

ПОВЕРХНОСТНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ – ПЕРСПЕКТИВЫ СИНТЕЗА И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Ю. К. ЕЖОВСКИЙ

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

SURFACE NANOSTRUCTURES – PERSPECTIVES OF SYNTHESIS AND USAGE

Yu. K. EZHOVSKII

Surface nanostructures are objects of intense attention of scientists in the last decades due to their many unique properties. The brightest examples of such structures, modern ways of their receptions and uses are considered.

Поверхностные наноструктуры являются объектом пристального внимания ученых благодаря их уникальным свойствам. Рассмотрены наиболее яркие примеры таких структур, современные способы их получения и использования.

ВВЕДЕНИЕ

Основной тенденцией в развитии современной техники является использование функциональных объектов малых размеров. Примером может служить электронная техника, в которой микроминиатюризация приборов уже сейчас требует применения элементов, размеры которых составляют несколько микрон. Уникальность свойств таких объектов (наноструктур) во многом определяется атомными и электронными процессами, протекающими как в объеме, так и на их границах и имеющими уже квантовый характер. Понять и научиться управлять этими процессами не всегда удается в рамках традиционных представлений физики и химии, развитых для достаточно протяженных объектов. Проблема осложняется еще и тем, что наноструктуры из-за очень малых размеров являются достаточно неравновесными системами, однако протекающие в них процессы часто анализируют на основе традиционных подходов, свойственных равновесным объектам. В связи с этим в настоящее время происходят как интенсивное развитие теории явлений в малых объектах, так называемых низкоразмерных системах, так и разработка новых методов их получения, а также физических и химических методов исследования.

Поверхностные наноструктуры с их особыми свойствами играют значительную роль в таких объектах, как высокодисперсные системы – адсорбенты и катализаторы, наполнители композиционных материалов, пленочные и мембранные системы. В последние годы интерес к наноструктурам значительно возрос в связи с перспективами их широкого использования в микро-, опто- и акустоэлектронике. Выделилось новое направление электроники – наноэлектроника, использующая в работе приборов низкоразмерные структуры с квантовыми эффектами [1–3].

В низкоразмерных системах, каковыми и являются наноструктуры, количества вещества на поверхности и в объеме становятся соизмеримыми, поэтому роль

поверхности как более активной составляющей существенно возрастает.

ПОВЕРХНОСТЬ. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ОБЪЕКТОВ

Под терминами “поверхность” или “межфазная граница” обычно понимают слой вещества конечной толщины, разделяющий различные объемные фазы. Его толщина определяется теми конкретными свойствами, которые изучаются и составляет, как правило, несколько атомных слоев вещества. Несмотря на то что при анализе поверхностных явлений обычно используют модель однородной поверхности, даже в случае наиболее совершенных кристаллов поверхность оказывается сильно неоднородной по структурным, электрическим и химическим свойствам. Современные методы исследования позволили установить, что на межфазных границах даже наиболее качественных кремниевых структур помимо точечных дефектов наблюдаются структурные макродефекты в виде кластеров – небольших скоплений атомов Si и молекул SiO₂, других адсорбированных молекул, химических группировок с локальными концентрациями, значительно превосходящими средние величины по всей поверхности. Указанные неоднородности заметно влияют на электрофизические характеристики тонкопленочных структур.

При переходе к нанобъектам или системам, включающим наноструктуры в качестве составных частей, ситуация становится еще более сложной. Если все размеры системы уменьшаются, то число атомов в приповерхностном слое (так называемой S-фазе) становится соизмеримо с количеством атомов в остальном объеме (V-фазе) и известные характерные свойства V-фазы существенно изменяются. Эти изменения обычно называют размерными эффектами. Они могут иметь различную природу. Структурные эффекты проявляются в виде изменения межатомных расстояний, перестройки кристаллической структуры вплоть до перехода в аморфное состояние, при химических эффектах изменяется стехиометрический состав вещества. Наиболее ярко наблюдаются некоторые физические размерные эффекты: изменение температуры плавления, резкое изменение электрофизических свойств. В качестве примера можно привести обнаруженный в 1959 году эффект понижения температуры плавления льда в субмикронных порах SiO₂ и существование жидкой, точнее, квазизидкой подвижной пленки воды на поверхности льда при температурах значительно ниже температур плавления объемной фазы (рис. 1) [4]. Толщина незамерзающего слоя воды уменьшалась с понижением температуры, оставаясь на уровне нескольких нанометров и при очень низких температурах. Аналогичные эффекты были обнаружены для аммиака и некоторых

