

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

УДК 533.9.03

Тихон
Олег Игоревич

СВЧ плазмотрон средней мощности для травления
полупроводниковых материалов

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук

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

Научный руководитель

Мадвейко Сергей Игоревич

кандидат технических наук, доцент

Минск 2017

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Широкое распространение в сфере обработки и изготовления изделий электронной техники находит неравновесная плазма сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда. Плазма СВЧ разряда обладает высокой эффективностью и рядом очевидных преимуществ над другими типами электрических газовых разрядов, что обуславливает возможность её применения для решения практически важных задач в микро- и наноэлектронике.

Современные задачи и высокие требования полупроводникового производства активизируют поиск новых способов направленного плазменного воздействия на обрабатываемые среды.

Перспективным направлением вакуумно-плазменных технологий, способствующим повышению качества обработки поверхностей, является применение комбинированных двухчастотных разрядов. Данные разряды формируются путём стимуляции воздействия СВЧ разряда на поверхность обрабатываемого материала электромагнитным полем низкочастотного (НЧ) или высокочастотного (ВЧ) диапазона. Использование устройств возбуждения двухчастотных разрядов в вакуумно-плазменных системах предоставляет возможность независимого контроля показателей потока и энергии заряженных частиц, играющих важную роль в прикладных задачах, таких как нанесение тонких плёнок, травление и обработка поверхностей.

Современная микроэлектронная промышленность характеризуется потребностью в интенсификации существующих технологических процессов и применении более эффективных способов осуществления плазмохимической обработки материалов. Стимуляция СВЧ разряда полем низкой частоты, как один из способов повышения эффективности СВЧ плазмы, требует изучения влияния низкочастотной составляющей на особенности формирования плазменного разряда и характеристики процессов обработки полупроводниковых структур.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Целью работы является исследование характеристик СВЧ плазмотрона резонаторного типа средней мощности применительно к процессу обработки изделий электронной техники; изучение условий возбуждения и поддержания плазмы СВЧ разряда в условиях низкого давления, а также результатов её взаимодействия с поверхностями полупроводниковых материалов.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

- провести анализ современных тенденций развития СВЧ плазменной техники и методов плазмохимической обработки;
- разработать стенд, в основе которого будет лежать СВЧ плазмотрон средней мощности, с целью проведения экспериментальных исследований;
- исследовать влияние электрических параметров источников питания плазмотрона на возбуждение и поддержание разряда в СВЧ плазменном модуле;
- исследовать характеристики процесса плазмохимического удаления фоторезиста под воздействием СВЧ поля и их зависимость от электрофизических и технологических параметров процесса;
- исследовать особенности процесса травления монокристаллического кремния под воздействием СВЧ поля в условиях низкого давления;
- исследовать влияние внешней энергетической стимуляции СВЧ поля на характеристики возбуждаемого плазменного разряда и параметры плазмохимических процессов, проводимых в реакционном объеме СВЧ плазмотрона.

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

Предметом исследования являются электрофизические и технологические характеристики плазмы СВЧ разряда и особенности влияния на них низкочастотной энергетической стимуляции.

Высокие качественные характеристики сверхвысокочастотного разряда, по сравнению с традиционными ВЧ разрядами, и простота реализации резонаторных плазмотронов открывают перспективы внедрения СВЧ-разрядных модулей в состав новых технологических установок. Использование резонаторных систем характеризуется крайне малыми потерями и возможностью обеспечения высокого уровня поглощаемой мощности. Дополнительное внешнее стимулирование процесса формирования СВЧ разряда электромагнитным полем другой частоты является одним из способов повышения эффективности плазмохимической обработки. Внешнее энергетическое стимулирование разряда позволяет создавать плазму высокой плотности с возможностью эффективного управления энергией ионов, воздействующих на обрабатываемую поверхность. Перспективность и высокая эффективность подобных разрядов обуславливает необходимость исследования их электрофизических характеристик и анализ потенциальных применений.

На защиту выносятся приведённые ниже положения.

1. Выбрана методика и разработана конструкция волноводного тракта, позволяющего оценить величину подаваемой к разряду СВЧ мощности.

2. Зависимость скорости протекания процессов обработки в плазме СВЧ разряда от мощности в диапазоне мощностей 150–600 Вт носит линейный характер; изменение величины подаваемой в волноводный тракт мощности от 400 до 600 Вт приводит к увеличению скорости травления кремния на $\pm 40\%$.

