

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

УДК [621.385:551.54]:621.372

Страхович
Владислав Игоревич

СВЧ плазмотрон атмосферного давления
волноводно-резонаторного типа

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-38 80 02 "ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ
ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ"

Научный руководитель

Мадвейко Сергей Игоревич
кандидат технических наук, доцент

Минск 2020

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия вопросам использования электромагнитной энергии сверхвысокочастотного диапазона для повышения энергосбережения в различных технологических процессах уделяется значительное внимание. СВЧ-энергия востребована не только в традиционных процессах, но и для получения чистой плазмы. Особенности СВЧ-плазмы состоят в её высокой чистоте, которую нельзя получить с помощью обычных плазмотронов, в более эффективном вводе энергии в СВЧ-плазму и в возможности получения плотной высокотемпературной плазмы в небольших объемах. Всё это предопределяет перспективность исследования плазмы СВЧ-разряда и применения её для решения новых прикладных задач.

Плазма СВЧ-разряда может использоваться в следующих процессах: получение водорода; получение оксидов и нитридов высокочистых материалов; плазмохимическая переработка углей, включая их пиролиз и газификацию; энергоэффективный поджиг угольной пыли; осаждение алмазов и алмазоподобных пленок; осаждение покрытий на кремниевых подложках и травление поверхности; использование СВЧ-плазмы в космической энергетике, в частности для имитации вхождения спутников в атмосферу Земли; в источниках света на основе СВЧ-разряда; в спектроскопии.

С развитием СВЧ-техники и магнетронных генераторов появилось большое количество научных работ по созданию и применению СВЧ-плазмотронов, работающих на воздухе атмосферного давления на частоте 2,45 ГГц. Следует отметить, что перечень проблем, которые можно решать с помощью СВЧ-плазмы, непрерывно расширяется.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Целью данной работы является моделирование и исследование СВЧ-плазмотрона атмосферного давления. В рамках решения этой задачи рассматриваются следующие вопросы:

- актуальность использования СВЧ-плазмотронов для решения прикладных задач;
- расчет волноводно-резонаторной системы для передачи СВЧ энергии;
- моделирование конструкций волноводно-резонаторных систем;
- моделирование влияния излучателя СВЧ магнетрона на распределение СВЧ энергии в волноводно-резонаторной системе;

- моделировании влияния разрядной области в волноводе на распределение СВЧ энергии в волноводно-резонаторной системе;
- моделирование нагрева полупроводниковой пластины в СВЧ резонаторе прямоугольного типа;
- моделирование нагрева полупроводниковых пластин в СВЧ резонаторе волноводно-щелевого типа.

Объектом исследования является СВЧ плазмотрон атмосферного давления волноводно-резонаторного типа для формирования СВЧ-разряда атмосферного давления.

Предметом исследования является распределение электромагнитной энергии и в объеме волноводно-резонаторной системы.

Актуальность темы магистерской диссертации заключается в том, что для исследований возможности использования СВЧ-плазмы в прикладных задачах большой интерес представляют СВЧ-плазмотрон волноводно-резонаторного типа. Таким образом, успехи в моделировании СВЧ-плазмотронов и в изучении свойств СВЧ-плазмы могут привести к появлению большого числа новых энергосберегающих технологий, позволяющих решить широкий круг современных проблем.

На защиту выносятся приведенные ниже положения:

1) Модель СВЧ плазмотрона, позволяющая изучить влияние конструктивных элементов на распределение электромагнитной энергии в волноводно-резонаторной системе.

2) На основании результатов моделирования выбраны оптимальные геометрические размеры излучающей антенны СВЧ магнетрона в волноводе, при которых достигается напряженность электрического поля в центральной области резонатора $E = 758050$ В/м при мощности СВЧ излучения 1000 Вт.

3) На основании результатов моделирования нагрева полупроводниковой пластин в СВЧ резонаторе прямоугольного типа установлена зависимость влияния нагрева полупроводниковой пластин от времени воздействия СВЧ энергией, зависимость имеет линейный характер, время выхода на стационарный температурный режим (около 450 °С), составляет больше 100 с.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников, включающего 45 наименований. Общий объем диссертации составляет 63 страницы, включая 30 рисунков и 2 таблицы, 1 приложение.

По материалам диссертации опубликовано 5 работ в сборниках материалов научных конференций.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** описывается актуальность темы работы и состояние исследуемой проблемы к настоящему времени, формулируются основные цели и задачи диссертации.

В **первой главе** выполнен обзор работ по СВЧ-плазмотронам атмосферного давления, разработанным за последние годы для решения различных прикладных задач. Показана потребность создания энергетически эффективного СВЧ-плазмотрона атмосферного давления, работающего при малой мощности СВЧ-питания.

Обзор современного состояния разработок СВЧ-плазмотронов для решения прикладных задач, показал нарастающий интерес к различным направлениям и способам использования плазмы СВЧ-разряда. Рассмотрены конструкции существующих устройств, генерирующих СВЧ-плазму. Показана тенденция в создании СВЧ-плазмотронов атмосферного давления для исследовательских целей, которая заключается в использовании доступных магнетронных генераторов [1- А].

Во **второй главе** дан обзор современных работ по использованию СВЧ-плазмы, в котором показан широкий спектр ее технологических применений. Рассмотрены различные конструкции устройств, генерирующих СВЧ-плазму, и оценена их эффективность. Приведены основные параметры и характеристики СВЧ-плазмы. Описаны механизмы воздействия СВЧ-плазмы [2-А].

В **третьей главе** выполнен расчет волноводно-резонаторной системы для передачи СВЧ энергии. Описан процесс моделирования конструкций волноводно-резонаторных систем в интегрированной программной среде *COMSOL Multiphysics*.

В **четвертой главе** приведены результаты моделирования влияния излучателя магнетрона на распределение СВЧ энергии в волноводно-резонаторной системе. По полученным расчетным данным было смоделировано распределение СВЧ энергии (рисунок 4.1).

