений, возникающего во внутреннем слое кантилевера при нанесении. Эффективность использования трехслойной структуры подтверждена результатами изготовления кантилеверов Cr/Al/Cr и Ti/Al/Ti с соотношением толщин слоев 1/6/1.

2. При использовании трехслойной структуры впервые изготовлены металлические кантилеверы наноразмерной толщины, обладающие рекордно высоким отношением длины к толщине 1500.

3. Впервые экспериментально получены зависимости резонансных характеристик металлических кантилеверов наноразмерной толщины со сверхвысоким отношением длины к толщине от геометрических размеров. Установлено, что резонансная частота кантилеверов Cr/Al/Cr и Ti/Al/Ti с высокой степенью точности описывается теорией балки Бернулли-Эйлера при значениях модуля Юнга и плотности объемного материала. Добротность кантилеверов определяется потерями энергии на дефектах поверхностного слоя.

Достоверность результатов, полученных в данной работе, определяется применением современных экспериментальных методик, воспроизводимостью результатов, а также согласием экспериментальных данных с результатами математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование симметричной трехслойной структуры кантилевера позволяет исключать изгиб под действием остаточных напряжений и с высокой степенью повторяемости изготавливать прямые металлические кантилеверы без применения специальных методик нанесения металлических пленок.

2. В экспериментах по измерению резонансной частоты кантилеверов Cr/Al/Cr и Ti/Al/Ti толщиной 40-120 нм размерных эффектов модуля Юнга и плотности материала не наблюдается. Резонансная частота кантилеверов с высокой степенью точности описывается теорией балки Бернулли-Эйлера при значениях модуля Юнга и плотности объемного материала.

3. Добротность металлических кантилеверов толщиной 40-120 нм, обладающих сверхвысоким отношением длины к толщине, при отсутствии воздушного демпфирования определяется потерями энергии на дефектах в поверхностном слое кантилевера.

Практическая ценность работы

Отработана технология изготовления металлических кантилеверов с широким диапазоном геометрических размеров, в т.ч. обладающих отношением длины к толщине более 1000, позволяющая приступить к созданию устройств на основе данных кантилеверов.

Отработана методика измерения резонансных характеристик кантилеверов при различных давлениях воздуха. Собран измерительный стенд, регистрирующий изгиб кантилевера методом «светового рычага» и позволяющий использовать различные методы возбуждения колебаний. Методика применима для исследования динамических характеристик различных чувствительных элементов МЭМС/НЭМС.

Апробация результатов работы

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и конкурсах:

- международная молодежная научно-практическая конференция «Путь в науку», Ярославль, 2013;
- международная конференция «Микро- и наноэлектроника – 2012» (ICMNE-2012), Звенигород, 2012;
- II и I международные конференции по актуальным проблемам физики поверхности и наноструктур (ICMPSN-2012 и ICMPSN-2010), Ярославль, 2012 и 2010;
- III и II международные научно-технические конференции «Технологии микро- и наноэлектроники в микро- и наносистемной технике», Москва, Зеленоград, 2012 и 2011;
- XIII всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи (НТТМ-2012), Москва, 2012 (получена премия «Победитель» по поддержке талантливой молодежи);
- IV внутривузовский конкурс инновационных проектов молодых ученых по приоритетным направлениям науки и техники «Молодежь и наука», Ярославль, 2012 (получен грант Победителя);
- VIII Курчатовская молодежная научная школа, Москва, 2010.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 работ, из них 4 – статьи в рецензируемых журналах, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК РФ. Список работ приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Общая постановка задачи осуществлялась научным руководителем автора Амировым И.И. В диссертации изложены результаты, полученные как лично автором, так и в сотрудничестве с Наумовым В.В. (магнетронное распыление и вакуумный термический отжиг), Королевой О.М. (фотолитография, жидкостное травление и др.), Постниковым А.В., Козиным И.А. (оптическая система измерительного стенда), Морозовым О.В., Изюмовым М.О. (вакуумная система стенда), Куприяновым А.Н. (автоматизация измерения резонансных характеристик), Селюковым Р.С. (СТМ-исследования). СЭМ-исследования, РМА и измерение резонансных характеристик, обработка и интерпретация полученных экспериментальных данных проводились соискателем самостоятельно. Наумовым В.В. была оказана помощь в планировании экспериментов и обсуждении результатов.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием «Диагностика микро- и наноструктур» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы и содержит 126 страниц, 65 рисунков, 13 таблиц, 81 формул. Список использованных источников включает 131 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится краткое описание состояния проблемы, обосновывается актуальность темы работы, формулируется цель и конкретные задачи исследования, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору текущего состояния в области разработки МЭМС/НЭМС-переключателей на основе кантилеверов. Описываются основные типы переключателей, особое внимание уделяется электростатическому механизму срабатывания как наиболее распространенному. В настоящее время в мире интенсивно ведутся разработки ключей на основе наноразмерных кантилеверов, что приводит к уменьшению габаритов переключателя, снижению напряжения срабатывания и увеличению скорости переключения. Однако напряжение срабатывания современных ключей составляет несколько вольт и более и не позволяет широко использовать их в современных электронных схемах, обладающих низким энергопотреблением, поэтому задача снижения напряжения срабатывания является весьма актуальной. Отмечается, что для снижения напряжения срабатывания переключателя перспективным является использование металлических кантилеверов наноразмерной толщины, обладающих сверхвысоким отношением длины к толщине.

Металлические кантилеверы наноразмерной толщины, обладающие сверхвысоким отношением длины к толщине, имеют большое отношение площади поверхности к объему, и поэтому весьма чувствительны к изменениям состояния поверхности. В то же время, данные кантилеверы обладают малой упругостью, поэтому перспективной областью их применения являются статические МЭМС/НЭМС-сенсоры, регистрирующие изменение состояния поверхности кантилевера по его изгибу. Описываются основные принципы работы сенсоров и методы регистрации изгиба кантилевера: метод «светового рычага», интерференционный, емкостной, пьезорезистивный, пьезоэлектрический и контактный методы, а также метод туннелирования.

В данной главе также описываются мировые достижения в области изготовления микро- и нанокантилеверов. Кантилеверы изготавливаются из различных материалов с использованием разнообразных технологических маршрутов. Приводятся основные параметры изготовленных кантилеверов: геометрические размеры, упругость, первая резонансная частота, добротность. Отмечаются основные проблемы, возникающие при изготовлении кантилеверов, и методы их решения. Согласно литературным данным, наибольшим отношением длины к толщине обладают кантилеверы толщиной 12 нм, изготовленные из кремния [3]. Среди металлических кантилеверов максимальное отношение длины к толщине составляет 400 при толщине кантилевера 20 нм [2].

Вторая глава посвящена описанию предлагаемой технологии изготовления металлических кантилеверов наноразмерной толщины, обладающих сверхвысоким отношением длины к толщине, а также описанию экспериментальных методик исследования свойств кантилеверов.

