

ПЛАЗМЕННЫЕ СВЧ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЦЕССАХ ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ**А.П. Достанко, С.В. Бордусов***Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, (Минск).*

Поступила в редакцию 24.01.2003

В статье представлена информация обзорного характера о применении плазмы СВЧ разряда в технологических процессах производства изделий электронной техники. Указаны области технического применения СВЧ разрядов, приводятся основные характеристики структур, формируемых под их воздействием.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается значительное возрастание интереса к практическому использованию СВЧ энергии в промышленных целях [1–3]. При этом отмечается, что быстрое внедрение СВЧ в практику научных исследований и технику стало возможным благодаря разработке недорогих и надежных СВЧ генераторов [4].

Широкое распространение в различных областях науки и техники СВЧ энергия находит в виде плазмы газового СВЧ разряда. Она используется для накачки газовых лазеров; в технике спектрального анализа; в качестве источников света в экспериментах по резонансной флуоресценции для измерений малых концентраций химически активных атомов и двухатомных радикалов; для поверхностной активации полимеров; для разрушения сильно токсичных и канцерогенных веществ; для нанесения твердых покрытий, упрочнения, закалки; в воздушно-реактивных двигателях для целей перемещений летательных аппаратов; в плазмо-химических процессах диссоциации воды при получении водорода – перспективного и экологически чистого топлива будущего; синтеза субмикронных порошковых материалов при получении мелкодисперсных абразивов для резки и шлифовки пластин; диссоциации сероводорода, CO_2 и т.д.

К настоящему времени на базе СВЧ техники разработано значительное количество разновидностей устройств, позволяющих на их основе реализовать большинство технологических процессов производства интегральных схем, а именно: плазменную очистку и активирование поверхности подложек; эпитаксию; окисление, литографические процессы, включающие сушку, задубливание, экспонирование и удаление фоторезистивных слоев; все виды вакуумно-плазменного травления; осаждение тонких пленок, включающее плазмо-химическое осаждение и катодное распыление; легирование (ионную имплантацию); термический отжиг полупроводниковых пластин; модификацию поверхности.

При этом основную роль в реализации вышеназванных процессов играет СВЧ плазменная технология, так как плазма СВЧ разряда является эффективным механизмом передачи мощности электромагнитного поля в газ и представляет собой чистый атомарный источник, в котором, как правило, отсутствуют металлические электроды, являющиеся источником загрязнений.

Рассмотрим некоторые характеристики и условия проведения технологических процессов производства

изделий электронной техники с использованием энергии СВЧ полей.

АКТИВИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ПЛАЗМЕННАЯ ОЧИСТКА

Перед проведением ряда технологических процессов (например, высокотемпературное окисление, первая фотолитография, нанесение металлической либо диэлектрической пленки и т.д.) следует провести очистку подложек для удаления как органических, так и неорганических загрязнений в виде инородных атомов и молекул, появляющихся на предыдущих этапах технологических процессов или во время переноса подложек с одной технологической линии на другую. Если такие загрязнения не удалить, то возможно ухудшение электрических характеристик приборов, а также понижение надежности интегральных схем (ИС).

Плазменная очистка поверхности подложек происходит вследствие химического взаимодействия загрязнений с ионами и радикалами активных газов с образованием летучих соединений, которые удаляются из реакционного объема в процессе откачки. Очищенные и активированные поверхности подложек обладают высокой прочностью с наносимыми пленками [5]. Травление и очистка пластин перед осаждением пленок в едином вакуумном цикле позволяют уменьшить уровень загрязнений, получить хорошую текстуру, адгезию, микроструктуру и снизить электромиграцию в пленках.

Основным компонентом газовой смеси для очистки поверхности подложки от органических загрязнений с использованием СВЧ разряда является кислород с небольшими (до 1 об. %) добавками аргона, азота или гелия. Добавки H_2 , N_2 , Ar, He катализируют процессы диссоциации молекул кислорода в плазме до атомарного состояния и тем самым ускоряют процесс очистки. Плазменная обработка используется также с целью удаления собственного оксида, т.е. оксида, образующегося на чистой поверхности кремния в атмосфере кремния в качестве предварительной очистки перед осаждением пленочных слоев различных материалов и составов. В этом случае используется H_2 с добавками H_2O и NF_3 . Как правило, процесс реализуется способом травления “вне зоны разряда” [6]. Это позволяет свести к минимуму поверхностные повреждения и переосаждение.

Низкотемпературная очистка позволяет получить чистую поверхность без каких-либо дефектов. Установлено [7], что в случае плазменной очистки, проводимой в режиме реактивной ионно-лучевой обработ-

ки, имеется критическая доза облучения ионами водорода, выше которой на очищенной поверхности начинают наблюдаться кристаллические дефекты. Они впоследствии могут сказаться на качестве наносимых поверх эпитаксиальных слоев. Кроме того, определенные режимы низкотемпературной очистки в водородной плазме с источником, работающем в режиме электронного циклотронного резонанса (ЭЦР), способствуют процессу образования шероховатости поверхности кремниевой пластины. По данным исследований [8] установлено, что шероховатость поверхности, в частности пластины Si (100), в сильной степени связана с зародышеобразованием и ростом пластинчатых дефектов (100) в подповерхностной области кремния: травление протекает в основном в местах пересечения этих дефектов и поверхности кремния. Уровень содержания этих дефектов и, следовательно, степень шероховатости поверхности кремниевой пластины можно контролировать, управляя величинами потока ионов водорода и температурой подложки в интервале 440–730 К. Разработанный и исследованный в [9] процесс очистки *in situ* контактных отверстий размером < 0,5 мкм в схемах динамических ЗУПВ с использованием плазмы H_2 , Ar и их смесей, возбуждаемый от источника ЭЦР, показал, что плазма высокой плотности, но с малой энергией ионов, вносит минимальные повреждения в поверхностный слой, а благодаря высокой направленности эффективно удаляет поверхностные примеси из контактных отверстий, что обеспечивает получение низкого и стабильного контактного сопротивления. Кроме того, при такой очистке создается форма профиля контакта, способствующая заполнению отверстия алюминием.

Подготовка поверхности перед нанесением пленки для улучшения адгезии и управления составом границы раздела в режиме ионно-лучевой очистки проводится с использованием инертных газов в диапазоне энергий ионов от нескольких десятков до нескольких сотен электронвольт. СВЧ ионные источники, обеспечивающие большую плотность тока ионного пучка и сравнительно низкие энергии ионов, хорошо подходят для подготовки поверхности полимеров и других синтетических материалов перед нанесением металлов. Эти процессы могут также проводиться с применением активных газов таких, как кислород или фторуглероды.

Еще одной перспективной областью применения ЭЦР источников является очистка поверхности полупроводниковой пластины перед процессом эпитаксии от примесей углерода и оксидов. Если оксид можно удалить высокотемпературным отжигом (1070–1270 К), то для удаления углерода приходится применять методы ионно-плазменного распыления, которые, однако, вносят радиационные нарушения, устраняемые также высокотемпературным отжигом (970 К). Обработка в ЭЦР источнике в плазме водорода позволяет легко удалить углерод и оксид при температуре не выше 670 К [10].

Процесс СВЧ плазмохимической обработки весьма перспективен для межоперационной очистки тех-

нологических и плазменных камер плазменных установок. В [11, 12] предлагаются методы высокоэффективной СВЧ плазменной очистки плазменного технологического оборудования от остатков продуктов плазменных реакций. В частности, это может быть двухстадийный процесс [11]. На первой стадии производится напуск в плазменную камеру из системы газоснабжения плазмообразующего газа и возбуждение плазмы под действием СВЧ энергии. Химически активные радикалы, образующиеся в плазме разряда, взаимодействуют с остатками загрязнений на внутренней поверхности технологической камеры и оснастки, на второй стадии к реакционноспособному газу добавляется инертный газ, после чего вновь возбуждается газовый разряд. Инертный газ, кроме того, может продуваться через технологическую камеру перед первой стадией с целью удаления осевших частиц, не связанных с конструктивными элементами. Реакционноспособным (реактивным) газом желательно выбирать NF_3 , однако могут использоваться и другие фторсодержащие газы такие, как CF_4 , SF_6 и др. Более того, в качестве реактивных газов могут быть использованы вместо фторсодержащих газов хлор- или другие галогенсодержащие газы.

