

На правах рукописи



Асташенкова Ольга Николаевна

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ
В ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ МИКРОМЕХАНИКИ

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2015

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

Научный руководитель:

Корляков Андрей Владимирович,
доктор технических наук,
директор НОЦ «Нанотехнологии», профессор
кафедры микро- и нанoeлектроники
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова
(Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Официальные оппоненты:

Кузнецов Вячеслав Геннадьевич, Лауреат
Государственной премии России в области
науки и техники, доктор технических наук,
заведующий лабораторией федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Институт проблем машиноведения
Российской академии наук (г. Санкт-Петербург)

Пятьшев Евгений Нилович, кандидат физико-
математических наук, заведующий научно-
исследовательской лабораторией нано- и
микросистемной техники объединённого
научно-технологического института СПбГПУ
(г. Санкт-Петербург).

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Национальный исследовательский ядерный
университет "МИФИ" (г. Москва)

Защита состоится «17» декабря 2015 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д212.238.04 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

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

Автореферат разослан «16» октября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.04,

д.ф.-м.н., профессор

 Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В микроэлектромеханических системах используют геометрию и свойства тонких плёнок для управления параметрами устройств, выполненных на их основе.

Возникновение неконтролируемых механических напряжений в слоях, входящих в состав микромеханических структур, может приводить к возникновению невоспроизводимых механических характеристик приборов, изменению формы устройства, а также к непрогнозируемым термомеханическим изменениям. Кроме того, механические напряжения, возникающие в процессе формирования плёнок, могут приводить к растрескиванию и отслаиванию их от подложек.

К сожалению, задача воспроизводимого получения низконапряжённых плёнок в условиях реального технологического процесса затруднена из-за множества факторов, влияющих на формирование механических напряжений в плёнках в процессе роста. Особенно это касается методов ионно-плазменного осаждения при формировании поликристаллических плёнок, где проблему неконтролируемых механических напряжений не удаётся решить подбором материалов с близкими параметрами кристаллической решётки и температурными коэффициентами линейного расширения, как при эпитаксиальном росте. К тому же, ввиду многообразия и сложности конструкций микромеханических элементов и систем возникает необходимость создания методик определения механических напряжений, учитывающих особенности конструкции и формобразования микромеханических элементов.

Контролируя и изменяя механические напряжения в тонких плёнках, можно создавать не только низконапряжённые структуры, но и структуры с управляемыми напряжениями. Управлять механическими напряжениями можно как в ходе формирования структур, так и после его завершения за счёт модификации уже сформированных плёнок, а также активации мембраны с помощью различных внешних воздействий в процессе эксплуатации устройства.

Мембранные микромеханические структуры на основе низконапряжённых плёнок используются для различных датчиков и преобразователей. Чувствительность мембраны определяется не только конструкцией мембраны, но и свойствами материалов слоёв, включённых в её состав. Уменьшая механические напряжения слоёв, составляющих мембранную композицию, можно добиться уменьшения жесткости мембраны, а значит и увеличения чувствительности при сохранении конструкции и малых размеров устройства.

Цель работы:

Разработка и исследование эффективных способов управления механическими напряжениями в тонкоплёночных композициях элементной базы микромеханики на различных стадиях формирования микромеханических структур.

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

1. Управление механическими напряжениями в слоях и тонкоплёночных композициях микромеханики в процессе их формирования ионно-плазменными методами и последующего отжига с целью повышения чувствительности.
2. Создание комплекса методик определения сжимающих и растягивающих механических напряжений в однослойных и композиционных мембранах.
3. Разработка способов управления механическими напряжениями мембранных структур в процессе эксплуатации устройств микромеханики.

Научная новизна работы:

1. Определено, что доминирующее влияние на возникновение механических напряжений в плёнках карбида кремния оказывает поток высокоэнергетичных частиц из плазмы разряда на поверхность роста в процессе ионно-плазменного осаждения.
2. Установлено определяющее влияние на формирование механических напряжений в плёнках нитрида алюминия градиента электрического потенциала, возникающего в процессе ионно-плазменного осаждения.
3. Экспериментально установлено, что доминирующим фактором, определяющим увеличение механической чувствительности гофрированных композиционных мембран «нитрид кремния–золото» является уменьшение механических напряжений в плёнке золота, что достигается низкотемпературным вакуумным отжигом.
4. Экспериментально показана возможность активации прогиба композиционных мембран при управлении их механическими напряжениями с помощью электростатического сжатия и термомеханического воздействия при лазерном облучении.

Практическая значимость работы:

1. Получены экспериментальные зависимости механических напряжений в тонких плёнках хрома от технологических параметров процесса их формирования: давления рабочего газа и температуры подложки
2. Достигнуто снижение механических напряжений в плёнках карбида кремния при уменьшении потока высокоэнергетичных частиц к растущей плёнке в процессе ионно-плазменного осаждения.
3. Достигнуто снижение механических напряжений в плёнках нитрида алюминия за счёт уменьшения градиента электрического потенциала в плёнке в процессе ионно-химического осаждения.
4. Достигнуто увеличение чувствительности гофрированных композиционных мембран, включающих плёнки золота с подслоем хрома, при низкотемпературном вакуумном отжиге за счёт уменьшения механических напряжений в плёнке золота.
5. Создан комплекс методик определения механических напряжений в микромеханических мембранах, включающий методики измерения сжимающих и растягивающих напряжений в однослойных и композиционных мембранах с различным рельефом поверхности.

6. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ НОЦ ЦМИД и НОЦ «Нанотехнологии»: ОКР «Микродатчик», ОКР «Микродатчик-А», НИР «Электрон-Снасть», ОКР «Электрон-1П», НИР «Листок», а также НИР «Физико-технологические основы формирования высокочувствительных нано- и микромембранных элементов» и НИР «Физико-технологические основы управления механическими напряжениями в микро- и наноструктурах для создания высокочувствительных микромеханических систем» (гранты ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»).

