

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

УДК 533.9.08

Сабодаш Олег Александрович

Исследование распределения СВЧ мощности в плазмотроне
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

Развитие СВЧ газоразрядных устройств технологического назначения идет в направлении разработки СВЧ плазмотронов с большим плазменным объемом. Это обусловлено необходимостью обработки полупроводниковых пластин диаметром 200 и 300 мм, а также групповой обработки пластин с меньшим диаметром на операциях плазменной очистки, активирования поверхности подложек, радикального и плазменного травления, плазмохимического осаждения тонких пленок и др.[1] Такие СВЧ плазменные установки технологического назначения разрабатываются на базе объемных СВЧ резонаторов, в центре которых размещаются разрядные вакуумные камеры.

Причинами использования резонаторных систем являются: возможность обеспечения высокого уровня поглощаемой мощности в плазме; резонатор является хорошо согласованным соединителем тракта передачи СВЧ энергии с плазмой, так как его импеданс слабо меняется при изменении импеданса плазмы; резонатор сохраняет достаточно высокую добротность даже при наличии в нем плазмы.

Особенностью СВЧ разрядов является высокая степень ионизации (до 7%) и плотность плазмы (до 10^{13} см⁻³) по сравнению с традиционным ВЧ разрядами. Это обеспечивает сравнительно высокую концентрацию химически активных радикалов и фрагментов молекул в объеме плазмы СВЧ разрядов.

В современном мире существует потребность в модернизации оборудования и вложении огромных средств для улучшения и ускорения существующих процессов, также необходимость экономии энергии заставляет технологов уделять все более пристальное внимание процессам, происходящим в низкотемпературной газоразрядной плазме [2].

В рамках научной работы поставлена задача исследовать влияние электрических режимов источника питания на величину СВЧ мощности в объеме СВЧ разряда и влияние пластин на распределение СВЧ мощности в разрядной камере СВЧ плазмотрона. Полученные данные будут полезны для разработки и модернизации технологических установок.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Увеличение объема или улучшения качества выпускаемой продукции требует повышение мощностных характеристик СВЧ установок. Исследование распределения СВЧ мощности при разных режимах работы источника питания в вакуумной камере СВЧ плазмотрона, высокий уровень которой может оказать негативное влияние на полупроводниковые структуры, является актуальной задачей для исследования.

Цель и задачи исследования

Целью работы является установление зависимостей влияния режимов источника питания СВЧ магнетрона и пластин на распределение СВЧ мощности в объеме крупногабаритной плазменной камеры СВЧ плазмотрона резонаторного типа

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Проведение анализа конструктивных решений систем резонаторного типа для возбуждения СВЧ разряда большого объема технологического назначения.
2. Исследование распределения СВЧ мощности в плазме в зависимости от электрических параметров и режимов работы источника питания СВЧ магнетрона.

Объектом исследования является плазма СВЧ разряда возбуждаемая внутри крупногабаритной плазменной камеры СВЧ плазмотрона резонаторного типа.

Предметом исследования является распределение СВЧ мощности в плазме СВЧ разряда.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна

Модернизирована малогабаритная СВЧ плазменная установка, на базе которой проводились исследования. Новыми частями являются источник питания постоянного тока, система охлаждения магнетрона.

Выявлены зависимости величины мощности источника питания на распределение СВЧ энергии в плазме СВЧ разряд, влияние пластин на распределение СВЧ мощности в разрядной камере СВЧ плазмотрона резонаторного типа. Измерен уровень СВЧ мощности по длине разрядной камеры с плазмой и без плазмы.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Экспериментально установлено, что СВЧ мощность внутри плазменного объема в 9 раз меньше в случае ее отсутствия.
2. Экспериментально установлено, что при изменении мощности источника питания СВЧ магнетрона сохраняется характер распределения (максимумов и минимумов) СВЧ энергии в камере СВЧ плазмотрона.
3. Экспериментально установлено, что пластины, размещенные внутри резонаторной камеры из различных материалов, оказывают влияние на характер распределения максимумов СВЧ мощности в месте их расположения.