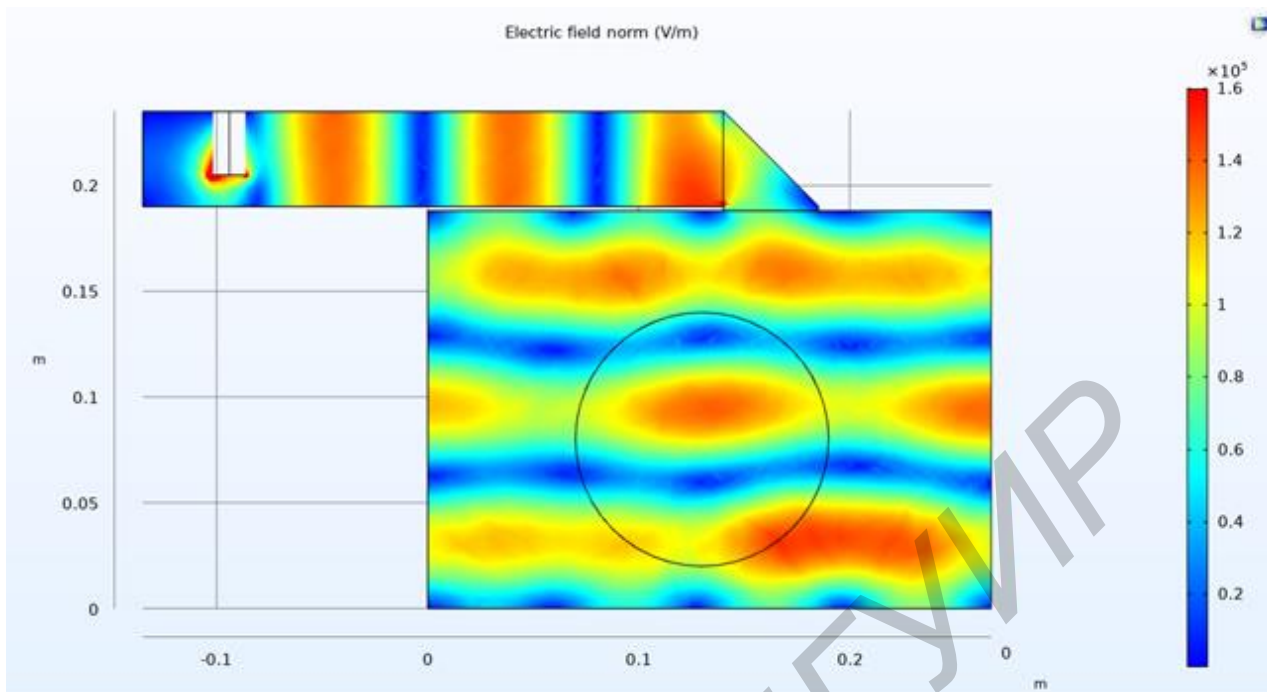


Рисунок 1 – Распределение СВЧ энергии в плазмотроне волноводно-резонаторного типа

Из рисунка видно, что при моделировании СВЧ-плазмотрона по расчетным данным (диаметр антенны 18 мм, расстояние от торца стенки волновода до центра антенны магнетрона $L_2 = 41$ мм, длина антенны магнетрона $L_1 = 28$), мы получили хорошее распределение СВЧ-энергии в резонаторе, напряженности электрического поля в центре резонаторной камеры достигает значения $E = 794090$ В/м при мощности излучения $P = 1$ кВт.

При помощи *COMSOL Multiphysics* было проведено: моделирование зависимости напряженности электрического поля энергии от расстояния L_2 от торца стенки волновода до центра антенны магнетрона (рисунок 2); моделирование зависимости напряженности электрического поля от длины антенны L_1 (рисунок 3); моделирование зависимости напряженности электрического поля от площади торца антенны (рисунок 4) [3-А].

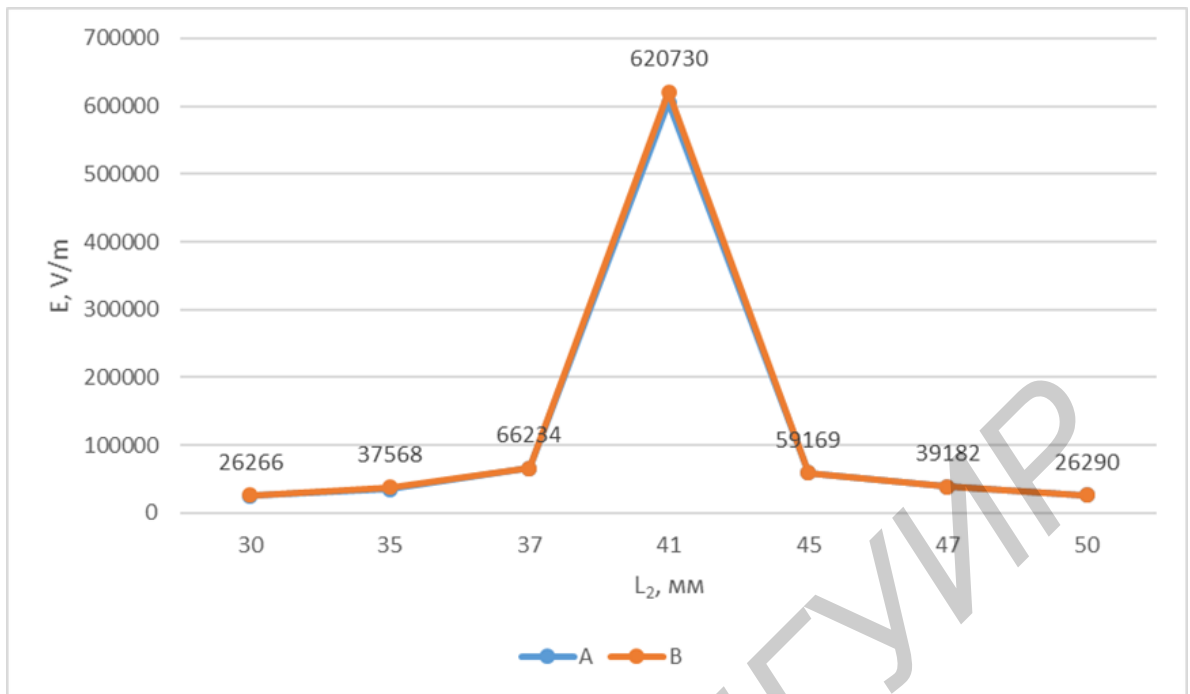


Рисунок 2 – Зависимость напряженности электрического поля от расстояния L_2 (от торца стенки волновода до центра антенны магнетрона)

