

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

УДК 621.387.143

Земляков
Артём Сергеевич

Динамическое распределение СВЧ энергии в плазмотроне
на базе призматического резонатора

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 2017

ВВЕДЕНИЕ

Плазменная обработка получила широкое распространение вследствие высокой по промышленным стандартам температуры плазмы ($\sim 10^4$ К), большого диапазона регулирования мощности и возможности сосредоточения потока плазмы на обрабатываемом изделии; при этом эффекты плазменной обработки достигаются как тепловым, так и химическим действием плазмы. Удельная мощность, передаваемая поверхности материала плазменной дугой, достигает $10^5 \dots 10^6$ Вт/см², в случае плазменной струи она составляет $10^3 \dots 10^4$ Вт/см². В то же время тепловой поток, если это необходимо, может быть рассредоточен, обеспечивая «мягкий» равномерный нагрев поверхности, что используется при наплавке и нанесении покрытий. 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 с более низкочастотными разрядами. Кроме того, существенным преимуществом СВЧ разряда является возможность их устойчивого поддержания в широком диапазоне давлений.

В современном мире существует потребность в модернизации оборудования и вложении огромных средств для улучшения и ускорения существующих процессов. В рамках данной диссертации исследуются характеристики плазмы СВЧ разрядного устройства.

Для изучения условий плазмообразования при проведении процессов плазмохимической обработки материалов используется малогабаритная СВЧ плазмохимическая установка с аппликатором изготовленном на базе резонатора прямоугольной формы.

В данной диссертации поставлена задача проведения исследований динамического распределения СВЧ энергии в объеме плазмы плазмотрона резонаторного типа в целях плазменной обработки материалов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Цель работы:

Исследование динамического распределения СВЧ энергии в плазмотроне на базе призматического резонатора.

Актуальность темы магистерской диссертации:

Плазма СВЧ разряда является нестационарной нагрузкой, что может приводить к неравномерности обработки полупроводниковых пластин, расположенных в разрядной области, поэтому исследование динамического распределения СВЧ энергии в камере СВЧ плазмотрона и выбор оптимального способа перераспределения СВЧ энергии является актуальной задачей.

Задачи исследования:

1. Провести обзор существующих конструкций СВЧ разрядных устройств.
2. Разработать исследовательский стенд.
3. Провести моделирование динамического распределения СВЧ энергии в разрядной камере СВЧ плазмотрона.
4. Провести экспериментальные исследования динамического распределения электромагнитного поля в объёме плазмы СВЧ разряда.

Объект исследования:

Плазма СВЧ разряда технологического назначения.

Предмет исследования:

Характеристики пространственного распределения СВЧ энергии в СВЧ плазме.

Новизна работы:

В опубликованных к настоящему времени научно-технических материалах отсутствует глубоко разработанная и экспериментально подтвержденная универсальная теория взаимодействия СВЧ полей с плазмой газового разряда. Следовательно, материал, содержащийся в литературе, не позволяет однозначно прогнозировать характеристики новых разрабатываемых плазмотронов. А в имеющихся к настоящему времени сообщениях о СВЧ разрядном оборудовании практически отсутствуют данные об исследованиях параметров плазмы, возбуждаемой в СВЧ резонаторных плазмотронах технологиче-

ского назначения. 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:

Разработанный исследовательский стенд.

Моделирование динамического распределения СВЧ энергии в разрядной камере СВЧ плазмотрона.

Результаты исследований экспериментальных исследования динамического распределения электромагнитного поля в объёме плазмы СВЧ разряда.

Апробация результатов диссертации

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных конференциях: 12-я международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ – 2016»: Тезисы докладов – Севастополь, РФ, 2016; 53-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР: Тезисы докладов – Минск, 2017.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех разделов, заключения, списка использованных источников и приложения. Объем магистерской диссертации составляет 72 страницы, включая 55 иллюстраций, библиографический список из 24 наименований, 1 приложение.

