

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

УДК 001.891.573

Барковская
Кира Николаевна

Компьютерное моделирование низкотемпературной
безэлектродной плазмы в многокамерном СВЧ
плазмотроне резонаторного типа

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 7-06-0713-02 Электронные системы и технологии

Научный руководитель
Мадвейко Сергей Игоревич
кандидат технических наук,
доцент

Минск 2025

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Плазменные технологии в микроэлектронике играют важную роль в производстве полупроводниковых устройств. Они позволяют проводить точную обработку материалов на микроуровне, создавать тонкие пленки, очищать поверхности и создавать сложные микроструктуры. Благодаря плазменным технологиям можно получать более качественные и функциональные полупроводниковые устройства, что способствует развитию современной электроники.

Новые задачи и постоянно растущие требования субмикронной микро- и нанoeлектроники стимулируют поиск новых способов направленного плазменного воздействия на обрабатываемые конденсированные среды. Актуальной задачей остается повышение эффективности реализуемых и создание новых технологических процессов.

Учитывая актуальность применения плазмы и плазменных технологий в микроэлектронике, возникает необходимость разработки и модернизации существующего СВЧ плазменного технологического оборудования, широко применяемые в технологии микроэлектроники.

С точки зрения энерго- и ресурсосбережения особое внимание уделяется многократно повторяющимся операциям в одном технологическом цикле, к которым относится СВЧ плазмохимическое удаление резистивных покрытий с поверхности полупроводниковых пластин, реализуемых с использованием плазмотронов технологического назначения. Практический интерес представляет обеспечение возбуждения и поддержания СВЧ плазмы большого объема в плазмотронах, разработанных на базе объёмных резонаторов, позволяющих выполнять плазмохимическую обработку полупроводниковых материалов при использовании в качестве источников энергии СВЧ магнетронов.

Вопрос изучения параметров и свойств плазмы СВЧ разряда большого объема, формируемой при различных условиях электропитания СВЧ генераторов с применением разрядных устройств резонаторного типа, в научно-исследовательской литературе пока не нашёл глубокой проработки. Потенциальная возможность совершенствования и оптимизации конструктивного исполнения существующих технических решений СВЧ плазмотронов резонаторного типа обосновывает необходимость выполнения качественных исследований, а также разработки методологии и рекомендаций по внедрению данного типа устройств в различные техпроцессы вакуумно-плазменной обработки.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка методики компьютерного моделирования СВЧ-плазменной системы технологического назначения и изучения на её базе характерных особенностей формирования химически активной плазмы СВЧ разряда.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Провести анализ существующих конструктивных решений СВЧ разрядных систем резонаторного типа и изучить особенности формирования СВЧ разряда в вакууме в плазмотроне резонаторного типа.

2. Разработать методику построения компьютерной модели СВЧ-плазменной системы технологического назначения, обеспечивающей проведение плазменной обработки полупроводниковых пластин.

3. Моделировать конструкцию СВЧ-плазменной системы технологического назначения, электрофизические характеристики плазмы и электрическую энергию в призматическом резонаторе.

4. Выполнить анализ компьютерной модели СВЧ плазмотрона и модели многокамерной разрядной системы с целью модернизации существующих СВЧ-плазменных систем технологического назначения.

Объект исследования: СВЧ-плазменная система технологического назначения, применяемая для плазменной обработки полупроводниковых пластин в производстве изделий электронной техники; низкотемпературная безэлектродная плазма, формируемая в разрядных камерах внутри СВЧ плазмотрона резонаторного типа.

Предмет исследования: способы расположения разрядных камер для формирования низкотемпературной безэлектродной плазмы в объёме СВЧ-плазменной системы технологического назначения при воздействии электромагнитного СВЧ излучения.

Положения диссертации, выносимые на защиту

1. Методика разработки компьютерной модели СВЧ-плазменной системы технологического назначения для плазменной обработки полупроводниковых пластин, состоящей из резонаторной камеры, волноводной секции для ввода электромагнитной энергии 2,45 ГГц в резонатор, а также цилиндрических разрядных камер из кварцевого стекла с плазмой внутри объёмного резонатора.

2. Результаты компьютерного моделирования распределения напряжённости E электрического поля в центре объёма СВЧ плазмотрона резонаторного типа при значениях подводимой мощности P электромагнитной энергии, равных 300 Вт, 600 Вт и 900 Вт.