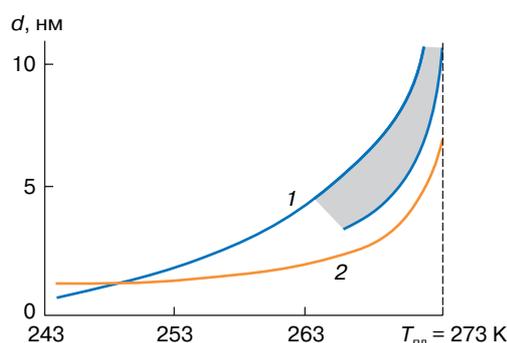


Рис. 1. Зависимость толщины незамерзающей фазы воды на поверхности льда (1) и в порах SiO₂ (2) [2]

металлов. Объясняются они нарушением или даже разрушением связей между атомами или молекулами на поверхности и их повышенной подвижностью. По сути дела, это вторичное проявление структурных эффектов, когда высокая дефектность кристаллической фазы облегчает фазовый переход кристалл–жидкость. В порах диоксида кремния поверхностная дефектность кристаллической фазы благодаря влиянию матрицы выражена меньше, что и объясняет разный ход зависимости на рис. 1 для льда и пор SiO₂.

Влияние поверхности на объем возрастает с уменьшением размеров частиц. Фольмер еще в 1939 году установил, что для малой сферической частицы с радиусом r температура плавления T_r понижается за счет создания повышенного давления пара над искривленной выпуклой поверхностью:

$$T_r = T \exp\left(\frac{2\sigma V_m}{Qr}\right),$$

где T – температура плавления “массивного” материала, σ – удельная поверхностная энергия границы раздела, V_m – молекулярный объем твердой фазы, Q – мольная теплота плавления. Такая зависимость объясняется тем, что при малом радиусе кривизны на поверхности имеется большое количество атомов с меньшим координационным числом (то есть количеством связей), чем в объеме, что повышает их подвижность вплоть до способности переходить в газовую фазу. Это облегчает разрушение кристаллической решетки и способствует плавлению материала.

Следует также отметить, что для поверхностных структур с нанометрическими размерами напряженности локальных электрических полей приближаются к внутриатомным полям ($E \sim 10^8 - 10^9$ В/см), когда начинают проявляться эффекты изменения электронно-зонной структуры и электронно-колебательных состояний. Это приводит к существенному изменению некоторых важных электрофизических свойств, например

электрической восприимчивости, механической деформации объема твердотельной матрицы — так называемый обратный пьезоэффект, обнаруженный на поверхности ZnO и CdS. В некоторых пленках, например VO₂, наблюдается даже фазовый переход полупроводник—металл. Наноструктуры обладают и другими специфическими свойствами, которые могут проявляться при их возбуждении электрическими, магнитными и радиационными полями.

В последние годы интенсивно исследуют поверхностные полупроводниковые наноструктуры, поскольку с их применением можно создавать новые электронные приборы, принципы работы которых основаны на квантовых эффектах. Наиболее интересными оказались сверхструктуры или сверхрешетки — периодические пленочные системы с толщинами слоев от 1 до 100 нм, синтезируемые на поверхности монокристаллической матрицы.

СВЕРХРЕШЕТКИ

Идея создания искусственных периодических структур или сверхрешеток с периодом в несколько нанометров зародилась при изучении резонансного туннелирования через двойные и более сложные потенциальные барьеры и при поиске новых объектов, обладающих отрицательным дифференциальным сопротивлением, то есть таких объектов, в которых на некотором участке вольт-амперной характеристики величина тока уменьшается с ростом напряжения. Они пригодны для созда-

ния генератора сверхвысокочастотных колебаний. Эта идея впервые была высказана Л.В. Келдышем еще в 1962 году.

