

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

УДК 66.088

Бельский  
Дмитрий Владимирович

Исследование оптических характеристик СВЧ разряда с  
динамическим управлением распределением СВЧ энергии

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-38 80 03 «Приборы, системы и изделия медицинского  
назначения»

---

Научный руководитель  
Мадвейко Сергей Игоревич  
заведующий кафедрой ЭТТ,  
доцент, кандидат технических наук

---

Минск 2019

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день существуют проблемы, связанные с очисткой и стерилизацией инструментов, используемых в медицине. Недостатком стерилизации жидкими химическими средствами является возможное наличие на очищенной инструментарию следов очистки-токсичных бактерицидных средств. При химической стерилизации может наступить загрязнение микроорганизмами простерилизованных инструментов. Стерилизация газовым методом более надежна, но технически она весьма сложна. Для нее необходимы особые помещения, аппаратура, согласованные с органами санитарного надзора. Применение СВЧ плазмы при очистке инструментов позволит минимизировать влияние вредных химических веществ, как на пациентов, так и непосредственно на рабочий персонал медицинского учреждения. Также СВЧ плазмотроны не требуют наличия отдельных помещений для их использования и могут обладать относительно небольшими габаритами.

В последние годы вопросам использования электромагнитной энергии сверхвысокочастотного диапазона для повышения энергосбережения в различных технологических процессах уделяется значительное внимание. СВЧ-энергия востребована в традиционных процессах сушки и спекания и для получения чистой плазмы. СВЧ-плазма имеет высокую чистоту, которую нельзя получить в обычных плазматронах, также возможно получить плотную высокотемпературную плазму в небольших объемах. Это определяет перспективу исследования плазмы СВЧ-разряда и новых областей ее применения.

Большинство методов диагностики плазмы - бесконтактные, потому что диагностика посредством помещения датчика в плазму искажает её параметры. Бесконтактными называются методы, в которых носителями информации о плазме являются окружающие её поля и излучения. К числу контактных относятся различные зондовые методы (электрические, магнитные, СВЧ-зонды и пр.).

Поэтому на данный момент перспективным направлением исследования плазмы является бесконтактная оптическая диагностика (плазменная спектроскопия). Простейшая задача спектроскопии плазмы — изучение состава и наличия примесей (качественный спектральный анализ). С этой целью исследуется спектр испускания плазмы в возможно более широком интервале длин волн.

В данной диссертации поставлена задача проведения исследований оптических характеристик СВЧ разряда с динамическим управлением распределением СВЧ энергии.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА**

### **Цель работы:**

Исследование оптических характеристик СВЧ разряда с динамическим управлением распределением СВЧ энергии.

### **Актуальность темы магистерской диссертации:**

На сегодняшний день СВЧ плазменная обработка материалов применяется как для технологических процессов изготовления интегральных схем, так и для очистки поверхностей от различных загрязнений. Оборудование с использованием такой технологии может применяться в таких сферах, как микро- и наноэлектроника и медицина, поскольку, в каждой из этих областей присутствуют проблемы очистки поверхностей различных материалов. Применение СВЧ плазмы при очистке и стерилизации инструментов, используемых в медицине, позволит минимизировать проблемы, возникающие при очистке наиболее распространенными способами. Одним из перспективных направлений исследования параметров плазмы является плазменная спектрометрия. Спектрометр предназначен для: контроля длин волн лазерных источников, анализа спектров различных источников, фотометрических измерений, контроля излучения плазмы в вакуумных камерах, применения в различных системах для осуществления обратной связи. В данной диссертации спектрометрия применяется при исследовании интенсивности свечения СВЧ разряда, а также при анализе скорости удаления фоторезистивных покрытий.

### **Задачи исследования:**

1. Провести обзор существующих конструктивных решений СВЧ плазматронов.
2. Изучить методики бесконтактной оптической диагностики плазмы.
3. Разработать исследовательский стенд.
4. Провести экспериментальные исследования оптических характеристик плазмы при динамическом управлении распределением СВЧ энергии.

### **Объект исследования:**

Плазма СВЧ разряда, формируемая в условиях динамического распределения СВЧ энергии в резонаторе призматической формы.

### **Предмет исследования:**

Оптико-спектроскопические характеристики СВЧ разряда.

### **Новизна работы:**

В опубликованных к настоящему времени научно-технических материалах отсутствует глубоко разработанная и экспериментально подтвержденная универсальная теория распределения плазмы в резонаторе призматической формы. В целях уменьшения неоднородности распределения СВЧ энергии в объеме резонатора может быть использован вращающийся диссектор, который крепится внутри камеры резонатора. Такое техническое решение позволит перераспределить электромагнитную энергию в объеме камеры. При вращении диссектора условия возбуждения для различных видов волн меняются в зависимости от расположения лопастей, поэтому структура поля и как следствие оптические характеристики, зависящие от энерговклада в плазму, в камере могут постоянно видоизменяться. Анализ оптического излучения СВЧ разряда позволит получить данные о распределении энергетических параметров СВЧ разряда в объеме разрядной камеры.

