

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

УДК 66.088+621.3.049.77

Жаворонок Игорь
Александрович

**Исследование влияния СВЧ плазмохимической обработки на зарядовые
состояния полупроводниковых структур интегральных микросхем**

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра
по специальности 1-39 80 03 «Электронные системы и технологии»

Научный руководитель
Мадвейко Сергей Игоревич
кандидат тех. наук

Минск 2023

ВВЕДЕНИЕ

Важной особенностью полупроводников является сильная зависимость их электрических и оптических свойств от состояния поверхности и способов ее обработки. При любых физико-химических обработках, связанных с получением атомно-чистых поверхностей, полупроводниковые кристаллы-подложки помимо собственных поверхностных состояний, обусловленных прерыванием периодичности потенциала кристаллической решетки, приобретают и другие, несобственные поверхностные состояния, обусловленные возмущением потенциала идеальной атомно-чистой поверхности. Наличие локальных поверхностных уровней энергии приводит к тому, что электроны и дырки могут «прилипнуть» к поверхности, образуя поверхностный электрический заряд. При этом под поверхностью формируется равный по величине и противоположный по знаку пространственный заряд, который приводит к перераспределению подвижных носителей заряда и изменению приповерхностных свойств полупроводников [1].

Практически с момента появления МОП ИС известно, что их надежность и выход годных в значительной степени зависят от вида и величины заряда в подзатворном диэлектрике. До сих пор ведущие фирмы по микроэлектронике интенсивно изучают характеристики зарядовых состояний в структуре кремний-термически выращенный оксид кремния. Цель этих исследований – получить предельные значения степени интеграции, быстродействия, потребляемой мощности, надежности и т.п. Особый интерес представляет изучение зарядовых состояний полупроводниковых структур после их обработки в плазме СВЧ разряда большого объема при различных электрических параметрах блока питания СВЧ магнетрона.

В процессе производства при плазмохимической обработке полупроводниковые структуры микросхем могут подвергаться радиационному, термическому и другим видам воздействия. Это может приводить к изменению плотности зарядов, находящихся на границе раздела Si-SiO₂. Поэтому исследование влияния СВЧ плазмохимической обработки на зарядовые состояния полупроводниковых структур интегральных микросхем является актуальной задачей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами

Результаты диссертационного исследования получены в рамках проведения следующих научно-исследовательских работ: ГБ 2021-25 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.

Личный вклад соискателя

Содержание диссертации отображает личный вклад автора. Он заключается в подборе метода исследования, разработке блока питания, исследовании электрических характеристик и оптического свечения плазмы постоянной генерации, а также анализ результатов и исследование зависимостей. Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем

Актуальность темы магистерской диссертации:

В процессе производства при плазмохимической обработке полупроводниковые структуры микросхем могут подвергаться радиационному, термическому и другим видам воздействия. Это может приводить к изменению плотности зарядов, находящихся на границе раздела Si-SiO₂. Поэтому исследование влияния СВЧ плазмохимической обработки на зарядовые состояния полупроводниковых структур интегральных микросхем является актуальной задачей.

Степень разработанности проблемы

Большую часть исследований в этой области удалось обнаружить в работе Яфаров Р.К. «Неравновесная СВЧ-плазма низкого давления в научных исследованиях и разработках микро и наноэлектроники», а также в работах Бордусова С.В. и Мадвейко С.И.

Однако интерес к данной работе был вызван недостаточностью исследований параметров полупроводников после обработки в плазме СВЧ-разряда при непрерывном режиме генерации, а именно появляющихся зарядовых состояний их влияния на параметры первых.

Цель работы: Исследовать влияние СВЧ плазмохимической обработки на зарядовые состояния полупроводниковых структур интегральных микросхем при различных режимах генерации СВЧ плазмы.

Задачи исследования:

- Исследовать влияние электрических параметров источника питания СВЧ магнетрона на параметры СВЧ плазмы.
- Исследовать зарядовые состояния полупроводниковых структур после их обработки в плазме СВЧ разряда большого объёма при изменении электрических параметров блока питания СВЧ магнетрона.