Если характерные размеры (периоды сверхрешетки) будут достаточно малыми, меньшими, чем длина свободного пробега электронов, то при наличии почти идеальных границ вся электронная система перейдет в квантовый режим с особыми характеристиками. Для реализации требуемой искусственной периодичности были предложены два типа сверхрешеток: сверхрешетки с переменным легированием, в которых периодичность параметров создается введением небольшого количества примеси в узкие, строго ограниченные части кристаллической структуры, и сверхрешетки с переменным составом, в которых чередуются тонкие слои материалов различного состава. Последнюю называют композиционной сверхрешеткой. Схематическое изображение и зонные структуры двух этих видов показаны на рис. 2.

Сверхрешетки с переменным легированием или *ni-pi*-структуры представляют собой новый тип искусственных периодических полупроводниковых структур с управляемой концентрацией носителей и управляемой шириной запрещенной зоны. Одна из первых и типичных структур такого типа была получена из периодической последовательности тонких (5–100 нм) слоев полупроводникового материала арсенида галлия GaAs (обозначается как слой *i*), легированных Si (слой *n*-проводимости) и Be (слой *p*-проводимости), показана на рис. 2, а. Поле объемного заряда ионизированных

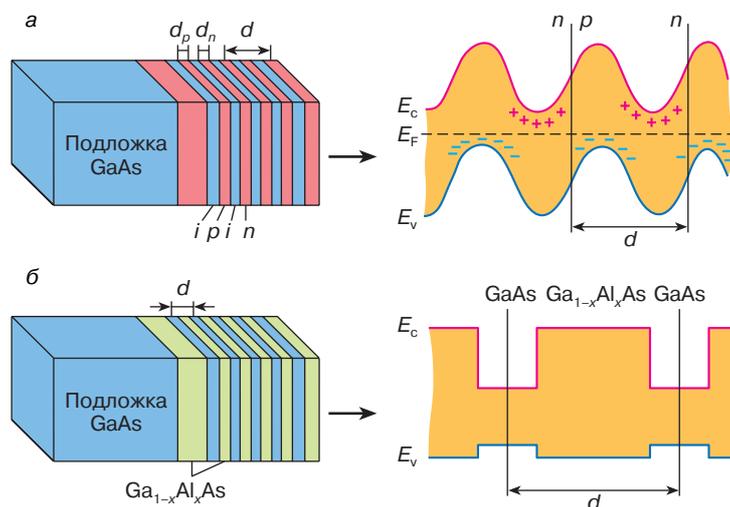


Рис. 2. Вид и пространственный ход краев энергетических зон вдоль оси роста (показана стрелкой) сверхрешеток на структуре GaAs–Ga_{1-x}Al_xAs с периодом d , имеющей толщины слоев d_i , d_n , d_p , с концентрациями носителей тока n_i , n_n , n_p соответственно: *а* – легированная сверхрешетка, *б* – композиционная сверхрешетка. E_v , E_c – энергетические уровни зон валентной и проводимости соответственно, E_F – уровень Ферми

примесей, меняющееся в направлении чередования этих слоев, создает параллельную периодическую модуляцию энергетических зон (рис. 2, а, правый), приводящую к необычным электрическим и оптическим свойствам материала. Периодический потенциал расщепляет зону проводимости и валентную зону на подзоны. Сверхрешетки *nipi* на основе GaAs имеют непрямую в реальном пространстве запрещенную зону с электронами и дырками, разнесенными на половину периода сверхрешетки. Эффективная ширина запрещенной зоны и концентрация носителей не являются фиксированными, а зависят от толщины слоев, составляющих решетку, концентрации легирующей примеси и могут быть управляемы извне внешним напряжением или оптическим возбуждением.

В композиционных сверхрешетках с контактом двух и более различных материалов за счет разницы кристаллографических параметров на границах возникает неизбежное, хотя иногда и очень малое рассогласование кристаллических решеток. Чтобы избежать дефектов и напряжений на этих границах, подбирают пары с достаточно хорошим согласованием параметров. Однако если слои являются достаточно тонкими, то различие в их постоянных решетки может компенсироваться однородными механическими напряжениями. Наиболее удачной для выращивания таких структур оказалась пара GaAs и твердый раствор $Ga_{1-x}Al_xAs$, в котором часть атомов галлия замещена атомами алюминия ($0,15 < x < 0,55$). Ширина запрещенной зоны одного и другого полупроводников имеет разную величину, и широкозонный материал ($Ga_{1-x}Al_xAs$) ограничивает движение электронов в узкозонном, создавая для них потенциальную яму (рис. 2, б, правый). Такие наноструктуры называют структурами с квантовыми ямами (см. [1], а более детально сверхрешетки и их свойства описаны в [5]).

