

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

УДК 533.9.082.74 : 621.385

Бондаренко
Анна Сергеевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО НАГРЕВА СВЧ ЭНЕРГИЕЙ
КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН В РЕЗОНАТОРНОЙ КАМЕРЕ СВЧ
ПЛАЗМОТРОНА**

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра

По специальности 1-39 80 03 «Электронные системы и технологии»

Научный руководитель
Мадвейко Сергей Игоревич
кандидат технических наук

Минск 2023

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Нагрев полупроводников занимает важное место в большинстве физико-химических процессов производства микроэлектроники. От равномерности нагрева и воспроизводимости процесса нагрева от операции к операции зависит качество изделий микроэлектроники.

Существует несколько видов технологического нагрева материалов, среди которых ИК-нагрев, быстрый термический отжиг, резистивный нагрев. В диссертационной работе проводится исследование СВЧ-нагрева.

Одной из главных проблем СВЧ нагрева является неравномерность распределения температуры по кремниевым пластинам. К такому приводит наличие неоднородности распределения электрического поля в объеме резонатора. Следствием такого является неравномерность скоростей обработки материалов. В связи с этим исследование, с целью поиска оптимального способа перераспределения СВЧ энергии в объеме резонатора, является актуальным.

Актуальными задачами являются управление нагревом при СВЧ плазменной обработке и исследование возможности реализации разогрева пластины до начала процесса плазмообразования без использования специальных нагревательных элементов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Диссертационная работа выполнена в рамках ГБ 2021-26 Физико-химические процессы формирования твердотельных структур электронной, электронно-оптической и медицинской техники «ЧАСТЬ 1 Материалы и процессы формирования твердотельных структур электронной техники» 2021-2023 г».

Актуальность темы исследования

Нагрев полупроводников занимает важное место в большинстве физико-химических процессов производства микроэлектроники. От равномерности нагрева и воспроизводимости процесса нагрева от операции к операции зависит качество изделий микроэлектроники.

Цели и задачи исследования

Целью исследования является изучение особенностей СВЧ нагрева кремниевых пластин в вакууме и СВЧ плазме.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изучить теоретические аспекты нагрева полупроводниковых материалов СВЧ энергией;
2. Построить модель СВЧ резонатора с помещенной внутри кремниевой пластиной и диссектором;
3. Провести моделирование нагрева кремниевых пластин в условиях вращения диссектора вокруг своей оси.

Объектом исследования является кремниевая пластина.

Предметом исследования являются способы управления нагревом полупроводниковых пластин.

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 полученных результатов

Научная состоит в разработанной методике исследования равномерности нагрева кремниевых пластин в резонаторной камере СВЧ плазмотрона, а также в проведенном эксперименте по исследованию нагрева кремниевой пластины в СВЧ плазмотроне резонаторного типа.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Компьютерная модель динамического распределения СВЧ энергии в объёмном резонаторе, которая позволила установить, что вращения диссектора в резонаторе позволяют достичь разброса температуры по пластине в пределах 17° .

2. В условиях обработки пластин в объёме плазмы СВЧ разряда основной вклад в температуру поверхности кремниевой пластины вносит передача тепла СВЧ излучением, конвективный теплообмен с плазмой влияет на температуру в заметно меньшей степени.

Теоретическая значимость заключается в определении условий для равномерного распределения температуры по кремниевой пластине.

Практическая значимость заключается в разработке методики компьютерного моделирования для исследования распределения температуры по полупроводниковой пластине, она может быть использована при планировании технологических процессов, включающих нагрев полупроводниковых пластин, и их модернизации.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов

Результаты исследования, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 57-й, 58-й и 59-й научных конференциях студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР 2021 - 2023.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности научной работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приводятся особенности работы СВЧ нагрева технологических материалов, структурная схема СВЧ плазмотрона, влияние плазмы на технологические процессы микроэлектроники.

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

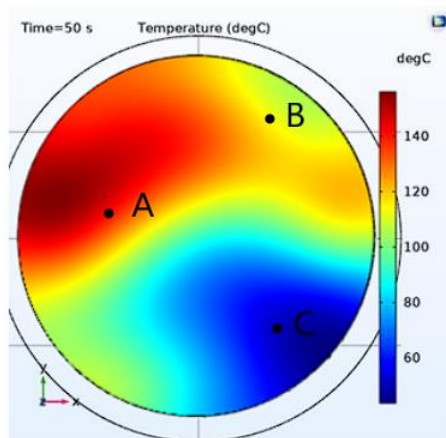
Вторая глава посвящена поиску и изучению методик экспериментального исследования распределения электромагнитного поля, выбору методик исследования распределения СВЧ энергии в объёме резонатора СВЧ плазмотрона, обзору программного обеспечения для построения объёмных моделей с целью исследования СВЧ нагрева, исследованию способов управления распределением СВЧ энергии и формированию методики исследования выбранного способа распределения с помощью 3D-моделирования в среде 3D разработки.