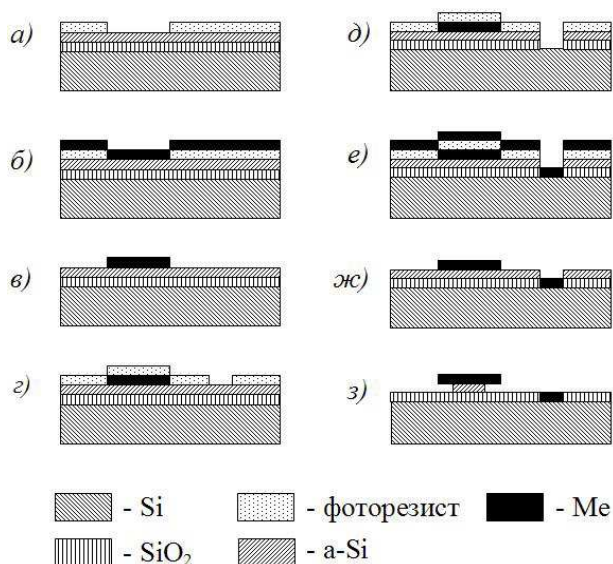


Рис. 1. Процедура изготовления кантилеверов

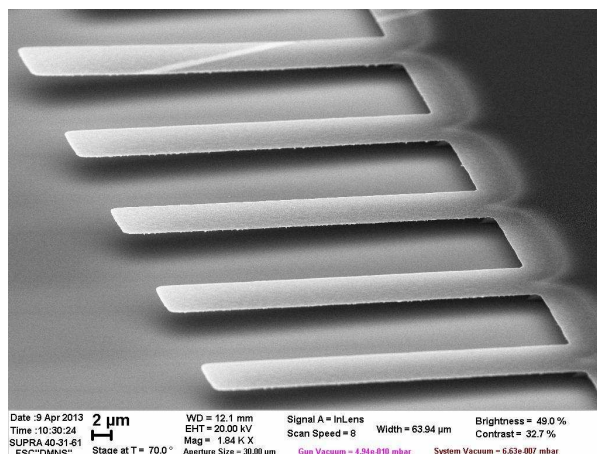


Рис. 2. СЭМ-изображение кантилеверов Cr/Al/Cr 40×8×0,08 мкм

Основные этапы изготовления кантилеверов представлены на рис. 1. Кремниевая пластина КДБ 0,01 термически окислялась во влажном кислороде (система ДОМ-75, 4 ч при температуре 1080 °С) до толщины слоя SiO₂ 0,9 мкм. На окисленную пластину методом магнетронного распыления наносился жертвенный слой аморфного кремния (a-Si) толщиной 2 мкм (установка SCR 651 Tetra фирмы Alcatel, давление аргона $p = 2$ мкбар, скорость нанесения $v = 0,6$ нм/с). Затем пластина покрывалась слоем позитивного фоторезиста S1813SP15 толщиной 1,5 мкм (центрифуга TP6000, скорость вращения 4000 об/мин, ускорение 3000 об/с², время нанесения 20 с, сушка в сушильном шкафу при 96 °С, время сушки 10 мин). В слое резиста методом контактной обратной фотолитографии с помощью фотошаблона выполнялся рисунок кантилеверов (рис. 1а, установка совмещения и экспонирования ЭМ576). После проявления фоторезиста в 7%-растворе КОН на пластину методом магнетронного распыления наносились структурные слои металла (рис. 1б). В качестве материала кантилеверов был выбран алюминий, заключенный между слоями хрома или титана. Таким образом, кантилеверы были трехслойными и изготавливались в двух вариантах: Cr/Al/Cr и Ti/Al/Ti. Толщины наносимых слоев находились в соотношении 1/6/1, суммарная толщина слоев составляла 40 (слои 5/30/5), 80 (10/60/10) и 120 (15/90/15) нм. Нанесение слоев Cr осуществлялось при $p = 5$ мкбар, $v = 0,5$ нм/с, слоев Ti при $p = 2$ мкбар, $v = 0,25$ нм/с, слоя Al при $p = 5$ мкбар, $v = 1$ нм/с. После нанесения слоев металла производилось «взрывное» удаление фоторезиста (lift-off, раствор ДМФА, рис. 1в). Далее пластина снова покрывалась слоем позитивного фоторезиста, в котором методом обратной фотолитографии выполнялись окна (рис. 1г). После экспонирования и проявления фоторезист задубливался в сушильном шкафу при температуре 120 °С в течении 20 мин. Через окна в слое фоторезиста выполнялось травление слоя a-Si в плазме SF₆ (установка реактивного ионного травления RDE 300 фирмы Alcatel, мощность

индукционного разряда 700 Вт, расход SF_6 70 нсм³/мин, время травления 60 с) и травление слоя SiO_2 в растворе $\text{HF}/\text{NH}_4\text{F}$ (установка Лада Электроника, время травления 21 мин, рис. 1д). Затем на пластину магнетронным методом наносился слой Al толщиной 100 нм и выполнялся «взрыв» (рис. 1е, ж). Таким образом, непосредственно на кремниевой подложке были сформированы алюминиевые контактные площадки, необходимые в дальнейшем для подачи потенциала на подложку. Заключительным этапом изготовления являлось удаление жертвенного слоя a-Si из-под кантилеверов (освобождение кантилеверов) методом реактивного ионного травления в плазме SF_6 ВЧ-индукционного разряда (рис. 1з). Режимы травления выбирались в зависимости от размеров кантилевера и других факторов.

Кантилеверы имели длину (L) от 10 до 100 мкм с шагом 10 мкм, ширину (w) от 2 до 10 мкм с шагом 2 мкм, и по толщине (t) были трехслойными (Cr/Al/Cr и Ti/Al/Ti в соотношении 1/6/1). Суммарная толщина кантилеверов составляла 40, 80 и 120 нм. Пример изготовленных кантилеверов приведен на рис. 2. Особенностью кантилеверов являлось сверхвысокое отношение длины к толщине. Были изготовлены кантилеверы, обладающие рекордно высоким значением $L/t = 1500$ ($L = 60$ мкм, $t = 40$ нм). Достаточно широкий диапазон геометрических размеров позволял выявить характерные особенности представленных кантилеверов.

Особенности конструкции кантилеверов, обусловленные технологией изготовления, исследовались с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Использовался микроскоп Supra 40 фирмы Carl Zeiss. Морфология поверхности кантилеверов исследовалась методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Применялась 3D-нанозондовая система GPI-Cryo-SEM фирмы Сигма-скан, использующая для получения высокого пространственного разрешения вакуумную камеру СЭМ Supra 40. Для определения влияния различных технологических процессов на материал кантилеверов применялся рентгеновский энергодисперсионный микроанализ (РМА). Использовался энергодисперсионный спектрометр INCA Energy фирмы Oxford Instruments, являющийся приставкой к СЭМ Supra 40.