Теоретическая значимость

Определены влияние мощности источника питания на распределение СВЧ энергии в плазме СВЧ разряда и влияние пластин (металлических и кремниевых) на распределение СВЧ мощности, измерен уровень СВЧ мощности по длине разрядной камеры с плазмой и без плазмы.

Практическая значимость

Источник питания постоянного тока, который использовался для проведения экспериментов, может быть использован для проектирования новых и модернизации существующих СВЧ плазменных установок технологического назначения.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 56-й, 57-й научных конференциях студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР 2020 - 2021.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 4 публикации.

Проверка на антиплагиат

Проверка выполнялась с использованием онлайн ресурса antiplagiat.ru. Оригинальность диссертации составляет 82.87%. Заимствования и цитирования обозначены ссылками на публикации, указанные в «Списке использованных источников».

Библиотека БГУИР

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации 45 страниц, в том числе 32 иллюстрации.

Во введении приводится обоснование актуальности работы, тенденции развития СВЧ газоразрядных устройств, особенности использования и потребности в модернизации.

Первая глава носит обзорный характер. В ней проводится анализ научной литературы в направлении изучения текущих СВЧ установок и физические процессы взаимодействия СВЧ поля с плазмой. Проведен анализ существующих типов резонаторов, используемых в составе плазматронов, изучены существующие СВЧ-плазмотроны, используемые в производстве, изучены существующие СВЧ блоки, работающие в режиме непрерывного питания магнетрона, изучено взаимодействие СВЧ поля с плазмой.

Вторая глава содержит данные об исследовательском комплексе и методики проведения исследований распределения электромагнитного поля в разрядной камере СВЧ плазменной установки: структурная схема исследовательского комплекса, СВЧ плазменная установка, методика проведения исследований, выбор источника питания СВЧ магнетрона. Основу исследовательского комплекса составляет модернизированный источник питания постоянного тока; система охлаждения магнетрона; резонатор прямоугольной формы, внутри которого размещена вакуумная камера, представляющая собой кварцевую разрядную трубу; генератор электромагнитных колебаний (СВЧ генератор) на базе магнетрона М-105; система откачки, представляющая собой вакуумный насос; система подачи плазмообразующих и технологических газов; вакуумметр; система управления и контроля; зонд и измеритель мощности. Измерения распределения мощности СВЧ волны в объеме плазмы СВЧ разряда проводились методом "Активного зонда". Для достижения режима непрерывного питания магнетрона была выбрана схема электрическая принципиальная СВЧ генератора с источником постоянного тока.

В третьей главе диссертации представлены исследования влияния режимов источника питания на величину СВЧ мощности в объеме СВЧ разряда.

Результаты измерения СВЧ мощности по длине разрядной камеры с плазмой и без плазмы представлены на рисунке 1.

