

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.398.094.3

КОВАЛЬЧУК
Наталья Станиславовна

**МНОГОСЛОЙНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ НИТРИДА
КРЕМНИЯ ДЛЯ МЕМБРАННЫХ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

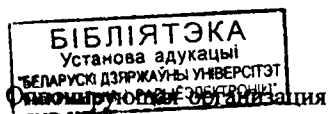
Минск 2012

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель Ануфриев Леонид Петрович, д-р техн. наук, профессор, генеральный менеджер по внешне-экономическим связям ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Официальные оппоненты: Лабунув Владимир Архипович, академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник НИЧ учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Залесский Валерий Борисович, канд. техн. наук, заведующий лабораторией фотоэлектрических преобразователей государственного научного учреждения «Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси»



ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»

Защита состоится 28 июня 2012 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые приборы (транзисторы, диоды, интегральные микросхемы) и мембраны микроэлектромеханических систем (МЭМС) представляют собой многослойную структуру, работоспособность которой во многом зависит от сбалансированности по остаточным напряжениям образующих ее слоев. МЭМС-датчики, используемые промышленностью Республики Беларусь в настоящее время, в основном поставляются из-за рубежа. С позиции импортозамещения важным является то, что микроэлектромеханические системы могут изготавливаться достаточно разработанными методами планарных технологий обработки, применяемыми при изготовлении полупроводниковых приборов. Базовым материалом для МЭМС, как и для полупроводниковых приборов, служит кремний. Формирование многослойных сбалансированных по остаточным напряжениям структур является важной задачей как при производстве полупроводниковых приборов, так и мембранных МЭМС. Поэтому освоение отечественного производства мембранных датчиков на основе существующего в республике научного, производственного и технологического потенциала микроэлектронного производства является актуальной научно-технической проблемой.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертации утверждена Советом учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (протокол № 4 от 28.12.2007 г.) и соответствует подразделу 6.9 «Принципы схемотехнического построения и технологии создания интегральных, в том числе трехмерных, микросхем, устройств функциональной и СВЧ-электроники, опто- и микроэлектромеханических систем, светодиодных и фоточувствительных приборов, высокоэффективных солнечных элементов» приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011 – 2015 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 19 апреля 2010 г. № 585.

Диссертационная работа выполнялась в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники в рамках заданий Республиканских научно-технических программ:

– ГНТП «Электроника», НИР – «Разработка и исследование физико-технологических методов создания микроэлектромеханических, микроэлектромеханических и микросенсорных систем на основе тонкопленочной технологии и процессов формирования и модифицирования аллюмооксидных микроструктур» (2006 – 2010 гг., № госрегистрации 2006698).

– ГНТП «Микроэлектронные технологии, компоненты, оборудование», задание 2.22 шифр «Тиристор» «Разработать и внедрить в серийное производство технологический процесс изготовления высоковольтных тиристорov для энергосберегающих устройств управления электроприводами» (2007 – 2010 гг., № госрегистрации 20072701).

– ГНТП «Микроэлектронные технологии, компоненты, оборудование», задание 2.47 шифр «Такт – 83» «Разработать конструкцию, технологический процесс и освоить серийное производство биполярного транзистора с низким напряжением насыщения для регуляторов напряжения» (2007 – 2012 гг., № госрегистрации 20092301).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является исследование и разработка конструкций, технологических маршрутов и выбор режимов изготовления сбалансированных по остаточным напряжениям многослойных структур полупроводниковых приборов и мембран изделий класса МЭМС. Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- исследование влияния параметров процесса осаждения нитрида кремния из газовой фазы на состав, химические и механические свойства получаемых пленок;
- исследование и разработка методов формирования резистивных слоев Ni и Pt с высокой адгезией к пленке нитрида кремния;
- разработка технологических процессов формирования компенсационных по остаточным напряжениям слоев;
- формирование защитных слоев, обеспечивающие устойчивость мембран в условиях воздействия агрессивных сред;
- выбор режимов глубокого прецизионного травления Si химическим и плазмохимическим методами;
- математическое моделирование остаточных напряжений в многослойных системах при комнатной и рабочей температурах нагревателя и разработка конструкции мембраны, обеспечивающей механическую прочность в условиях эксплуатации;
- разработка технологических маршрутов изготовления мембранных высокотемпературных датчиков в соответствии с выбранными конструкциями с использованием разработанных режимов формирования функциональных слоев.

Объектом исследования являются многослойные тонкопленочные структуры мембранных МЭМС и полупроводниковых приборов. Выбор объекта исследования обусловлен потребностью импортозамещения и возможностью изготовления изделий класса МЭМС на основе существующего в

республике производственного и технологического потенциала микроэлектронного производства. **Предметом исследования** являются остаточные напряжения пленок, входящих в состав многослойной структуры, и закономерности изменения механических свойств в зависимости от условий формирования и последующих технологических операций обработок.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально установлено, что при формировании пленки нитрида кремния методом химического осаждения из газовой фазы при пониженном давлении 40 ± 3 Па, температуре 1123 ± 1 К и объемном расходе газовой смеси $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + \text{NH}_3$ 10 л/ч соотношение $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 / \text{NH}_3$ должно быть 4/1, что обеспечивает получение механически прочных пленок нитрида кремния необходимой толщины 0,8 – 1,2 мкм с остаточными напряжениями, не превышающими 20 – 50 МПа, которые могут использоваться как элемент мембранных микроэлектромеханических систем, так и полупроводниковых приборов без дополнительных слоев SiO_2 .

2. Установлен эффект увеличения соотношения атомных концентраций Si к N с 0,75 до 1,22 в пленке нитрида кремния, получаемой методом химического осаждения из газовой фазы в смеси $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + \text{NH}_3$ при изменении соотношения компонентов с 1/4 до 4/1, что позволяет снизить величину остаточных напряжений с 1150 до 20 МПа соответственно, а также уменьшить скорость травления пленки нитрида кремния в концентрированной HF (49 %) с 18 до 2,2 нм/мин.

3. Предложен метод подготовки поверхности Al_2O_3 перед нанесением используемой в качестве резистивного слоя мембранных высокотемпературных датчиков пленки Pt, заключающийся в ионно-лучевой обработке ионами аргона, что обеспечивает вскрытие поверхностных пор с увеличением их размера до 0,02 мкм в поперечном сечении и повышает адгезию Pt к Al_2O_3 в 2 – 3 раза по сравнению с обработкой в ортофосфорной кислоте за счет увеличения площади физического контакта при проникновении Pt в глубь пор Al_2O_3 .

4. Предложена и апробирована в производственных условиях конструкция многослойной мембраны, обеспечивающая низкий уровень остаточных напряжений ($\sigma_{\text{расст}} \approx +25$ МПа). Конструкция мембраны состоит из последовательно чередующихся слоев, включающих пленку нитрида кремния, полученную методом химического осаждения из газовой фазы, пленку никеля, полученную методом электронно-лучевого испарения, пленку нитрида кремния, полученную плазмостимулируемым химическим осаждением, пленку диоксида кремния, полученную плазмостимулируемым химическим осаждением, с остаточными напряжениями для указанных слоев соответственно:

$\sigma_{\text{раст}} = +20$ МПа, $\sigma_{\text{раст}} = +450$ МПа, $\sigma_{\text{раст}} = +90$ МПа, $\sigma_{\text{сжат}} = -480$ МПа. Учитывая различный знак напряжений в слоях многослойной мембраны результирующие напряжения составляют $\sigma_{\text{раст}} \approx +25$ МПа.

