

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Кафедра инженерной психологии и эргономики

На правах рукописи

УДК

Козлова
Светлана Алексеевна

**ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЛАЗМЫ ДВУХЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА**

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук

1-41 80 02 – Технология и оборудование для производства полупроводников,
материалов и приборов электронной техники

Научный руководитель
С.И. Мадвейко, кандидат
технических наук, доцент

Минск 2019

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Обработка поверхностей материалов неравновесной плазмой СВЧ разряда находит широкое применение в качестве промышленных технологий изготовления изделий микроэлектроники. Новые задачи микро- и наноэлектроники и увеличение габаритных размеров обрабатываемых изделий требуют поиска иных способов направленного плазменного возбуждения на обрабатываемые конденсированные среды.

В настоящее время дальнейшее совершенствование технологических процессов плазменной обработки целесообразно проводить в направлении повышения качественных характеристик и за счет дополнительного внешнего энергетического стимулирования.

Именно поэтому актуальными на сегодняшний день являются исследования физических основ плазменной обработки материалов в виду несложившейся системы научных знаний об эффектах воздействия СВЧ плазмы на обрабатываемые материалы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Целью работы является изучение закономерностей и характерных особенностей внешнеэнергетической стимуляции процессов СВЧ обработки материалов электронной техники.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

- провести анализ современных тенденций развития газоразрядных устройств и процессов обработки материалов с возбуждением плазмы разночастотными полями;
- исследовать физические модели и параметры плазмы двухчастотного разряда, а также провести моделирование, основываясь на полученных знаниях;
- рассмотреть технологическое оборудование и методики проведения исследования возбуждения плазмы двухчастотного разряда;
- провести анализ управляемого воздействия на характеристики газового разряда путем совместного воздействия полей разной частоты;
- исследовать электрофизические характеристики газового разряда комбинированного типа;
- исследовать технологические особенности травления материалов плазмой разряда комбинированного типа.

Объектом исследования является низкотемпературная плазма СВЧ разряда технологического назначения, формируемая в СВЧ плазматроне средней мощности.

Предметом исследования являются свойства и методы управления электрофизическими параметрами химически активной плазмы СВЧ разряда и особенности влияния на них низкочастотной энергетической стимуляции.

Актуальность темы магистерской диссертации, заключается в том, что процессы плазменной обработки реализуются давно, однако возникает необходимость управления параметрами и характеристиками газовых разрядов. Одним из направлений являются внешнее энергетическое стимулирование. Изучение физико-химических процессов, протекающих в объеме самостоятельного газового СВЧ разряда низкого вакуума, в условиях модуляции электромагнитными полями представляет собой научный и практический интерес.

На защиту выносятся приведенные ниже положения:

1 Выбрана методика и разработана физическая модель возбуждения плазмы двухчастотного разряда, позволяющая оценить распределение напряженности полей разряда.

2 Зависимость скорости протекания процессов обработки в плазме СВЧ разряда от мощности носит линейный характер; изменение величины подаваемой в волновод мощности ведет к увеличению скорости травления.

3 Использование внешней энергетической стимуляции СВЧ разряда полем низкой частоты приводит к изменению характеристик плазменного разряда, значительному повышению эффективности плазмохимической обработки монокристаллического кремния и демонстрирует взаимосвязь СВЧ и НЧ импульсов при их временной синхронизации.

Результаты работы докладывались и обсуждались в рамках 54 и 55 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР по направлению «Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем». По материалам диссертации опубликовано 3 работы в сборниках материалов научных конференций.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** приведены некоторые из современных конструкций газоразрядных устройств. В их число входят устройства, позволяющие обрабатывать полупроводниковые пластины, панельные дисплеи [1–А] и подложки, позволяющие генерировать индуктивно связанную плазму,

обладающие возможностью генерировать разряд большой площади, а также используемые для удаления оксидной пленки кремния.

Во втором разделе главы были описаны технологические процессы обработки материалов, проводимые с использованием плазмы двухчастотного разряда. Представлен механизм осуществления процесса нанесения материала методом химического осаждения из газовой фазы под действием возбуждения плазмы комбинированного разряда. Выделена особенность, позволяющая управлять потоками энергии ионов при формировании алмазных углеродных пленок в плазме двухчастотного разряда. Особое внимание уделено процессу вакуумно-плазменного травления. Приведена информация о недостатках и достоинствах данного метода.

