

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

УДК 621.793.18

РОГОВСКИЙ
Евгений Петрович

Ионно-лучевой источник для наноразмерной модификации поверхности

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1 – 41 80 03 «Нанотехнологии и наноматериалы
(в электронике)»

Научный руководитель
Котов Дмитрий Анатольевич
кандидат технических наук

Минск 2015

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день вакуумные плазменные технологии широко применяются для наноразмерной модификации поверхности твердого тела, однако применение с данной целью ионно-лучевых источников с повышенной плотностью тока луча ионов остается недостаточно изученным и требует дополнительных исследований.

Воздействие направленным потоком ионов на обрабатываемый образец – ионно-лучевая обработка, получило широкое применение в производстве изделий оптики, микро- и оптоэлектроники. Наибольший эффект при обработке поверхности образца возможно получить, когда плотность тока луча ионов и энергия ионов достигают порядка 10 мА/см^2 и $1000\text{-}2000 \text{ эВ}$ соответственно. На сегодняшний день в вакуумной технологии производства изделий оптики, микро- и оптоэлектроники широко используются ионно-лучевые источники с анодным слоем, но плотность тока ионов, генерируемая данным типом технологических устройств редко превышает $0,1 - 1 \text{ мА/см}^2$ и получение луча ионов плотностью 10 мА/см^2 является актуальной задачей.

Аналитическое исследование физико-химических процессов и методов ионно-лучевой обработки, а также особенностей применения ионно-лучевых источников для модификации поверхности твердого тела определяет направление дальнейших исследований по применению разработанного устройства для модификации поверхности. При воздействии на поверхность твердого тела луча ионов с повышенной плотностью тока эффективность обработки возрастет, что позволит уменьшить время технологического процесса до промышленно приемлемого, а также изменит морфологию обрабатываемой поверхности твердого тела.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы магистерской диссертации. На сегодняшний день технологии плазменной обработки в вакууме широко применяются для наноразмерной модификации поверхности твердого тела, что отображается в многообразии методов их применения с данной целью. Наибольший эффект при обработке поверхности образца возможно получить, когда плотность тока луча ионов и энергия ионов достигают порядка 10 мА/см^2 и $1000\text{-}2000 \text{ эВ}$ соответственно. Ионно-лучевые источники с анодным слоем нашли широкое применение в вакуумной технологии производства изделий оптики, микро- и оптоэлектроники благодаря возможности изменять параметры воздействия на обрабатываемую поверхность в широких диапазонах, возможности их

использования в комбинации с другими технологическими устройствами, а также простоте и надежности конструкции. Однако плотность луча ионов, генерируемая данным типом технологических устройств редко превышает $0,1 - 1 \text{ mA/cm}^2$ и получение луча ионов плотностью 10 mA/cm^2 является актуальной задачей. Увеличение плотности тока ионного луча позволит уменьшить время технологического процесса до промышленно приемлемого, т.к. эффективность обработки возрастет, также большой интерес представляют исследования по модификации поверхности твердого тела, т.к. применение с этой целью ионно-лучевых источников с повышенной плотностью тока луча ионов остается недостаточно изученным и требует дополнительных исследований.

Цели и задачи исследования. Разработка ионно-лучевого источника с анодным слоем и лучом ионов повышенной плотности тока и технологии его применения для модификации поверхности твердого тела.

Для достижения поставленных целей необходимо было выполнить следующие задачи:

1. Изучение литературных источников по физике воздействия потока ионов на поверхность твердого тела, применению ионно-лучевых источников для модификации поверхности твердого тела.
2. Изучение физических принципов работы и конструктивных особенностей построения ионно-лучевых источников с анодным слоем.
3. Разработка компактного ионно-лучевого источника с анодным слоем и лучом ионов повышенной плотности тока.
4. Разработка экспериментального комплекса.
5. Экспериментальные исследования рабочих характеристик разработанного ионно-лучевого источника.
6. Экспериментальные исследования по модификации поверхности твердого тела под воздействием луча ионов повышенной плотности тока, генерируемого разработанным источником ионов.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является процесс ионно-лучевой модификации поверхности твердого тела источником ионов с лучом ионов повышенной плотности тока. Предметом исследования являются параметры технологического процесса наноразмерной модификации поверхности твердого тела ионным лучом, изменение характеристик обрабатываемых образцов.

Научная новизна и значимость полученных результатов. На сегодняшний день разработка ионно-лучевых источников, плотность тока луча ионов которых будет достигать порядка 10 mA/cm^2 , и изучение их применения для модификации поверхности твердого тела являются важными научно-практическими задачами. В ходе работы над магистерской диссертацией был

разработан ионно-лучевой источник с анодным слоем и предельной конфигурацией ускорительного канала. При изучении характеристик разработанного технологического устройства были показаны отличительные особенности зависимостей его параметров от напряжения разряда, а также величины плотности тока ионного луча от характерных зависимостей для ионных источников со стандартной конфигурацией ускорительного канала. Результаты экспериментальных исследований по обработке поверхности твердого тела при помощи разработанного устройства показали особенности применения с данной целью источников ионов с лучом ионов повышенной плотности тока.