Личный вклад соискателя

В диссертации изложены результаты научно-исследовательских работ, выполненных автором лично и в соавторстве. В совместно опубликованных работах автором осуществлялись постановка задачи, обоснование направлений решения научных проблем, разработка методик проведения исследований, непосредственное проведение исследований, анализ результатов и формулировка выводов. Автором лично предложены: процесс осаждения нитрида кремния и диоксида кремния с заданными значениями остаточных напряжений; метод компенсации суммарных остаточных напряжений в многослойной тонкопленочной структуре; конструктивно-технологические принципы построения мембранных структур.

Определение структуры, целей и задач исследования, обсуждение и обобщение основных научных результатов исследования проводились совместно с научным руководителем, д-м техн. наук, проф. Л.П. Ануфриевым. Технология подготовки поверхности пленок Al_2O_3 для использования в качестве подслоя пленки Pt была разработана совместно с Э.В. Лобко. Анализ образцов методами растровой микроскопии, рентгеновского микроанализа проводился Т.В. Петлицкой. Моделирование результирующих остаточных напряжений в многослойной мембране проводилось при участии А.А. Ясюнаса. Изготовление образцов осуществлялось при участии Л.Н. Белоус, О.И. Орловой.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 9-я Международная научно-техническая конференция «Современные информационные и электронные технологии», Украина, Одесса, 2008 г.; 5-я Международная научно-практическая конференция «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы», Беларусь, Новополоцк, 2008 г.; 13-я Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи», Беларусь, Минск, 2008 г.; 5-я Международная научно-техническая конференция «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств», Беларусь, Новополоцк, 2008 г.; 10-я Международная научно-техническая конференция «Современные информационные и электронные технологии», Украина, Одесса, 2009 г.; 5-я Международная научно-практическая конференция «Військова освіта і наука: сьогоднішня та майбут-

нс», Украина, Киев, 2009 г.; 15-я Международная научно-техническая конференция «Современные информационные и электронные технологии», Беларусь, Минск, 2009 г.; 13-я Международная техническая конференция «Современные средства связи», Беларусь, Минск, 2009 г.; Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2010», Украина, Севастополь, 2010 г.; 11-я Международная научно-техническая конференция «Современные информационные и электронные технологии», Украина, Одесса, 2010 г.; Международная научно-техническая конференция и молодежная школа-семинар «Нанотехнологии-2010», Россия, Дивноморское, Геленджик, 2010 г.; 8-я Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации», Беларусь, Минск, 2010 г.; Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2011», Украина, Севастополь, 2011 г.; 12-я Международная научно-техническая конференция «Современные информационные и электронные технологии», Украина, Одесса, 2011 г.; 15-й Юбилейный Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке», Украина, Харьков, 2011 г.; 47-я научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Беларусь, Минск, 2011 г.

Опубликованность результатов

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 26 научных работ, в том числе 1 монография, 5 статей в рецензируемых научных журналах, 2 статьи в сборнике материалов научных конференций, 18 тезисов докладов на научных конференциях.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 4,9 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

Первая глава посвящена анализу проблемы формирования сбалансированных по напряжениям многослойных тонкопленочных структур. Во **второй главе** описаны методы формирования функциональных слоев в составе многослойных структур, методики исследования и контроля их свойств. В **третьей главе** представлены результаты исследований технологических процессов получения последовательно чередующихся слоев многослойной структуры и их механические свойства. В **четвертой главе** прове-

дено математическое моделирование величин результирующих остаточных напряжений многослойных структур при комнатной и рабочей температуре нагревателя мембранных МЭМС. В пятой главе описаны разработанные конструкции и технологические маршруты изготовления многослойных мембран с различной рабочей температурой нагревателя. В приложениях приведены документы об использовании результатов диссертации.

Общий объем диссертационной работы составляет 145 страниц, из которых 87 страниц основного текста, 70 рисунков на 55 страницах, 19 таблиц на 10 страницах, библиография из 111 источников, включая 26 собственных публикаций автора, приложения на 4 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении и в общей характеристике работы определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы существующие конструктивно-технологические методы создания высокотемпературных мембранных МЭМС. Показано, что технология изготовления многослойных структур мембранных МЭМС близка к технологии полупроводниковых приборов. Анализ существующих конструкций выявил необходимость разработки технологических процессов получения пленок нитрида кремния с минимальной величиной остаточных напряжений $\sigma_{\text{раст}} = (20 - 50)$ МПа, обладающих достаточной механической прочностью при толщине 0,8 – 1,2 мкм, разработки технологических режимов формирования пассивирующего и компенсационного слоев для получения сбалансированных по напряжениям многослойных мембран, стабильных при рабочих температурах нагревателя и стойких при работе в агрессивных средах, разработки методов повышения адгезии резистивных слоев Pt и Ni, выбора режимов глубокого прецизионного травления Si химическим и плазмохимическим методами.

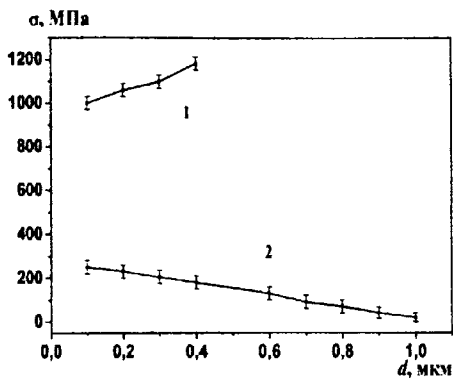
Во второй главе обоснован выбор методов формирования функциональных слоев мембраны. Определены методики контроля и исследования свойств функциональных слоев как элементов конструкции мембраны. Толщина пленок измерялась микроинтерферометрическим методом, поверхностное сопротивление – четырехзондовым методом. Для формирования тонкопленочных элементов мембраны на основе диэлектрических пленок выбран метод химического осаждения из газовой фазы. Остаточные напряжения каждого функционального слоя измерялись рентгеновским методом, коэффициент преломления определялся методом эллипсометрии. Математиче-

ское моделирование распределения напряжений в мембране при комнатной и повышенной температурах выполнялось с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics 4.0 в модуле Structural Mechanical.

В третьей главе проведено исследование свойств и условий формирования функциональных слоев многослойных структур. Установлено,

что при формировании пленок нитрида кремния методом химического осаждения из газовой фазы изменение соотношения рабочих газов $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ от 1/4 до 4/1 позволяет уменьшить величину остаточных напряжений с 1150 до 20 МПа (рисунок 1). Механически прочные пленки нитрида кремния толщиной 1,2 мкм, сформированные при температуре 1123 ± 1 К и соотношении $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$, равном 4/1, можно использовать как элементы мембранных микроэлектромеханических систем и полупроводниковых приборов без подслоев SiO_2 .

