

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

УДК 621.385.833

Дуцник  
Артем Иванович

Формирование оптических покрытий на основе оксида кремния  
с повышенной лучевой стойкостью методом ионно-лучевого  
распыления

#### **АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
специальности 1-41 80 01 «Твердотельная электроника,  
радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на  
квантовых эффектах»

---

Научный руководитель

Котов Дмитрий Анатольевич  
к.т.н., доцент

---

Минск 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Внедрение оптических приборов и методов исследования в различные области науки и техники приводит к необходимости создания многослойных диэлектрических, металлодиэлектрических систем не только с расширяющимися требованиями к их свойствам, но и возможному их сочетанию. Это в первую очередь оптические, физико-механические, химические и другие свойства. Из оптических свойств следует упомянуть непрерывно расширяющийся спектральный диапазон работы приборов, ужесточение требований к лучевой стойкости и прочности покрытий, сочетание возможности отражения (пропускания) и формирования волнового фронта отражённого (прошедшего) излучения.

Проблема формирования оптически стойких покрытий включает в себя научно-технические аспекты, относящиеся к физике, химии, и является довольно обширной среди современных актуальных направлений технологии. Реализация этих требований напрямую зависит от достижений в конструировании оборудования и совершенствования технологических процессов получения тонких пленок. В настоящее время наиболее перспективными методами нанесения оптически стойких покрытий являются вакуумные ионно-лучевые. Это обусловлено их высокой чистотой технологических процессов и качеством продукции.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы магистерской диссертации.** Формирование оптически стойких покрытий для зеркал в лазерных резонаторах представляет значительный практический интерес. Это обусловлено широким применением лазерных систем для специального назначения, в медицине, обработке материалов и сварке, промышленности как тяжелой, так и легкой, а также в научных целях.

**Цель и задачи исследования.** Разработка технологии формирования оптически стойких покрытий на основе оксида кремния методом ионно-лучевого распыления.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Аналитические исследования методов получения оптически стойких покрытий и их свойств.
2. Разработка технологического комплекса для формирования оптически стойких покрытий, методов оценки их свойств.
3. Проведение измерения параметров ионного источника, определение оптимальных режимов работы.
4. Формирования оптически стойких покрытий и изучение их свойств.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является процесс получения покрытий методом ионно-лучевого распыления на основе оксида кремния, гафния и ниобия и изучение их лучевой стойкости. Предметом исследования являются экспериментальные зависимости режимов получения оптически стойких покрытий на основе оксида кремния и их способность сопротивляться необратимым изменениям оптических параметров при воздействии мощного оптического излучения.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй степени (магистратуры) специальности 1-41 80 01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

**Теоретическая и методологическая основа исследования.**

В результате выполнения аналитических исследований были определены основные методы получения оптически стойких покрытий. На основании преимуществ и недостатков установленных методов при формировании оптически стойких покрытий, был выбран метод реактивного ионно-лучевого распыления, позволяющий формировать пленки оксидов высокой плотности и повышенной лучевой стойкостью.

Разработан экспериментальный комплекс на основе мультиапертурного

ионного источника. Экспериментальный комплекс состоит из: вакуумной установки для создания и поддержания вакуума, мультиапертурного источника ионов, мишенного узла, системы компенсации заряда, системы подачи рабочего газа и блоков питания. С помощью зондовой системы определен профиль распределения плотности тока ионного пучка, определен энергетический спектр потока ионов на основе снятой тормозной характеристики. Исходя из выше приведенного установлены эффективные режимы работы мультиапертурного ионного источника.

**Информационная база** исследования заключается в определении оптимальных условий формирования ионного пучка и режимов нанесения оптически покрытий с повышенной лучевой стойкостью.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в разработке и использовании мультиапертурного ионного источника для формирования оптически стойких покрытий с высокой плотностью, отсутствием больших внутренних напряжений и воспроизводимостью стехиометрии методом ионно-лучевого реактивного распыления и установление лучевой прочности полученных покрытий.

**Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики.** Практическая часть работы выполнялась на ООО «ИЗОВАК-технологии» и результаты работы используются для внутренних проектов предприятия.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Формирование оптически стойких покрытий методом реактивного ионно-лучевого распыления при рабочем давлении  $2 \cdot 10^{-2}$  Па, мощности индукционного разряда в зоне плазмообразования источника ионов 600 Вт, и напряжении экстрагирующей сетки-электрода 1500 В, а ускоряющем сетки-электрода 400 В, с расходом Ar – 15 см<sup>3</sup>/мин и O<sub>2</sub> – 24 см<sup>3</sup>/мин, обеспечивающими формирование четырехслойных интерференционных покрытий - зеркал, с оптической прочностью для образцов с парами слоев Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + SiO<sub>2</sub> и HfO<sub>2</sub> + SiO<sub>2</sub> в 1,5 раза выше, а для образцов с парами слоев SiN + SiO<sub>2</sub> в 1,2 раза выше чем другими методами.

