

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

УДК 533.932

Тодин Павел Александрович

**Исследование стабильности пульсирующего СВЧ разряда в объеме
крупногабаритной плазменной камеры СВЧ плазмотрона резонаторного
типа**

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра
по специальности 1-39 80 03 «Электронные системы и технологии»

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

Минск 2021

ВВЕДЕНИЕ

Обработка материалов и изделий электронной техники с использованием плазмы СВЧ разряда широко используется в технологии производства микро- и нанoeлектроники.

Это обусловлено тем, что источники плазмы СВЧ разряда обеспечивают в условиях безэлектродного разряда значительно более высокие концентрации активных плазменных частиц и большую плотность высокоэнергетичных электронов по сравнению низкочастотными разрядами. Кроме того, существенным преимуществом СВЧ разряда является возможность их устойчивого поддержания в широком диапазоне давлений.

Повышение уровня точности используемого в производстве оборудования диктуется совершенствованием технологий изготовления структур наноразмеров. Важным условием является стабильность проводимых процессов.

Электрические параметры электронных полупроводниковых приборов зависят от состояния поверхности полупроводниковых пластин, изменяющегося в результате физических и химических процессов, протекающих на их поверхности под воздействием плазмы в процессе их производства на операциях СВЧ плазмохимической обработки. Стабильность процессов влияет на качество обработки пластин, т.к. в случае нестабильности процесса при обработке больших пластин (диаметром до 300 мм) обработка различных участков одной пластины может оказаться неоднородной, что приведет к снижению качеству производимой продукции. Применительно к изучению вопроса воспроизводимости процесса СВЧ плазмохимической обработки материалов необходимо исследование стабильности поддержания СВЧ разряда в молекулярных газах, которая зависит от стабильности генерации электромагнитного излучения, генерируемого СВЧ магнетроном при изменении электрических параметров его источника питания, и загрузки камеры СВЧ генератора, а также материала нагрузки.

Актуальность работы обусловлена стремлением повысить качество плазменной обработки полупроводниковых материалов, а также снизить влияние человеческого фактора на этот процесс, путем предоставления автоматизированных решений для контроля за параметрами генерирования плазмы СВЧ разряда. С помощью разработанной программы, оператор, занимающийся настройкой технологических процессов, сможет получать информацию об изменении параметров плазмы СВЧ разряда в том числе и в графическом виде.

Целью данной работы является установление зависимости влияния электрических параметров магнетрона, площади обрабатываемых материалов в

камере плазмотрона, и их расположения на стабильность пульсирующего СВЧ разряда в объеме крупногабаритной плазменной камеры СВЧ плазмотрона резонаторного типа.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ технологий и оборудования генерации пульсирующего СВЧ разряда.
2. Разработка программного обеспечения в среде MATLAB для обработки экспериментальных данных, в том числе графическим методом.
3. Исследование стабильности оптических характеристик СВЧ разряда объемом более 4000 см^3 в зависимости от электрических параметров источника питания СВЧ магнетрона, а также от объемов обработки в камере СВЧ плазмотрона.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема диссертационной работы утверждена приказом №2024-с от 19.09.2019 первым проректором учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Диссертационная работа выполнялась на кафедре «Электронной техники и технологии» в рамках следующей научной программы:

ГБЦ 19-3105 «Исследование стабильности плазмы СВЧ разряда в плазмотроне резонаторного типа технологического назначения».

Актуальность темы исследования

Обработка материалов и изделий электронной техники с использованием плазмы пульсирующего СВЧ разряда широко используется в технологии производства микро- и нанoeлектроники. Важным условием является стабильность проводимых процессов, а значит повышение ее за счет контроля параметров СВЧ разряда, приведет к улучшению качества продукции.

Цель и задачи исследования

Целью работы является установление зависимости влияния электрических параметров и материалов в камере плазмотрона на стабильность пульсирующего СВЧ разряда в объеме крупногабаритной плазменной камеры СВЧ плазмотрона резонаторного типа.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ технологий и оборудования генерации пульсирующего СВЧ разряда.
2. Разработка программного обеспечения в среде MATLAB для обработки экспериментальных данных, в том числе графическим методом.
3. Исследование стабильности оптических характеристик СВЧ разряда объемом более 4000 см^3 в зависимости от электрических параметров источника питания СВЧ магнетрона, а также от объемов обработки в камере СВЧ плазмотрона.