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Основным фактором, определяющим формирование механических напряжений в плёнках карбида кремния в процессе ионно-плазменного осаждения, является поток высокоэнергетичных частиц из плазмы разряда на растущий слой.
2. Снижение сжимающих механических напряжений в плёнке нитрида алюминия достигается при уменьшении градиента электрического потенциала в плёнке в процессе ионно-плазменного осаждения.
3. Увеличение чувствительности композиционных гофрированных мембранных структур на основе композиций «нитрид кремния–золото» достигается предварительным низкотемпературным вакуумным отжигом, обеспечивающим уменьшение механических напряжений в плёнках золота.

Апробация результатов.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах и школах:

- Международная конференция «Микро- и нанотехнологии в электронике 2014», г. Нальчик, Россия, 1–6 июня 2014 г.;
- 11-я международная конференция «Плёнки и покрытия – 2013», Санкт-Петербург, 6–8 мая 2013 г.;
- 9th European conference on Silicon Carbide and Related Materials, Saint-Petersburg, Russia, 2–6 September 2012;
- 15-я научная молодёжная школа «Физика и технология микро- и наносистем. Карбид кремния и родственные материалы», Санкт-Петербург, 8–9 октября 2012 г.;
- Международная научно-техническая конференция «Нанотехнологии-2012», г. Таганрог, 25–29 июня 2012 г.;
- IV Международная научно-техническая конференция «Микро- и нанотехнологии в электронике», г. Нальчик, 22–26 сентября 2011 г.;
- VI Международный научный семинар «Карбид кремния и родственные материалы» ISSCRM-2009, г. Великий Новгород, 2009 г.;
- XVI Всероссийская конференция «Структура и динамика молекулярных систем», г. Йошкар-Ола, 29 июня – 4 июля 2009 г.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из них 6 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора заключается в постановке задачи, в планировании экспериментов, в разработке и оптимизации методик для определения механических напряжений в тонких плёнках, входящих в состав микромеханических структур. Автором лично проведены все измерения и расчёты, анализ полученных результатов, а также подготовка экспериментальных образцов для измерений.

Методы исследования.

Для оценки величины механических напряжений в данной работе был разработан комплекс методик, основанных на интерферометрическом методе измерения прогиба мембраны в зависимости от подаваемого на неё давления и профилометрии поверхности мембран и плёнок, образующих рельеф под действием сжимающих механических напряжений. Для оценки рельефа поверхности использовался оптический микроскоп КН-7700 («Nirox», Япония). Для измерения величины прогиба микромеханических балок использовался растровый электронный микроскоп Quanta Inspect («FEI», США). Для измерения растягивающих внутренних механических напряжений микромеханических мембран, обладающих плоским рельефом поверхности, использовалась лабораторная установка, разработанная и собранная в НОЦ «ЦМИД» СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Процесс изготовления микромеханических мембран и балок был реализован в чистых помещениях НОЦ «Нанотехнологии» СПбГЭТУ «ЛЭТИ». В ходе формирования опытных образцов были задействованы операции фотолитографии, магнетронного нанесения, ионно-плазменного осаждения, электронно-лучевого напыления, резки и тестирования кристаллов.

Толщины исследуемых плёнок определялись эллипсометрическими методами, а также с использованием технологического комплекса остросфокусированного ионного пучка.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и библиографического списка, включающего 61 наименование. Диссертация содержит 144 страницы машинописного текста, включая 55 рисунков и 6 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность данной диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна работы, практическая значимость полученных результатов и научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** – «Механические напряжения в тонких плёнках и микромеханических структурах на их основе» – рассмотрены основные причины возникновения механических напряжений в тонких плёнках. Рассмотрено их влияние на форму и характеристики микромеханических структур, выполненных на их основе. Проанализированы возможности управления механическими напряжениями в тонких плёнках на различных

стадиях формирования устройства. Дан обзор методов измерения механических напряжений в тонких плёнках.

Во **второй главе** – «Определение механических напряжений в микромеханических структурах» – представлен комплекс методик определения механических напряжений в микромеханических мембранах и балках, разработанный в ходе данной работы с учётом особенностей формообразования микромеханических структур под действием механических напряжений.

Для плоских однослойных и композиционных мембран, обладающих растягивающими механическими напряжениями, методика определения механических напряжений основана на зависимости прогиба мембраны от давления подаваемого на неё сжатого воздуха. Сигнал снимается при помощи волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо, а давление задается системой сжатого воздуха или водяным столбом. Механические напряжения σ определяются по уравнению прогиба мембраны [1] под действием давления на линейном участке этой зависимости (рисунок 1):

$$P = C_1 \frac{\sigma \cdot hW}{a^2} + C_2 \frac{Eh}{a^4(1-\nu^2)} W^3,$$

где: a – радиус круглой мембраны; W – прогиб центра мембраны; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; h – толщина мембраны; P – давление сжатого воздуха, подаваемого на мембрану; C_1 и C_2 – численные коэффициенты.

Такая методика позволяет определить и механические напряжения, и модуль упругости плёнки. Для устранения ошибки определения прогиба мембраны, возникающей при измерении высокочувствительных мембран, в настоящей работе предложено использовать дифференциальный метод, основанный на определении относительного изменения давления за период интерференции отраженного от мембраны света. Это позволяет более точно определить модуль упругости плёнок в составе микромеханических мембран.