С самого начала стало ясно, что изготовление подобных кристаллических структур из сверхтонких слоев является необычайно сложной задачей. Тем не менее эта идея вдохновила специалистов-материаловедов и привела к развитию существующих и появлению новых методов тонкопленочной технологии. Наибольший прогресс был достигнут в технологии эпитаксиальных (ориентированных) пленок нанометровых толщин. Сложность задачи заключалась в том, что существующие ранее подходы и методики выращивания пленочных структур не позволяли синтезировать сплошные ультратонкие слои, так как их формирование осуществлялось через стадию образования трехмерных, например сферических, зародышей, слияние которых и образование сплошной пленки происходили при толщинах больше требуемых. Только появление таких методов, как молекулярно-лучевая эпитаксия

(МЛЭ), химическая сборка (ХС) или атомно-слоевая эпитаксия (АСЭ), осаждение из металлоорганических соединений – так называемая МОС-гидридная технология, позволило с успехом решить эту задачу.

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ НАНОСТРУКТУР

Молекулярно-лучевая эпитаксия

Момент, когда реализация новых идей, казалось, начинает ограничиваться предельными возможностями технологии, был успешно преодолен с появлением метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), который представляет собой результат фантастического усовершенствования старого, широко применявшегося для получения металлических пленок способа – испарения вещества в вакууме. Использование чистых источников испаряемых материалов, сверхвысокий вакуум, точный контроль температуры подложки, различные методы диагностики растущей пленки в сочетании с компьютерной системой управления параметрами процесса – все это, вместе взятое, привело к созданию качественно новой технологии, способной решать задачи, ранее казавшиеся невыполнимыми.

Процесс МЛЭ – это процесс испарения и конденсации вещества в сверхвысоком вакууме ($P < 10^{-9}$ мм рт. ст.). Проводят его в специальной камере, схематическое изображение которой показано на рис. 3 [6]. Наличие вакуумного шлюза позволяет менять подложки, сохраняя высокий вакуум. Для уменьшения давления остаточных газов вся свободная площадь камеры ограждается экранами, охлаждаемыми жидким азотом. Эффузионные (эффузия – медленное истечение газа через малое отверстие) испарительные ячейки выполняются из тугоплавкого материала, например нитрида бора.

После того как камера МЛЭ откачана, экран охлажден жидким азотом, а испарители выведены на требуемую температуру, нагревается подложка. Для арсенида галлия ее температура должна составлять около 600°C , для кремния – не ниже 850°C . Процесс роста слоев начинается при открытии основной заслонки и заслонок соответствующих испарителей. Сверхвысокий вакуум и малая скорость поступления атомов на растущую поверхность (примерно 10^{14} – 10^{15} атомов в секунду) приводят к эпитаксиальному росту пленок посредством практически монослойного заполнения растущей поверхности, обеспечивая исключительно точное управление профилями химического состава и легирования. В процессе МЛЭ возможен непосредственный контроль как состава газовой фазы (масс-спектрометрия), так и параметров слоев: кристаллической структуры (методами дифракции быстрых или медленных электронов), химического состава (ожеспектроскопия),