ПЛАЗМЕННОЕ ТРАВЛЕНИЕ В ВАКУУМЕ

Газовая плазма СВЧ разряда применяется для реализации практически всех процессов вакуумного газоплазменного травления, используемых в производстве кремниевых микроэлектронных приборов (табл. 1) [2].

Плазма СВЧ разряда позволяет реализовать все виды физико-химического взаимодействия энергетических и химически активных частиц с поверхностными атомами или молекулами обрабатываемого материала.

Реактивное ионно-лучевое травление (РИЛТ). В процессах РИЛТ обрабатываемый материал вынесен из зоны плазмы разряда, находится в вакууме и подвергается воздействию пучка ускоренных ионов химически активного газа, которые в процессе перезарядки, диссоциации и нейтрализации в пучке и на поверхности материала могут образовывать реакционноспособные травящие частицы и производить травление.

Отличительной особенностью механизма РИЛТ по сравнению с другими процессами вакуумно-плазменного травления является то, что в нем используется как физическое, так и химическое взаимодействие ускоренных ионов с атомами поверхностных слоев обрабатываемого материала. По сравнению с ИЛТ при этом значительно повышается скорость травления материала, а в некоторых случаях также степень использования рабочего газа.

Процессы РИЛТ с применением плазмы СВЧ разряда реализуются в газоразрядных системах, использующих явление электронного циклотронного резонанса [13, 14]. К настоящему времени имеются сообщения о травлении с помощью этих газоразрядных систем практически всех материалов микроэлектроники в широком наборе газов и их смесей.

Основные процессы вакуумного газоплазменного травления в производстве кремниевых микроприборов

Травление	Функциональный слой (травимый материал)	Материал подслоя (подложки)	Материал маски
Затворов	Поликремний, тугоплавкие металлы, их силициды и полициды	SiO ₂	Фоторезист (ФР)
Канавок	Монокристаллический кремний	Отсутствует	ФР+SiO ₂
Защитного слоя	Нитрид кремния	SiO ₂	Фоторезист
Межслойной изоляции для планаризации	Система фосфорносиликатное стекло (ФСС) - SiO ₂	Отсутствует	Фоторезист
Контактных окон различной глубины	Система ФСС - SiO ₂	Si, тугоплавкие металлы, их силициды, моно-Si	Фоторезист
Планаризирующих слоев маскирующих покрытий	Фоторезисты, полиимид	Si, система ФСС - SiO ₂ , сплавы Al	SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , ФСС, металлы
Контактных окон различной глубины	Система ФСС - SiO ₂	Сплавы Al	Фоторезист
Металлизация на Si подложке	Al/Si; Al/Si/Cu; Al/Si/Ti; Al/Si + TiW; AlN+ Al/Si	ФСС	Фоторезист

Используя возможность изменения угла падения пучка, с помощью РИЛТ удалось создать в диоксиде кремния решетки косоугольного профиля с субмикронным периодом. Показана возможность травления Si, Mo, Ti и сплавов Al. Применение РИЛТ при обработке материалов типа A^{III}B^V позволило, опираясь на расширенные возможности метода, получить рельеф с профилем, не достижимым другими методами. Сопряженная с РИЛТ техника, названная травлением, стимулированным ионным пучком, используется при изготовлении приборов на GaAs.

Типовые технологические режимы обработки: степень предварительного вакуума не хуже $7 \cdot 10^{-4}$ Па, рабочее давление порядка $5 \cdot 10^{-2}$ Па, плотность ионного тока не менее 5 мА/см², энергия ионов в процессе травления 20 – 40 эВ. Такие режимы дают возможность осуществлять анизотропное травление с нулевым подтравом под маску с высокой селективностью травления материалов.

Уникальные характеристики этого метода такие, как независимое регулирование параметров процесса, возможность изменения угла падения пучка, совместимость с аналитической аппаратурой для изучения поверхности, позволяют использовать его для травления новых структур, материалов, плохо поддающихся обработке другими методами, а также для достижения лучшего понимания механизмов всех ионно-стимулированных процессов травления.

Реактивное ионно-плазменное травление (РИПТ). При проведении процессов РИПТ обрабатываемые изделия находятся в контакте с плазмой СВЧ разряда и

размещаются, как правило, на электроде, подключенном к источнику СВЧ [15], ВЧ [16], НЧ [17] либо постоянного [18] напряжения. Возможно также их расположение в зоне разряда на заземленном подложкодержателе [19]. Удаление материала происходит как за счет физического распыления ускоренными ионами химически активных газов, так и в результате химических реакций между свободными атомами и радикалами, образующимися в газоразрядной плазме, и поверхностными атомами материала, подвергаемого травлению. Газоразрядная плазма стимулирует процессы, происходящие и в газовой фазе, и на поверхности твердого тела. При этом физическое распыление активизирует поверхность материала, повышая скорость химических реакций, которые в свою очередь ослабляют химические связи поверхностных атомов, увеличивая тем самым скорость их физического распыления. Эти процессы отличаются высокой степенью равномерности обработки по пластине – 96 – 97%, более высокими скоростями травления по сравнению с обработкой в плазме ВЧ либо НЧ разрядами, возможностью селективного управления ходом процесса за счет изменения параметров сигнала, подаваемого на подложкодержатель – электрод.

Достоинством РИПТ также является возможность точного и анизотропного воспроизведения элементов с малыми размерами для создания плотноупакованных структур. Однако на вертикальных стенках рельефа, обычно получающихся при РИЛТ, толщина металлических пленок, нанесенных испарением или распылением, значительно уменьшается (на 50 % и более).

Кроме того, появляется возможность увеличения напряжений в металле и его растрескивания на прямых углах при входе в контактное окно и на его дне. Поэтому профиль контактного окна желателен иметь наклонным. Оптимальной представляется величина $60 - 70^\circ$, выбранная исходя из электрических характеристик и соображений экономного использования поверхности, а сглаженные края в верхней части и у дна окна позволяют уменьшить проблемы, связанные с напряжениями и растрескиванием металлических пленок [20].

Ионно-лучевое травление (ИЛТ). Удаление поверхностных слоев при ИЛТ осуществляется в результате физического распыления энергетическими ионами инертных газов или ионами, которые химически не реагируют с обрабатываемым материалом. При ИЛТ поверхность обрабатываемого материала не контактирует с плазмой и последняя используется только в качестве источника ионов, осуществляющих процесс травления.

Ионы генерируются в разряде в отдельной “ионной пушке”, фокусируются и ускоряются (с малым разбросом по энергии) по направлению к обрабатываемому образцу, который находится в вакууме $10^{-2} - 10^{-4}$ Па и может устанавливаться на охлаждаемом держателе с тем, чтобы при травлении его поверхность не сильно нагревалась. Образец может быть расположен под любым углом по отношению к ионному пучку. Для компенсации положительного объемного заряда пучка в него подается поток электронов, так что никаких нежелательных эффектов зарядки образца не происходит.

Эффективность реализации ИЛТ зависит от оптимального выбора режимов всех составляющих стадий этого процесса. Основными стадиями ИЛТ являются генерация ионов, распространение пучка ионов в вакууме и взаимодействие пучка ионов инертного газа с поверхностью обрабатываемого материала. Процессы ИЛТ реализуются с помощью ионных источников различной конструкции, использующих в качестве рабочих газов H_2 , He, Ar. Давление газов поддерживается в диапазоне $0,133 - 1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Использование СВЧ разрядов позволяет эффективно формировать пучки ионов с энергией $10 - 100$ эВ с большими поперечными сечениями (диаметром до 300 мм) различной конфигурации (круглые, овальные, кольцевые, прямоугольные, H-образные и т.д.). При этом степень ионизации достигает 30% и выше, а концентрация электронов n_e во много раз (более 100) превышает критическую [21].

ИЛТ находит практическое применение еще в нескольких областях помимо микроэлектроники, причем основным направлением является создание СБИС на цилиндрических магнитных доменах. Кроме того, ионное травление используется при изготовлении приборов на основе поверхностных акустических волн, оптических компонентов и тонкопленочных приборов.