Во второй главе были рассмотрены физические особенности возбуждения плазмы двухчастотного разряда. Описаны физические модели, используемые для анализа процессов в плазме. Подробно описана математическая модель соотношения электрического поля оболочки и давления газа с направленностью переноса ионов. Показаны графики направленности травления и зависимости плотности тока от давления. Рассмотрены методы управления параметрами плазмы. Описан путь формирования комбинированного СВЧ-НЧ разряда.

Проведено компьютерное моделирование распределения напряженности в объеме плазмы двухчастотного разряда, представленное на рисунке 1 и 2.

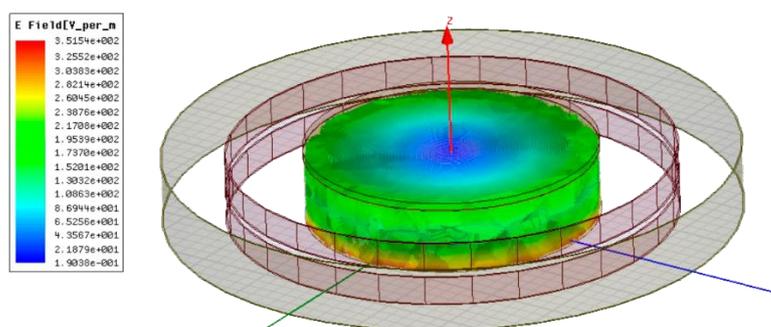


Рисунок 1 – Распределение напряженности НЧ поля при влиянии СВЧ поля

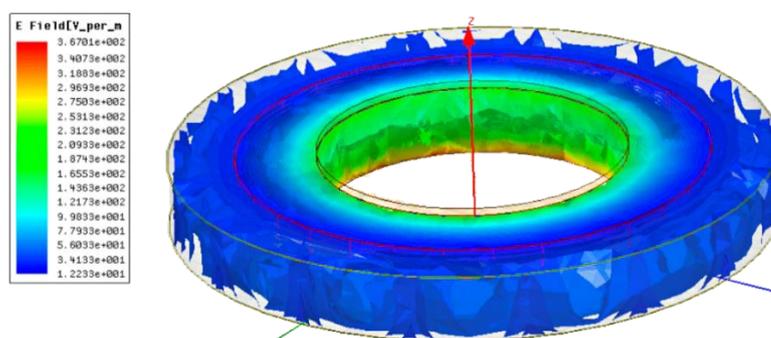
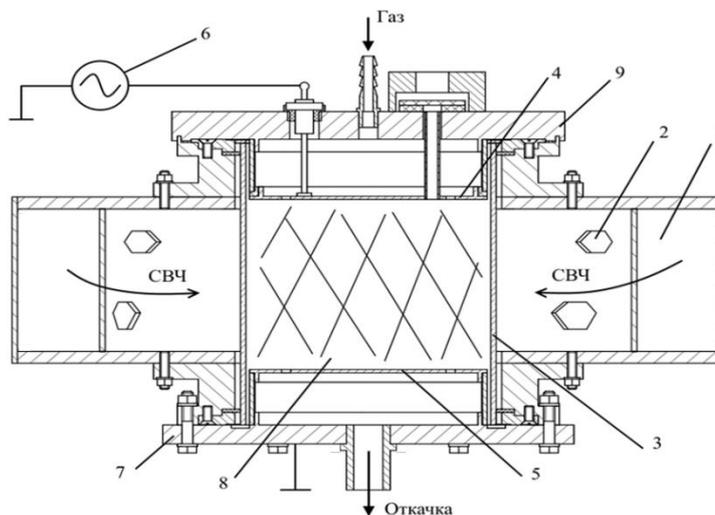


Рисунок 2 – Распределение напряженности СВЧ поля при влиянии НЧ поля

Исходя из данных, стало известно, что структура комбинированной плазмы двухчастотного разряда существенно отлична как от СВЧ, так и от НЧ разряда. При влиянии СВЧ поля в области НЧ разряда напряженность в центре становится мало. Плотность распределения напряженности СВЧ поля стремится к центру.