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 52-ой и 53-ей научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР по направлению «Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем». По материалам диссертации опубликовано 4 печатные работы в сборниках материалов научных конференций.

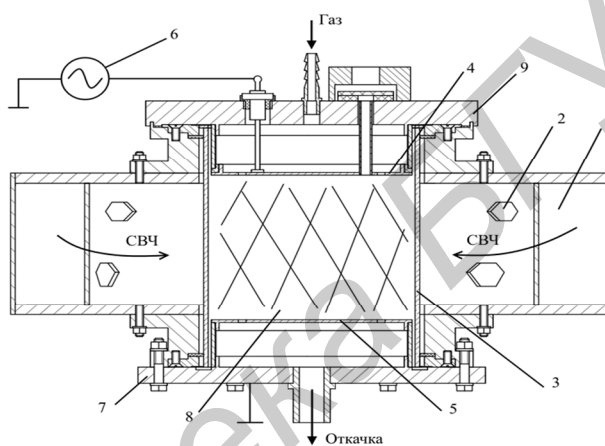
КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** описаны процессы плазменного удаления материала с поверхности твёрдого тела. Приведена классификация процессов вакуумно-плазменного травления и краткая характеристика каждого из них. Представлен механизм осуществления процесса плазмохимического травления под действием низкотемпературной химически активной плазмы. Рассмотрены основные этапы в производстве изделий микроэлектроники, включающие удаление органических материалов, плазмохимическое травление кремнийсодержащих материалов, описаны тенденции развития методов травления Si и SiO₂, а также особенности обработки тонких металлических плёнок. Приведены примеры реакций, протекающих в условиях газового разряда в атмосфере O₂ и CF₄. Рассмотрены особенности модификации структуры поверхностных слоёв твёрдых тел плазмой СВЧ разряда. Особое внимание уделено процессам ионной имплантации и плазменно-ионной имплантации в условиях СВЧ разряда. Также приведена информация о процессах плазменного окисления. Описаны современные подходы применения низкотемпературной СВЧ плазмы для выращивания окислов на основе германия и титана. Представлена информация о процессе азотирования.

В заключительном разделе первой главы приведены некоторые из современных разработок СВЧ плазмотрона. В их число входят устройства, позволяющие генерировать разряд большой площади, обладающие возможностью тонкого контроля плотности плазмы, средства формирования СВЧ микроразрядов в условиях атмосферного давления [1-А]. Особое внимание

уделено резонаторным СВЧ плазмотронам. Описана тенденция развития комбинированных плазменных разрядов.

Во **второй** главе приведено описание разработанного экспериментального комплекса и методик проводимых исследований. Разработан исследовательский стенд для проведения процесса плазмохимической обработки в условиях низкого давления. Центральным элементом комплекса является СВЧ разрядное устройство, представляющее собой замкнутый в кольцо волновод, являющийся цилиндрическим резонатором, с расположенной на его оси реакционной камерой [2-А]. В объеме камеры осуществляются процессы плазменной обработки. Схема разрядного устройства представлена на рисунке 1.



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

Рисунок 1 – Схема СВЧ разрядного устройства

Подробно описаны структура и особенности функционирования СВЧ плазмотрона. Рассмотрен принцип стимуляции СВЧ разряда НЧ полем. Для формирования СВЧ плазмы применяется генератор СВЧ мощности, включающий в себя источник электромагнитной энергии – магнетрон М-112, а также систему питания и управления им. Описаны принцип работы блока источника питания СВЧ генератора и подключаемого к потенциальному электроду разрядной системы НЧ генератора. 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 4-ой главе.

В третьей главе описаны результаты исследования влияния электрических параметров источников питания плазмотрона на возбуждение и поддержание разряда. Проанализировано влияние величины давления в рабочей камере на процесс формирования СВЧ разряда, и установлено, что наибольшая эффективность плазмообразования при проведении травления кремния характерна для величины давления 50 Па [3-А]. 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 2, 3) [4-А].