ИЛТ является методом анизотропного травления с очень высоким разрешением, который обеспечивает хорошую равномерность обработки, воспроизводимость скорости и внесение минимальных загрязнений.

К недостаткам метода относятся: низкие скорость и селективность травления, возможность радиационного повреждения приборов при непосредственном травлении границы раздела.

Увеличение выхода годных изделий за счет использования ИЛТ определенных, нечувствительных к облучению слоев может быть получено и для других типов СБИС. Оно уже нашло широкое применение при изготовлении ИС средней и высокой степени интеграции на GaAs, а при переходе к СБИС на GaAs ионно-лучевое травление, по-видимому, будет играть еще более важную роль.

Радикальное травление (РТ). В основе процессов РТ лежат гетерогенные химические реакции, происходящие на границе двух фаз – твердой и газообразной, между свободными атомами и радикалами, образующимися при диссоциации молекул рабочего газа в низкотемпературной плазме газовых разрядов, и активными центрами обрабатываемого материала, представляющими собой поверхностные атомы со свободными валентностями [22]. Обрабатываемый материал при РТ находится в зоне, отделенной от плазмы перфорированным металлическим экраном, магнитным полем, расстоянием или другими способами. Такое разделение области плазмы (разрядной области) и области, в которой размещен обрабатываемый материал (реакционной области), не позволяет ионам и электронам достигать поверхности материала и в то же время практически не создает преграды для реакционноспособных незаряженных частиц, которые, достигая поверхности обрабатываемого материала, вступают с ним в химическую реакцию с образованием стабильных летучих соединений, удаляемых из реакционной зоны в результате ее непрерывной откачки.

РТ с помощью плазмы СВЧ разряда в реакторах с потоком газа подвергаются лишь материалы, образующие летучие соединения с радикалами, такие, как кремний и его соединения, молибден, вольфрам, ванадий, ниобий, тантал и титан. В промышленности реакторы высокого давления с потоком газа применяются в основном для травления поликристаллического кремния и нитрида кремния на подслое двуокиси кремния, так как при отсутствии заряженных частиц и малом поступлении тепла от плазмы достигается высокая селективность травления. Ограниченное поступление тепла из зоны активации в зону обработки способствует также высокой устойчивости фоторезистивных масок и стабильности температуры пластин.

Процессы реализуются при низких температурах подложек (310 – 370 К) и характеризуются отсутствием радиационных повреждений и деградации электрофизических параметров обрабатываемых структур.

При принудительном подогреве пластин до 470 – 525 К, наоборот, наблюдается эффективное удаление фоторезистивных слоев (до 2 мкм/мин) в потоке активированного кислорода [23, 24]. Этому методу удаления фоторезиста сейчас уделяется особое внимание, так как вследствие незначительного воздействия заряженных частиц возможно удаление масок с тонких диэлектрических слоев без их пробоя, что особенно

важно при изготовлении ИС с уровнем интеграции 1 – 64 Мбит и выше.

Плазменное травление (ПТ). В основе СВЧ плазменного травления лежат активируемые излучением плазмы, электронами и ионами гетерогенные химические реакции между свободными атомами и радикалами и поверхностными атомами обрабатываемого материала. В отличие от РТ обрабатываемый материал при этом находится непосредственно в зоне плазмы или же на электродах и подложкодержателях, соприкасающихся с плазмой. Свободные атомы и радикалы вступают в реакцию с поверхностными атомами материала и, взаимодействуя с ними, образуют летучие соединения, в то время как излучение плазмы, электроны и ионы активируют эти реакции, существенно увеличивая скорость их протекания. Обрабатываемая поверхность находится под отрицательным “плавающим” потенциалом по отношению к плазме. Однако эта разность потенциалов между плазмой и обрабатываемой поверхностью не может обеспечить заряженным частицам энергию, необходимую для эффективного физического распыления, поскольку даже при энергии 100 эВ коэффициент распыления составляет 0,1 атом/ион. В то же время энергия ионов, электронов и фотонов достаточна для разрушения химической связи между поверхностными атомами материала, активации химических реакций и стимулирования процессов десорбции образующихся продуктов, что вызывает увеличение скорости травления. СВЧ плазменное травление реализуется в реакционно-разрядных камерах больших объемов [25–27], разработанных специально для обработки кремниевых пластин диаметром 150 и 200 мм. При этом конструкции разрядных систем ориентированы на проведение процессов поштучной обработки с целью формирования рисунка в нанесенных на поверхность пленок, глубинного травления материала пластины и т.д.

Основная проблема, возникающая при травлении в реакторах с низким вакуумом (70 – 1300 Па), – невысокая анизотропия травления ($v_{\text{норм}}/v_{\text{бок}} = 2 - 3$) из-за химического характера травления радикалами с неупорядоченным по направлению движением. Поэтому такие установки используют для размерного травления при изготовлении микросхем степени интеграции до 64 – 256 К, а при большей степени интеграции – только для мягкого селективного дотравливания слоев.

Хорошие производственно-технические показатели имеют процессы групповой обработки подложек в объеме плазмы СВЧ разряда при удалении фоторезистивных и полимерных покрытий [28, 29]. Скорость удаления достигает нескольких десятых микрометров в минуту. Процессы характеризуются высокой производительностью и экологической безопасностью.

Радиационно-стимулированное травление. Стимуляция процессов травления материалов может осуществляться потоками ионов, электронов и излучений (инфракрасным, видимой области, ультрафиолетовым и рентгеновским). При этом поток стимулирующего воздействия и поток частиц, производящих травление, генерируются независимо друг от друга и подаются к

обрабатываемой поверхности. При такой организации процесса травления повышаются и количественные, и качественные показатели процесса. Так, например, в [30] предлагается способ, значительно повышающий скорость травления GaAs. Подложка GaAs с маской размещается в камере обработки на вращающемся держателе. С камерой обработки соединены камеры генерации плазмы и генерации ионов. В камеру генерации плазмы до определенного давления напускается Cl_2 и подается СВЧ мощность. Под воздействием электронного циклотронного резонанса генерируется плазма. Путем подачи напряжения на вытягивающий электрод пучок ионов Cl^+ направляется в камеру обработки на подложку. Одновременно в камере генерации ионов создаются ионы Ar^+ , которые также направляются на подложку. Ионная бомбардировка приводит к образованию в подложке аморфного слоя толщиной 20 – 30 нм. При таком способе подачи ионов Ar^+ и Cl^+ на подложке не образуются продукты, препятствующие быстрому травлению, и подложка не загрязняется. Таким образом, становится возможной селективная сверхчистая обработка.

Метод травления, названный – травление стимулированное нейтральным лучом (НБА), позволяет полностью исключить наведенный на поверхности электрический заряд [31]. В процессе травления нейтральные радикалы CF_x ($x = 1-3$), генерированные в HF_3 плазме, и нейтральный луч одновременно действуют на слой SiO_2 . Нейтральный луч с энергией несколько сотен электронвольт получается из ионного луча с помощью реакций обмена зарядами.

ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Плазменные СВЧ разрядные устройства могут быть использованы для осаждения пленок металлов, сплавов, диэлектриков, полупроводников, сверхпроводников, выращивания эпитаксиальных пленок.

Плазменное осаждение из парогазовых смесей (ПГС). Плазмохимическое осаждение позволяет формировать пленки при очень низкой температуре подложки. Это достигается за счет реакции между газами в тлеющем разряде, который обеспечивает основное количество энергии, необходимой для протекания реакции. Температура образца поддерживается в пределах 370 – 670 К. Чтобы избавиться от радиационных нарушений, осаждения полимеров и образования побочных продуктов реакции, в устройствах для осаждения пленок из газовой фазы плазму, возбуждаемую с помощью СВЧ разряда, используют только для диссоциации исходного продукта, не допуская ее присутствия в рабочем объеме реактора. В разрядную камеру подается инертный газ, а реактивный газ поступает в пространство перед подложкой (камеру перезарядки). В камере перезарядки происходит обмен заряда между газами, и формируется вторичный поток плазмы, который транспортируется к подложке и осаждается на ней в виде пленки определенного состава.

