

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Клакевич М.С.

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

Научный руководитель: Бордусов С.В. – проф., д-р техн. наук

Аннотация. Проанализированы методы контроля процессов плазменного травления материалов, рассмотрены их достоинства и недостатки.

Ключевые слова: контроль плазменного травления, спектроскопия, эмиссионная спектроскопия, оптическая спектроскопия, масс-спектроскопия, оже-спектроскопия, интерферометрия.

Одной из наиболее важных проблем практического использования плазмохимических процессов травления и удаления тонких пленок является разработка точного и надежного метода контроля этих процессов. Решение указанной проблемы позволило бы оптимизировать время плазмохимической обработки, исключить брак на операциях плазмохимического травления, автоматизировать процессы, минимизировать разброс параметров выпускаемых полупроводниковых приборов или интегральных схем. Именно поэтому в последнее время уделяется большое внимание развитию методов контроля плазмохимических процессов обработки поверхности.

Метод оже-электронной спектроскопии. Метод основан на высокочувствительной спектроскопии вторичных оже-электронов, эмитирующих с поверхности твердого тела под действием бомбардировки пучком первичных моноэнергетических электронов в сверхвысоком вакууме. Энергия эмитируемого электрона определяется его энергией связи в атоме, что позволяет идентифицировать малые количества элементов, находящихся на поверхности твердого тела.

Существует несколько способов проведения оже-анализа поверхности после воздействия плазмы. Наиболее простой – это перенос образца из реактора в сверхвысоковакуумную камеру для анализа. Его очевидный недостаток состоит в том, что образец подвергается воздействию атмосферы и нарушается чистота эксперимента. Второй способ – перемещение образца из реактора в камеру через вакуумный шлюз. Он сложен и требует основательной доработки реактора. Третий способ – размещение оже-анализатора непосредственно в реакторе. Затруднения при его использовании вызваны тем, что вакуумные условия в реакторе часто недостаточны для точного количественного анализа, а существующий при плазменном травлении разряд оказывает вредное влияние на оже-анализатор [1].

Масс-спектрометрический метод. Масс-спектрометрический метод контроля основан на разделении ионизированных атомов и молекул в зависимости от отношения массы иона к его заряду и последующим измерении соответствующих ионных токов. Масс-спектрометр обеспечивает по существу одновременную регистрацию нескольких ионов и может быть легко приспособлен к реакторам, в которых проводится вакуумно-плазменное травление того или иного вида, без существенных затрат на реконструкцию аппаратуры. На рисунке 1 представлено размещение аппаратуры для прямого отбора ионов из плазмы реактора и их анализа.

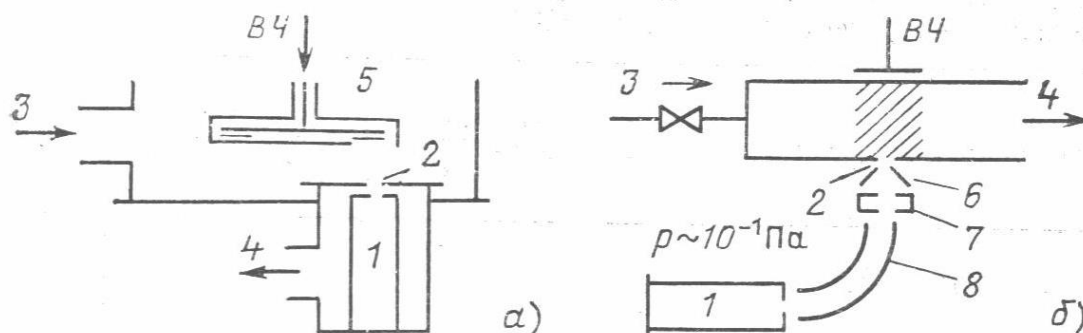


Рисунок 1 – Размещение аппаратуры для прямого отбора ионов из плазмы реактора и их анализа в КМА через отверстие в заземленном электроде (а) и через отверстие в стенке (б) (1-КМА; 2 – отверстие в заземленном электроде; 3- подача газа; 4 – откачка газа; 5 – заземленный экран; 6- вытягивающий электрод; 7 – ионный источник; 8 – электростатический анализатор)

Комплексное изучение поведения компонентов, принимающих участие в процессах вакуумно-плазменного травления, возможно при использовании масс-спектрометра, обеспечивающего точный количественный анализ и идентификацию частиц, в связи с чем к масс-спектрометру предъявляются следующие требования [1]:

- диапазон масс и разрешающая способность, достаточные для регистрации реагентов, продуктов реакции и промежуточных соединений, участвующих в вакуумно-плазменном травлении, а также остаточных газов и примесей с массой до 300 а.е.м.;