Теоретическая значимость диссертации заключается в установлении зависимостей и закономерностей изменения параметров оптически стойких покрытий от режимов работы ионного источника.

Практическая значимость состоит в том, что был разработан экспериментальный комплекс и определены параметры работы мультиапертурного ионного источника для формирования оптически

прочных покрытий на основе оксида кремния состава  $Nb_2O_5 + SiO_2$ ,  $Si_3N_4 + SiO_2$ ,  $HfO_2 + SiO_2$ .

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Сборка, запуск, определение эффективных режимов работы ионного источника, а также процесса нанесения оптических покрытий проводилось соискателем лично. Во время работы над диссертацией, соискателем были исследованы зависимости ионного тока и плотности ионного тока от разницы напряжений на ускоряющей и экстрагирующей сетках, влияние расхода газа, мощности ВЧ излучения на однородность ионного пучка, а также ионный ток, измерена тормозная характеристика ионного пучка и энергетический спектр ионного пучка. Анализ результатов эксперимента по формированию покрытий проводился совместно с научным руководителем, кандидатом технических наук Котовым Д. А.

**Апробация результатов диссертации.** Основные теоретические результаты и законченные этапы диссертационной работы, а также результаты прикладных исследований и разработок были доложены на 56-й научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов БГУИР, 2020.

Отдельные положения, в частности режимы формирования оптически стойких покрытий использовались в рамках проектов ООО «ИЗОВАК-технологии».

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и списка использованных источников, включающего 42 наименования. Общий объем диссертации составляет 86 страниц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** и в **общей характеристике работы** обоснована актуальность темы диссертации, показана её связь с научными программами и темами. Сформулирована цель работы и поставлены задачи исследований. Представлены основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о личном вкладе соискателя, её структуре и объеме.

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору научной литературы по теме диссертации. Рассмотрены разновидности оптических покрытий и их параметры, рассмотрена лучевая стойкость как важный параметр в современных лазерных системах. Рассмотрены методы формирования оптически стойких покрытий и обоснован выбор использования ионно-лучевого источника в качестве основного устройства для формирования оптически прочных покрытий. Использование данного метода позволяет получать пленки высокой плотности, при этом отсутствуют большие внутренние напряжения и достигается воспроизводимость стехиометрии. Описана теория зародышеобразования и формирования пленки, процесс зародышеобразования, этапы и четыре стадии формирования пленки а также рассмотрено образование дефектов в процессе роста пленок.

Во **второй главе** изложена методическая часть работы. Описаны оборудование и методики измерения параметров ионно-лучевого источника. Описана установка для проведения процесса ионно-лучевого распыления, а также ионный источник.

По отдельности рассмотрены составные части мультиапертурного ионного источника: газоразрядная камера, ионно-оптическая система; их принцип работы. Представлена используемая система компенсации заряда пучка, в роли которой выступает плазменно-мостовой источник электронов. Рассмотрена система контроля толщины слоев при напылении многослойных покрытий. Указана методика определения лучевой прочности поверхности.

В **третьей главе** представлены результаты определения характеристик мультиапертурного ионно-лучевого источника с помощью зонда. На начальном этапе были сняты зависимости плотности ионного тока от напряжения на ускоряющей сетке