Третья глава посвящена разработке моделей распределения СВЧ энергии по камере с использованием плазмы. Исследовано влияние плазмы на равномерность нагрева подложки, проанализировано влияние полученных результатов на технологические процессы микроэлектроники, требующие нагрев кремниевых пластин.

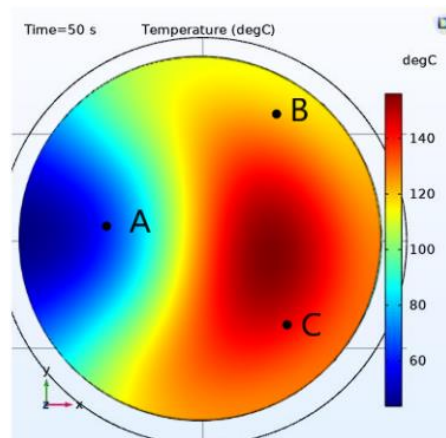
Представлены результаты исследования нагрева кремниевых пластин посредством динамического распределения СВЧ излучения в резонаторной камере объёмом $11\ 250\ \text{см}^2$ СВЧ плазмотрона. Для динамического распределения СВЧ излучения использовался вращающийся металлический четырёхлопастный диссектор, размещённый над реакционной камерой.

Установлено, что при повороте металлического диссектора вокруг собственной оси меняется распределение СВЧ мощности в объёме резонаторной камеры. Лопасты переотражают СВЧ излучение, попадающее на них, и картина распределения тепла по кремниевой пластине меняется.

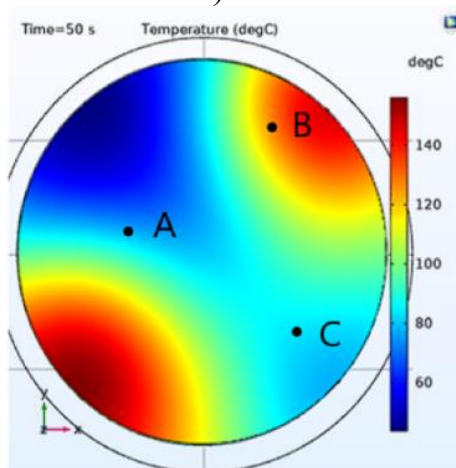
Исследована парадигма изменения температуры трёх точек пластины (А, В, С) через одинаковый промежуток времени при шести различных положениях диссектора (поворот на 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75°). После каждого поворота диссектора производился новый расчёт 3D-модели и, как результат, получались отличные друг от друга картины распределения температуры по пластине.



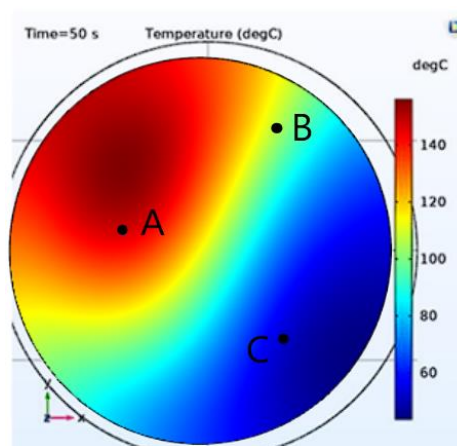
а)



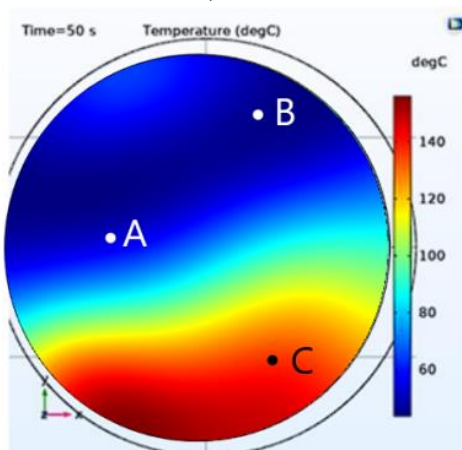
б)



