

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

Коваленко И.А.

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

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

Аннотация. Проведен анализ особенностей применения сверхвысокочастотной (СВЧ) плазмы для удаления фоторезиста с полупроводниковых пластин в сравнении с традиционной высокочастотной (ВЧ) плазмой. Показано, что использование СВЧ-плазмы в downstream-режиме может обеспечивать степень диссоциации кислорода до 90%, что позволяет достичь скорости удаления фоторезиста 10–15 мкм/мин.

Ключевые слова: СВЧ-плазма, downstream-режим, радикальное травление, удаление фоторезиста.

Введение. Современная микро- и нанoeлектроника базируется на процессе фотолитографии, который позволяет формировать топологию интегральных схем (ИС) с элементами размером в несколько нанометров. Ключевое требование к производству – высокая чистота поверхностей на каждом этапе. В этом контексте плазменные технологии обеспечивают подготовку поверхности (очистку, активацию) и заключительное удаление временных масок (фоторезиста).

Традиционно в промышленности используется высокочастотная (ВЧ) плазма (13.56 МГц). Однако с ростом требований к скорости обработки, (минимизация радиационных дефектов и повышение селективности процессов) все большее внимание привлекает сверхвысокочастотная (СВЧ) плазма (2.45 ГГц). В данной статье проводится анализ особенностей применения СВЧ плазмохимического удаления фоторезиста в сравнении с классическими ВЧ методами

Основная часть. Плазменная очистка подложек используется для удаления адсорбированных паров воды и органических загрязнений. Это важно для повышения адгезии наносимого фоторезистивного слоя к поверхности материала (кремния, диоксида кремния или металлов) [1]. Здесь сравнение ВЧ и СВЧ плазмы показывает интересные различия. Обработка в ВЧ-плазме эффективно удаляет загрязнения за счет ионной бомбардировки, но может создавать дефекты в приповерхностном слое. Обработка в СВЧ-плазме, благодаря высокой плотности радикалов и низкой энергии ионов, позволяет проводить «мягкую» химическую очистку и модифицировать поверхностную энергию, делая ее гидрофильной без повреждения кристаллической решетки, что особенно важно для структур с ультратонкими диэлектриками.

Завершающая операция цикла литографии – удаление фоторезиста. После этапа травления защитная маска из фоторезиста должна быть полностью удалена без повреждения нижележащих слоев. Качество этой операции напрямую определяет успех последующих процессов.

Для реализации вакуумно-плазменных процессов используются различные типы разрядов, каждый из которых имеет свою область применения [1].

Высокочастотный (ВЧ) разряд (13.56 МГц) является промышленным стандартом. Его основное достоинство – способность создавать плазму как в проводящих, так и в диэлектрических средах благодаря емкостному или индуктивному способу ввода энергии. Однако из-за наличия высокого потенциала само-смещения на электродах происходит ионная бомбардировка.

Сверхвысокочастотный (СВЧ) разряд (2.45 ГГц) при прочих равных условиях плотность ионизации выше, а также ниже и энергия ионов, что не приводит к ионной бомбардировке [1].

Взаимодействие плазмы с материалом можно разделить на несколько режимов.

Плазменное травление (ПТ) и радикальное травление (РТ) – процессы, протекающие по чисто химическому механизму. В их основе лежат гетерогенные реакции между нейтральными активными частицами (радикалами) и атомами обрабатываемого материала. Для удаления фоторезиста (органического полимера) используется атомарный кислород О, который окисляет пленку, превращая её в летучие продукты реакции (СО, СО₂, Н₂О) [1].

С уменьшением размеров элементов ИС чувствительные материалы, такие как low-k диэлектрики или ультратонкие слои металлов, становятся крайне уязвимы для воздействия заряженных частиц. Ионная бомбардировка и жёсткое ультрафиолетовое излучение из плазмы могут вызывать перезарядку и пробой тонких диэлектриков, увеличение шероховатости поверхности, имплантацию ионов в подложку, деградацию материала low-k (увеличение его диэлектрической проницаемости).