В третьей главе приведено описание разрядной системы возбуждения плазмы в НЧ и СВЧ полях и методики проведения исследований. Основным компонентом комбинированного разрядного устройства является резонатор с кварцевой камерой, в которой выполняются все процессы обработки. Его схема представлена на рисунке 3. Представлены конструкции систем подвода и концентрации СВЧ и НЧ энергии в двухчастотном плазменном разрядном устройстве, предназначенном для целей реактивно-ионного травления материалов при формировании элементов микроструктуры изделий электронной техники [2–А]. Основу конструкции составляет СВЧ плазмотрон резонаторного типа с аппликатором в форме замкнутой в кольцо волноводно-щелевой антенны. По оси СВЧ аппликатора располагается вакуумированная кварцевая камера, по торцам которой размещены плоские электроды низкочастотной газоразрядной системы емкостного типа.



- 1 – волновод; 2 – отверстия связи; 3 – кварцевая камера;
 4 – потенциальный электрод; 5 – заземленный электрод; 6 – НЧ генератор;
 7 – нижняя крышка; 8 – плазма; 9 – съёмная верхняя крышка

Рисунок 3 – Схема комбинированного разрядного устройства

Рассмотрена методика оптической диагностики газового разряда, основанная на методе эмиссионной спектроскопии, проводимой с помощью спектрометра *SL40-2-2048 ISA*. По причине присутствия эффекта отражения проведению экспериментов предшествовала калибровка устройства генерации

СВЧ энергии. Рассмотрена методика проведения калибровки результаты которой позволяют оперировать реальными значениями подаваемой в СВЧ тракт мощности, применяемыми для проведения экспериментов, описанных в 5 главе.

Четвертая глава посвящена описанию результатов исследования электрофизических режимов возбуждения плазмы. Проанализировано влияние величины давления в рабочей камере на процесс формирования СВЧ разряда. Определено влияние значения подаваемой в СВЧ тракт мощности на интенсивность интегрального свечения разряда и воспроизводимость результатов плазмообразования. Рассмотрены особенности взаимодействия СВЧ поля со стимулирующей низкочастотной составляющей и зафиксирован эффект уменьшения величины НЧ амплитуды в случае временного совпадения импульсов СВЧ и НЧ разрядов (рисунки 4,5).

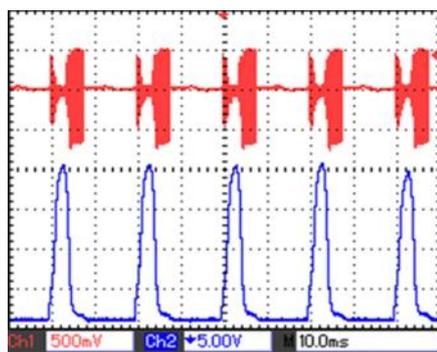


Рисунок 4 – Осциллограмма изменения величины НЧ амплитуды при синхронизации импульсов СВЧ и НЧ сигналов

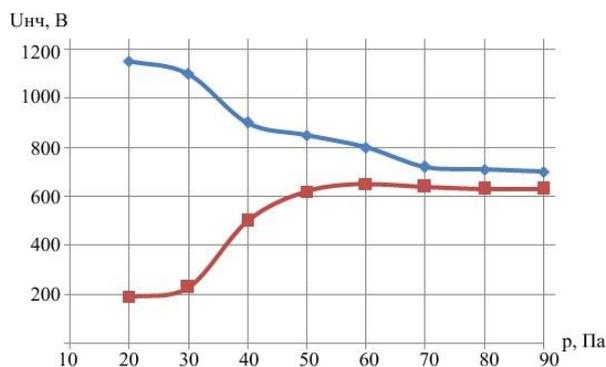


Рисунок 5 – Зависимость значений амплитуды НЧ импульсов на разрядном промежутке от давления

Проведены оптико-спектроскопические исследования и представлен результат анализа спектров плазменных разрядов в атмосфере кислорода и SF_4 . Определено влияние внешней энергетической стимуляции на интенсивность наиболее активных спектральных линий СВЧ и НЧ разрядов.

В **пятой главе** были рассмотрены характеристики травления материалов в разрядной системе комбинированного типа. Проверена зависимость скорости удаления фоторезистирующих покрытий под воздействием СВЧ поля от значения подаваемой в волновой тракт СВЧ мощности. Согласно полученным экспериментальным данным скорость удаления материала находится в прямой зависимости к величине СВЧ мощности (рисунок 6).

