

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В ПРОТОЧНЫХ ТУНЕЛЬНЫХ РЕАКТОРАХ ПРИ НИЗКОМ ВАКУУМЕ

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

Прокофьев С. С.

Бордусов С.В.-д.т.н., профессор

Обработка поверхности твердотельных структур с помощью низкотемпературной неравновесной плазмы представляет собой сложный комплекс физикохимических процессов образования активных частиц в результате внешнего энергетического воздействия на рабочую газообразную среду и взаимодействия этих частиц между собой, с обрабатываемой поверхностью и стенками, ограничивающими разрядное пространство.

Для ВЧ разрядов существуют разные способы их возбуждения, которые делят по признаку того, замыкаются ли силовые линии электрического поля в плазме или нет. К первой группе относятся индукционные разряды (рисунок 1 а), где разряд возбуждается путем подачи переменного тока в соленоид, внутри которого расположен реактор из диэлектрического материала. Силовые линии электрического поля представляют собой окружности концентрические с витками соленоида, а магнитное поле направлено вдоль оси соленоида. Такой разряд называют разрядом *H*-типа. Ко второй группе относятся разряды, в которых переменное напряжение подается на электроды, которые могут находиться в непосредственном контакте с плазмой, либо быть изолированными от нее (рисунок 2б и в). Такая система возбуждения по отношению к переменному напряжению аналогична конденсатору. Поэтому такие типы разрядов называются емкостными или разрядами *E*-типа[1].

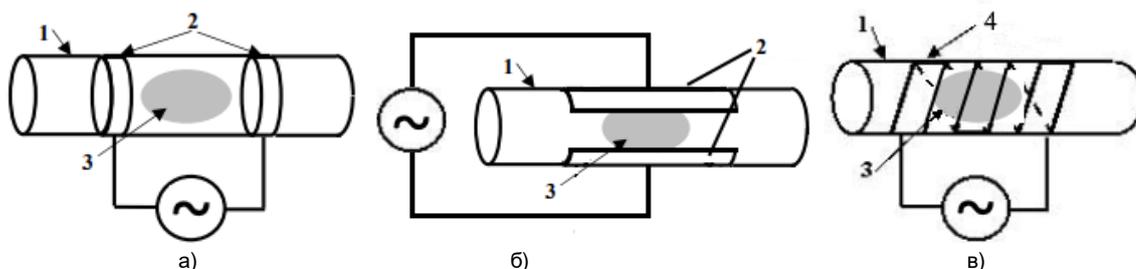


Рисунок 1 - Способы возбуждения ВЧ разряда: 1 – корпус реактора, 2 – электроды, 3 – плазма, 4 – индуктор; а - емкостное возбуждение с кольцевыми электродами; б – емкостное с электродами в виде обкладок; в – индукционное возбуждение

Материалом для реакторов объемных систем служит, в основном, кварцевое стекло, окись алюминия, алунд. Тип материала стенки влияет на скорость гибели заряженных и нейтральных частиц в плазме, поскольку в разрядах низкого давления рекомбинация происходит, в основном на стенках камеры.

Энергия внешнего источника превращает, практически не взаимодействующий с поверхностью в обычных условиях плазмообразующий газ в «активный» газ – плазму: ионы, электроны, атомы и радикалы. Компоненты плазмы реагируют с поверхностью обрабатываемого образца, где происходит ряд гетерогенных процессов – рекомбинация и химическое или физическое взаимодействие с тонким поверхностным слоем[2].

Специфической особенностью травления материалов в плазме является наличие целого ряда одновременно, и в основном, независимо друг от друга протекающих реакций, особенно при использовании многокомпонентных газовых смесей[1].

Опыт эксплуатации высокочастотных планарных и объемных реакторов показал на непригодность туннельных проточных реакторов с объемным расположением подложек для проведения прецизионных процессов травления пленочных материалов по следующим причинам:

1. высокая неравномерность травления по пластине (10-15%) и в партии пластин (10 - 15%);
2. невозпроизводимость процесса от цикла к циклу обработки;
3. сильный нагрев в процессе обработки (500 - 600 К);
4. низкая анизотропия процесса и т.д.

Однако в ряде случаев для многослойных структур требуется получение наклонного профиля травления. Интенсивно ведутся работы по совершенствованию процессов удаления фоторезиста и очистки поверхности подложек от органических и неорганических загрязнений, осаждения пленочных материалов и т.д., в связи с чем актуальность работ по созданию реакторов объемного типа не уменьшается.

Общей особенностью всех реакторов объемного типа для плазменного травления является кассетная загрузка подложек. Одновременно в реакторе может обрабатываться 26-100 подложек. Высокая производительность установок - их главное достоинство. В то же время кассетная загрузка чрезвычайно затрудняет создание условий для проведения равномерной обработки всех подложек, находящихся в реакторе.