Методом Оже-спектроскопии установлен эффект увеличения соотношения атомарных концентраций Si / N с 0,75 до 1,22 в пленках нитрида кремния, получаемых методом химического осаждения из газовой фазы в смеси $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + \text{NH}_3$, при изменении соотношения компонентов с 1/4 до 4/1, что обеспечивает снижение величины остаточных напряжений с 1150 до 20 МПа соответственно (рисунки 2 и 3). На рисунке 4 показан спектр пленок нитрида кремния, полученных при



1 – 1/4, 2 – 4/1

Рисунок 1 – Зависимость остаточных напряжений в пленке нитрида кремния от толщины при различном соотношении $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$

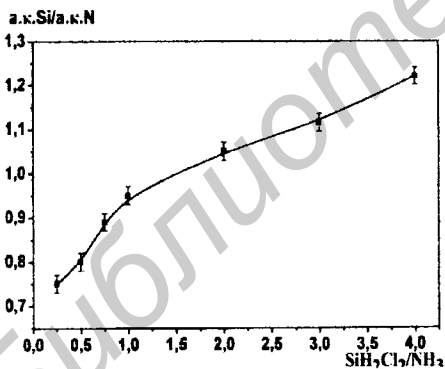


Рисунок 2 – Зависимость отношения атомных концентраций Si и N от соотношения расходов $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$

соотношении реакционных газов $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$, равном 4/1, т.е. появление избыточного Si в пленке является причиной снижения остаточных напряжений. Кроме того, увеличение содержания Si уменьшает скорость травления

пленки нитрида кремния в концентрированной HF (49 %) с 18 до 2,2 нм/мин, что позволяет применять мембранные МЭМС в агрессивной среде.

Таким образом, пленки нитрида кремния толщиной 1,2 мкм с низкими значениями остаточных напряжений при формировании мембраны изделий класса МЭМС могут заменить трехслойную систему $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$, что упрощает и удешевляет конструкцию, повышает чувствительность мембраны.

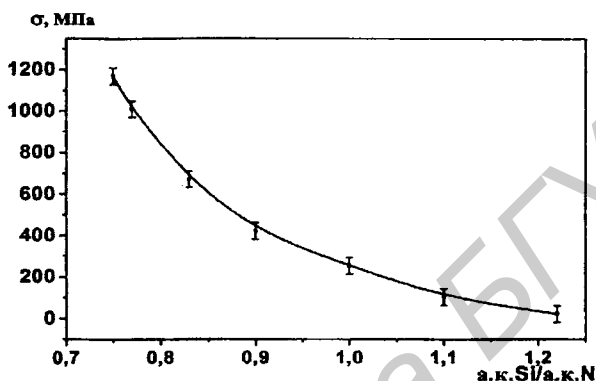


Рисунок 3 – Зависимость величины остаточных напряжений в пленках нитрида кремния от соотношений атомных концентраций Si/N

Установлена взаимозависимость показателя преломления пленки нитрида кремния, соотношения компонентов Si и N, величины остаточных напряжений пленок и соотношения рабочих газов SiH_2Cl_2 и NH_3 (таблица 1). Показано, что показатель преломления может использоваться как критерий для оперативной оценки соотношения компонентов и величины остаточных напряжений в пленках нитрида кремния.

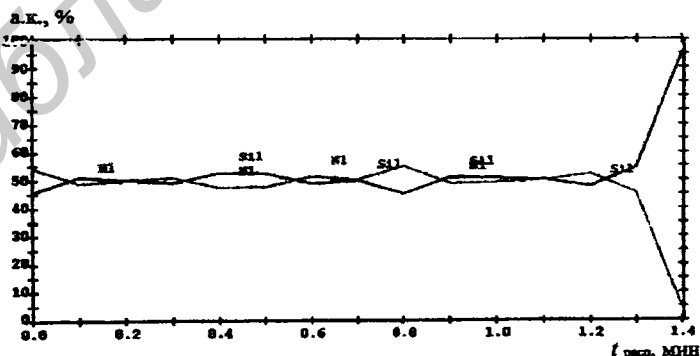


Рисунок 4 – Спектр пленки нитрида кремния, полученной при соотношении расходов газов $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ равном 4/1

Таблица 1 – Значения показателя преломления n , соотношения компонентов Si/N, величины остаточных напряжений σ в пленках нитрида кремния при разных соотношениях расходов рабочих газов $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$

Показатель	Соотношение в газовой смеси $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$				
	4/1	3/1	2/1	1/1	1/4
Коэффициент преломления, n	2,23	2,14	2,09	2,05	1,95
Соотношение атомных концентраций Si/N	1,2	1,09	1,04	1,0	0,75
Остаточные напряжения, $\sigma_{\text{ост}}$, МПа	20	190	240	560	1150

Исследовано влияние технологических режимов формирования пленки нитрида кремния, полученной осаждением из газовой фазы с плазменной активацией процесса (PECVD-методом) на величину остаточных напряжений в пленке (рисунок 5).

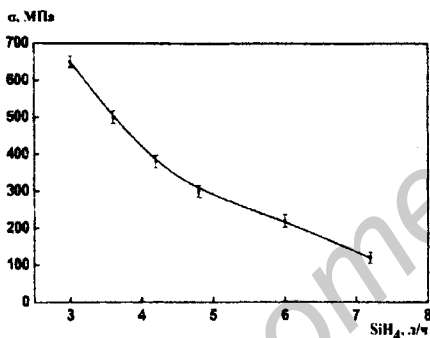


Рисунок 5 – Зависимость величины остаточных напряжений в пленке нитрида кремния, полученного PECVD-методом, от объемного расхода силана

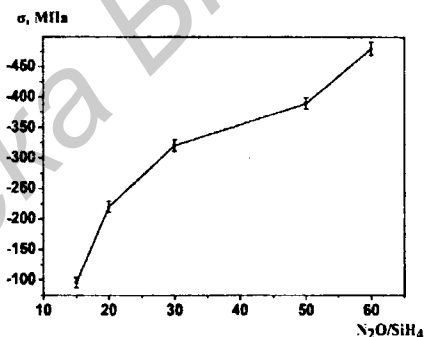


Рисунок 6 – Зависимость величины остаточных напряжений в пленках оксида кремния, полученного PECVD-методом, от соотношения расходов газов $\text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4$

Определен режим нанесения пленок нитрида кремния, сформированных PECVD-методом, в качестве пассивирующего слоя изделий класса МЭМС: соотношение рабочих газов $\text{SiH}_4/\text{NH}_3/\text{N}_2 = 7,2/15/100$ л/ч, давление в рабочем объеме 55 ± 5 Па, мощность ВЧ генератора 1000 ± 100 Вт. При этом величина остаточных напряжений растяжения в пленке будет находиться в пределах $+90 \dots +100$ МПа.

Исследовано влияние технологических режимов формирования компенсационного слоя диоксида кремния на величину остаточных напряжений получаемых пленок. Установлено, что увеличение величины соотношения

рабочих газов NO_2/SiH_4 (за счет увеличения объемного расхода SiH_4) с 15 до 60 позволяет изменять величину остаточных напряжений в пленках диоксида кремния с $\sigma_{\text{сжат}} = -80$ МПа до $\sigma_{\text{сжат}} = -480$ МПа (рисунок 6).

