

ТЕХНОЛОГИИ САМООРГАНИЗАЦИИ В НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

Стремительное развитие микроэлектронных технологий позволило ворваться в область 100 нанометровых топологических размеров, т.е. в область нанотехнологий, под которыми понимают сумму технологий и методов, основанных на манипуляциях с отдельными атомами, молекулами и биологическими объектами с целью получения новых материалов, приборов и устройств, а также формирования приборных структур с характеристическими размерами порядка 10–100 нм [1].

Изделия микроэлектроники – интегральные схемы, микропроцессоры, запоминающие устройства – основа информационной техники, бытовой электроники, медицины, автомобилестроения, авиации.

Количество транзисторов, ежегодно поставляемых на рынок, составляет 10^{19} – 10^{20} единиц, причем плотность упаковки структур на чипе такова, что на булавочной головке можно разместить 200 млн. транзисторов ($\approx 10^8$ шт.), скорость их переключения – $\approx 10^{12}$ с⁻¹, а характерный топологический размер элемента $\approx 0,1$ мкм.

В технологическом процессе на одной пластине одновременно обрабатывается до 5 тыс. чипов, каждый из которых может содержать миллионы транзисторов.

В атомной и квантовой физике единицей длины принято считать величину 10^{-10} м или 1 \AA (0,1 нм). Этот масштаб выбран потому, что он соответствует диаметру атома водорода.

В живой природе молекулы протеина и липидов имеют размеры до 10 нм. Диаметр спиральной молекулы ДНК примерно 20 нм, в то время как ее длина может достигать десятков микрон. Размеры рибосом и вирусов лежат в пределах 100 нм. Интересно отметить, что один из продуктов нанотехнологии – нанотрубки, а также элементы сверхбольших ИС имеют размеры тоже порядка 100 нм. Это обстоятельство вселяет надежду на успешное совмещение технологий живых и неживых систем, создание микроминиатюрных комбинированных устройств и высокоэффективных лекарств.

ДВЕ СТРАТЕГИИ

Логичный путь развития микроэлектроники – постоянное увеличение степени интеграции за счет уменьшения топо-

логической нормы, масштабирования параметров элементов ИС – стратегия "сверху–вниз".

За счет совершенствования технологических процессов можно уменьшать, например, длину канала МДП-транзистора, что приведет к увеличению его быстродействия, снижению величины управляющих напряжений и потребляемой мощности. Примером реализации такого подхода могут служить результаты, достигнутые фирмой Intel. Использование УФ-литографии с длиной волны источника 193 нм, 8-слойной медной металлизации и встроенного напряженного канала по технологии Si_3N_4 позволило создать ОЗУ статического типа, ячейка которого состоит из шести транзисторных структур площадью 0,57 мкм². Длина канала транзистора – 35 нм, толщина подзатворного диэлектрика (SiON) – 1,2 нм, рабочее напряжение – 1,2 В при тактовой частоте 3 ГГц. Эти данные относятся к массовому освоению технологии уровня 65 нм, на смену которой идет технология 45 нм, что, несомненно, приведет к улучшению характеристик транзисторных структур.

Интересна ситуация с линиями межсоединений, которые выполняются с теми же технологическими нормами, что и транзисторные структуры. Оценки показывают, что сопротивление токоведущей дорожки резко возрастает с уменьшением ее сечения. Есть вероятность, что сигнал может не пройти по линии межсоединения, поскольку при масштабировании электромиграция, возрастание волнового сопротивления, краевые емкости, джоулев разогрев резко ухудшают характеристики межсоединений.

Уменьшение размеров в плоскости кристалла сопровождается уменьшением глубины изделия. Это относится

ОБ АВТОРЕ

Александр Александрович Щука – доктор технических наук, профессор МИРЭА, автор 200 печатных работ, в том числе 15 монографий.

к толщине подзатворного диэлектрика, глубине залегания p - n -переходов. Уже при топологической норме 65 нм толщина слоя оксида должна быть порядка 1 нм (несколько атомных слоев), что позволяет происходить процессам туннелирования через диэлектрик. С этой целью применяют диэлектрики с высоким значением диэлектрической постоянной, например, HfO_2 ($\epsilon = 25$).

