

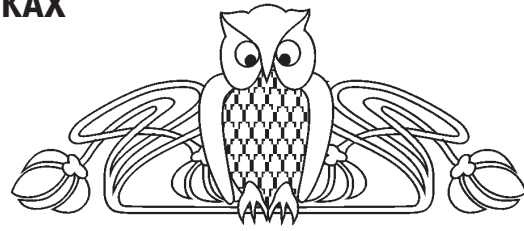


УДК 533.9

## НЕРАВНОВЕСНАЯ СВЧ-ПЛАЗМА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И РАЗРАБОТКАХ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Р. К. Яфаров

Саратовский филиал Института радиотехники  
и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
E-mail: pirpc@yandex.ru



Рассмотрены достоинства и преимущества использования для реализации нанотехнологий высокоионизированной низкоэнергетичной СВЧ-плазмы низкого давления. Показано, что по своим функциональным возможностям одна установка на основе СВЧ-плазмы может заменить 4–5 установок с обычным высокочастотным возбуждением газового разряда.

**Ключевые слова:** вакуумно-плазменное технологическое оборудование, нанотехнологии, СВЧ-плазма низкого давления, поверхностное структурирование, кремний, СВЧ плазмохимическое травление, квантово-размерные системы.

### Nonequilibrium the Microwave Plasma of Low Pressure in Scientific Researches and Development Micro and Nanoelectronics

R. K. Yafarov

Advantages and benefits realization use of nanotechnology of high ionized low-energy microwave plasma of low pressure are described. It presents the fact that one installation on the basis of microwave plasma can replace up 4 to 5 installations with usual high-frequency excitation of the gas discharge.

**Key words:** vacuum-plasma process equipment, nanotechnology, low pressure microwave plasma, surface structure of silicon, microwave plasma-chemical etching, quantum-dimensional systems.

Неуклонное возрастание роли диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) электромагнитного спектра в жизни общества обусловлено не только успешным его использованием в радиотехнике и радиолокации, но и тем, что электромагнитные колебания этого диапазона обладают рядом важных физических особенностей и свойств, отличающими их от смежных участков спектра. В частности, особенностью СВЧ-диапазона является легкость, с которой СВЧ-энергия трансформируется в другие виды энергии: тепло, энергию ускоренных частиц и др. Одним из наиболее перспективных применений СВЧ-энергии является получение неравновесной «мягкой», или «холодной», плазмы. Такая плазма обладает рядом важных свойств, которые находят все новые применения в различных областях науки и техники.

Общая теория взаимодействия электромагнитных волн СВЧ-диапазона с газовой низкотемпературной плазмой разработана в начале 60-х гг. XX в. в работах В. Л. Гинзбурга [1], В. Е. Голанта [2] и др. Она нашла широкое экспериментальное подтверждение при решении многих важных научно-технических проблем, среди которых проблема управляемого термоядерного синтеза, где явление электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) в магнитной конфигурации типа «пробкотрон» служит для создания и нагрева плазмы до предтермоядерных температур, астрофизические проблемы, создание плазменных преобразователей энергии и плазменных двигателей, разработка газовых лазеров и др.

Эффект ЭЦР нагрева плазмы с целью получения многозарядных ионов было предложено применять в 1969 г. В 1972 г. появились первые источники, в которых была реализована эта идея. В настоящее время ионные источники на ЭЦР широко применяются для получения высококачественных пучков многозарядных ионов в ускорителях и экспериментах по ядерной физике. Примерно с 1977 г. началось практическое использование ЭЦР СВЧ-плазмы в исследованиях технологических процессов микроэлектронного производства [3].

Выбор способов вакуумно-плазменной обработки в производстве изделий микроэлектроники и наносистемной техники зависит от применяемых материалов и требований к технологическому процессу, таких как скорость обработки, степень совершенства кристаллической структуры обрабатываемого материала, селективность и анизотропность «сухого» травления, стоимость и др. Поэтому на разных этапах их изготовления используются различные способы плазменной обработки. Так как существующие промышленные установки предназначены для обработки только одним из способов, это делает производство изделий наносистемной техники



дорогим и трудоемким процессом. В связи с этим приоритетным направлением развития нанотехнологий в стране и мире является создание новой технологической базы, которая обладала бы многофункциональными свойствами и могла бы обеспечить получение новых наноструктурных материалов и устройств наносистемной техники с принципиально новыми свойствами, присущими наномасштабу.

На современном этапе развития полупроводникового материаловедения актуальными являются задачи получения атомно-чистых поверхностей полупроводниковых кристаллов, создания туннельно-тонких пленок и гетерограниц с заданным составом, уровнем легирования и высоким качеством структуры границ раздела, что вызвано высокой чувствительностью электронных свойств материалов к дефектам и неоднородностям структуры. Важным представляется рассмотрение структурного аспекта полупроводниковой поверхности: контролируемое создание микроморфологии поверхности кристаллов-подложек, что необходимо для управления плотностью стоков для адатомов; определение механизмов формирования субмонослойных покрытий в процессах получения низкоразмерных эпитаксиальных структур; определение принципиально новых возможностей создания квантово-размерных систем, примером которых могут служить самоорганизующиеся системы при создании квантовых проволок, латеральных поверхностных сверхрешеток и квантовых точек. Все эти задачи обусловлены тенденциями развития твердотельной электроники, направленными на повышение степени интеграции и реализацию квантово-размерных явлений в двумерных кристаллах.

Существуют различные методы получения атомарно чистых поверхностей материалов [4], каждый из которых имеет определенные преимущества и недостатки. Поэтому универсальной процедуры очистки не существует. Для каждого материала, как правило, требуется индивидуальная методика или даже комбинация нескольких методик. В настоящее время наиболее перспективным методом получения атомарно чистых поверхностей является ионно-плазменное травление. Использование для этих целей «мягкой» (неравновесной) беспримесной (не имеющей металлических электродов) низкоэнергетичной плазмы СВЧ газового разряда низкого давления представляет значительный научный и практический интерес. В отличие от других методов

плазменного воздействия она имеет широкий диапазон распределения электронов по энергии, что позволяет селективно возбуждать заданный химический состав плазмообразующего газа и, таким образом, исследовать влияние режимов обработки на микроморфологию и электронные свойства атомарно чистой поверхности монокристаллического кремния различных кристаллографических ориентаций, других полупроводниковых и диэлектрических материалов.

Современные твердотельные электронные системы имеют сложную иерархическую структуру. Для своего функционирования они интегрируют физико-химические явления от атомно-молекулярного до макроскопического уровня. По своей архитектуре они неуклонно приближаются к архитектуре живых систем.

Можно использовать три различные стратегии для создания сложных наноэлектронных систем.

*Стратегия «сверху – вниз» (top-down)*, основана на уменьшении размеров физических тел с использованием того или иного вида микрообработки (например, литографии и травления) до получения объектов с нанометровыми параметрами.

*Стратегия «снизу – вверх»*, в этом случае наноэлектронные системы создаются из атомов, молекул и других структурных элементов, располагаемых в требуемом порядке. Такая стратегия присуща живым системам. Примерами этого подхода в технологии микро- и наноэлектроники являются поштучная укладка атомов на кристаллической поверхности при помощи сканирующего туннельного микроскопа или слоев атомов («слой за слоем») с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии.

*Стратегия «самоорганизации»*, получила большое распространение в современной нанотехнологии для формирования наносистем. «Самоорганизация» наноструктур понимается в широком смысле как самопроизвольное (спонтанное) возникновение макроскопического порядка в первоначально однородной среде. Использование термина «самоорганизация» наноструктур охватывает как равновесные явления, так и неравновесные процессы, а также их комбинацию. Этот подход дает возможность анализировать с единых позиций различные механизмы спонтанного возникновения наноструктур, при котором, как правило, равновесие успевает установиться только частично (например, равновесие успевает установиться на границе раздела фаз и не успевает в объеме).



