

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.382.002; 621.382.049.77.002

Демидович Сергей Александрович

Исследование возможностей получения устойчивых  
микроэлектромеханических систем путем управления внутренними  
механическими напряжениями в нитриде кремния

## **АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-36 80 08 «Инженерная геометрия и компьютерная графика»

Научный руководитель

Вышинский Николай Владимирович

профессор кафедры ИКГ

профессор; кандидат технических наук

Минск 2023

## ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является создание процессов формирования слоев нитрида кремния с управляемыми механическими напряжениями и построение трехмерной компьютерной модели для последующего получения устойчивых микроэлектромеханических систем (далее – МЭМС).

Для выполнения поставленной цели в работе был проведен анализ основных положений и концепция компьютерного моделирования МЭМС.

В настоящее время в производстве МЭМС весьма остро стоит вопрос разработки низкотемпературных методов, позволяющих получать тонкие высококачественные пленки различного функционального назначения на основе диэлектрических материалов. Главным достоинством тонких пленок нитрида кремния, определяющим их применимость в конструкционных элементах МЭМС, является их высокий модуль упругости в совокупности с низким уровнем остаточных напряжений.

Для производства МЭМС с трехмерной структурой в виде микробалочных и мостиковых элементов необходимо решить проблему получения прочных, с небольшими значениями внутренних напряжений, диэлектрических и полупроводниковых пленок, из которых состоит мембрана. В качестве основных структурных компонентов МЭМС используют диэлектрические пленки нитрида кремния из-за их высоких диэлектрических и механических характеристик.

В диссертации были рассмотрены вопросы трехмерного компьютерного моделирования МЭМС. Также базовые параметры, результаты испытаний и диаграммы параметрических характеристик, необходимые для управления процессом осаждения нитрида кремния.

Для компьютерного проектирования была использована программа Autodesk Inventor, а также Autodesk Coventor. Autodesk Coventor был использован для моделирования микроболометрической матрицы на основе проекта болометра, смоделированного в Autodesk Inventor.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## **Актуальность темы исследования**

Развитие интегральных технологий ставит задачи по поиску новых составов и свойств материалов. Это актуально и для нитрида кремния – одного из наиболее востребованных диэлектриков в технологии интегральных микросхем и микроэлектромеханических систем. Для ряда применений существенное значение имеет уровень остаточных механических напряжений в нитридных пленках. Рассмотрение вопроса о исследовании внутренних механических напряжений в нитриде кремния также является важным.

## **Цели и задачи исследования**

Целью диссертации является создание процессов формирования слоев нитрида кремния с управляемыми механическими напряжениями и построение трехмерной компьютерной модели для последующего получения устойчивых МЭМС.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи:

- анализ основных положений и концепция компьютерного моделирования МЭМС;
- получение пленок нитрида кремния с управляемыми механическими напряжениями;
- получение устойчивых образцов МЭМС.

**Объектом** исследования является МЭМС, нитрид кремния.

**Предмет** исследования – нитрид кремния с управляемыми механическими напряжениями для формирования МЭМС.

**Область исследования.** Разработка методов формирования конструктивных элементов и подходов к компьютерному проектированию приборных структур интегральных неохлаждаемых тепловых детекторов на основе кремниевой технологии.

## **Теоретическая и методологическая основа исследования**

Одним из этапов получения устойчивых МЭМС является их трехмерное компьютерное моделирование. Нахождение возможности управления механическими напряжениями пленки в максимально возможном диапазоне, в том числе получения как растягивающих, так и сжимающих напряжений, является одной из главных задач.

**Магистерская диссертация** выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составил 91,69%.

Заимствования, самоцитирования и цитирования обозначены ссылками на публикации, указанные в «Списке литературы».

### **Апробация диссертации и информации об использовании ее результатов**

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на:

- 15-й международной научно-технической конференции “Приборостроение – 2022” БНТУ, 2022;
- 10-й международной научной конференции “Актуальные проблемы физики твердого тела” ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», 2023.

### **Публикации**

Основные положения работы и результаты диссертации представлены в 5-и статьях в рецензируемых научных журналах.

**Структура и объем работы.** Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трех глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации - 82 страницы. Работа содержит 25 таблицы, 61 рисунок. Библиографический список включает 12 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В введении** рассмотрен вопрос разработки низкотемпературных методов, позволяющих получать тонкие высококачественные пленки различного функционального назначения на основе диэлектрических материалов, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

**В общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, даны сведения об объекте, предмете и области исследования, представлена теоретическая и методологическая основа исследования, структура и объем диссертации.

**В первой главе** рассматривается МЭМС – технология изготовления микроболометра, Особенности конструкции микроболометров, их процесс моделирования.

**Во второй главе** исследуется процесс осаждения нитрида кремния с возможностью управления остаточными напряжениями от сжимающих до растягивающих с переходом через ноль.

**В третьей главе** рассматривается практическое применение полученных результатов для изготовления микроболометрической матрицы.

**В приложениях** приведены параметры материалов, визуализация моделирования микроболометра и отчет о проверке в системе «Антиплагиат».

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе были проведены разработка и исследование процессов формирования несущих слоев нитрида кремния для микроболометрических матриц с размером пикселя 20 – 25 мкм.

В ходе реализации поставленных задач было сделано следующее:

1 Разработан проект болометра в программе Autodesk Inventor, а также смоделирован микроболометр для различных механических напряжений несущих пленок нитрида кремния с использованием программного обеспечения Autodesk Coventor.