Данная методика не может быть использована для микромеханических мембран со сжимающими напряжениями, поскольку такие мембраны под действием напряжений деформируются. В данной работе предложена методика, основанная на профилометрии поверхности деформированной мембраны. Механические сжимающие напряжения можно оценить, исходя из величины деформации мембраны, которая представляется как отношение изменения длины деформированной мембраны к длине плоской мембраны:

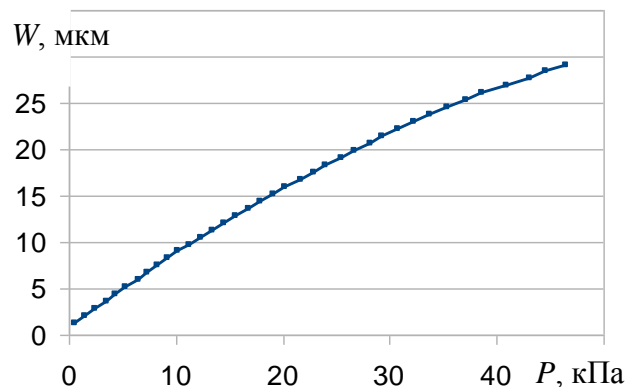


Рисунок 1 – Зависимость прогиба мембраны от давления

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_0 = E \cdot \frac{L_0 - L}{L},$$

где σ – механические напряжения; ε_0 – начальная деформация мембраны под действием сжимающих механических напряжений; L – длина сечения плоской мембраны L_0 – длина профиля сечения деформированной мембраны; E – модуль Юнга.

Построение профиля поперечного сечения такой мембраны осуществляется по выбранной линии сканирования на трёхмерной модели реальной мембраны, построенной с помощью оптического 3D-микроскопа, как это показано на рисунке 2. При сканировании с выбранным шагом вдоль поверхности мембраны в различных направлениях оценивается средняя величина механических напряжений в деформированной мембране.

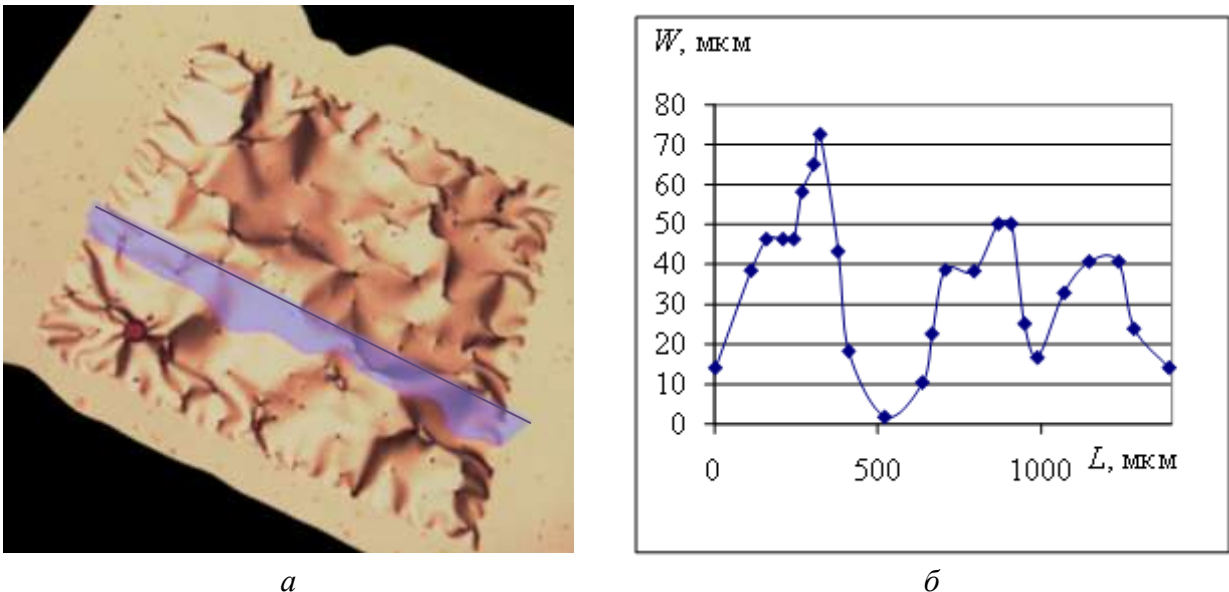


Рисунок – 2 Профилограмма поверхности деформированной мембраны:
a – 3D- модель деформированной мембраны с поперечным сечением;
б – профиль поперечного сечения деформированной мембраны

Для плёнок со сжимающими механическими напряжениями характерно образование локальных отслоений плёнки от подложки круглой формы (рисунок 3, *a*). Такие отслоения фиксировались в плёнках карбида кремния, титана и никеля с подслоем титана. Размеры отслоения целесообразно определять при помощи атомно-силового микроскопа (рисунок 3, *б*), что также позволит оценить толщину плёнки в областях, где отслоения разрушены.

Механические напряжения в таких случаях оценивается без вытравливания мембран, исходя из высоты таких отслоений и их радиуса в плоскости подложки:

$$\sigma = - \frac{C_2 \cdot W^2 \cdot E}{C_1 (1 - \nu^2) \cdot a^2}$$

где W – высота отслоения; a – радиус отслоения; E – модуль Юнга плёнки.