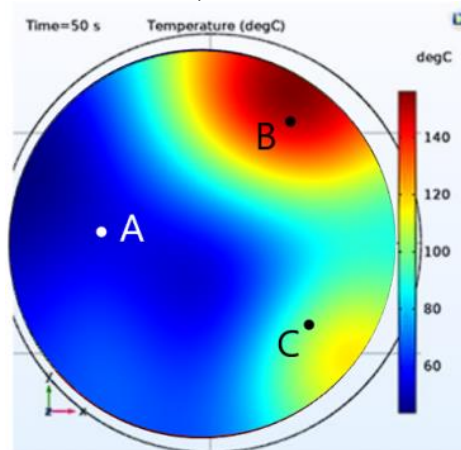
в)



г)



д)



е)

а) начальное положение (0°); б) поворот на 15° ; в) поворот на 30° ; г) поворот на 45° ; д) поворот на 60° ; е) поворот на 75°

Рисунок 1 – Распределение температуры по пластине при шести положениях диссектора

Результаты моделирования показали, что наличие в камере вращающегося диссектора может повысить равномерность распределения температуры по кремниевой пластине. Полученные результаты следует использовать при проведении технологических операций, включающих нагрев полупроводников.

Проведены три серии экспериментов – измерение температуры при прямом воздействии плазменного СВЧ разряда на поверхность кремниевых пластин; при отсутствии контакта плазма-пластина за счёт использования изоляционного материала; при нагреве СВЧ энергией без возбуждения СВЧ разряда.

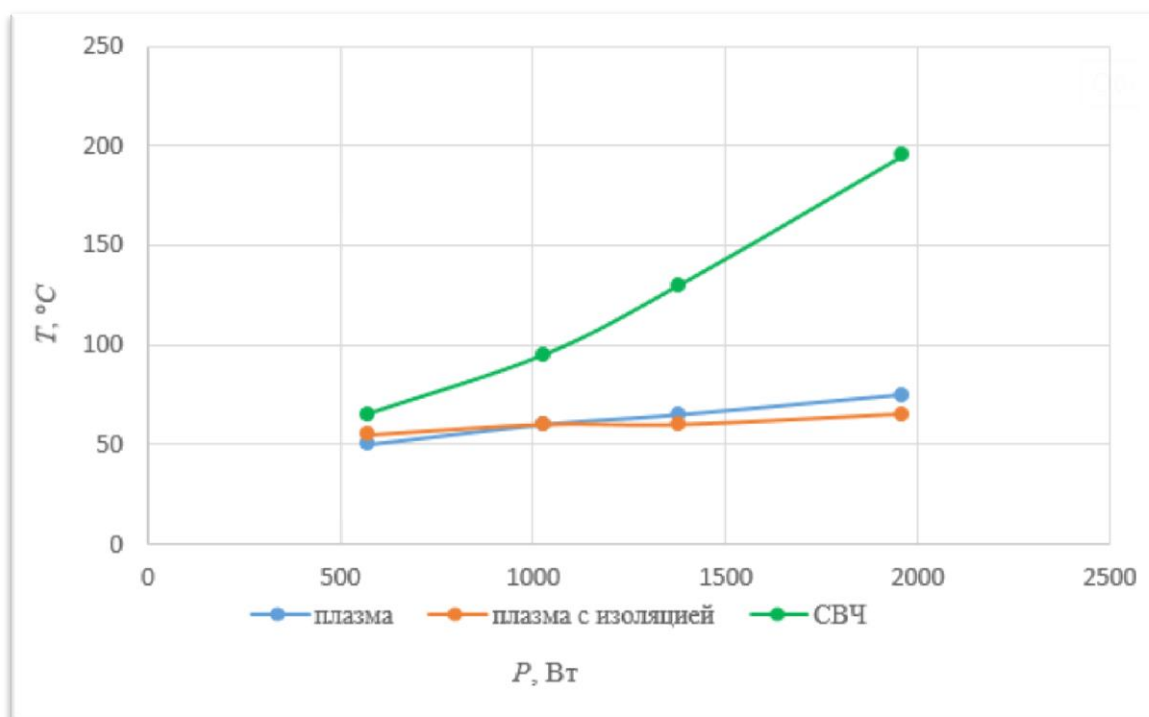


Рисунок 2 – Зависимость температуры кремниевых пластин от значения потребляемой СВЧ генератором мощности после 10 секунд обработки при различных условиях воздействия СВЧ энергии на поверхность

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что в случае обработки пластин в объёме плазмы СВЧ разряда основной вклад в температуру поверхности кремниевой пластины вносит передача тепла СВЧ излучением. Конвективный теплообмен с плазмой влияет на температуру в заметно меньшей степени. Значительные скорости СВЧ нагрева без возбуждения разряда позволяют рассмотреть возможность реализации процесса управляемого быстрого предварительного нагрева

полупроводниковых пластин энергией СВЧ поля перед плазмохимической обработкой в плазмотроне резонаторного типа.