Получены результаты исследования скорости травления кремния под действием СВЧ поля в условиях низкого давления. Описана методика проведения экспериментов по травлению монокристаллического кремния и

получены результаты для случаев обработки образцов в СВЧ и НЧ разрядах, а также при стимуляции СВЧ разряда низкочастотным полем (рисунок 7).

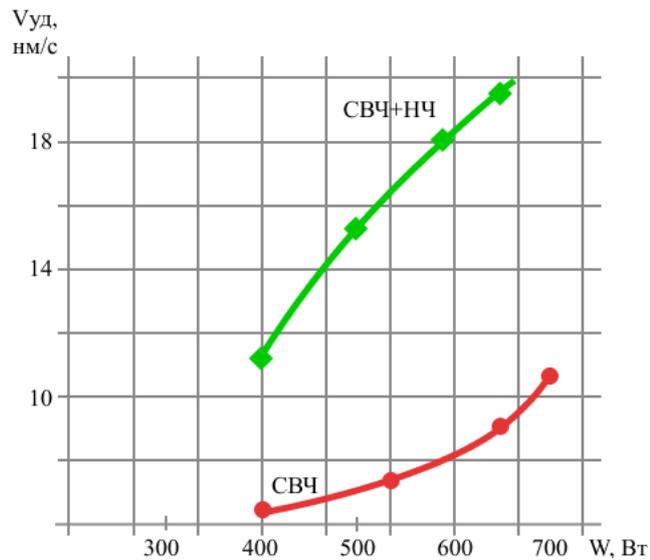


Рисунок 6 – Зависимость скорости удаления фоторезиста от СВЧ и СВЧ+НЧ мощности

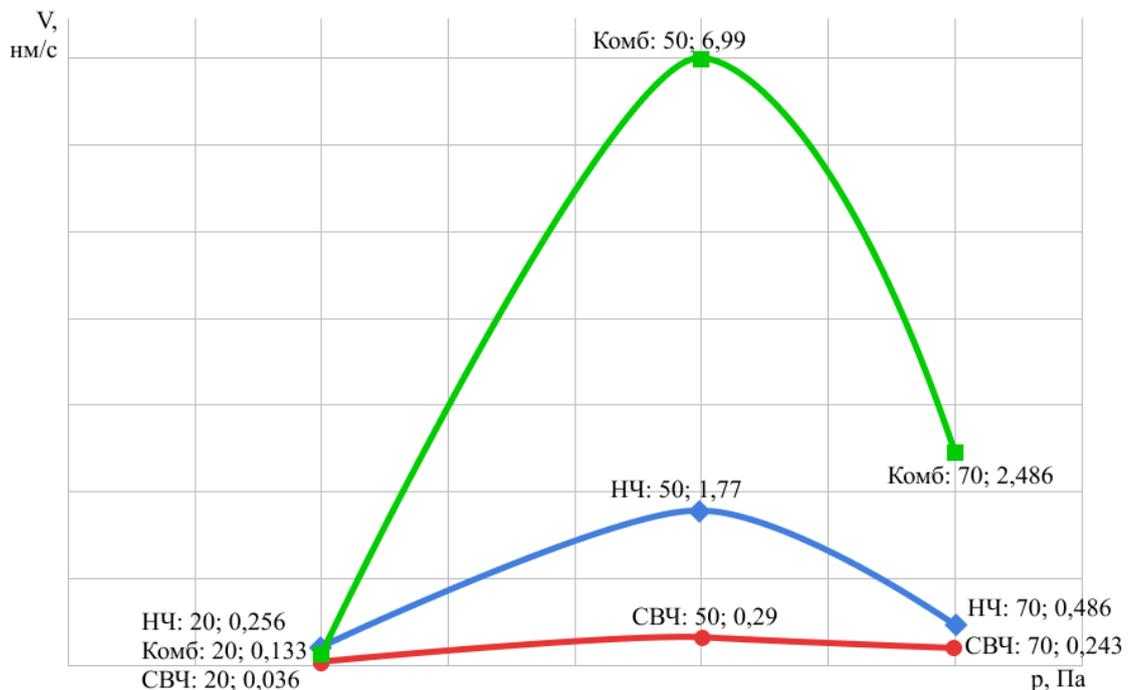


Рисунок 7 – Зависимость скорости травления кремния в трех типах разрядов от давления