Поэтому главная перспектива развития плазменной очистки – вынос обрабатываемой пластины из зоны активного разряда. Это и есть радикальное (downstream) травление: пластина находится в зоне, отделённой от плазмы, и подвергается воздействию только нейтральных химически активных частиц (радикалов). Это позволяет полностью исключить повреждение структуры заряженными частицами и излучением.

Анализ патентной литературы [2] показывает несколько основных способов реализации «downstream» или «remote» плазмы:

Перфорированный экран: между зоной генерации плазмы и камерой обработки устанавливается металлическая стенка с множеством отверстий. Если размер отверстий меньше дебаевского радиуса экранирования (толщины слоя пространственного заряда у стенки), плазма не проникает через них. Ионы и электроны, сталкиваясь со стенками экрана, рекомбинируют. Нейтральные же радикалы свободно проходят через отверстия и диффундируют к пластине.

Удалённое расположение (Downstream): плазма генерируется в трубе или камере, удалённой от пластины на расстояние, значительно превышающее длину свободного пробега иона. Пока частицы движутся по трубе к пластине, ионы успевают рекомбинироваться на стенках, в то время как радикалы с большим временем жизни достигают подложки [1].

Все эти методы успешно работают как с ВЧ, так и с СВЧ разрядами. Но эффективность генерации радикалов и скорость, и качество удаления фоторезиста напрямую зависят от типа используемого источника. Именно здесь преимущества СВЧ-плазмы раскрываются наиболее полно.

Основной параметр, определяющий скорость удаления фоторезиста - концентрация атомарного кислорода. Эффективность образования радикалов зависит от плотности мощности, вкладываемой в газ. СВЧ-разряд при давлении 10-300 Па обеспечивает исключительно высокую степень диссоциации молекул кислорода от 50 до 90%, что значительно выше, чем в стандартном ВЧ-разряде (обычно 5-20%) [3]. Это достигается благодаря эффективному ускорению электронов в СВЧ-поле [1]. Высокая концентрация атомарного кислорода позволяет достигать скоростей удаления фоторезиста до 10-15 мкм/мин и выше, что критически важно для производительности линий.

Низкая энергия ионов в первичной СВЧ-плазме, а в режиме РТ – их полное отсутствие в зоне обработки, делает процесс «химически мягким». Это исключает ионную бомбардировку нижележащих слоев образца. Таким образом, достигается бесконечная селективность по отношению к материалу подложки, что принципиально невозможно в процессах, где пластина контактирует с плазмой (РИПТ, ПТ).

Заключение. Анализ особенностей плазмохимического удаления фоторезиста показывает, что применение СВЧ-плазмы, организованной по схеме радикального травления (downstream), является наиболее перспективным методом для современного производства ИС. По сравнению с традиционной ВЧ-плазмой, СВЧ-метод обеспечивает более высокую скорость

процесса за счет большей плотности атомарного кислорода, абсолютную селективность к подложке благодаря отсутствию ионной бомбардировки, минимальное радиационное повреждение чувствительных структур.

Список литературы

1. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. «Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов». М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Патент US 6,395,150 B1, «Plasma processing system for processing semiconductor wafers in a downstream radical dissociation process», 2002.
3. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. «Principles of Plasma Discharges and Materials Processing». 2nd Edition. Wiley-Interscience, 2005.

UDC 621.382.002.3:533.9

ANALYSIS OF THE FEATURES OF USING MICROWAVE PLASMA TO REMOVE PHOTORESIST FROM SEMICONDUCTOR WAFERS

Kovalenko I.A

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

Madveika S.I. – Cand. of Sci., associate professor, head of department electronic technique and technology

Annotation. An analysis of the specific features of using microwave plasma to remove photoresist from semiconductor wafers was conducted, compared to traditional radio-frequency (RF) plasma. It was shown that using microwave plasma in downstream mode can achieve oxygen dissociation rates of up to 90%, enabling photoresist removal rates of 10–15 $\mu\text{m}/\text{min}$.

Keywords: microwave plasma, downstream mode, radical etching, photoresist removal.