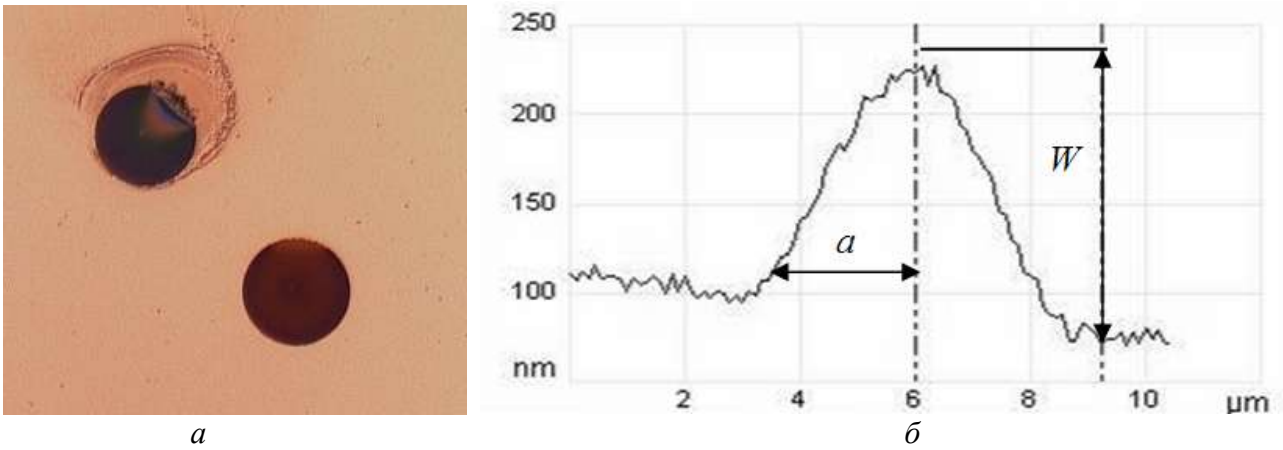


Рисунок 3 – Определение сжимающих механических напряжений: *a* – локальные отслоения плёнки, характерные для сжимающих механических напряжений; *b* – АСМ-профилограмма отслоения пленки от поверхности подложки

Механические напряжения в микромеханических балках определяются по прогибу балки, закреплённой с двух концов (рисунок 4):

$$\sigma = -2,6 \cdot \frac{W^2 \cdot E}{l^2},$$

где W – прогиб балки; l – длина балки; E – модуль Юнга плёнки.

Определять прогиб балок можно при помощи электронного микроскопа. При использовании такой методики определения механических напряжений важен не только способ измерения прогиба мембраны, но и подготовка образцов для измерения. Поскольку технология формирования микромеханических балок включает использование жертвенных слоёв, необходимо обеспечить полное удаление жертвенного слоя с обратной стороны балок.

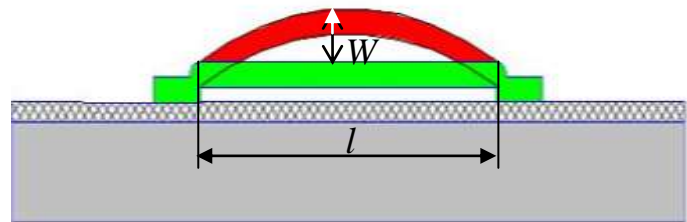


Рисунок 4 – Определение механических напряжений в микромеханических балках

Созданный комплекс методик позволил определить сжимающие и растягивающие механические напряжения в тонких плёнках, входящих в состав различных микромеханических мембран и балок.

Третья глава – «Управление механическими напряжениями в тонких плёнках в процессе их формирования» – посвящена исследованию формирования механических напряжений в процессе роста плёнок. Рассмотрено влияние технологических параметров процесса формирования методами ионно-плазменного осаждения плёнок таких материалов, как карбид кремния и нитрид алюминия, часто используемых в композициях микромеханики, а также плёнок некоторых металлов, на их механические напряжения.

Исследования проводились на микромеханических мембранах и балках. Рассмотрена технология формирования таких структур.

Экспериментально показано уменьшение механических напряжений в плёнках карбида кремния с увеличением температуры подложки в процессе формирования плёнок методом магнетронного осаждения. Также отмечена сильная зависимость механических напряжений от остаточного давления в вакуумной камере.

Представлены экспериментальные результаты, которые свидетельствуют о влиянии «бомбардировки» поверхности растущей плёнки высокоэнергетичными частицами из плазмы разряда на формирование

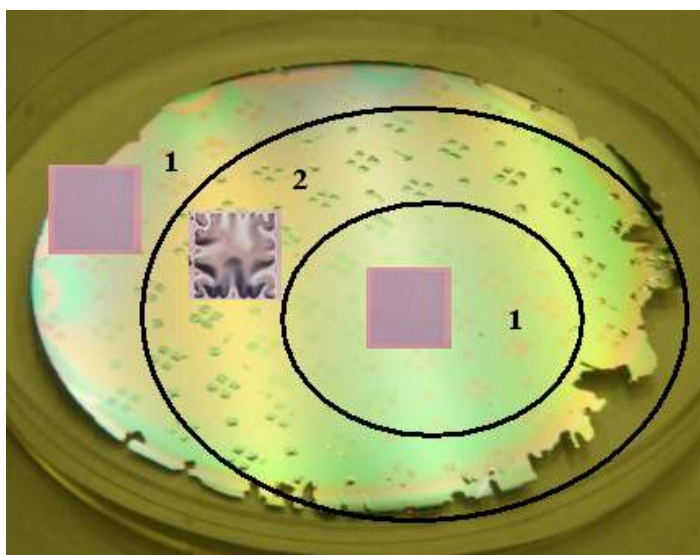


Рисунок 5 – Расположение мембранных структур на кремниевой подложке после магнетронного осаждения плёнки карбида кремния:

1 – область с низконапряжёнными мембранами;
2 – область с высокими сжимающими механическими напряжениями, соответствующая области локализации плазмы магнетронного разряда

сжимающих механических напряжений. Создание структур с низконапряжёнными плёнками карбида кремния осуществляется при отнесении чипов от области локализации плазмы у мишени магнетронного разряда в процессе магнетронного осаждения (рисунок 5).

Достигнуто уменьшение механических напряжений с (-600) до (-100) МПа. При магнетронном нанесении пленок карбида кремния на кремниевой подложке с разделительным слоем диэлектрика был экспериментально зафиксирован наведенный электрический потенциал около (-100) В. Экспериментально показано влияние электрического

потенциала подложки на механические напряжения в плёнках карбида кремния в процессе ионно-плазменного осаждения. В микромеханических балках из карбида кремния, формируемых на подложке с нулевым потенциалом, механические напряжения составляли (-2700) МПа, а в пленках, полученных на подложке с «плавающим» потенциалом, напряжения не превышали (-2000) МПа.

Плёнки нитрида алюминия, полученные ионно-плазменным методом, обладают более высокими сжимающими напряжениями, чем плёнки карбида кремния. На поверхности диэлектрической подложки при получении плёнки нитрида алюминия экспериментально зафиксирован эффективный наведенный электрический потенциал около 30 В.