Объектом исследования является плазма СВЧ разряда.

Предметом исследования являются оптические характеристики пульсирующего СВЧ разряда.

Область исследования. Плазменная техника и плазменная технология применительно к процессам обработки материалов и изделий электронной техники.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров. Заимствования и цитирования обозначены ссылками на публикации, указанные в «Списке литературы». Работа выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составил 86,99%.

Научная новизна полученных результатов обусловлена математическим расчетом и графическим представлением результатов исследований с помощью средств программного обеспечения MATLAB.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Методика проведения исследований и анализа экспериментальных данных путем использования графического метода и среды MATLAB.

2. Экспериментально установлено влияние увеличения площади загрузки реакционной камеры плазмотрона кремниевыми пластинами на уменьшение разброса амплитудных значений интегрального оптического свечения плазмы СВЧ разряда с 30% до 3%, а соответственно и на увеличение стабильности процесса плазменной обработки.

3. Показано, что использование металлических пластин, либо расположение кремниевых пластин на токопроводящем основании не оказывают видимого влияния на стабильность процесса плазмообразования, поскольку разброс амплитудных значений оптического свечения остается примерно равным 25%.

Теоретическая значимость работы – получены результаты графического моделирования импульсов оптического излучения, с помощью которых получены зависимости стабильности процесса плазмообразования от электрических характеристик источника питания магнетрона, площади обрабатываемых полупроводниковых пластин, а также их расположения.

Практическая значимость – полученные результаты могут быть использованы при разработке нового и модернизации существующего плазменного технологического оборудования.

Апробация диссертации и информации об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались на 56-й научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР, 2020, Минск; 6-й международных конференциях «BIGDATA and Advanced Analytics Conference and EXPO» 2019–2020, БГУИР, Минск; Международной конференции «Приборостроение-2020», Минск, Международной научно-технической видеоконференции студентов, аспирантов, и молодых ученых «Интеллектуальные системы», БНТУ, Минск.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 4 печатные работы, в том числе 4 доклада.

Библиотека БГУИР

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 проводится анализ литературы о свойствах плазмы СВЧ разряда, конструктивных решениях СВЧ разрядных систем резонаторного типа, а также источников питания СВЧ магнетронов. Термин “СВЧ-плазма” объединяет плазменные образования, полученные в различных СВЧ устройствах (СВЧ-разряды). В настоящее время разработаны многочисленные СВЧ устройства для получения плазмы и свойства последней оказываются зависящими от способа ее получения. Эти устройства определяют структуру электромагнитного поля, энергетическую эффективность устройства, широкополосность, зависимость свойств плазмы от частоты, уровни минимальной и максимальной мощности. Поэтому при анализе такой плазмы более целесообразно рассматривать СВЧ-разряд - систему, представляющую плазму в конкретном газоразрядном устройстве. СВЧ-разрядами (микроволновыми разрядами) обычно называют разряды, создаваемые с помощью электромагнитных волн с частотой, превышающей 300 МГц. Разрешенными для промышленных, медицинских и научных применений являются частоты 460, 915, 2450, 5800, 22125 МГц. Наиболее часто используется частота 2450 МГц.

Основными достоинствами СВЧ-разрядов являются:

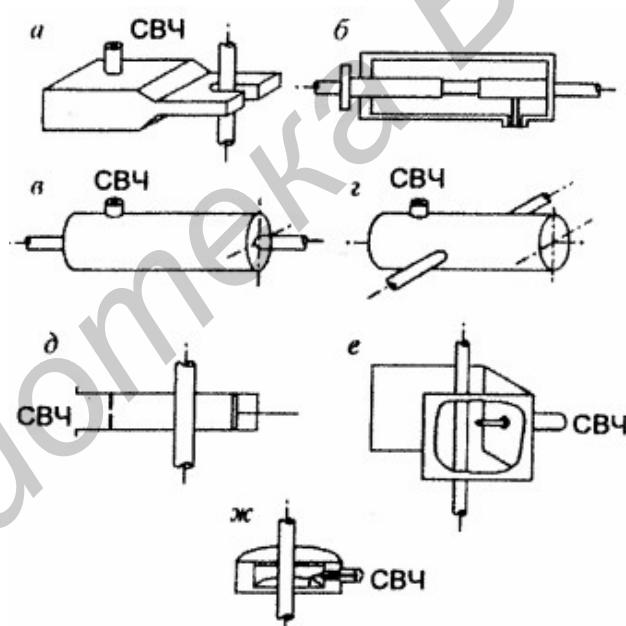
- простота получения плазмы с высоким удельным энерговыделением (>1 Вт/см³);
- простота получения плазмы с малыми удельными энерговыделениями ($\ll 1$ Вт/см³);
- широкая область рабочих давлений;
- возможность создания как квазиравновесной, так и существенно неравновесной плазмы;
- простота управления внутренней структурой разряда путем изменения электродинамических характеристик устройства ввода СВЧ энергии в плазму;
- возможность создания плазмы в безэлектродных и электродных системах (в последнем случае отсутствует загрязнение объема и образцов продуктами эрозии электродов);
- возможность создания плазмы в малых и больших объемах, включая свободное пространство (атмосфера Земли);
- возможность обработки больших поверхностей сканированием области плазменного образования, имеющего малые размеры;
- возможность совместного воздействия плазмы и электромагнитного поля на объекты в плазме для увеличения эффективности процесса;
- разработанные семейства разнообразных эффективных СВЧ генераторов

плазмы позволяют выбрать конструкцию для любых применений.

Широкое распространение в различных областях науки и техники СВЧ-энергии находит в виде плазмы газового СВЧ-разряда.

Резонаторные системы являются одними из самых первых устройств для генерации плазмы. В качестве аппликаторов резонаторного типа применяются прямоугольные (призматические), цилиндрические, сферические и другие типы резонаторов (рисунок 1.1).

Наиболее распространены плазмотроны с частичным заполнением плазмы резонирующего объема. Применяется также отделение резонирующего объема от плазменной камеры перегородкой, в которой выполнены отверстия связи для излучения СВЧ энергии в зону плазмообразования. Конструкция СВЧ плазмотрона с большим разрядным объемом, находящимся внутри резонирующей полости, возбуждаемой через отверстия связи, схематично представлена на рисунке 1.2.



а – призматический резонатор; б – коаксиальный резонатор; в,г – цилиндрические резонаторы с различной ориентацией разрядных трубок; д – резонатор на базе прямоугольного волновода; е – открытый резонатор; ж – цилиндрический резонатор уменьшенной высоты на моде

Рисунок 1.1 – Резонаторы СВЧ плазмотронов

В данном подразделе кратко описан принцип действия установки, который основан на передаче энергии сверхвысокочастотного излучения по волноводу от генератора-лампы сверхвысокой частоты (магнетрона) в реактор, где в вакуумированном объеме (кварцевая труба) зажигается плазменный низкотемпературный газовый разряд.

В данной главе будут представлены три варианта электрических схем источника питания СВЧ магнетрона: упрощенная схема питания нефильТРованным высоковольтным напряжением промышленной частоты; схема однополупериодного выпрямления с удвоением напряжения; циклическая схема двухполупериодного выпрямления с удвоением напряжения, которые были выбраны для изучения влияния электрических параметров источника питания СВЧ магнетрона на электрофизические характеристики СВЧ разряда и технологические параметры процесса СВЧ плазмохимической обработки полупроводниковых материалов. Выбранные схемотехнические решения источников питания позволяют получить выпрямленное анодное напряжение с синусоидальной, прямоугольной формой импульсов и постоянное при сохранении пульсирующего режима работы СВЧ магнетрона с частотой следования импульсов питающего его анодного тока 50 и 100 Гц.