Основываясь на результатах экспериментов подтвержден эффект от стимуляции СВЧ разряда низкочастотной составляющей. Причиной увеличения скорости протекания процессов травления под воздействием подобного

двухчастотного импульсного разряда могут быть высокая степень ионизации молекул плазмообразующего газа в неравновесной плазме и направленность потока ионов в условиях НЧ разряда, что было теоретически установлено во второй главе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные методы взаимодействия плазмы газового разряда с материалами полупроводникового производства показали актуальность проблемы изучения особенностей возбуждения и поддержания сверхвысокочастотных разрядов. Перспективным направлением разработки новых устройств генерации СВЧ плазмы явилось использование конструктивных решений на базе прямоугольных и кольцевых резонаторных волноводов с использованием источников энергии в виде СВЧ магнетронов средней мощности бытового назначения.

Выполнено моделирование конструкции двухчастотного плазменного разрядного устройства, представляющего собой СВЧ плазмотрон резонаторного типа с аппликатором в форме замкнутой в кольцо волноводно-щелевой антенны при СВЧ (2,45 ГГц), НЧ (30 кГц) и комбинированном разряде. Моделирование позволило сделать вывод о том, что структура комбинированной плазмы двухчастотного разряда существенно отлична как от СВЧ, так и от НЧ разряда. Также можно отметить, что при влиянии СВЧ поля в области НЧ разряда напряженность в центре становится значительно меньше. Плотность же распределения напряженности СВЧ поля стремится к центру.

Проведенные электрофизические эксперименты показали влияние стимуляции низкочастотной составляющей на СВЧ разряд, выражающееся в повышении интенсивности спектральных линий газового разряда. Взаимодействие НЧ и СВЧ сигналов проявляется в уменьшении амплитуды низкочастотных импульсов при повышении СВЧ мощности. Подобная зависимость говорит о необходимости согласования электрических параметров генераторов в случае внешней энергетической стимуляции плазмохимических процессов в плазме СВЧ разряда.

Технологические эксперименты по удалению фоторезиста с кремниевых подложек продемонстрировали высокие скорости протекания процесса под воздействием СВЧ поля.

При проведении экспериментов по травлению монокристаллического кремния установлена линейная зависимость скорости травления от значения подаваемой в СВЧ волновод мощности. Исследование влияния внешней энергетической стимуляции СВЧ разряда полем низкой частоты показало, что

травление кремния в случае взаимодействия НЧ поля с СВЧ разрядом происходит при значительно больших скоростях. Причиной такого роста может являться направленность воздействия реактивных частиц, сформированных в результате ионизации молекул плазмообразующего газа неравновесным СВЧ разрядом. Направленность потока ионов перпендикулярно обрабатываемым образцам объясняется емкостным характером сформированной в рабочей камере СВЧ плазмотрона НЧ разрядной системы, что подтверждается результатами моделирования.

Полученные результаты исследований представляют интерес применительно к обработке полупроводниковых изделий в плазме СВЧ разряда и могут быть использованы при разработке нового и модернизации существующего промышленного оборудования. Применение самостоятельного газового СВЧ разряда низкого вакуума, в условиях модуляции электромагнитными полями, представляет собой научный и практический интерес, и существует необходимость проведения дополнительных научных исследований.

Магистерская диссертация выполнена самостоятельно и проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составляет 86 %. Заимствованные блоки обозначены ссылками на публикации, указанные в библиографическом списке.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

[1–А] Козлова, С. А. Технологические процессы обработки материалов, проводимые с использованием плазмы двухчастотного разряда / С. А. Козлова // Сборник тезисов 54 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. – 2018. – №54. – С.158–159.

[2–А] Козлова, С. А. Физическая модель формирования низкотемпературной плазмы комбинированного разряда / С. А. Козлова // Сборник тезисов 55 юбилейной научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. – 2019. – №55. – С.123–124.

[3–А] Козлова, С. А. Системы концентрации СВЧ и НЧ энергии для возбуждения комбинированного разряда / С. А. Козлова // Сборник тезисов 55 юбилейной научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. – 2019. – №55. – С.125–126.