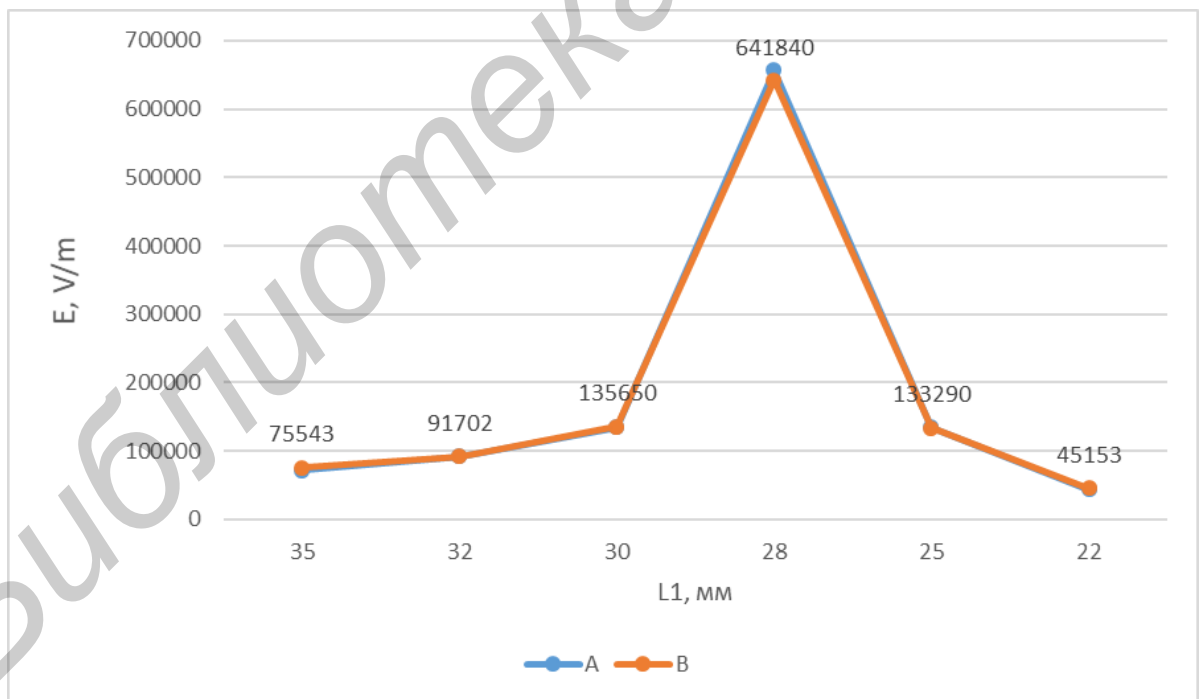


Рисунок 3 – Зависимость напряженности электрического поля от длины антенны L_1

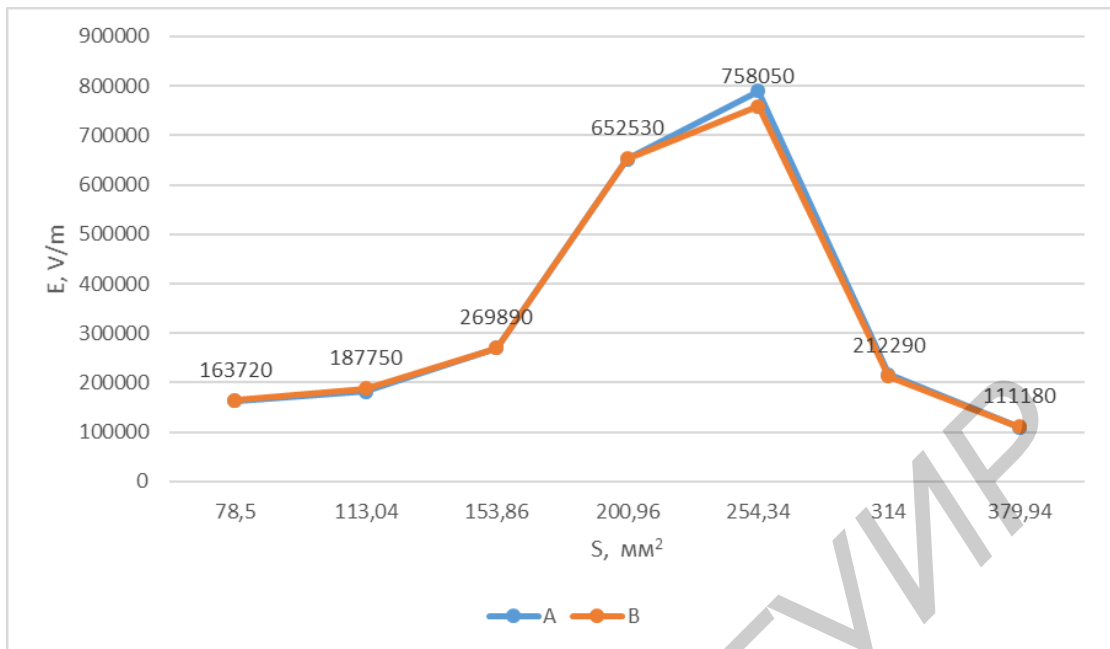


Рисунок 4 – Зависимость напряженности электрического поля от площади торца антенны

Так же было проведено моделирование распределения СВЧ энергии от мощности излучения при различных данных, в частности, при диаметре антенны 18 мм, L2 = 41 мм, L1 = 28 мм и при диаметре антенны 16 мм, L2 = 45 мм, L1 = 30 мм (рисунок 5).