В процессе сравнительного эксперимента (рисунок 6) было показано, что градиент электрического потенциала, который формировался в плёнке в процессе ионно-химического осаждения за счёт подачи нулевого потенциала на обратную сторону мембраны через слой металла, влияет на величину механических напряжений в плёнках нитрида алюминия.

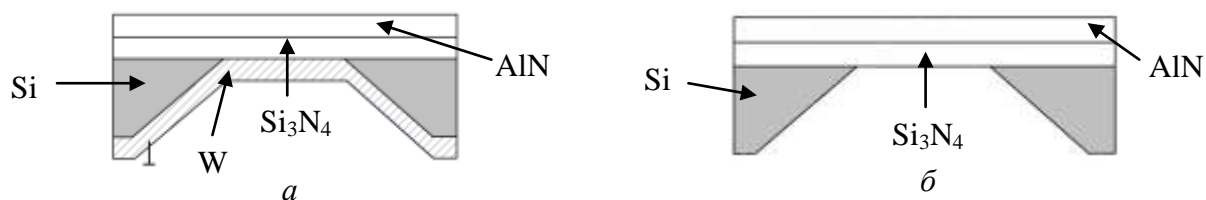


Рисунок 6 – Условия формирования электрического поля в плёнке нитрида алюминия: *a* – заземление за счёт дополнительного слоя металла; *б* – мембрана без заземления

Проведённая оценка показала, что напряженность поля составляла 10^3 В/м в случае формирования плёнок на диэлектрической мембране и 10^7 В/м – при заземлении мембраны с обратной стороны. Механические напряжения плёнок нитрида алюминия при формировании на диэлектрической мембране составляли (-23) ГПа, а при создании дополнительного градиента электрического потенциала (-230) ГПа. Это может быть связано с электромиграцией примеси в процессе ионно-плазменного осаждения под действием электрического поля в плёнке нитрида алюминия, вследствие чего происходит накопление примеси и, следовательно, механических напряжений на границе плёнки и подложки.

Показано, при управлении механическими напряжениями в плёнках нитрида алюминия в процессе ионно-плазменного осаждения основным фактором является градиент электрического потенциала в плёнке, приводящий к увеличению механических напряжений.

Приведены экспериментальные зависимости механических напряжений тонких плёнок хрома от давления рабочего газа в камере и от температуры подложки при формировании плёнок методом магнетронного осаждения (рисунок 7).

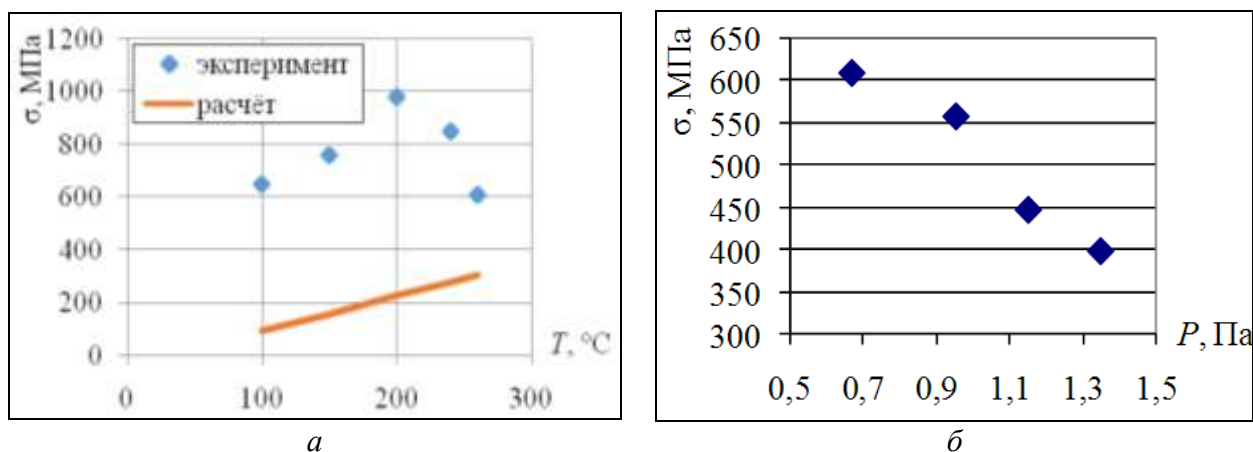


Рисунок 7 – Зависимость величины растягивающих механических напряжений в плёнках хрома, полученных магнетронным методом: *a* – от температуры подложки при осаждении; *б* – от давления рабочего газа в камере при осаждении

За счёт изменения давления рабочего газа в камере при магнетронном осаждении и температуры подложки были достигнуты изменения механических напряжений в тонких плёнках хрома в диапазоне 400...1000 МПа.

В четвёртой главе – «Управление механическими напряжениями в тонких плёнках и микромеханических мембранах при термической обработке»

– представлены результаты исследования влияния вакуумного отжига при различных температурах на механические напряжения в тонкоплёночных композициях микромеханики.

Вакуумный отжиг при температурах ниже температуры рекристаллизации приводит к увеличению механических напряжений в плёнках хрома, полученных методом магнетронного осаждения (рисунок 8). Сплошной линией показана расчётная зависимость изменения механических напряжений, вызванных различием температурных коэффициентов линейного расширения плёнки и подложки. Полученные экспериментальные значения механических напряжений при отжиге пленок хрома существенно выше расчетных. Растягивающие напряжения в пленке могут возрастать вследствие миграции и десорбции примеси кислорода при ее отжиге. Отжиг в вакууме при температуре выше температуры рекристаллизации также приводит к возрастанию механических напряжений с 650 до 980 МПа. Расчётное значение механических напряжений, вызванных различием температурных коэффициентов линейного расширения плёнки и подложки, составило 1360 МПа, что превышает экспериментальные значения. Это объясняется дополнительным рекристаллизационным отжигом при медленном остывании плёнки.

