

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.385.69

Пронина
Мария Игоревна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБА
ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ СВЧ
ЭНЕРГИИ В ОБЪЕМЕ ПЛАЗМЕННОЙ
КАМЕРЫ СВЧ ПЛАЗМОТРОНА**

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-41 80 02 «Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники»

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

Минск 2019

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Развитие микроэлектроники, являющееся важнейшей областью электронной техники, непосредственно связано с непрерывным совершенствованием как существующих технологий изготовления интегральных микросхем (ИМС), так и созданием принципиально новых технологических процессов. В этом направлении особо важное значение имеет использование плазменных методов обработки материалов, позволяющих достигать заданных физических свойств, геометрических характеристик поверхности слоев обрабатываемых материалов, а также повышение производительности процессов и качества изделий микроэлектроники [1].

Так как эффективность процессов плазмообразования и поддержания стабильного газового разряда в значительной степени связана с величиной напряженности электрической составляющей электромагнитного поля $E_{эфф}$ в зоне разряда [2], то особый интерес представляют СВЧ плазмотроны резонаторного типа, в которых значительное возрастание напряженности поля электромагнитной волны в зоне плазмообразования обеспечивается не повышением мощности источника СВЧ энергии, а за счет конструктивных решений системы формирования СВЧ энергии.

Наличие неоднородности распределения электрического поля в объеме резонатора приводит к неравномерности нагрева образцов, помещенных в разрядной камере в резонаторе СВЧ плазмотрона, и, следовательно, к неравномерности скоростей обработки материалов. В связи с этим исследование, с целью поиска оптимального способа перераспределения СВЧ энергии в объеме резонатора, является актуальным.

В магистерской диссертации основной целью является анализ эффективности способа динамического управления распределением СВЧ энергии в объеме плазменной камеры СВЧ плазмотрона.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными исследованиями университета

Результаты диссертационного исследования были использованы при проведении ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», задание 3.5.02 «Разработка многофункциональных технологических систем и методов управляемого формирования слоистых структур материалов в изделиях электронной техники» (2016 – 2018 гг., ГБЦ 16-3102).

Цель исследования:

Анализ эффективности способа динамического управления распределением СВЧ энергии в объеме плазменной камеры СВЧ плазмотрона.

Задачи исследования:

1 Провести обзор конструктивных решений СВЧ разрядных устройств резонаторного типа и существующих СВЧ разрядных устройств технологического назначения.

2 Разработать исследовательский стенд и методики экспериментального исследования распределения электромагнитного поля

3 Провести моделирование распределения СВЧ энергии в объеме реакционно-разрядной камеры внутри резонатора.

4 Провести экспериментальные исследования эффективности динамического распределения электромагнитного поля в объеме призматического СВЧ плазмотрона резонаторного типа.

Объект исследования – плазма СВЧ разряда технологического назначения.

Предмет исследования – распределение СВЧ энергии в объеме плазменной камеры СВЧ плазмотрона резонаторного типа.

Новизна полученных результатов

В настоящее время в микроэлектронике осуществляется переход на обработку кремниевых пластин больших диаметров (300 мм), что влечет увеличение объема технологических камер, в которых производится обработка. Это, в свою очередь, требует получения плазмы больших объемов с равномерным распределением СВЧ энергии для равномерной обработки пластин. В связи с этим известные технические решения СВЧ плазмотронов резонаторного типа требуют всестороннего исследования с целью оптимизации их конструктивного исполнения и выработки научно обоснованных рекомендаций по применению в процессах вакуумно-плазменной обработки материалов.

Положения, выносимые на защиту

1 Способ динамического распределения СВЧ энергии в плазменном объеме СВЧ плазмотрона.

2 Система с динамическим управлением распределением СВЧ энергии в разрядной камере СВЧ плазмотрона.

2 Результаты моделирования распределения СВЧ энергии в разрядной камере СВЧ плазмотрона.

4 Экспериментальные исследования распределения электромагнитного поля в объеме плазмы СВЧ разряда в разрядной камере СВЧ плазмотрона.

Апробация результатов диссертации

Результаты работы представлены на 54 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов (Минск, БГУИР); 10-й международной научной конференции «Приборостроение-2017» (Минск, БНТУ); Международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности (Могилев, БРУ); 13-й международной молодежной научно-технической конференции «РТ-2017» (Севастополь, Севастопольский государственный университет); 55 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов (Минск, БГУИР).

Опубликованность результатов исследования

По материалам магистерской диссертации опубликовано 5 печатных работ, в том числе 1 статья в сборнике материалов научных конференций и 4 тезиса докладов на научных конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из общей характеристики работы, введения, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе проведен анализ имеющихся в литературе данных о конструктивных особенностях и технологических характеристиках СВЧ разрядных систем резонаторного типа, о существующих СВЧ разрядных устройствах технологического назначения и о методах перераспределения электромагнитных волн в резонаторе.