- высокая чувствительность, поскольку даже следу некоторых веществ могут играть важную роль в процессах вакуумно-плазменного травления;

- высокое быстродействие (около 1 с), позволяющие регистрировать изменение содержания компонентов плазмы в реальном масштабе времени, что необходимо для оперативного управления процессами плазменно-вакуумного травления;

- невосприимчивость к значительному разбросу энергий анализируемых ионов, поскольку в ряде случаев этот разброс может быть значительным (до 100 эВ);

- способность работать при сравнительно высоких давлениях в ионном источнике, что необходимо для изучения зависимости протекания процессов вакуумно-плазменного травления от давления в реакторе;

- минимальное влияние на плазму, поскольку последняя обладает высокой чувствительностью к внешним электрическим и магнитным полям;

- минимальные габариты и масса.

Эмиссионно-спектральный метод. Эмиссионно-спектральный метод основан на регистрации оптического спектра собственного излучения возбужденных в плазме атомов и молекул. При этом с помощью градуировочных экспериментов удается получить достаточно простые и точные выражения, описывающие связь интенсивности эмиссионных линий и скорости травления. Эмиссионно-спектральный метод может осуществляться с фильтром и оптическим детектором. В первом случае контролируется фиксированный диапазон длин волн, что дает лишь ограниченную информацию относительно конечной точки травления в то время как во втором случае контролируется широкая область спектра и экспериментатор получает большой объем информации о процессах, которые происходят в плазме при травлении того или иного материала. В условиях производства дополнительная информация не всегда желательна, поскольку, во-первых, производственное оборудование зачастую не в состоянии ее использовать и, во-вторых, к тому времени, когда процесс будет внедрен в производство, он будет вестись шаблонно, по заранее установленному порядку. В то же время диагностика плазм может оказать ценную помощь в разработке процессов, которые в конечном итоге будут применяться в производстве [1]. На рисунке 2 представлена схема эмиссионного спектрометра.

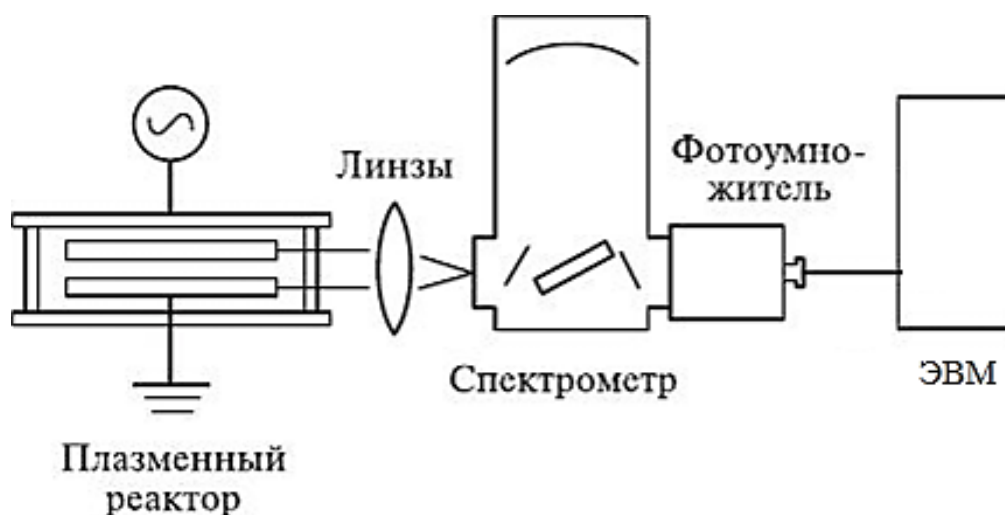


Рисунок 2 – Схема эмиссионного спектрометра [2]

Основное преимущество метода состоит в том, что излучение тлеющего разряда может наблюдаться и вне реакционной камеры через кварцевые или стеклянные окна без вмешательства в химические процессы, происходящие внутри камеры. Применения зондов или заборников, которые могли бы вызвать возмущения в реакционной камере, не требуется. Другим достоинством метода эмиссионно-спектрального метода является легкость интерпретации экспериментов. Спектроскопический анализ зародился еще в 19 веке одновременно с разработкой систем тлеющего разряда. Эмиссионные спектры атомов и молекул описаны в многочисленных источниках, наилучшими из которых являются каталоги по молекулярным и атомным спектрам. Таким образом, анализ эмиссионных спектров может опираться на обширные научные данные, полученные за последние столетия [2].

