

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

УДК 533.9.03

Шандарович  
Бажен Михайлович

Ионно-лучевой источник для ассистированного  
осаждения оптических покрытий

### **АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-41 80 01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

---

Научный руководитель  
Котов Дмитрий Анатольевич  
канд. техн. наук, доцент

---

Минск 2019

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день тонкопленочная технология нашла широкое применение в оптике и оптоэлектронике и используется в производстве потребительской оптики, промышленного и медицинского оборудования, военной техники, средств коммуникаций. Актуальной задачей тонкопленочной технологии является формирование качественных функциональных диэлектрических покрытий с заданными физическими свойствами.

Одним из рациональных путей решения вопроса является использование процессов ионно-лучевого ассистирования осаждению [1]. Комбинирование вакуумных осаждающих технологий с бомбардировкой ионами из ионного источника дает возможность независимого управления энергией и составом частиц, конденсирующихся на подложке, и как следствие – достижения различных свойств пленок (плотность, пористость, компонентный состав, внутренние напряжения, микроструктура) в соответствии с их применением.

Ионно-лучевое ассистирование осаждению на сегодняшний день считается развивающейся областью, однако уже существует целый рынок автономных устройств для процессов ионного ассистирования, способных формировать направленный поток ионов с различными токовыми и энергетическими параметрами. Ярким представителем такого класса устройств является торцевой холловский источник ионов. Преимущество источников данного типа заключается в простоте их конструкции и систем питания. Однако, зачастую, предлагаемые на рынке модели имеют высокую стоимость при неудовлетворительных параметрах ионного пучка, а так же недостаточном времени эксплуатации между операциями технического обслуживания, что является существенным недостатком для современного производства тонкопленочных покрытий. Усовершенствование указанных параметров является приоритетным направлением исследований в области устройств для ионно-ассистированного осаждения.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы магистерской диссертации.** Актуальность работы определяется задачей формирования качественных функциональных диэлектрических покрытий для оптики и оптоэлектроники с заданными физическими свойствами, такими как плотность, пористость, компонентный состав, внутренние напряжения, микроструктура.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы являются повышение эффективности генерации потока ионов низких энергий и увеличение времени

непрерывной работы торцевого холловского источника для ионно-ассистированного осаждения оптических покрытий.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

– Провести аналитическое исследование процессов и устройств ионно-ассистированного осаждения.

– Выполнить расчетные исследования величины и формы линий индукции магнитного поля источника, а также температурных полей в предельных режимах работы.

– Разработать модифицированную конструкцию торцевого холловского источника ионов с повышенной эффективностью генерации пучка ионов.

– Провести экспериментальное исследование разрядных характеристик разработанного устройства.

**Объектом** исследования является ионно-лучевой источник типа торцевого холловского ускорителя, а также генерируемый им поток ионов.

**Предметом** исследований являются условия генерации ионов низких энергий и зависимости тока и энергии ионов в формируемом пучке от величины и конфигурации линий индукции магнитного поля в ускорительном канале торцевого холловского источника.

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

**Теоретическая и методологическая основа исследования.** Для получения результатов аналитических исследований составлялась сравнительная диаграмма энергетических и токовых параметров разрядных устройств для процессов ионного ассистирования осаждению. Разработана методика повышения эффективности генерации ионного пучка в торцевых холловских источниках на основе расчета магнитной ловушки и тепловых полей в зоне плазмообразования. Расчеты проводились в программном комплексе *Comsol Multiphysics* методом конечных элементов. Предварительно геометрия магнитной системы создавалась в CAD-приложении *Autodesk Inventor Professional 2017* и далее импортировалась в программный комплекс *Comsol Multiphysics 5.3*. Экспериментальные исследования параметров ионного пучка проводились зондовыми методами с использованием вакуумной установки *Ortus-700*.

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

1. Методика повышения эффективности генерации пучка ионов с энергиями 30-100 эВ, за счет обеспечения условий инжекции в зону плазмообразова-

ния, над рабочей поверхностью анода, низкоэнергетичных электронов путем уменьшения радиальной составляющей индукции магнитного поля в периферийной области ускорительного канала на 12% и увеличения осевой составляющей на 13% у поверхности анода, что позволило повысить ток генерируемого пучка ионов на 18%.

2. Результаты проведенных исследований с применением расчетной модели тепловых полей позволили повысить эффективность системы охлаждения и тем самым снизить рабочую температуру постоянных магнитов в три раза, что исключило их деградацию от перегрева и обеспечило увеличение времени непрерывной работы источника в 5 раз.

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Анализ тенденций развития, конструкций и параметров современных устройств для ионно-ассистированного осаждения проводился соискателем лично. Во время работы над диссертацией соискателем были проведены расчеты магнитных и тепловых полей, разработана модифицированная конструкция торцевого холловского источника, проведены экспериментальные исследования разрядных характеристик разработанного источника и параметров генерируемого ионного пучка. Разработка способов повышения эффективности генерации ионов низких энергий проводилась совместно с научным руководителем, кандидатом технических наук, доцентом Котовым Д. А.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в том, что в ней предложены принципы построения высокоэффективной магнитной ловушки путем уменьшения радиальной составляющей индукции магнитного поля и увеличения аксиальной составляющей индукции магнитного поля в зоне плазмообразования.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, что на основе представленной методики был разработан экспериментальный ионно-лучевой источник типа торцевого холловского для проведения процессов ионно-ассистированного осаждения. Поставлены и отработаны методики проведения исследований параметров ионного пучка.

