

К. ф.-м. н. С. В. ДУДИН, А. П. ЯЦКОВ,
к. ф.-м. н. В. И. ФАРЕНИК

Украина, г. Харьков, Национальный ун-т им. В. Н. Каразина,
Научный физико-технологический центр
E-mail: root@sptca.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию
14.03 2002 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. В. ФЛОРКО
(ОНУ им. И. И. Мечникова, г. Одесса)

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Приведен обзор теоретических и прикладных аспектов применения электрических зондов для измерения параметров технологической плазмы и диагностики технологических процессов.

Опыт использования плазменных технологий свидетельствует, что высокое, повторяемое качество продукции могут гарантировать только устройства, в которых процесс плазменной обработки полностью автоматизирован. При этом одним из ключевых факторов в достижении стабильного качества является оперативный контроль параметров технологического процесса [1].

Традиционно для контроля плазменных технологических процессов используют измерение внешних параметров системы — напряжения и тока разряда, давления и расхода газа и т. п. Однако “инструментом”, который непосредственно воздействует на обрабатываемую поверхность, является плазма, и ее параметры определяются не только перечисленными внешними параметрами, но и количеством, формой и расположением обрабатываемых изделий, состоянием их поверхности, а также состоянием поверхности вакуумной камеры технологической установки и другими факторами, часто неконтролируемыми. То есть гарантией повторяемости результатов процесса является повторяемость параметров плазмы, контактирующей с обрабатываемым изделием, и потоков заряженных частиц на его поверхность. (Это особенно важно при разработке нового технологического оборудования и отработке новых технологий, когда необходима быстрая обратная связь, оперативная информация о параметрах плазмы и визуализация вносимых изменений в реальном масштабе времени. Кроме того, возможность воспроизводить параметры технологической плазмы позволяет обоснованно переносить существующие технологические процессы на другие типы технологических установок и новые типы обрабатываемых изделий.)

К настоящему времени наибольшее распространение получили эмиссионно-спектральные методы диагностики плазменно-технологических процессов, масс-спектрометрические, оптические, контактные и

др. Несмотря на достоинства перечисленных методов контроля, ни один из них не удовлетворяет требованиям универсальности, высокой точности, простоты реализации, технологичности и дешевизны одновременно [2].

В последние годы в технологии микроэлектроники и прецизионного машиностроения интенсивно развиваются зондовые методы контроля плазменной обработки покрытий. Они позволяют производить локальные измерения практически всех существенных параметров плазмы в очень широком диапазоне их изменения, обладая при этом относительной простотой реализации. Наряду с присущими им серьезными недостатками (сложность интерпретации результатов, возмущение плазмы в процессе измерения), эти методы отличают универсальность в отношении материала покрытий, типа разряда, сорта рабочего газа при высоком быстродействии и чувствительности. Они дают непосредственную численную информацию о таких важнейших параметрах плазмы (и их пространственных распределениях), как

— плотность плазмы, ответственная за плотность потока заряженных частиц, бомбардирующих обрабатываемую поверхность;

— потенциал плазмы, ответственный за их энергию;

— энергетический спектр электронов, ответственный за химические реакции в плазме и образование активных частиц.

Начиная с 1980 г. систематические исследования в области диагностики плазменных технологических процессов интенсивно проводились в Отраслевой научно-исследовательской лаборатории диагностики плазменно-технологических процессов Харьковского национального университета и Научном физико-технологическом центре Министерства образования и Национальной академии наук Украины (г. Харьков), а успешные испытания разработанных в этих организациях приборов были осуществлены на ведущих предприятиях Министерства электронной промышленности бывшего СССР: НИИ ВТ им. С. А. Векшинского, НПО “Сапфир” (г. Москва), НПО “Светлана” (г. Санкт-Петербург), НИИ ТМ, НИИ ТТ, НИИ МЭ (г. Зеленоград), НПО “Сатурн” (г. Киев), НПО “Интеграл” (г. Минск), НПО “Электроника” (г. Воронеж). В течение этого времени были проведены исследования фундаментальных и прикладных аспектов при-

Работа выполнена за счет финансирования Министерства образования и науки Украины.

менения электрических зондов для диагностики процессов ионно-плазменного травления и нанесения материалов, начиная с физических основ зондовых измерений в плазме различных типов технологических установок и заканчивая конкретными методами и устройствами контроля.

Настоящая статья посвящена краткому обзору результатов этих работ.

Особенности зондовых измерений в технологической плазме

Несмотря на то, что в области использования электрических зондов для диагностики плазмы накоплен богатый экспериментальный и теоретический материал [3—6], строгой универсальной теории зондовых измерений не существует, а построенные теории для частных случаев применения зондов очень сложны [3]. Более того, технологическая плазма, как правило, является неравновесной, неоднородной, неизотропной, часто химически активной средой, что ограничивает применимость стандартных зондовых методик. Поэтому разработка зондовых методик контроля плазменно-технологических процессов представляет собой достаточно сложную научно-техническую задачу и требует проведения широкого спектра исследований технологической плазмы и специфики работы в ней электрических зондов.