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 многощелевого 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 для последующей разработки активного зонда и непосредственно разработка конструкции активного зонда, который будет использован 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 посвящена моделированию динамического распределения СВЧ энергии в резонаторе призматической формы СВЧ плазмотрона. В ней проведен обзор современных программных продуктов для моделирования распределения СВЧ энергии и магнитных полей и выбран программный пакет ANSYS HFSS.

Была построена модель объемного призматического резонатора с размерами 345x250x380 мм, внутрь которого была помещена кварцевая труба с наружным диаметром 200 мм и длиной 310 мм, ограниченная по торцам медными стенками, внутри которой была смоделирована неоднородность с электрофизическими параметрами близкими к СВЧ плазме. Ввод СВЧ энергии был организован через прямоугольное отверстие связи размерами 45x90 мм, расположенное своей длинной стороной вдоль резонирующих стенок.

Для построенной модели было произведено моделирование динамического распределения СВЧ энергии.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

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. Анализируя распределение структуры СВЧ поля внутри кварцевой разрядной камеры можно предположить, что кварцевую разрядную камеру нужно рассматривать как отдельный цилиндрический объемный резонатор, ограниченный по торцам медными стенками.

Наличие диссектора в объеме призматического резонатора и его вращение, оказывает существенное влияние на распределение СВЧ поля, так как он переотражает часть стоячих волн.

Четвертая глава содержит результаты проведенных экспериментальных исследований динамического распределения СВЧ энергии в объеме плазмы.

Приведены исследования влияния пластин из различных материалов в объеме плазмы СВЧ разряда на величину СВЧ энергии по оси резонаторной камеры. Во всех опытах наблюдается устойчивая периодичность максимумов в некоторых точках положения зонда относительно передней стенки: 60-80 мм, 190-200 мм, 260-280 мм, 320 мм. В присутствии плазмы СВЧ энергия падает примерно в 10 раз, так как энергия тратится на поддержание разряда. В камере без плазмы наибольший разброс от среднего показателя СВЧ энергии $\pm 85\%$, в присутствии плазмы наибольший разброс от среднего показателя СВЧ энергии $\pm 42\%$. Следовательно в присутствии плазмы наблюдается более равномерное распределение СВЧ энергии.

Исследование влияния расположения пластин из различных материалов в объёме плазмы СВЧ разряда на величину СВЧ энергии между ними привело к следующим выводам: уменьшение расстояния между кремниевыми пластинами приводит к уменьшению величины СВЧ мощности, регистрируемой между ними. Этот эффект может быть объяснён поглощением СВЧ мощности кремниевыми пластинами обладающими высокими тангенсом диэлектрических потерь, а также может быть частично связан с эффектом экранирования «активного зонда» пластинами от электромагнитных полей. Изменение расстояния между ситалловыми пластинами, являющиеся «прозрачными» для электромагнитных волн СВЧ диапазона, не приводит к изменению величины СВЧ мощности между ними. Зависимость расстояния между металлическими пластинами и величиной СВЧ мощности между ними имеет сложный вид с максимумом зарегистрированной СВЧ мощности на расстоянии между пластинами 60-70 мм, соответствующего примерно половине длины, возбуждающей плазму электромагнитной волны ($f = 2,45 \pm 0,05$ ГГц) в резонаторе, что предположительно может быть объяснено образованием резонансного эффекта между металлическими пластинами. Так же, как и для кремниевых пластин общий вид зависимости может быть частично связан с эффектом экранирования «активного зонда» пластинами от электромагнитных полей.

Так же приведены исследования влияния объёма на величину энергии между пластинами. Во всех опытах получаемая СВЧ энергия на зонде тем больше чем тоньше стоящие рядом с ним пластины.

Исследование динамического управления распределением СВЧ энергии в камере СВЧ плазматрона при загрузке в камеру образцов материалов электронной техникой позволило сделать следующие выводы: при включенном диссекторе амплитуда колебаний величины СВЧ энергии по оси разрядной камеры уменьшилась. В эксперименте без плазмы в резонаторе амплитуда колебаний уменьшилась на 40-60%, при наличии плазмы на 10-40%.