Резонансные свойства кантилеверов исследовались с помощью специально собранного в ЯФ ФТИАН РАН измерительного стенда. Возбуждение колебаний кантилеверов осуществлялось электростатическим методом. Переменное напряжение от прецизионного генератора ГЗ-122 прикладывалось между кантилеверами и кремниевой подложкой, как показано на рис. 3. Возбуждающий сигнал имел синусоидальную форму:

$$V(\tau) = V_{AC} \cos(\omega\tau), \quad (1)$$

где V_{AC} и ω – амплитуда и частота сигнала, τ – время. Регистрация колебаний кантилеверов выполнялась методом «светового рычага». Принцип работы оптической системы стенда показан на рис. 4. Луч He-Ne лазера ЛГН-207Б с длиной волны 628 нм проходил через элементы оптической системы и фокусировался 40-кратным объективом на поверхность кантилевера. Диаметр сфокусированного пучка составлял 4 мкм. Рабочее расстояние объектива

составляло 1 мм, поэтому объектив размещался внутри вакуумной камеры. Отраженный от поверхности кантилевера луч проходил оптическую систему в обратном направлении и попадал на позиционно-чувствительный фотоприемник. Снималась резонансная кривая кантилевера (зависимость амплитуды сигнала на выходе фотоприемника от частоты возбуждающего сигнала), по ней определялась его первая резонансная частота и добротность. Добротность рассчитывалась как отношение резонансной частоты к ширине резонансного пика на уровне $1/\sqrt{2}$ от максимума. Была выполнена автоматизация съема резонансной кривой с помощью GPIB-контроллера фирмы National Instruments и программного обеспечения LabView. При этом приборы ГЗ-122 и В7-46/1 подключались к ПК через интерфейс GPIB. Стенд имел вакуумную систему, позволяющую измерять резонансные характеристики кантилеверов при давлении воздуха от 10^{-4} до 10^3 мбар.

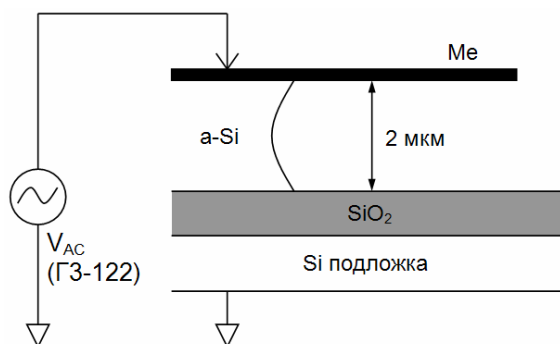


Рис. 3. Электростатическое возбуждение колебаний кантилеверов

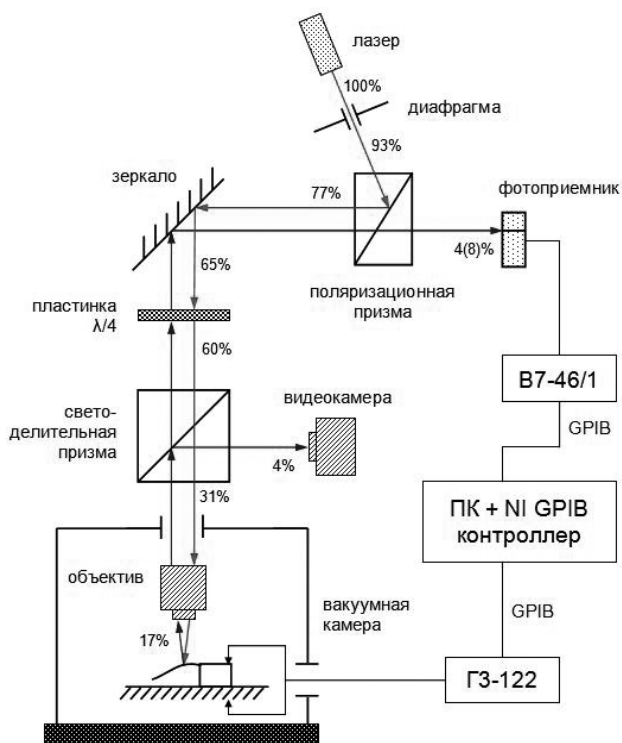


Рис. 4. Принцип работы измерительного стенда

В третьей главе приводятся данные об особенностях процедуры изготовления, неидеальности конструкции и морфологии поверхности кантилеверов.

Основной проблемой при изготовлении кантилеверов Cr/Al/Cr являлся их изгиб под действием остаточных напряжений. При удалении жертвенного слоя кантилеверы изгибались вниз и прилипали к подложке, теряя работоспособность. Решить данную проблему позволил вакуумный термический отжиг кантилеверов до освобождения. Параметры отжига: давление 10^{-6} мбар, температура $330\text{ }^{\circ}\text{C}$, время 60 мин. Предварительно отожженные кантилеверы при освобождении практически не изгибались.

Трехслойная структура кантилевера позволяла использовать относительно низкую температуру отжига и обеспечивала высокую повторяемость результата.

В случае кантилеверов Ti/Al/Ti основной проблемой также являлся их изгиб при освобождении. В отличие от кантилеверов Cr/Al/Cr, изгиб происходил вверх и был связан с изменениями, происходящими на поверхности кантилевера. РМА образцов, отличающихся временем и скоростью травления жертвенного слоя, показал, что с увеличением времени травления в образце уменьшалось содержание титана. Предположительно, в процессе освобождения кантилевера титан частично стравливался с его поверхности, что и вызывало изгиб. При этом на поверхности возникали ямки травления. Для изготовления прямых кантилеверов Ti/Al/Ti требовалось выполнять освобождение как можно быстрее, с максимальной селективностью травления кремния по отношению к титану. РМА образцов Cr/Al/Cr показал, что Cr не удалялся с поверхности кантилевера при освобождении, т.е. кантилеверы Cr/Al/Cr обладали стойкостью к плазменной обработке.

Основной особенностью конструкции кантилевера, связанной с технологией изготовления, являлся выступ жертвенного слоя на середине ширины кантилевера. Он являлся следствием того, что жертвенный слой удалялся не только из-под кантилевера, но также из-под опорной площадки. На

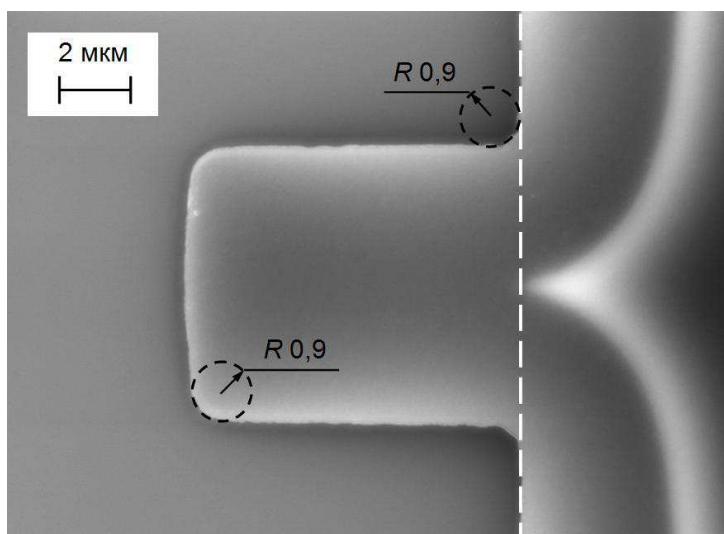


Рис. 5. СЭМ-изображение кантилевера Cr/Al/Cr 10×8×0,04 мкм, вид сверху

СЭМ-изображении рис. 5 четко видна граница жертвенного слоя под кантилевером (электронный луч частично проходил сквозь металлическую пленку). Если вершина выступа совпадала с началом кантилевера, то кантилевер был освобожден идеально (как на рис. 5). Однако зачастую жертвенный слой либо располагался в глубине опорной площадки (перетрав), либо, наоборот, заходил на кантилевер (недотрав). Недотрав/перетрав

изменял эффективную длину кантилевера и влиял на его резонансные характеристики [4].