В заключении сформированы основные результаты диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований установлено, что нагрев полупроводников является важной частью многих технологических процессов микроэлектроники, таких как термическое окисление, диффузия, отжиг имплантата, химическое осаждение из паровой фазы, быстрая термическая обработка. Рассмотрены виды технологического нагрева полупроводниковых материалов, проанализированы особенности нагрева полупроводников СВЧ-энергией. Проведён обзор конструктивных решений СВЧ модулей резонаторного типа, позволяющих совместить процесс нагрева СВЧ энергией с технологической обработкой плазмой.

Изучены методики повышения равномерности распределения СВЧ энергии по объёму резонаторной камеры и методики исследования влияния плазмы на температуру нагрева в объёме СВЧ разряда.

Моделирование в COMSOL Multiphysics показало, что в пустом резонаторе распределение температуры по кремниевой пластине имеет неравномерный характер. Внесение в резонатор металлического диссектора приводит к существенному изменению структуры электрической составляющей СВЧ поля внутри моделируемой конструкции. Анализируя распределение структуры СВЧ поля внутри камеры, можно предположить местоположение кремниевой пластины наиболее удачное для более равномерного облучения её СВЧ энергией. Наличие диссектора в объёме призматического резонатора и его вращение оказывает существенное влияние на распределение СВЧ поля, так как он переотражает часть стоячих волн.

На исследование была взята температура кремниевой пластины в трёх условно взятых точках. Рассчитана средняя температура в каждой точке: $T=96^{\circ}\text{C}$ (A); $T=113^{\circ}\text{C}$ (B); $T=100^{\circ}\text{C}$ (C). Как видно, равномерность распределения температуры существенно повысилась и разность температур по пластине по условиям данного исследования может сократиться \approx до 17°C при включенном диссекторе.

В ходе исследования определено влияния контакта плазмы с поверхностью кремниевых пластин на температуру нагрева в объёме СВЧ разряда, а также проведена оценка интенсивности разогрева при бесплазменной обработке.

Исследование показало, что в случае обработки пластин в объёме плазмы СВЧ разряда основной вклад в температуру поверхности кремниевой пластины вносит передача тепла СВЧ излучением. Конвективный теплообмен с плазмой влияет на температуру в заметно меньшей степени.

Значительные скорости СВЧ нагрева без возбуждения разряда позволяют рассмотреть возможность реализации процесса управляемого быстрого предварительного нагрева полупроводниковых пластин энергией СВЧ поля перед плазмохимической обработкой в плазмотроне резонаторного типа.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Бондаренко, А. С. Анализ взаимодействия СВЧ-излучения с полупроводниковыми материалами / А. С. Бондаренко, В. А. Кондратьева // Электронные системы и технологии [Электронный ресурс] : сборник материалов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 18-22 апреля 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]. – Минск, 2022. – С. 353–354. – Режим доступа : <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/46926>.

2. Тихон О. И. Исследование температуры полупроводниковых пластин в реакционно-разрядной камере СВЧ плазмотрона резонаторного типа / О. И. Тихон, А. С. Бондаренко // Физика конденсированного состояния [Электронный ресурс] : материалы XXX междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 7–8 апр. 2022 г.) / ГрГУ им. Янки Купалы, физ.-техн. фак. ; редкол.: Г. А. Гачко (гл. ред.), Н. Г. Валько (зам. гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2022 – С. 239-241. – Режим доступа : <https://ftf.grsu.by/files/News/FKS/2022/Materialy-FKS-XXX-2022.pdf>

3. Бондаренко, А. С. Анализ особенностей нагрева кремниевых пластин СВЧ энергией в объёме СВЧ резонатора = Analysis of the peculiarities of silicon wafers heating with microwave energy in the volume of a microwave resonator / А. С. Бондаренко, О. И. Тихон // Электронные системы и технологии : сборник материалов 57-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 19-23 апреля 2021 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]. – Минск, 2021. – С. 152–153.

4. Бондаренко А.С. Влияние вращающегося диссектора в объёмном резонаторе на равномерность нагрева СВЧ энергией кремниевой пластины / Бондаренко А.С., Иванов И.А. // Электронные системы и технологии : сборник материалов 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 2023 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол. : Д.В. Лихачевский [и др.] – Минск, 2023. – [в печати].