Во второй главе описаны исследовательский комплекс, оборудование и методики экспериментального исследования распределения электромагнитного поля в СВЧ плазмотроне резонаторного типа. Представлено конструктивное решение системы с динамическим управлением распределением СВЧ энергии в СВЧ плазмотроне резонаторного типа.

В третьей главе представлены результаты компьютерного моделирования динамического распределения СВЧ энергии в объеме резонатора СВЧ плазмотрона на основе программного продукта для моделирования Ansoft HFSS.

В четвертой главе приведены результаты исследования динамического управления распределением СВЧ энергии в камере СВЧ плазмотрона; исследований влияния кремниевых пластин на распределение СВЧ мощности в разрядной камере СВЧ плазмотрона резонаторного типа; исследование влияния расположения пластин из различных материалов в объеме плазмы СВЧ разряда на величину СВЧ энергии между ними.

Общий объем диссертации 55 страниц, 43 иллюстрации, библиографический список из 26 источника, список публикаций автора из 5 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен обзор существующих и используемых конструкций СВЧ разрядных устройств для выявления проблем, которые приходится решать при проектировании объемных резонаторов для целей плазменной обработки материалов. Проведен анализ существующих СВЧ разрядных устройств технологического назначения, рассмотрены способы управления распределением СВЧ энергии в плазме.

Определено, что недостатком использования многоцелевого ввода СВЧ-энергии в резонаторе является сложность реализации такой конструкции, сопровождающейся трудоемкими расчетами расположения отверстий связи. Гребенчатые замедляющие структуры позволяют равномерно распределять электромагнитное поле только вблизи стенок с данными структурами, что может быть полезно для обработки тонких образцов в узких резонаторах. Вращающийся поддон конструктивно сложно реализуем применительно к плазмотронам проточного типа.

Для объемных резонаторных систем диссектор является оптимальным средством перераспределения стоячих СВЧ волн, так как он переотражает от лопастей электромагнитную энергию в объеме.

Вторая глава посвящена разработке исследовательского стенда, а также поиску и изучению методик экспериментального исследования распределения электромагнитного поля с помощью зондов, выбору методик исследования распределения СВЧ энергии в объеме резонатора СВЧ плазмотрона.

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.

Система с динамическим управлением распределением электромагнитной энергии в объеме резонатора представляет собой разрядную систему, установленную внутри резонатора СВЧ плазмотрона, а также вращающийся диссектор закрепленный на верхней стенке резонатора.

В данной главе рассмотрено конструктивное исполнение кольцевого резонатора для дальнейшего исследования характеристик пространственного распределения СВЧ энергии в объемах призматического и кольцевого резонаторов.

В третьей главе проведено компьютерное моделирование распределения СВЧ энергии в объемах кольцевого и призматического резонатора и выполнена качественная оценка эффективности использования объема реакционно-разрядной камеры СВЧ-резонаторов для создания плазмы большого объема. Установлено, что при увеличении длины реакционно-разрядной камеры со 180 мм до 330 мм наблюдается снижение интенсивности распределения для кольцевого резонатора со значения $E = 9,17e^{+002}$ до значения $E = 1,72e^{+002}$. При этом в разрядной камере призматического резонатора наблюдается более высокая интенсивность распределения СВЧ энергии $E = 2,78e^{+002}$, чем в разрядной камере кольцевого резонатора аналогичной длины – 330 мм, $E = 1,72e^{+002}$. Из чего можно сделать вывод, что при использовании для технологических целей одинаково больших объемов реакционно-разрядной камеры с длиной камеры 330 мм, эффективнее использовать призматический резонатор в сравнении с кольцевым.

Проведено компьютерное моделирование распределения СВЧ энергии в объеме разрядной камеры СВЧ плазмотрона резонаторного типа. Выполнена качественная оценка эффективности способа динамического управления распределением СВЧ энергии в объеме плазменной камеры, путем моделирования распределения СВЧ энергии в объеме плазменной камеры СВЧ плазмотрона с диссектором, повернутым на значение угла поворота равное 0° , 45° и 90° и без диссектора, при различных расстояниях между кремниевыми пластинами равными 20, 40, 60, 80 и 100мм.

Установлено, что в резонаторе без диссектора наблюдается снижение напряженности E при уменьшении расстояния между пластинами, что объясняется частичным экранированием СВЧ энергии кремниевыми пластинами. Для согласования данных моделирования проведено исследование зависимости величины СВЧ энергии между пластинами в

плазменном объёме СВЧ плазмотрона резонаторного типа. При повороте диссектора наблюдается увеличение значения напряженности E между пластинами, по сравнению с аналогичным значением E без диссектора из-за проникновения СВЧ энергии между пластинами, что происходит в результате перераспределения СВЧ энергии диссектором. Однако и без диссектора, и с диссектором в различных положениях минимальное значение E , для каждого случая, находится при значении расстояния между пластинами 20 мм.