Каждая из этих стратегий имеет свои достоинства и недостатки, что делает привлекательным поиск компромиссных решений на основе комбинаций этих стратегий в заданном технологическом маршруте изготовления реальных электронных систем.

С переходом в область нанотехнологий, которые должны обеспечивать получение наноструктур с атомной точностью и необходимыми химическим составом и конфигурацией, требования к плазменным процессам значительно ужесточились. Они уже не могут быть удовлетворены использованием процессов, которые основываются на электрических разрядах постоянного тока и переменного тока промышленной или высокой частоты. Возникающие в процессах традиционной ионно-плазменной обработки дополнительные дефекты кристаллической структуры приповерхностных слоев имеют размеры, сопоставимые с размером рабочего элемента, и не позволяют обеспечить необходимое качество границ раздела в атомном масштабе. Это ухудшает транспортные свойства носителей заряда, резко уменьшает времена их жизни и ставит под сомнение возможность создания систем с пониженной размерностью. Другим важным требованием является сокращение стоимости производства, которое достигается увеличением прецизионности и интенсивности (скорости) плазменной обработки. Ставится задача обеспечения сверхгруппового характера обработки без снижения качества, т. е. повышение степени прецизионности и структурного совершенства микрообработки на все возрастающих размерах подложек.

Для выполнения названных требований предстоит решить ряд фундаментальных проблем, как в области физики твердого тела, так и физики плазмы. В области физики твердого тела проблемы, связанные, например, с созданием на основе известных полупроводниковых и диэлектрических материалов многослойных гетероструктур с размерным квантованием – сверхрешеток, которые модифицируют зонные структуры, и приводят к появлению новых полезных электрических и оптических свойств. Интерес к ним существует не только теоретический, но и практический, так как уже показана принципиальная возможность создания приборов на основе квантовых объектов, например лазеров с параметрами лучшими, чем у существующих в настоящее время [5].

Большой практический интерес представляют аморфные сверхрешетки на основе наноразмерного тонкопленочного кремния и его соединений. Такие квантовые системы в зависимости от способа получения могут обладать неограниченно широким спектром полупроводниковых свойств и по параметрам цена – качество могут существенно превосходить сверхрешетки, созданные на основе монокристаллических материалов с применением молекулярно лучевой эпитаксии или других уникальных и дорогостоящих технологий [6].

Особый и в значительной степени самостоятельный научный и практический интерес представляют разработка технологии получения и изучение свойств гидрогенизированного аморфного кремния ( $a\text{-Si} : \text{H}$ ). Наноразмерные пленки  $a\text{-Si} : \text{H}$  обычно используются в полупроводниковых сверхрешеточных структурах в качестве узкозонного материала и во многом определяют как фундаментальные, так и оптоэлектронные свойства таких структур. Научный интерес к этому материалу, существенно возросший в последние годы, связан также с надеждой, что применение  $a\text{-Si} : \text{H}$  позволит получать дешевую электроэнергию путем прямого преобразования солнечной энергии в электрическую с помощью фотоэлектрического эффекта. Основными параметрами, определяющими эффективность фотоэлектрического преобразования, являются ширина запрещенной зоны и время жизни фотогенерированных носителей. Возрастание рекомбинационного времени жизни носителей обычно приводит к увеличению всех фотоэлектрических параметров ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$  и  $FF$ ) [7].

Гидрогенизированный аморфный кремний – стеклообразный полупроводниковый материал, представляющий собой разупорядоченный сплав кремния с водородом, концентрация которого может изменяться от 1 до 50 ат.% в зависимости от способа получения. Пленки аморфного кремния получали множеством способов [6, 7]. Главным их недостаток состоит в том, что полученные пленки имеют, как правило, слишком высокую плотность локализованных состояний в щели подвижности. Это существенно ограничивает области их практического использования. Поэтому задача улучшения качества пленок аморфного гидрогенизированного кремния остается актуальной.

Согласно современным представлениям оптоэлектронные свойства аморфного гидрогенизированного кремния определяются в основном



количеством содержащегося в пленках водорода и структурой, которую он образует при вхождении в кристаллическую решетку кремния. Оба фактора регулируются изменением условий синтеза, в частности температуры подложки, давления рабочего газа, степени ионизации плазмы, энергии и вида ионов, бомбардирующих поверхность пленки в процессе роста. Увеличение содержания водорода в твердом растворе с кремнием вызывает увеличение ширины запрещенной зоны полупроводника. Однако и его отсутствие делает аморфный кремний непригодным к практическому использованию. Причиной этого является высокая плотность локализованных состояний в щели подвижности, обусловленная большим количеством оборванных связей Si-Si. Считается, что одна из основных причин появления у сплавов на основе a-Si : H хороших фотоэлектрических свойств заключается в полном закреплении большинства оборванных связей водородом с образованием моногидридной структуры. При повышенном содержании водорода в кремниевых пленках, которое имеет место, как правило, при низких температурах осаждения, образуется структура полимерного типа. Такая структура a-Si : H характеризуется высокой плотностью локализованных состояний и также является непригодной для практического применения.

Огромный научный и практический интерес представляет разработка технологии создания бездефектных наноструктур с целью исследования в них квантового хаоса и реализации электронного транспорта в кольцевых интерферометрах с квантовыми точками на его входе. Интерес к таким приборам вызван, прежде всего, тем, что электронный интерферометр является основой квантового одноэлектронного нанотранзистора, использование которого позволит уменьшить мощность переключения на несколько порядков в сравнении с классическими транзисторами [8]. На пути к созданию интерференционного транзистора имеется ряд трудностей, вызванных главным образом подавлением интерференции флуктуационным потенциалом примесей и дефектов. Одна из возможностей их преодоления – уменьшение размеров интерферометра. Изучается возможность создания на основе эффекта Ааронова – Бома полевых интерференционных одноэлектронных нанотранзисторов [9].

На рис. 1 приведено РЭМ-изображение электронного интерферометра Ааронова – Бома на гетероструктуре AlGaAs/GaAs, впервые создан-

ного и исследованного в ИФП СО РАН [10–13]. В настоящее время созданы и исследованы образцы электронных интерферометров с внешним диаметром кольца менее 300 нм, уверенно работающие при температуре выше 4.2 К. Интерферометр изготавливался с использованием электронной литографии и технологии реактивного ионного травления на основе 2D-электронного газа в гетеропереходе AlGaAs/GaAs с тонким спейсером, полученным методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Параметры электронного газа при  $T = 4.2$  К были следующими: поверхностная плотность  $N_S = (7-9) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , подвижность  $\mu = 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . Это соответствует длине свободного пробега электронов  $l = 1.5$  мкм. Исследовалось магнитосопротивление интерферометра при температурах  $T = 0.02-4.2$  К и в магнитных полях до 10 Тл. Измерения сопротивления проводились на переменном сигнале частотой 30 Гц. Было показано, что в приборе реализуется режим одномодового электронного волновода.

Возможность уменьшения размеров интерферометра за счет уменьшения поверхностного и бокового дефектообразования при низкоэнергетичном высоковакуумном СВЧ вакуумно-плазменном травлении было показано в работе [14] при создании топологических структур субмикронных размеров в виде проводящих («квантовых») мостиков и петель в  $n^+ - \text{GaAs}$  на изолирующей подложке из того же материала (рис. 2). Оценка дефектообразования проводилась по величине проводимости  $n^+ - \text{GaAs}$  – мостика с различной шириной. Определялась ширина, при которой проводимость прекращается. Проводимость измерялась как при комнатной, так и при более низких температурах. Из зависимостей нормированной проводимости от ширины проводящих «мостиков» следовало, что с уменьшением вытягивающих напряжений при СВЧ плазменном травлении ширина перемычки с «разрывом цепи» уменьшается и при  $U_{\text{уск}} = -50$  В составляет менее 0.05 мкм. Это более чем в 3 раза меньше минимальной ширины проводящего канала, полученного с использованием ВЧ реактивного ионного травления в  $\text{CCl}_2\text{F}_2 / \text{He}$  в работе [15].