Этот метод пригоден для формирования пленок с использованием практически любых материалов. Ис-

ходные реагенты подбирают по свойствам их паров – важны достаточно высокое давление паров, определенная температура подложек, чистота используемых реагентов, от которой в первую очередь зависит чистота формируемых пленок, а также возможность утилизации продуктов реакции. Физические свойства пленок SiO_2 , полученных этим методом при температуре, близкой к комнатной, идентичны свойствам термического оксида SiO_2 , полученного при $T = 1270 \text{ K}$ [13]. Кроме того, при использовании плазмы СВЧ разряда обеспечивается резкая граница раздела между диэлектриком и полупроводником с низкой плотностью фиксированного заряда и высокое напряжение пробоя ($5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$), а также появляется возможность перед осаждением слоя проводить очистку пластины ионами инертного газа, подавая на нее отрицательное напряжение смещения.

Данный метод подробно рассмотрен в [13, 32]. Плазмохимическим методом с помощью СВЧ разряда можно осаждать большое число неорганических и органических соединений (SiO_2 , Si_3N_4 , Si_xN_y , аморфный кремний, Cd , GeO_2 , B_2H_3 , Ti_xO_y , Sn_xO_y , Fe_2O_3 , гексаметилдисилоксан и т.д. [33 – 37]) на поверхности различной формы. Так, в частности, СВЧ плазменное осаждение диэлектрических пленок на металлические поверхности с малым радиусом кривизны может быть использовано для изоляции проводников различных датчиков, работающих в агрессивных и химически активных средах, для пассивации различных металлических поверхностей, а также при изготовлении волоконно-оптических заготовок с различными показателями преломления по их сечению и протяженных изделий с малым радиусом кривизны. В [38] предложен и технически реализован способ СВЧ плазменного осаждения диэлектрических пленок Si_3N_4 или SiO_2 на металлические поверхности, включающий синтез их в скрещенных потоках плазмообразующего и кремнийсодержащего газов вблизи (или на) нагретой ИК излучением до $350 - 470 \text{ K}$ обрабатываемой поверхности, причем, поток ИК излучения должен быть направлен навстречу плазменному потоку. Для получения равномерных покрытий на протяженных изделиях с малым радиусом кривизны изделия располагают перпендикулярно плазменному потоку и вращают вокруг своей продольной оси. Полученные экспериментально на металлических поверхностях с малым радиусом кривизны ($r \leq 0,1 \text{ мкм}$, иглы) пленки SiO_2 и Si_3N_4 разной толщины ($0,8 - 3,0 \text{ мкм}$) равномерно покрывали поверхность металла, в том числе и поверхность острия, были плотные, без пор.

Наиболее широкое применение для реализации этих процессов получили СВЧ разрядные системы с ЭЦР возбуждением плазмы. Существенные результаты в области практического использования ЭЦР источников для нанесения тонкопленочных слоев имеют японские фирмы – изготовители полупроводниковых приборов. Так, в низкотемпературной технологии изготовления МОП БИС фирмы NTT предусмотрено создание самосовмещенного затвора со слоем двуоксида кремния толщиной 400 нм , выращиваемым при

температуре $320 - 420 \text{ K}$ ионно-плазменным осаждением из ПГС с помощью ЭЦР источника [34, 39]. Процесс осаждения SiO_2 производится в смеси SiH_4 с кислородом и аргоном при низком давлении $10^{-1} - 10^{-3} \text{ Па}$ при подаче на подложку ВЧ напряжения смещения частотой $13,56 \text{ МГц}$ для обеспечения процесса планаризации пленки. После нанесения оксида не требуется никакой дополнительной термообработки, что позволяет изготавливать по этой технологии очень мелкие переходы истока и стока (с глубиной залегания примерно $0,15 \text{ мкм}$) и очень тонкий слой подзатворного оксида (8 нм). Это, в свою очередь, способствует подавлению эффекта короткого канала, а также дает возможность применять алюминиевый электрод для уменьшения времени распространения сигнала в межсоединениях. В качестве межуровневого диэлектрика в схеме используется аналогично выращенный слой двуоксида кремния. По предлагаемой технологии был изготовлен экспериментальный образец МОП-транзистора. Результаты его испытаний подтвердили пригодность предлагаемой технологии для изготовления новых поколений МОП СБИС. Фирмой NTT также разработан аналогичный низкотемпературный метод осаждения пассивирующих пленок Si_3N_4 , при котором вместо O_2 в ПГС вводится N_2 . Основное достоинство этого метода – возможность выращивания слоев без нагрева подложки, что позволяет шире применять пленки Si_3N_4 , в которых меньше включений атомов водорода, чем в пленках, выращенных традиционным ионно-плазменным методом. В результате снижается пороговое напряжение изготавливаемых приборов и исключается деградация их электрофизических параметров.

При проведении процессов плазменной полимеризации СВЧ разряды являются более эффективными источниками радикалов и ионов [13], чем широко используемые разряды постоянного тока и ВЧ. И, как следствие этого, они позволяют проводить процессы с более высокими скоростями, обеспечивая большую производительность оборудования. Получаемые при этом пленки имеют хорошее значение величины относительной диэлектрической проницаемости (на уровне $2,5$ и ниже) [40, 41] и удовлетворительное содержание примеси фтора (порядка $18 - 30 \%$) [42].

С использованием ЭЦР СВЧ вакуумно-плазменных источников разработаны процессы осаждения графитовых и алмазоподобных углеродных пленок (АПП) из различных плазмообразующих сред: паров этилового спирта, ацетилена, метана с добавками водорода, кислорода и без них.

В зависимости от используемых режимов генерации плазмы получены алмазоподобные пленки с широким диапазоном механических и электрофизических свойств: величина удельного сопротивления пленок изменялась от 10 до $10^7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а показатель преломления – от $1,4$ до $2,5$; диэлектрическая проницаемость составляла $2 - 8$. Большое значение этого параметра соответствует характеристике природного алмаза [13].

Ионно-плазменное распыление (ИПР). При процессе осаждения тонких пленок материал, который должен напыляться, используется в качестве катода мишени в системе с тлеющим разрядом в инертном газе (Ar или Xe), кислороде, азоте, иницилируемым СВЧ разрядом в режиме электронного циклотронного резонанса при давлении 1 – 10 Па и при величине напряжения на катоде в несколько киловольт. Подложка, на которую нужно осадить пленку, располагается на аноде. Положительные ионы газа, создаваемые в разряде, ускоряются по направлению к катоду и достигают его с большой энергией, возрастание которой происходит в прикатодной области. В результате ионной бомбардировки материал с катода распыляется, главным образом, в виде нейтральных атомов, но частично и в виде ионов, попадающих в область СВЧ разряда. Распыленное вещество конденсируется на всей окружающей площади, в том числе на подложках, расположенных на аноде. Композиционный состав и микроструктура получаемых пленок могут изменяться в широком диапазоне в зависимости от используемой газовой смеси и энергии осаждаемых частиц.

При реактивном распылении происходит химическое взаимодействие материала на поверхности мишени с химически активной плазмой или взаимодействие атомов мишени, осажденных на поверхности подложки. Осаждение пленок оксида или нитрида кремния осуществляется путем распыления кремниевой мишени в среде O_2 или N_2 .

В случае реактивного распыления Ta и Al в среде $Ar+O_2$ получают высококачественные пленки Ta_2O_5 и Al_2O_3 , имеющие разброс коэффициента преломления на пластинах диаметром 150 мм не более 0,01 при неравномерности пленки по толщине 5 %.

Распылением в атмосфере Ar получают пленки металлов с ровной зеркальной поверхностью и хорошей адгезией к подложке. Энергия ионов, бомбардирующих подложку, составляет $(1,6–4,8) \cdot 10^{-18}$ Дж (10 – 30эВ) и зависит от СВЧ мощности и давления рабочего газа. С помощью ЭЦР устройства с кольцевой мишенью были без последующего отжига получены ВТСП пленки $Y–Ba–Cu–O$ с $T_c = 73$ К [39]. На мишень подавалось ВЧ напряжение смещения с частотой 13,56 МГц (ВЧ мощность на мишени 700 Вт). Температура подложки в процессе нанесения составляла 920 К, рабочее давление – 0,02 Па. После нанесения подложку сначала охлаждали в атмосфере азота со скоростью 100 К/мин до температуры 670 К, а затем на воздухе со скоростью 50 К/мин до комнатной температуры.

