

УДАЛЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА В ПЛАЗМЕ СВЧ С ПЛАСТИН БОЛЬШИХ ПЛОЩАДЕЙ

Масейкова Д.Д.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Мадвейко С.И. – к.т.н., доцент, зав. кафедры ЭТТ

Аннотация. Экспериментально и теоретически рассмотрен процесс удаления фоторезиста с поверхности полупроводниковых пластин больших площадей в условиях микроволновой плазмы. Показано, что равномерность очистки определяется распределением плотности плазмы, параметрами СВЧ-излучения и температурными условиями обработки. Предложены подходы к оптимизации параметров плазменного разряда и конструкции реактора, позволяющие повысить однородность удаления фоторезиста при обработке крупноформатных подложек.

Ключевые слова: фоторезист, СВЧ-плазма, плазменная обработка, полупроводниковые пластины.

Введение. Современное развитие микроэлектроники связано с ростом требований к миниатюризации и производительности интегральных схем. Этап удаления фоторезиста играет особую роль. Остатки фоторезиста могут снизить точность формирования топологии и надежность полупроводниковых устройств. При обработке пластин диаметром более 300 мм в СВЧ-плазменных установках возникает проблема неравномерного удаления фоторезиста. В результате появляются дефекты и увеличивается количество бракованных изделий.

В данной статье рассматриваются параметры плазменного разряда и предлагаются подходы к оптимизации процесса, что поможет улучшить равномерность удаления фоторезиста на подложках больших площадей.

Основная часть. Микроволновая плазма характеризуется высокой энергией электронов (1-10 эВ) при относительно низкой температуре тяжёлых частиц. Плотность заряженных частиц в таком разряде обычно составляет 10^{10} - 10^{12} см⁻³, что обеспечивает интенсивное взаимодействие с обрабатываемой поверхностью. Степень ионизации газа варьируется от 10^{-6} до 10^{-2} в зависимости от мощности СВЧ-излучения и давления в камере. Эти параметры определяют реакционную способность плазмы и её эффективность при удалении фоторезиста [1].

Генерация плазмы в СВЧ-поле происходит преимущественно за счёт безударного механизма поддержания разряда, где электроны эффективно нагреваются в переменном электрическом поле. Основным механизмом удаления фоторезиста в кислородсодержащей плазме является окислительный распад его органических компонентов. Атомарный кислород (О) и озоновые радикалы (О₃), генерируемые в плазме, атакуют углерод-углеродные и углерод-водородные связи полимерной матрицы, что приводит к разрыву длинных цепей и образованию низкомолекулярных соединений, таких как СО, СО₂ и Н₂О. Летучие продукты реакции удаляются из зоны обработки потоком газа, обеспечивая постепенное истончение фоторезистного слоя. Параллельно с химическим окислением значительную роль играет физическое распыление продуктов деградации под действием ионной бомбардировки. Ускоренные в плазменном разряде ионы кислорода (О₂⁺) и аргона (Аг⁺) передают кинетическую энергию поверхности, разрушая ослабленные окислением участки [2].

Роль СВЧ-излучения в генерации плазмы. Однородность плазменного разряда при удалении фоторезиста напрямую определяется параметрами микроволнового излучения. Частота СВЧ-поля влияет на глубину скин-слоя и распределение энергии в плазме, что критично для обработки больших площадей. Мощность генератора определяет плотность электронов и радикалов, участвующих в химических реакциях удаления фоторезиста. Режим модуляции (импульсный или непрерывный) позволяет контролировать тепловую нагрузку на подложку, предотвращая локальные перегревы.

Геометрические параметры реактора оказывают существенное влияние на пространственное распределение плазменного поля. Конфигурация камеры обработки

определяет характер распространения электромагнитных волн и формирование стоячих волн. В реакторах цилиндрической формы наблюдается аксиально-симметричное распределение плотности плазмы, тогда как прямоугольные конструкции способствуют формированию неоднородностей в угловых зонах. Размеры рабочей области напрямую влияют на степень равномерности плазменного покрытия подложки.

Расположение СВЧ-излучателей относительно обрабатываемой подложки является критическим фактором равномерности генерации плазмы. Симметричная компоновка излучателей по периметру камеры способствует формированию однородного плазменного слоя. Система подачи реакционного газа с оптимизированной сеткой распределительных форсунок обеспечивает равномерное смешивание реагентов по всей площади пластины. Комбинированное воздействие этих факторов определяет стабильность параметров плазмы в приповерхностной зоне [3].

Материалы внутренних поверхностей реактора существенно влияют на локальную плотность активных частиц. Металлические стенки с высокой степенью отражения СВЧ-волн способствуют формированию стоячих волн и неравномерному распределению энергии. Диэлектрические покрытия уменьшают рекомбинацию заряженных частиц, но могут создавать зоны с повышенной концентрацией радикалов. Эти эффекты приводят к образованию пространственных неоднородностей в плазменном слое над обрабатываемой поверхностью.

Мощность СВЧ-излучения является ключевым параметром, определяющим плотность генерируемой плазмы. Повышение мощности приводит к увеличению концентрации активных частиц в плазменном объеме, что напрямую влияет на скорость удаления фоторезиста. Однако чрезмерное увеличение мощности может вызвать локальный перегрев подложки и деградацию её поверхностных свойств. Оптимальный диапазон мощностей обеспечивает баланс между высокой скоростью обработки и сохранением структурной целостности пластины.