Проведено моделирование распределения СВЧ энергии в объеме камеры (вид сбоку) без диссектора и с диссектором, повернутым на значение угла поворота равное 0° , 45° и 90° при расстоянии между пластинами $l=45$ мм, т.к. при данном значении расстояния между пластинами наблюдается снижение величины напряженности E при отсутствии (рисунок 3.13).

Установлено, что в пустом резонаторе наблюдается периодичность распределения плотности СВЧ энергии. Внесение в резонатор алюминиевого диссектора приводит к существенному изменению структуры электрической составляющей СВЧ поля внутри моделируемой конструкции. Наличие диссектора в объёме призматического резонатора и его вращение, оказывает существенное влияние на распределение СВЧ поля, так как он переотражает часть стоячих волн.

В главе 4 представлены результаты исследования динамического распределения СВЧ мощности ($f_{\text{microwave}} = 2,45 \pm 0,05$ GHz) в реакционно-разрядной камере объёмом 9000 см^3 СВЧ плазмотрона резонаторного типа. Для динамического распределения СВЧ мощности использовался вращающийся металлический четырехлопастный L-образный диссектор размещенный над реакционно-разрядной камерой. Измерения СВЧ мощности в локальных точках на оси камеры с плазмой и без плазмы проводились с использованием метода «активного зонда».

Установлено, что при проведении плазменных процессов обработки в СВЧ плазмотроне резонаторного применение вращающегося диссектора позволяет уменьшить неравномерность интенсивности СВЧ энергии в объёме разрядной камеры, что может обеспечить увеличение равномерности обработки материалов и изделий электронной техники.

Экспериментально установлена периодичность чередования максимумов и минимумов локальных значений СВЧ мощности вдоль оси камеры. При этом в условиях вращения диссектора диапазон разброса значений максимумов и минимумов показаний «активного зонда» уменьшается. Установлено что во время вращения диссектора величина СВЧ мощности в локальных областях разряда изменяется с периодическим повторением через четверть его оборота – 162,5 мс.

Полученные результаты могут быть полезны при проектировании нового и модернизации существующего технологического оборудования СВЧ плазмохимической обработки материалов и изделий электронной техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен обзор конструктивных решений СВЧ разрядных устройств резонаторного типа и существующих СВЧ разрядных устройств технологического назначения.

Разработан исследовательский стенд и методики экспериментального исследования распределения электромагнитного поля.

Проведено моделирование динамического распределения СВЧ энергии в объёме резонатора СВЧ плазмотрона.

Проведены экспериментальные исследования эффективности динамического распределения электромагнитного поля в объёме призматического СВЧ плазмотрона резонаторного типа.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Пронина, М.И. Исследование распределения СВЧ энергии в объёме разрядной камеры СВЧ плазмотрона / М. И. Пронина, А. С. Земляков, М. С. Лушакова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых (Могилев, 26 – 27 октября 2017 г.). – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2017. – С. 97.

2. Бордусов, С.В. СВЧ-плазмотрон резонаторного типа с динамическим управлением распределения СВЧ энергии в объёме плазменной камеры / С.В. Бордусов, С.И. Мадвейко, А.С. Земляков, М.И. Пронина, М.С. Лушакова // Приборостроение-2017 : материалы 10-й междунар. науч. конф. (Минск, 1-3 ноября 2017) – Минск : БНТУ, 2017. – С 219-221.

3. Пронина, М.И. Исследование эффекта динамического управления характером распределения СВЧ энергии в плазматроне / М.И. Пронина, С.И. Мадвейко, М.С. Лушакова, науч. рук. С.В. Бордусов // РТ-2017 : материалы 13-й междунар. молодежной науч.-техн. конференции (Севастополь, 20-24 ноября 2017) / отв. ред. Савочкин А.А. – Севастополь : Сев. гос. ун-т, 2017. – С 182.

4. Пронина, М. И. Исследование влияния кремниевых пластин на распределение СВЧ мощности в разрядной камере СВЧ плазмотрона резонаторного типа / М. И. Пронина, О. А. Сабодаш // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сборник

тезисов 54 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 23–27 апреля 2018 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; отв. ред. Раднёнок А. Л. – Минск, 2018. – С. 172 - 173.

5. Сабодаш, О.А. Влияние площади поверхности кремниевых пластин на величину СВЧ мощности в разрядной камере СВЧ плазмотрона резонаторного типа / О.А. Сабодаш, М.И. Пронина, С.С. Прокофьев, науч. рук. С.И. Мадвейко // Материалы представлены на 55 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов (Минск, 22–26 апреля 2019 года). – Минск : БГУИР.