СТМ-изображения поверхности пленок Cr/Al/Cr и Ti/Al/Ti представлены на рис. 6. Пленки имели схожие количественные параметры рельефа: шероховатость составляла 3-3,5 нм. Оба типа пленок имели крупные зерна, покрытые гофрировкой из мелких зерен. Предположительно, крупные зерна были сформированы слоем алюминия, мелкие – слоями хрома и титана. С увеличением толщины пленки латеральные размеры зерен увеличивались, однако увеличение шероховатости обнаружено не было.

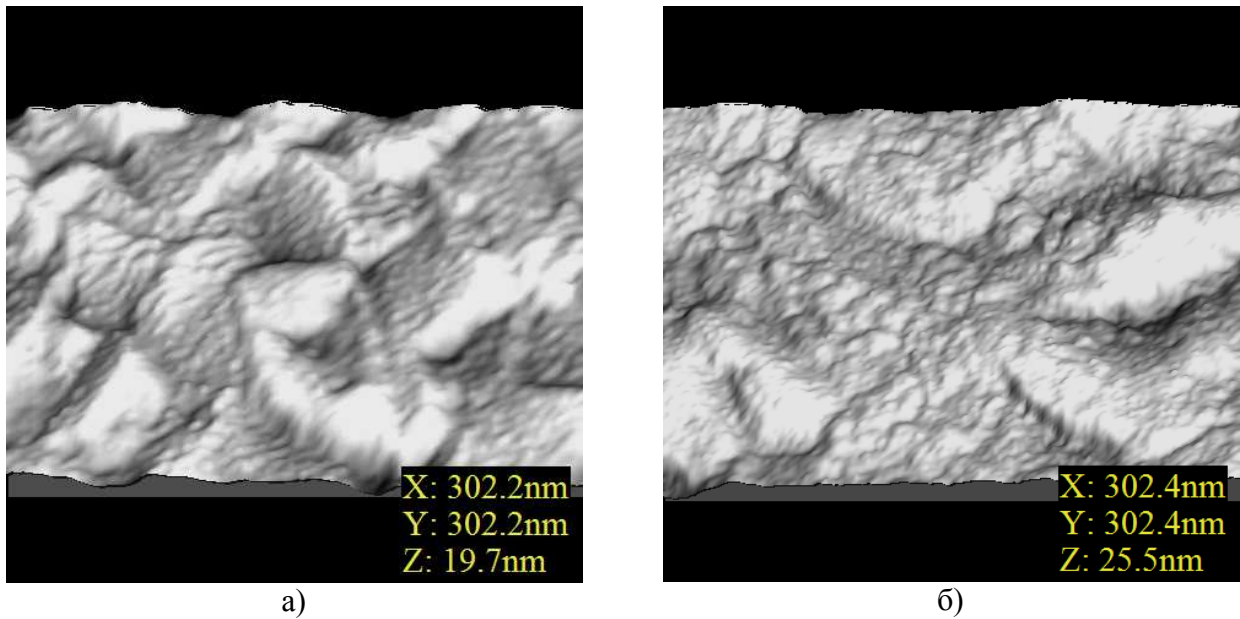


Рис. 6. СТМ-изображения поверхности пленок Cr/Al/Cr (а) и Ti/Al/Ti (б) толщиной 15/90/15 нм

Четвертая глава посвящена описанию математической модели кантилевера. Полагается, что кантилевер подчиняется теории балки Бернулли-Эйлера. Уравнение движения кантилевера представляет собой дифференциальное уравнение в частных производных:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial \tau^2} + c \frac{\partial y}{\partial \tau} = F, \quad (2)$$

где $y(x, \tau)$ – поперечное смещение нейтральной плоскости кантилевера в точке x в момент времени τ , ось x направлена вдоль кантилевера и имеет начало координат в месте его крепления к опорной площадке, E, ρ – модуль Юнга и плотность материала кантилевера, I – момент инерции поперечного сечения кантилевера относительно нейтральной оси, A – площадь поперечного сечения ($A = w \times t$), c – коэффициент трения, F – внешняя поперечная сила. Четвертый порядок уравнения (2) по пространственной координате x требует задания четырех граничных условий. Конец кантилевера с координатой $x = 0$ полагается жестко закрепленным. Это подразумевает равенство нулю смещения и изгиба данного конца:

$$y(0, \tau) = 0, \quad \left. \frac{\partial y(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \quad (3)$$

Конец $x = L$ свободен, что подразумевает равенство нулю изгибающего момента и усилия сдвига:

$$EI \left. \frac{\partial^2 y(x, \tau)}{\partial x^2} \right|_{x=L} = 0, \quad \left. \frac{\partial}{\partial x} \left(EI \frac{\partial^2 y(x, \tau)}{\partial x^2} \right) \right|_{x=L} = 0. \quad (4)$$

Уравнение (2) является линейным при условии однородности материала и постоянства поперечного сечения кантилевера ($EI = \text{const}$), линейности члена, описывающего диссипацию, и линейности внешней силы. Нелинейность

колебаний кантилевера возникает при учете инерции движения, а также при больших амплитудах колебаний. Кроме того, для МЭМС/НЭМС-резонаторов характерны несколько источников потерь энергии, и ситуация, когда диссипационный член является линейным, встречается достаточно редко [5].