Частота микроволнового излучения существенно влияет на глубину скин-слоя и пространственное распределение энергии в плазме. При стандартной частоте 2,45 ГГц наблюдается более выраженное поверхностное поглощение энергии, тогда как более высокие частоты обеспечивают лучшее проникновение в объем реактора. Это свойство позволяет управлять профилем плотности плазмы, что особенно важно для равномерной обработки пластин больших площадей. Выбор частоты должен учитывать геометрические параметры реактора и требуемую глубину взаимодействия.

Стабильность параметров СВЧ-генератора критически важна для поддержания однородной плотности плазмы на протяженных подложках. Колебания мощности или частоты приводят к пространственно-временным неоднородностям в плазменном разряде, что проявляется в виде зон с разной скоростью удаления фоторезиста. Особенно чувствительны к этим изменениям периферийные области пластин, где возможны эффекты краевого ослабления поля. Системы автоматической стабилизации параметров генератора минимизируют эти отклонения, обеспечивая технологическую воспроизводимость процесса [4].

Локальные перепады температуры на поверхности пластины создают значительные вариации в скорости удаления фоторезиста. Это связано с температурной зависимостью кинетики химических реакций между активными частицами плазмы и полимерным материалом. В зонах с повышенной температурой скорость реакций окисления возрастает экспоненциально, что приводит к ускоренному удалению фоторезиста [5].

Данный эффект особенно критичен на краях пластины, где наблюдаются максимальные градиенты из-за особенностей теплопередачи в системе.

Термические напряжения, возникающие из-за неравномерного нагрева подложки, способствуют образованию структурных дефектов. Разница коэффициентов теплового расширения между фоторезистом и материалом подложки усиливает механические напряжения в пограничных слоях. При превышении предела прочности это приводит к микротрещинам и расслоению материалов, что особенно проявляется при обработке пластин диаметром более 300 мм. Указанные дефекты снижают выход годных изделий и требуют дополнительных мер по контролю температурного поля.

Физические принципы плазменного травления лежат в основе обеспечения равномерности удаления фоторезиста на больших площадях. Ключевым аспектом является достижение однородного распределения активных частиц плазмы по всей поверхности

обрабатываемой пластины, что требует точного контроля параметров плазменного разряда, включая плотность электронов, температуру и состав реакционной среды. Особую роль играет синхронизация скорости химических реакций на границе раздела плазма-фоторезист с равномерностью подвода энергии СВЧ-излучения [6].

Модификация формы и взаимного расположения электродов позволяет достичь более равномерного распределения СВЧ-поля в рабочей камере, что обеспечивает гомогенность плазменного слоя по всей поверхности обрабатываемой подложки, данный аспект является критически важным для устранения пространственных вариаций скорости удаления фоторезиста. Внедрение асимметричных конфигураций электродной системы способствует компенсации краевых эффектов и повышению воспроизводимости процесса [7].

Заключение. Анализ показывает, что равномерное удаление фоторезиста критически важно для полупроводниковой промышленности, особенно при обработке пластин диаметром более 300 мм. Увеличение спроса на высокопроизводительные интегральные схемы требует минимизации дефектов подложек и отходов, что связано с качеством плазменной очистки. Исследование выявило множество причин неравномерности обработки, включая геометрию реакторов и температурные градиенты. Оптимизация плазменных установок, включая распределение СВЧ-поля и многоуровневый температурный контроль, может повысить равномерность обработки. Разработанные рекомендации создают основу для масштабирования технологии плазменной очистки, что может снизить брак и себестоимость, соответствуя требованиям к миниатюризации и производительности электронных компонентов.

Список литературы

1. Бордусов С.В. Высокоскоростное удаление фоторезистивных пленок в послесвечении СВЧ разряда в кислороде // *Электронная обработка материалов*. – 2001. – №6. – С. 80–83.
2. Бордусов С.В. СВЧ-плазменные процессы в микроэлектронной технологии // *Электронная обработка материалов*. – 2001. – №3. – С. 72–78.
3. Достанко А.П., Русецкий А.М., Бордусов С.В. и др. *Электрофизические процессы и оборудование в технологии микро- и нанoeлектроники*. – Минск: Бестпринт, 2011. – 210 с.
4. Симонов О. Использование микроволновой плазмы для удаления фоторезиста при групповой обработке полупроводниковых пластин // *Технологии*. – 2017. – №2. – С. 180–184.
5. Хамицевич Е.Ю., Лушакова М.С., Бордусов С.В. Вакуумно-плазменные системы двухчастотных разрядов для технологического применения // 54-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2018. – С. 194–195.
6. Яфаров Р.К., Климова С.А. Влияние свч плазменной микрообработки на электронные свойства поверхности кристаллов кремния (100) // *Журнал технической физики*. – 2014. – №3. – С. 103–107.
7. Bahena J.A., Tyler P., Taddei J. и др. *An evaluation of bath life effects on photoresist removal for wafer level packaging* // IMAPS 2022 - 55th International symposium on microelectronics. – Boston, MA, 2022. – С. 1–5.

UDC 621.3.095.3

MICROWAVE PLASMA PHOTORESIST REMOVAL FROM LARGE-AREA WAFERS

Maseikova D.D.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Madveiko S.I. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of EET

Annotation. The process of removing photoresist from the surface of large-area semiconductor wafers under microwave plasma conditions is examined experimentally and theoretically. It is shown that the uniformity of removal is determined by the plasma density distribution, microwave radiation parameters, and processing temperature conditions. Approaches to optimizing plasma discharge parameters and reactor design are proposed, allowing for improved photoresist removal uniformity during processing of large-format wafers.

Keywords: photoresist, microwave plasma, plasma processing, semiconductor wafers.