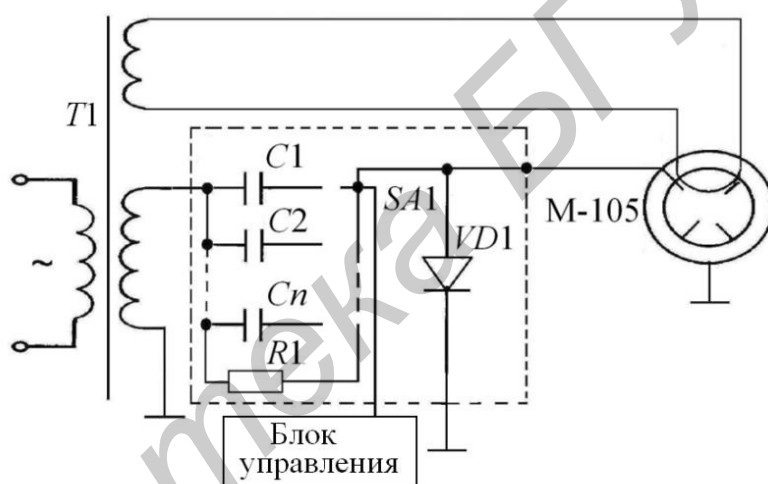


Рисунок 1.2 – Принципиальная электрическая схема высоковольтного источника питания СВЧ магнетрона

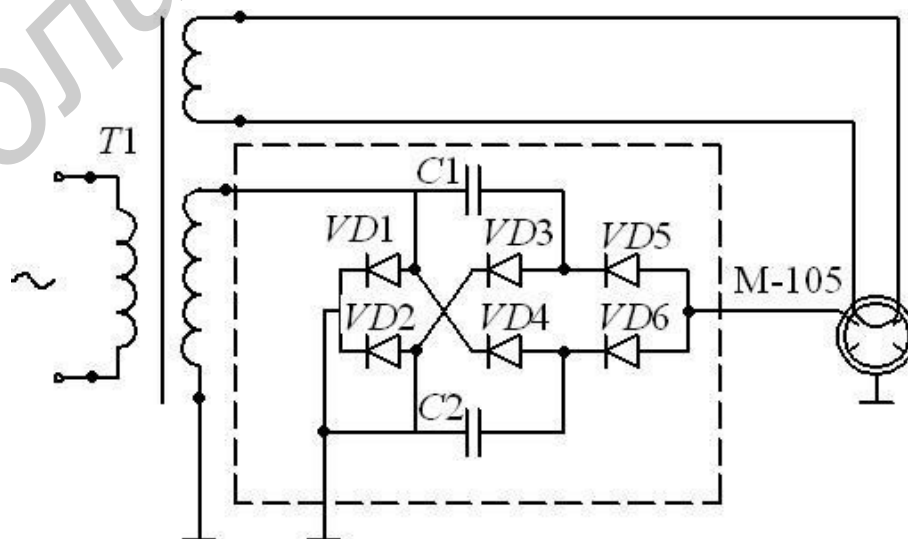


Рисунок 1.3 – Схема однофазная двухполупериодная циклическая источника питания СВЧ магнетрона

В результате изучения влияния различных схемотехнических решений и источника питания СВЧ магнетрона на скважность импульсов и частоту генерации интегрального оптического сигнала СВЧ разряда было определено следующее: при питании СВЧ магнетрона от источника питания с частотой следования импульсов анодного напряжения и тока 50 и 100 Гц, по форме близкими к синусоидальным, наполняемость временного интервала импульсами интегрального оптического свечения СВЧ разряда составляет не более 35 %; при питании электрическими импульсами анодного тока и напряжения с частотой следования 50 Гц с формой импульса анодного напряжения, близкой к прямоугольной, которая формируется за счет использования трансформатора, работающего в режиме насыщения, наполняемость временного интервала импульсами сигнала интегрального оптического свечения СВЧ разряда составляет не более 44 %, в случае питания СВЧ магнетрона от источника питания, собранного по циклической схеме двухполупериодного выпрямления с умножением напряжения при использовании трансформатора, работающего в режиме насыщения, она повышается до 77 %.