Практическая значимость полученных результатов. Практическая значимость проводимых научных исследований связана с необходимостью расширения функциональных возможностей обработки поверхности твердого тела при одновременном снижении времени ионно-лучевой обработки до промышленно приемлемого уровня, что возможно посредством повышения эффективности плазмообразования в ускорительном канале ионно-лучевого источника и, как следствие, плотности обрабатываемого потока ионов. Отличительной особенностью исследований является их практическая направленность, связанная с одним из приоритетных направлений белорусской промышленности – импортозамещением в области ионно-лучевых технологий.

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

1. Разработка конфигурации зоны плазмообразования и ускорения ионно-лучевого источника с анодным слоем, позволившую достичь плотность ионного тока более 10 мА/см^2 .
2. Установление локального минимума на вольт-амперных характеристиках разряда в диапазоне давлений от $2,85 \cdot 10^{-2}$ до $4,68 \cdot 10^{-2}$ Па в следствие расширения зоны плазмообразования и утечки электронов из анодного слоя на стенки ускорительного канала.
3. Отработка технологии ионно-лучевого травления пористого кремния с применением разработанного источника ионов с анодным слоем.

Личный вклад соискателя. Основные результаты, изложенные в работе, получены автором самостоятельно. Автор проводил математическое моделирование при разработке конструкции ионно-лучевого источника, экспериментальные исследования характеристик разработанного технологического устройства, а также исследования по его применению для модификации поверхности твердого тела. Научному руководителю в совместных работах принадлежат предметные постановки задач, выбор направлений исследования, руководства при проведении экспериментальных исследований и анализе полученных результатов.

Апробация результатов диссертации. Основные теоретические результаты и законченные этапы диссертационной работы, а также результаты прикладных исследований и разработок отражены в следующих научных трудах:

1. Роговский, Е. П. Ионно-лучевой источник для обработки поверхности твердого тела. / Роговский Е. П. // Физика конденсированного состояния: материалы XXIII междунар. научн. – практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 16 апр. 2015 г.) ГрГУ им. Я. Купалы, физ.-техн. фак. – Гродно, ГрГУ. 2015. – С. 177 – 179.

Публикации. Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 5 опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций (см. список опубликованных работ).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения и списка использованных источников, включающего 58 наименований. Общий объем диссертации составляет 76 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы генерации луча ионов повышенной плотности ионно-лучевыми источниками и его применение для модификации поверхности твердого тела, определены основные направления исследования, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цели и задачи, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, 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** приведен анализ технологического процесса ионно-лучевой обработки поверхности твердого тела. Рассматриваются физические основы воздействия потока ионов на поверхность твердого тела, рассмотрены основные методы и средства ионно-лучевой обработки, определен перспективный для исследований диапазон плотностей тока и энергий потока ионов, воздействующего на обрабатываемый образец. Также приведены особенности процесса ионно-лучевой обработки, требующие изучения, и факторы, влияющие на успешность осуществления технологического процесса обработки поверхности ионно-пучковой плазмой.

Во **второй главе** рассмотрены основы физических процессов функционирования и конструктивные особенности построения ионно-лучевых

источников с анодным слоем. Рассмотрение физики работы данного вида технологических устройств является основой для разработки собственной конструкции и дальнейшего анализа результатов экспериментальных исследований его характеристик. Исследование конструктивных особенностей ионно-лучевых источников с анодным слоем позволило выделить основные тенденции их развития, что в итоге позволило определить специфику разрабатываемой конструкции компактного ионно-лучевого источника с анодным слоем.

В **третьей главе** приведены данные по разработке компактного ионно-лучевого источника с анодным слоем. Приведены результаты математического моделирования эффективностей системы охлаждения и магнитная ловушка в ускорительном канале, которые позволили определить оптимальные параметры конструкции разрабатываемого устройства. Далее дается детальное описание конструкции разработанного компактного ионно-лучевого источника с анодным слоем и лучом ионов повышенной плотности с рассмотрением ее особенности. В заключение приведены результаты математического моделирования системы охлаждения модернизированной конструкции разработанного устройства, которые могут являться основой для его дальнейшего совершенствования.

В **четвертой главе** рассматривается экспериментальный комплекс, который использовался для дальнейших исследований. Приведены параметры вакуумной установки, в которую встраивался макет разработанного технологического устройства, описаны монтаж ионного источника в камере и зондовые устройства, которые использовались для изучения токовых параметров ионного луча.