При создании полевых нанотранзисторов основные усилия направлены в настоящее время на формирование в канале транзистора квантовых точек (КТ). Это позволяет в полной мере реализовать преимущества квантовых и одноэлектронных эффектов, таких как туннелирование, размерное квантование энергетического спектра носителей заряда и кулоновская блокада,

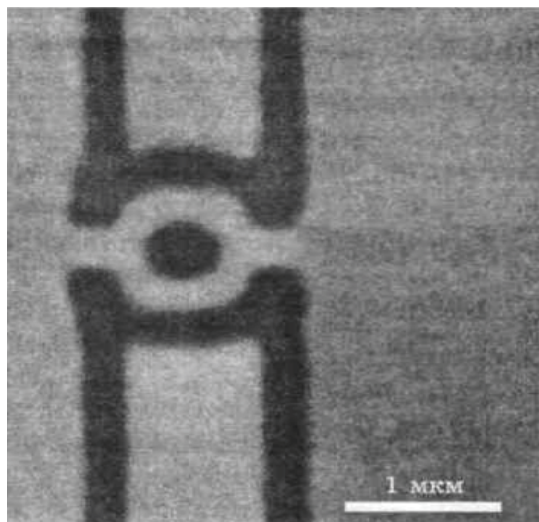


Рис. 1. РЭМ-изображение интерферометра на эффекте Ааронова – Бома, сформированного на гетероструктуре AlGaAs/GaAs с двумерным электронным газом

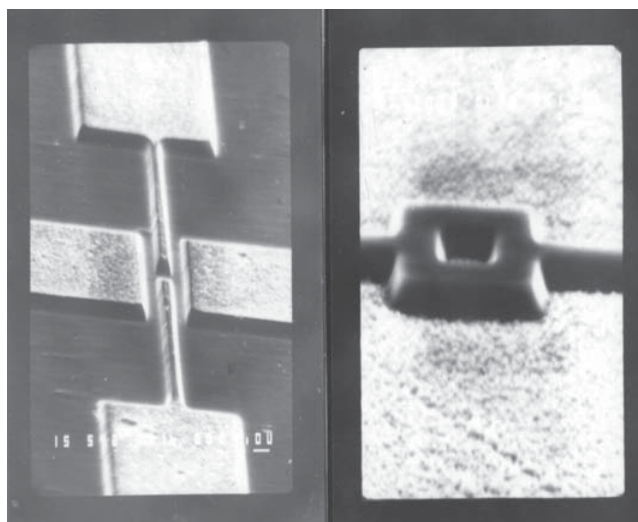


Рис. 2. РЭМ-изображение «квантовых» мезоструктур на  $n^+$ -GaAs, полученных травлением в ЭЦР СВЧ-плазме (ширина линий 0.1 мкм)

присущих электронным элементам нанометрового масштаба. Основные усилия сосредоточены на кремниевых полевых транзисторах с КТ, которые изготавливаются с помощью электронной литографии в комбинации с высокоанизотропным травлением [16–19]. Для того чтобы обеспечить работу квантового транзистора при комнатной температуре, необходимо, чтобы размеры КТ не превышали 10 нм.

Известно [4], что при создании наноструктур ростовую поверхность в непосредственной близости режимов плазмохимической обработки к реализации процессов квазиравновесных конденсации и/или сухого травления в условиях слабой адсорбции следует рассматривать в виде атомно-шероховатой структуры, определяемой условиями подготовки и ее внутренней атомно-энергетической симметрией сил и масс. Воздействие низкоэнергетичной (10–30 эВ) СВЧ-плазмы на поверхность роста или травления твердого тела снижает энергию десорбции до эффективного численного значения, что при данной температуре вещества эквивалентно повышению его летучести. Такое искусственное повышение летучести веществ при условии самоорганизации стационарности процесса переводит технологию с использованием «мягкой» СВЧ-плазмы в ряд наиболее универсальных. При этом конденсация атомных и ионно-радикальных потоков рабочего вещества заданного состава и энергии в условиях слабой адсорбции и ограниченной поверхностной диффузии из-за повышенного коэффициента прилипания заряженных частиц будет способ-

ствовать самоорганизованному формированию нового наноструктурированного состояния поверхности, присущего данной паре взаимодействующих химических элементов. Следует ожидать, что вблизи равновесной конденсации минимизация свободной энергии создаст предпосылки для самоорганизации статистически неоднородных слоев нанокластеров. При последующей конденсации это создаст условия для перехода к формированию наноструктур в виде фрактальных сеток. Такой результат относится к ожидаемому, но принципиально новому, так как квазиравновесные процессы на атомной поверхности с участием высокоионизованной низкоэнергетичной электронной и ионно-радикальной плазмы в условиях слабой адсорбции до настоящего времени практически не изучены, в отличие, например, от молекулярно пучковой эпитаксии. Таким образом, с использованием низкоэнергетичного СВЧ плазменного воздействия может получить развитие принципиально новая концепция наноструктурирования архитектурных форм материалов за счет контролируемой самоорганизации квазиравновесных стационарных конденсации или травления.

Основываясь на этих представлениях, специалисты могут изучить закономерности влияния режимов, химического состава, кристаллографической ориентации полупроводниковых пластин на скорость ионного и ионно-химического травления и микро- и наноморфологию (размеры, конфигурацию и плотность формирующихся наноструктурных систем и объектов) их поверхно-



сти. Предстоит разработать физико-химические основы и механизмы процессов плазменного электронного травления в условиях слабой адсорбции, а также модельные механизмы процессов формирования и управления параметрами упорядоченных наноструктурных систем (квантовых точек и проволок) на поверхности кремниевых кристаллов, полученных методами ионно-химического синтеза и высокоэнергетического низкоэнергетического травления.

Принципиальная возможность получения самоорганизующихся низкоразмерных систем в результате распыления ионами аргона с энергией 1.2 кэВ при базовом давлении  $2 \times 10^{-5}$  Па и плотности ионного тока  $0.24 \text{ мА/см}^2$  с использованием ионной пушки «Kauffman» монокристаллических полупроводников, в частности, кремния различных кристаллографических ориентаций, была показана в работах [20–22]. Получены кремниевые КТ высотой  $6 \pm 1$  нм и диаметром 40–50 нм, самоорганизованные с гексагональной симметрией с ближним порядком. Однако важной проблемой, которая широко обсуждается в литературе и ставит под сомнение возможность применения самоорганизующихся наноструктур, полученных распылением полупроводниковых монокристаллов ионами аргона с энергией более 1 кэВ, является их кристалличность [23, 24]. Действительно, в ряде работ было показано, что полученные таким методом нанокристаллиты покрыты аморфным слоем толщиной  $\sim 2$  нм. Кроме того, исследования самих закономерностей формирования низкоразмерных систем (их размеры, периодичность и др.) ионным травлением в зависимости от типа подложки, схем и параметров ионной обработки еще очень далеки от завершения [25]. Способ же формирования наноструктур с использованием низкоэнергетического электронного и ионно-плазменного травления в условиях квазистационарности и слабой адсорбции, как нам известно, в литературе еще не обсуждался. Поэтому ожидаемые результаты исследований в этом направлении с применением высокоионизованной низкоэнергетической плазмы СВЧ-разряда обещают быть новыми и оригинальными.