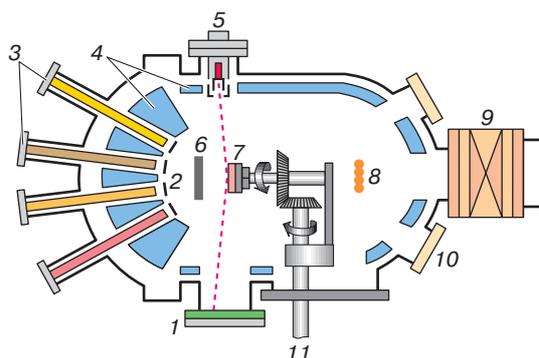


Рис. 3. Схематическое изображение ростовой камеры установки МЛЭ: 1 – флуоресцентный экран дифрактометра, 2 – заслонки эффузионных испарительных ячеек, 3 – эффузионные испарители с веществом, 4 – экраны с азотным охлаждением, 5 – электронная пушка дифрактометра, 6 – основная заслонка, 7 – вращающийся держатель подложки, 8 – ионизационный индикатор, 9 – шлюзовой клапан с вакуумным шлюзом для смены образцов, 10 – смотровое окно, 11 – ось двигателя для вращения подложки и питания нагревателя подложки. Пунктиром показан ход электронного луча дифрактометра

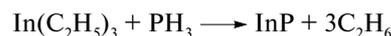
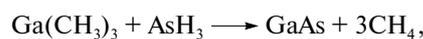
толщины (эллипсометрия), датчики которых могут быть помещены в высоковакуумную камеру установки. Использование масок в ходе роста и “рисование” молекулярными пучками позволяют создавать на поверхности подложки трехмерные, монолитно интегрированные структуры. Обладая неоспоримыми преимуществами, метод МЛЭ имеет единственный, но весьма существенный недостаток – высокую стоимость, что вызвало поиск альтернативных методов.

Газофазная эпитаксия металлоорганических соединений

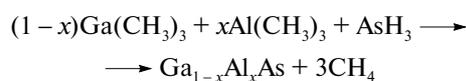
Одним из методов альтернативных МЛЭ явился метод газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) или так называемая МОС-гидридная технология (особенно ее модификация при пониженных давлениях). В этом случае исходные газообразные реагенты пиролизически (под действием высокой температуры) разлагаются у поверхности подложки, выделяя пленкообразующие компоненты, причем подложка является более нагретым телом, чем окружающая среда. При выращивании тонких слоев методом ГФЭ МОС контроль параметров пленок непосредственно в процессе синтеза неприменим, так как обычно используют достаточно агрессивные газовые среды. Процесс проводят в проточном вакуумном реакторе при давлении паров компонентов 0,1–10 мм рт. ст. Снижение давления и увеличение скорости газового потока поз-

воляют получать более однородные слои с контролем толщины до нескольких ангстрем. Исходными компонентами обычно служат метильные, этильные и изобутильные соединения металлов, а также гидриды некоторых элементов.

В качестве примера можно привести химические реакции, протекающие у поверхности при получении тонких слоев полупроводников $A^{III}B^V$:



Смешивая исходные компоненты в газовой фазе в определенных пропорциях синтезируют эпитаксиальные пленки твердых растворов:



Добавляя в газовую фазу небольшие количества легколетучей примеси получают легированные эпитаксиальные слои.

МОС-гидридная технология, успешно конкурируя с МЛЭ своей простотой и производительностью, обладает несколько худшей воспроизводимостью и дает более расплывчатые профили изменения состава и легирования. Это обусловлено использованием как сравнительно высоких температур подложки, так и длительным временем синтеза.

Химическая сборка поверхностных наноструктур

Метод химической сборки (ХС) и его разновидности – метод молекулярного наслаивания (МН) и атомно-слоевая эпитаксия (АСЭ) – явились результатом поиска принципиально новых методов синтеза ультратонких слоев. Они основаны на образовании поверхностных химических соединений при хемосорбции компонентов из газовой фазы и являются новыми так называемыми циклично-дискретными процессами. Благодаря возможности реализовать практически монослойную хемосорбцию компонентов формирование кристаллических структур происходит по слоевому механизму, то есть без образования трехмерных зародышей. Это позволяет получать сплошные пленки при толщинах в несколько монослоев вещества (менее 1 нм). Используют этот метод в основном для синтеза наноструктур бинарных соединений.