В **пятой главе** приводятся результаты экспериментальных исследований характеристик разработанного ионно-лучевого источника с анодным слоем. Описаны зависимости тока разряда и тока ионного луча, а также коэффициента токовой эффективности от напряжения разряда, дается качественный анализ, основанный на описании физики работы устройства, характера данных зависимостей, их особенностей и отличий от типичных зависимостей данного класса ионно-лучевых источников. Исследование характеристик разработанного ионного источника необходимо для дальнейшего выбора его оптимальных рабочих параметров при использовании в технологическом процессе модификации поверхности твердого тела. Описаны результаты исследований по применению разработанного ионно-лучевого источника с лучом ионов повышенной плотности для модификации поверхности твердого тела, в частности приведены результаты по ионно-лучевой полировке оптических компонентов и обработки потоком ионов поверхности пористого аморфного кремния с осажденным на его поверхности никелем, даны рекомендации и

указания по применению разработанного устройства для обработки поверхности твердого тела.

В **выводах** кратко изложены основные результаты магистерской диссертации, приведены основные характеристики разработанного компактного ионно-лучевого источника с анодным слоем и результаты исследований по его применению для наноразмерной модификации поверхности твердого тела.

ВЫВОДЫ

В процессе работы над магистерской диссертацией был проведен комплексный анализ физических процессов воздействия потока ионов на поверхность твердого тела и особенностей применения метода ионно-лучевой обработки для модификации поверхности.

На основе понимания принципов построения и физических основ работы ионно-лучевых источников с анодным слоем была разработана конструкция компактного ионно-лучевого источника, генерирующего луч ионов с повышенной плотностью тока ионов. Физическое моделирование магнитных и температурных полей в программном комплексе Comsol Multiphysics позволило определить оптимальные параметры магнитной системы и геометрии ускорительного канала, а также параметры системы охлаждения.

В результате экспериментальных исследований разработанного источника ионов были получены вольт-амперные характеристики разряда, зависимости тока ионов и коэффициента токовой эффективности от напряжения разряда при различных значениях расхода рабочего газа. Были определены отличительные особенности данных зависимостей для устройств с предельными конфигурацией ускорительного канала и величиной индукции магнитного поля в нем, а также приведен качественный теоретический анализ данных особенностей. Максимальное значение коэффициента токовой эффективности составляет 0,75. Максимальная плотность тока ионного луча достигает 10 mA/cm^2 на расстоянии 15 см от выходного отверстия ускорительного канала.

Экспериментальные исследования по обработке поверхности диэлектрических образцов ионным лучом показали уменьшение шероховатости поверхности после обработки, что говорит о возможности применения разработанного ионно-лучевого источника в целях ионно-лучевой полировки оптических компонентов.

В ходе экспериментальные исследования по обработки поверхности образцов пористого кремния были достигнуты высокие скорости травления пористого кремния под воздействием луча ионов порядка 0,1 мкм/мин и 1 мкм/мин для периферийной и центральной областей ионного луча

соответственно, что значительно увеличивает эффективность обработки и позволяет уменьшить время технологического процесса. Путем воздействия ионного луча на поверхность пористого кремния можно достигнуть полного вскрытия пор матрицы и произвести очистку части внутренней поверхности пор, при этом толщиной стравливаемой поверхности и степенью очистки внутренней поверхности пор возможно управлять путем изменения режима эксплуатации разработанного ионно-лучевого источника.

Список опубликованных работ

1. Роговский, Е. П. Ионно-лучевой источник для обработки поверхности твердого тела. / Роговский Е. П. // Материалы XXIII Международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов “Физика конденсированного состояния”. – Гродно, ГрГУ. 2015. – С. 177 – 179.

2. Роговский, Е. П. Разрядные характеристики ионно-лучевого источника с анодным слоем. / Роговский Е. П., Котов Д. А. // Материалы Международной научно-технической конференции, приуроченной к 50-летию МРТИ–БГУИР. - Минск, 2014. – С. 95 – 96.

3. Роговский, Е. П. Характеристики высокоэффективного ионно-лучевого источника с анодным слоем. / Роговский Е. П. // Материалы XXII Международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов “Физика конденсированного состояния”. – Гродно, ГрГУ. 2014. – С. 196 – 197.

4. Роговский, Е. П. Исследование механизмов переноса и рассеяния тепла в конструкции ионно-лучевого источника. / Роговский Е. П., Савич В. А. // Материалы XXI Международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов “Физика конденсированного состояния”. – Гродно, ГрГУ. 2013. – С. 210 – 212.

5. Роговский, Е. П. Изучение характеристик компактного ионно-лучевого источника с анодным слоем. / Роговский Е. П., Котов Д. А., Зеневич Г. В. // Материалы 10 Международной конференции “Взаимодействие излучения с твердым телом”. – Минск, БГУ. 2013. – С. 366 – 368.