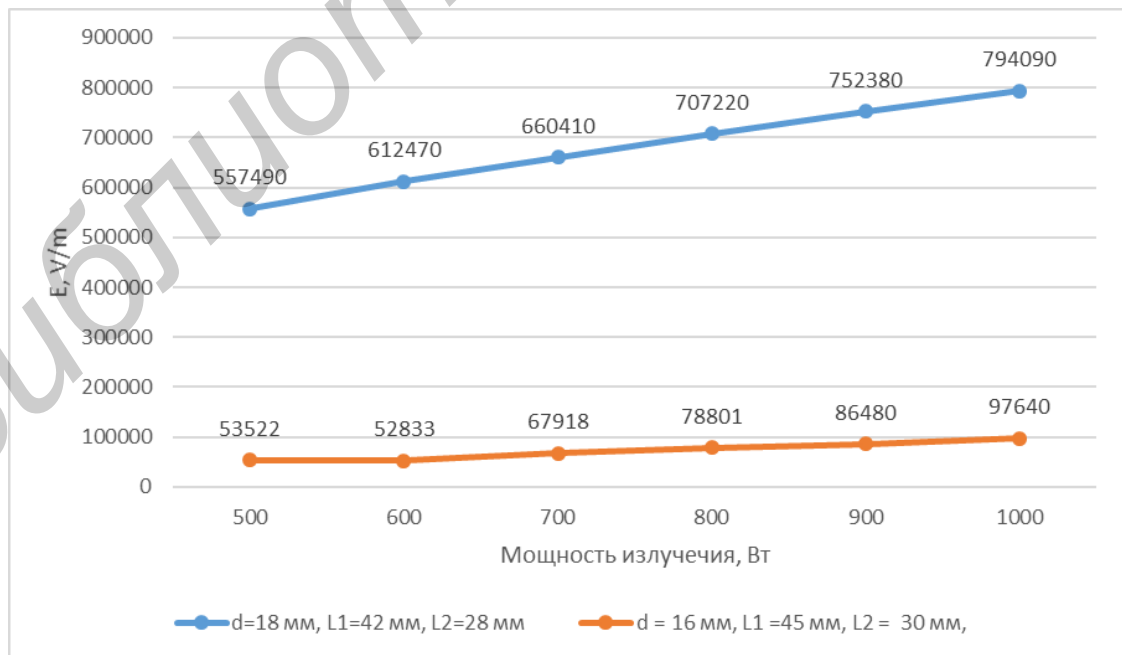


Рисунок 5 – Зависимость напряженности электрического поля от мощности излучения

Из рисунка 2, 3 и 4 видно, что расстояние L_2 и длина антенны магнетрона L_1 оказывают существенное влияние на распространения СВЧ-энергии, при $L_2 = 41$ мм и $L_1 = 28$ мм напряженности электрического поля в несколько раз выше, и имеет максимальное значение $E = 641840$ В/м.

Как показано на рисунке 5, зависимость напряженности электрического поля от мощности излучения имеет линейный характер и при правильно выбранных геометрических размерах напряженность электрического поля может достигать значения $E = 794090$ В/м.

В результате моделирования выбраны оптимальные параметры (диаметр антенны 18 мм, $L_2 = 41$ мм, $L_1 = 28$ мм), которые могут быть учтены при изготовлении плазмотрона атмосферного давления волноводно-резонаторного типа.

Было проведено моделирование влияния разрядной области в волноводе на распределение СВЧ в плазмотроне волноводно-резонаторной системе. Модель плазмотрона с разрядной областью показана на рисунке 6.