При вращении диссектора условия возбуждения для различных видов волн меняются, в зависимости от расположения лопастей, поэтому структура поля в камере постоянно видоизменяется, что приводит к снижению неравномерности распределения электромагнитной энергии в резонаторной камере СВЧ плазматрона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований был проведен обзор конструктивных решений СВЧ разрядных устройств резонаторного типа, анализ существующих СВЧ разрядных устройств технологического назначения, а также рассмотрение способов управления распределением СВЧ энергии в плазме.

Разработан исследовательский стенд, рассмотрены методики экспериментального исследования распределения электромагнитного поля с помощью зондов и разработана конструкция активного зонда.

Моделирование в ANSYS HFSS показало, 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. Анализируя распределение структуры СВЧ поля внутри кварцевой разрядной камеры можно предположить, что кварцевую разрядную камеру нужно рассматривать как отдельный цилиндрический объемный резонатор, ограниченный по торцам медными стенками. Наличие диссектора в объеме призматического резонатора и его вращение, оказывает существенное влияние на распределение СВЧ поля, так как он переотражает часть стоячих волн.

Приведены исследования влияния пластин из различных материалов в объеме плазмы СВЧ разряда на величину СВЧ энергии по оси резонаторной камеры. Во всех опытах наблюдается устойчивая периодичность максимумов в некоторых точках положения зонда относительно передней стенки: 60-80 мм, 190-200 мм, 260-280 мм, 320 мм. В присутствии плазмы СВЧ энергия падает примерно в 10 раз, так как энергия тратится на поддержание разряда. В камере без плазмы наибольший разброс от среднего показателя СВЧ энергии $\pm 85\%$, в присутствии плазмы наибольший разброс от среднего показателя СВЧ энергии $\pm 42\%$. Следовательно в присутствии плазмы наблюдается более равномерное распределение СВЧ энергии.

Уменьшение расстояния между кремниевыми пластинами приводит к уменьшению величины СВЧ мощности, регистрируемой между ними. Этот эффект может быть объяснен поглощением СВЧ мощности кремниевыми пластинами обладающими высокими тангенсом диэлектрических потерь, а также может быть частично связан с эффектом экранирования «активного зонда» пластинами от электромагнитных полей. Изменение расстояния между ситалловыми пластинами, являющиеся «прозрачными» для электромагнитных волн СВЧ диапазона, не приводит к изменению величины СВЧ мощности между ними. Зависимость расстояния между металлическими пласти-

нами и величиной СВЧ мощности между ними имеет сложный вид с максимумом зарегистрированной СВЧ мощности на расстоянии между пластинами 60-70 мм, соответствующего примерно половине длины, возбуждающей плазму электромагнитной волны ($f = 2,45 \pm 0,05$ ГГц) в резонаторе, что предположительно может быть объяснено образованием резонансного эффекта между металлическими пластинами.

При включенном диссекторе амплитуда колебаний величины СВЧ энергии по оси разрядной камеры уменьшается на 40-60% без плазмы и на 10-40% при наличии плазмы.

Магистерская диссертация выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составляет 81%. Цитирования обозначены ссылками на публикации, указанные в «Списке использованных источников».

Библиотека БГУИР

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Земляков, А. С. Моделирование распределения СВЧ энергии в камере плазмотрона резонаторного типа/ А.С. Земляков(научный руководитель С.И. Мадвейко) // 52-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 2016 г. / БГУИР. – Минск. – 2016.

2. Земляков, А. С. Моделирование распределения сверхвысокочастотной энергии в камере плазмотрона резонаторного типа/ А. С. Земляков (научный руководитель С. И. Мадвейко) // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ-2016): материалы 12-й Международной молодежной научно-технической конференции, Севастополь, 14-18 ноября 2016 г. / Севастопольский нац. Технический ун-т; редкол.: Ю.Б. Гимпилевич [и др.]. – Севастополь. – 2016.

3. Земляков, А. С. Исследование влияния расположения пластин из различных материалов в объёме плазмы СВЧ разряда на СВЧ энергию между ними / А. С. Земляков (научный руководитель С. И. Мадвейко) // 53-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 2017 г. / БГУИР. – Минск. – 2017.

Библиотека БГУИР