Правила масштабирования предусматривают увеличение уровня легирования канала, что позволяет не только увеличить число носителей, но и снизить их подвижность и избежать смыкания областей пространственного заряда истока и стока.

Определенная проблема также – выравнивание характеристик транзисторов p - и n -типов. При длинах канала порядка 10 нм электрон преодолевает его как волна – “баллистический режим движения”.

Стратегия “снизу–вверх” предполагает синтез структур из отдельных атомов.

На начальной стадии развития туннельной микроскопии был продемонстрирован массоперенос на уровне отдельных атомов и сборка из них структур. В настоящее время создан нанотехнологический комплекс (НТК) с кластерной компоновкой – НаноФаб 100, позволяющий организовать мелкосерийное производство полнофункциональных наноструктур, наноустройств и наносистем. Координатно-связанная система позиционирования подложек в состоянии обеспечить создание сложных многокомпонентных 3D-наноустройств путем проведения в различных модулях последовательных операций с нанометровым разрешением [2].

Однако сформировать транзисторную структуру в классическом понимании в соответствии со стратегией “снизу–вверх” не только не удалось, но и вряд ли целесообразно, прежде всего по экономическим соображениям.

В нанотехнологическом комплексе каждая транзисторная структура должна производиться по индивидуальному технологическому маршруту. К тому же еще не разработана технология компоновки интегральной схемы из таких нанотранзисторных структур, не решена проблема межсоединений.

САМООРГАНИЗАЦИЯ В ПРИРОДЕ

В нанотехнологиях и, в частности, в наноэлектронике, очень актуален вопрос о поиске в природе или разработке эффективного процесса создания заданных наноструктур. Таким процессом может быть самоорганизация структур – спонтан-

ный переход от беспорядочного движения, хаотического состояния к новому порядку через нарастание флуктуаций.

Лауреат Нобелевской премии по химии И.Р.Пригожин, анализируя открытые системы, выдвинул принцип, согласно которому неравновесность может служить источником упорядоченности [3].

Для описания неравновесных систем он предложил ввести понятие локального термодинамического равновесия, когда процессы, возмущающие равновесие в малом объеме, менее интенсивны, чем процессы, его формирующие.

Малые отклонения системы от термодинамического равновесия описывают феноменологические уравнения. Возникающие потоки линейно зависят от термодинамических сил:

$$J_i = \sum_{k=1}^n L_{ik} X_k \quad (1)$$

где L_{ik} – коэффициенты переноса, X_k – термодинамическая сила, вызывающая поток J_k . Например, градиент температуры вызывает поток тепла (теплопроводность), градиент концентрации – поток вещества, градиент скорости – поток импульса, электрическое поле – электрический ток.

Уравнение (1) называют также термодинамическим уравнением движения. Гипотеза о линейной связи потоков и термодинамических сил лежит в основе термодинамики необратимых процессов.

Термодинамическая сила может вызывать ток J_{ik} , где $i \neq k$. Например, градиент температуры может вызвать поток вещества в многокомпонентных системах. Такие процессы называются перекрестными и характеризуются коэффициентом L_{ik} при $i \neq k$. В этом случае производство энтропии имеет вид:

$$\sigma = \sum_{i,k} X_k L_{ik} X_k \geq 0. \quad (2)$$

В соответствии с теоремой Пригожина в стационарном состоянии при заданных внешних условиях, препятствующих достижению равновесия, величина σ минимальна.

При термодинамическом равновесии $\sigma = 0$. Для объяснения многочисленных неравновесных явлений (термодинамических, гальваномагнитных, термогальваномагнитных) используются соотношения термодинамики неравновесных процессов.

Например, в области линейности необратимых процессов матрица феноменологических коэффициентов симметрична:

$$L_{ik} = L_{ki}. \quad (3)$$

Это соотношение взаимности (симметрии) Онсагера*. Другими словами, возрастание потока J_k , вызванное увеличением на единицу силы X_i , равно возрастанию потока J_i , обусловленному увеличением на единицу силы X_k .