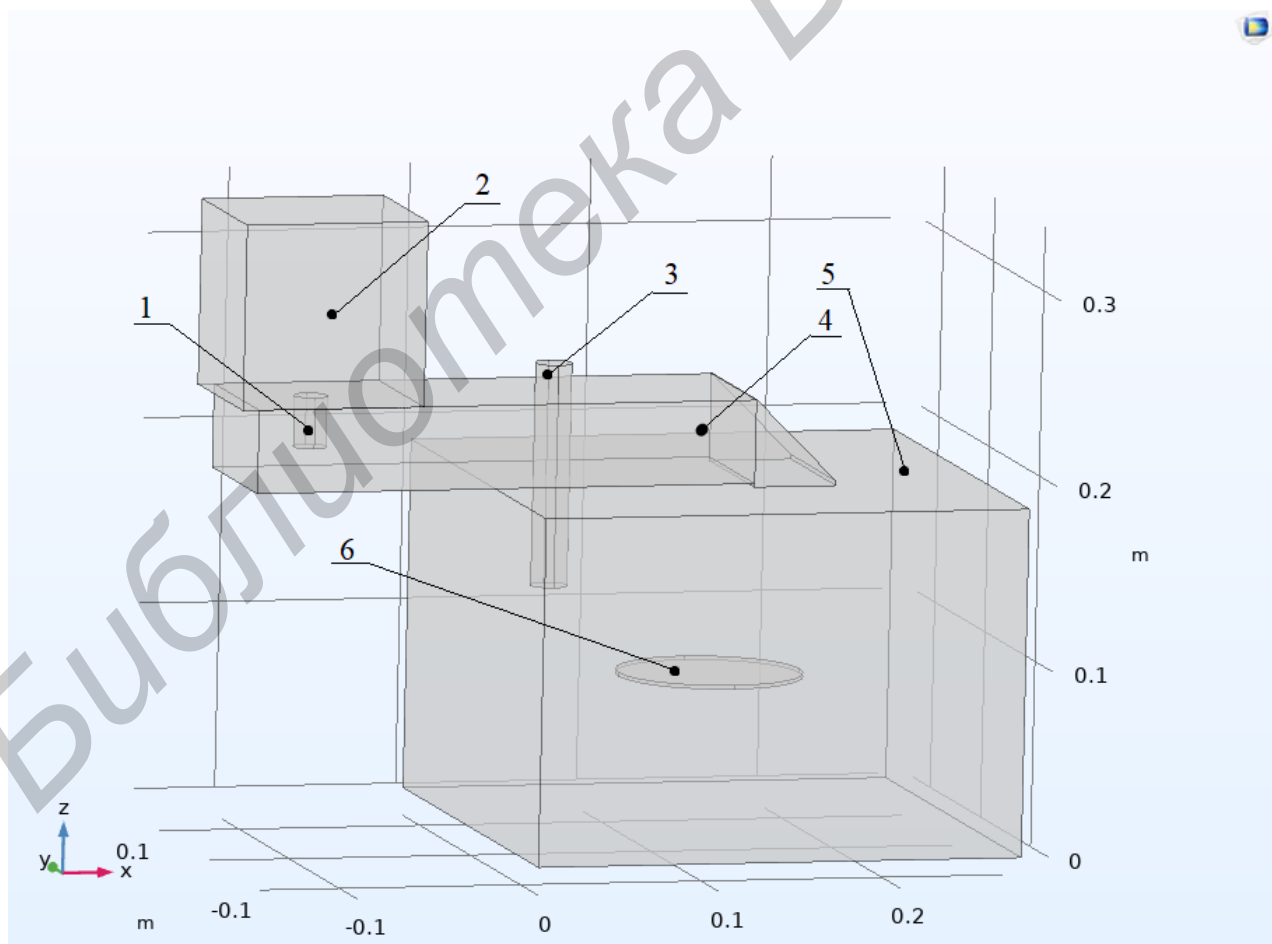


Рисунок 6 – Модель СВЧ резонатора прямоугольного типа с разрядной областью: 1 – антенна магнетрона; 2 – магнетрон; 3 – разрядная область; 4 – волновод; 5 – резонатор; 6 – образец

Модель разрядной области представляет собой цилиндр, который характеризуется определенной проводимостью σ . Согласно литературе [2], проводимость σ СВЧ-разряда варьируется от $1 \cdot 10^{-3}$ См/м до $1 \cdot 10^{-1}$ См/м.

При помощи COMSOL Multiphysics было проведено моделирование зависимости напряженности электрического поля энергии от диаметра трубки разрядной области (D) (рисунок 7). Измерения напряженности электрического поля проводилось в центральной область резонатора.

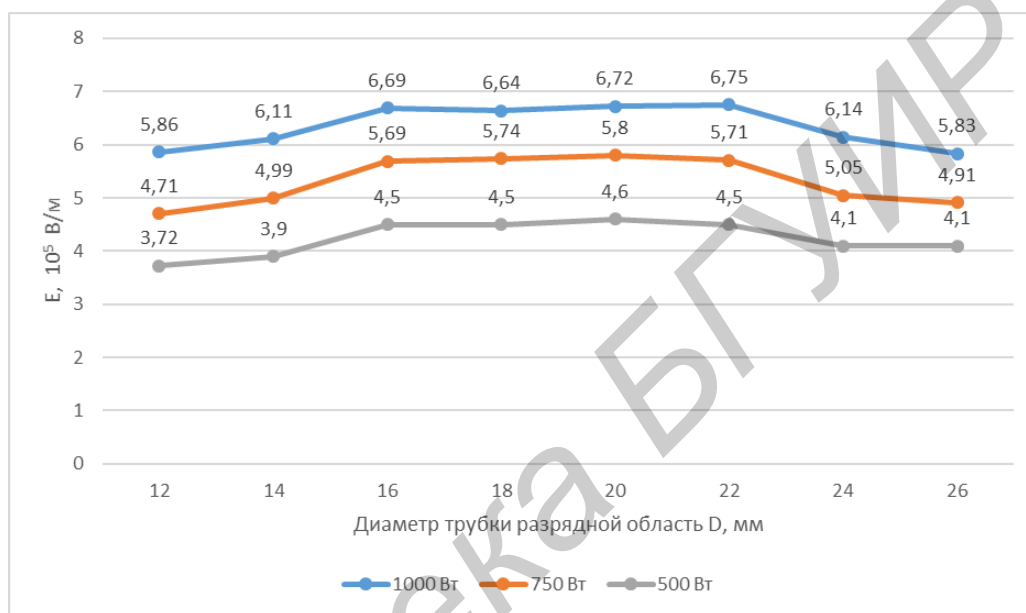


Рисунок 7 – Зависимость напряженности электрического поля от диаметра трубки разрядной области (D)

Как показано на рисунке 7, зависимость напряженности электрического поля от диаметра трубки разрядной области (D) имеет нелинейный характер.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что диаметр трубки разрядной области несущественно влияет на напряженность электрического поля в плазматроне волноводно-резонаторного типа с разрядной областью.

Для моделирования распределения температуры использовалась полость микроволновой печи размером 42x39x21 см. Конфигурация показана на рисунке 4.8, где также показан цилиндрический образец, размещенный в центре полости. Магнетрон с выходной мощностью 1 кВт излучает внутрь печи с частотой $2,45 \pm 0,25$ ГГц.

На рисунке 10, где показано изменение температуры в зависимости от времени воздействия на образец СВЧ-энергией, мы наблюдаем, что с

увеличением времени воздействия изменение температуры между различными точками увеличивается, что может негативно сказаться на материале.