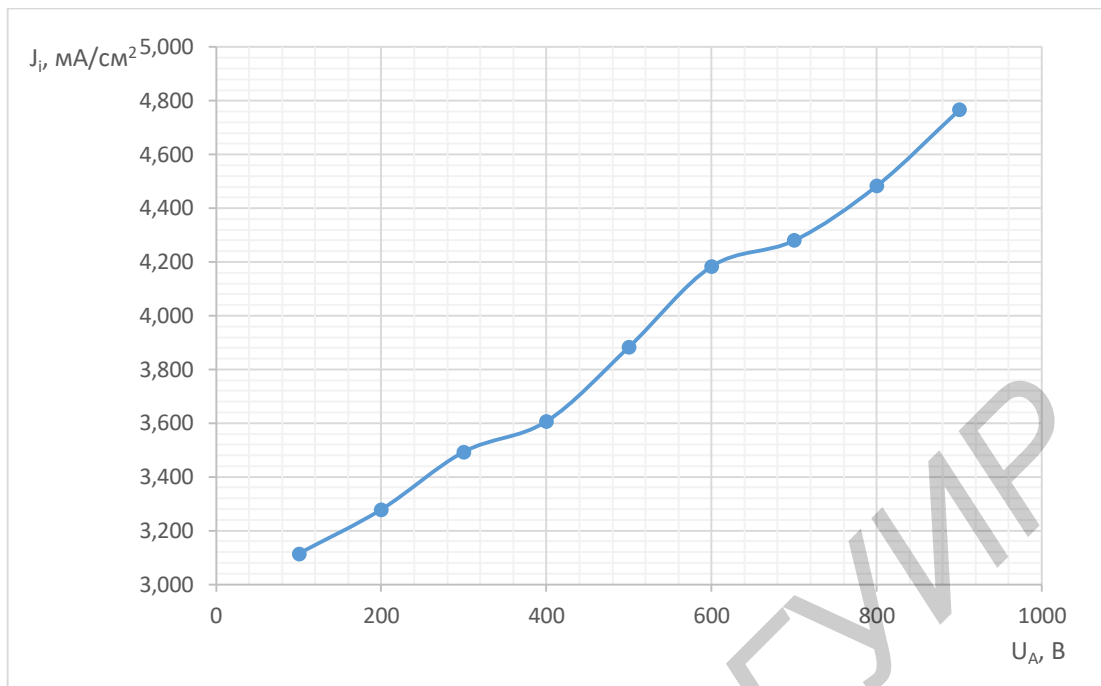


Рисунок 2 – зависимость плотности ионного тока  $J_i$  от напряжения  $U_A$  на ускоряющей сетке

С увеличением напряжения на ускоряющей сетке, увеличивается и плотность тока, это обуславливается увеличением числа экстрагированных ионов с границы плазмы с увеличением потенциала на ускоряющей сетке. При низких напряжениях, ионно-оптическая система работает в расфокусированном режиме, при этом экстрагируемые с границы плазмы ионы, интенсивно бомбардируют обратную сторону ускоряющей сетки, что приводит к её эрозии, а также попаданию распыленного материала сетки в рабочую камеру и на подложки. При высоких же напряжениях, ионно-оптическая система работает как фокусирующая линза, траектории ионов начинают пересекаться, что также снижает эффективность работы ионного источника. Поэтому существует оптимальное значение ускоряющего потенциала.

Основной задачей источника является обеспечение максимально однородного профиля ионного пучка одновременно с максимальным ионным током. Поэтому далее снимался профиль пучка и ионный ток в разных режимах работы источника.