Установлено, что максимальное отклонение структуры от плоскостности наблюдается в местах крепления ноги к несущим столбикам микроболометрического пикселя. При этом наименьшее отклонение от плоскостности имеют структуры, с шириной ноги 1,1 мкм,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с толщиной 120 нм и механическим напряжением минус 350 МПа.

2 Разработан процесс формирования слоев нитрида кремния с возможностью управления остаточными напряжениями от сжимающих до растягивающих с переходом через ноль, а также установлены принципы управления.

3 Процесс осаждения нитрида кремния, методом химического осаждения из газовой фазы в реакторе индуктивно связанной плазмы (ICP CVD) на установке STE ICP200D из газохимического состава  $\text{SiH}_4/\text{N}_2/\text{He}$  позволяет получать достаточно малые сжимающие механические напряжения в пленках (менее минус 100 МПа), однако получить напряжения противоположного знака не удалось.

В результате получены остаточные напряжения в слоях нитрида кремния от 130 до минус 86 МПа. Коэффициент преломления пленок составлял около двух, что соответствует значениям для стехиометрических пленок нитрида кремния с небольшим обогащением кремнием.

4 В диссертации показана возможность получения в общей структуре  $\text{Si}_3\text{N}_4 \setminus \text{NiCr} \setminus \text{Si}_3\text{N}_4$  остаточных напряжений близких к нулю с помощью комбинирования режимов осаждения слоев нитрида кремния по установленным принципам.

Остаточные напряжения в структуре после осаждения нитрида кремния на полиимид значительно уменьшаются по сравнению со случаем осаждения нитрида кремния на кремниевую подложку.

По контролю на оптическом микроскопе, а также на РЭМ, никаких отклонений по внешнему виду и адгезии пленки нитрида кремния к полиимиду не выявлено.

Показана возможность получения мембран, не подвергающихся деформациям, с использованием установленных принципов управления процессом осаждения  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

С использованием результатов моделирования, а также установленных принципов управления процессом осаждения  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , на кремниевой подложке были сформированы все функциональные слои микроболометрической матрицы. Был получен образец МЭМС, устойчивый к механическим и термическим деформациям. Данные результаты пригодны для дальнейшего создания рабочих изделий.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Электролюминесценция пленок SiO<sub>2</sub> на Si, полученных термическим окислением и плазмохимическим осаждением / И.А. Романов, Н.С. Ковальчук, Л.А. Власукова, И.Н. Пархоменко, В.А. Солодуха, В.А. Пилипенко, Д.В. Шестовский, С.А. Демидович / Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2021;3: 26–31

The effect of upper layer in optical capacitor based on SiO<sub>2</sub>/SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si structure I. Parkhomenkoa, \*, L. Vlasukova, I. Romanova, F. Komarovb, c, A. Mudryid, N. Kovalchuke, S. Demidovich // Optical Materials 127 (2022) 112293

Механические напряжения в пленках SiN<sub>x</sub> при химическом осаждении из газовой фазы в плазме высокой плотности /Н.С. Ковальчук, С.А. Демидович, Л.А. Власукова, И.Н. Пархоменко, Ф.Ф. Комаров // Неорганические материалы, 2022, том 58, № 9, с. 938-944

Optical and electrophysical properties of gate dielectrics obtained by means of rapid thermal processing / N.S. Kovalchuk, Yu.A. Marudo, A.A. Omelchenko, V.A. Pilipenko,\* V.A. Solodukha, S.A. Demidovich, V.V. Kolos, E.S. Kozlova, V.A. Filipenya, & D.V. Shestovski // High Temperature Material Processes 26(3):59–68 (2022)

Kovalchuk N.S., Demidovich L.A., Vlasukova L.A., Parkhomenko I.N., and Komarov F.F. Mechanical Stress in SiN<sub>x</sub> Films Grown by High Density Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition //ISSN 0020-1685, Inorganic Materials,2022, Vol. 58, No.9,pp. 938-944//

Пленки SiN<sub>x</sub> с низкими механическими напряжениями для микросистемных применений, синтезированные в ICP-реакторе / Ковальчук Н.С., Демидович С.А., Комаров Ф.Ф., Власукова Л.А., Пархоменко И.Н. // Приборостроение – 2022: материалы 15-й Междунар. Научно-технической конференции, Минск, 16 – 18 ноября 2022 г. / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. - БНТУ, 2022 – с. – 445 – 446.

Влияние верхнего оксидного слоя в оптических микрорезонаторах на основе нитрида кремния / Пархоменко И.Н., Власукова Л.А., Комаров Ф.Ф., Романов И.А., Альжанова А.Е., Демидович С.А. // Приборостроение – 2022: материалы 15-й Междунар. Научно-технической конференции, Минск, 16 – 18 ноября 2022 г. / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. - БНТУ, 2022 – с. – 265 – 267.

The deposition of PECVD-SiN<sub>x</sub> films with controlled residual stress for MEMS applications / N. S. Koval'chuk, S. A. Demidovich, L. A. Vlasukova, I. N. Parkhomenko // proc. book X Intern. Scient. Conf., Minsk, 22-26 May, 2023 / SSPA «Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus»; ed.: V. M. Fedosyuk (chairman) [et al.]. – Minsk : Publisher A.Varaksin, 2023.

Effect of rapid thermal annealing on silicon nitride and oxynitride thin films / I. Parkhomenko, L. Vlasukova, F. Komarov, N. Kovalchuk, S. Demidovich, A. Zhussupbekova, K. Zhussupbekov, I. Shvets, and D. Zhigulin // proc. book X Intern. Scient. Conf., Minsk, 22-26 May, 2023 / SSPA «Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus»; ed.: V. M. Fedosyuk (chairman) [et al.]. – Minsk : Publisher A.Varaksin, 2023.