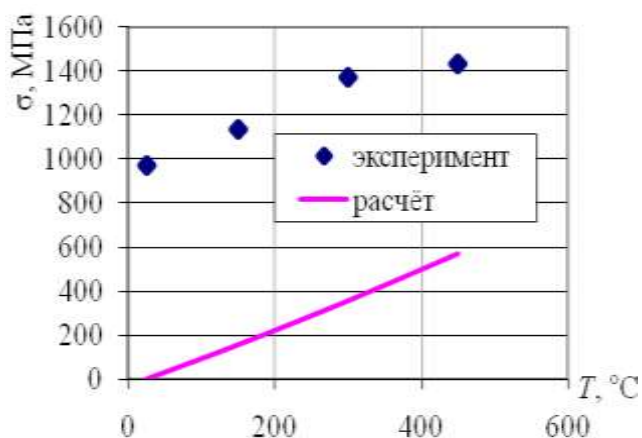


Рисунок 8 – Влияние отжига при температурах ниже температуры рекристаллизации на механические напряжения в плёнках хрома, полученных магнетронным методом

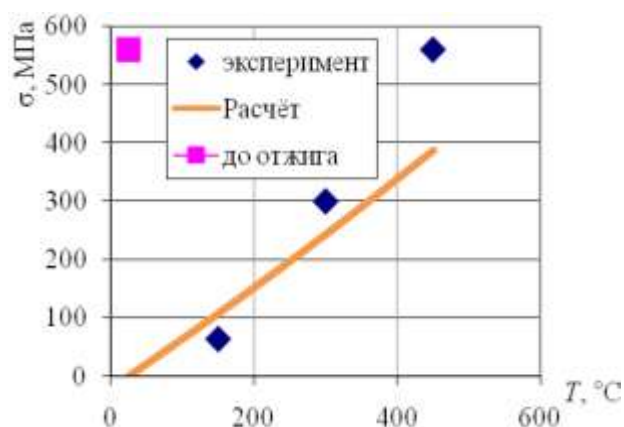


Рисунок 9 – Влияние температуры отжига на механические напряжения в плёнках золота в составе микромеханических композиционных мембран

Исследовано влияние вакуумного отжига на микромеханические мембраны различных конструкций, сформированные на основе тонких плёнок. При отжиге плоских мембран на основе пленочной композиции «нитрид кремния–золото» с подслоем хрома выявлено снижение механических напряжений такой структуры за счёт уменьшения механических напряжений в плёнках золота. При этом наиболее эффективное снижение механических напряжений осуществляется при температуре 150 °C (рисунок 9). Эффективного уменьшения механических напряжений в плёнках золота удастся достичь за счёт температурной релаксации механических напряжений. Увеличение механических напряжений при увеличении температуры отжига

связано с возрастанием влияния различия температурных коэффициентов линейного расширения плёнки и подложки, а также возникновением взаимной диффузии плёнки золота и подслоя хрома.

При создании высокочувствительных преобразователей на основе гофрированных композиционных мембран одной из важных задач является увеличение чувствительности мембраны без изменения малых геометрических размеров и конструкции. Отжиг сформированных мембранных композиций «нитрид кремния–золото» позволяет увеличить чувствительность мембраны за счёт уменьшения механических напряжений в слое золота.

Был проведён подбор параметров и условий отжига для снижения механических напряжений. Определено, что при вакуумном отжиге при температурах 250 °С и выше изменяется формы мембраны, а чувствительность возрастает незначительно. Отжиг в атмосфере кислорода приводит к необратимой деградации металлической композиции золото–хром.

В [2] было показано, что чувствительность гофрированных мембран в первую очередь зависит от механических напряжений в металлических плёнках, входящих в их состав. Кроме того, движущей силой температурной релаксации механических напряжений являются действующие напряжения. В гофрированной мембране механические напряжения снижаются за счет деформации гофрированной области при освобождении мембраны от подложки. В связи с этим для наиболее эффективного снижения механических напряжений в металлизированной гофрированной мембране следует осуществлять предварительный отжиг до её вытравливания.

При вакуумном низкотемпературном отжиге (150...200 °С, 15 мин) с постепенным нагревом и остыванием чувствительность гофрированных мембран «нитрид кремния–золото» увеличивается с 11...30 до 35...50 нм/Па.

В **пятой главе** – «Особенности эксплуатации и управления механическими напряжениями мембранных структур на основе тонких плёнок» – показано, что, управляя механическими напряжениями в процессе эксплуатации мембранных структур на основе тонких плёнок, можно осуществлять контролируемые перемещения мембраны. Представлен способ управления прогибом мембраны за счёт изменения механических напряжений под внешним воздействием.

Получено выражение, которое описывает изменение прогиба мембраны (рисунок 10) за счёт изменения механических напряжений:

$$\Delta W = -\frac{W_0}{\sigma_0} \cdot \frac{1}{(1+3\eta)} \cdot \Delta\sigma,$$

где W_0 – начальный прогиб мембраны; σ_0 – начальные механические напряжения мембраны; $\eta = \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{E \cdot W_0^2}{\sigma_0 \cdot a^2}$ – коэффициент нелинейности прогиба мембраны; E – модуль Юнга; a – радиус круглой мембраны.

Экспериментально и аналитически показано, что изменение прогиба мембраны из нитрида кремния с металлическими электродами с двух сторон при электростатическом сжатии за счёт подачи электрического напряжения на электроды, возникает вследствие изменения механических напряжений такой мембраны. Экспериментально получено значение изменения прогиба мембраны около 90 нм при электрическом напряжении на электродах 80 В.