В четвертой главе исследованы процессы формирования пленок Pt, Ni

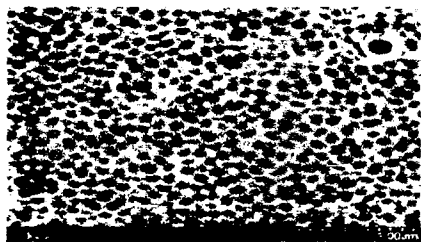


Рисунок 7 – Поверхность пленки анодированного Al_2O_3

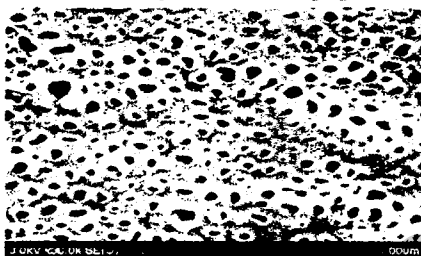


Рисунок 8 – Поверхность пленки анодированного Al_2O_3 после ионно-лучевой обработки в течение 10 мин



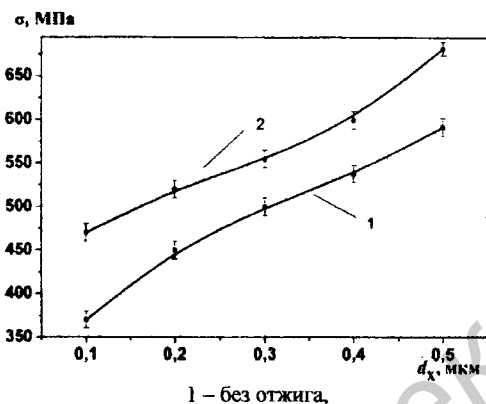
Рисунок 9 – Пленка платины, нанесенная на пленку оксида алюминия после ионно-лучевой обработки

и ПМК в качестве резистивных слоев многослойных мембранных МЭМС. Предложен метод подготовки поверхности пленки Al_2O_3 толщиной $0,4 \pm 0,04$ мкм (рисунок 7), используемой в качестве адгезионного подслоя для Pt, ионно-лучевой обработкой ионами аргона при ускоряющем напряжении 3 кВ и плотности постоянного тока $0,3 \text{ mA/cm}^2$ в течение 10 мин (рисунок 8). Это приводит к увеличению эффективной площади контактирования за счет увеличения диаметра пор до $0,02$ мкм, что позволяет увеличить адгезию пленки платины толщиной $0,4 \pm 0,04$ мкм в 2–3 раза по сравнению с обработкой в ортофосфорной кислоте. На рисунке 9 представлен разрез структуры, выполненной в указанных режимах, где видно, что платина проникает внутрь пор Al_2O_3 . Исследована зависимость сопротивления и температурного коэффициента сопротивления (ТКС) от температуры подложки в процессе нанесения и толщины пленки Pt, влияние последующего отжига на эти параметры. Установлено, что полученные пленки Pt могут обеспечивать стабильную работу датчика при рабочих температурах нагревателя до 1070 К.

Определены режимы формирования пленок никеля, получаемых методом электронно-лучевого испарения, используемых при изготовлении высокотемпературных мембранных

МЭМС в качестве нагревателей с рабочей температурой до 530 К. Остаточные напряжения составляют $\sigma_{\text{раст}} = +450$ МПа, что не согласуется с остаточными напряжениями пленки нитрида кремния ($\sigma_{\text{раст}} = +20$ МПа). Последующий отжиг при температуре 770 ± 3 К увеличивает величину остаточных напряжений в пленке никеля (рисунок 10). Поэтому предложено использовать в качестве компенсационного слоя пленку диоксида кремния, сформированную PECVD-методом, имеющую противоположные по знаку остаточные напряжения.

В случае применения в качестве материала нагревателя мембраны кристалла датчика пленок Pt, Ni рекомендуется проводить прецизионное глубокое травление кремния



1 — без отжига,
2 — после отжига при температуре 770 ± 3 К
Рисунок 10 — Зависимость остаточных напряжений от толщины пленок Ni

нагревателя до 530 К ($\text{Si-Si}_x\text{N}_y$ -Ni-SiN_x-SiO₂), 770 К ($\text{Si-Si}_x\text{N}_y$ -ПКК-Si_xN_y), 1070 К ($\text{Si-Si}_x\text{N}_y$ -Al₂O₃-Pt-SiN_x-SiO₂). В целях упрощения конструкции обоснована возможность использования пленок нитрида кремния толщиной 1,2 мкм вместо трехслойной системы SiO₂-Si₃N₄-SiO₂. С использованием программного пакета COMSOL Multiphysics 4.0 проведено математическое моделирование величин результирующих остаточных напряжений в мембранах с различным резистивным слоем. В модуле Structural Mechanical методом конечных элементов решалось уравнение термоупругости Дюамеля – Неймана в котором учитываются термические напряжения, вызванные разностью тепловых коэффициентов расширения материалов структуры (обобщенный закон Гука с учетом изменения температуры). Так как анизотропия свойств в нашем случае не существенна, то решаем задачу для изотропной среды. Матрица эластичности D в этом случае имеет вид

кое травление кремния в водном растворе KOH 20 % -ной концентрации при температуре 353 ± 3 К, что обеспечивает скорость травления $1 \pm 0,1$ мкм/мин. В случае использования в качестве материала нагревателя пленок поликристаллического кремния необходимо проводить плазмохимическое травление кремния в среде элегаза (SF₆).

В пятой главе предложены конструкции многослойных структур мембранных МЭМС с рабочей температурой

$$D = \frac{E}{(1-\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга;

ν – коэффициент Пуассона.

Граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} u &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где u – вектор перемещения.

Вектор перемещения связан с тензором деформации ϵ соотношением

$$\epsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + \nabla u^T), \quad (3)$$

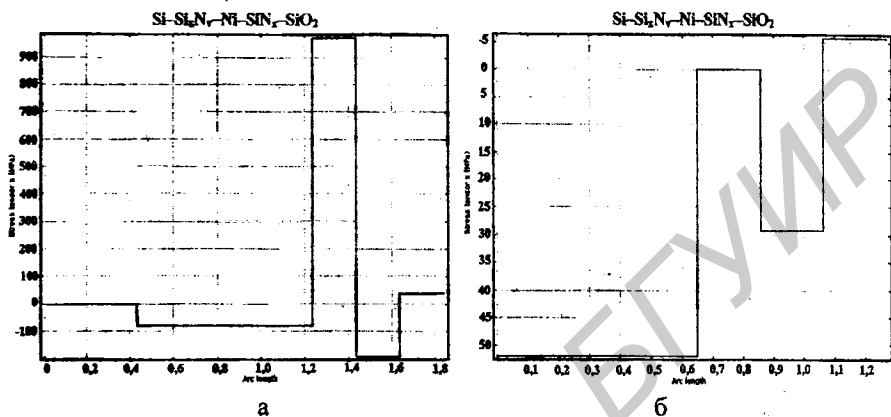
где T – температура осаждения слоя.