Колебания кантилеверов возбуждались электростатическим методом, поэтому дополнительным источником нелинейности являлась внешняя электростатическая сила:

$$F_E = \frac{\varepsilon B V(\tau)^2}{2(g-y)^2}, \quad (5)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, B – площадь нижней грани кантилевера ($B = L \cdot w$), V – возбуждающее напряжение, g – величина воздушного зазора между кантилевером и подложкой в исходном состоянии. Влияние электростатического метода возбуждения колебаний на параметры резонатора зачастую удобно рассматривать на примере линейного осциллятора с сосредоточенными параметрами [6]:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = \frac{\varepsilon B V^2(\tau)}{2(g-y)^2}, \quad (6)$$

где m – масса осциллятора, c – коэффициент трения, k – упругость. В МЭМС/НЭМС в качестве возбуждающего сигнала принято использовать комбинацию постоянного и переменного напряжений:

$$V(\tau) = V_{DC} + V_{AC} \cos(\omega\tau), \quad (7)$$

при этом V_{DC} , как правило, составляет несколько вольт, V_{AC} – несколько десятков или сотен милливольт, т.е. $V_{AC} \ll V_{DC}$. В этом случае полагается, что осциллятор колеблется с малой амплитудой $u(\tau)$ относительно положения равновесия δ :

$$y(\tau) = \delta + u(\tau). \quad (8)$$

Подстановка выражений (7) и (8) в (6) после преобразований приводит к следующему уравнению движения:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + k_{eff}u + \alpha_q u^2 + \alpha_c u^3 = F \cos(\omega\tau) + F_p u \cos(\omega\tau), \quad (9)$$

где

$$k_{eff} = k - \frac{\varepsilon B V_{DC}^2}{(g-\delta)^3}, \quad \alpha_q = -\frac{3\varepsilon B V_{DC}^2}{2(g-\delta)^4}, \quad \alpha_c = -\frac{2\varepsilon B V_{DC}^2}{(g-\delta)^5},$$

$$F = \frac{\varepsilon B V_{DC} V_{AC}}{(g-\delta)^2}, \quad F_p = \frac{2\varepsilon B V_{DC} V_{AC}}{(g-\delta)^3}. \quad (10)$$

Электростатический механизм возбуждения колебаний вносит в колебательную систему ряд особенностей. Во-первых, уменьшается коэффициент упругости резонатора (spring softening effect [6]), что приводит к уменьшению

резонансной частоты, т. к. $\omega_0 = \sqrt{k_{eff}/m}$. Во-вторых, в уравнении движения появляются нелинейные члены u^2 и u^3 (членами более высокого порядка, как правило, пренебрегают) с отрицательными коэффициентами α_q и α_c , что также

приводит к уменьшению резонансной частоты [6]. В-третьих, из-за наличия члена $F_p \cdot u \cdot \cos(\omega\tau)$ в системе возможно параметрическое возбуждение. Если возбуждающий сигнал содержит только переменную составляющую ($V_{DC} = 0$), то уравнение движения (9) и коэффициенты (10) сохраняют вид, но величина коэффициентов будет значительно меньше, чем при наличии V_{DC} . Следовательно, описанные выше эффекты, приводящие к сдвигу резонансной частоты осциллятора, будут малы. Именно поэтому в диссертационной работе измерение резонансных характеристик кантилеверов выполнялось при отсутствии постоянной составляющей в возбуждающем сигнале.

Выражение для собственных частот кантилевера выводится из уравнения движения при отсутствии диссипации и внешней силы:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial \tau^2} = 0. \quad (11)$$

В случае многослойного кантилевера суммарной толщиной t , состоящего в направлении оси z (по толщине) из K слоев различных материалов с толщинами t_i , плотностями ρ_i выражение (11) принимает вид [7]:

$$w \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \int_t E(z - z_0)^2 dz + w \sum_{i=1}^K t_i \rho_i \frac{\partial^2 y}{\partial \tau^2} = 0, \quad (12)$$

где z_0 – координата нейтральной плоскости кантилевера. Из уравнения (12) следует выражение для собственных частот изгибных колебаний многослойного кантилевера:

$$f_n = \frac{(\beta_n L)^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{\int_t E(z - z_0)^2 dz}{\sum_{i=1}^K t_i \rho_i}}, \quad (13)$$

где n – номер колебательной моды, $\beta_n L \approx 1,8751, 4,6941, 7,8548, \dots$. В предположении, что кантилевер имеет три слоя с соотношением толщин 1/6/1 и внешние слои изготовлены из одного и того же материала, выражение для его первой (основной) собственной частоты имеет вид:

$$f_0 = \frac{(1,875)^2}{16\pi} \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{\frac{37}{3} E_{\text{внеш}} + 9E_{\text{внутр}}}{\rho_{\text{внеш}} + 3\rho_{\text{внутр}}}}, \quad (14)$$

где $E_{\text{внеш}}, E_{\text{внутр}}, \rho_{\text{внеш}}, \rho_{\text{внутр}}$ – модули Юнга и плотности материала внешних и внутреннего слоев кантилевера.

Добротность МЭМС/НЭМС-резонатора, как правило, определяется следующими источниками потерь энергии: воздушное демпфирование (Q_{air}), передача энергии колебаний опорной площадке через место крепления (Q_{clamping}), термоупругое демпфирование (Q_{TED}), а также потери энергии на дефектах в объеме (Q_{volume}) и в поверхностном слое материала (Q_{surface}). Данные источники действуют независимо друг от друга, результирующая добротность резонатора определяется выражением:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{air}}} + \frac{1}{Q_{\text{clamping}}} + \frac{1}{Q_{\text{TED}}} + \frac{1}{Q_{\text{volume}}} + \frac{1}{Q_{\text{surface}}}. \quad (15)$$

Воздушное демпфирование обусловлено сопротивлением воздуха, которое кантилевер преодолевает в процессе колебаний. В данной работе измерение резонансных характеристик кантилеверов выполнялось при таком давлении воздуха, когда их добротность достигала максимальной величины и не зависела от давления. Полагалось, что воздушное демпфирование отсутствовало, поэтому описание данного механизма потерь энергии не приводится.

Механизм передачи энергии кантилевера опорной площадке заключается в том, что колеблющийся кантилевер создает в области крепления периодически изменяющиеся усилия сдвига и моменты сил, которые возбуждают в опорной площадке механические волны. Волны распространяются в ней и рассеиваются. Добротность кантилевера, обусловленная данным явлением, задается выражением [8]:

$$Q_{clamping} = \left[\frac{0,24(1+\nu)}{(1-\nu)\psi} \right] \frac{1}{(\gamma_n \chi_n)^2} \left(\frac{L}{t} \right)^3, \quad (16)$$

где ν – коэффициент Пуассона материала кантилевера, ψ – константа, равная 0,336, γ_n и χ_n – постоянные величины для n -й колебательной моды (для 1-й моды $\gamma_n = 0,597$ и $\chi_n = -0,734$).

Механизм термоупругого демпфирования заключается в следующем. При изгибе кантилевера одна его сторона сжимается и нагревается, другая – растягивается и охлаждается, т.е. кантилевер при изгибе выходит из теплового равновесия. Внутри него создается градиент температуры, под действием которого формируется диссипативный поток тепла, который позволяет кантилеверу снова вернуться в состояние теплового равновесия. Температура внутри кантилевера выравнивается в течение некоторого времени релаксации τ_R . Добротность кантилевера, обусловленная термоупругим демпфированием, задается выражением [9]:

$$Q_{TED} = \frac{\rho C}{E \alpha^2 T} \frac{1 + (f \cdot \tau_R)^2}{f \cdot \tau_R}, \quad \tau_R = \frac{t^2}{\pi^2 D}, \quad (17)$$

где C – удельная теплоемкость, E – модуль Юнга, α – линейный коэффициент теплового расширения, T – абсолютная температура, D – температуропроводность материала, $D = \kappa / \rho C$, κ – теплопроводность.