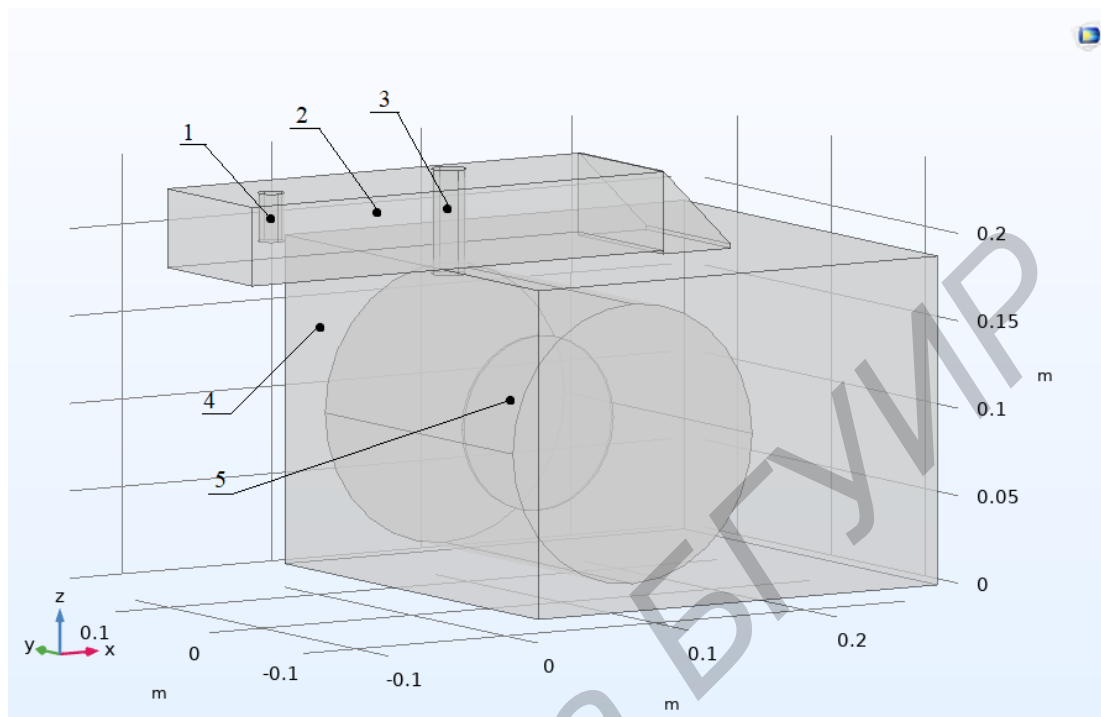


Рисунок 8 – Модель СВЧ резонатора прямоугольного типа: 1 – антенна магнетрона; 2 – волновод; 3 – разрядная область; 4 – камера резонатора; 5 – образец

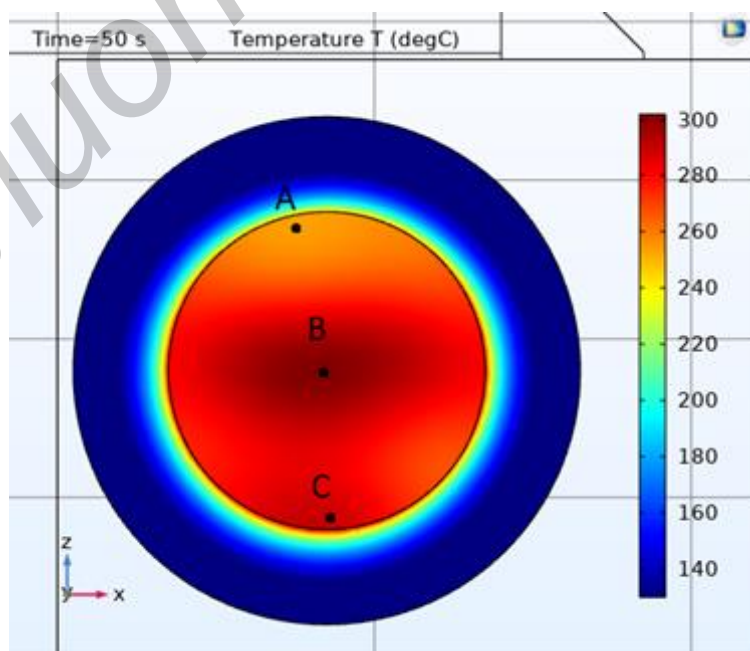


Рисунок 9 – Распределение температуры в образце при времени воздействия $t = 50$ с

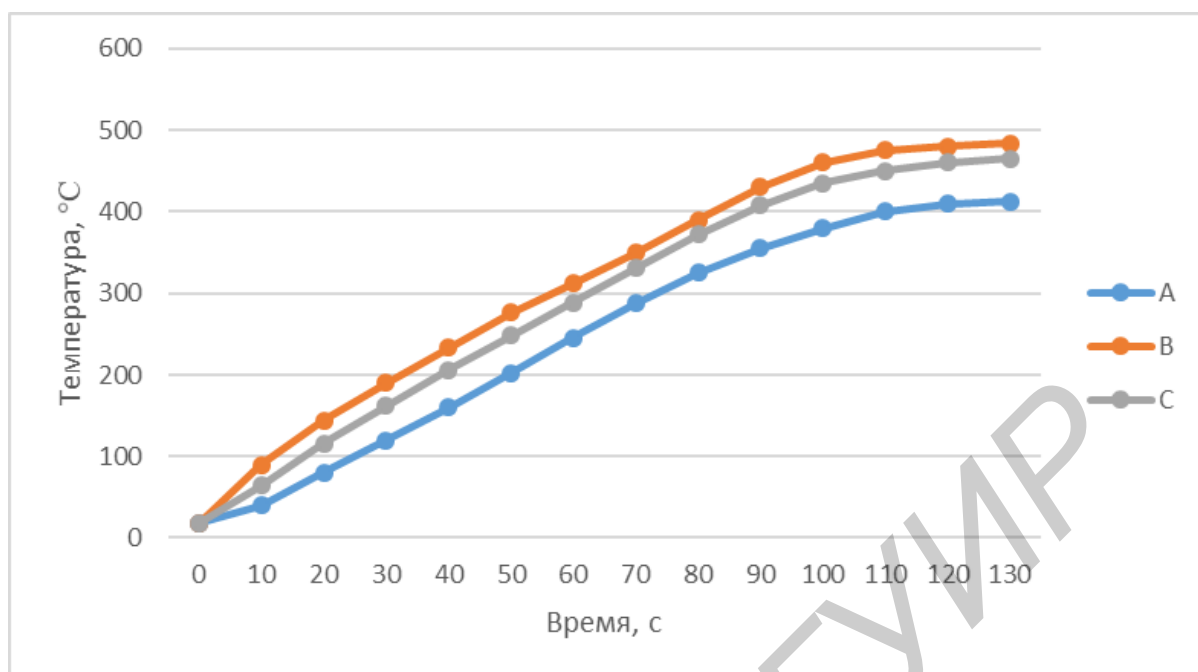


Рисунок 10 – Изменение температуры в образце, в 3 разных точках

Результаты моделирования показали, что температура отдельных локальных областей платины может отличаться на 80 °С, время выхода на стационарный температурный режим более 100 с. Полученный результаты необходимо учитывать при разработке новых технологических процессов нагрева и плазмохимической обработки полупроводниковых материалов [4-А].