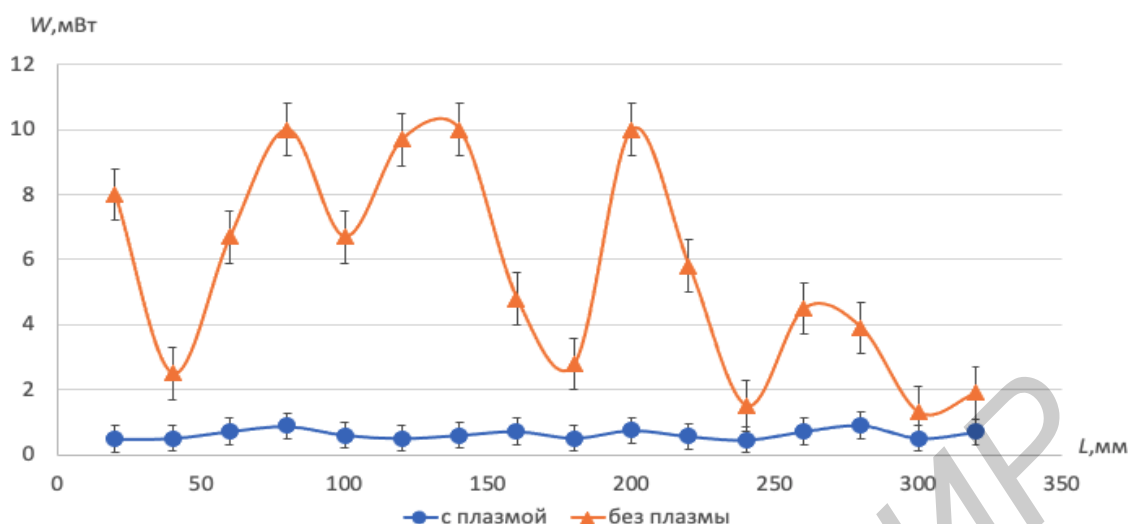


Рисунок 1 – Распределение уровня СВЧ энергии по оси вакуумной камеры с плазмой и без плазмы

Характер распределения СВЧ мощности с плазмой и без плазмы сохраняется, точки максимума и минимума имеют близкое месторасположения. СВЧ мощность внутри плазменного объема в 9 раз меньше в случае ее отсутствия. Эффект может быть объяснен затуханием электромагнитных волн по мере их прохождения вглубь плазмы (скин-эффект), также частичным экранированием «активного зонда».

Результаты исследования влияния мощности источника питания на распределение СВЧ энергии в плазме СВЧ разряда с использованием источника питания, построенного по схеме однополупериодного выпрямления с удвоением напряжения представлены на рисунке 2.

Средние значения мощности для 695 Вт, 1350 Вт, 1815 Вт равны соответственно 0,055 мВт, 0,0396 мВт, 0,0251 мВт. При увеличении поглощаемой мощности с 695 Вт до 1350 Вт (на 50%), наблюдается уменьшение средней мощности на 0,0153 мВт (28%); при увеличении поглощаемой мощности с 1350 Вт до 1815 Вт (на 26%); наблюдается уменьшение средней мощности на 0,0145 мВт (37%).

Можно сделать вывод, что изменение мощности источника питания не оказывает существенного влияния на характер распределения СВЧ энергии в плазменном объеме. Увеличение емкости, а соответственно и подводимой мощности, ведет к уменьшению мощности СВЧ разряда в объеме СВЧ плазмы.

Результаты исследования влияния мощности источника питания на распределение СВЧ энергии в плазме СВЧ разряда при использовании СВЧ генератора с источником постоянного тока представлены на рисунке 3.