Наиболее полный обзор существующих методов получения нанокристаллитов кремния в аморфной диэлектрической матрице приведен в работе [25]. Большой практический интерес к этой теме вызывает возможность получения достаточно интенсивной электролюминесценции (ЭЛ) при комнатной температуре в наносистемах

на основе КТ кремния. Из-за диэлектрических свойств  $\text{SiO}_2$  (ширина запрещенной зоны  $\Delta E$  составляет  $\approx 9$  эВ [26]) в создании структур на основе системы  $\text{SiO}_2 : \text{Si}$ , дающих интенсивную ЭЛ, возникают некоторые трудности, хотя сама возможность получения ЭЛ в этой наносистеме продемонстрирована в работе [27]. Наиболее перспективной с этой точки зрения представляется система нановключений Si, погруженных в матрицу аморфного кремния (nc-Si : a-Si): для a-Si эффективная величина  $\Delta E$  составляет менее 2.0 эВ.

Задача формирования низкоразмерных систем в виде ансамблей кремниевых нанокристаллитов на некристаллических подложках методом ионно-плазменного синтеза является актуальной для создания, например, эффективных фотолюминесцентных систем и объемных сверхрешеточных структур [25, 28]. Однако размеры и концентрация наноструктур Si, полученных этим методом, существенно зависят от многих технологических параметров и плохо воспроизводятся [29–31]. Решение задачи в плане определения фундаментальных закономерностей и построения физико-химической модели самоорганизации наноструктур, например, кремния и ультрадисперсного алмаза, осаждением в условиях низкоэнергетической интенсивной ионной бомбардировки в литературе, кроме наших поисковых работ [32, 33], еще не обсуждалось.

Большой практический интерес представляют исследования, связанные с разработкой новых технологий и фундаментальных основ формирования наноструктурных объектов и систем, обусловленных закономерностями протекания начальных стадий кристаллизации и роста наноразмерных кристаллитов кремния, алмазоподобного углерода и их соединений на кристаллических и аморфных подложках с различной энергией связи на межфазной границе. Предполагается, что одним из важнейших факторов разрабатываемых процессов будут условия и режимы плазмохимической подготовки поверхностей с учетом их энергетической реконструкции. Определяющими, по-видимому, будут процессы так называемой заместительной плазмохимической хемосорбции. Кроме нее перспективным направлением исследований по созданию полупроводниковых наноструктур на поверхности являются исследования явлений и процессов, связанных с коалесцентным распадом субмонослойного адсорбата, который представляет собой релаксационное формоизменение



тонкой пленки, и реконструкцией поверхности полупроводниковой подложки, на которую эта пленка осаждается. Система тонкая пленка – реконструированная поверхность полупроводниковой подложки, по сути, является двумерной фазой, которая характеризуется своей собственной атомной и электронной структурой, составом, областью температурной стабильности, свойствами и т. д. [6]. Особенно перспективным представляется исследование самоорганизации углеродных материалов на монокристаллическом кремнии, так как при этом реализуется наиболее сильное и, по-видимому, наиболее результативное взаимодействие между атомами углеродного адсорбата и поверхности кремния, которое по величине превышает энергию химической связи между атомами кремниевой пластины. Исследование условий образования поверхностных фаз на реконструированных поверхностях кристаллов-подложек и их свойств, в частности образование поверхностной кремний-углеродной фазы на реконструированных поверхностях монокристаллического кремния различных кристаллографических ориентаций, является, на наш взгляд, актуальным и своевременным научным исследованием в физике твердого тела. Результаты этих исследований позволят получать нелитографическими способами не только поверхностные, но и пространственные наносистемы. Это может быть реализовано за счет использования самоорганизованных дискретных углеродных покрытий, имеющих рекордно низкие значения коэффициента распыления ионными пучками, в качестве масочных с субнанометровым разрешением и высокоанизотропного низкоэнергетичного плазмохимического травления с селективностью, определяемой соотношением скоростей травления маски и материала подложки. Данный метод получения квантово-размерных систем хотя и основывается на известных процессах, присущих тонкопленочной технологии, однако во всей совокупности последовательностей, согласно имеющимся литературным данным, до настоящего времени еще не был реализован.

В связи с интенсивным развитием нанотехнологий в мире возрос интерес к нано- или ультрадисперсным алмазам. Благодаря сочетанию аномально высоких значений твердости, теплопроводности, а также дисперсности, химической инертности и адсорбционной активности, обусловленной предельно высоким значением числа нескомпенсированных связей на поверхности наноалмазов, наиболее перспективным

является их применение в качестве сорбентов, катализаторов, накопителей электроактивных водорода и кислорода в топливных элементах, твердых антифрикционных смазок, а также в виде наполнителей в специальных полимероалмазных композициях, керамических и резинотехнических изделиях и др. [34].

Современные технологии получения алмазных микропорошков, как правило, весьма трудоемки, связаны с использованием статических сверхбольших давлений и температур или энергии взрыва. Исходным сырьем для их получения послужил углерод взрывчатых веществ, а высокое давление и температура, необходимые для образования структуры алмаза из атомов углерода, достигались в процессе самого взрыва [35]. Короткое время взрыва определяет малый размер алмазных кристаллов. Полученный взрывными методами алмазографитовый порошок требует проведения специальных операций химической очистки по выделению ультрадисперсных алмазов. По этим причинам разработка «невзрывных» технологий синтеза наноалмазных материалов имеет важное прикладное и фундаментальное значение.

В настоящее время уже известны экспериментальные доказательства того, что использование неравновесной высокоионизованной СВЧ-плазмы низкого давления позволяет реализовывать такие технологии. Наблюдаемое в работе [36] образование наноалмазной фазы в полимероподобной углеводородной матрице (рис. 3) может быть обусловлено тем, что процесс конденсации при использовании СВЧ-плазмы происходит в неравновесных условиях так же как и при детонационном синтезе наноалмазов. Применение СВЧ-плазмы в диапазоне давлений паров этанола от 0.1 до 5 Па позволяет создавать сверхбольшие пересыщения при термоударе на холодной подложке ионов и возбужденных атомов углерода с широким энергетическим спектром. При этом вероятность зарождения наноалмаза возрастает, поскольку преобладающими при его образовании являются не термодинамические факторы, а процессы физической кинетики [37].

При низких температурах подложки одновременно с наноуглеродной кристаллической фазой могут конденсироваться продукты неполного разложения этанола, а также молекулярные продукты вторичных реакций, протекающих в СВЧ углеводородной плазме паров исходного рабочего вещества, образуя при этом нанокompозитные алмазо-углеводородные структуры.