Таким образом, катодным распылением с использованием СВЧ разряда получают проводящие (металлические), диэлектрические (оксидные, нитридные), силицидные и другие пленки [43, 44], характеризующиеся большой прочностью сцепления с подложкой и высокими электрофизическими показателями.

Улучшение свойств пленок, по сравнению с широко распространенными способами термического испарения в вакууме и ионного распыления, может быть связано с воздействием плазмы при ЭЦР и ионной

бомбардировки, что ведет к повышению скорости распыления мишени и интенсификации реакций формирования пленочного покрытия.

Эпитаксия – это процесс ориентированного нарастания, в результате которого образующаяся новая фаза закономерно продолжает кристаллическую решетку имеющейся фазы (подложки) с образованием некоторого переходного слоя, способствующего когерентному срастанию двух решеток по плоскости подложки со сходной плотностью упаковки атомов. Материал подложки в процессе наращивания играет роль затравочного кристалла. Эпитаксиальный процесс отличается от выращивания монокристаллов методом Чохральского тем, что рост кристалла происходит при температуре ниже температуры плавления. Большинство методов эпитаксии основано на технологии осаждения из парогазовой смеси.

СВЧ плазменные технологии используются как в автоэпитаксиальных (выращивание кремния на кремнии) [45], так и в гетероэпитаксиальных (выращивание слоя $d - GaN_yAs_{1-y}$ на подложке из GaAs [46]) процессах. Формирование структур производится при невысоких температурах (670 – 870 К) и давлениях $6,5 \cdot 10^{-3} - 1,3 \cdot 10^{-2}$ Па.

При этом в сообщениях об использовании СВЧ энергии в процессах эпитаксиального наращивания слоев говорится о хороших параметрах процессов и высоком качестве получаемых структур, не уступающим по свойствам пленкам, выращенным методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Легирование (ионная имплантация). Наиболее общим применением ионной имплантации в случае использования в качестве источников ионов СВЧ разряда [47, 48] является процесс ионного легирования кремния при изготовлении приборов. В качестве легирующей примеси используются ионы бора, индия, фосфора, мышьяка с энергией 3 – 500 эВ, имплантируемые в приповерхностную область кремниевой подложки на глубину 10 – 100 нм. Получение ионных пучков примесных элементов осуществляется путем ионизации паров твердых материалов, помещенных в печь, сообщающуюся с ионизационной камерой. Нужную концентрацию легирующей примеси в кремнии в диапазоне $10^{14} - 10^{21}$ см⁻³ получают после отжига (нагрева до выбранной температуры в интервале 870 – 1270 К). Высокоинтенсивные пучки ионов кислорода применяются для формирования скрытого слоя SiO_2 методом SIMOX (Separation by Implanted Oxygen) [31]. Используемый для этих целей СВЧ ионный источник должен обладать следующими свойствами:

- 1) высокой плотностью тока порядка 100 мА/см² и высокой интенсивностью экстрагирования, по крайней мере 100 мА/см², через одно – или многоапертурную оптику с сечением порядка 1 см²;
- 2) высокой стабильностью луча и большим временем эксплуатации;
- 3) большим отношением O^+/O_2^+ порядка 80 %.

Сравнительный анализ микроволновых источников и источников типа дугопигатрон для имплантации кислорода, проведенный в [49], показал, что микроволновые источники обладают лучшей стабильностью, большим соотношением O^+/O_2^+ газа носителя аргона, необходимого для надежной работы дугопигатрона, улучшает качество работы ускорителя.

Наряду с ионно-лучевой имплантацией СВЧ разряды используются в процессах плазменно-ионной имплантации, основанных на приложении к подложке отрицательных импульсов высокого напряжения, которые обеспечивают вытягивание ионов из плазмы и ускорение их по направлению к подложке [50, 51]. Метод плазменно-ионной имплантации, называемый еще методом ионной имплантации погружением в плазму, служит для упрощения процесса обработки и обеспечения объемного внедрения ионов в твердый материал при температуре, близкой к комнатной. Один из вариантов реализации этого метода описан в [52] и состоит в следующем.

Исходный материал для последующего формирования ионного потока помещается в микроволновую камеру и испаряется лазерным лучом для создания газовой плазмы. В результате диффузионного движения плазма окружает объект обработки. К объекту обработки прикладывается импульс напряжения отрицательной полярности такой длительности, чтобы в условиях имеющейся плотности плазмы и расстояния от образца до стенок разрядной камеры избежать возникновения дугового разряда. В результате этого происходит имплантация ионов по всей поверхности объекта обработки. Воздействие лазерного импульса и импульса постоянного тока высокого напряжения периодически повторяется до тех пор, пока не будет достигнута требуемая величина дозы имплантируемого материала.

Основное преимущество ионно-плазменной имплантации перед ионно-лучевой – простота обработки больших площадей или 3-мерных объектов выпуклой формы и возможности использования широкой области ионных энергий от нескольких электронвольт до 250 кэВ.

Плазменное окисление – низкотемпературный процесс, проходящий в вакууме в тлеющем разряде чистого кислорода. Плазма формируется с помощью высокочастотного либо сверхвысокочастотного разряда. При размещении подложки в области с однородной плотностью плазменного разряда и подаче на нее менее положительного потенциала, по сравнению с потенциалом плазменного разряда, происходит вытягивание из последнего и адсорбция на подложке активных заряженных частиц окислителя (кислорода). Скорость роста оксидных пленок обычно возрастает с увеличением температуры подложки, плотности плазменного разряда и уровня легирования подложки.

Процесс анодного плазменного окисления позволяет выращивать высококачественные оксидные пленки, обладая при этом всеми преимуществами низкотемпературного процесса, а именно: ограничивает перераспределение в предварительно сформированных

диффузионных областях и подавляет образование дефектов. С помощью анодного плазменного окисления можно выращивать относительно толстые оксидные пленки (порядка 1 мкм) при низких температурах (< 870 К) со скоростью роста 1 мкм/ч.

Наибольшее число сообщений о процессах низкотемпературного окисления в кислородной плазме СВЧ разряда относится к плазменному анодированию кремния (например, [53 – 55]), хотя есть сведения и об окислении тонких металлических (Al, Ta, Ti, Nb) и полупроводниковых (GaAs, Si) пленок [56, 57]. При этом отмечается, что наряду с более высокими скоростями роста пленки, формируемые в СВЧ разряде, отличаются хорошими электрофизическими свойствами. В частности, в работах [53, 54] сообщается о получении оксидных пленок на кремнии со следующими параметрами: пробивное напряжение порядка $E_d \gg 3,9 \cdot 10^6$ В/см, плотность поверхностных состояний $N_{ss} = 9,5 \cdot 10^{11}$ см⁻² относительная диэлектрическая проницаемость в пределах $\epsilon_{ox} = 3,66 - 3,97$.

Формирование туннельно-тонких слоев окисленного кремния в объеме кислородной плазмы СВЧ разряда может также проводиться и без подключения подложки к источнику напряжения [58].

Плазменное азотирование и цементация поверхностных слоев материала. В процессах производства изделий электронной техники находит применение азотирование (нитрирование) поверхности Si-подложек [59, 60] и металлических образцов [61, 62] с целью получения нитридных или оксинитридных слоев. Азотирование проводится как в самом СВЧ разряде в азоте либо смеси $N_2 + H_2$, так и в после свечении (т.е. вне зоны разряда). Рабочие режимы процесса (СВЧ мощность, нагрев подложек, давление и расход газа, состав газовой смеси и т.д.) зависят от обрабатываемого материала и конструктивных особенностей газоразрядного устройства. Формируемые этим способом слои имеют ряд преимуществ по сравнению с полученными термическим путем. Так, например, для тонких слоев нитрида или оксинитрида кремния, это прежде, всего лучшие электрические характеристики пробоя, стабильность зарядовых характеристик слоя при термополевых испытаниях, снижение потенциального барьера для носителей на границе нитрированного диэлектрика с подложкой для уменьшения питающих напряжений РПЗУ с электрическим перепрограммированием.