Опыт авторов показывает, что взаимосвязь параметров плазмы с результатом технологического процесса, как правило, нетривиальна и заранее неизвестна. В связи с этим была выработана следующая схема проведения комплекса исследований для каждого типа разряда.

В первую очередь, необходимо изучить особенности зондовых измерений в плазме данного типа разряда. Влияние постоянных и переменных электрических и магнитных полей, потоков заряженных частиц, осаждения проводящих и диэлектрических пленок на зондах может кардинально изменять зондовые характеристики, и часто требуется принятие специальных мер для устранения или корректного учета этих факторов.

Затем должна быть поставлена задача получения и систематизации максимально широкого комплекса экспериментальных данных о чувствительности зонда к конкретному технологическому процессу. На основании полученных результатов разрабатываются специфические методики контроля различных плазменно-технологических процессов.

Кроме того, для конкретных случаев применения зондов обычно можно выделить ограниченное количество доминирующих процессов в плазме и на этой основе построить (либо модернизировать существующие) математические модели, описывающие взаимосвязь зондовых характеристик с параметрами технологического процесса.

В работах [7—10] проведен анализ специфических особенностей применения электрических зондов в ионно-пучковой плазме (ИПП), образующейся в пространстве транспортировки пучков ионов в устройствах ионно-лучевого травления. Этот анализ показал, что ИПП является довольно сложным обра-

зованием. Она состоит [7] из четырех компонент с принципиально различными свойствами: ионы пучка; γ -электроны, выбитые из мишени в результате ион-электронной эмиссии; медленные ионы, рожденные в результате ионизации и резонансной перезарядки; запертые в потенциальной яме низкоэнергетичные электроны.

В работах [11—13] проанализированы особенности зондовых измерений в плазме ВЧ-разряда емкостного типа, широко используемого в микроэлектронной промышленности [14]. Показано, что наличие ВЧ-тока в цепи зонда приводит к существенному возмущению формы его ВАХ и к значительным погрешностям в оценках параметров плазмы [11]. Разработана методика, позволяющая устранить влияние паразитной емкости ввода и существенно повысить импеданс зонда [15].

Классические зондовые теории наиболее развиты для предельного случая низких давлений нейтрального газа, когда длина свободного пробега заряженных частиц λ значительно превышает размеры зонда R_p (бесстолкновительный режим зонда), и для другого предельного случая, когда $\lambda \ll R_p$ (зонд работает в режиме сплошной среды) [6]. В то же время давление газа в большинстве промышленных технологий лежит в области промежуточных давлений, в которой длина свободного пробега сопоставима с размерами зонда и слоя. При этом решение задачи значительно усложняется в силу нелокальной зависимости плотности заряженных частиц от потенциала и напряженности электрического поля. В наиболее общей постановке задача вычисления зондового тока при промежуточных давлениях решалась в [10]. В этой работе построена теоретическая модель ионного тока на цилиндрический ленгмюровский зонд, погруженный в слабоионизованную газоразрядную плазму, при произвольных давлениях нейтрального газа и любом соотношении между толщиной слоя объемного заряда и радиусом зонда.



Рис. 1. Прибор «Плазмометр»

Базируясь на результатах отработки зондовых методик в технологической плазме, в лаборатории диагностики плазменных технологических процессов ХНУ был разработан универсальный измерительный комплекс «Плазмометр» (рис. 1), предназначенный для автоматизированного измерения ключевых стационарных параметров лабораторной и технологической газоразрядной плазмы и их пространственных распределений, а также для автоматизированного сбора, обработки, анализа и хранения результатов измерений. Измеряемыми параметрами являются: потенциал плазмы, плавающий потенциал, плотность электронов и положительных ионов, температура и энергетический спектр электронов. Область применения этого прибора — научные исследования, раз-

работка нового технологического оборудования и обработка новых технологий.

Плазмометр снабжен системой автоматизированного перемещения зонда по двум координатам, что позволяет получать пространственные распределения параметров плазмы. Кроме того, предусмотрено измерение временных зависимостей этих параметров. Прибор работает под управлением компьютера класса PC и оснащается сервисным программным обеспечением, позволяющим полностью автоматизировать процесс измерения и обработки информации.

Комплект зондов (см. рис. 2) представляет собой систему насадок с взаимосовместимыми металлическими и керамическими трубками и переходниками, позволяющими изменять длину зонда d_1 в диапазоне 50—500 мм при радиусе d_3 до 200 мм.

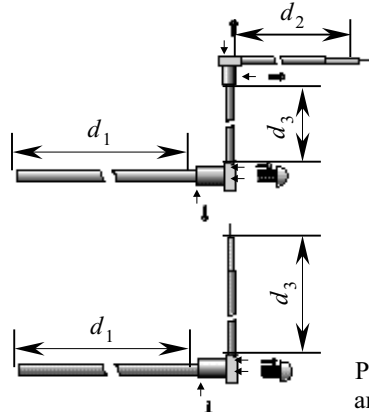


Рис. 2. Различные варианты компоновки зонда

Перемещение зонда происходит в вакууме, в то время как все электронные и механические системы комплекса смонтированы за пределами вакуумной камеры в едином металлическом корпусе. Вывод зонда и вся измерительная электроника полностью экранированы. Кроме того, предусмотрена система подавления ВЧ-сигнала с частотой 13,56 МГц.