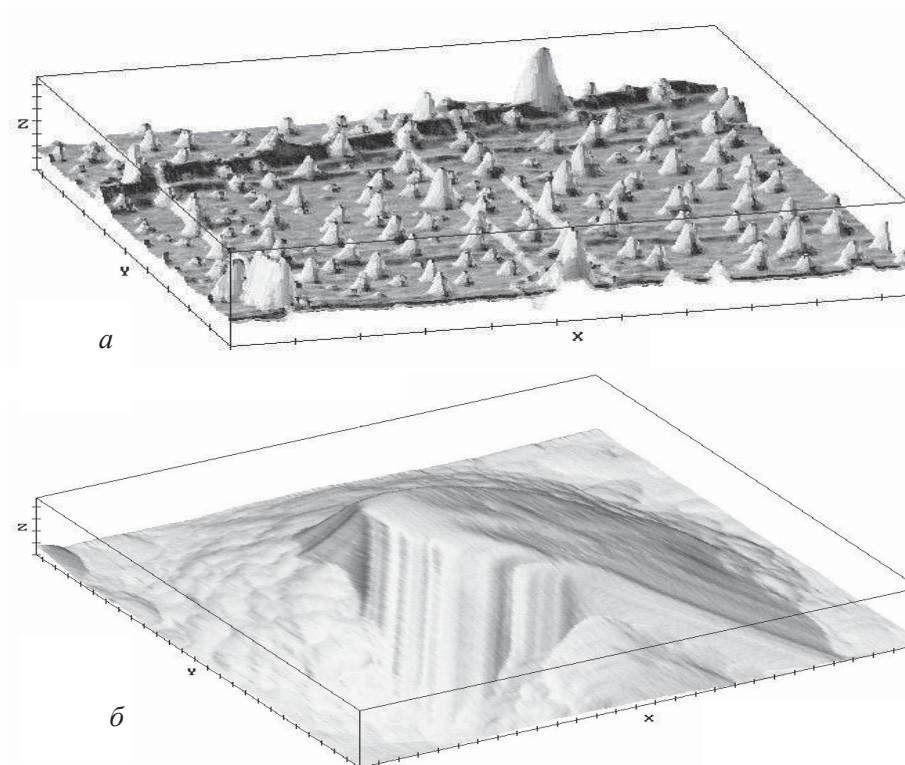


Рис. 3. АСМ-изображение наноалмазной углеводородной матрицы (а) (масштаб: X : 1 мкм, Y : 1 мкм, Z : 0.1 мкм) и нанокристаллита в ней (б). (масштаб: X : 0.1 мкм, Y : 0.1 мкм, Z : 0.01 мкм)

Благодаря погруженности наноалмазов в карбасную углеводородную матрицу имеются широкие возможности для непосредственного их нанесения на любые подложки и детали, а также для модификации и управления поверхностными свойствами наноалмазов при использовании в качестве накопителя газовой массы в топливных элементах. Погруженность наноалмазов в уникальную по своим функциональным свойствам углеводородную матрицу исключает возможность их агрегатирования в прочные образования, которые в случае сухих детонационных порошкообразных наноалмазов нуждаются в дополнительной подготовке сухого продукта при изготовлении паст путем механического дробления.

Важный прикладной интерес имеют исследования с применением неравновесной СВЧ-плазмы низкого давления по получению композиционных наноалмазграфитовых структур (рис. 4), обладающих в зависимости от размера и концентрации наноалмазных кристаллитов в графитовой матрице регулируемым порогом напряженности электрического поля и плотностью тока автоэлектронной эмиссии [38]. Технология

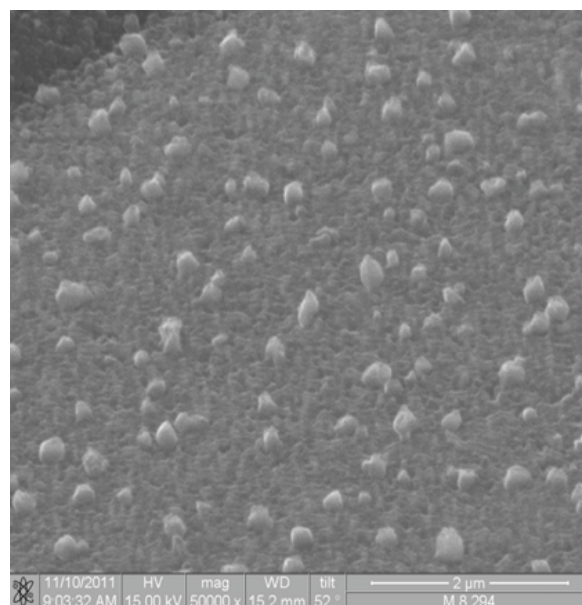


Рис. 4. СЭМ-изображение нанокомпозитной алмазграфитовой пленки

плазмохимического осаждения наноалмазграфитовых плёнок позволяет формировать эмиттеры при низких температурах от 250 до 350°C,





что дает возможность совместить ее с другими технологиями микроэлектронного производства. Основными областями применения композиционных наноалмазграфитовых материалов являются создание на их основе элементной базы радиационно-стойкой вакуумной микроэлектроники, энергоэффективных источников белого света, плоских катодлюминисцентных экранов и дисплеев.

Кроме процессов самоорганизации на границе раздела твердой и плазменной сред большой интерес с точки зрения физики плазмы имеют процессы самоорганизации в самой низкотемпературной плазме происходящие, с одной стороны, под действием внешних СВЧ электромагнитных полей, а с другой – в результате их диссипации, отражения и рекомбинации заряженных частиц плазмы как проводящей среды.

Одной из важнейших задач при использовании плазмы в технологии является задача активного формирования спектра электронов для селективного возбуждения определенных энергетических состояний атомов и ионов химически активных газов [39]. В работе [40] показаны принципиальные ограничения управления спектром электронов при помощи постоянного электрического поля. В то же время существуют экспериментальные доказательства преимуществ, которые дает применение электромагнитных полей СВЧ-диапазона для селективного возбуждения плазмохимических сред [41, 42]. Например, в работе [43] эффективность СВЧ-возбуждения газового оптического квантового генератора объяснялась существенным отклонением электронной функции распределения от максвелловского типа. В работе [44] из анализа уравнения Власова следует, что путем подбора частоты и напряженности электрической компоненты можно добиться любой величины наиболее вероятного значения энергии колебательного движения электронов.

Экспериментальные исследования параметров электронной компоненты неравновесной плазмы СВЧ газового разряда в магнитном поле, функции распределения электронов по энергии, электрических полей, влияния на них технологических параметров процесса и конструкции плазмотрона позволят определить наиболее значимые факторы управления внутренними параметрами плазмы, которые обеспечивают селективность процессов ионизации и возбуждения атомов и молекул рабочего газа. Это позволит реализовать на практике самоорганизующиеся

СВЧ плазменные системы, изучить процессы и механизмы самоорганизации стационарного квазиравновесного состояния в различных инертных и химически активных плазмообразующих средах с целью повышения прецизионности (селективности и анизотропности) и интенсивности (скорости) плазменной обработки. На основании этих исследований представляется возможным проводить оптимизацию зарядового, энергетического и массового состава для конкретных практических применений, изучать влияние параметров технологического процесса на ионно-радикальный состав плазменной среды применительно к процессам ионно-химического, радикального или электронно-плазменного травления или осаждения материалов, что является преимуществом СВЧ ВПО по сравнению с другими методами вакуумно-плазменной обработки с постоянно токовым или высокочастотным возбуждением разряда. В перспективе могут быть разработаны способы управления «каналами» поглощения плазмой СВЧ-мощности, изучены вопросы интеграции различных технологических процессов, основанных только на применении СВЧ-плазмы в магнитном поле.

Не менее важными для воспроизводимого получения наноматериалов и наноструктур с заданными функциональными свойствами и устройств наносистемной техники являются поиск и исследование эффективных методов диагностики и управления процессом их получения, а также контроля моментов окончания процессов. Практика показывает, что эффективность методов управления процессами плазмохимической обработки материалов определяется не возможностями обработки информации и реализации обратных связей, а отсутствием необходимых данных о свойствах и кинетике образования структур и связях между технологическими воздействиями и их откликом в свойствах структур при данном состоянии технологического оборудования. Повышение требований к процессам получения новых материалов с заданными электрофизическими свойствами, с одной стороны, и функциональным параметрам структур, с другой, вызывает необходимость создания и использования в современном плазмохимическом оборудовании методов контроля свойств плазмы и получаемых образцов материалов непосредственно в ходе проведения процессов. В связи с этим зарубежные фирмы-разработчики оборудования стремятся к насыщению технологических установок системами встроенного контроля.



Исследование и разработка методик, алгоритмов и программно-аппаратных средств многопараметрового контроля и мониторинга процесса и свойств материалов и структур на различных этапах их плазмохимического синтеза и сухого травления могут основываться на микроволновом зондировании плазмохимической среды путем измерения фазы отраженных волн и их рассеяния, а также на твердотельном зондировании свойств самих структур с использованием эллипсометрии, рефлектометрии, одноволновой и спектральной интерферометрии.