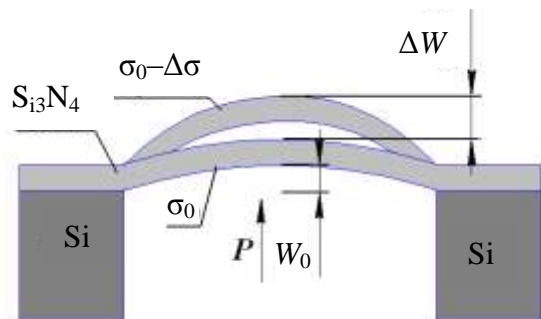


Рисунок 10 – Изменение прогиба мембраны за счёт изменения механических напряжений

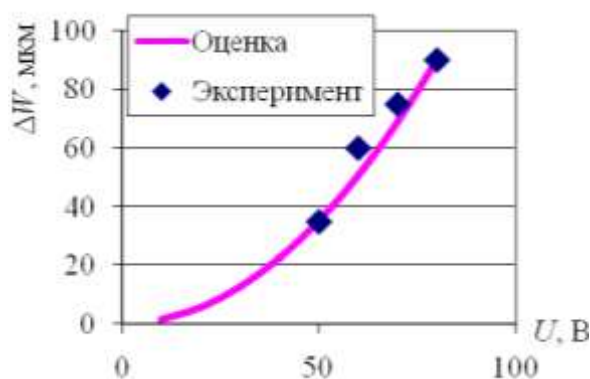


Рисунок 11 – Изменение прогиба мембраны под действием электрического напряжения

Изменение механических напряжений в радиальном направлении $\Delta\sigma_r$ будет определяться из условия растяжения мембраны при её электростатическом сжатии:

$$\Delta\sigma_r = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot \nu \cdot U^2}{2h^2 \cdot (1-\nu)},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала мембраны; ε_0 – относительная диэлектрическая проницаемость; U – разность потенциалов, прилагаемых к электродам; h – толщина мембраны; ν – коэффициент Пуассона материала мембраны.

Полученная экспериментальная зависимость изменения прогиба мембраны под действием электрического напряжения (рисунок 11) соответствует расчётному значению при начальном прогибе мембраны 20 мкм.

Показано, что перемещения мембраны под действием лазерного излучения возникают за счёт локального нагрева мембраны в области воздействия, а изменение механических напряжений в этой области $\Delta\sigma_{\text{тепл}}$ определяются выражением:

$$\Delta\sigma_{\text{тепл}} = -E_{\text{ср}} \cdot \alpha_{\text{ср}} \cdot \Delta T,$$

где $\alpha_{\text{ср}}$ – эффективный температурный коэффициент линейного расширения композиционной мембраны; $E_{\text{ср}}$ – эффективный модуль Юнга композиционной мембраны; ΔT – изменение температуры в локальной области воздействия.

Получена зависимость перемещений мембраны от времени (рисунок 12) и амплитудно-частотная характеристика мембраны при воздействии лазерным излучением (рисунок 13).

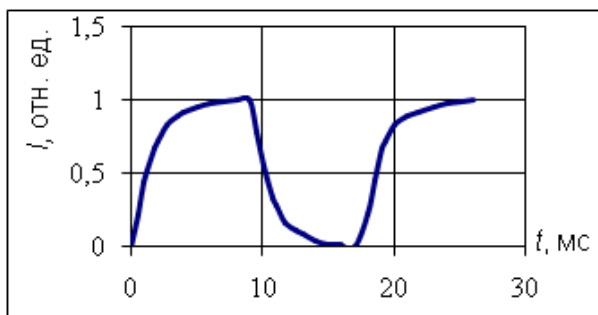


Рисунок 12 – Интенсивность сигнала, полученная от мембраны, пропорциональная прогибу мембраны под действием лазерного излучения

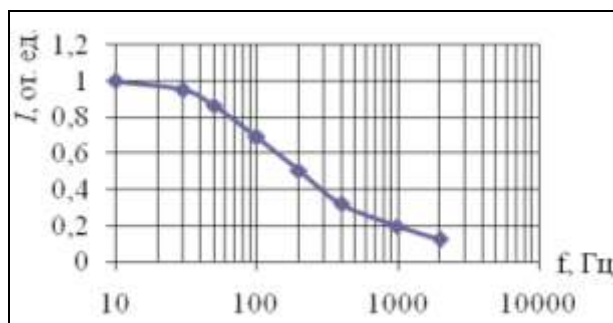


Рисунок 13 – Амплитудно-частотная характеристика колебаний мембраны под воздействием лазерного излучения мощностью 2,8 мВт

Аналитически показано, что сжимающие механические напряжения, вызванные нагревом в локальной области гофрированной мембраны $\Delta\sigma$, могут быть больше, чем начальные механические напряжения σ_0 , что и вызывает прогиб мембраны:

$$\Delta W = a \cdot \sqrt{\frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{(1 - \nu^2) \cdot |\Delta\sigma|}{E_{ср}}},$$

где a – радиус области локального нагрева.

Разработаны способы управления механическими напряжениями в процессе эксплуатации устройства, реализующие функцию управления посредством электростатического сжатия и термомеханического воздействия на локальную область мембраны при воздействии лазерным излучением.

Проведена экспериментальная оценка эксплуатационных характеристик мембран, предназначенных для работы в качестве высокочувствительных преобразователей. Даны практические рекомендации, включающие выбор материалов слоев и принцип выбраковки устройств. Для эксплуатации в условиях повышенной влажности рекомендовано использовать мембраны с плоской поверхностью, обладающие растягивающими механическими напряжениями.

В заключении приведены основные научные и практические результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ:

1. Определено, что в плёнках карбида кремния, полученных ионно-плазменными методами, уменьшение механических напряжений достигается за счёт увеличения температуры подложки при осаждении и уменьшении остаточного давления в рабочей камере.

2. Определено, что основным фактором, определяющим формирование механических напряжений в плёнках карбида кремния в процессе ионно-плазменного осаждения, является поток высокоэнергетичных частиц из плазмы разряда на растущий слой. Для снижения механических напряжений в плёнках

карбида кремния необходимо уменьшать уровень «бомбардировки» подложки высокоэнергетичными частицами из области локализации плазмы.

3. Экспериментально показано, что снижение сжимающих механических напряжений в плёнке нитрида алюминия достигается при уменьшении градиента электрического потенциала в плёнке в процессе ионно-плазменного осаждения.