Применительно к технологическим условиям проведения процесса СВЧ плазмохимической обработки материалов увеличение наполняемости импульсами интегрального оптического свечения СВЧ разряда приведет к увеличению времени воздействия плазмы на поверхность обрабатываемых изделий в единицу времени, что в свою очередь должно привести к увеличению скорости обработки, соответственно решение, использующее схему двухполупериодного выпрямления с умножением напряжения при использовании трансформатора, будет наиболее выгодной.

Во второй главе представлен исследовательский комплекс, используемый для экспериментального изучения электрофизических параметров плазмы СВЧ разряда, структурная схема которого представлена на рисунке 1.4, а также используемого оборудования.

Основу исследовательского комплекса составляет вакуумно-плазменная СВЧ разрядная система технологического назначения, построенная на базе СВЧ газоразрядного модуля, который состоит из разрядной вакуумной камеры, представляющей собой кварцевую трубу, и резонатора прямоугольной формы, обладающего высокой эффективностью трансформации энергии СВЧ полей в плазму газового разряда. Также в состав системы входят генератор электромагнитных колебаний, система смещения и напуска газов, вакуумметр, источник электропитания СВЧ магнетрона и систему управления.

Также во второй главе представлены методики проведения исследований, а именно метода графического анализа экспериментальных данных с помощью среды MATLAB.

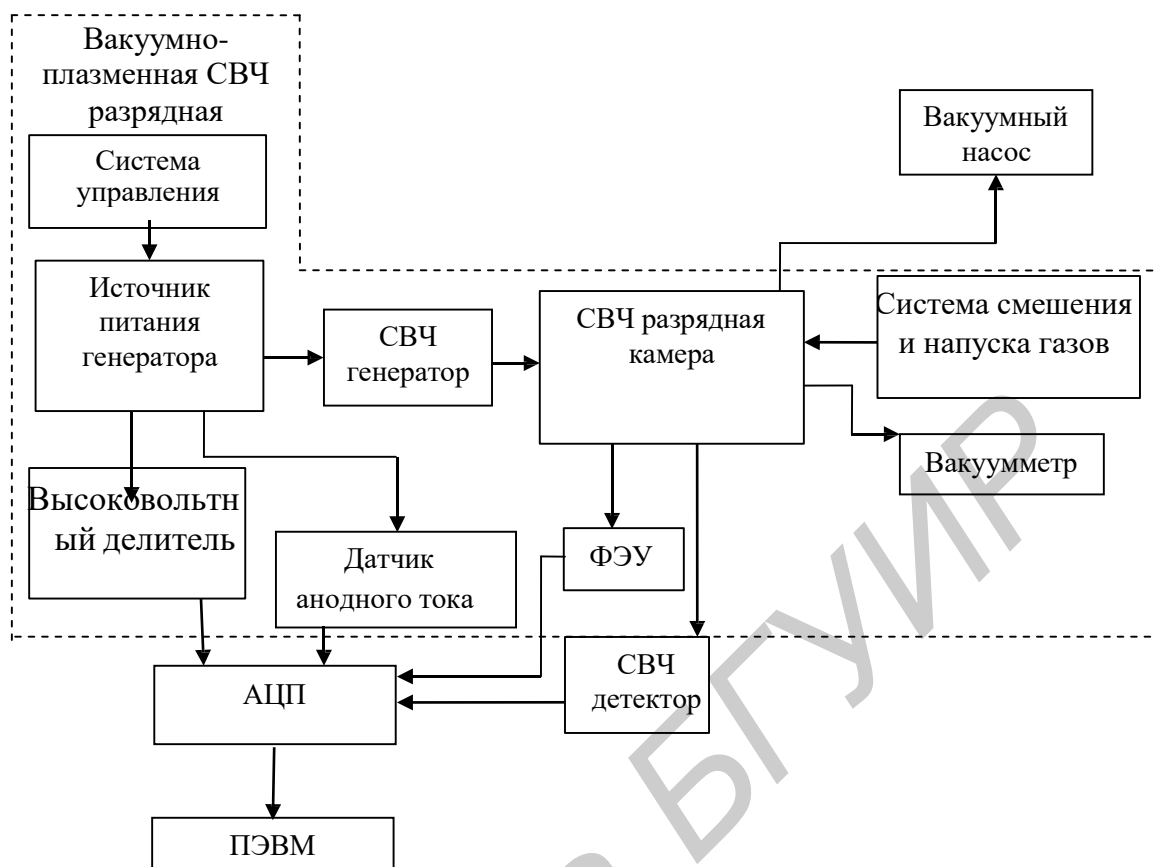


Рисунок 1.4 – Структурная схема исследовательского комплекса

Третья глава описывает процесс обработки экспериментальных данных и их визуализации. В процессе производственной эксплуатации технологического оборудования возникает необходимость отслеживания состояния системы путем проведения корреляционного анализа параметров.

