

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

УДК 537.523

Аксючиц Александр Владимирович

Генерация холодной плазмы при атмосферном давлении для обработки  
поверхности металлов

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

Магистрант Аксючиц А.В.

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

Минск 2020

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все больший интерес привлекают к себе плазменные методы модификации поверхности, в том числе и плазменная активация. Плазменные технологии основаны на простом физическом принципе - за счет внесения дополнительной энергии в систему можно изменять свойства этой системы, как за счет изменения структуры, так и за счет химического синтеза с созданием новых материалов. Если нагреть газ до большой температуры или подвергнуть электронной бомбардировке, он ионизируется и переходит в насыщенное энергией четвертое агрегатное состояние – плазму.

В производстве этот принцип используется для целенаправленной модификации свойств материала. Предварительная обработка в плазме способствует существенному изменению свойств поверхности различных материалов, что позволяет точно регулировать адгезионные способности и смачиваемость поверхности. Многие химические технологии предварительной обработки сегодня можно заменить плазменной обработкой.

В зависимости от назначения обработки, ее качество может быть оценено по различным физико-химическим показателям. Одним из важнейших показателей состояния поверхности твердого тела для полупроводниковых технологий, а также при производстве оптических изделий является адгезия наносимой на поверхность пленки.

При действии плазмы на поверхность твердого тела происходят процессы ее очистки и активации. Очистка атмосферной плазмой – это процесс удаления с обрабатываемой поверхности адсорбированных газов, влаги, органических и биологических загрязнений, а также пылевидных частиц за счет воздействия плазменных потоков из таких газов как аргон, азот, водород, пары летучих химических соединений и/или воздуха.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы магистерской диссертации.** Состоит в том, что для развития прикладных нанотехнологий необходимо гибкое и оперативное управление свойствами границы раздела фаз, в частности поверхности твердого тела, что реализуется путем ее очистки, активации и модификации. Возможности традиционной обработки поверхности жидкостными методами ограничены из-за физического эффекта поверхностного натяжения и невозможности полностью избавиться от продуктов реакций. Плазменная обработка таких ограничений не имеет и способна как проникать в наноразмерные отверстия и полости, так и способствовать десорбции атомов и молекул газа с поверхности обрабатываемых материалов.

### **Цель и задачи исследования.**

Разработка экспериментальной разрядной системы для генерации плазмы атмосферного разряда и разработка методики очистки и модификации поверхности твердых тел. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- провести аналитические исследования действия плазмы атмосферного разряда на поверхности твердых тел;
- разработать экспериментальный комплекс на основе коаксиальной разрядной системы для получения плазмы диэлектрического барьерного разряда с целью обработки поверхности металлов;
- отработать методики обработки поверхностей металлов в плазме диэлектрического барьерного разряда;
- определить эффективные режимы обработки поверхности металлов в плазме при атмосферном давлении и установить зависимости изменения ее свойств.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является разработанная система генерации плазмы атмосферного разряда и поверхность образцов обработанная в плазме. Предметом исследования являются зависимости и закономерности процесса формирования эффективного плазменного факела, а также изменения свойств обработанной поверхности в зависимости от условий процесса.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (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 установлены основные процессы, происходящие на поверхности материалов при взаимодействии с атмосферной плазмой:

Очистка происходит за счет разрушения энергетическими частицами плазмы органических загрязнений поверхности и их удаления потоком газа, а также за счет десорбции газов с поверхности.

Активация поверхности заключается в том, что поверхностным атомам твердого тела для перевода их в активное состояние сообщается некоторая энергия, необходимая для обрыва связей между атомами тела и атомами внешней среды, насыщающими их свободные связи.

Разработан экспериментальный комплекс на основе коаксиальной разрядной системы для обработки поверхностей. Экспериментальный комплекс состоит из: разрядной системы, системы подачи рабочего газа и системы питания. Определены оптимальные параметры разрядной системы и системы питания для формирования плазменного факела. Разработана методика обработки поверхности металлов в плазме диэлектрического барьерного разряда при атмосферном давлении. Отработана методика обработки металлов для повышения гидрофильных свойств поверхности и оценки характеристик методом лежащей капли.