Напряжения определялись при комнатной и рабочей температурах нагревателя многослойных мембран, в качестве резистивных слоев в которых использовались пленки поликристаллического кремния, никеля и платины. В качестве исходных данных для моделирования результирующих остаточных напряжений многослойных структур использовались результаты исследований, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Данные для моделирования результирующих напряжений

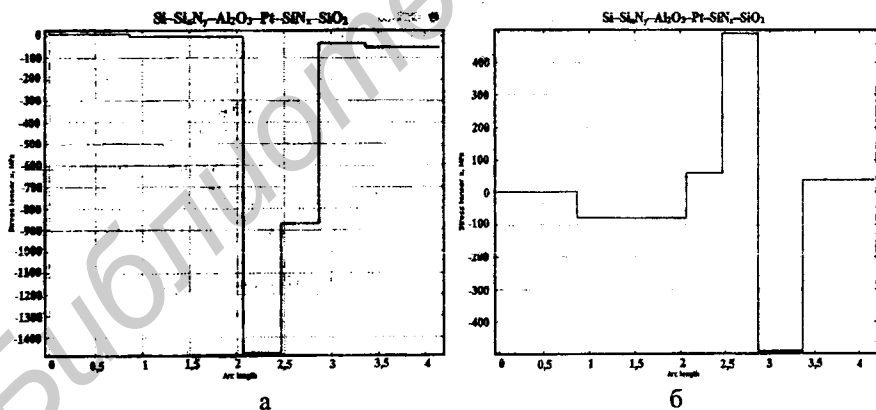
Т _{раб. нагр.} , К	Показатель	Слой, мкм					
		1	2	3	4	5	6
530	Материал	Si	Si _x N _y	Ni	SiN _x	SiO ₂	-
	Толщина, мкм	360	1,2	0,3	0,5	1,0	-
	Температура формирования, К	-	1123	573	623	623	-
	Остаточные напряжения, МПа	-	+20	+450	+90	-480	
770	Материал	Si	Si _x N _y	ПКК	Si _x N _y	-	-
	Толщина, мкм	360	1,2	0,5	0,5	-	-
	Температура формирования, К	-	1123	888	1123	-	-
	Остаточные напряжения, МПа	-	+22	+20	+22	-	-
1070	Материал	Si	Si _x N _y	Al ₂ O ₃	Pt	SiN _x	SiO ₂
	Толщина, мкм	360	1,2	0,4	0,4	0,5	1,0
	Температура формирования, К	-	1123	888	573	623	623
	Остаточные напряжения, МПа	-	+20	+200	+400	+90	-480

Результирующие остаточные напряжения в многослойной структуре мембраны датчика при рабочей температуре нагревателя рассчитывались с учетом добавления каждого последующего слоя. Результаты моделирования для структур $\text{Si-Si}_x\text{N}_y\text{-Ni-SiN}_x\text{-SiO}_2$ и $\text{Si-Si}_x\text{N}_y\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Pt-SiN}_x\text{-SiO}_2$ представлены на рисунках 11, 12.



температура нагревателя: а – 293 К; б – 530 К

Рисунок 11 – Вектор изменения распределения остаточных напряжений в многослойной структуре $\text{Si-Si}_x\text{N}_y\text{-Ni-SiN}_x\text{-SiO}_2$



температура нагревателя: а – 293 К; б – 1070 К

Рисунок 12 – Вектор изменения распределения остаточных напряжений в многослойной структуре $\text{Si-Si}_x\text{N}_y\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Pt-SiN}_x\text{-SiO}_2$

На основании полученных результатов математического моделирования обоснован выбор режимов формирования многослойной структуры, состоящей из пленок нитрида кремния, полученного LPCVD-методом

($\sigma_{\text{раст}} = +20$ МПа), никеля ($\sigma_{\text{раст}} = +450$ МПа), нитрида кремния, полученного PECVD-методом ($\sigma_{\text{раст}} = +90$ МПа), диоксида кремния, полученного PECVD-методом ($\sigma_{\text{сжат}} = -480$ МПа), что обеспечило получение суммарных остаточных напряжений в данной конструкции $+25$ МПа.

Расчетным путем подтверждена обоснованность возможности использования пленки нитрида кремния толщиной $1,2$ мкм вместо традиционно используемой тройной системы $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$. Это позволяет упростить конструкцию, увеличить чувствительность мембраны и удешевить производство мембранных датчиков. Разработаны конструкции и маршруты изготовления мембран МЭМС с рабочей температурой нагревателя до $530, 770, 1070$ К (рисунок 13).

- | | | |
|--|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Химическая обработка 2. Осаждение Si_3N_4,
$d_f = 1,2 \pm 0,1$ мкм 3. Нанесение Ni
$d_f = 0,3 \pm 0,03$ мкм 4. 2-сторонний ф/л
«Нагреватель» - планарная
сторона, «Мембрана» -
обратная сторона.
Травление Ni и Si_3N_4 5. Осаждение Si_3N_4,
$d_f = 0,5 \pm 0,05$ мкм; 6. Осаждение SiO_2,
$d_f = 1,0 \pm 0,1$ мкм 7. ф/л «Локальная
компенсация»,
травление SiO_2. 8. ф/л «Пассивация»,
травление SiN. 9. Проверка параметров
нагревателя 10. Травление Si с обратной
стороны до Si_3N_4, на 460 мкм. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Химическая обработка 2. Осаждение Si_3N_4,
$d_f = 1,2 \pm 0,1$ мкм 3. Нанесение ПКК
$d_f = 0,6 \pm 0,06$ мкм 4. Легирование бором до
$R_s = 6$ Ом/□ 5. 2-сторонний ф/л
«Нагреватель» -
планарная сторона,
«Мембрана» - обратная
сторона. Травление Ni и
Si_3N_4 6. Осаждение Si_3N_4,
$d_f = 0,5 \pm 0,05$ мкм 7. ф/л «Пассивация»,
травление SiN. 8. Проверка параметров
нагревателя 9. ПХ травление Si с
обратной стороны до Si_3N_4,
на 460 мкм. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Химическая обработка 2. Осаждение Si_3N_4,
$d_f = 1,2 \pm 0,1$ мкм 3. Нанесение Al
$d_f = 0,4 \pm 0,04$ мкм 4. Ионно-лучевая обработка:
10 минут 5. Нанесение Pt
$d_f = 0,4 \pm 0,04$ мкм 6. 2-сторонний ф/л
«Нагреватель» - планарная
сторона, «Мембрана» - обратная
сторона. Травление Pt и Si_3N_4 7. Осаждение Si_3N_4,
$d_f = 0,5 \pm 0,05$ мкм 8. Осаждение SiO_2;
$d_f = 0,5 \pm 0,05$ мкм 9. ф/л «Локальная компенсация»,
травление SiO_2. 10. ф/л «Пассивация», травление
SiN. 11. Проверка параметров
нагревателя 12. Травление Si с обратной
стороны до Si_3N_4, на 460 мкм. |
|--|---|--|

а

б

в

а – до 530 К, б – до 770 К, в – до 1070 К

Рисунок 13 – Схемы технологических маршрутов изготовления мембранных датчиков МЭМС с различной рабочей температурой нагревателя

В приложениях приводятся материалы о внедрении результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Экспериментально установлено, что при формировании прочной пленки нитрида кремния методом химического осаждения из газовой фазы при пониженном давлении (40 ± 3 Па), температуре (1123 ± 1 К) и объемном расходе газовой смеси $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + \text{NH}_3$ (10 л/ч) соотношение $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ должно быть 4/1, что обеспечивает получение пленок нитрида кремния необходимой толщины (0,8 – 1,2 мкм) с остаточными напряжениями, не превышающими 20 – 50 МПа, которые могут использоваться как элемент мембранных микроэлектромеханических систем, так и полупроводниковых приборов без дополнительных слоев SiO_2 [1-А, 2-А, 7-А, 9-А, 12-А, 16-А, 18-А, 19-А, 23-А, 27-А].