Термический отжиг. Характерной чертой термического отжига в СВЧ полях является то, что в отличие от традиционных методов нагрева, при которых тепловой поток на пластину направляется извне, вызывая при этом значительный градиент температур между нагретой поверхностью и центром пластины, при СВЧ обработке он поступает как бы от “внутреннего” источника тепла, так как пластина нагревается за счет выделения тепла в объеме материала [3].

Исследования по СВЧ отжигу МОП структур с мезозалегающими переходами и БИС с субмикронными размерами [63, 64] показали эффективность данного

метода нагрева полупроводниковых пластин. Для предотвращения возникновения разряда СВЧ нагрев проводится, как правило, при давлении не выше 1 Па в атмосфере азота или аргона [65], при этом в зависимости от режимов обработки время выхода температуры подложки на стационарное значение составляет 1 – 2 мин.

ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ ЭНЕРГИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Применение СВЧ энергии в производстве микроструктур не ограничивается процессами плазменной очистки, травления, модификации поверхностных слоев материала, а также нанесением на его поверхность пленок других материалов.

СВЧ энергия также используется в источниках рентгеновского излучения, для термической обработки органических и неорганических маскирующих слоев, в процессах сухого фототермического удаления фоторезистивных пленок, для резки материалов и т.д. Часть из этих процессов находится пока еще на стадии изучения и исследования, а часть прошла опытно-промышленную апробацию и готова к практическому применению.

Сушка слоя фоторезиста. В сообщениях о применении СВЧ энергии для сушки и задубливания фоторезистивных пленок при изготовлении ИС на кремниевых подложках [3] и для других целей [66] указывается на высокую эффективность этого метода обработки.

Сушка слоя фоторезиста в СВЧ поле происходит в основном за счет нагрева подложки до температуры 350 – 390 К, в процессе которого тепло передается через весь объем материала, имеющего свойства диэлектрика с потерями.

Основными требованиями, предъявляемыми к устройству для сушки резиста, являются обеспечение равномерности нагрева по всей площади пластины и высокая скорость нагрева. Реальное время обработки должно составлять 20 – 25 с, а неравномерность сушки ~ 5 %.

СВЧ сушка пригодна лишь для фоторезиста, нанесенного на пластины с высоким поверхностным сопротивлением. Там, где по условиям технологического процесса до первой фотолитографии требуется провести металлизацию поверхности пластин или легирования ее примесью, снижающей поверхностное сопротивление до единиц Ом на квадрат и менее, пластины кремния практически не нагреваются вследствие экранирования их поверхностными слоями с высокой проводимостью.

Исследования по использованию СВЧ энергии в полупроводниковом производстве показали, что СВЧ сушка обеспечивает равномерное высыхание резиста, а время обработки снижается до секунд. Кроме того, после СВЧ сушки время экспонирования и проявления резиста уменьшается в 1,5 – 2,0 раза. Все это дает возможность повысить производительность линии фотолитографии на 20 %.

Удаление фоторезиста – завершающая операция технологического процесса фотолитографии, которая

во многом определяет качество выполнения последующих циклов: диффузии, окисления, металлизации. Кроме плазмохимического метода удаления фоторезиста, который рассмотрен выше, СВЧ энергия может быть использована при удалении фоторезистивной пленки фототермическим методом [67, 68], результатом которого является окислительная деструкция пленки в кислороде или кислородсодержащих газах. В [68] приведены данные по удалению фоторезистов PMMA, OMR, CMS, AZ – 1350 J, используемых в промышленности. Удаление фоторезиста осуществлялось при температуре подложки 400 – 430 К в атмосфере кислорода при давлении $6,6 \cdot 10^4$ Па и скорости потока 50 л/мин под воздействием ультрафиолетового излучения с плотностью потока энергии 2,4 Вт/см², создаваемого СВЧ разрядной лампой, наполненной смесью аргона с парами ртути. В зависимости от режимов обработки и типа фоторезиста время полного удаления пленки составляет 15 – 30 мин.

Экспонирование маскирующих слоев. Экспонирование фоторезистивного слоя – технологическая операция по формированию защитного рельефа, обеспечивающая перенос изображения с фотошаблона на пластину. Имеются сообщения [69, 70] об использовании в качестве источников света при экспонировании ламп СВЧ разрядов низкого давления мощностью от 100 до 500 Вт, интенсивно излучающих в коротковолновой области спектра, что соответствует полосе максимальной чувствительности большинства фоторезистов (300 – 450 нм). Для этой цели в Nagaya University (Япония) разработан новый вид источника вакуумного ультрафиолета на основе безэлектродного разряда в аргоне при давлении 0,65 Па и величине газового потока 12 см³/мин. Источник обеспечивает спектр излучения в диапазоне 50 – 110 нм с потоком фотонов $2,5 \cdot 10^{11}$ см⁻²·с⁻¹ и энергией 13,5 эВ. Излучение в этом диапазоне может быть использовано как для процессов литографии с высоким разрешением, так и для активированного фотонами осаждения и травления различных материалов [21].

СВЧ разрядные источники начинают использоваться в технологиях получения высокояркого луча для проведения процессов ионно-лучевой микролитографии [71]. При этом отмечается, что они обладают малым рассеянием по скоростям ионов до 1 эВ в высокоплотном хорошо сфокусированном луче.

Разработан и исследован экспериментальный вариант СВЧ разрядного источника рентгеновского излучения [72], показавший возможность создания на базе СВЧ разряда с ЭЦР источников интенсивного рентгеновского излучения для использования в промышленности, науке, сельскохозяйственном производстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение обзора использования плазмы СВЧ разряда в процессах инженерии поверхности изделий электронной техники, необходимо отметить, что перспективы ее широкого внедрения в промышленность объясняются, прежде всего, тем, что реализуемым на