В связи с широким диапазоном энергетических и технологических параметров установки, в которых используется плазма СВЧ газового разряда, можно отнести к многоцелевым. В этих установках с одинаково хорошими результатами можно проводить научные исследования и разработки современных технологических процессов создания сверхбольших и сверхскоростных интегральных схем, светоизлучающих и других устройств опто-, микро- и наноэлектроники: а) процессов безрадиационной очистки, пассивации и модификации поверхностей различных полупроводниковых материалов с целью улучшения их электронных свойств, б) прецизионного глубоко-субмикронного сухого травления с управляемыми селективностью и анизотропностью полупроводниковых и диэлектрических структур на основе кремния, углерода и их соединений, а также полупроводниковых соединений АЗВ5 и др. В низкоэнергетичной СВЧ плазме могут быть реализованы как процессы низкотемпературного осаждения высококачественных туннельно-тонких диэлектрических, полупроводниковых и проводящих пленок и наносистем с заданными электрофизическими свойствами, которые основываются на использовании традиционных механизмов вакуумно-плазменной конденсации из паровой фазы, так и процессы, которые основываются на явлениях самоорганизации с обеспечением кинетических преимуществ для формирования заданных поверхностных фаз, например, при получении нанокompозитных алмазографитовых, алмазоуглеводородных и других материалов для применений в строительстве, архитектуре, энергетике, других областях науки и техники.

Актуальной проблемой современной микро- и наноэлектроники является создание источников плазмы для высокопроизводительной безрадиационной вакуумно-плазменной обработки и получения полупроводниковых и наноструктурных материалов на подложках большой площади.

В последние годы конструкции СВЧ-источников плазмы и многозарядных ионов были усовершенствованы, и сейчас хорошо известно, как их изготовить. Однако далеко недостаточно изучены физические процессы, лежащие в основе их действия. Причинами этого является многообразие и сложная взаимосвязь различных параметров плазмы источника с параметрами технологических процессов, таких как вид, давление и скорость прокачки рабочего и плазмообразующего газов, СВЧ-мощность, величина и конфигурация внешних магнитных полей, а также параметрами электродинамической конструкции плазмотронов, трудности проведения прямых измерений. Создание источников плазмы большого объема наталкиваются на серьезные трудности, связанные с нежелательным снижением концентрации плазмы, изменением ее пространственной химической активности и однородности при увеличении площади обрабатываемой пластины. Это не позволяет обеспечивать сверхгрупповой характер обработки без снижения ее качества. Поэтому задача повышения степени прецизионности и структурного совершенства материала микрообработки на все возрастающих размерах подложек, которые обеспечивали бы снижение себестоимости изготавливаемых микросхем, остается актуальной, хотя на первый взгляд это представляется чисто технической проблемой. Однако на самом деле ее решение из-за высокой сложности экспериментальных реализаций не является тривиальным, тем более, если это относится к волноводным СВЧ электродинамическим системам во внешнем магнитном поле, для которых экспериментальный путь решения проблемы является весьма сложным и дорогим. Понимание этого заставляет разработчиков современного СВЧ плазмохимического оборудования обращаться к разработке теоретических моделей управления плазменными средами в ограниченных объемах, определению степени совместимости технологических требований и поиску путей наиболее оптимального решения проблемы.

Для моделирования плазменных процессов в данной области науки применяют различные методы построения функций распределения электронов и ионов по энергии, характеризующих рассматриваемый плазменный процесс при его устойчивом протекании: уравнения Лоренца, Максвелла, кинетические уравнения и различные цепочки уравнений для многочастичных функций распределения. Однако для получения



конкретных новых научных результатов исследователи чаще всего накладывают на плазму некоторые ограничения и при этом получают различные приближенные описания плазменных процессов: приближение первых моментов (теория Власова), поляризационное приближение, при котором трехчастичные корреляционные функции отсутствуют, а двухчастичные достаточно малы, и т.д. Среди этих приближений особо важную роль играет диффузионное приближение, возникающее в том случае, когда интеграл столкновений Балеску – Ленарда представляем в форме эллиптического дифференциального оператора второго порядка. Большое внимание должно быть уделено изучению разновидностей граничных условий на стенках плазматрона, различным способом ввода энергии и наличию различных форм источников ионизации в виде областей электронно-циклотронного резонанса, задаваемых внешним магнитным полем.

Особый интерес представляет разработка диффузионной модели сверхвысокочастотного разряда в неоднородных внешних магнитных полях с различными граничными условиями. Одним из ее достоинств является то, что она применяется не только к функции распределения электронов по энергии, но и к распределению концентрации электронов в цилиндрическом плазматроне. На основании адекватной диффузионной модели могут быть рассмотрены практические проблемы, связанные с исследованием повышения качества технологического процесса, а именно интенсивности и равномерности плазменной обработки, построением областей в плазматронах, обеспечивающих микрообработку с заданными требованиями.

Для плазменной микрообработки пластин большого диаметра с использованием СВЧ электромагнитного излучения наибольшее распространение получили многомодовые устройства с многоканальным вводом СВЧ-излучения. Одномодовые СВЧ плазменные устройства на основе ЭЦР с соленоидными катушками для формирования продольного магнитного поля обладают наибольшей простотой и высокой энергетической эффективностью процесса с КПД 90–95%. Однако работа на низшем типе волны в круглом волноводе на частоте 2450 МГц ограничивает поперечное сечение плазменного пучка и диаметр обрабатываемых пластин величиной до 100 мм. При увеличении диаметра пластин целесообразно было бы использовать генераторы электромагнитного излучения с

меньшей частотой (например, 915 МГц). В этом случае необходимы меньшие магнитные поля для ЭЦР. Однако при работе на более низкой частоте уменьшаются критическая плотность электронов плазмы и производительность обработки при низких давлениях.

Важное значение для повышения производительности и равномерности СВЧ плазменной обработки в многомодовых реакторах имеет рациональный выбор типа используемой для генерации плазмы электромагнитной волны. Структура электрических полей в такой электромагнитной волне должна обеспечивать, с одной стороны, создание скрещенных электрических и внешних стационарных магнитных полей для реализации ЭЦР, а с другой – создание такого распределения интенсивности ионизации плазмы по сечению реактора, при котором в наилучшей степени выполнялись бы указанные требования к процессу.

Перспективным направлением развития конструкций СВЧ плазменных устройств для обработки материалов на сверхбольших подложках (10–12 дюймов и более) являются многомодовые устройства с соленоидно-мультипольным магнитным управлением и многоканальным продольно-поперечным вводом энергии [45].

Недостатком разрабатываемых, в том числе и за рубежом, подобного рода устройств является несовершенство конструкции элементов возбуждения многомодового СВЧ-поля в круглых волноводных реакторах с большим поперечным сечением [3]. Элементы возбуждения, выполненные в виде отрезков многопроводной линии, введенных в плазменный объем, подвергаются воздействию плазмы, в результате чего они расплываются и/или требуют дополнительных мер по охлаждению. Мощность, передаваемая таким способом в реакторную камеру, невелика; требуется периодическое согласование элементов возбуждения с СВЧ-полем, снижается химическая чистота процессов, площадь равномерной обработки ограничена.

В отличие от существующих конструкций широкоапертурных СВЧ плазменных устройств, большой научный и практический интерес представляет рассмотрение принципов создания планарных плазменных электродинамических структур, включающих в себя плоскую резонаторную камеру с устройством распределенного возбуждения электромагнитных волн заданного типа и изменяющейся добротностью за счет непрерывного ввода и вывода плоских обрабатываемых изделий через специальные щели без



остановки ввода электромагнитной энергии. Возбуждение в резонаторе СВЧ-колебаний вида  $H_{mnp}$  ( $p \gg m, n$ ) может осуществляться через прямоугольный волновод, расположенный вдоль широкой длинной стенки резонатора, и вакуумноплотные окна связи в общей стенке. В середине боковых противоположных стенок операционной камеры размещены невозмущающие для СВЧ-колебаний резонатора узкие длинные щели, через которые протягивается ленточный обрабатываемый материал и осуществляется соединение со средствами откачки [46].