2. Методом Оже-спектроскопии установлен эффект увеличения соотношения атомных концентраций Si к N с 0,75 до 1,22 в пленке нитрида кремния, получаемой методом химического осаждения из газовой фазы в смеси $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + \text{NH}_3$ при изменении соотношения компонентов с 1/4 до 4/1, что позволяет обеспечить снижение величины остаточных напряжений с +1150 до +20 МПа соответственно, а также уменьшение скорости травления пленки нитрида кремния в концентрированной HF (49 %) с 18 до 2,2 нм/мин [1-А, 7-А, 24-А, 25-А, 26-А].

3. Установлена взаимозависимость показателя преломления пленки Si_xN_y , соотношения компонентов Si и N, а также величины остаточных напряжений пленок нитрида кремния при различном соотношении реагентов в газовой смеси $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$. Показано, что показатель преломления может использоваться как критерий для оперативной оценки соотношения компонентов Si/N и величины остаточных напряжений в пленках нитрида кремния [2-А, 3-А, 11-А, 12-А, 15-А].

4. Предложены режимы формирования пленок диоксида кремния PECVD-методом, позволяющие получать пленки с остаточными напряжениями $\sigma_{\text{сжат}} = -480$ МПа, которые могут быть использованы в качестве компенсационного слоя при формировании мембран приборов МЭМС с нагревателем на основе резистивного слоя Ni [5-А, 24-А, 26-А, 27-А].

5. Предложен метод подготовки поверхности Al_2O_3 перед нанесением пленки Pt, заключающийся в ионно-лучевой обработке ионами аргона, что обеспечивает вскрытие поверхностных пор с увеличением их размера до 0,02 мкм в поперечном сечении и повышает адгезию Pt к Al_2O_3 в 2 – 3 раза по сравнению с обработкой в ортофосфорной кислоте за счет увеличения площади физического контакта при проникновении Pt в глубь пор Al_2O_3 [1-А, 8-А, 13-А, 14-А, 21-А].

6. С учетом результатов моделирования результирующих остаточных напряжений многослойной мембраны разработаны конструкции и технологические маршруты изготовления кристаллов высокотемпературных МЭМС датчиков с рабочей температурой нагревателя до 530, 770, 1070 К, а также осуществлен выбор технологических режимов получения каждого функционального слоя структур $\text{Si-Si}_x\text{N}_y\text{-Ni-SiN}_x\text{-SiO}_2$, $\text{Si-Si}_x\text{N}_y\text{-ПКК-Si}_x\text{N}_y$, $\text{Si-Si}_x\text{N}_y\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Pt-Si}_x\text{N}_y\text{-SiO}_2$ [4-А, 6-А, 7-А, 10-А, 27-А].

7. Предложена и апробирована в производственных условиях конструкция многослойной мембраны, обеспечивающая низкий уровень остаточных напряжений. Конструкция мембраны состоит из последовательно чередующихся слоев, включающих пленку нитрида кремния, полученную методом химического осаждения из газовой фазы, пленку никеля, полученную методом электронно-лучевого испарения, пленку нитрида кремния, полученную плазмостимулируемым химическим осаждением, пленку диоксида кремния, полученную плазмостимулируемым химическим осаждением. Учитывая различный знак напряжений в слоях многослойной мембраны результирующие напряжения составляют $\sigma_{\text{раст}} \approx +25 \text{ МПа}$ [1-А, 5-А, 25-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Пленки нитрида кремния толщиной 1,2 мкм с низкими значениями остаточных напряжений по разработанным технологическим режимам при формировании мембранных микроэлектромеханических систем могут заменить традиционно используемую трехслойную систему $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$, что упрощает и удешевляет конструкцию, повышает чувствительность мембран.

2. Разработанные конструкции и маршруты изготовления мембран могут использоваться при производстве кристаллов датчиков класса МЭМС с рабочей температурой нагревателя до 530, 770, 1070 К.

3. Разработанные технологические режимы осаждения слоев диоксида и нитрида кремния PECVD-методом используются при формировании кристалла микросхемы КР1181ЕНХХ (маршрутная карта СФНК.01200.00037).

4. Разработанные технологические режимы осаждения слоев диоксида и нитрида кремния PECVD-методом используются при формировании кристалла микросхемы КР1180ЕНХХ (маршрутная карта СФНК.01200.00067).

5. С использованием кристаллов, изготовленных по разработанным технологическим маршрутам (с резистивными слоями в виде пленок Ni и Pt), ООО «С-Компонент» (Россия) изготовлены высокотемпературные мембранные датчики расхода газа, технические характеристики которых соответствуют датчикам фирмы Bosch (Германия).

6. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе БГУИР на кафедре электронной техники и технологии.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Монографии

1–А. Электрофизические процессы и оборудование в технологии микро- и нанoeлектроники / А.П. Достанко, А.М. Русецкий, С.В. Бордусов, В.Л. Ланин, Л.П. Ануфриев, С.В. Карпович, В.В. Жарский, В.И. Плебанович, А.Л. Адамович, Ю.А. Гросберг, Д.А. Голосов, С.М. Завадский, Я.А. Соловьев, И.В. Дайняк, Н.С. Ковальчук, И.Б. Петухов, Е.В. Телеш, С.И. Мадвейко; под ред. А.П. Достанко и А.М. Русецкого – Минск: Бестпринт, 2011. – 216 с.

Статьи в научных журналах

2–А. Ковальчук, Н.С. Пленки нитрида кремния с низкими механическими напряжениями для микроэлектромеханических систем / Н.С. Ковальчук // Доклады БГУИР. – 2008. – № 4. – С. 65–69.

3–А. Высоцкий, В.Б. Оптимизация конструкции мембранных датчиков / В.Б. Высоцкий, И.И. Рубцевич, Н.С. Ковальчук // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – № 5. – С. 16–20.

4–А. Ковальчук, Н.С. Оптимизированная конструкция датчика газового анализатора с уменьшенным энергопотреблением / Н.С. Ковальчук, И.И. Рубцевич // Доклады БГУИР. – 2009. – № 4. – С. 39–44.

5–А. Формирование пленок поликристаллического кремния для микроэлектромеханических систем / Л.П. Ануфриев, В.Б. Высоцкий, Н.С. Ковальчук, Э.В. Лобко // Весці НАН Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2010. – № 1. – С. 91–97.