3. Результаты компьютерного моделирования оптимальной конструкции многокамерного СВЧ плазмотрона резонаторного типа при расположении четырёх разрядных камер по принципу «прямоугольника», при котором достигается максимальное значение напряжённости электрического поля $E = 14000$ В/м, достаточное для формирования СВЧ разряда, а также обеспечивается минимальное расхождение в распределении напряжённости электрического поля по разрядным камерам до 4000 В/м.

Личный вклад магистранта

В диссертации изложены результаты научно-исследовательских работ, выполненных автором лично и в соавторстве. В опубликованных работах автору принадлежат: обоснование путей решения научной задачи, определение цели и постановка задач исследования, разработка методик проведения компьютерного моделирования, непосредственное участие в проведении компьютерного моделирования, анализ результатов и формулировка выводов.

Апробация результатов диссертации

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на 5 научных конференциях: 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 2024), 17-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2024» (Минск, 2024), II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики» (Новополоцк, 2024), XXXIII Международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния» (Гродно, 2025) и 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 2025).

Опубликованность результатов диссертации

По материалам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 7 статей в материалах конференций, 2 статьи для материалов конференций находятся в печати.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырёх глав с выводами по каждой главе, заключения и библиографического списка. В первой главе в результате анализа конструктивных особенностей СВЧ разрядных систем резонаторного типа и особенностей формирования СВЧ разряда в вакууме в плазмотроне резонаторного типа сформулированы задачи по повышению производительности и качества плазменной обработки полупроводниковых пластин при воздействии СВЧ излучения. Вторая глава содержит разработку методик проведения компьютерного моделирования конструкции СВЧ-плазменной системы на основе анализа существующих конструктивных решений СВЧ-плазменных систем технологического назначения, а также методику моделирования электрофизических характеристик плазмы и электрической энергии в призматическом резонаторе для дальнейшего исследования данных параметров. В третьей главе проведено исследование электрического поля внутри резонатора на основе анализа компьютерной модели СВЧ плазмотрона. Исследования проводились для пустого плазмотрона, для плазмотрона с одной или несколькими пустыми разрядными камерами, а также для многокамерного плазмотрона с плазмой. Определено оптимальное расположение камер в объёме многокамерного СВЧ плазмотрона резонаторного типа. В четвёртой главе проведено исследование компьютерной модели плазмы безэлектродного СВЧ разряда на основе анализа модели многокамерной разрядной системы. В данной главе были изучены такие характеристики, как электронная плотность плазмы, электронная температура плазмы, электрический потенциал плазмы и резистивные потери.

Общий объем диссертационной работы составляет 67 страниц, из которых 23 страницы основного текста, 59 рисунков на 36 страницах, библиографический список содержит 30 источников на 3 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность научного направления, определены направления исследований, показана необходимость исследований процессов плазменных технологий в микроэлектронике.

В первой главе проанализированы особенности СВЧ плазмы такие, как высокая степень ионизации и распада, низкое соотношение электронной температуры и ионной температуры к температуре нейтрального газа, высокие значения давления воздуха, отсутствие внутренних электродов в конструкции плазменного оборудования, высокий фактор безопасности, стабильность и простота в управлении, низкая стоимость использования. Плазма может быть ограничена установленным пространством, использующим магнитное удержание. СВЧ переходы и магнитопроводы могут быть совместимы. СВЧ плазма в большинстве случаев относительно спокойная и не сопровождается высокими значениями шумов, как это происходит в случае с разрядом постоянного тока. Рассмотрена конструкция СВЧ плазмотрона и виды резонаторов.

Также в первой главе описаны особенности формирования плазмы СВЧ разряда в вакууме в плазмотроне резонаторного типа. Производство плазмы происходит в условиях вакуума, полученная плазма не нагревается, что важно для многих процессов. Плазма может использоваться при напылении, травлении или ионной имплантации.

Для правильной работы полупроводников необходимы точные электрические характеристики. Примеси могут изменять электрические характеристики, вмешиваясь в электрические поля внутри полупроводника. Даже небольшая частица или примесь может создать локализованные электрические поля, которые отклоняются от желаемого поведения, влияя на производительность и надежность полупроводникового устройства. Непреднамеренное взаимодействие электрических полей, вызванное загрязнением, может привести к снижению качества сигнала, увеличению энергопотребления или даже к короткому замыканию.