Планарная конструкция реакторной камеры позволит значительно (до 2 м и более в ширину) увеличить площадь обрабатываемых пластин, а при использовании шлюзовых систем проводить обработку ленточных материалов на потоке, т. е. в режиме непрерывного протягивания обрабатываемых пластин через реакторную камеру. При этом открываются новые технологические возможности для создания и производства принципиально новых изделий электронной техники с повышенной степенью интеграции. Плазменные технологии нанесения из газообразных химических источников диэлектрических, полупроводниковых, металлических, эмиссионных и других тонкопленочных покрытий на пластины большой площади и ленточные материалы шириной до 2 м и более уже сейчас востребованы для применения в электронной отрасли, светотехнике, медицине, оптике, энергетике (включая получение слоистых структур для элементов солнечной энергетики), машиностроении, стекольной промышленности, архитектуре, транспорте (для нанесения на листовое стекло износостойких, энергосберегающих, декоративных и др. покрытий).

В настоящее время независимо от назначения схем изготовление перспективных элементов электронной техники, применяемых для создания ЭВМ, систем управления, аппаратуры связи, устройств телевидения, современных систем вооружения или медицинского назначения, все больше осуществляется с использованием нанотехнологии, реализующей размеры элементов и функциональные слои толщиной в десятки - сотни ангстрем, повышенную интеграцию. Увеличение степени интеграции современных микросхем сопровождается уменьшением толщин эпитаксиальных структур, используемых для их создания. В результате этого увеличивается отношение поверхности к объему и, как следствие, возрастает роль поверхностных явле-

ний, которые непредсказуемым образом могут модифицировать электрофизические свойства используемой полупроводниковой структуры. Это ужесточает проблему совершенства атомной структуры поверхностей и переходных слоев полупроводниковых систем, создаваемых с использованием различных технологических методов и приемов обработки. Проблема сохранения высоких электрофизических характеристик полупроводниковых систем при технологических обработках требует минимизации последствий их влияния на структуру и электронные свойства поверхности. Для получения приемлемого выхода годных в таком производстве должны быть условия для минимальных дефектообразований как в самом технологическом оборудовании, так и вне его – при загрузках и транспортировках обрабатываемых пластин. В связи с этим современное развитие полупроводникового машиностроения предусматривает отказ от больших объемов «чистых» комнат и переход к оборудованию кластерного типа, что позволяет создавать микроэлектронную схему без извлечения на атмосферу до завершения определенного технологического микроцикла (рис. 5).

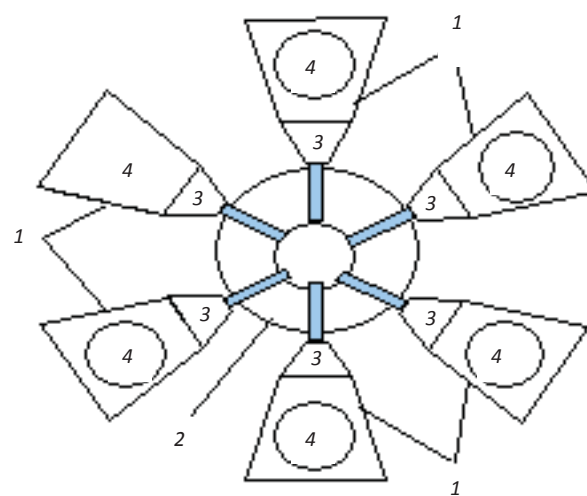


Рис. 5. Схема кластерной СВЧ нанотехнологической установки: 1 – специализированные СВЧ вакуумно-плазменные технологические модули; 2 – вакуумный транспортный модуль; 3 – транспортные механизмы; 4 – зоны специализированной СВЧ вакуумно-плазменной обработки

Использование кластерного оборудования позволяет реализовать целый ряд преимуществ по сравнению с существующим оборудованием:

- наращивать кластеры для проведения укрупненных технологических циклов;



– снижать затраты на «чистые» комнаты, а в ряде случаев и полностью их исключить;

– иметь гибкость при переходе к новым процессам за счет простоты изменения состава кластера;

– обеспечивать необходимую чистоту процессов за счет транспортировки пластин между операциями в вакууме и т.д.

Применение специализированных кластерных установок не только повышает производительность изготовления и снижает себестоимость производимой наносистемной техники, но и способствует повышению ее надежности и долговечности за счет улучшения стабильности и качества границ раздела между слоями гетероструктур.

При создании конкурентоспособного вакуумно-плазменного нанотехнологического кластерного оборудования одним из важнейших факторов является выбор типов установок, входящих в состав кластера. Наиболее перспективными для этих целей на сегодняшний день представляются установки, основанные на применении низкоэнергетичной высокоионизованной плазмы микроволнового газового разряда с электронным циклотронным резонансом. Как было видно из вышеизложенного, они обладают несомненными преимуществами как с точки зрения удовлетворения самым жестким требованиям нанoeлектронного производства, так и с точки зрения многообразия реализуемых технологических процессов. Благодаря возможности реализации различных методов плазмохимической обработки в такой установке можно создавать кластерные системы на основе нескольких однотипных многоцелевых модулей, каждый из которых предназначен для выполнения заданной технологической операции. При этом нет необходимости в резервировании и обслуживании различных типов оборудования, которые могут быть использованы для выполнения конкретного технологического процесса или изделия. Экономические выгоды от создания и эксплуатации подобных многоцелевых модулей и кластерных систем на их основе очевидны.

### Список литературы

1. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М. : Наука, 1967. 685 с.
2. Голант В. Е. Газовый разряд на сверхвысоких частотах // УФН. 1958. Т. 65, вып. 1. С. 39–86.
3. Гуляев Ю. В., Яфаров Р. К. Микроволновое ЭЦР вакуумно-плазменное воздействие на конденсированные среды в микроэлектронике (физика процессов, оборудование, технология) // Зарубежная электронная техника. 1997. № 1. С. 77–120.
4. Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А., Зотов А. В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. М. : Наука, 2006. 490 с.
5. Алферов Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. 1998. Т. 32, № 1. С. 3–18.
6. Меден А., Шо М. Физика и применение аморфных полупроводников / пер. с англ. М. : Мир, 1991. 670 с.
7. Джоунупулос Дж., Люковски Дж. Физика гидрогенизированного аморфного кремния. М. : Мир, 1988. Вып. 1. 448 с.
8. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / отв. ред. А. Л. Лосев. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. 368 с.
9. Thundat T., Nagahara L. A., Oden P. I., Lindsay S. M., George M. A., Glaunsinger W. S. Modification of tantalum surfaces by scanning tunneling microscopy in an electrochemical cell // J. Vac. Technol. 1990. Vol. A8, № 4. P. 3537–3541.
10. Neubauer G., Cohen S. R., McClelland G. M., Home D. Force microscopy with bidirectional capacitance sensor // Rev. Sci. Instrum. 1990. Vol. 61, № 9. P. 2296–2308.
11. Huang Y., Williams C. C., Wendman M. A. Quantitative two-dimensional dopant profiling of abrupt dopant profiles by cross-sectional scanning capacitance microscopy // J. Vac. Sci. Technol. 1996. Vol. A14, № 3. P. 1168–1171.
12. Kikukawa A., Hosaka S., Honda Y., Imura R. Phase-locked noncontact scanning force microscope // Rev. Sci. Instrum. 1995. Vol. 66, № 1. P. 101–105.
13. Wiesendanger R. Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy // Appl. Surf. Sci. 1992. Vol. 54. P. 271–276.
14. Игнатъев А. С., Терентьев С. А., Яфаров Р. К. Низкоэнергетичное травление GaAs в хлорсодержащем газовом СВЧ-разряде с ЭЦР // Микроэлектроника. 1993. № 4. С. 14–21.
15. Cheng R., Lee Y., Knoedler C., Lee K., Smith T., Kern D. Sidewall damage in n-GaAs quantum wires from reactive ion etching // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 54, № 21. P. 2130–2132.
16. Ishikuro H., Fujii T., Saraya T., Hashiguchi G., Hiramoto T., Ikoma T. Coulomb blockade oscillations at room temperature in a Si quantum wire metal-oxide-semiconductor field-effect transistor fabricated by anisotropic etching on a silicon-on-insulator substrate // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 68. P. 3585–3591.
17. Алферов Ж. И., Бимберг Д., Егоров А. Ю., Жуков А. Е., Копьев П. С., Леденцов Н. Н., Рувимов С. С., Устинов В. М., Хейденрайх И. Напряженные субмонослойные гетероструктуры и гетероструктуры с квантовыми точками // УФН. 1995. Т. 165, вып. 2. С. 224–225.
18. Быков А. А., Квон З. Д., Ольшанский Е. Б., Асеев А. Л., Бакланов М. Р., Литвин Л. В., Настаушев Ю. В., Мансуров В. Г., Мигаль В. П., Мощенко С. П. Квазибаллистический квантовый интерферометр // УФН. 1995. Т. 165, вып. 2. С. 227–229.