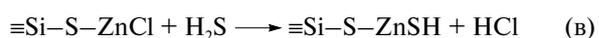
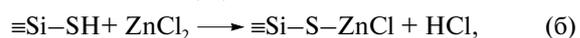
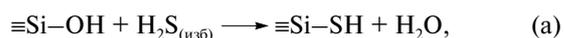
В методе МН (см. [5]) предусмотрено наличие на поверхности матрицы определенных функциональных групп, которые способны реагировать с низкомолекулярным реагентом с образованием устойчивого соединения. Последнее также должно обладать активными группами, способными к дальнейшим взаимодействиям. Таким образом, благодаря серии последовательных химических реакций осуществляется наращивание

слоев структурных единиц заданного состава. Основная особенность ХС заключается в том, что процесс формирования слоя контролируется не термодинамикой фазовых переходов, а термодинамикой макрореакентов химических реакций и проведение реакций в неравновесных условиях приводит к устойчивости синтезируемой структуры. Неравновесность процесса легко достигается значительным избытком реагента и быстротой удаления газообразных продуктов реакции. Данный метод позволяет синтезировать нано- и микроструктуры на поверхности твердых веществ путем многократного чередования химических реакций по заданной программе. Толщина образующегося слоя определяется не временем синтеза или интенсивностью потока вещества, а количеством повторяющихся реакционных циклов. Благодаря малой энергии активации поверхностных реакций ХС обычно проводят при достаточно низких температурах (25–400°C), что значительно снижает влияние диффузионных процессов и позволяет получать многослойные структуры с резкими границами. Для предотвращения физической конденсации исходных реагентов А и В температура подложки T_S должна удовлетворять соотношению $T_A, T_B < T_S < T_{AB}$, в котором T_A, T_B, T_{AB} – критические температуры конденсации компонентов А, В и соединения АВ соответственно.

Как уже отмечалось, для осуществления процесса ХС по методу МН необходимо активировать поверхность функциональными группами, компоненты которых являются составляющими синтезируемого слоя. Так, группировки –ОН используются для получения оксидных слоев, –SH–сульфидных, –NH–нитридных и т.д. Они получаютя обработкой поверхности соответствующими реагентами – парами H_2O, H_2S, NH_3 . Полупроводниковые матрицы соединений $A^{III}B^V$ предварительно обрабатывают парами галогенводорода, что позволяет удалить оксидный слой и активировать поверхность галогенидными группировками. Процесс МН проводят либо в проточном реакторе при атмосферном давлении, либо в системе с пониженным давлением.

В качестве примеров можно привести реакции для синтеза слоев.

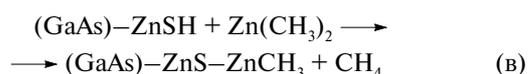
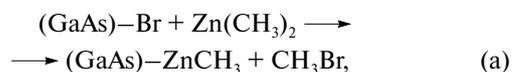
1. Синтез сульфида цинка на гидроксированном кремнии при 200°C:



Дальнейшее чередование реакций (б) и (в) с промежуточным удалением избытка реагентов и продуктов реакции приводит к росту цинксульфидного слоя. На рис.

4, а показано схематическое изображение этого процесса, протекающего на поверхности подложки.

2. Синтез сульфида цинка на бромированной поверхности арсенида галлия с использованием диметилцинка:



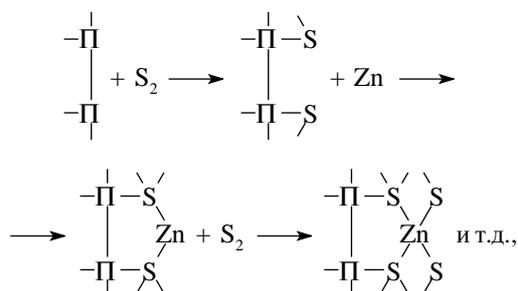
В этом случае рост слоя сульфида цинка осуществляется уже при комнатной температуре чередованием реакций (б) и (в). Аналогично (2) могут быть получены пленочные структуры GaAs попеременной обработкой поверхности твердотельной матрицы парами $Ga(CH_3)_3$ и AsH_3 .

Следует отметить, что возможности химической сборки по методу молекулярного наслаивания за счет поверхностных реакций конденсации ограничены достаточно узким кругом веществ и низкой скоростью процесса, так как лимитирующей стадией является стадия удаления продуктов реакции после каждого акта обработки.