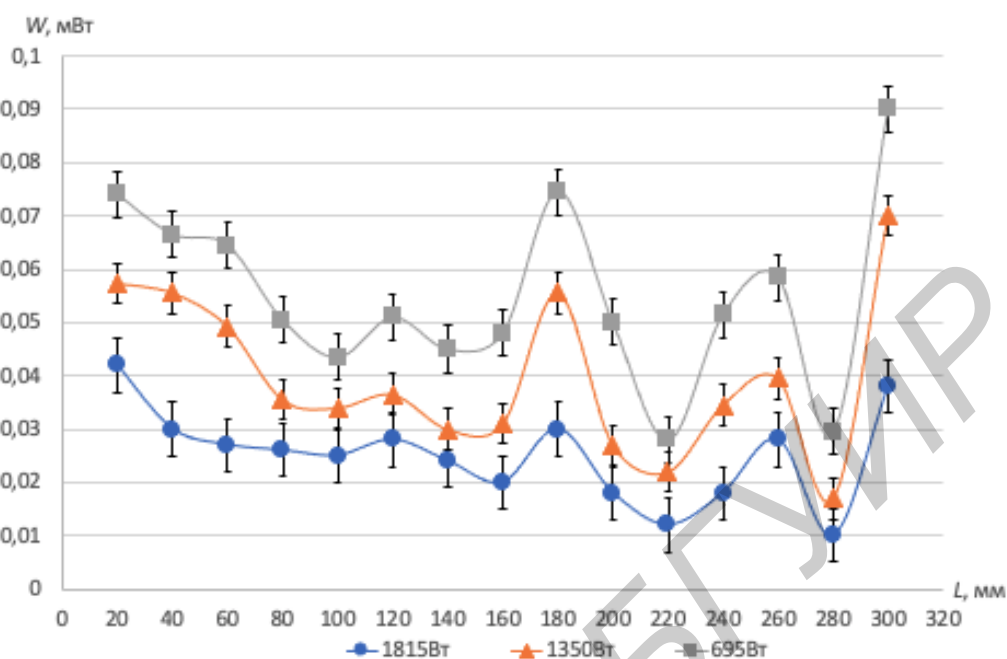


Рисунок 2 – Распределение уровня СВЧ энергии в объеме плазмы СВЧ разряда по оси вакуумной камеры в зависимости от мощности, потребляемой источником питания от сети

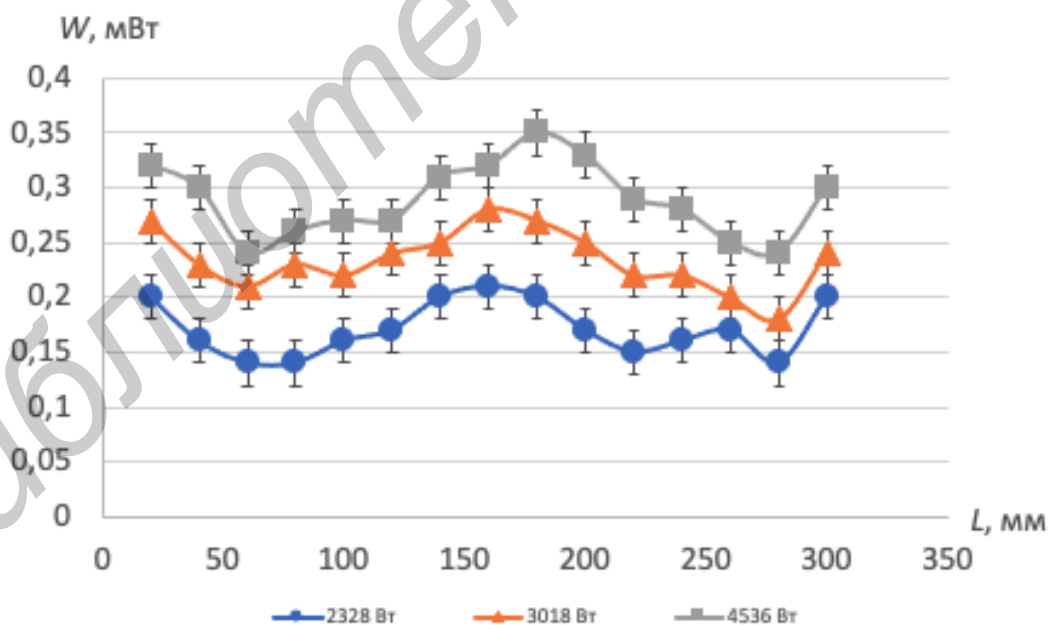


Рисунок 3 – Распределение уровня СВЧ энергии в объеме плазмы СВЧ разряда по оси вакуумной камеры в зависимости от мощности, потребляемой источником питания от сети

Средние значения мощности для 2328 Вт, 3018 Вт, 4536 Вт равны соответственно 0.171 мВт, 0,234 мВт, 0,289 мВт. При увеличении

поглощаемой мощности с 2328 Вт до 3018 Вт (на 23%), наблюдается увеличение средней мощности на 0,063 мВт (27%); при увеличении поглощаемой мощности с 3018 Вт до 4536 Вт (на 34%); наблюдается увеличение средней мощности на 0,055 мВт (19%). При увеличении поглощаемой мощности с 2328 Вт до 3018 Вт (на 23%), наблюдается увеличение средней мощности на 0,063 мВт (27%);

Можно сделать вывод, что при изменении мощности источника питания СВЧ магнетрона сохраняется характер распределения (максимумов и минимумов) СВЧ энергии в камере СВЧ плазмотрона, а СВЧ мощность, регистрируемая в объеме плазмы, прямо пропорциональна мощности, поглощаемой источником питания от сети.