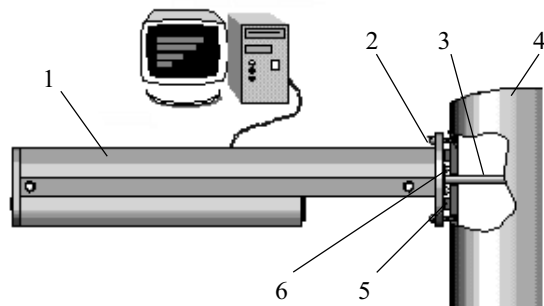


Рис. 3. Схема подключения "Плазмометра" к технологической установке:

1 — электронно-механический блок; 2 — присоединительный фланец; 3 — зонд; 4 — вакуумная камера; 5 — медное уплотнение; 6 — вакуумное уплотнение зонда

Предусмотрено несколько способов крепления прибора к камере (см. рис. 3): непосредственно при помощи базового фланца (диаметр 114 мм) с медным уплотнением, через переходный фланец, либо с использованием выносного вакуумного уплотнения (в случае отсутствия достаточного места для монтажа базового фланца).

В основу работы «Плазмометра» положен метод ленгмюровского зонда с комбинированной электронной и численной обработкой зондового сигнала. Данными, снимаемыми с зонда электронным контроллером, являются ВАХ и зависимости производных зондового тока от потенциала зонда, измеряемые по усовершенствованной модуляционной методике. При этом достигается высокая чувствительность (вплоть до 3—4 порядков по амплитуде) при измерении высокоэнергетичного «хвоста» функции распределения электронов по энергии даже в нестационарной плазме.

Через последовательный порт (интерфейс RS-232) данные поступают в персональный компьютер. С использованием численных моделей работы ленгмюровского зонда [14] производится определение основных параметров плазмы в различных условиях работы технологических устройств. Результатом измерений являются вольт-амперная характеристика зонда, ее вторая производная, функция распределения электронов по энергии и локальные параметры плазмы: плотности электронов и ионов, температура электронов, потенциал плазмы (рис. 4). Предусмотрена также возможность автоматизированного контроля процессов травления и нанесения покрытий.

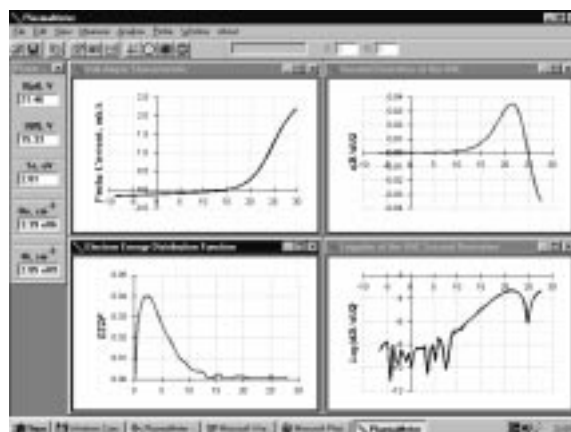


Рис. 4. Вид экрана компьютера при измерении параметров плазмы

Программное обеспечение «Плазмометра» включает полностью автоматизированные алгоритмы выбора режимов измерения, собственно измерений и обработки их результатов. В то же время следует учитывать, что в силу специфики зондовых измерений эти алгоритмы могут существенно меняться в зависимости от типа и характеристик разряда, давления газа, наличия магнитных полей и т. д. Поэтому в программном обеспечении предусмотрена возможность подстройки параметров измерения и анализа (всего около 60 параметров), а также отключения отдельных автоматических блоков с переходом в ручной режим.

Основным требованием к универсальному варианту прибора является возможность получения максимально возможного объема информации о плазме и ходе технологического процесса. «Плазмометр» включает оборудование и программное обеспечение как для измерения и анализа параметров плазмы, так

и для решения специфических технологических задач (поддержание какого-либо параметра плазмы в заданных пределах, определение момента окончания процесса). При этом обеспечиваются фильтрация шумов и флуктуаций, переходные процессы между этапами плазменно-технологического процесса, автоматическая настройка параметров анализа в зависимости от стадии и параметров процесса.

Основные характеристики "Плазмометра"

Диапазон изменения потенциала зонда	-400...+400 В
Разрешение по потенциалу зонда	0,01 В
Диапазон измеряемых токов	10 нА ...10 мА
Диапазон измерения электронной температуры	0,01...100 эВ
Диапазон измерения плотности плазмы	$10^7...10^{13}$ см ⁻³
Количество координат перемещения зонда	2
Диапазон перемещения зонда	0...300 мм
Точность позиционирования	0,5 мм