6–А. Исследования свойств нитрида и оксида кремния, полученных методом плазмохимического осаждения / И.И. Рубцевич, Я.А. Соловьев, В.Б. Высоцкий, А.И. Дудкин, Н.С. Ковальчук // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2011. – № 4. – С. 29–32.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

7–А. Высоцкий, В.Б. Система металлизации для высокотемпературных датчиков / В.Б. Высоцкий, Н.С. Ковальчук, Э.В. Лобко, Т.И. Ореховская // Современные средства связи: материалы XIII междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–26 сент. 2008 г. – Минск, 2008. – С. 135–137.

8–А. Прогнозирование надежности подзатворного диэлектрика МОП СБИС / В.В. Баранов, Н.С. Ковальчук, В.С. Сякерский, Г.Г. Чигирь, И.Н. Цырельчук // Військова освіта і наука: сьогодні та майбутнє:

материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конф., Киев, 14–16 окт. 2009 г. – Киев, 2009. – С. 65–71.

Тезисы докладов на научных конференциях

9–А. Ковальчук, Н.С. Пленки поликристаллического кремния с низкими значениями механических напряжений для МЭМС / Н.С. Ковальчук // Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 апр. 2008 г. / Минск, гос. высш. радиотехн. колледж. – Минск, 2008. Ч.1. – С. 62–64.

10–А. Оптимизация конструкции мембранных датчиков / Л.П. Ануфриев, В.Б. Высоцкий, Н.С. Ковальчук, Э.В. Лобко // Современные информационные и электронные технологии: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 19–23 мая, 2008 г. – Одесса, 2008. – С. 138.

11–А. Ковальчук, Н.С. Конструкция маломощного микроэлектронного кристалла датчика газового анализатора / Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы 5-й Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29-30 мая 2008 г. / Новополоцк, 2008. – С. 77.

12–А. Система металлизации для высокотемпературных датчиков / В.Б. Высоцкий, Н.С. Ковальчук, Э.В. Лобко, Т.И. Ольшевская // Современные средства связи: тез. докл. XIII междунар. техн. науч.-конф., Минск, 23–26 сент. 2008 г. – Минск, 2008. – С. 135–137.

13–А. Формирование металлической пленки для газовых датчиков / Л.П. Ануфриев, В.Б. Высоцкий, Н.С. Ковальчук, Э.В. Лобко, Т.И. Ореховская // Современные информационные и электронные технологии: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 18–22 мая, 2009 г. – Одесса, 2009. – С. 106.

14–А. Баранов, В. В. Формирование мембран для сенсоров в микроэлектронном исполнении / В.В. Баранов, В.Б. Высоцкий, Н.С. Ковальчук // Современные информационные и электронные технологии: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 18–22 мая 2009 г. – Одесса, 2009. – С. 140.

15–А. Получение канавок в кремнии методом ПХТ / В.Б. Высоцкий, Н.С. Ковальчук, Д.А. Котов, Э.В. Лобко // Современные средства связи: тез. докл. XIII междунар. науч.-техн. конф., Минск, 29 – 30 сент. 2009 г. – Минск, 2009. – С. 45.

16–А. Ковальчук, Н.С. Функциональные слои мембранных датчиков / Н.С. Ковальчук // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2010: материалы Междунар. молодежн. науч.-техн. конф., Севастополь, 19–24 апр. 2010 г. – Севастополь, 2010. – С. 98.

17–А. Плазмохимическое травление в технологии производства МЭМС / А.А. Ясюнас, А.С. Тymoщик, Н.С. Ковальчук, Д.А. Котов // Техни-

ческие средства защиты информации: материалы VIII Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Браслав, 24–26 мая 2010 г. / БГУИР. Минск, 2010. – С. 43.

18–А. Ануфриев, Л.П. Формирование диэлектрических тонкопленочных мембран с управляемыми механическими свойствами / Л.П. Ануфриев, В.Б. Высоцкий, Н.С. Ковальчук // Современные информационные и электронные технологии: материалы 11-й Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 24–28 мая 2010 г. – Одесса, 2010. – С. 164.

19–А. Ковальчук, Н.С. Согласование систем индуктивно-связанного разряда / Н.С. Ковальчук, Д.А. Котов, А.А. Ясюнас // Современные информационные и электронные технологии: материалы 11-й Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 24–28 мая 2010 г. – Одесса, 2010. – С. 49.

20–А. Ковальчук, Н.С. Адгезионный подслои для металлических пленок / Н.С. Ковальчук, Т.И. Ореховская, Э.В. Лобко // Нанотехнологии-2010: материалы Междунар. науч.-техн. конф. и молодежн. шк.-семинара, Дивно-морское, 19–24 сентября 2010 г. – Геленджик, 2010. – С. 167.

21–А. Функциональные слои высокотемпературных мембранных датчиков / Л.П. Ануфриев, В.Б. Высоцкий, Н.С. Ковальчук, Э.В. Лобко // Современные информационные и электронные технологии: материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 сент. 2010 г. – Минск, 2009. – С. 81–82.

22–А. Ковальчук, Н.С. Диэлектрические мембраны с локально пассивированными резистивными пленками / Н.С. Ковальчук // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2011: материалы Междунар. молодежн. науч.-техн. конф., Севастополь, 11–15 апреля 2011 г. – Севастополь, 2011. – С. 145.

23–А. Ковальчук, Н.С. Влияние стехиометрии пленок Si_xN_y на величину механических напряжений / Н.С. Ковальчук // Радиозлектроника и молодежь в XXI веке: материалы 15-го Юбилейн. Междунар. молодежн. форума, Харьков, 18–20 апр. 2011 г. – Харьков, 2011. – С. 78.

24–А. Ковальчук, Н.С. Управление механическими напряжениями в кинематическом элементе МЭМС / Н.С. Ковальчук, А.А. Ясюнас // Материалы 47-й науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 18–22 апреля 2011 г. / БГУИР. – Минск, 2011. – С. 83.

25–А. Ковальчук, Н.С. Анализ механических напряжений в пленках Si_xN_y / Н.С. Ковальчук, Л.П. Ануфриев, Э.В. Лобко // Современные информационные и электронные технологии: материалы 12-й Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 23–27 мая 2011 г. – Одесса, 2011. – С. 278.

26–А. Влияние стехиометрии пленок нитрида кремния на величину механических напряжений / Н.С. Ковальчук, Л.П. Ануфриев, В.Б. Высоцкий, Э.В. Лобко // Современные информационные и электронные технологии: ма-

териалы 12-й Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 23–27 мая 2011 г. –
Одесса, 2011. – С. 286.



Библиотека БГУИР

Шматслаёвыя структуры на аснове нітрыду крэмнію для мембранных мікраэлектрамеханічных сістэм і паўправадніковых прыбораў

Ключавыя словы: шматслаёвыя структуры, мембрана, паўправадніковыя прыборы, нітрыд крэмнія, астаткавыя напружанні, нікель, плаціна, авадаваны алюміній, іённа-прамянёвая апрацоўка.