Область исследования

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) ОСВО 1-39 80 03-2019 специальности 1-39 80 03 Электронные системы и технологии.

Теоретическая и методологическая основа исследования

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Объект исследования: Si-пластины с оксидной пленкой после СВЧ плазмохимической обработки.

Предмет исследования: Характеристики плазмы, зарядовые состояния полупроводниковых структур.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы публиковались на 57-ой, 58-ой и 59-ой научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 2021-2023 гг.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Установлена стабильная работа СВЧ магнетрона на плазменную нагрузку большого объёма при питании его от импульсного блока питания, работающего в квазипостоянном режиме.
2. Установлено, что квазинепрерывный режим генерации тока импульсным блоком питания СВЧ магнетрона способствует возбуждению разряда в непрерывном режиме.
3. Установлено, что при обработке Si-пластин в плазме СВЧ-разряда генерируемого в непрерывном режиме, имеется оптимальное давление (≈ 140 Па), при котором зарядовые состояния в поверхностном слое структуры минимальны.

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 4 печатных работы, в том числе: 4 статьи в сборнике и материалах конференций, общим объемом 12 авторских листов.

Текст обоснования: Практически с момента появления МОП ИС известно, что их надежность и выход годных в значительной степени зависят от вида и величины заряда в подзатворном диэлектрике. До сих пор ведущие полупроводниковые фирмы интенсивно изучают характеристики зарядовых состояний в структуре кремний–термически выращенный оксид кремния. Цель этих исследований – получить предельные значения степени интеграции, быстродействия, потребляемой мощности, надежности и т.п. Особый интерес представляет изучение зарядовых состояний полупроводниковых структур после их обработки в плазме СВЧ разряда большого объема при изменении электрических параметров блока питания СВЧ магнетрона.

Проверка на уникальность

Проведена экспертиза диссертации Жаворонка Игоря Александровича «Исследование влияния СВЧ плазмохимической обработки на зарядовые состояния полупроводниковых структур интегральных микросхем» на корректность использования заимствованных материалов с применением сетевого ресурса «Антиплагиат» (адрес доступа: <https://antiplagiat.ru>) в on-line режиме 19.04.2023 г. В результате проверки установлена корректность использования заимствованных материалов (оригинальность диссертационной работы составляет 63,54 %).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В общей характеристике работы сформулированы ее цель и задачи, даны сведения об объекте и предмете исследования, представлены положения, выносимые на защиту.

Во введении обозначена актуальность задачи исследования влияния зарядовых состояний на характеристики изделий при обработке в СВЧ плазме.

В первой главе описываются зарядовые состояния МОП-структур, вследствие чего могут возникать, на какие характеристики потенциально могут оказывать эффект и о других дефектах. А также об технологии плазменной обработки полупроводниковых структур, включая описание используемого оборудования в данной работе.

По ходу главы получается вывод о том, что перспективные условия формирования разряда – квазипостоянный режим, который, предположительно, позволит сократить время обработки пластин за счет увеличения энергозатрат в плазму СВЧ разряда. Однако, плазмохимическая обработка предполагает непосредственное взаимодействие заряженных частиц из плазмы с поверхностью обрабатываемых материалов. Возникновение поверхностных состояний и поверхностного заряда зачастую негативно влияет на параметры последних. В связи с этим, исследование влияния зарядовых состояний на параметры полупроводников, в ходе обработки их квазипостоянной плазме СВЧ-разряда, является актуальной задачей.

Вторая глава посвящена технологической системе, контрольно-измерительному оборудованию и методик проведения исследования. Вкратце описана технологическая система, на которой производится обработка пластин в плазме, методики для измерения влияния зарядовых состояний на качество полупроводниковых структур, обзор некоторого контрольно-измерительного оборудования, используемого для подобных задач.

В данной работе используется оборудование, содержащее детали от обычных бытовых микроволновых печей. Такое техническое решение дешевое, легкое, и сравнительно небольшое.