Зондовые методы контроля момента окончания ПТП

Рассматриваемые методы относятся, в основном, к контролю наиболее распространенных методов травления (ионно-лучевого — ИЛТ, реактивного ионно-лучевого — РИЛТ и плазмохимического — ПХТ) при параметрах, типичных для технологии микроэлектроники (плотность тока ионов 1—10 мА/см², энергия 0,1—2 кэВ). В процессах ИЛТ и РИЛТ использовались источник ионов холловского типа "Радикал-М" [17], источник Кауфмана [18], источник на основе ВЧ индукционно-емкостного разряда [19, 20]. Для ПХТ применялись плазмохимические реакторы на базе ВЧ емкостного разряда (рабочая частота 13,56 МГц) с использованием фтор- и хлорсодержащих газов. Подчеркнем, что эффективное применение даже самых надежных методов контроля плазменно-технологических процессов (ПТП) существенно зависит от технологического совершенства систем плазменной обработки, которое определяется, главным образом, такими параметрами как селективность и однородность травления, воспроизводимость процесса. Поэтому разработка описанных ниже методик контроля проводилась на серийных промышленных установках производства НИИ ТМ (г. Зеленоград, Россия), НИИ ПМ (г. Воронеж, Россия), Xenon (Австрия), Alcatel (Франция) в реальных технологических процессах производства интегральных микросхем.

Возможность зондового контроля ПТП обусловлена тем, что при травлении одного материала и появлении на поверхности обрабатываемой пластины другого изменяются некоторые характерные параметры контактирующей с поверхностью плазмы (плазменный потенциал, плотность и температура электронов), связанные с коэффициентами ион-электронной эмиссии, характером и составом нейтральной компоненты и примесей [21]. Одной из наиболее информативных методик, позволяющих контролировать такие изменения параметров плазмы, является методика измерения ВАХ ленгмюровского зонда. Анализ большого количества экспериментальных дан-

ных показал, что для контроля ПТП пригоден практически любой участок ВАХ (электронный или ионный ток насыщения, плавающий потенциал и т. д.). Выбор рабочего участка следует проводить в зависимости от конкретных условий и типа технологического процесса. В [2] описан целый ряд практически реализованных методик контроля процессов травления на основе чувствительности различных участков ВАХ зонда Ленгмюра к ПТП. Кратко перечислим некоторые из этих методик.

Контроль ионно-лучевого травления.

Одной из простейших является методика контроля ИЛТ по электронному току насыщения одиночного зонда, помещенного в ИПП (типичные значения 0,1—10 мА). Недостатком этой методики является невысокая точность контроля процессов травления покрытий образцов, возмущение плазмы из-за больших потерь частиц на зонд, сильный разогрев зонда. Наибольшей чувствительности метода можно достичь, поместив зонд в пограничный слой объемного заряда вблизи мишени. В то же время применение такого способа сопряжено с дополнительными техническими трудностями: небольшая толщина приповерхностного слоя (<5 мм) ограничивает возможность размещения зонда в слое (особенно в системах с вращающимися подложкодержателями). Кроме того, зонд, расположенный в непосредственной близости к обрабатываемой поверхности, реагирует лишь на локальные (вблизи зонда) изменения материала образца, что позволяет использовать методику только при соблюдении высокой однородности травления по поверхности.

Описанные в [22] экспериментальные и теоретические исследования ИПП показывают, что параметром, наиболее чувствительным к материалу поверхности мишени, является потенциал плазмы. Технически более просто регистрировать временную зависимость плавающего потенциала зонда, которая с достаточной степенью точности повторяет колебания потенциала плазмы (что и используется в методике контроля по плавающему потенциалу одиночного зонда). Зонд под плавающим потенциалом гораздо меньше возмущает плазму и не подвержен разогреву [22]. К тому же в этом случае зонд может располагаться практически в любой точке пространства транспортировки ионного пучка (ИП).

Методики, основанные на применении одиночного зонда, отличаются простотой реализации и не требуют дорогостоящего оборудования. Вместе с тем они достаточно универсальны и обладают хорошей чувствительностью к травлению различных функциональных слоев. К недостаткам однозондовых методик можно отнести сильную чувствительность к неустойчивости пучково-плазменной системы, т. е. работы источника ионов (ИИ), откачки, напуска и т. д. Для применения в системах со значительными флуктуациями тока пучка была разработана модифицированная зондовая методика, основанная на слежении за током ИП с помощью дополнительного электрода

или зонда, располагаемого в пучке. При этом для контроля используется отношение сигналов зонда и опорного электрода. Такой способ позволяет компенсировать нестабильность работы ИИ и тем самым повысить чувствительность и помехоустойчивость однозондовых методик контроля.

Контроль плазмохимического травления в плазме ВЧ-разрядов.

Наибольший объем экспериментальных данных по зондовому контролю ПТП накоплен для систем ПХТ в плазмохимических реакторах на основе ВЧ-разрядов емкостного и индукционно-емкостного типов с использованием в качестве контрольного сигнала плавающего потенциала зонда [23]. Поскольку плазма ВЧ-разряда имеет целый ряд качественных отличий от ИПП, необходимо более подробно описать специфические отличительные черты зондовой диагностики ПХТ в ВЧ-плазме.