Потери энергии на дефектах в объеме и поверхностном слое кантилевера происходят вследствие взаимодействия механических волн, распространяющихся в колеблющемся кантилевере, с дефектами. Дефектами являются межзеренные границы, чужеродные атомы в кристаллической решетке, неровности поверхности, поверхностный оксид, различные адсорбаты и др. Предположим, что исследуемый резонатор имеет объем V и содержит N дефектов. В случае достаточно крупного резонатора и равномерного распределения дефектов в объеме концентрацию дефектов можно записать в виде:

$$\eta = \lim_{V \rightarrow \infty, N \rightarrow \infty} \frac{N}{V}. \quad (18)$$

У наноразмерного резонатора поверхностный слой составляет достаточно большую часть всего объема, и значительная часть дефектов находится именно в поверхностном слое. Поэтому общее число дефектов и их концентрацию можно записать следующим образом:

$$N = \eta_S S + \eta_V V, \quad \eta = \frac{N}{V} = \eta_S \frac{S}{V} + \eta_V, \quad (19)$$

где η_S – число дефектов на единицу площади поверхности, η_V – число дефектов в единице объема, S – площадь поверхности тела. Т.е. у наноразмерного резонатора концентрация дефектов пропорциональна отношению площади поверхности к его объему. Если предположить, что потери энергии пропорциональны концентрации дефектов, то получим:

$$\frac{1}{Q} \propto \Delta W \propto \frac{S}{V}, \quad (20)$$

где ΔW – потери энергии за один период колебаний. У исследуемых кантилеверов $t \ll L, w$, поэтому

$$\frac{S}{V} = \frac{2Lw + 2Lt + 2wt}{Lwt} \approx \frac{2Lw}{Lwt} = \frac{2}{t} \Rightarrow Q \propto t. \quad (21)$$

Таким образом, добротность должна изменяться пропорционально толщине кантилевера. Добротность, обусловленная потерями энергии на дефектах поверхностного слоя, задается выражением [10]:

$$Q_{surface} = \frac{t}{6t_s} \frac{E}{E_d^S}, \quad (22)$$

где t_s – толщина поверхностного слоя кантилевера, E_d^S – диссипативная составляющая модуля Юнга поверхностного слоя. Выражение (22) не позволяет рассчитать добротность, так как в него входят неизвестные величины. Однако оно говорит о характере зависимости добротности от геометрических размеров кантилевера: добротность кантилевера наноразмерной толщины должна убывать с уменьшением толщины по линейному закону и не должна зависеть от длины и ширины.

В пятой главе приводятся результаты измерения резонансных характеристик кантилеверов и выполняется их анализ.

Экспериментально получены зависимости добротности нескольких кантилеверов различных размеров от давления воздуха в вакуумной камере измерительного стенда. При давлении воздуха менее 10^{-2} мбар добротность кантилеверов достигала максимальной величины и не зависела от давления воздуха, т.е. определялась внутренними источниками потерь энергии. Именно в данном режиме (режиме внутренних потерь) измерялись резонансные характеристики кантилеверов. Полагалось, что воздушное демпфирование отсутствует.

Измеренные значения резонансной частоты кантилеверов находились в диапазоне $10 \div 1700$ кГц. Расчет собственной частоты выполнялся в соответствии с выражением (14), при расчетах использовались значения модуля Юнга и плотности объемного материала: $E_{Cr} = 279$ ГПа, $E_{Ti} = 112$ ГПа,

$E_{Al} = 70$ ГПа, $\rho_{Cr} = 7190$ кг/м³, $\rho_{Ti} = 4510$ кг/м³, $\rho_{Al} = 2700$ кг/м³. Анализ зависимости резонансной частоты от длины кантилевера показал, что по характеру зависимости экспериментальные данные находились в согласии с теорией. Основными причинами количественного расхождения экспериментальных данных с результатами расчетов являлись описанные выше явления перетрав/недотрав. Зависимость резонансной частоты кантилеверов от ширины отсутствовала, что соответствовало предсказаниям теории.

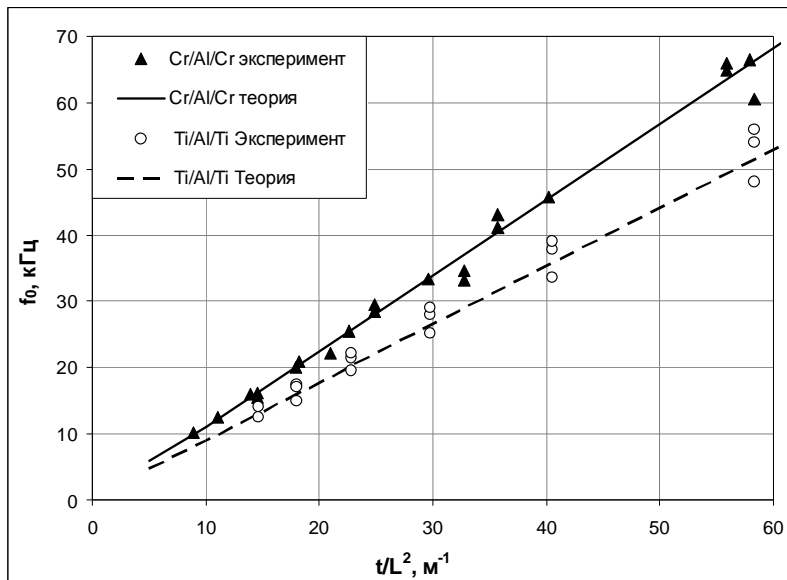


Рис. 7. Зависимость резонансной частоты кантилеверов от t/L^2

Согласно принятой модели, резонансная частота кантилевера должна изменяться пропорционально отношению толщины к квадрату длины (выражение (14)). Коэффициент пропорциональности определяется значениями модуля Юнга и плотности материала слоев кантилевера. На рис. 7 представлен график зависимости резонансной частоты кантилеверов от t/L^2 . Прямыми обозначены результаты расчетов для кантилеверов Cr/Al/Cr и Ti/Al/Ti. На график также нанесены экспериментально полученные значения резонансной частоты, за исключением значений частоты кантилеверов, изготовленных с дефектом перетрав/недотрав более 1 мкм. Расхождение экспериментальных данных с теорией не превышало 10%. Важно, что в эксперименте наблюдалась линейная зависимость резонансной частоты от отношения толщины к квадрату длины кантилевера. Это свидетельствовало о том, что в экспериментах по измерению резонансной частоты зависимость свойств материала от толщины кантилевера вплоть до толщины 40 нм не наблюдалась, и для расчета собственных частот кантилеверов была применима классическая теория балки при значениях модуля Юнга и плотности объемного материала.