Задача по прогнозированию и увеличению воспроизводимости параметров технологических процессов непосредственно связана со стабильностью работы технологической системы в целом и в настоящее время остается весьма сложной.

При проектировании технологических систем опираются на использование процедур анализа и синтеза. Одним из важных этапов исследований может являться параметрический анализ технологической системы с использованием технологий визуализации аналитических данных, направленный на изучение влияния внешних и внутренних параметров системы на качество ее функционирования, конечной целью которого является выявление областей в пространстве параметров, обеспечивающих качество системы.

Одной из актуальных задач является практическая реализация способов визуализации параметров (электрических, электрофизических и технологических) технологической системы для облегчения восприятия данных и их последующего анализа. В данном случае визуализация может являться поддержкой принятия решений.

При анализе зависимости между двумя переменными применяют диаграмму

рассеяния, которая является наглядной формой представления информации. Для ее построения используют прямоугольную систему координат. По оси абсцисс отмечают значения независимой переменной, а по оси ординат — значения зависимой переменной. Результат каждого наблюдения схемы отображается точкой на плоскости. Совокупность этих точек образует скопление, или облако. Скопление точек определяет картину зависимости двух переменных.

Однако в связи с большим количеством данных, получаемых при работе прибора сложно выявить какие-либо отклонения или изменения в кучности, а иногда и форме расположения данных точек, поэтому вместо диаграммы была использована матрица, визуализованная в виде тепловой карты, в более удобном виде показывающая скопления точек и их форму. Тепловые карты (heatmap) относятся к визуализации с помощью цветных индикаторов, при этом сохраняется табличное представление информации, но числа в ячейках заменяются на заливку этих ячеек цветом.

При проведении экспериментов в качестве плазмообразующей среды использовался атмосферный воздух, давление в разрядной камере – 240 Па. СВЧ мощность, вводимая в резонатор – 650 Вт.