Простейшим вариантом данного метода является способ контроля [24], по которому в зону разряда помещают одиночный зонд и располагают его в потоке продуктов реакции активного газа с веществом покрытия образца. В процессе травления измеряют изменение плавающего потенциала зонда, по которому производят контроль процесса травления покрытий. При травлении образца образуются летучие продукты реакции газа с веществом покрытия. Появление новых частиц в разряде приводит к перераспределению потенциала плазмы в области, где их концентрация достаточно велика. Это приводит, в свою очередь, к изменению потенциала зонда, помещенного в зону протока продуктов реакции. При неизменных прочих внешних параметрах разряда, как то: мощность, давление, температура, расход и скорость откачки газа, — изменение потенциала измерительного электрода связано только с процессом травления.

Недостатком описанного выше способа контроля является негативное влияние колебаний потенциала зонда (вызванных нестабильностью параметров режима установки) на точность определения момента стравливания слоев. Для устранения этого недостатка был предложен метод двух зондов. Метод основан на измерении разности плавающих потенциалов двух зондов, один из которых расположен вблизи поверхности образца со стороны откачки, так, чтобы он находился в потоке продуктов реакции, а другой — со стороны напуска рабочего газа на таком же расстоянии от потенциального электрода, т. е. в точке с таким же потенциалом плазмы. Поскольку зонды находятся в одинаковых условиях, разностный сигнал практически нечувствителен к колебаниям разрядных параметров, а определяется лишь изменением материала обрабатываемой поверхности.

С целью повышения точности контроля процесса травления за счет исключения фонового сигнала система измерительных электродов была также выполнена в виде трех зондов, размещенных последовательно один за другим между подложкодержателем и откачным патрубком, а их рабочие концы расположены в плоскости, параллельной поверхности мишени [15].

Испытания одно- и двухзондового датчика контроля по плавающему потенциалу совместно с приборами “Контроль” разных модификаций проводились также в технологических процессах скоростного травления пленок SiO_2 в локализованной плазме в реакторе индивидуальной обработки ВЧ-диодного типа на серийной промышленной установке “Плазма НД-125И”, в процессах ПХТ пленок Al в реакторе для групповой обработки “Плазма-планар”, в процессах скоростного удаления фоторезиста на установке “Плазма НД-125Ф”, в процессах ПХТ слоев Si_3N_4 , поли-Si, SiO_2 , фосфорно-силикатного стекла в ВЧ-диодных реакторах установок фирмы “Xenon” (групповой и индивидуальной обработки), в реакторе индивидуальной обработки ВЧ-диодного типа установки “ПХО-008” и др. Во всех случаях зондовый контроль показал высокую эффективность.

Устройства серии «Контроль» для зондового контроля ПТП

Для реализации перечисленных выше методик контроля ПТП была разработана серия приборов «Контроль», предназначенных для контроля процессов травления тонких пленок, используемых в производстве интегральных микросхем. Эти приборы являются специализированными устройствами, в которых из зондового сигнала извлекается информация лишь об одной технологической операции при производстве серийной продукции. Различные приборы серии отличаются типом ПТП, типом зондовых датчиков, алгоритмом обработки контрольного сигнала. Поскольку приборы «Контроль» обычно используются в составе технологических установок, конструктивно они оформлены в виде компактных встраиваемых модулей. Ниже дано краткое описание двух из них, на примере которых можно получить общее представление о приборах этой серии.

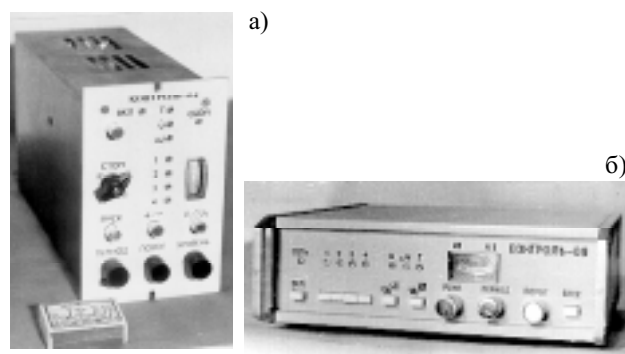


Рис. 5. Общий вид устройств “Контроль-01” (а) и “Контроль-09” (б)

Устройство “Контроль-01” предназначено для фиксации окончания процессов ИЛТ и РИЛТ тонких функциональных металлических, диэлектрических, полупроводниковых слоев, многослойных покрытий, структур со сложной топологией при изготовлении интегральных микросхем. Общий вид прибора показан на рис. 5, а.

Принцип действия устройства основан на измерении отношения токов двух зондов, один из которых расположен в приповерхностном слое у мишени с

образом, а второй контролирует ток пучка. По заданной величине этого отношения фиксируется момент стравливания слоя. Метод сравнения, заложенный в электрической схеме устройства, позволяет компенсировать линейные флуктуации зондовых сигналов (связанные с нестабильностью тока пучка ионов, давления в вакуумно-реакционной камере, анодного напряжения в ионном источнике) и выделить полезный сигнал, характеризующий именно сам процесс травления.