Проведено моделирование распределения температуры кремниевой платине диаметром 200 мм расположенной внутри резонатора волноводно-щелевого типа, конфигурация которого показана на рисунке 11.

Выходная мощность СВЧ магнетрона – 1 кВт. Частота СВЧ колебаний внутри резонатора - 2,45 ГГц.

На рисунке 12 показано, что помещенная в резонатор пластина характеризуется неравномерностью температуры, которая может быть связана с неравномерностью распределения СВЧ энергии в объёме резонатора.

На рисунке 13 показано изменение температуры в различных точках на поверхности платины в зависимости от времени воздействия СВЧ энергией. Установлено, что с увеличением времени воздействия изменение температуры между различными точками увеличивается, что в процессе плазмохимической обработки может привести к неравномерности процесса, но и к образованию внутренних деформаций в материале пластины.

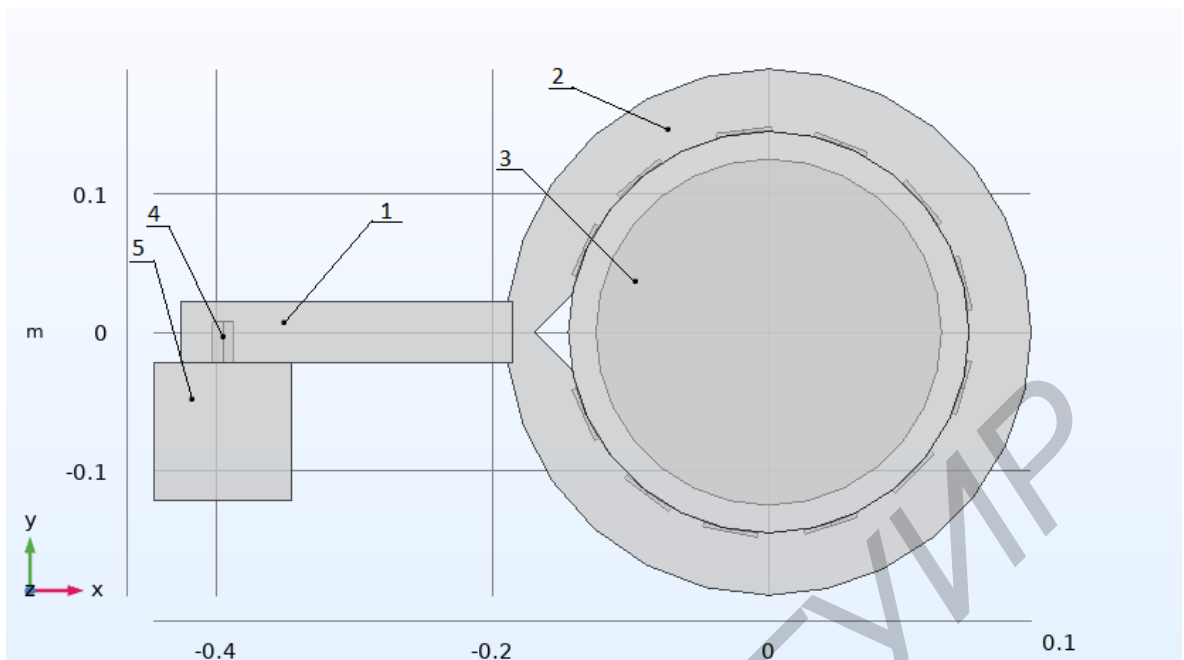


Рисунок 11– Конфигурация резонатора, используемая при моделировании:
 1 – волновод, 2 – корпус резонатора, 3 – образец, 4 – антенна магнетрона, 5 – магнетрон

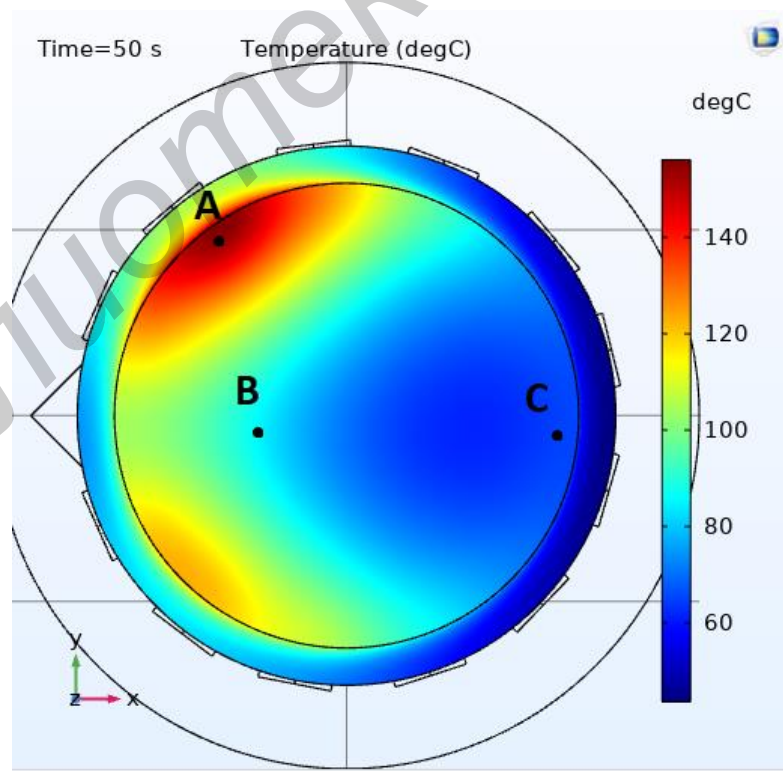


Рисунок 12 – Распределение температуры в образце при времени воздействия $t = 50$ с