**Апробация и внедрение результатов исследования.** Результаты исследования были неоднократно представлены на республиканских и международных конференциях.

**Публикации.** Основные положения работы и результаты диссертации изложены в пяти опубликованных работах общим объемом 12,0 п.л.

**Структура и объем работы.** Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Общий объем диссер-

тации – 63 страницы. Работа содержит 8 таблиц, 45 иллюстраций. Библиографический список включает 42 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы формирования качественных функциональных покрытий для оптики и оптоэлектроники с заданными физическими свойствами, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, даны сведения об объекте исследования, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также, структура и объем диссертации.

В **первой главе** рассматривается анализ процессов и устройств ионного ассистирования осаждению в вакууме, включающие физико-химические процессы взаимодействия ионов с твердым телом, а так же принцип ионно-ассистированного осаждения.

Во **второй главе** приведен экспериментальный комплекс, методы и методики проведения исследований.

В **третьей главе** рассматриваются способы повышения эффективности генерации ионного пучка, определенные на основе расчетов магнитных и тепловых полей торцевого холловского источника ионов.

В **четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований источника ионов с повышенной эффективностью генерации пучка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магистерской диссертации проведено аналитическое исследование устройств ионно-ассистированного осаждения, изучены физические особенности их работы. В результате исследования определена необходимость модификации ТХИ «Стрелок-2» с целью повышения токовых параметров его ионного пучка.

На основе расчетных исследований величины и формы линий индукции магнитного поля, а также температурных полей в предельных режимах работы источника «Стрелок-2», была разработана модифицированная конструкция ТХИ, в которой было уменьшено значение радиальной составляющей индукции магнитного поля на 6-12 % и на 3-13 % увеличено значение осевой составляющей индукции магнитного поля в ускорительном канале. Таким образом, ре-

зультаты расчетов подтвердили возможность повышения тока ионного пучка в модифицированной конструкции.

Модифицированная система охлаждения позволила значительно снизить температуру нагрева конструктивных элементов источника в процессе его работы. Максимальная температура полюсного наконечника была уменьшена с 820 до 180 °С, максимальную температуру нагрева постоянных магнитов удалось снизить со 170 °С до 62 °С. Отсутствие перегрева полюсного наконечника и постоянных магнитов исключило их деградацию от перегрева и обеспечило увеличение времени непрерывной работы источника в 5 раз.

В ходе экспериментального исследования были получены разрядные характеристики, зависимости тока ионного пучка от напряжения разряда, профили распределения плотности ионного тока, а также энергетические спектры пучка ионов исходного и модифицированного ТХИ. Проведен сравнительный анализ полученных данных. Результаты исследования свидетельствуют об увеличении эффективности генерации потока ионов в модифицированном источнике. Максимальный ток ионного пучка увеличен на 18 %. Разработанная конструкция обеспечивает требуемые моноэнергетичность и угол расходимости ионного пучка, необходимые для применения в процессе ионно-ассистированного осаждения.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1] Modeling the magnetic field of the End-Hall ion source acceleration channel / M. Palmera, B. Shandarovich, D. Kotov // Plasma physics and plasma technology: Contributed papers of IX International conference PPPT-9 (Minsk, Belarus September 17 – 21, 2018) / B.I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus; editors: N.V. Tarasenko, A. A. Nevar, N. N. Tarasenko. – Minsk : “Kovcheg LTD”, 2018. – P. 144 – 147.

[2] Моделирование магнитной системы торцевого холловского источника ионов / Шандарович Б. М., Палмера М., Котов Д. А. // Материалы и структуры современной электроники : сборник научных трудов VII Международной научной конференции, Минск, 10–11 октября 2018 г. / редкол. : В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Изд. центр БГУ, 2018. – С. 240 – 242.

[3] Источник для ионно-ассистированного осаждения оптических покрытий / Шандарович Б. М., Занько А. И. // Физика конденсированного состояния : материалы XXVI междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 19 апр. 2018 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы, физ.-техн. фак.; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2018. – С. 198 – 199.

[4] Источник для процессов ионно-ассистированного осаждения в вакуу-

ме / Шандарович Б. М., Занько А. И. // Физика конденсированного состояния : материалы XXV междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов. (Гродно, 20 апр. 2017 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы, физ.-техн. фак.; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2017. – С. 142 – 144.

[5] Источник ассистирования осаждению в вакууме / Шандарович Б. М., Занько А. И. // Новые направления развития приборостроения : Материалы 10-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, Минск, 26–28 апреля 2017 г. : в 2 т. / Белорусский национальный технический университет ; редкол. О. К. Гусев (председатель) [и др.]. - Минск: БНТУ, 2017. – Т1, – С. 288.