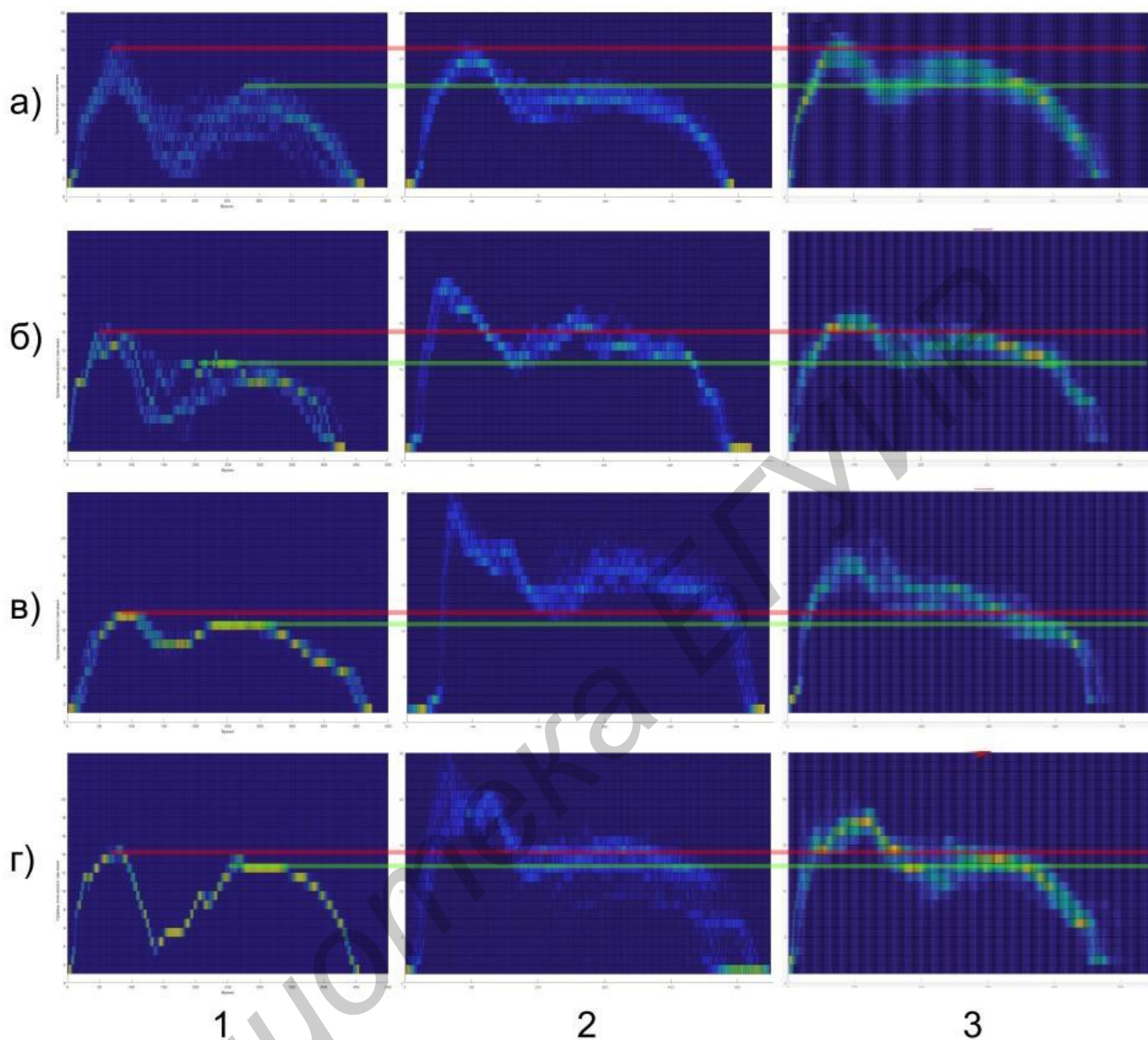
Регистрировались осциллограммы сигналов анодного напряжения, анодного тока СВЧ магнетрона и оптического свечения плазмы СВЧ разряда при различной площади поверхности Si пластин, размещенных в реакционно-разрядном объеме плазмотрона. Экспериментально установлена зависимость времени задержки возбуждения СВЧ разряда от площади поверхности Si пластин, размещенных в реакционном объеме.

Проведено изучение стабильности амплитуды импульсов оптического свечения плазмы СВЧ разряда в зависимости от площади поверхности кремниевых пластин, размещенных в реакционной камере плазмотрона. На рисунке 3.5 изображены диаграммы распределения амплитуды импульсов оптического свечения плазмы СВЧ разряда при различной площади поверхности находящихся в зоне плазмообразования кремниевых пластин.

На рисунке 3.19 для сравнительного анализа приведены полученные ранее диаграммы распределения импульсов интегрального свечения оптического СВЧ разряда для кремниевых пластин (1 столбец), металлических пластин (2 столбец), и кремниевых пластин, расположенных на металлическом основании (3 столбец).

Экспериментально установлено, что размещение кремниевых пластин в плазменном объеме на токопроводящем держателе (нержавеющая сталь) приводит к увеличению амплитуды импульсов интегрального оптического излучения СВЧ разряда в области над пластинами до 30%. Как видно из представленных диаграмм, увеличение площади кремниевых пластин при таких условиях проведения эксперимента не приводит к существенному изменению амплитуды

импульсов интегрального оптического излучения СВЧ разряда.