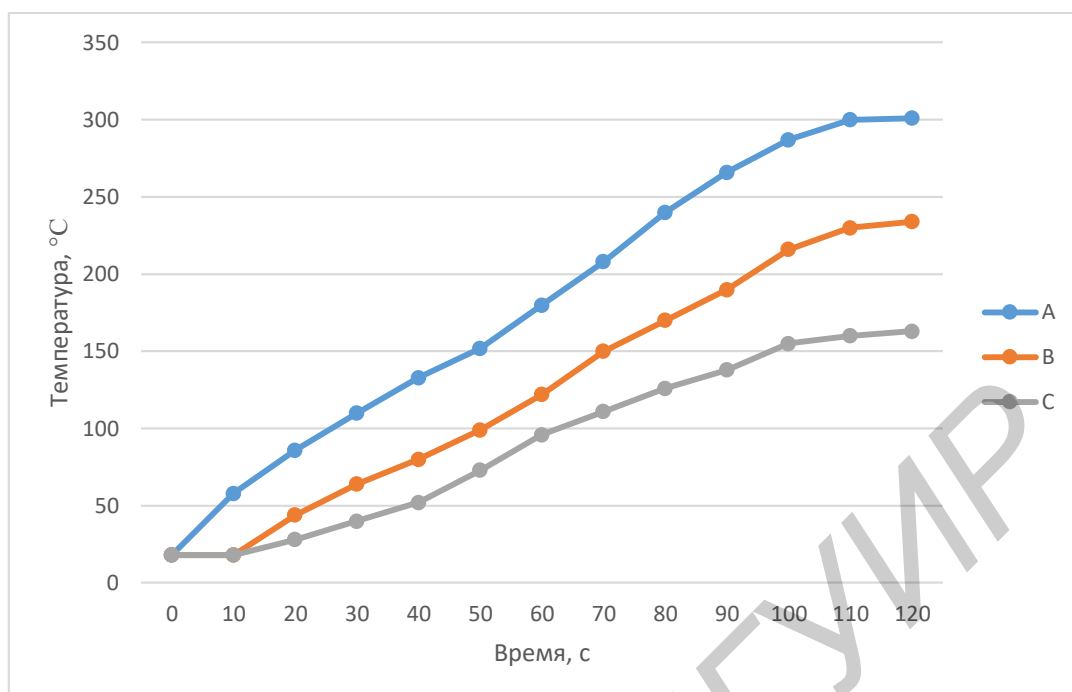


Рисунок 13 – Изменение температуры в образце, в 3 разных точках

Результаты моделирования показали, что температура отдельных локальных областей платины может отличаться на 150 °C, время выхода на стационарный температурный режим более 100 с. Полученный результаты необходимо учитывать при разработке новых технологических процессов нагрева и плазмохимической обработки полупроводниковых материалов [5-А].

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования возможности использования СВЧ-плазмы в прикладных задачах было проведено моделирование конструкций волноводно-резонаторных систем в интегрированной программной среде COMSOL Multiphysics, выполнен расчет волноводно-резонаторной системы для передачи СВЧ энергии.

По результатам моделирования влияния излучателя СВЧ магнетрона на распределение СВЧ энергии в волноводно-резонаторной системе можно сделать вывод, геометрические размеры (диаметр антенны магнетрона, расстояние L_2 от торца стенки волновода до центра антенны магнетрона, длина антенны L_1) оказывают существенное влияние на величину E .

В результате моделирования выбраны оптимальные параметры (диаметр антенны 18 мм, $L_2 = 41$ мм, $L_1 = 28$ мм), которые могут быть учтены при изготовлении плазмотрона атмосферного давления волноводно-резонаторного типа.

По результатам моделирования зависимости напряженности электрического поля энергии от диаметра трубки разрядной области, можно сделать вывод, что геометрические размеры трубки разрядной области несут существенное влияние на величину E . Зависимость напряженности электрического поля от диаметра трубки разрядной области (D) имеет нелинейный характер.

Результаты моделирования нагрева полупроводниковых пластин в СВЧ резонаторе прямоугольного типа показали, что температура отдельных локальных областей платины может отличаться на 80 °С, время выхода на стационарный температурный режим более 100 с.

По результатам моделирования распределения температуры кремниевой платине диаметром 200 мм, расположенной внутри резонатора волноводно-щелевого типа, можно сделать вывод, что температура отдельных локальных областей платины может отличаться на 150 °С, время выхода на стационарный температурный режим более 100 с.

Полученные результаты при моделировании нагрева полупроводниковых пластин в СВЧ резонаторе прямоугольного и волноводно-щелевого типа необходимо учитывать при разработке новых технологических процессов нагрева и плазмохимической обработки полупроводниковых материалов.

Магистерская диссертация выполнена самостоятельно и проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составляет 83,54 % (ПРИЛОЖЕНИЕ А). Цитирования обозначены ссылками на публикации, указанные в списке использованных источников.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1-А] Страхович, В. И. Способы возбуждения сверхвысокочастотного разряда / В.И. Страхович (научный руководитель С.И. Мадвейко) // Электронные системы и технологии : 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-26 апреля 2019 г.: сборник тезисов докладов / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 369-370.

[2-А] Страхович, В. И. Характеристика и область применения сверхвысокочастотного разряда/ В. И. Страхович (научный руководитель С.И. Мадвейко) // Электронные системы и технологии: 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-26 апреля 2019 г.: сборник тезисов докладов / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 368.

[3-А] Страхович, В.И. Исследование влияния конструкции излучательной антенны магнетрона на распределение СВЧ энергии в волноводно-резонаторной системе / В.И. Страхович, А.С. Левданский (научный руководитель С.И. Мадвейко) // Электронная техника и технология: сб. материалов 56-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР – Минск: БГУИР, 2020. – С. 392-393.

[4-А] Страхович, В.И. Исследование нагрева полупроводниковых пластин в свч резонаторе волноводно-щелевого типа / В.И. Страхович, А.С. Левданский, Н.Д. Заяц (научный руководитель С.И. Мадвейко) // Электронная техника и технология: сб. материалов 56-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР – Минск: БГУИР, 2020. – С. 394-395.

[5-А] Левданский, А. С. Исследование нагрева полупроводниковых пластин в СВЧ резонаторе прямоугольного типа / В.И. Страхович, А.С. Левданский (научный руководитель С.И. Мадвейко) // Электронная техника и технология: сб. материалов 56-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР – Минск: БГУИР, 2020. – С. 350-351.