**Информационная база** исследования заключается в определении оптимальных параметров разрядной системы и системы питания для обработки.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в разработке методики управления свойствами поверхности металлических образцов, без ее физического повреждения, посредством обработки в низкотемпературной плазме при атмосферном давлении и установление зависимостей изменений свойств поверхности от режимов обработки.

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

1. Обработка поверхностей металлических образцов (нержавеющая сталь, латунь, медь) в плазме диэлектрического барьерного разряда при атмосферном давлении (длина и диаметр плазменного факела соответственно 15 мм и 8 мм, расход рабочего газа 150 - 300 л/ч, температура обработки поверхности не более 500 °C в среде инертного газа, мощность барьерного разряда 30 Вт) обеспечивает при обработке в течение 30-50 с снижение краевых углов смачивания 4-5 раз в сравнении с исходным состоянием поверхностей.

Теоретическая значимость диссертации заключается в установлении зависимостей и закономерностей изменения свойств поверхности металлов от режимов обработки в плазме диэлектрического барьерного разряда.

Практическая значимость состоит в том, что был разработан экспериментальный комплекс и разработана методика обработки поверхностей нержавеющей стали и стекла в плазме диэлектрического барьерного разряда поверхностей нержавеющей стали, меди и латуни.

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Разработка, сборка и запуск разрядной системы и системы питания, а так же обработка поверхностей проводилась соискателем лично. Во время работы над диссертацией соискателем были выявлены зависимости и закономерности формирования диэлектрического барьерного разряда. Анализ результатов эксперимента по обработке проводилась 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 не однократно представлены на республиканских и международных конференциях.

Отдельные положения, в частности методики обработки поверхностей оптических материалов использовались в рамках проектов НИОКР № 17-9006 «Система генерации плазмы атмосферного разряда для наноразмерной очистки и модификации поверхности», а так же СГ № 1.1.4.2/16-1180Б «Разработать технологию нанесения защитных и просветляющих алмазоподобных углеродных покрытий ИК диапазона на поверхность оптических изделий из германия»

**Публикации.** Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 10 опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения и списка использованных источников, включающего 29 наименований. Общий объем диссертации составляет 68 страниц.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** рассмотрены преимущества применения плазмы атмосферного разряда, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **первой главе** приводятся аналитические исследования процессов генерации плазмы атмосферного разряда. Приведены основные типы разрядных систем, физические и химические принципы очистки и модификации поверхностей. Рассмотрены методики оценки свойств поверхностей после обработки.

Во **второй главе** рассмотрены этапы разработки экспериментального комплекса.

В качестве источника атмосферной плазмы рассматривается разрядное устройство коаксиального типа. Диэлектрический барьерный разряд формируется между двумя электродами, разделенными диэлектрической прослойкой. Электрод под высоким потенциалом располагался в кварцевом изоляторе, снаружи которого закреплен второй электрод. Генерируемый разряд может существовать в виде диффузного или стримерного. Обработку проводят путем перемещения образца через зону плазменного факела, формируемого за счет прокачки рабочего газа в зоне плазмообразования. Питание осуществлялось переменным напряжением с частотой 23,2 кГц. Через зону плазмообразования прокачивался инертный газ - аргон.

В **третьей главе** приведены результаты исследования зависимости характеристик плазменного факела от параметров разрядной системы и системы питания. А также приведены исследования зависимости краевого угла смачивания от времени обработки, расстояния между образцом и разрядной системой, и от расхода рабочего газа.

В **выводах** кратко изложены основные результаты магистерской диссертации.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате проведенных аналитических исследований было установлено, что обработка поверхности материалов с целью изменения ее свойств в плазме при атмосферном давлении является наиболее перспективной по сравнению с традиционными химическими жидкостными методами и вакуумно-плазменными с точки зрения отсутствия, как продуктов химических реакций, так и низкой энерго- и материалоемкости процессов и оборудования.

Для экспериментов была выбрана разрядная система коаксиального типа с диффузным диэлектрическим барьерным разрядом для создания плазмы при атмосферном давлении. На её основе разработан экспериментальный

комплекс для исследования обработки металлов. Для изучения возможностей разрядной системы было проведено исследование зависимости длины плазменной струи от расхода рабочего газа при различных напряжениях на первичной обмотке высоковольтного преобразователя. Экспериментально установлено, что геометрические параметры плазменного факела определяются особенностями газодинамики, а увеличение напряжения увеличивает длину сформированного плазменного факела.