### **Положения, выносимые на защиту:**

Установлено, что вращающийся диссектор приводит к изменению интенсивности свечения СВЧ разряда.

Установлено, что существует линейная зависимость изменения площадей импульсов СВЧ сигналов с «активного зонда» и оптических сигналов с ФЭУ.

Установлено, что уменьшение расстояния между пластинами в местах максимумов СВЧ мощности может приводить к уменьшению скорости удаления фоторезиста до двух раз, в локальных местах минимумов – до трех раз.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях: XXVI международная научно-практическая конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния»: Тезисы докладов – Гродно, 2018; 54-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР: Тезисы докладов – Минск, 2018; 11-ая международная научно-техническая конференция «Приборостроение – 2018»: Тезисы докладов – Минск, 2018. Полученные результаты могут быть использованы: при разработке конструкций систем загрузки полупроводниковых пластин в разрядную камеру СВЧ плазматрона; при разработке новых разрядных камер СВЧ плазменных установок резонаторного типа; при оптимизации технологических процессов групповой СВЧ плазмохимической обработки; для модернизации существующих плазменных установок, используемых на ОАО «ИНТЕГРАЛ», НП РУП «КБТЭМ-ОМО» и др.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех разделов, заключения, списка использованных источников и приложений. Объем магистерской диссертации составляет 68 страниц, включая 30 иллюстраций, 1 таблицу, библиографический список из 26 наименований, 2 приложения.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен поиск конструктивных решений СВЧ плазматронов, обзор устройств для управления распределением СВЧ энергии, а также способы технологического применения плазмы СВЧ энергии.

Определено, что для объемных резонаторных систем диссектор является оптимальным средством перенаправления стоячих волн, так как он переотражает от лопастей электромагнитную энергию в объеме.

Вторая глава посвящена разработке исследовательского стенда, а также поиску и изучению методик бесконтактной оптической диагностики плазмы, для получения теоретической информации, которая будет использована при проведении последующих экспериментальных исследований.

Экспериментальный стенд разработан на базе малогабаритной СВЧ плазменной установки, которая представляет собой прямоугольную настольную конструкцию на базе микроволновой бытовой печи «Электроника». Потребляемая электрическая мощность установки до 1000 Вт, напряжение питающей сети 220 В, рабочая частота 2,45 ГГц. Установка предназначена для очистки подложек, удаления фоторезистивных покрытий, лаков и мастик, плазмохимического осаждения пленок, модификации поверхности материалов, деталей и узлов сложной формы. Принцип действия установки основан на передаче энергии СВЧ излучения по волноводу от магнетрона в реактор, где в вакуумированном объеме (кварцевая труба) зажигается плазменный низкотемпературный газовый разряд.

Третья глава содержит результаты проведенных экспериментальных исследований влияния вращающегося диссектора на интенсивность свечения СВЧ разряда в плазматроне резонаторного типа, а также исследования влияния расположения кремниевых пластин в объёме плазмы СВЧ разряда на величину СВЧ энергии между ними.

Плазма зажигалась внутри кварцевого туннельного реактора объемом около 9000 см<sup>3</sup>. Регистрировалось оптическое свечение плазмы с использованием фотоэлектрического умножителя (ФЭУ 112) и импульсы СВЧ сигнала с использованием «активного зонда». В качестве «активного зонда», измеряющего локальное значение электрической составляющей электромагнитного поля, использовался отрезок гибкого коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом, внешний проводник которого выполнен из медной трубки, а внутренний – из одножильного медного провода. Пространство между проводниками заполнено гибким диэлектриком – фторопластом. Сигналы подавались на АЦП в составе ПЭВМ.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

Интенсивность свечения СВЧ разряда зависит от перенаправления СВЧ-энергии в объеме резонаторной системы. Вращающийся диссектор приводит к изменению интенсивности свечения СВЧ разряда, при этом существенно изменяется величина СВЧ энергии в отдельной локальной области разрядной камеры СВЧ плазматрона. И как следствие в процессе вращения диссектора могут меняться электрофизические параметры плазмы.

Существует линейная зависимость оптических характеристик и энергетических при исследовании плазмы СВЧ разряда.

Уменьшение расстояния между кремниевыми пластинами с 105 мм до 20 мм приводит к уменьшению величины СВЧ мощности между пластинами примерно на 50%.

Четвертая глава содержит результаты проведенных экспериментальных исследований влияния расстояния между кремниевыми пластинами на скорость СВЧ плазмохимического удаления фоторезистивных пленок в области локального максимума и минимума СВЧ энергии при динамическом управлением распределением СВЧ энергии в камере СВЧ плазматрона.