Устройство работает следующим образом. Сигналы с измерительных зондов подаются на входной блок, который производит согласование уровней зондовых сигналов с электрической схемой прибора. Далее сигнал поступает на блок сравнения, который формирует напряжение, пропорциональное частному от входных напряжений. Это позволяет избавиться от синхронных флуктуаций входных сигналов с измерительных электродов. С выхода блока сравнения аналоговый сигнал поступает на контрольный вольтметр, позволяющий судить о величине сигнала. Прибор снабжен также аналоговым выходом (0—10 В) для совместной работы с ЭВМ. С блока сравнения сигнал поступает также на компаратор с регулируемым по конкретному процессу порогом срабатывания. Далее сигнал с компаратора поступает на блок сигнализации окончания процесса травления. Этот блок выдает цифровой сигнал в уровнях ТТЛ, который включает установку по окончании процесса травления.

Устройство универсально по отношению к типу стравливаемого материала, имеет небольшие габариты. Применение оригинальной схемы компенсации обеспечило высокую чувствительность и надежность контроля ПТП в самых различных условиях. Относительная простота конструкции в сочетании с большими возможностями обеспечивают высокую эффективность эксплуатации прибора “Контроль-01” в составе обширного класса промышленных плазменно-технологических систем.

Однако применение этого прибора в составе автоматизированных систем управления ограничивается тем, что его аналитическая часть, ответственная за определение “момента выключения”, представляет собой простое пороговое устройство, что может приводить к ложным срабатываниям. На основании опыта контроля разнообразных ПТП были разработаны более совершенные принципы обработки контрольного сигнала. Эти принципы были положены в основу устройства “Контроль-09”, показанного на рис. 5, б.

Анализ большого количества измерений, проведенных для различных технологических процессов в разных условиях, показывает, что несмотря на определенные количественные отличия, временные зависимости контрольного сигнала обладают рядом характерных повторяющихся признаков, по которым с достаточно высокой точностью можно определить момент стравливания слоя. Действительно, в зависимости от типа установки и параметров технологического режима контролируемый ток может составлять 1 мкА—100 мА, напряжение — 0,1—500 В, а длительность процесса — 20 с—15 мин. Однако вы-

бором величины усиления входного согласующего блока можно установить некое номинальное значение напряжения на выходе (например 5 В), а период опрашивания входного сигнала выбрать равным, например, 1% от времени процесса (причем здесь достаточно грубой оценки). В этом случае, независимо от абсолютных измерений (в вольтах и секундах) контрольного сигнала, кривым одинаковой формы будут соответствовать одинаковые напряжения на входе логической схемы. Кроме того, все кривые травления (исключая их начальный участок) имеют общее свойство: переходу от слоя к слою соответствует существенное изменение уровня сигнала, причем в период установившегося травления фиксированного слоя сигнал остается примерно постоянным. Поскольку основную информацию о протекании процесса травления несут перепады уровня контрольного сигнала, а не его фоновое абсолютное значение, установившееся после стабилизации разряда, можно вычесть из сигнала его фоновое значение и выделить сигнал, связанный только с перепадами уровня, т. е. с травлением, и установить его номинальный уровень соответствующим выбором усиления.

Введение безразмерных характеристик кривой травления позволяет построить универсальную логическую обработку сигнала с фиксированным алгоритмом, обеспечивающим автоматическую регистрацию момента окончания процесса травления. Приведение кривых травления к единому масштабу по амплитуде и длительности дает возможность ввести в логическую схему фиксированные значения порогового напряжения и длительности для выделения и индикации основных принципиальных признаков травления и избавиться, таким образом, от сложной перестройки этой части прибора при переходе, например, к другому технологическому процессу с другими абсолютными измерениями кривой зондового сигнала.

Рассмотрим типичную кривую травления (I) на рис. 6. Точке $t=0$ соответствует момент включения

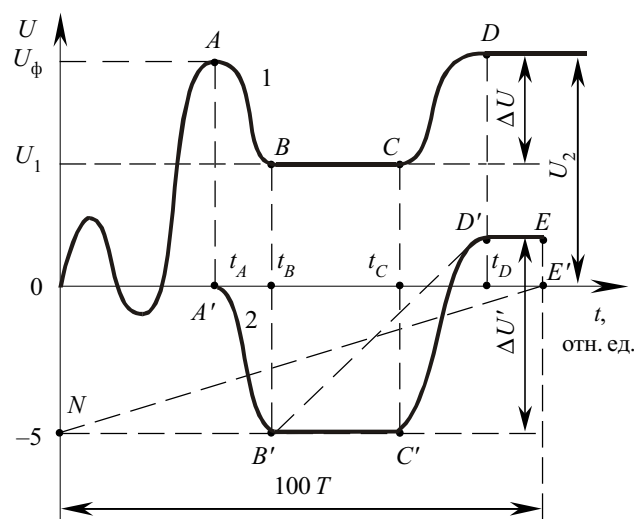


Рис. 6. Типичная кривая травления: 1 — временная зависимость входного сигнала; 2 — безразмерная скомпенсированная кривая травления