Анализ показал, что при формировании СВЧ разряда в плазмотроне во время выполнения технологических процессов обработки полупроводников следует принимать во внимание такое явление как электрическое поле резонатора. Электрическое поле представляет собой область пространства, окружающего электрически заряженную частицу или объект, где на электрический заряд действует сила. Электрическое поле существует во всех точках в пространстве и может быть наблюдаться при переносе другого заряда в электрическое поле. Следовательно, электрическое поле внутри резонатора, которое окружает обрабатываемый материал может повлиять на его

электрические параметры, а также может привести к снижению качества сигнала, увеличению энергопотребления и даже короткому замыканию, что существенно снижает качество полупроводника.

В результате анализа процесса формирования СВЧ плазмы в вакууме в плазмотроне резонаторного типа сформированы задачи по повышению качества плазменной обработки полупроводниковых пластин в производстве изделий электроники.

Вторая глава посвящена методике разработки компьютерной модели СВЧ-плазменной системы. Был проведён анализ структуры СВЧ-плазменной системы технологического назначения, на базе которой будет производиться компьютерное моделирование. Далее был проведён обзор программных пакетов, позволяющих реализовать исследуемую компьютерную модель СВЧ-плазменной системы. Рассмотрены такие программные продукты, как *ANSYS*, *STAR-CCM+* и *Comsol Multiphysics*. Предпочтение было отдано пакету *Comsol Multiphysics* ввиду его возможностей и функционала.

Далее выполнялась непосредственно разработка модели СВЧ-плазменной системы. Модель представляет собой резонаторную камеру, выполненную из высоколегированной стали, которая подключена к источнику питания с частотой 2,45 ГГц через прямоугольный волновод. Размер резонаторной камеры: 267 мм × 270 мм × 188 мм. Размеры волновода: 50 мм × 78 мм × 18 мм. Затем в данном разделе представлена методика моделирования электрофизических характеристик плазмы и электрической энергии в призматическом резонаторе.

В третьей главе проводилось исследование электрического поля внутри резонатора на основе анализа компьютерной модели СВЧ плазмотрона. Для возбуждения плазмы в ограниченном пространстве нужно сконцентрировать СВЧ-энергию до уровня напряжённости электрической составляющей электромагнитного поля $E_{\text{проб}}$, близкого к пробойному. Для разрядов низкого вакуума величина $E_{\text{проб}}$ составляет 80 – 300 В/см (8000 – 30000 В/м). Было проведено компьютерное моделирование электрического поля внутри резонатора призматической формы. Получены модели при значениях подводимой мощности $P = 300$ Вт, 600 Вт и 900 Вт. Все полученные значения напряжённости электрического поля сравниваются со значением величины $E_{\text{проб}}$. Компьютерное моделирование проводилось в пустом резонаторе, в резонаторе с одной разрядной камерой с плазмой и без плазмы, а также в многокамерном резонаторе с плазмой. Также были рассмотрены варианты расположения разрядных камер внутри объёмного резонатора. Для плазмохимической обработки полупроводников более оптимальным вариантом является использование нескольких камер внутри СВЧ резонатора, так как в таком случае значения напряжённости электрического поля не превышают диапазон пробивного уровня $E_{\text{проб}}$. За наиболее оптимальное расположение трубок

принято расположение кварцевых трубок по принципу «прямоугольника», так как наблюдаются минимальные расхождения в распределении напряжённости электрического поля между кварцевыми трубками.

Четвёртая глава посвящена исследованию компьютерной модели плазмы безэлектродного СВЧ разряда на основе анализа модели многокамерной разрядной системы. Были рассмотрены показатели следующих характеристик: электронной плотности плазмы, электронной температуры плазмы, электрического потенциала плазмы и показатели резистивных потерь в многокамерной разрядной системе. Описано влияние показателей на качество обработки, а также причины возникновения полученных результатов моделирования. Исследование характеристик, рассмотренных в данной главе, позволяет оптимизировать технологические процессы и оборудование для плазменной обработки, управлять поведением плазмы и совершенствовать энергетическую эффективность плазменного оборудования, что в дальнейшем обеспечит повышение качества плазменной обработки полупроводниковых пластин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе были изучены напряжённость электрического поля в многокамерном СВЧ плазмотроне резонаторного типа, а также исследование характеристик низкотемпературной безэлектродной плазмы в многокамерном СВЧ плазмотроне, разработка методов проведения компьютерного моделирования конструкции СВЧ-плазменной системы и электрофизических характеристик плазмы и электрической энергии в призматическом резонаторе, компьютерное моделирование СВЧ плазмотрона и плазмы безэлектродного СВЧ разряда на основе анализа модели многокамерной разрядной системы для дальнейшей модернизации существующих СВЧ-плазменных систем технологического назначения с целью повышения качества обработки полупроводниковых пластин в производстве изделий электроники.