Дальнейшим развитием этого метода явился метод атомно-слоевой эпитаксии, в котором ХС осуществляют за счет реакций присоединения на координационно ненасыщенных атомах поверхности. В этом случае синтез пленок осуществляют послойной хемосорбцией компонентов соединения из атомно-молекулярных пучков. Процесс проводят в вакууме, причем для синтеза слоев соединения АВ подложка попеременно экспонируется в молекулярных потоках компонентов А и В при испарении соответствующих элементов. Аппаратурное оформление АСЭ – упрощенный вариант МЛЭ, так как не требуется сверхвысокого вакуума. Цикличность процесса обеспечивается поочередным открытием заслонок испарительных ячеек (см. рис. 3). Толщина слоя, как и при МН, определяется только количеством циклов обработки подложки потоками компонентов и может задаваться и контролироваться с предельной точностью – до размеров одного монослоя вещества в направлении роста.

Формирование слоя сульфида цинка при попеременной обработке подложки парами серы и цинка,

представленное на рис. 4, б, можно представить в виде таких поверхностных реакций:



где Π – поверхностные атомы подложки.

Образование соединения АВ и рост пленки происходят за счет реакции между компонентами А и В в адсорбированном слое, поэтому важно, чтобы их адсорбция была мономолекулярной. Эти условия определяются температурой подложки и соответствуют так называемому окну АСЭ (рис. 5), где скорость роста соответствует одному монослою за цикл (участок АВ). Термоактивацию хемосорбции можно заменить или дополнить другим видом, например фотоактивацией, и тем самым существенно расширить область монослойного роста. Легирование слоев, как и в предыдущих случаях, осуществляют добавлением примеси в газовую фазу.

Следует отметить, что химическая сборка во всех ее видах – достаточно низкотемпературный процесс, что позволяет синтезировать наноструктуры с резкими границами по составу и легированию. Смена реагента на любой стадии процесса в любой последовательности

дает возможность без особых усилий получать многослойные композиционные наноструктуры с контролем толщины до одного монослоя вещества. Недостатками ХС в настоящее время являются ограниченный круг реакционноспособных легколетучих реагентов и сложность создания достаточно однородно активированной поверхности для реализации монослойного механизма роста структур.

Рассмотрим несколько примеров, служащих иллюстрацией того, как использование уникальных свойств наноструктур позволило создать новые типы приборов, работа которых основана на новых физических эффектах. Характеристики этих приборов намного превосходят возможности аналогов на обычных полупроводниковых структурах. Это гетеролазеры для систем оптической связи на двойной гетероструктуре с двойными барьерами на GaAs–Ga_{1-x}Al_xAs, работающие в диапазоне 0,70–0,88 и 1,78 мкм на гетероструктуре GaSb–Ga_{1-x}Al_xSb, лазеры на сверхрешетке с квантовыми ямами GaAs–Ga_{1-x}Al_xAs. В последнем случае сверхрешетка должна иметь не менее десяти периодов с толщиной слоев 10–15 нм. Инжекционные лазеры на сверхрешетках с квантовыми ямами имеют КПД до 60%, обладают низким пороговым током и узкой диаграммой направленности. Для этих же целей перспективна сверхрешетка с более сложным составом GaAs–(Ga_{1-x}Al_x)_yIn_{1-y}P.

В 1982 году был создан первый лавинный фотодиод на сверхрешетке GaAs–Ga_{1-x}Al_xAs (x = 0,55), обладающий эффектом фотоумножителя, а позднее и полевой транзистор с модулированным легированием, который