Результаты исследования влияния пластин на распределение СВЧ мощности в разрядной камере СВЧ плазмотрона резонаторного типа представлены на рисунке 4 (при емкости конденсаторов 0.5 мкФ), на рисунке 5 (при емкости конденсатора 1 мкФ).

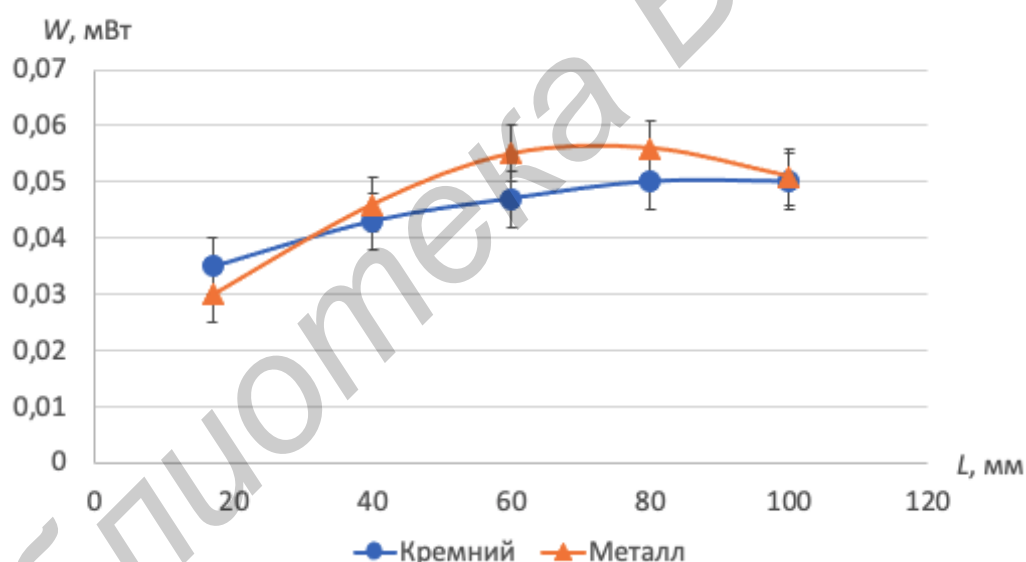


Рисунок 4 – Зависимость величины СВЧ энергии между парами кремниевых и металлических пластин в плазменном объеме при емкости конденсатора 0.5 мкФ от расстояния между ними

Значения СВЧ мощности между металлическими пластинами больше, чем между кремниевыми. При емкости 0.5 мкФ среднее значение мощности между металлическими пластинами больше на 9 % чем для кремниевых. При емкости 1 мкФ среднее значение мощности между металлическими пластинами больше на 22 % чем для кремниевых.

Зависимость СВЧ мощности между парами металлических пластин от расстояния между ними имеет ярко выраженные пиковые точки,

предположительно обусловленные образованием резонансного эффекта между пластинами.

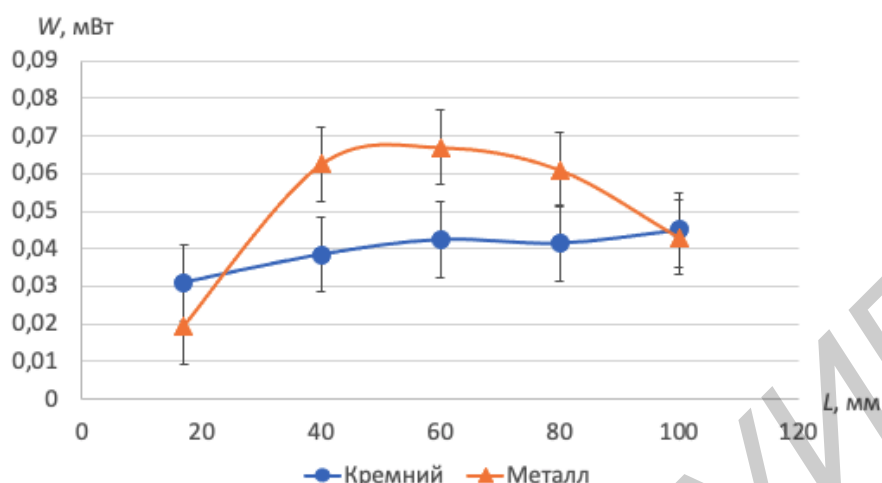


Рисунок 5 – Зависимость величины СВЧ энергии между парами кремниевых и металлических пластин в плазменном объёме при емкости конденсатора 1 мкФ от расстояния между ними