Установлено, что для достижения высокой равномерности плазмохимического удаления материалов необходимо:

- вводить стабилизацию температуры обратном с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$, если скорость процесса удаления материала определяется скоростью химических реакций на поверхности;
- выравнять концентрацию активных частиц в зоне генерации с помощью устройств организации газового потока» и обеспечивать эквидистантность зоны генерации и всех обрабатываемых поверхностей, если скорость процесса удаления материала определяется скоростью доставки активных частиц;
- вводить устройства для фиксации положения образцов в реакционной зоне и положения реакционной зоны в реакторе;
- обеспечивать возможность быстрой смены или очистки реакционной камеры перед каждым циклом обработки.

Стабилизация температуры подложек в процессе обработки в реакторах объемного типа, как правило, не производится. Изготовив подложкодержатель специальной формы, в принципе можно добиться стабилизации температуры, но это сильно усложнит конструкцию реактора[2].

На равномерность процессов обработки, связанную с распределением концентрации активных травящих частиц, по диаметру объемного реактора, оказывает влияние соотношение поперечных размеров реактора и подложек. Это связано с газодинамическими условиями в зоне обработки подложек. Так как рабочее давление в реакционной камере $p \gg 7.3$ Па, то в этом случае реализуется вязкостный режим течения газа, при котором характер распределения скорости в поперечном сечении определяется силами внутреннего трения. Внесение пластин в зону движения газа приведет к искажению газового потока, а взаимная экранировка пластин выразится в неравномерной доставке активных частиц к различным точкам их поверхности, что должно отрицательно сказаться на равномерности обработки[3].

Экспериментально установлено, что для проведения плазмохимических процессов травления диаметр реактора должен быть в 3.5-4.5 раза больше диаметра подложки. Выдержать такое соотношение при обработке подложек диаметром 100 - 150 мм и более технически сложно, так как увеличение объема реакционной камеры вызывает необходимость повышения производительности откачных средств, мощности генератора электромагнитных волн, усложнения конструкции разрядной камеры, связанной с вакуумным уплотнением, системой подвода энергии к реакционному объему и т.д.[4].

Известен еще ряд технических решений, направленных на повышение равномерности процесса обработки, связанных с внесением в рабочую камеру сильно развитых металлических поверхностей. Это использование перфорированных цилиндров, позволяющее снизить неравномерность обработки до 3-5%, но приводящее к существенному (в 2-3 раза) снижению скорости процесса, и размещение подложек на вращающихся подложкодержателях.

Невоспроизводимость процесса от цикла к циклу обработки возникает либо за счет разных температур стенок реакционной камеры, либо за счет откачки до различных степеней остаточных давлений, что сказывается на воспроизводимости скоростей травления материалов. При этом основную дестабилизирующую роль играют различные примеси и загрязнения, попадающие в объем реакционной камеры вместе с воздухом во время разгерметизации[4].

Разогрев подложек в процессе травления приводит не только к повышению скорости обработки, но и к увеличению подтравки под маску и деградации фоторезистивных масок. Следствием неодинакового и неконтролируемого подогрева подложек в ходе процесса обработки могут являться различные скорости травления, что, в случае отсутствия оперативного контроля за ходом процесса, выражается в невоспроизводимости результатов от цикла к циклу и неравномерности обработки (в случае, если пластины в различных местах реактора нагреваются по-разному). В связи с этим температуру подложек стараются снизить и стабилизировать на одном уровне.

При работе на высоких давлениях (порядка 65-200 Па) вследствие уменьшения длины свободного пробега частиц снижается направленность и увеличивается хаотичность их движения. Это вызывает ухудшение профиля травления и, в большинстве случаев, выражается в подтравливании за счет снижения анизотропии процесса. Плазменное травление в объемном реакторе изотропно и величина подтравки и профиль травления зависят от давления и мощности, подводимой к разряду.

Наиболее очевидным технологическим преимуществом использования прямооточных реакторов туннельного типа является высокая скорость процессов плазмохимической обработки, обусловленная совокупным воздействием рассмотренных выше факторов активации гетерогенных процессов на поверхности твердого тела. Поэтому исходя из специфических особенностей организации и проведения процессов вакуумного газоплазменного травления в производстве изделий электронной техники плазмохимическая обработка материалов в условиях низкого вакуума будет наиболее эффективна на операциях удаления фоторезиста, очистки поверхности подложек от органических и неорганических загрязнений, планаризации слоев маскирующих (фоторезисты, полиимид) покрытий а также при травлении рельефа структур микроприборов, допускающих изотропный профиль травления[4].

Список использованных источников:

4. Киреев В.Ю., Данилин Б.С., Кузнецов В.И. Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур. М., Радио и связь, 1983. 128 с.
5. Бордусов, С. В. Процесс СВЧ плазмохимического удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин. // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР: материалы конф. В 2 ч. Ч. 2. - Минск, 2014. - С. 192-193
6. Достанко, А. П. Плазменные СВЧ технологии в процессах инженерии поверхности / А. П. Достанко, С. В. Бордусов, // Журнал физики и инженерии поверхности – 2003. – Том 1, №1.
7. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М., Энергоатомиздат, 1987. 264 с.