4. Показано, что при изменении таких параметров технологического процесса магнетронного осаждения, как температура подложки и давление рабочего газа в камере, механические напряжения в тонких плёнках хрома можно изменять в диапазоне 300...1000 МПа.

5. Экспериментально установлено, что отжиг плёнок хрома, полученных методом магнетронного осаждения, приводит к увеличению их механических напряжений.

6. Определены параметры и условия отжига гофрированных композиционных мембран «нитрид кремния–золото», которые позволяют увеличивать их чувствительность до 50 нм/Па без изменения формы мембраны: вакуумный низкотемпературный (150...200 °С) отжиг до вытравливания мембран в течение 15 минут с постепенным нагревом и остыванием.

7. Разработаны способы управления механическими напряжениями в процессе эксплуатации микромеханических устройств, реализующие функцию управления посредством электростатического сжатия и термомеханического воздействия при лазерном излучении.

8. Создан комплекс методик оценки механических напряжений тонкоплёночных мембран, основанный на интерферометрическом методе измерения прогиба мембраны в зависимости от подаваемого на него давления и профилометрии поверхности мембран и плёнок, образующих рельеф под действием сжимающих механических напряжений.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Асташенкова, О.Н. Контроль физико-механических параметров тонких плёнок/ О.Н. Асташенкова, А.В. Корляков // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – №2. – с. 24-29

2. Ефременко, А.М. Низкотемпературный синтез текстурированных плёнок нитрида алюминия на инородных подложках для устройств микросистемной техники / А.М. Ефременко, А.В. Корляков, О.Н. Асташенкова, А.Н. Кривошеева// Нано- и микросистемная техника. – 2012. – №12. – с. 25-30

3. Асташенкова, О.Н. Исследование условий возникновения механических напряжений в тонких плёнках хрома/ О.Н. Асташенкова, А.В. Корляков // Известия Кабардино-балкарского государственного университета. – т.1. – №3. – 2011 – с.18-20

4. Асташенкова, О.Н. Исследование поверхности дефектов автоэпитаксиальных слоёв арсенида индия/ О.Н. Асташенкова, Е.Н. Севостьянов, В.Н. Смирнова, С.Д. Попов, А.С. Петров // Известия «ЛЭТИ». – 2011. – № 7. – с. 16-20

5. Прохорова, О.В. Сравнительный анализ влияния полировочных инструментов на текстуру поверхности наногибридного композитного материала/ Т.Н. Чудинова, О.Н. Асташенкова, Н.В. Кущенко, С.В. Байрамкулова // Пародонтология. – 2010. – Т. 15. – С. 51-57.

6. Асташенкова, О.Н. Влияние электронной бомбардировки в процессе роста на свойства слоев карбида кремния, полученных методом магнетронного распыления/ О.Н. Асташенкова, А.М. Ефременко, А.В. Корляков, О.А. Тестов // Вакуумная техника и технология. – 2009. – Т. 19, №3. – С.139-143.

Публикации в других изданиях:

7. Склизкова, В.П. Влияние химического строения наноразмерных полиимидных покрытий на свойства вибро-акустических мембран/ В.П. Склизкова, С.И. Голоудина, В.М. Пасюта, О.Н. Асташенкова, А.В. Корляков, И.В. Гофман, В.В. Кудрявцев// Материалы XVI всероссийской конференции «Структура и динамика молекулярных систем». – Йошкар-Ола. – 2009. – с. 207

8. Асташенкова, О.Н. Исследование механических напряжений в наноразмерных плёнках титана / О.Н. Асташенкова, А.В. Корляков// Тезисы международной научно-технической конференции «Нанотехнологии-2012». – г. Таганрог, Россия.– 2012. – с. 54-55

9. Astashenkova, O.N. Micromechanics based on silicon carbide/ O.N. Astashenkova, A.V. Korlyakov, V.V. // 15 научная молодёжная школа «Физика и технология микро- и наносистем. Карбид кремния и родственные материалы» – 2012, – с. 38-39

10. Активные и пассивные механические мембраны на основе композиций широкозонных материалов/ А.Н. Кривошеева, О.Н. Асташенкова, А.М. Ефременко, А.В. Матузов // Тезисы докладов VI- Международный научный семинар «Карбид кремния и родственные материалы» ISSCRM-2009. Великий Новгород, с. 211-213.

11. Асташенкова, О.Н. Механические напряжения в тонких пленках хрома в зависимости от условий получения и отжига/ О.Н. Асташенкова, А.В. Корляков, А.С. Дубровин// Материалы IV Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике».– Нальчик. – 2011. – с. 153-154

12. Luchinin, V.V. Micromechanics based on silicon carbide/ O.N Astashenkova, A.V. Korlyakov, V.V. Luchinin // 9th European conference on Silicon Carbide and Related Materials. Materials Science Forum. – Vols. 740-742. –2013. –p. 998-1001

13. Асташенкова, О.Н. Определение механических напряжений в тонких плёнках/ О.Н. Асташенкова, А.В. Корляков //Труды 11-ой международной конференции «Плёнки и покрытия – 2013», Санкт-Петербург. – 2013. – с. 188-190

14. Асташенкова, О.Н. Исследование механических напряжений в микроструктурах на основе плёнок карбида кремния / О.Н. Асташенкова, А.В. Корляков // Материалы IV международной конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике». – 2014. – Нальчик, Россия. – 2014 г. – с. 408-409

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривошеева, А.Н. Пассивные и активные мембраны для устройств микросистемной техники: автореф. дисс. ...канд. тех.наук: 05.27.01/ Кривошеева Александра Николаевна. – СПб, 2007. – 16 с.

2. Ветров, А.А. Расчёт и измерение динамических параметров наноразмерных колебаний микромембранных элементов/ А.А. Ветров, А.В. Корляков, А.Н. Сергушичев, К.А. Сергушичев // Нано- и микросистемная техника. – №12. – 2012. – с. 48-54