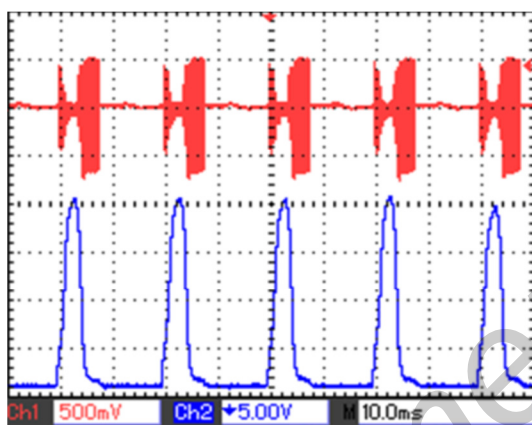


Рисунок 2 – Осциллограмма изменения величины НЧ амплитуды при синхронизации импульсов СВЧ и НЧ сигналов

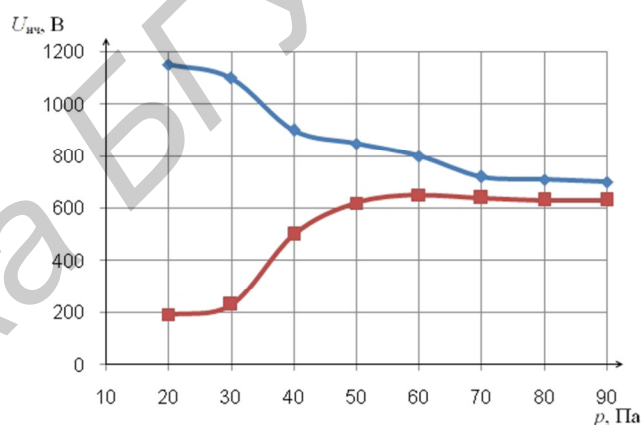


Рисунок 3 – Зависимость значений амплитуды НЧ импульсов на разрядном промежутке от давления

Проведены оптико-спектроскопические исследования и представлен результат анализа спектров плазменных разрядов в атмосфере кислорода и CF_4 . Определено влияние внешней энергетической стимуляции на интенсивность наиболее активных спектральных линий СВЧ и НЧ разрядов. В данном разряде появляется ряд отсутствующих в формируемых его разрядах молекулярных полос, характер изменения спектра комбинированного разряда выражается в увеличении интенсивности некоторых линий в 3 раза. Также описаны особенности контроля процесса удаления фоторезиста и травления монокристаллического кремния.

Четвёртая глава посвящена изучению технологических характеристик плазменного модуля. Проверена зависимость скорости удаления

фоторезистивных покрытий под воздействием СВЧ поля от значения подаваемой в волноводный тракт СВЧ мощности. Согласно полученным экспериментальным данным скорость удаления материала находится в прямой зависимости к величине СВЧ мощности (рисунок 4). В условиях самостоятельного СВЧ разряда увеличение СВЧ мощности на 50 Вт приводило к сокращению времени проведения процесса в среднем на 10%.

Получены результаты исследования скорости травления кремния под воздействием 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 5).

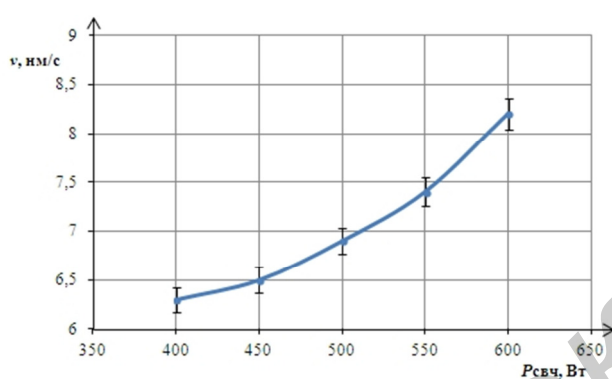


Рисунок 4 – Зависимость скорости удаления фоторезиста от СВЧ мощности

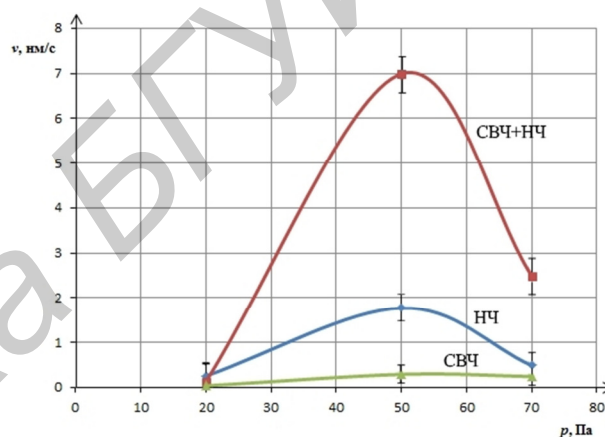


Рисунок 5 – Зависимости скорости травления кремния в трёх типах разрядов от давления