Соотношение взаимности сыграло громадную роль в становлении термодинамики необратимых процессов, самое су-

*Ларс Онсагер – лауреат Нобелевской премии по химии.

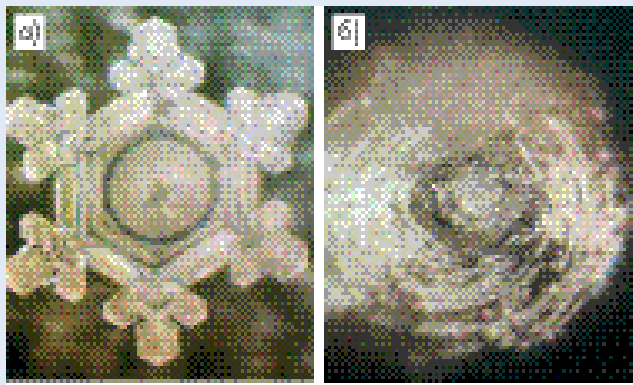


Рис. 1 Формы кристаллов льда в разных условиях

щественное в которой – их общее свойство самоорганизации в открытых системах.

Как ни парадоксально, источником такой упорядоченности служит сама неравновесность системы, и формирование самоорганизующихся структур происходит вдали от состояния равновесия.

В природе в качестве примеров самоорганизующихся систем можно привести выверенное строительство шестиугольных сот у пчел, индивидуальный и неповторимый рисунок кожи на пальцах человека, типы снежинок и льдинок.

Могут существовать временные структуры, зависящие от внешних условий. В качестве примера на рис.1 приведены фотографии кристаллов замороженной воды с надписями "спасибо" (а) и "ты дурак" (б) [4].

Классическим структурированием в условиях притока энергии может служить возникновение в жидкости ячеек Бенара при определенном градиенте температуры [1] – в жидкости появляются конвекционные потоки, обладающие характерной структурой в виде шестиугольных ячеек призмы. В центральной области призмы жидкость поднимается вверх, а вблизи вертикальных граней опускается вниз (рис.2).

В поверхностном слое жидкость растекается от центра к краям, а в придонном – от границ к центру. Конвективные ячейки являются высокорезализованной структурой, в которой происходит отдача энтропии. Формирование структур Бенара объясняется тем, что при малых градиентах температуры появляется конвективный поток. В результате увеличивается способность слоя жидкости передавать тепло. Появляются флуктуации конвективного движения, которые усиливаются и достигают макроскопических масштабов.

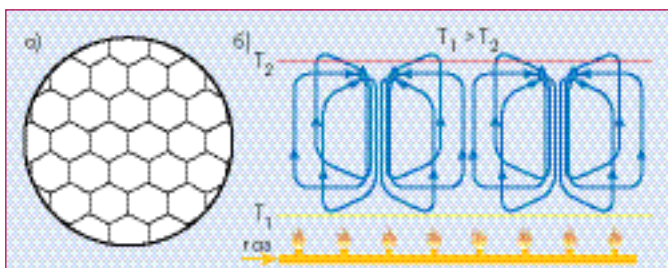


Рис.2 Ячейки Бенара: а – общий вид структуры; б – схема потоков в отдельных ячейках

В возникающей устойчивой структуре Бенара обеспечивается максимальная скорость теплового потока. В открытой системе возникает новый молекулярный порядок, стабилизируемый за счет обмена энергией с внешней средой. При этом второе начало термодинамики не нарушается. Стационарная неравновесная система, имеющая диссипативную структуру, потребляет отрицательную энтропию.

Возникновение таких структур носит пороговый характер. Структура возникает из флуктуаций, и ее пороговый характер самоорганизации связан с переходом одного устойчивого состояния в другое.