Экспериментально установлено, что для обработанных металлических образцов предпочтительно проводить обработку на расстоянии 15 мм, расходе газа от 150 до 250 л/ч, мощности порядка 30 Вт, временном промежутке от 30 до 50 с. Поверхность металлов является гидрофобной, но после обработки в плазме диэлектрического разряда, краевого угол смачивания поверхности уменьшился с  $78^\circ$  до  $19^\circ$  для меди, с  $75^\circ$  до  $17^\circ$  для нержавеющей стали и с  $72^\circ$  до  $15^\circ$  для латуни. Это можно объяснить тем, что в процессе обработки, при эффективных режимах происходит десорбция атомов и молекул воздуха и при таком расстоянии образца от разрядной системы не нарушается общая целостность морфологии поверхности.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

- [1] Aksiuchyts, A. V. Managing the surface properties of materials of display technology by means of treatment in atmospheric discharge plasma / A. V. Aksiuchyts, D. A. Kotov, A. N. Osipov, S. V. Pancev, Y. V. Zaporozhenko // EuroDisplay/ Society for information Display, 2019.
- [2] Aksiuchyts, A. V. Cold Atmospheric Plasma Treatment of Medical Devices / A. V. Aksiuchyts, D. A. Kotov, D. Krivenchuk, A. N. Osipov, S. V. Pancev, G. Ponomarenko, V. Kulchitsky // Biomedical Journal of Scientific & Technical Research. – V. 22. – № 3. – 2019. – P. 16745–16749.
- [3] Аксючиц, А. В. Изменение адгезионных свойств поверхности кремния после обработки в плазме атмосферного разряда / Ю. В. Запорожченко, Е. В. Яцевич // Физика конденсированного состояния : материалы XXVII международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов. - Гродно : ГрГУ, 2019. - 145-146 с.
- [4] Аксючиц, А. В. Управление поверхностными свойствами полимеров в плазме атмосферного разряда / А. В. Аксючиц, Ю. В. Запорожченко, Е. В. Яцевич // Физика конденсированного состояния : материалы XXVII международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов. Гродно : ГрГУ, 2019. – 180–183 с.
- [5] Аксючиц, А. В. Модификация свойств поверхности стекла обработкой в плазме атмосферного разряда / А. В. Аксючиц, Н. В. Жидкина, М. С. Вербицкая, Е. В. Яцевич // Физика конденсированного состояния : материалы XXVII международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов. – Гродно : ГрГУ, 2020. – 49–51 с.
- [6] Аксючиц, А. В. Модификация свойств поверхности полиметилметакрилата после обработки в холодной плазме атмосферного разряда / А. В. Аксючиц, Н. В. Жидкина, М. С. Вербицкая, Е. В. Яцевич // Физика конденсированного состояния : материалы XXVII международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов. Гродно : ГрГУ, 2020. – 30–32 с.
- [7] Аксючиц, А. В. Изменение адгезионных свойств поверхности кремния после обработки в плазме атмосферного разряда / А. В. Аксючиц, Ю. В. Запорожченко // 55-я научная конференция студентов, магистрантов, аспирантов БГУИР. – Минск, 2019.

- [8] Аксючиц, А. В. Изучение параметров факела холодной плазмы, генерируемого при атмосферном давлении / А. В. Аксючиц, Ю. В. Запорожченко, Д. А. Котов // Материалы XVI Международной научной конференции «Молодежь в науке – 2.0'19». – Минск, 2019. – 462–464 с.
- [9] Аксючиц, А. В. Исследование технологического процесса обработки поверхности стекла в плазме диэлектрического барьерного разряда / А. В. Аксючиц, Н. В. Жидкина, М. С. Вербицкая, Е. В. Яцевич // 56-я Научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2020.
- [10] Аксючиц, А. В. Методика проведения спектроскопических исследований плазмы / А. В. Аксючиц, К. Т. Логунов // 56-я Научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2020.