Основываясь на результатах экспериментов подтверждён эффект от стимуляции СВЧ разряда низкочастотной составляющей, выражающийся в значительном росте скорости травления кремния более, чем в 5 раз. Причиной увеличения скорости протекания процессов травления под воздействием подобного двухчастотного импульсного разряда могут быть высокая степень ионизации молекул плазмообразующего газа в неравновесной СВЧ плазме и направленность потока ионов в условиях НЧ разряда.

Установлен линейный характер зависимости скорости травления кремния от величины подаваемой в СВЧ тракт мощности. Изменение СВЧ мощности от 400 до 600 Вт привело к росту скорости травления кремния на 40%. Увеличение скорости обработки связано с повышением степени ионизации и температуры частиц плазмы. Рост СВЧ мощности вызывает ускорение процессов физического распыления ионами слоя кремния.

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.

Разработана схема исследовательского стенда, с помощью которого организовывались исследования электрофизических и технологических параметров удаления фоторезиста и травления кремния при средних уровнях давления 50–100 Па. Проведена оценка подводимой к резонатору по волноводному тракту СВЧ мощности. Калибровка позволила оценить мощность, подводимую к резонаторной системе по волноводному тракту. Показала, что конструкционное решение резонансных разрядных областей обеспечивает отношение отражённой волны к падающей в 20%, что является удовлетворительным параметром согласования цепи магнетрон – волноводный тракт – резонаторная система – рабочая область.

Проведённые 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. Скорость удаления материала показала прямую зависимость от значения подаваемой в СВЧ тракт мощности, а именно увеличение на 10% при повышении величины мощности на 50 Вт.

При проведении экспериментов по травлению монокристаллического кремния установлена линейная зависимость скорости травления от значения подаваемой в СВЧ тракт мощности. Исследование влияние 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.

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 внешней стимуляции СВЧ разряда электромагнитным полем иной частоты является перспективным направлением развития СВЧ плазменной технологии и указывает на актуальность и необходимость проведения дополнительных научных исследований.

Магистерская диссертация выполнена самостоятельно и проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составляет 91,3%. Заимствованные блоки обозначены ссылками на публикации, указанные в библиографическом списке.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

[1-А] Тихон, О.И. Конструктивные решения технологических плазменных систем атмосферного давления / О.И. Тихон, С.И. Мадвейко, С.В. Бордусов // Проблемы взаимодействия излучения с веществом [Электронный ресурс]: материалы IV Респ. научн. конф., посвящ. 90-летию со д.р. Б.В. Бокутя, (Гомель, 9-11 ноября 2016 года), в 2 ч. Ч. 2. – Электрон. дан. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2016. – С. 159-163.

[2-А] Тихон, О.И. Двухчастотный плазменный лабораторный модуль / О.И. Тихон (научный руководитель С.И. Мадвейко) // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сб. материалов 52-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 25-30 апреля 2016 года) – Минск: БГУИР, 2016. – С. 140-141.

[3-А] Тихон, О.И. Average power microwave plasmatron for semiconducting materials removal / О.И. Тихон // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сб. материалов 53-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 02-06 мая 2017 года) редкол.: А.Н. Осипов [и др.]. – Минск: БГУИР, 2017. – 2 с.

[4-А] Лушакова, М.С. Исследование особенностей возбуждения пульсирующего комбинированного (СВЧ+НЧ поля) разряда / М.С. Лушакова, О.И. Тихон (научные руководители С.В. Бордусов, С.И. Мадвейко) // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сб. материалов 53-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 02-06 мая 2017 года) – Минск: БГУИР, 2017. – 2 с.

[5-А] Лушакова, М.С. Исследование влияния СВЧ предыонизации на условия пробоя в молекулярных газах в разрядной системе Е-типа / М.С. Лушакова, О.И. Тихон // Физика конденсированного состояния: материалы XXV междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 20 апреля 2017 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы, физ.-техн. фак.; редкол.: В.Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2017. – С. 203-205.