Используемая система состоит из камеры, где производится непосредственно обработка, СВЧ магнетрона как источника энергии для создания плазмы в объеме камеры, блока питания, вакуумной системы и модулей напуска газа.

Описанный вольт-фарадный метод исследования, является основным. Так в основе его лежит хорошо проработанная и многократно подтвержденная практикой теория формирования в приповерхностной области полупроводников пространственного заряда и связанных с ней емкостей, под воздействием приложенной к этой структуре потенциала (напряжения).

В третьей главе проводится исследование характеристик плазмы и зарядовых состояний структур, образованных в ее области при различных условиях питания СВЧ магнетрона.

План проведения исследований таков, берется полупроводниковая пластина кремний, и делится на несколько, больше двадцати, пластин. Первая обозначается как нулевая и не будет обрабатываться, чтобы потом использовать ее для сравнения (рисунок 1).

Затем производилась обработка при различных режимах, в течении одинакового времени (секунд 40). После чего по полученным данным можно будет производить дальнейший анализ.

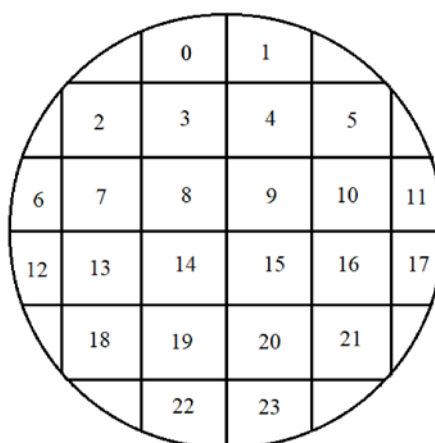


Рисунок 1 – Примерное деление кремниевой подложки на образцы

Так была выбрана наиболее показательная серия результатов для фиксированной мощности в 1890 Вт, и переменном давлении (таблица 1).

Таблица 1 – Зарядовые состояния пластин, обработанных при различном давлении

Мощность, Вт	Давление, Па	$Q_{ss} \cdot 10^6, \text{ Кл/см}^{-2}$
1890	80	0,97
	133	0,19
	200	0,44
	260	1,09

По приведенным результатам построен график зависимости зарядовых состояний от давления при постоянной мощности для обработки в квазинепрерывном режиме генерации СВЧ-плазмы (рисунок 2)

Так из графика наблюдается оптимальное давление, при котором зарядовые состояния в поверхностном слое полупроводниковой структуре минимальны.

Полученный минимум зарядовых состояний, объясняется тем, что в области низких давлений количество активных плазменных частиц мало, и их поток на поверхность материала снижается по мере уменьшения давления. В сторону больших давлений поток частиц к поверхности также уменьшается ввиду затруднения процесса плазмообразования и увеличения скорости гибели активных травящих частиц в объеме за счет соударения между собой, а также гибелью на стенках разрядной камеры. А чем эффективнее обработка, тем больше стравливается материала, с потенциальными зарядовыми состояниями.

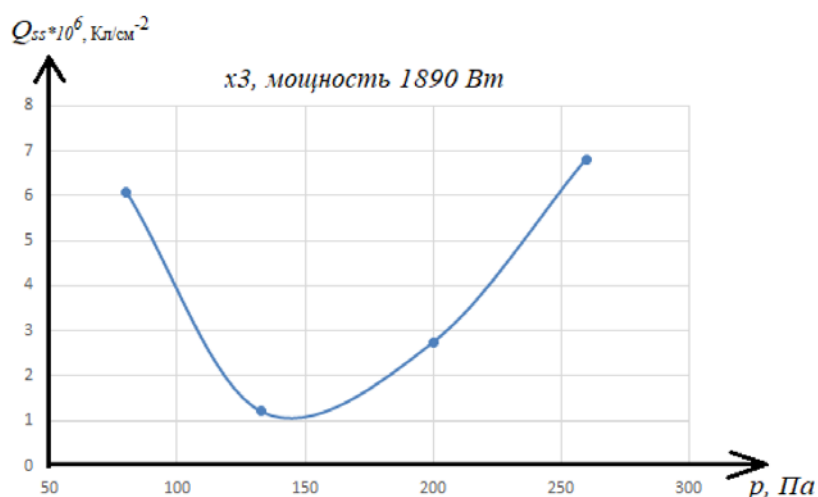


Рисунок 2 – Зависимость зарядовых состояний от давления (непрерывный режим генерации при 1890 Вт)