ее основе процессам присущи высокая энергетическая эффективность, селективность, большая скорость и производительность. Важным фактором является также и то, что в СВЧ разряде удается получить параметры плазмы (степень ионизации, температура электронов и удельный энерговклад) близкие к оптимальным для осуществления плазменных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плазменные процессы в производстве электронной техники/А.П.Достанко, С.В. Бордусов, И.В. Свадковский и др. /Под. общ. ред. А.П. Достанко. – Мн.: ФУАинформ, 2001. – 244 с.
2. Бордусов С.В. Плазменные СВЧ технологии в производстве изделий электронной техники/Под ред. А.П. Достанко. – Мн.: Бестпринт, 2002. – 452 с.
3. Гонтарев Г.Г., Глазырин Б.Н., Лысов Г.В. Микроволновое технологическое оборудование и приборы // Обзоры по электрон. технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. Вып. 10 (1681). – М.: ЦНИИ “Электроника”, 1992. – 74 с.
4. Соколов И.В. Магнетроны для СВЧ нагрева и источники СВЧ энергии // Электронная промышленность. – 1996. – № 3. – С. 4 – 9.
5. Р. Оулет, М. Барбье, П. Черемисинофф и др. Технологическое применение низкотемпературной плазмы: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 144 с.
6. J. Kikuchi, M. Nagasaka, S. Fujimira et al. Cleaning of silicon surfaces by NF_3 – added hydrogen and water – vapor plasma down stream treatment // Jap. J. Appl. Phys. Pt 1. – 1996. – Vol. 35, № 2B. – P. 1022 – 1026.
7. Tae Heung-Sik, Park Sang-June, Hwang Seok-Hee et al. Low - temperature in situ cleaning of silicon (100) surface by electron cyclotron resonance hydrogen plasma // J. Vac. Sci. and Technol. B. – 1995. – Vol.13, № 3. – P. 908 – 913.
8. Surface roughness and defect morphology in electron cyclotron resonance hydrogen plasma cleaned (100) silicon at low temperatures / Hwang Ki-Hyun, Yoon Euijoon, Whang Ki-Woong, Lee Jeong Yong // Appl. Phys. Lett. – 1995. – Vol.67, № 24. – P. 3590 – 3592.
9. Park In Seon, Yoon Me-eyoung, Lee Hyeon Deok et al. Low damage in situ contact cleaning method by a highly dense and directional ECR plasma // Jap. J. Appl. Phys. Pt. 1. – 1996. – Vol.35, № 2B. – P. 1097 – 1101.
10. Hobstra P.G., Robinson B. J., Thompson D.A. et al. Etching of InP surface oxide with atomic hydrogen produced by electron cyclotron resonance // J.Vac. Sci. Technol. A. – 1995. – Vol.13, N4. – P. 2146 – 2150.
11. Пат. 99/03312 WO. МКИ⁶ Н 05 Н 1/00. Method for improved cleaning of substrate processing systems/ Kao Chien – Teh, Littau Karl, Vasudev Anand, Koo Dong Won; Applied Materials, Inc. – № PCT/US98/13980; Заявл.10.07.1998; Оpubл. 21.01.1999.
12. S. Raoux, T. Tanaka, M. Bhan e.a. Remote microwave plasma source for cleaning chemical vapor deposition chambers: Technology for reducing global warming gas emissions // J.Vac. Sci. Technol. B. – 1999. – Vol.17, № 2. – P. 477 – 485.
13. Гуляев Ю.В., Яфаров Р.К. Микроволновое ЭЦР вакуумно – плазменное воздействие на конденсированные среды в микроэлектронике (физика процессов, оборудование, технология) // Зарубеж. электрон. техника. – 1997. – № 1. – С.77 – 120.
14. Шаповал С.Ю. Особенности применения ЭЦР плазменного стимулирования процессов осаждения и травления в технологии наноструктур // Наука – производству. – 1999. – № 3. – С. 7 – 11.
15. Заявка 57–174465 Япония, МКИ С 23 F 1/08. Устройство для плазменного травления / Такахаси Киеси; Кокусай дэнки к.к. – №56-58391; Заявл. 20.04.1981; Оpubл. 27.10.1982.
16. Doh Hyun – Ho, Yeon Chung – Kyu, Whang Ki – Woong. Effects of bias frequency on reactive ion etching lag in an electron cyclotron resonance plasma etching system// J. Vac. Sci. and Technol. A. – 1997. – Vol.15, № 3. – P. 664 – 667.
17. J. Arnal, J. Pelletier, C. Pomot, et al. Plasma etching in magnetic multipole microwave discharge// Appl. Phys. Lett. – 1984. – Vol.45, № 2. – P. 132 – 134.
18. Pichot M.G. Microwave multipolar plasma etching at low pressure: a novel reactor concept // Microelectron. Eng. – 1985. – Vol.3, № 1/4. – P.411 – 418.
19. Пат. 4559100 США, МКИ Н 01 L 21/306, С 23 F 1/03. Microwave plasma etching apparatus / Ninomiya Ken, Nishimatsu Shigeru, Suzuki Keizo, Okudaira Sadayuki; Hitachi. – Ltd. – №684299; Заявл. 20.12.1984; Оpubл. 17.12.1985; НКИ 156/345.
20. Айнспрука Н., Брауна Д. Плазменная технология в производстве СБИС: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 469 с.
21. Vide: Sci., Techn. et appl. // Proc.10 - th International Colloquium: Palais des Congr. – Paris (France). – 1995. – P. 559.
22. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. – М.: Энергоатомиздат. – 1987. – 264 с.
23. Shi J., Kamarehi M., Shaner D. et al. Damage reduction in dry resist stripping systems// Solid State Technology. – 1995. – Vol.38, № 10. – P.75 – 82.
24. Бордусов С.В. Высокоскоростное удаление фоторезистивных пленок в послесвечении СВЧ разряда в кислороде. // Электронная обработка материалов. – 2001. – № 6 (212). – С. 80 – 83.
25. Singar P. New frontiers in plasma etching // Semicond. Int. – 1996. – Vol.19, № 8. – P. 152 – 154, 156, 158, 164.
26. Bowles J.H., Duncan D., Walker D.N. A large volume microwave plasma source // Rev. Sci. Instrum. – 1996. – Vol. 67, № 2. – P. 455 – 461.
27. Shirai Haiyme, Sakuma Yoshikazu, Uegama Hiroyaki. The control of the high – density microwave plasma for large – area electronics // Thin Solid Films. – 1999. – Vol.37, № 1 - 2. – P.12 – 17.
28. Достанко А.П., Бордусов С.В., Босяков М.Н. и др. Физико-химические особенности процессов плазменной обработки материалов микроэлектроники в СВЧ разряде // Плазменные методы обработки в технологии изделий микроэлектроники: Материалы семинара в ЦНИИ информации. – М., 1988. – С.11 – 13.
29. Бордусов С.В. СВЧ - плазменные процессы в микроэлектронной технологии // Электронная обработка материалов. – 2001. – № 3 (209). – С.72 – 78.
30. Заявка 60 – 165721 Япония, МКИ Н 01 L 21/502. Способ реактивно – лучевого травления/Сугато Сумио, Асикава Кицу; Когё гидзюцу интё. – № 59-20076; Заявл. 08.02.84; Оpubл. 28.08.85.
31. Wartski L., Schwebel C., Aubert J. Radio frequency, microwave, and electron resonance ion sources for industrial applications: A review (invited) // Rev. Sci. Instrum. – 1996. – Vol. 67, №3. – P. 895 – 900.
32. Microwave Discharges: Fundamentals and Applications// Journal de Physique IV. – 1998. – Vol.8, Pr 7. – 421 p.
33. Fukuda Takuya, Saito Katsuaki, Ohue Michio. High – quality, high – rate SiO_2 and SiN films formed by 400 kHz bias electron cyclotron resonance – chemical vapor deposition // Jap. J. Appl. Phys. Pt 2. – 1995. – Vol.34, № 7 B. – P. L937 – L940.
34. Rack M.J., Hilt L.L., Vasileska D., Ferry D.K. Remote plasma enhanced chemical vapor deposition SiO_2 in silicon based nanostructures// J.Vac. Sci. and Technol. B. – 1999. – Vol.17, № 4. – P.1840 – 1847.
35. G. Farber David, Bae Sanghoon, Okandan Murat et. al. Pathway to depositing device – quality 50°C silicon ni-