Мэта работы: даследаванне і распрацоўка канструкцый, тэхналагічных маршрутаў і выбар рэжымаў вырабу збалансаваных па астаткавым напружваннем шматслаёвых структур паўправадніковых прыбораў і мембран мікраэлектрамеханічных прылад.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: Эксперыментальна ўстаноўлена, што пры фарміраванні плёнак нітрыду крэмнію метадам хімічнага асаджэння з газавай фазы пры паніжаным ціску суадносіны $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ павінна быць 4/1, што забяспечвае атрыманне плёнак нітрыду крэмнію неабходнай таўшчыні (0,8 – 1,2 мкм) з астаткавымі напружаннямі ня перавышваючымі 20 – 50 МПа. Плёнкі нітрыду крэмнію таўшчынёй 1,2 мкм з нізкімі значэннямі астаткавымі напружаннямі пры фарміраванні мембраны вырабаў класа МЭМС могуць замяніць трохслаёвую сістэму $\text{SiO}_2\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--SiO}_2$, што спрашчае і патанняе канструкцыю, павышае адчувальнасць мембраны. Прапанаваны метады падрыхтоўкі паверхні Al_2O_3 перад нанясеннем плёнкі Pt, які складаецца ў іённа-прамянёвай апрацоўцы іёнамі аргону, што забяспечвае выкрыццё паверхневых часу з павелічэннем іх памеру да 0,02 мкм ў папярочным перасеку і павялічвае адгезію Pt да Al_2O_3 ў 2-3 разы ў параўнанні з апрацоўкай ў артафасфорнай кіслаце за кошт павелічэння плошчы фізічнага кантакту пры пранікненні Pt ўглыб часу Al_2O_3 . Прапанавана канструкцыя шматслаёвай мембраны, што складаецца з пластоў якія паслядоўна чаргуюцца, і ўключаюць плёнку нітрыду крэмнію, атрыманую LPCVD-метадам, плёнку нікеля, атрыманую метадам электронна-прамянёвага выпарэння, плёнку нітрыду крэмнію, атрыманай PECVD-метадам, плёнку дыяксіду крэмнія, атрыманай PECVD-метадам, з выніковымі астаткавымі напружаннямі $\sigma_{\text{расц}} = 25$ Мпа.

Ступень выкарыстання: вынікі дысертацыйнай працы выкарыстаныя пры вырабе партыі крышталаў датчыкаў расходу газу для ТАА «С-Компонент» (Расія), выкарыстоўваюцца на ААТ «ІНТЭГРАЛЬ» пры вырабе крыштала мікрасхемы КР1181ЕНХХ і крыштала мікрасхемы КР1180ЕНХХ.

Галіна прымянення: мікраэлектроніка і мікраэлектрамеханічныя прылады.

РЕЗЮМЕ

КОВАЛЬЧУК Наталья Станиславовна

Многослойные структуры на основе нитрида кремния для мембранных микроэлектромеханических систем и полупроводниковых приборов

Ключевые слова: многослойные структуры, мембрана, полупроводниковые приборы, нитрид кремния, остаточные напряжения, никель, платина, анодированный алюминий, ионно-лучевая обработка.

Цель работы: исследование и разработка конструкций, технологических маршрутов и выбор режимов изготовления сбалансированных по остаточным напряжениям многослойных структур полупроводниковых приборов и мембран микроэлектромеханических устройств.

Полученные результаты и их новизна: Экспериментально установлено, что при формировании пленок нитрида кремния методом химического осаждения из газовой фазы при пониженном давлении соотношение $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 / \text{NH}_3$ должно быть 4/1, что обеспечивает получение пленок нитрида кремния необходимой толщины (0,8 – 1,2 мкм) с остаточными напряжениями не превышающими 20 – 50 МПа. Пленки нитрида кремния толщиной 1,2 мкм с низкими значениями остаточных напряжений при формировании мембраны изделий класса МЭМС могут заменить трехслойную систему $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$, что упрощает и удешевляет конструкцию, повышает чувствительность мембраны. Предложен метод подготовки поверхности Al_2O_3 перед нанесением пленки Pt, заключающийся в ионно-лучевой обработке ионами аргона, что обеспечивает вскрытие поверхностных пор с увеличением их размера до 0,02 мкм в поперечном сечении и увеличивает адгезию Pt к Al_2O_3 в 2-3 раза по сравнению с обработкой в ортофосфорной кислоте за счет увеличения площади физического контакта при проникновении Pt вглубь пор Al_2O_3 . Предложена конструкция многослойной мембраны, состоящая из последовательно чередующихся слоев, включающих пленку нитрида кремния, полученную LPCVD-методом, пленку никеля, полученную методом электронно-лучевого испарения, пленку нитрида кремния, полученную PECVD-методом, пленку диоксида кремния, полученную PECVD-методом, с результирующими остаточными напряжениями $\sigma_{\text{расст}} = +25$ МПа.

Степень использования: результаты диссертационной работы использованы при изготовлении кристаллов датчиков расхода газа для ОАО «С-Компонент» (Россия), используются на ОАО «ИНТЕГРАЛЬ» при изготовлении кристалла микросхемы КР1181ЕНХХ и кристалла микросхемы КР1180ЕНХХ.

Область применения: микроэлектроника и микроэлектромеханические системы.

SUMMARY

KOVALCHUK Natalia Stanislavovna

Multilayer structures based on silicon nitride for membranes of microelectromechanical systems and semiconductor devices

Key words: multilayered structures, membrane, semi-conductor devices, silicon nitride, residual tension, nickel, platinum, anodized aluminum, ion-beam processing.

The aim of the work: research and development of structures, process routes and choice of modes of production balanced by the residual stress of multilayer structures of semiconductor devices and MEMS membrane devices.

The results obtained and their novelty: it was established experimentally in the formation of silicon nitride films by chemical vapor deposition under reduced pressure, the ratio $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 / \text{NH}_3$ should be 4/1, which provides the necessary silicon nitride films of thickness (0.8 – 1.2 μm) with residual stresses do not exceed 20 – 50 MPa. Silicon nitride film thickness of 1.2 μm with low values of residual stresses in the formation of membrane-class MEMS products can replace the three-layer system $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$, which simplifies and reduces the cost of construction increases the sensitivity of the membrane. A method of surface preparation before application of Al_2O_3 film Pt, which consists of ion-beam treatment with argon ions, which provides an autopsy of the surface pores with an increase in their size to 0.02 μm in cross section and increases the adhesion of Pt to the Al_2O_3 in 2–3 times in comparison with treatment in a phosphoric acid by increasing the area of area physical contact with the penetration depth since Pt Al_2O_3 . The design of the multilayer membrane consisting of alternating layers, including a film of silicon nitride, LPCVD-derived method, the nickel film obtained by electron-beam evaporation, a film of silicon nitride, PECVD-derived method, a film of silicon dioxide obtained by PECVD-method with the resulting residual stresses $\sigma_{\text{ten}} = 25$ MPa.

Degree of utilization: results of the thesis are used in the manufacture of an experimental batch of crystals for gas flow sensors LLC «S-component» (Russia), used at JSC "INTEGRAL" in the manufacture of crystal and crystal chips KR1181ENHH KR1180ENHH chips.

Field of application: microelectronics and MEMS.

Научное издание

КОВАЛЬЧУК НАТАЛЬЯ СТАНИСЛАВОВНА

**МНОГОСЛОЙНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ
ДЛЯ МЕМБРАННЫХ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

Специальность 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать <i>23.05.2012.</i>	Формат 60x84 ^{1/16}	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.- изд. л. 1,4	Тираж 60 экз.	Заказ <i>245.</i>

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровка, 6