19. Атомная структура полупроводниковых систем / отв. ред. А. Л. Асеев. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2006. 292 с.
20. *Facsko S., Dekorsy T., Koerdts C., Trappe C., Kurz H., Vogt A., Hartnagel H. L.* Formation of Ordered Nanoscale Semiconductor Dots by Ion Sputtering // *Science*. 1999. Vol. 285, № 5433. P. 1551–1553.
21. *Rusponi S., Constantini G., Buatier-de-Mongeon F., Boragno C., Valbusa U.* Patterning a surface on the nanometric scale by ion sputtering // *Appl. Phys. Lett.* 1999. Vol. 75, № 21. P. 3318–3320.
22. *Gago R., Vazquez E., Guerno R., Varela M., Ballesteros G., Albella J. M.* Production of ordered silicon nanocrystals by low-energy ion sputtering // *Appl. Phys. Lett.* 2001. Vol. 78, № 21. P. 3316–3318.
23. *Yin Y., Gates B., Xia Y.* A Soft Lithographic Approach to the Fabrication of Nanostructures of Single Crystalline Silicon with Well-Defined Dimensions and Shapes // *Adv. Mater.* 2000. Vol. 12, № 19. P. 1426–1429.
24. *Grom G. F., Lockwood D. J., McCaffrey J. P., Labbe H. J., Fauchet P. M., White B., Diener J., Kovalev D., Koch F., Tsybeskov L.* Ordering and self-organization in nanocrystalline silicon // *Nature*. 2000. Vol. 407, № 6802. P. 358–361.
25. *Герасименко Н. Н., Пархоменко Ю. Н.* Кремний – материал нанoeлектроники. М. : Техносфера, 2007. 325 с.
26. *Силин А. Р., Трухин А. Н.* Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO<sub>2</sub>. Рига : Зинатне, 1985. 244 с.
27. *Lalic N., Linnros J.* Light emitting diode structure based on Si nanocrystals formed by implantation into thermal oxide // *Luminescence*. 1999. Vol. 80, № 1–4. P. 263–267.
28. *Edelberg E., Bergh S., Naone R., Hall M., Audil E. A.* Visible luminescence from nanocrystalline silicon films produced by plasma enhanced chemical vapor deposition // *Appl. Phys. Lett.* 1996. Vol. 68, № 10. P. 1415–1417.
29. *Голубев В. Г., Медведев А. В., Певцов А. Б., Селькин А. В., Феоктистов Н. А.* Фотолюминесценция тонких пленок аморфно-нанокристаллического кремния // *ФТТ*. 1999. Т. 41, вып. 1. С. 153–158.
30. *He Y., Yin C., Cheng G., Wang L., Liu X., Hu G. Y.* The structure and properties of nanosize crystalline silicon films // *J. Appl. Phys.* 1994. Vol. 75, № 2. P. 797–803.
31. *Голубев В. Г., Медведев А. В., Певцов А. Б., Силкин А. В., Феоктистов Н. А.* Спектры рамановского рассеяния и электропроводность тонких пленок кремния со смешанным аморфно-нанокристаллическим фазовым составом : определение объемной доли нанокристаллической фазы // *ФТТ*. 1997. Т. 39, вып. 8. С. 1348–1353.
32. *Нефедов Д. В., Яфаров Р. К.* Влияние температуры на формирование кремниевых нанокристаллитов на некристаллических подложках в плазме СВЧ газового разряда низкого давления // *ПЖТФ*. 2008. Т. 34, вып. 2. С. 62–68.
33. *Усанов Д. А., Яфаров Р. К.* Методы получения и исследования самоорганизующихся наноструктур на основе кремния и углерода. Саратов : Изд-во Саратов-ун-та, 2011. 126 с.
34. *Витязь П. А.* Состояние и перспективы использования наноалмазов детонационного синтеза в Белоруссии // *ФТТ*. 2004. Т. 46, вып. 4. С. 591–595.
35. *Даниленко В. В.* Синтез и спекание алмазов взрывом. М. : Энергоатомиздат, 2003. 272 с.
36. *Алехин А. А., Суздальцев С. Ю., Яфаров Р. К.* Тонкая структура углеродных пленок, полученных в плазме микроволнового газового разряда низкого давления // *Письма в ЖТФ*. 2003. Т. 29, вып. 15. С. 73–79.
37. Алмазы в электронной технике : сб. ст. / отв. ред. В. Б. Квасков. М. : Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
38. *Зайцев Н. А., Горнев Е. С., Орлов С. Н., Красников А. Г., Свечкарев К. П., Яфаров Р. К.* Наноалмазографитовые автоэммиттеры для интегральных автоэмиссионных элементов // *Наноиндустрия*. 2011. № 5. С. 37–41.
39. *Рябов С. Н., Кутюлин С. А., Бойкин Н. И.* Физико-химические особенности процессов плазмохимического травления : обзоры по электронной технике. М. : ЦНИИ «Электроника», 1981. С. 73–79. (Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. Вып. 20 (844)).
40. *Кэрролл Д.* СВЧ-генератор на горячих электронах. М. : Мир, 1972. 382 с.
41. *Яфаров Р. К.* Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. М. : Физматлит, 2009. 216 с.
42. *Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т.* Низкотемпературная плазма с неравновесной ионизацией // *УФН*. 1979. Т. 128, вып. 2. С. 233–271.
43. *Никольский О. А., Юдин В. И.* Генерирование и усиление колебаний // *Сб. тр. Воронеж. политехн. ин-та*. 1973. № 6. С. 252–267.
44. *Никольский О. А., Юдин В. И.* Энергетический спектр электронов плазмы в электромагнитном поле // *Радиотехника и электроника*. 1977. № 2. С. 309–312.
45. *Гуляев Ю. В., Черкасов И. Д., Яфаров Р. К.* Диффузионная модель газового СВЧ-разряда в магнитном поле с распределенным вводом энергии // *Докл. АН*. 1998. Т. 358, № 3. С. 333–336.
46. Устройство для микроволновой вакуумно-плазменной с электронным циклотронным резонансом обработки конденсированных сред на ленточных носителях : пат. 2153733 Рос. Федерация. № 99110048/28 ; заявл. 07.05.1999 ; опубл. 27.07.00. Бюл. № 21. 17 с.