Добротность кантилеверов находилась в диапазоне 100÷2100, что согласуется с литературными данными о добротности металлических кантилеверов. Наблюдался значительный разброс добротности, однако можно было выделить ряд особенностей. Во-первых, отсутствовала зависимость добротности от длины и ширины кантилевера. Во-вторых, добротность убывала с уменьшением толщины по закону, близкому к линейному. На рис. 8

представлена зависимость добротности кантилеверов от толщины, аппроксимирующая прямая проведена через средние значения. В-третьих, кантилеверы Ti/Al/Ti имели добротность на порядок ниже, чем кантилеверы Cr/Al/Cr. В-четвертых, наблюдалось уменьшение добротности кантилеверов со временем: у кантилеверов Cr/Al/Cr добротность убывала на 20% за 3 месяца пребывания в воздухе при нормальных условиях.

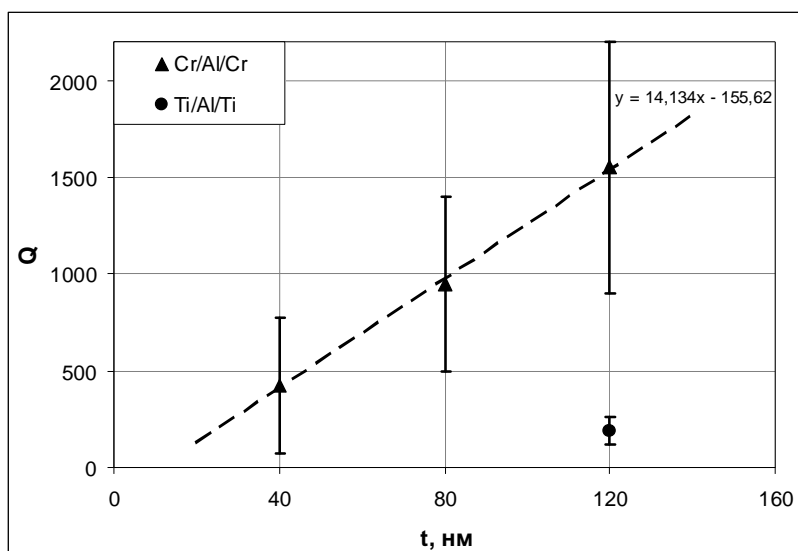


Рис. 8. Зависимость добротности кантилеверов от толщины

Добротность кантилевера определяется несколькими механизмами потерь энергии, которые действуют независимо друг от друга. Чтобы определить результирующую добротность кантилевера, необходимо рассмотреть каждый источник потерь энергии в отдельности.

Воздушное демпфирование полагалось отсутствующим, $Q_{air} = \infty$.

Добротность, обусловленная потерями энергии колебаний кантилевера в месте крепления к опорной площадке, задается выражением (16). Согласно данному выражению, добротность кантилевера пропорциональна величине

$\left(\frac{L}{t}\right)^3$. Поэтому кантилеверы, имеющие отношение длины к толщине ~ 100 ,

должны обладать добротностью $\sim 10^6$ для первой колебательной моды. Если же отношение длины к толщине составляет ~ 1000 , то расчетное значение добротности имеет порядок 10^9 . В то же время, наибольшие измеренные значения добротности исследуемых кантилеверов имели величину около 2000. Следовательно, потери энергии колебаний в опорной площадке не являлись доминирующим источником потерь энергии, и добротность кантилеверов была ограничена другими механизмами демпфирования.

Добротность, обусловленная термоупругим демпфированием, была рассчитана в соответствии с выражением (17). При расчетах кантилевер полагался изготовленным из алюминия, имеющим толщину 100 нм и резонансную частоту 100 кГц. Использовались следующие значения констант и величин: $\kappa_{Al} = 237$ Вт/(м·К), $\rho_{Al} = 2700$ кг/м³, $C_{Al} = 930$ Дж/(кг·К), $E_{Al} = 70$ ГПа, $\alpha_{Al} = 23,1 \times 10^{-6}$ 1/К, $T = 300$ К. Согласно выражению (17), для кантилевера с

данными параметрами время релаксации составляет $1,1 \times 10^{-11}$ с. На частоте 100 кГц период колебаний кантилевера составляет 10^{-5} с. Таким образом, время релаксации существенно меньше периода колебаний кантилевера. Следовательно, термоупругое демпфирование мало, и, согласно (17), добротность кантилевера составляет $2,09 \times 10^8$. В случае кантилевера, изготовленного из хрома ($\kappa_{Cr} = 93,9$ Вт/(м·К), $\rho_{Cr} = 7190$ кг/м³, $C_{Cr} = 461$ Дж/(кг·К), $E_{Cr} = 279$ ГПа, $\alpha_{Cr} = 8,2 \times 10^{-6}$ 1/К) время релаксации составляет $3,6 \times 10^{-11}$ с, а добротность – $1,63 \times 10^8$. Таким образом, термоупругое демпфирование, также как и потери энергии через крепление, не являлось доминирующим источником потерь энергии в исследуемых кантилеверах.

Согласно современной модели [10], потери энергии на дефектах в объеме кантилевера не зависят от его геометрии, а определяются лишь свойствами материала. В то же время добротность, обусловленная потерями в поверхностном слое, не зависит от длины и ширины кантилевера и изменяется пропорционально толщине (выражение (22)). На основании экспериментально полученных зависимостей добротности от геометрических размеров кантилевера был сделан вывод о том, что добротность определялась потерями энергии на дефектах поверхностного слоя кантилевера.

Выше было отмечено, что кантилеверы Ti/Al/Ti 15/90/15 нм обладали более низкой добротностью (100-250), чем Cr/Al/Cr (900-2100). Возможно, разница в добротности была обусловлена высокой газопоглотительной способностью титана. Поверхность кантилеверов Ti/Al/Ti активно поглощала различные вещества из окружающей среды, что обусловило наличие большого числа дефектов, на которых происходили потери энергии. Хром не обладает высокой газопоглотительной способностью. Причиной уменьшения добротности кантилеверов со временем, вероятнее всего, являлось накопление различных адсорбатов на их поверхности. Таким образом, полученные экспериментальные данные подтверждали вывод об определяющем влиянии поверхностного слоя исследуемых кантилеверов на их добротность.

В заключении диссертации изложены основные результаты и выводы:

1. Отработана технология изготовления металлических кантилеверов наноразмерной толщины, обладающих сверхвысоким отношением длины к толщине. Изготовлены кантилеверы толщиной 40 нм, обладающие рекордно высоким отношением $L/t = 1500$.

2. Продемонстрировано использование симметричной трехслойной структуры кантилевера для предотвращения изгиба под действием остаточных напряжений. Установлено, что использование трехслойной структуры позволяет с высокой степенью повторяемости изготавливать металлические кантилеверы без применения специальных методик нанесения металлических пленок. Эффективность использования трехслойной структуры подтверждена результатами изготовления кантилеверов двух типов: Cr/Al/Cr и Ti/Al/Ti с соотношением толщин слоев 1/6/1.

3. Отработана методика измерения резонансных характеристик кантилеверов при различных давлениях воздуха, использующая

электростатический метод возбуждения колебаний кантилевера и оптический метод регистрации. Методика применима для исследования резонансных характеристик различных чувствительных элементов МЭМС/НЭМС.