Таким образом в ходе исследования влияния плазмохимической обработки полупроводниковых структур в СВЧ-разряде, было обнаружено, что зарядовые состояния уменьшаются при увеличении мощности, а для давления существует оптимальное значение ($\approx 140 \text{ Па}$). Между тем при проведении двух серий экспериментов зарядовые состояний относительно нулевого образца (не подвергавшегося обработке), в среднем были то выше, то ниже. Учитывая, что сами значения их в целом малы, можно прийти к выводу, что их влияние в ходе обработки в непрерывном режиме генерации плазмы, находятся на уровне погрешности.

И если все же они будут иметь недопустимые значения, то достаточным в таком случае считается низкотемпературный отжиг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе литературного анализа было установлено, что состояние поверхности полупроводника обычно оказывает существенное влияние на работу полупроводниковых приборов. Возникновение поверхностных состояний и поверхностного заряда зачастую негативно влияет на параметры последних. В связи с этим необходимы очень тщательная очистка и обработка поверхности полупроводниковых кристаллов в рамках технологического процесса изготовления полупроводниковых приборов.

Рассмотрены несколько видов сухого травления, один из которых «ионное травление». Определены перспективные условия формирования разряда – квазипостоянный режим, который, предположительно, позволит сократить время обработки пластин за счет увеличения энергозатрат в плазму СВЧ разряда.

Показана возможность использования плазменного оборудования на базе типовых конструктивных элементов бытовых СВЧ печей и трёхфазный импульсный источник питания СВЧ магнетрона с регулировкой мощности в широком диапазоне значений для обработки полупроводниковых материалов. Такое техническое решение источника питания обладает хорошими массогабаритными характеристиками. Использование подобного источника питания СВЧ магнетрона в составе плазменного СВЧ оборудования позволяет возбуждать разряд в непрерывном режиме, за счет чего могут быть уменьшены временные и энергетические затраты на технологические процессы.

Экспериментально установлено, что для исследованных условий, при обработке Si-пластин в плазме СВЧ-разряда, генерируемой в непрерывном режиме, имеется оптимальное давление (≈ 140 Па), при котором зарядовые состояния в поверхностном слое структуры минимальны.

Результаты можно использовать при разработке новых технологических процессов и модернизации существующих.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Материалы конференций

[1] Жаворонок, И.А. Исследование режимов работы трехфазного импульсного источника питания СВЧ магнетрона на плазменную нагрузку / И.А. Жаворонок, О. И. Тихон // Электронные системы и технологии: сборник материалов 57-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, 19–23 апреля 2021 г. / редкол.: Д.В. Лихачевский [и др.]. – Минск: БГУИР, 2021. – 178–180.

[2] Жаворонок, И. А. Зарядовые состояния МОП-структур / И. А. Жаворонок, О. И. Тихон // Электронные системы и технологии: 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. Лихачевский [и др.]. – Минск, 2022. – С. 406–408.

[3] Жаворонок, И. А. Анализ технологии плазменной обработки полупроводниковых структур / И. А. Жаворонок, О. И. Тихон // Электронные системы и технологии: 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. Лихачевский [и др.]. – Минск, 2022. – С. 403–405.

[4] Жаворонок, И. А. Исследование зарядовых состояний в поверхностном слое кремниевой пластины и оксидной пленки после плазмохимической обработки / И. А. Жаворонок, О. И. Тихон // Электронные системы и технологии: сборник материалов 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 18-20 апреля 2023 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихачевский [и др.]. – Минск, 2023. – С. 400–402.