К тому же потоки энергии и вещества создают в открытых системах флуктуационный и структурный порядок. Возникновение диссипативных структур носит пороговый характер. Новая структура является результатом неустойчивости и возникает из флуктуаций, причем в докритическом режиме флуктуации обычно затухают. При преодолении порога и выходе на сверхкритический режим флуктуации усиливаются, достигают макроскопического уровня и формируют новый устойчивый режим. Таким образом, пороговый характер самоорганизации связан с переходом одного устойчивого стационарного состояния в другое, а самоорганизация в системе связана с формированием структуры более сложной, чем первоначальная.

К процессам самоорганизации можно отнести формирование когерентного лазерного пучка. В процессе "накачки" активного рабочего вещества сначала происходит некогерентное излучение возбужденными атомами квантов света. Когда амплитуда сигнала превышает определенный порог, атомы начинают осциллировать когерентно. Возникает когерентное электромагнитное поле, формирующее лазерный луч с определенной временной и пространственной когерентностью, т.е. на смену хаотическому спонтанному излучению приходит организованное индуцированное излучение.

В последние годы исследовательский бум вызвало открытие фуллеренов и углеродных нанотрубок (УНТ). Поверхность фуллеренов имеет замкнутую сферическую форму, структура которой состоит из 20 правильных шестиугольников и 12 правильных пятиугольников.

УНТ по своей структуре можно рассматривать как определенным образом свернутые в трубки графеновые слои. Графен представляет собой атомарный слой графита – одну молекулу в виде пленки. УНТ заканчиваются полусферической головкой, образованной как бы половинкой фуллерена с участием пятичленных углеродных циклов. УНТ могут быть одностенными и многостенными, если они образованы несколькими графеновыми слоями (рис.3) [5].

Если фуллерены представляют собой молекулярную форму углерода, то УНТ сочетают в себе свойства нанокластеров и твердого тела.

УНТ образуются в результате физико-химических превращений углерода при высоких температурах. Известно не-

сколько способов их получения: электродуговое распыление графита, его абляция с помощью лазерного или солнечного облучения, каталитическое разложение углеводородов.

Механизм образования фуллеренов и УНТ остается дискуссионным. В частности, неясно, каким образом из хаотического состояния углерода образуются высокоупорядоченные наноструктуры. Видимо, в основе процессов лежит самоорганизация структур, однако неясна последовательность реакций. Как следствие, приходится оперировать понятиями типа "сворачивание гофреновой пленки". Как полагает ряд исследователей, с решением проблемы образования УНТ будет создан технологический процесс самоорганизации таких структур. Заметим, что в минерале шунгит обнаружены УНТ и фуллерены, сформированные естественным путем.

ХИМИЧЕСКАЯ САМОСБОРКА

В качестве примера самоорганизации можно рассматривать метод химической самосборки поверхностных наноструктур.

Разновидность химической сборки – метод молекулярного наслаивания, основанный на процессах образования поверхностных химических соединений при хемсорбции компонентов из газовой фазы. Идея метода состоит в последовательном наращивании монослоев заданного химического состава

с одновременным построением на поверхности устойчивых соединений твердофазной матрицы.

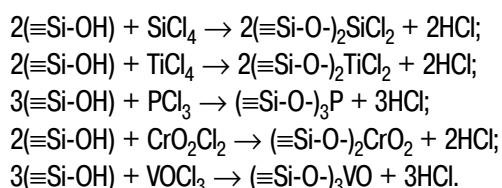
Процесс реализуется в условиях максимального удаления от термодинамического равновесия за счет химических реакций между функциональными группами твердого тела и подводящими к ним реагентами [6].

Схема процесса представлена на рис.4. Поатомная сборка поверхностных нано- и микроструктур путем многократного чередования химических реакций по заданной программе представлена на рис.4а,б.

Методом молекулярного наслаивания можно синтезировать на поверхности твердофазной матрицы наноструктуры различного химического состава, в том числе многокомпонентные нанослои (рис.4в). Главное требование при проведении воспроизводимого синтеза – обеспечение различных стадий взаимодействия реагентов (AC_4 , AB_4 , NB_4 , NC_4 , MC_4) с функциональными группами.

Толщина нанослоя определяется числом циклов молекулярного наслаивания и позволяет формировать их на поверхности подложки с точностью до одного слоя.