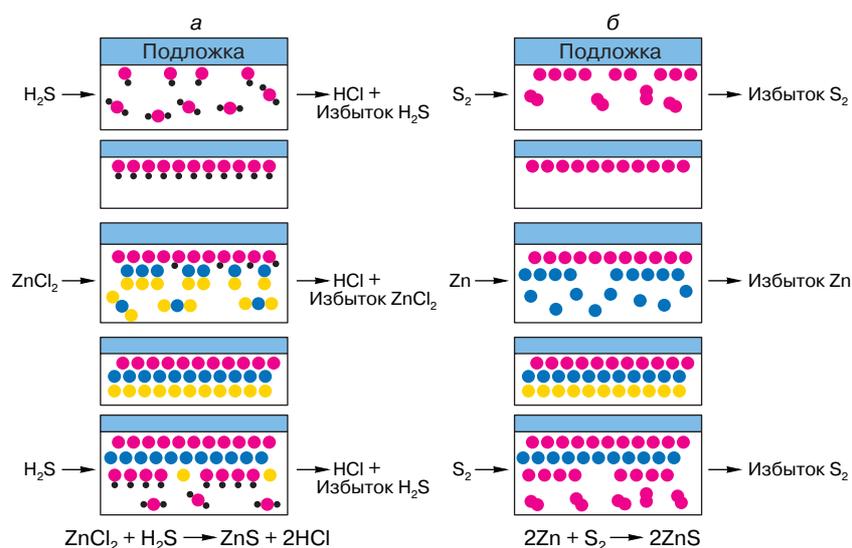


Рис. 4. Изображение процесса химической сборки по методу молекулярного наслаивания (а) и атомно-слоевой эпитаксии (б)

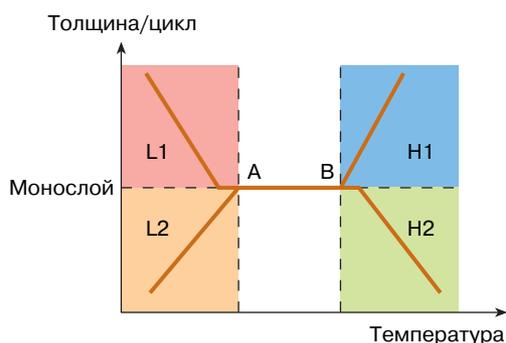


Рис. 5. Условия роста слоев в АСЭ-процессе. L1 – область полимолекулярной сорбции реагентов (температура недостаточна для десорбции физически адсорбированных компонентов); L2 – температура недостаточна для активирования поверхностной реакции хемосорбции компонентов); H1 – нежелательное разложение исходного компонента и конденсация продуктов на образовавшемся монослое; H2 – преобладание десорбции компонентов и продуктов реакции

имел время переключения всего несколько пикосекунд. Это открывает реальные возможности его использования в сверхбыстродействующих высокочастотных интегральных схемах. Более подробную информацию по вопросу использования сверхрешеток можно получить из [5].

Недавно благодаря уникальным возможностям нанотехнологии был создан микрополостный лазер. Излучающие элементы этого крохотного устройства – молекулы флуоресцентного вещества заключены в микроскопическую полость в специально выращенном кристалле – цеолите на основе фосфата алюминия. Особая форма полости (поры), обеспечивающая полное внутреннее отражение света, позволяет сфокусировать и направить испускаемый молекулами свет. Новая технология создания микроскопических лазеров может оказаться настолько эффективной, что именно на их основе будут созданы миниатюрные устройства для CD-плееров и компьютеров будущего.

В заключение следует отметить и такие традиционные области применения поверхностных наноструктур, как высокодисперсные сорбенты, катализаторы и наполнители, в которых использование химической сборки для модифицирования поверхности и выращивания поверхностных структур заданного состава и строения позволило существенно улучшить их свойства и получить новые, например высокоселективные, сорбенты, негорючие полимерные материалы. Химическая сборка является одним из основных методов бурно развивающейся нанотехнологии, в частности химической нанотехнологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демидовский В.Я. Квантовые ямы, нити и точки: Что это такое? // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 80–86.
2. Шик А.Я. Квантовые нити // Там же. С. 87–92.
3. Белявский Ц.И. Экситоны в низкоразмерных системах // Там же. С. 93–99.
4. Квливидзе В.И., Киселев В.Ф., Ушакова Л.А. // Докл. АН СССР. 1970. Т. 191. С. 1088–1092.
5. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. М.: Мир, 1989.
6. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры: Пер. с англ. / Под ред. Ж.И. Алферова, Ю.В. Шмарцева. М.: Мир, 1989. 582 с.
7. Малыгин А.А. Химическая сборка поверхности твердых тел методом молекулярного наслаивания // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 7. С. 58–64.

Рецензент статьи Б.Д. Сумм

* * *

Юрий Константинович Ежовский, кандидат химических наук, доцент кафедры химической технологии материалов и изделий электронной техники Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). Область научных интересов – физическая химия поверхности, технология тонких пленок и нанотехнология. Автор и соавтор более 90 научных статей, четырех учебных пособий и более 20 авторских свидетельств и патентов России.