4. Получены экспериментальные зависимости резонансных характеристик трехслойных металлических кантилеверов, обладающих сверхвысоким отношением длины к толщине, от их геометрических размеров. Установлено, что резонансная частота кантилеверов Cr/Al/Cr и Ti/Al/Ti с высокой степенью точности описывается теорией балки Бернулли-Эйлера при значениях модуля Юнга и плотности объемного материала. Зависимость свойств материала от толщины кантилеверов Cr/Al/Cr и Ti/Al/Ti в диапазоне толщины 40÷120 нм не наблюдается.

5. Выполнен комплексный анализ добротности металлических кантилеверов наноразмерной толщины. На основании полученных экспериментальных данных и их сравнения с результатами расчетов установлено, что при отсутствии воздушного демпфирования добротность определяется главным образом потерями энергии на дефектах поверхностного слоя кантилевера.

Список цитируемой литературы:

1. Loh O.Y., Espinosa H.D. Nanoelectromechanical contact switches // Nature Nanotech. – 2012. – Vol. 7. – P. 283-295.

2. Ophus C., Nelson-Fitzpatrick N., Lee Z., Lubner E., Harrower C., Westra K., Dahmen U., Radmilovic V., Evoy S., Mitlin D. Resonance properties and microstructure of ultracompliant metallic nanoelectromechanical systems resonators synthesized from Al-32 at. % Mo amorphous-nanocrystalline metallic composites // Appl. Phys. Lett. – 2008. – Vol. 92. – P. 123108. – 3 pp.

3. Li X., Ono T., Wang Y., Esashi M. Ultrathin single-crystalline-silicon cantilever resonators: Fabrication technology and significant specimen size effect on Young's modulus // Appl. Phys. Lett. – 2003. – Vol. 83. – P. 3081-3083.

4. Babaei Gavan K., van der Drift E.W.J.M., Venstra W.J., Zuiddam M.R., van der Zant H.S.J. Effect of undercut on the resonant behaviour of silicon nitride cantilevers // J. Micromech. Microeng. – 2009. – Vol. 19. – P. 035003. – 8 pp.

5. В.П. Митрофанов. Колебательные системы с малой диссипацией (от макро- до наносцилляторов): Учебное пособие. – М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. – 74 с.

6. Younis M.I. MEMS linear and nonlinear statics and dynamics. – New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2011. – 453 p.

7. Sandberg R., Svendsen W., Mølhav K., Boisen A. Temperature and pressure dependence of resonance in multi-layer microcantilevers // J. Micromech. Microeng. – 2005. – Vol. 15. – P. 1454-1458.

8. Hao Z., Erbil A., Ayazi F. An analytical model for support loss in micromachined beam resonators with in-plane flexural vibrations // Sens. Actuators A. – 2003. – Vol. 109. – P. 156-164.

9. Zener C. Internal friction in solids: II. General theory of thermoelastic internal friction // Phys. Rev. – 1938. – Vol. 53. – P. 90-99.

10. Yasumura K.Y., Stowe T.D., Chow E.M., Pfafman T., Kenny T.W., Stipe B.C., Rugar D. Quality factors in micron- and submicron-thick cantilevers // J. Microelectromech. Syst. – 2000. – Vol. 9. – P. 117-125.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. Уваров И.В., Наумов В.В., Амиров И.И. Особенности изготовления металлических кантилеверов наноразмерной толщины // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – № 11. – С. 5-9.

A2. Уваров И.В., Наумов В.В., Амиров И.И. Резонансные свойства многослойных металлических нанокантилеверов // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – № 4. – С. 29-32.

A3. Уваров И.В., Наумов В.В., Аминов М.К., Куприянов А.Н., Амиров И.И. Исследование резонансных характеристик металлических микро- и нанобалок // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 12. – С. 45-48.

A4. Уваров И.В., Морозов О.В., Козин И.А., Постников А.В., Амиров И.И., Кальнов В.А. Динамические характеристики чувствительного элемента акселерометра с повышенным фактором демпфирования // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 12. – С. 38-40.

A5. Uvarov I.V., Naumov V.V., Amirov I.I. Resonance properties of multilayer metallic nanocantilevers // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8700. – 87000S-1. – 8 pp.

A6. Уваров И.В., Наумов В.В., Амиров И.И. Технология изготовления трехслойных металлических нанокантилеверов // Вестник ЯрГУ. Серия Естественные и технические науки. – 2012. – № 4. – С. 2-9.

A7. Уваров И.В., Наумов В.В., Амиров И.И. Резонансные свойства многослойных металлических нанокантилеверов // Вестник ЯрГУ. Серия Естественные и технические науки. – 2012. – № 2. – С. 32-39.

A8. Уваров И.В., Амиров И.И., Аминов М.К. Исследование резонансных характеристик металлических микро- и нанобалок // Вестник ЯрГУ. Серия Естественные и технические науки. – 2011. – № 2. – С. 38-43.

A9. Уваров И.В., Козин И.А., Амиров И.И. Исследование влияния давления воздуха на динамику чувствительного элемента микромеханических устройств // Вестник ЯрГУ. Серия Естественные и технические науки. – 2010. – № 2. – С. 38-42.

A10. Уваров И.В., Наумов В.В. Изготовление и анализ подвижных элементов нанoeлектромеханических переключателей // Путь в науку. Физика: Материалы международной молодежной научно-практической конференции. Ярославль: ЯрГУ, 2013. С. 23.

A11. Уваров И.В. Стенд для измерения динамических характеристик микро- и наномеханических устройств // Сборник «Ярославский государственный университет имени П.Г. Демидова. Лучшие молодежные научно-исследовательские работы. 2012 год». Ярославль: ЯрГУ, 2013. С. 40-41.

A12. Uvarov I.V., Naumov V.V., Amirov I.I. Resonance properties of multilayer metallic nanocantilevers // International Conference “Micro- and Nanoelectronics – 2012”: Book of abstracts. Moscow, Zvenigorod. 2012. P. O3-30.

A13. Uvarov I.V., Naumov V.V., Amirov I.I. Size effect in multilayer metallic nanocantilevers // II International conference on Modern problems in physics of surfaces and nanostructures: Book of abstracts. Yaroslavl. 2012. P. 120.

A14. Postnikov A.V., Uvarov I.V., Amirov I.I. Characterization of electrostatically-actuated metal microbeams // International conference on Modern problems in physics of surfaces and nanostructures: Book of abstracts. Yaroslavl. 2010. P. 101-102.

A15. Амиров И.И., Козин И.А., Постников А.В., Уваров И.В. Исследование динамики чувствительного элемента микроэлектромеханических устройств // VIII Курчатовская молодежная научная школа: Сб. аннотаций работ. Москва. 2010. С. 16.

Подписано в печать 13.11.13. Формат 60x84/16.
Тираж 100 экз. Заказ 09/13.
Отдел оперативной полиграфии ЯрГУ
150000, Ярославль, ул. Советская, 14.