Например, при формировании монослоя элементосхлоридных групп на поверхности SiO_2 происходят многократно чередующиеся химические реакции:



Одновременно возможен процесс легирования, для чего в газовую фазу необходимо добавить соответствующие примеси. Химическая сборка – низкотемпературный процесс. Именно это позволяет оперативно реагировать на синтез наноструктур с резкими границами по составу и легированию, что обеспечивает создание гетеролазеров, лазеров на сверхрешетках, инжекционных лазеров с квантовыми ямами, лазерных диодов на сверхрешетках.

Возможности химической сборки по методу молекулярного наслаивания за счет поверхностных реакций ограничены невысокой скоростью процесса, а также небольшим числом пригодных для этого веществ.

Сочетание нанотехнологии молекулярного наслаивания с методами получения твердофазных материалов позволит повысить эффективность процесса, а также расширить набор объектов.

Отметим, что в процессе развития рассматриваемый метод трансформировался в метод атомно-силовой эпитаксии.

САМООРГАНИЗАЦИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР

При создании упорядоченных наноструктур одним из методов является образование гетероэпитаксией полупроводниковых

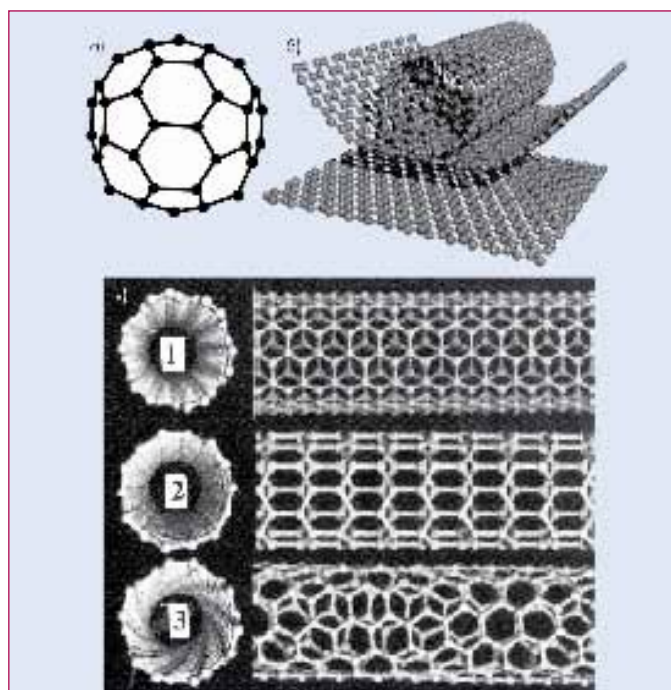


Рис.3 Структуры: молекулы фуллерена C^{60} (а), графеновой сетки в процессе ее свертывания в нанотрубку (б), УНТ (в): 1 – нехиральная структура нанотрубки типа "зигзаг"; 2 – типа "кресло"; 3 – хиральная структура нанотрубки (хиральность – свойство объекта быть несовместимым со своим изображением в идеальном плоском зеркале)

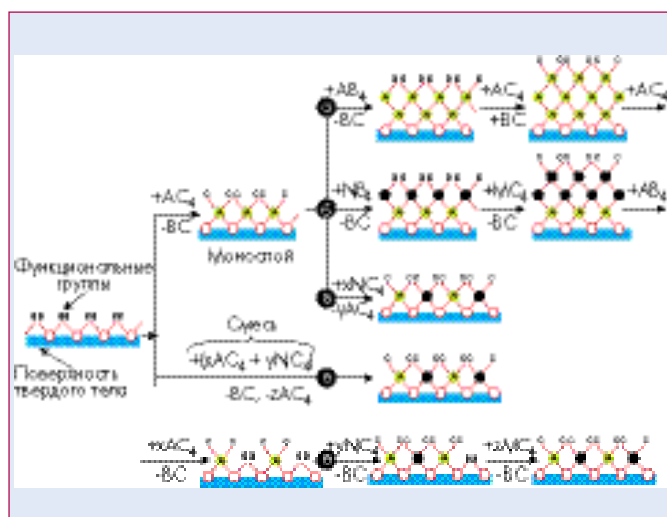


Рис.4 Процесс молекулярного наслаивания

островков. Метод заключается в осаждении материала, образующего островки на подложке, состоящей из другого материала с близкими структурой и параметрами решетки.