разряда; участок t_{0A} — время стабилизации разряда после включения и установления фонового значения U_{ϕ} ; t_{AB} — начало травления; t_{BC} — время установившегося травления; U_1 — уровень сигнала, соответствующий установившемуся травлению; участок CD — "дотрав", т. е. исчезновение с поверхности образца остатков данного слоя и обнажение поверхности следующего; U_2 — величина сигнала, соответствующая следующему (или промежуточному) слою покрытия. Ход временной зависимости входного сигнала на участке t_{0A} после включения разряда в источнике может быть совершенно произвольным для различных технологических процессов и не несет полезной информации о протекании процесса травления. Полное время травления t_{BD} зависит от режима обработки и толщины слоя; величина перепада $U_2 - U_1 = \Delta U$ зависит от площади обрабатываемой поверхности и падает с ее уменьшением; величина t_{CD} связана с неравномерностью травления по поверхности образца и увеличивается с ростом неравномерности. Для пластин из одной партии при неизменных условиях обработки величины t_{BC} , t_{CD} , ΔU , а также форма кривой на участках BC и CD могут незначительно отличаться, что является отражением «индивидуальности», т. е. неодинаковости образцов. Таким образом, времена t_{BC} , t_{CD} , величину и наклон перепада ΔU можно считать объективными характеристиками процесса травления конкретного образца.

Теперь рассмотрим скомпенсированную и приведенную к единому масштабу кривую травления 2 на рис. 6. Основным признаком участка $C'D'$ кривой, соответствующего окончанию процесса травления, является наличие отличного от нуля наклона, т. е. производной по времени от сигнала на ΔU за время t_{CD} . При каждом опросе входной цепи с периодом T величина напряжения на входе возрастает на $\Delta U/K$ вольт, где $K = t_{CD}/T$ — безразмерное время участка CD . Следовательно, величина $\Delta U/K$ представляет собой среднее значение производной приведенной к единому масштабу кривой травления на участке CD .

Для индикации отличной от нуля производной в устройстве выбран пороговый уровень величиной 50 мВ, что обеспечивается даже в случае кривой, соответствующей 100%-ной неравномерности травления по поверхности (кривая $A'B'D'$). Это видно из сравнения наклонов отрезков $B'D'$ и NE' , т. е., действительно, $\Delta U \cdot T / t_B > 5$ В/100 = 50 мВ. Дальнейшее увеличение чувствительности устройства к величине производной не имеет смысла, поскольку случаю 100%-ной неравномерности травления по технологическим причинам уже соответствует брак.

Наличие отличной от нуля производной (т. е. > 50 мВ) не является достаточным признаком участка CD кривой, поскольку оно может иметь место и при флуктуациях контрольного сигнала. Это требует введения еще двух дополнительных характерных признаков — наличия перепада уровня сигнала величиной ΔU вольт и следующего за ним участка с нулевой производной DE .

Этот набор признаков кривой травления был заложен в электронную схему прибора "Контроль-09".

Кроме того, учитывая, что начальные участки кривых не обладают набором характерных, повторяющихся признаков и могут привести к преждевременному срабатыванию логической схемы уже при включении разряда, необходимо (для предотвращения сбоев) исключить их попадание в логическую часть прибора и обработку. С этой целью в приборе предусмотрена регулируемая задержка включения логической части на этот переходный промежуток времени.

Таким образом, описанные устройства позволяют производить надежную регистрацию момента окончания процессов травления различных функциональных многослойных покрытий, рельефных структур при ИЛТ, РИЛТ и ПХТ и могут быть легко интегрированы в цепочку технологических операций с возможностью их полной автоматизации. Работоспособность приборов была испытана в различных ПТП на многих промышленных установках на предприятиях, упомянутых во вводной части статьи. Отмечена высокая точность контроля по толщине травливаемого слоя (не хуже 5%), хорошее разрешение по площади травливаемой поверхности (менее 1%), практически отсутствие запаздывания сигнала об окончании процесса по времени.

Изложенные результаты экспериментальных и теоретических исследований, а также материалы патентов и конструкторских разработок позволяют сделать вывод, что зондовые методы контроля являются одним из наиболее эффективных диагностических средств и не уступают традиционным методам по универсальности, чувствительности, помехозащищенности, простоте, надежности, достоверности контроля, а во многих случаях превосходят их. Кроме того, применение этих методов не требует дорогостоящего оборудования, что делает их конкурентоспособными на рынке диагностических средств ПТП и весьма перспективными для применения в промышленности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Плазменные технологии в производстве СБИС / Под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна. — М.: Мир, 1987.
2. Фареник В. И., Дудин С. В., Зыков А. В. и др. Специфика диагностики параметров плазмы электрическими зондами в процессах ионно-лучевого и плазмохимического травления // В сб.: Ионно-лучевая обработка материалов в микро- и нанoeлектронике. — М.: Наука, 1999. — С. 86—116.
3. Чан П., Тэлбот Л., Турян К. Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме. — М.: Мир, 1978.
4. Алексеев Б. В., Котельников В. А. Зондовый метод диагностики плазмы. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат, 1989.
6. Чен. Ф. Электрические зонды // В кн.: Диагностика плазмы. — М.: Мир, 1967.
7. Дудин С. В. Исследование ионно-пучковой плазмы, создаваемой широким потоком ионов низкой энергии / Дисс. канд. физ.-мат. наук. — Харьков, ФТФ ХГУ. — 1994.
8. Дудин С. В., Зыков А. В., Фареник В. И. Экспериментальное исследование ионно-пучковой плазмы / Препринт НФТЦ. — Харьков, 1993.