Характер зависимости СВЧ мощности между парами кремниевых пластин от расстояния между ними можно объяснить высокой поглотательной способностью, обусловленной высоким углом тангенса диэлектрических потерь и частичным экранированием СВЧ энергии между пластинами.

При анализе данных графиков 2, 4, 5, видно снижение максимума СВЧ мощности в точке расположения пластин. Таким образом можно сделать вывод, что пластины, размещенные внутри резонаторной камеры из различных материалов, оказывают влияние на характер распределения максимумов СВЧ мощности в месте их расположения.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования проведен анализ конструкторских решений СВЧ разрядных устройств резонаторного типа. Проведен анализ существующих СВЧ-плазмотронов технологического назначения и СВЧ блоков, работающих в режиме непрерывного питания магнетрона.

Разработан исследовательский стенд. Выбрана методика экспериментальных исследований по изучению характера распределения СВЧ мощности. Экспериментальные исследования проводились с использованием источника питания, построенного по схеме однополупериодного выпрямления с удвоением напряжения, и с использованием источника питания постоянного тока на основе трёх повышающих трансформаторов.

Измерения СВЧ мощности по длине разрядной камеры с плазмой и без плазмы показали, что характер распределения СВЧ мощности сохраняется. СВЧ мощность внутри плазменного объема в 9 раз меньше в случае ее отсутствия. Эффект может быть объяснен затуханием электромагнитных волн по мере их прохождения вглубь плазмы (скин-эффект), также частичным экранированием «активного зонда».

Исследование влияния мощности источника питания, построенного по схеме однополупериодного выпрямления с удвоением напряжения, на распределение СВЧ энергии в плазме СВЧ разряда показало, что изменение мощности источника питания не оказывает существенного влияния на характер распределения СВЧ энергии в плазменном объеме. Увеличение мощности источника питания ведет к уменьшению СВЧ мощности внутри плазмы.

Исследование влияния мощности источника питания, постоянного тока на основе трёх повышающих трансформаторов, на распределение СВЧ энергии в плазме СВЧ разряда показало, что при изменении мощности источника питания СВЧ магнетрона сохраняется характер распределения (максимумов и минимумов) СВЧ энергии в камере СВЧ плазмотрона, а СВЧ мощность, регистрируемая в объеме плазмы, прямо пропорциональна мощности, поглощаемой источником питания от сети.

Экспериментально установлено, что уменьшение расстояния между пластинами (металлическими и кремниевыми) с 100 мм до 20 мм приводит к уменьшению СВЧ энергии между ними.

Полученные результаты могут быть полезны при проектировании нового и модернизации существующего технологического оборудования

СВЧ плазмохимической обработки материалов и изделий электронной техники.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1. Сабодаш О.А. Исследование электрических параметров источника тока для питания СВЧ магнетрона средней мощности / О.А. Сабодаш, О.И. Тихон // 56-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР. – 2020. – С. 399-400.

2. Сабодаш О.А. Анализ электрических режимов работы источника постоянного тока для питания СВЧ магнетрона средней мощности / О.А. Сабодаш, О.И. Тихон // 56-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР. – 2020. – С. 372-373.

3. Сабодаш О.А. Анализ способов обеспечения температурного режима работы СВЧ магнетрона средней мощности при электропитании от источника постоянного тока / О.А. Сабодаш, К.С. Сарамбаев // 56-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР. – 2020. – С. 374-375.

4. Сабодаш О.А. Исследование влияния электрических режимов питания СВЧ магнетрона на распределение СВЧ энергии в плазме СВЧ разряда / О.А. Сабодаш, О.И. Тихон // 57-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР. – 2021. – С. 244-245.