Гетероэпитаксия широко используется при исследованиях и промышленном изготовлении многих полупроводниковых устройств и превратилась, по существу, в хорошо развитую технологию. Она включает в себя доставку атомов или молекул к поверхности подложки, где они могут принимать участие в одном из трех процессов:

- адсорбции и диффузии по поверхности с образованием зародыша островка соединением с другими "адаатомами",
- присоединении к существующему островку,
- десорбции с испарением в окружающее пространство.

Островки могут расти, мигрировать или испаряться. Существует критический размер, при котором они становятся устойчивыми и больше не подвергаются испарению. Таким образом, существует начальная стадия формирования островков, когда их число с добавлением новых порций материала увеличивается. За ней следует стадия, когда количество островков стабилизируется, а существующие островки растут в размере. Наконец, на третьей стадии происходит объединение существующих островков друг с другом с образованием больших кластеров [7,8].

Различные стадии могут быть описаны в терминах скорости изменения:

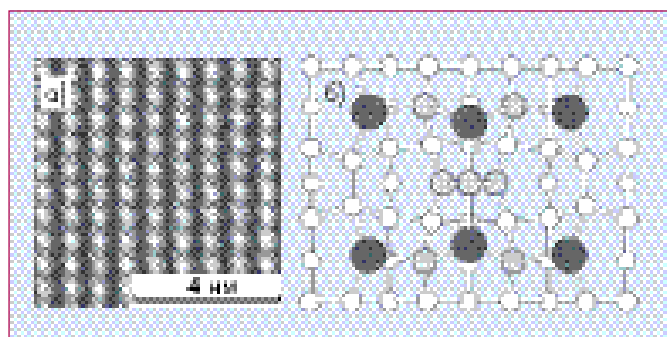


Рис.5 Массив кластеров в системе $\text{In/Si}(100)$: а – СТМ-изображение; б – схема атомного строения кластера

$dn_i/dt = (R_{ads} + R_{det} + 2R_l) - (R_{evap} + R_{cap} + 2R'_l)$, (4)
 где R_{ads} – скорость адсорбции, R_{det} – скорость отделения атомов от кластеров больших, чем пары, R_l – скорость разрыва пар адатомов.

Отрицательные члены соответствуют скорости испарения R_{evap} , скорости захвата индивидуальных адатомов кластерами R_{cap} и скорости образования пар адсорбтоатомов $2R'_l$. Коэффициент 2 перед R_l и R'_l обусловлен участием двух атомов в каждом процессе пары. Аналогичные выражения могут быть представлены для скорости изменения числа пар dn_2/dt . Некоторые из членов для различных скоростей R_i зависят от количества вещества на поверхности, поэтому уравнение (4) применимо, главным образом, для стадии нуклеации.

На второй стадии (агрегации) процент изолированных "адатомов" становится незначительным, и рассмотрение в терминах свободной энергии может обеспечить некоторое понимание процесса формирования островка. Рассмотрим плотности свободной энергии: Гиббса $g_{sur-vac}$, $g_{sur-lay}$ – между поверхностью и слоями адатомов; $g_{lay-vac}$ – между этими слоями и вакуумом. Они связаны с полной плотностью свободной энергии Гиббса соотношением:

$$g = g_{sur-vac}(1-\varepsilon) + (g_{sur-lay} + g_{lay-vac})\varepsilon, \quad (5)$$