Для проведения исследований был проведён анализ существующих конструкционных решений СВЧ разрядных систем резонаторного типа и изучены особенности формирования СВЧ разряда в вакууме в плазмотроне резонаторного типа, разработана методика построения компьютерной модели СВЧ-плазменной системы технологического назначения, обеспечивающей проведение плазменной обработки полупроводниковых пластин. Выполнено моделирование конструкции СВЧ-плазменной системы технологического назначения, электрофизических характеристик плазмы и электрической энергии в призматическом резонаторе. По результатам моделирования был проведён анализ компьютерной модели СВЧ плазмотрона и модели многокамерной разрядной системы с целью модернизации существующих СВЧ-плазменных систем технологического назначения.

В ходе анализа результатов компьютерного моделирования сделан вывод о том, что для плазменной обработки полупроводников более оптимальным вариантом является использование нескольких камер внутри СВЧ резонатора, так как в таком случае значения напряжённости электрического поля не превышают диапазон пробивного уровня $E_{\text{проб}}$ (80 – 300 В/см). За наиболее оптимальное расположение трубок принято расположение кварцевых трубок по принципу «прямоугольника», так как наблюдаются минимальные расхождения в распределении напряжённости электрического поля между кварцевыми трубками.

Исследование электронной плотности плазмы, электронной температуры плазмы, электрического потенциала плазмы и показатели резистивных потерь в многокамерной разрядной системе позволяет оптимизировать технологические процессы и оборудование для плазменной обработки, управлять поведением плазмы и совершенствовать энергетическую эффективность плазменного

оборудования, что в дальнейшем обеспечит повышение качества плазменной обработки полупроводниковых пластин.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Барковская, К. Н. Исследование напряжённости электрического поля в объёме кварцевых трубок внутри СВЧ резонатора = *Electric field intensity research of quartz tubes inside of microwave resonator* / К. Н. Барковская, Н. В. Талиш // Электронные системы и технологии : сборник материалов 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 22–26 апреля 2024 г. – Минск, 2024. – С. 359–361.

2. Барковская, К. Н. Математическое моделирование потенциала ионизации и концентрации электронов низкотемпературной плазмы = *Math modeling of ionization potential and electron concentration of low temperature plasma* / К. Н. Барковская, Н. В. Талиш // Электронные системы и технологии : сборник материалов 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 22–26 апреля 2024 г. – Минск, 2024. – С. 362–364.

3. *Barkouskaya, K. M. Formation of microwave discharge* / К. М. Барковская // Электронные системы и технологии : сборник материалов 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 22–26 апреля 2024 г. – Минск, 2024. – С. 663–665.

4. Кудина, А. В. Технологический процесс СВЧ плазмохимического травления / А. В. Кудина, Е. П. Франко, К. Н. Барковская, Г. А. Есьман // Приборостроение – 2024 : материалы 17-й Международной научно-технической конференции – Минск, 2024. – С. 233 – 234.

5. Барковская, К. Н. Моделирование аргоновой плазмы внутри СВЧ резонатора / К. Н. Барковская, С. И. Мадвейко // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики [Электронный ресурс] : электронный сборник статей II Международной научно-практической конференции, Новополоцк, 14 ноября 2024 г. – Новополоцк, 2025. – С. 174-178.

6. Барковская, К. Н. Компьютерное моделирование электронной плотности аргоновой плазмы в объёме СВЧ плазмотрона резонаторного типа / К. Н. Барковская, // Электронные системы и технологии : сборник материалов 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 21–25 апреля 2025 г. – Минск, 2025. – С. 277–281.

7. Барковская, К. Н. Исследование влияния кварцевой камеры в объёме призматического резонатора на распределение электрического поля / К. Н. Барковская, // Электронные системы и технологии : сборник материалов 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 21–25 апреля 2025 г. – Минск, 2025. – С. 287–291.

8. Тихон, О. И. Исследование процесса плазмообразования при непрерывном режиме генерации энергии в СВЧ плазмохимической системе /

О. И. Тихон, К. Н. Барковская (ФКС XXXIII: материалы конференции. – Гродно: ГрГУ, 2025; сборник в печати)

9. Лушакова, М. С. Исследование влияния давления в разрядной камере на формирование комбинированного разряда / М. С. Лушакова, О. И. Тихон, К. Н. Барковская (ФКС XXXIII: материалы конференции. – Гродно: ГрГУ, 2025; сборник в печати)