а – 15000 мм²; б – 28600 мм²; в – 43000 мм²; г – 55000 мм²

Рисунок 1.5 - Диаграммы распределения амплитуды импульсов оптического свечения при различной площади поверхности:

1 – кремниевых пластин; 2 – металлических пластин;

3 – кремниевых пластин, размещенных в плазменном объеме на токопроводящем основании

Увеличение повторяемости импульсов интегрального оптического свечения плазмы СВЧ разряда указывает на повышение стабильности вклада СВЧ энергии в газовый разряд в процессе генерации магнетроном СВЧ энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы в теоретической части были рассмотрены свойства плазмы СВЧ разряда и ее применение в технологии производства изделий микроэлектроники, в свою очередь обуславливающую актуальность данной работы. Рассмотрены конструкции резонаторов и СВЧ плазмотронов резонаторного типа.

Разработан исследовательский комплекс и методика исследования плазмы СВЧ разряда, которая позволяет провести анализ оптического излучения плазмы СВЧ разряда.

В результате проведения работы установлено, что увеличение мощности СВЧ магнетрона не влияет на инерционность процесса плазмообразования, однако увеличивает стабильность импульсов, а значит и процесса обработки материалов и изделий микроэлектроники.

Увеличение площади обрабатываемых заготовок приводит к увеличению временной задержки в генерации плазменных разрядов, однако так же увеличивает повторяемость импульсов оптического свечения плазмы СВЧ разряда, и указывает на повышение стабильности вклада СВЧ энергии в газовый разряд в процессе генерации магнетроном СВЧ энергии.

Экспериментально установлено, что размещение кремниевых пластин в плазменном объеме на токопроводящем держателе (нержавеющая сталь) приводит к увеличению амплитуды импульсов интегрального оптического излучения СВЧ разряда в области над пластинами до 30%. Как видно из представленных диаграмм, увеличение площади кремниевых пластин при таких условиях проведения эксперимента не приводит к существенному изменению амплитуды импульсов интегрального оптического излучения СВЧ разряда (разброс амплитуды импульсов оптического свечения находится в пределах 25%).

Из этих результатов можно сделать вывод о необходимости учитывать материал обрабатываемых изделий микроэлектроники, их количестве, устанавливаемом в реакционной камере для обработки.

С целью упрощения проведения расчетно-аналитических действий, визуализации данных, была разработана программа в среде MATLAB, которая позволяет проводить графический и статистический анализ экспериментальных данных путем построения показанных в данной работе тепловых карт и расчета дисперсии амплитуд импульсов интегрального оптического излучения плазмы СВЧ разряда.

Графическое представление данных позволяет в более наглядной форме быстро определять отклонения или сбои во время технологического процесса обработки изделий электронной техники с использованием плазмы СВЧ разряда.

Исследование, которому посвящена данная работа позволит увеличить равномерность, а соответственно и качество процессов обработки изделий электроники и полупроводниковых материалов.

Разработанная программа позволяет предоставить как можно больше информации оператору, занимающемуся технологическим процессом, в том числе и в графическом виде, что упрощает работу по постановке технологических процессов.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке нового и модернизации существующего плазменного технологического оборудования.

Библиотека БГУИР

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1. Мадвейко, С.И., Тодин, П.А. // Исследование влияния электрических характеристик источника питания СВЧ магнетрона на стабильность оптического излучения плазмы СВЧ разряда // С.И. Мадвейко, П.А. Тодин // 56-ая научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 2020, Минск. – С. 396 – 397.

2. Бордусов, С.В., Мадвейко, С.И., Тодин, П.А. // Визуализация массивов данных в среде MATLAB при корреляционном анализе параметров технологических систем // С.В. Бордусов, С.И. Мадвейко, П.А. Тодин // Шестая Международная научно-практическая конференция «BIG DATA and Advanced Analytics. BIG DATA и анализ высокого уровня», 2020, Минск, - С. 263-268.

3. Исследования влияния кремниевых пластин на СВЧ разряд в плазмотроне резонаторного типа // Мадвейко С.И. [и др.] // 13-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение – 2020», 2020, Минск – С. 275-277.

4. Тодин, П.А. // Методика анализа стабильности свечения СВЧ плазменного разряда, возбуждаемого в резонаторе прямоугольной формы / П.А. Тодин, О.И. Тихон // Интеллектуальные системы : Междун. научн.-техн. видеоконф. студ., аспирантов и молодых учёных, Минск, 24 декабря 2020 г. / БНТУ. (В печати)