- tride in a high – density plasma system// J. Electrochem. Soc. –1999. – Vol.146, № 6.– P. 2254 – 2257.
36. Moonsang K., Yongseo K., Chul A. The optimization of the deposition variables for high photoconductivity β – Si:H films prepared by electron cyclotron resonance plasma chemical vapor deposition// Jap. J. Appl. Phys. Pt1.– 1998. – Vol.37, № 12B. – P.6959 – 6964.
 37. Xu Y.–Y., Ogishima T., Korzek D. et al. Deposition of Si_3N_4 thin film using m – SLAN surface wave plasma source// Jap. J. Appl. Phys. Pt1. –1999.– Vol.38, № 7 B.– P.4538 – 4541.
 38. Пат. 2117070 РФ, МКИ⁶ С 23 С 14/06, 14/44. СВЧ-плазменное осаждение диэлектрических пленок на металлические поверхности/С.В. Редькин, В.В. Аристов; – № 97112303/02; Заявл. 17.07.97; Опубл. 10.08.98, Бюл. №22.
 39. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Устройства со скрещенными полями и перспектива их использования в технологии микроэлектроники / Обзоры по электронной технике Сер.3. Микроэлектроника. Вып.2 (1619). – М.: ЦНИИ “Электроника”, 1991.– 91 с.
 40. Пат. 99/41423 ВО, МКИ⁶ С 23 С. Plasma process for depositing low dielectric constant films/Cheung David, Yau Wai – Fan, Mandal Robert P. et al.; Applied Materials Inc.– № PCT/ US 99/ 02903; Заявл. 10.02.1999; Опубл. 19.08.1999.
 41. Пат. 10144677 Япония, МКИ⁶ Н 01 L 21/314. Semiconductor device and manufacture there of / Akanori Takashi, Naito Yoko, Endo Shunichi; Tokyo Electron Ltd. – №8320913; Заявл. 14.11.1996; Опубл. 29.05.1998.
 42. Пат. 9821748 ВО, МКИ⁶ Н 01 L 21/314. Semiconductor device and its manufacturing method / Akanori Takashi, Naito Yoko, Endo Shunichi et al.; Tokyo Electron Ltd.– №32091396; Заявл. 11.14.1996; Опубл. 22.05.1998.
 43. Pelaunay M., Touchais E. Electron cyclotron resonance plasma ion source for material depositions // Rev. Sci. Instrum. – 1998. – Vol.69, № 6. – P. 2320 – 2324.
 44. Ono Toshiro, Amazawa Takao, Nishimura Hiroshi, Matsuo Seitaro. Tantalum and tantalum nitride films deposited by electron cyclotron resonance sputtering as barriers to copper diffusion// J. Vac. Sci and Technol. B.– 1999.– Vol.17, № 5.– P. 2385 – 2389.
 45. Gao Junsi, Narashima Hiroshi, Sakai Naofami. Growth of epitaxial silicon film at low temperature using sputtering – type electron – cyclotron resonance plasma // Jap. J. Appl. Phys. Pt 2. – 1999. – Vol.38, № 30.– P. L220 – L222.
 46. Kinetic modeling of microscopic processes during electron cyclotron resonance microwave plasma – assisted molecular beam epitaxial growth of GaN/GaAs – based heterostructures./Z.Z. Bandic,R.J. Hauenstein, M.L. O’Sten, T.C. Mc-Gill. // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol.68, N11. P. 1510 – 1512.
 47. Браун Я. Физика и технология источников ионов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1998. – 496 с.
 48. Sekiguchi M., Matsushita H., Jonoshita I., Kobasawa M. Development of a 2.45 GHz electron cyclotron resonance ion source for ion implanter application // Rev. Sci. Instrum.– 1998. – Vol.69, № 2. Pt2.– P.873 – 839.
 49. Torri Y., Shimada M., Watanabe I. et al. Characteristics of electron cyclotron resonance plasmas for large area ion source application//Rev. Sci. Instrum.–1990.– Vol. 61, №1. Pt.1. – P.253 – 259.
 50. Le Coeur F., Lagarde T., Pelletier J. Distributed electron cyclotron resonance plasma immersion for large area ion implantation (invited)//Rev. Sci. Instrum.– 1998.–Vol. 69, № 2. Pt.2. – P. 831 – 836.
 51. Popovici D., Terreault B., Boldue M. et al. Surface treatment of pure and alloyed aluminum using a new plasma – based ion implanter apparatus//J. Vac. Sci. Technol. B.– 1999. – Vol.17. № 2.– P.859 – 862.
 52. Пат. 11195397 Япония, МКИ Н 01 J 37/317. Low energy heavy ion three – dimensional radiation method / Nunogaki Masanobu; – №10031931; Заявл. 05.01.1998; Опубл. 21.07.1999.
 53. Martiret C., Devine R.A.B. Low – temperature oxidation of Si in a microwave electron cyclotron resonance excited O_2 plasma // Appl. Phys. Lett. – 1995.– Vol.67, № 23.– P. 3500 – 3502.
 54. Koromogawa Takashi, Yamasita Akihito. Negative ion assisted silicon oxidation in downstream of microwave plasma. // Jap. J. Appl. Phys. Pt. 1. – 1998.– Vol.35, № 9A. – P. 5028 – 5032.
 55. Buin O., Kennedy G.P., Gartner M., Taylor S. Structure analysis of silicon dioxide and silicon oxinitride films produced using an oxygen plasma// IEEE Trans. Plasma Sci.– 1998.– Vol.26, № 6. – P. 1700 – 1711.
 56. Chau T.T., Kao K.C. Optical emission spectra of microwave oxygen plasmas and fabrication of SiO_2 films//J.Vac. Sci. Technol. B. – 1996. – Vol.14, № 1. – P. 527 – 532.
 57. Nakamura Ryuichi, Ikoma Hideaki. Magnetically excited plasma oxidation of GaAs // Jap. J. Appl. Phys. Pt 2.– 1996.– Vol.39, № 1A.– P. L8 – L11.
 58. Saha C., Bera J.K., Ray S.K. et al. Electrical properties of thin polyoxides grown at a low temperature using microwave oxygen plasma// Semicond. Sci. and Technol.– 1998.– Vol.13, № 6. – P.599 – 602.
 59. Maslehi M.M., Tu C.Y., Sigmon T.W., Saraswat K.C. Low temperature direct nitridation of silicon in nitrogen plasma generated by microwave discharge// J. Appl. Phys.– 1985. – Vol.58, № 6.– P.2416 – 2419.
 60. Bera L.K., Baneryec H.D., Ray S.K. Microwave plasma nitridation of silicon dioxide on strained Si // Appl. Phys. Lett. – 1998.– Vol.73, №11. – P. 1559 – 1561.
 61. Chen Po-ching, Hsu Klaus Yung-jane, Lin Jian-yang, Hwang Huey-Iang. Characterization of ultrathin dielectrics grown by microwave afterglow oxygen and N_2O plasma // Jap. J. Appl. Phys. Pt 1. – 1995. – Vol.34, № 2B. – P.973 – 977.
 62. Camps E., Muhl S., Alvarez-Fregoso O., Juenez I. Microwave plasma nitriding of pure ion// J.Vac. Sci. and Technol. A. – 1999. – Vol. 17, № 4. Pt 2. – P. 2007 – 2014.
 63. Fukano T., Ito T., Ichikawa H. Microwave annealing for low temperature VLSI processing // Int. Electron Device Meet., Washington. D.C. – New-York (USA).–1985.– . 224 – 227.
 64. Пат. 4517026 США. МКИ Н 01 L 21/263. Method of backside heating a semiconductor substrate in an evacuated chamber by directed microwaves for vacuum treating and heating a semiconductor substrate / Inoue Minoru; Fujitsu, Ltd. – №483131. Заявл. 08.04.1983; Опубл. 14.05.1985; НКИ 148/1.5.
 65. Пат. 4593168 США. МКИ Н 05 В 6/78. Method and apparatus for the heat treatment of a plate – like member / Amada Haruo; Hitachi, Ltd.– № 581268; Заявл. 17.02.84; Опубл. 03.06.86; НКИ 219/10.58m.
 66. Пат. 1501756, РФ, МКИ⁶ 6 G 03 F 1/00. Способ изготовления фотошаблонов / Г.Г. Бунин, В.А. Курмачев, В.И. Мякиненков, В.Т. Николенков.– №430520/21; Заявл. 10.09.1987; Опубл. 20.02.1996; Бюл. №5.
 67. Bolon D.A., Kunz C.O. Ultraviolet depolymerisation of photoresist polymers // Polym. Eng. Sci.– 1972. – Vol.12, № 2.– P.109 – 114.
 68. Ozawa K., Sto T., Tahikawa H. UV resist – stripping for high – speed and damage – free process // Extended Abstr.

- 15 Conf. Solid State Devices and Mater.– Tokyo (Jap.). – 1983. – P.125 – 128.
69. Mattheews J., Ury M., Birch A. et .al. Microlithography techniques using a microwave powered deep UV source // Proc. Soc. Photo – Opt. Instrum. Eng. – 1983. – P.172 – 183.
70. Levine L.S., Ury M.G. Microwave – powered lamp technology for photoimaging // SME Techn. Pap.– 1985. – № 437.
71. Dudnikov V. G. Review of high brightness ion sources for microlithography // Rev. Sci. Instrum. Pt.2. – 1 996. – Vol. 67, № 3.– P. 915 – 920.
72. Гариер Х, Окава Т., Хауолд А. и др. Недорогой источник рентгеновского излучения на основе электронного циклотрона // Приборы для научных исследований. – 1990. – № 2. – С.28 – 31.

**ПЛАЗМОВІ НВЧ ТЕХНОЛОГІЇ В ПРОЦЕСАХ
ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ**

А.П. Достанко, С.В. Бордусов

У статті представлена інформація оглядового характеру про застосування плазми НВЧ розряду в технологічних процесах виготовлення виробів електронної техніки. Зазначено області технічного застосування НВЧ розрядів, приводяться основні характеристики сформованих під їх впливом структур.

**MICROWAVE PLASMA TECHNOLOGIES IN SURFACE
ENGINEERING PROCESSES**

A.P. Dostanko, S.V. Bordusov

Microwave plasma discharge applications in manufacturing of microelectronic products are reviewed. Some characteristics and material treatment conditions with microwave discharge technologies are considered.