9. Дудин С. В., Зыков А. В., Фареник В. И. Особенности зондовых измерений в ионно-пучковой плазме / Тез. докл. II межотрасл. науч.-техн. семинара «Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике». — Харьков, 1991. — С. 32—33.

10. Dudin S. V. Probe measurements in ion-beam plasma / 21st IEEE International Conference on Plasma Science. Conference Record-Abstracts. — 1994. — Santa Fe, USA. — P. 179—180.

11. Годяк В. А., Попов О. А. О зондовой диагностике ВЧ-плазмы // ЖТФ. — 1977. — Т. 47, № 4. — С. 768.

12. Cantin A., Gagne R. The behavior and correct use of electrostatic probes in rf plasmas // Third International Conf. on Gas Discharges. — London, 1974. — P. 625.

13. Cantin A., Gagne R. Investigation of an rf plasma with symmetrical and asymmetrical electrostatic probes // J. Appl. Phys. — 1972. — Vol. 43, N 6. — P. 2639.

14. Будянский А. М., Серета Н. Д., Фареник В. И. Особенности зондового контроля ПХТ в диодном ВЧ разряде / Тез. докл. межотрасл. науч.-техн. семинара «Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике». — М.: ЦНИИТИ, 1989. — С. 226—227.

15. А. с. 1428167 СССР. Способ контроля ПХТ покрытий // А. М. Будянский, А. П. Дудин, Н. Б. Марущенко и др. — Оpubл. в Б. И., 1988. — № 9.

16. Дудин С. В., Фареник В. И., Шевченко А. В. Моделирование ленгмюровского зонда при произвольных давлениях нейтрального газа // Вестник Харьковского государственного университета. — 1998. — № 421. — С. 137.

17. Маишев Ю. П. Ионные и ионно-плазменные системы и пути их развития для задач микроэлектроники // Микроэлектроника. — 1977. — Т. 3, № 2. — С. 21—39.

18. Kaufman H. R. Technology of ion-beam sources in sputtering // J. Vac. Sci. Technol. — 1979. — Vol. 15, N 2. — P. 272—276.

19. Маишев Ю. П., Фареник В. И., Будянский А. М. и др. Исследование высокочастотного индукционного разряда низкого давления для создания широкоапертурных источников ионов с высокой однородностью тока пучка // В сб.: Ионно-лучевая обработка материалов в микро- и нанoeлектронике. — М.: Наука, 1999. — С. 33—59.

20. А. с. 1144548 СССР. Источник ионов // В. И. Фареник, А. В. Зыков, Н. Н. Юнаков, Ю. А. Качанов. — Оpubл. в Б. И., 1984. — № 17.

21. Зыков А. В., Марущенко Н. Б., Лукинов В. А. Особенности контроля поверхности при обработке ее компенсированным ионным пучком средних энергий / Все-союз. совещ.-семинар молодых ученых «Диагностика поверхности ионными пучками». Тез. докладов. — Ужгород, 1985. — С. 106—107.

22. Маишев Ю. П., Фареник В. И., Калмыков Я. М. и др. Особенности зарядовой и токовой нейтрализации низкоэнергетичных пучков ионов в системах ионно-лучевого травления и нанесения покрытий // В сб.: Ионно-лучевая обработка материалов в микро- и нанoeлектронике. — М.: Наука, 1999. — С. 60—85.

23. Будянский А. М., Серета Н. Д., Фареник В. И. Зондовый контроль ПХТ в ВЧ разряде / Тез. докл. межотрасл. науч.-техн. семинара «Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике». — М.: ЦНИИТИ, 1989. — С. 224—225.

24. А. с. 1204087 СССР. Способ контроля процессов плазмохимического травления покрытий подложек // Н. Ю. Кропотов, Ю. П. Крячко, В. Д. Егоренков и др. — Оpubл. в Б. И., 1986. — № 1.



«РЫНОК ТЕХНОЛОГИЙ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ» —

под таким девизом в Украинском институте
научно-технической и экономической информации

3—4 декабря 2002 г.

состоится

Международная научно-практическая конференция

и, одновременно,

выставка высоких технологий «УКРТЕХНОЛОГИЯ—2002»

Организаторами конференции и выставки выступают: Министерство образования и науки Украины, Министерство экономики и по вопросам европейской интеграции, Министерство промышленной политики, Государственный комитет связи и информатизации, Академия технологических наук, Украинский институт научно-технической и экономической информации.

Оргкомитет приглашает научных работников, производителей и предпринимателей, конструкторов и технологов принять участие в работе конференции и выставки.

Если Вы хотите ознакомиться с особенностями современного развития рынка технологий и путями продвижения технологий на внутренний и внешний рынки, или можете предложить конкурентоспособные технологии, то участие в работе конференции и выставки будет для Вас полезным и плодотворным.

Заявки на участие направлять по адресу: 03039, г. Киев, ул. Горького, 180, УкрИНТЭИ.

Телефоны для справок: (044) 268-25-22, 268-31-10, 268-25-57, факс (044) 268-25-41,

<http://www.uintai.kiev.ua/> // E-mail: uintai@uintai.kiev.ua