Внутри кварцевого туннельного реактора объемом около 9000 см<sup>3</sup> на подложкодержателе из кварцевого стекла размещались пластины из монокристаллического кремния диаметром 100 мм с нанесенным на его поверхность фоторезистом марки *S1813G2SP15* толщиной 1,5 мкм. Пластины располагались вдоль оси напуска газа. В данном эксперименте расстояние между пластинами варьировалось от 20 до 105 мм. Регистрация момента окончания процесса удаления фоторезиста проводилась при помощи спектрометра *SL40-2-2048ISA* по интенсивности спектральной линии кислорода  $\lambda=777,46$  нм. В качестве рабочего газа использовался воздух. Процесс плазмохимического удаления проводился при давлении 130 Па.

Данное исследование привело к следующим выводам: при групповой обработке полупроводниковых пластин уменьшение расстояния между кремниевыми пластинами приводит к снижению скорости плазмохимического удаления фоторезистивных маскирующих покрытий на их поверхности. Уменьшение расстояния между обрабатываемыми пластинами в характерных местах максимумов СВЧ мощности в плазменном объеме может приводить к уменьшению скорости удаления фоторезиста до двух раз, в локальных местах минимумов – до трех раз. Также установлено, что при расстоянии менее 50 мм между пластинами происходит значительное снижение скорости удаления фоторезиста, что может быть частично объяснено экранированием пластинами диаметром 100 мм области обработки, а также эффектом поглощения СВЧ

энергии кремниевыми пластинами, обладающими высоким значением тангенса угла диэлектрических потерь.

Применение диссектора, позволяет уменьшить в объёме плазмы СВЧ плазмотрона неравномерность распределения скорости СВЧ плазмохимического удаления фоторезистивных покрытий с поверхности полупроводниковых пластин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований был произведен обзор конструктивных решений СВЧ плазматронов, обзор устройств для управления распределением СВЧ энергии, а также способы технологического применения плазмы СВЧ энергии.

Также произведена разработка исследовательского стенда и методик бесконтактной оптической диагностики плазмы. Для проведения экспериментов был выбран спектрометр *SL 40-2-2048 ISA*, а также фотоэлектрический умножитель ФЭУ 112. Спектрометр предназначен для: контроля длин волн лазерных источников, анализа спектров различных источников, фотометрических измерений, контроля излучения плазмы в вакуумных камерах, применения в различных системах для осуществления обратной связи.

Проведены исследования влияния вращающегося диссектора на интенсивность свечения СВЧ разряда в плазматроне резонаторного типа; исследование влияния расположения кремниевых пластин в объеме плазмы СВЧ разряда на величину СВЧ энергии между ними; исследование влияния расстояния между кремниевыми пластинами на скорость СВЧ плазмохимического удаления фоторезистивных пленок в области локального максимума и минимума СВЧ энергии при динамическом управлении распределением СВЧ энергии в камере СВЧ плазматрона

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что вращающийся диссектор приводит к изменению интенсивности свечения СВЧ разряда, при этом существенно изменяется величина СВЧ энергии в отдельной локальной области разрядной камеры СВЧ плазматрона. И как следствие в процессе вращения диссектора могут меняться электрофизические параметры плазмы. Этот факт необходимо учитывать при теоретическом изучении энергетических параметров плазмы СВЧ разряда и практическом проектировании разрядных камер СВЧ установок. Применение СВЧ плазмы при очистке и стерилизации инструментов, используемых в медицине, позволит минимизировать проблемы, возникающие при очистке наиболее распространенными способами.

Магистерская диссертация выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составляет 78%. Цитирования обозначены ссылками на публикации, указанные в «Списке использованных источников».

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Бельский, Д. В. Исследование влияния расстояния между кремниевыми пластинами на скорость СВЧ плазмохимического удаления фоторезистивных пленок / Д. В. Бельский // Физика конденсированного состояния: материалы XXVI междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 19 апреля 2018 г. / Гродненский гос. ун-т. имени Янки Купалы – Гродно, 2018. – С. 151 –152.

2. Бельский, Д. В. Исследование влияния вращающегося диссектора на интенсивность свечения СВЧ разряда в плазматроне резонаторного типа / Д. В. Бельский // СНТК 54: материалы 54-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 23–27 апреля 2018 г. / Белорусский гос. ун-т. информатики и радиоэлектроники – Минск, 2018. – С. 125 – 126.

3. Бельский, Д. В. Исследование влияния расстояния между кремниевыми пластинами на скорость СВЧ плазмохимического удаления фоторезистивных пленок / Д. В. Бельский, С. И. Мадвейко, С. В. Бордусов, О. И. Тихон, М. С. Лушакова // Приборостроение – 2018: материалы 11-ой междунар. науч.-тех. конф., Минск, 14–16 ноября 2018 г. / Белорусский национальный технический университет – Минск, 2018. – С. 240 – 241.