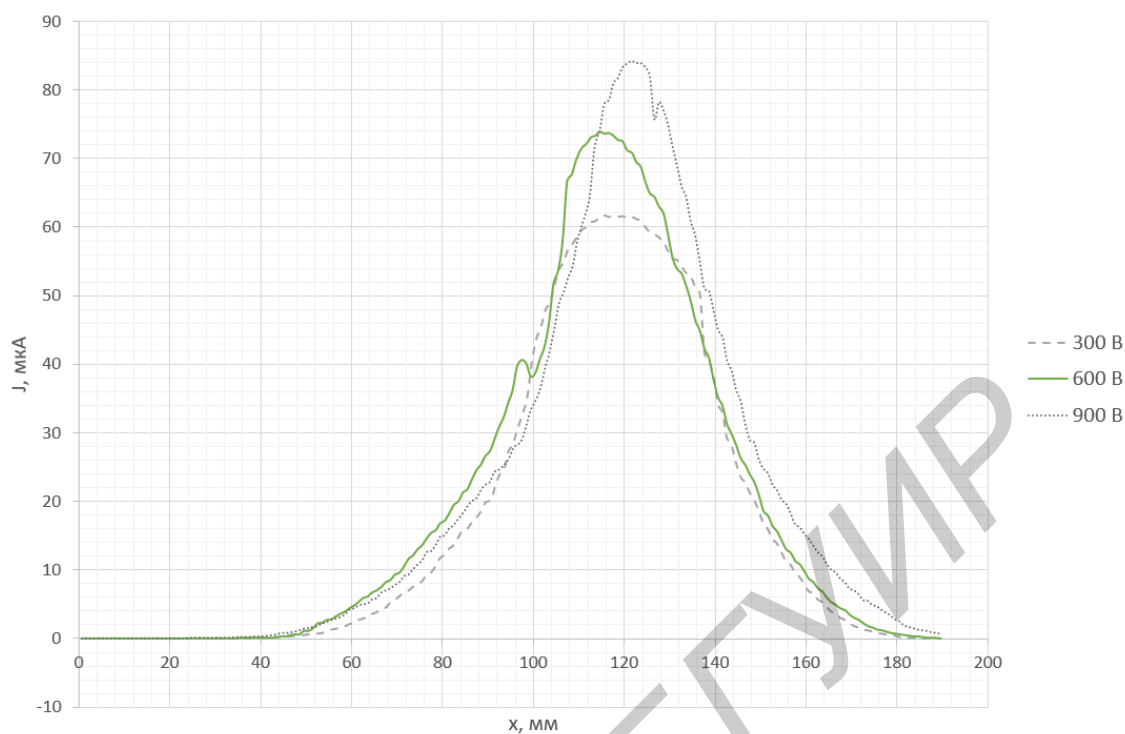


Рисунок 3 – профиль ионного пучка при разных напряжениях на ускоряющей сетке

В ходе работы была установлена оптимальная величина расхода газа  $17 \text{ см}^3/\text{мин}$ , оптимальная величина мощности ВЧ разряда, равная 500 – 600 Вт, а также оптимальная разница напряжений между ускоряющей и экстрагирующей сетками, величиной 1100 В.

Проведено измерения тормозной характеристики ионного пучка, в результате дифференцирования которой получен энергетический спектр ионов, который показывает высокую моноэнергетичность пучка, что является одним из основных достоинств мультиапертурного ионного источника.

**Четвертая глава** содержит результаты исследования оптической прочности полученных покрытий, сформированных методом реактивного ионно-лучевого распыления.

При изучение оптической прочности были использованы методы однократного и многократного воздействия мощного оптического излучения на образец. При этом метод однократного воздействия не показал достаточной точности измерения.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных аналитических исследований было установлено, что формирование оптически стойких покрытий методом реактивного ионно-лучевого распыления является перспективной технологией, по сравнению с другими вакуумными методами, с точки зрения получения оптически стойких пленок высокой плотности.

Для экспериментов была выбрана система с ВЧ сеточным ионным источником, на её основе разработан экспериментальный комплекс для формирования оптически прочных покрытий. Для определения оптимальных режимов работы ионного источника, с помощью зонда Фарадея, были проведены исследования зависимостей плотности ионного тока от напряжения на ускоряющей сетке, профили ионного пучка при изменении напряжения на ускоряющей сетке, при различных напряжениях экстракции, различных ВЧ мощностях и расходах газа.

Экспериментально установлено, что процесс формирования оптически стойких покрытий предпочтительно проводить при рабочем давлении  $2 \cdot 10^{-2}$  Па, диаметре сеточной системы 175 мм, полезной мощности индукционного разряда 600 Вт и напряжении экстракции 1500 В, а ускоряющем напряжении 400 В, с расходом рабочих газов для Ar – 15 см<sup>3</sup>/мин, для O<sub>2</sub> – 24 см<sup>3</sup>/мин. обеспечивают при проведении процесса в течении 1800 с, и формировании 4-ех слойных диэлектрических зеркал, оптическую прочность для образцов образцов с покрытием из материалов Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + SiO<sub>2</sub> и HfO<sub>2</sub> + SiO<sub>2</sub> не менее 1100 МВт/см<sup>2</sup>, а для образцов с покрытием SiN + SiO<sub>2</sub> до 700 МВт/см<sup>2</sup>, что является для образцов с парами слоев Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + SiO<sub>2</sub> и HfO<sub>2</sub> + SiO<sub>2</sub> в 1,5 раза выше, а для образцов с парами слоев SiN + SiO<sub>2</sub> в 1,2 раза выше чем другими методами.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Дуцник, А. И. Формирование оптически стойких покрытий на основе оксида кремния / А. И. Дуцник, Д. А. Котов // 56-я научная конференция студентов, магистрантов, аспирантов БГУИР, 2020. – Минск : БГУИР, 2020.
2. Терещук, О. И. Влияние конфигурации магнитного поля планарного магнетрона на форму и протяженность эрозионной канавки распыляемой мишени / О. И. Терещук, А. И. Дуцник, В. М. Комаровская // High Temperature Material Process: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes, 2020. – Begell House Inc. Т 24.
3. Терещук, О. И. Снижение неравномерность магнитного поля протяженное магнетронной распылительной системы с вращающимся цилиндрическим катодом/ О. И. Терещук, А. И. Дуцник, В. М. Комаровская // High Temperature Material Process: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes, 2020. – Begell House Inc. Т 24.
4. Рабатуев, Г.Г. Электрохимически наноструктурированные прозрачные металлические покрытия / Г.Г. Рабатуев, А.И. Дуцник // Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики : сборник трудов российской конференции 18-20 ноября 2019 г., Санкт-Петербург. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – С. 141-142.