Фотометрический и интерференционный метод. Фотометрический метод основан на изменении коэффициента отражения света пленками из различных материалов. В качестве источника света может служить He-Ne-лазер, луч которого через смотровое окно направляется в вакуумную камеру, затем при помощи зеркал и микрометрических винтов юстируется на поверхности образца, и отражается от нее, попадает в оптический детектор. Окончание травления каждого слоя многослойной структуры обнаруживается по заметному изменению коэффициента отражения. Если топология структуры не позволяет применять для контроля отдельные элементы ввиду их малых размеров или негладкой поверхности, то могут быть использованы «свидетели», аналогичные основной структуре и осажденные на подложку в той же последовательности.

Интерферометр работает следующим образом. Излучение лазера падает на поляризационный светоделитель и почти полностью отражается в левую сторону. Оно проходит четвертьволновую пластину и расширитель пучка. За оптическим окном в реакторе расположен образец, представляющий собой дифракционную решетку. Отраженный от образца свет расщепляется на несколько дифрагированных пучков, распространяющихся под соответствующим углом к поверхности образца. Пучок нулевого порядка на обратном пути вновь проходит через четвертьволновую пластину, и при этом его плоскость поляризации поворачивается в конечном итоге на 90° по отношению к исходному лазерному пучку. Затем отраженный свет проходит через поляризационный делитель и попадает в фотоприемник, выходной сигнал которого регистрируется на ЭВМ. На рисунке 3 представлена схема однолучевого интерферометра и зависимость амплитуды сигнала фотоприемника от времени при травлении кремниевой подложки [1].

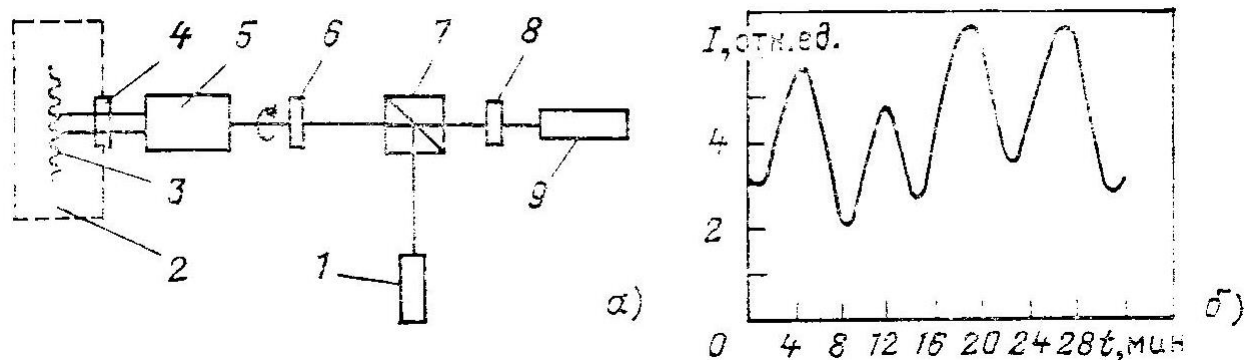


Рисунок 3 – Схема однолучевого интерферометра (а) и зависимость амплитуды сигнала фотоприемника от времени при травлении кремниевой подложки (б) (1 – лазер; 2 – реактор; 3 – дифракционная решетка; 4 – оптическое окно; 5 – расширитель пучка; 6 – четвертьволновая пластина; 7 – светоделитель; 8 – фотоприемник; 9- ЭВМ) [1]

В технологии изготовления интегральных схем лазерные интерферометры используются главным образом для контроля скорости травления в плазме диэлектрических пленок и определения момента окончания травления диэлектрика. Превышение необходимого времени травления может привести к быстрому подтравливанию «ступеньки» и разрушению маскирующего покрытия, в результате чего может иметь место недопустимое искажение размеров проводников. В последнее время лазерную интерферометрию стали применять также для контроля глубины вытравливания этих участков в кремниевой пластине. Глубина вытравливания этих участков около микрона, они используются в качестве областей с диэлектрической изоляцией в технологии изготовления биполярных интегральных схем [2].

Список литературы

1. Данилин, Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов / Б.С. Данилин, В.Ю. Киреев. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 264 с.
2. Галперин, В.А. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях : учеб.пособие / В.А. Галперин, Е.В. Данилкин, А.И. Мочалов ; под ред. С.П.Тимошенкова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 283 с.

UDC 533.9.08

METHODS FOR CONTROL OF PROCESSES OF PLASMA ETCHING OF MATERIALS

Klakevich M.S.

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

Bordusov S. V. – professor, doctor of technical sciences

Annotation. Methods for controlling the processes of plasma etching of materials has been reviewed, their advantages and disadvantages has been reviewed.

Keywords. plasma etching control, spectroscopy, emission spectroscopy, optical spectroscopy, mass spectroscopy, Auger spectroscopy, interferometry.