где ε – доля закрытой поверхности. При формировании и росте островков относительные вклады этих членов постепенно изменяются. Процесс развивается таким образом, чтобы обеспечить минимизацию свободной энергии. Этот подход может использоваться для определения давления, которое возникает вследствие различия между свободной энергией открытой поверхности $g_{sur-vac}$ и слоев ($g_{sur-lay} + g_{lay-vac}$) и является движущей силой процесса, контролирующего потока адатомов на поверхности:

$$P_s = g_{sur-vac} - (g_{sur-lay} + g_{lay-vac}). \quad (6)$$

При выполнении условия $g_{sur-vac} > (g_{sur-lay} + g_{lay-vac})$ добавление "адатомов" увеличивает ε и, следовательно, вызывает уменьшение свободной энергии. Адсорбирующиеся "адатомы" имеют тенденцию оставаться непосредственно на открытой поверхности, что приводит к горизонтальному росту островков и возможному образованию монослоя. Рассеивающее давление P_s положительно и вносит вклад в распространение адатомов по поверхности (режим Франка-Ван дер Мерва).

При выполнении противоположного условия:

$$g_{sur-vac} < (g_{sur-lay} + g_{lay-vac})$$

рост доли покрытия поверхности ε увеличивает свободную энергию, так что адсорбируемому слою быть тонким и плос-



ким становится термодинамически невыгодно. Вновь добавляемые атомы поддерживают свободную энергию на низком уровне путем присоединения к вершинам существующих островков, что приводит к их вертикальному, а не горизонтальному росту (режим Фольмера-Вебера).

Выше упоминалось, что гетероэпитаксия используется для выращивания островков и пленок, атомарная структура которых близка к структуре подложки. Доля f несоответствия между кристаллическими решетками островков и субстрата задается выражением $f = |a_f - a_s| / a_s$, где a_f – постоянная решетки островка или пленки, a_s – постоянная решетки подложки. Для маленьких несоответствий ($f < 2\%$) при росте пленки, состоящей из многих последовательных слоев друг на друге, возникающая деформация невелика.

Если $f > 3\%$, то первый слой заметно деформирован, и при добавлении следующих слоев деформация растет. В конечном счете, вне переходной области деформация спадает, и толстые пленки оказываются деформированными только в пограничной области вблизи подложки. Это несоответствие благоприятствует росту трехмерных островков, что отчасти компенсирует напряжения и способствует понижению свободной энергии (режим роста Странски-Крастанова).

В этом режиме сначала образуется монослой, способствующий понижению внутренних напряжений, а затем на нем формируются трехмерные островки. Другая возможность – образование монослойных островков оптимального размера, обеспечивающих лучшую релаксацию напряжений, возникающих из-за несоответствия решеток. Затем может последовать добавление к этим островкам следующих слоев. Типичный размер такого монослойного островка может быть 5 нм, что составляет 12 элементарных ячеек.

Для корректного описания ситуации необходимо учитывать внутренние напряжения в островках и подложке, поверхностную энергию боковых граней островков и др. Гетероэпитаксиальный рост при постепенно увеличивающемся от нуля до нескольких атомных слоев количестве вещества, осаждающемся на поверхности, хорошо исследован экспериментально.

В системе Ge-Si/Si(100) методом молекулярно-лучевой эпитаксии, были выращены самоорганизующиеся квантовые кольца. Внешний диаметр колец составлял примерно 300 нм, высота – до 4 нм. Помимо колец на поверхности структуры содержались квантовые точки.

Самосборка наноструктур из атомов адсорбатов на поверхности полупроводниковых кристаллов может служить примером самоорганизации в нанотехнологии. В этом случае используется метод молекулярно-лучевой эпитаксии, который позволяет формировать наноструктуры на атомарно-чистых поверхностях в условиях глубокого вакуума ($\sim 10^{-10}$ Тор). Контроль роста осуществляется с помощью сканирующей туннельной микроскопии и туннельной спектроскопии, позволяющей зондировать электронные свойства нанообъектов.

Этим методом удалось формировать самоорганизующиеся нанопленки с толщиной атомного масштаба. Поверхностные фазы могут обладать как металлическими, так и полупроводниковыми свойствами.

Ряд поверхностных фаз в системе кремний–металл имеет сильно выраженную анизотропию электронных свойств. Эти фазы могут содержать линейные цепочки атомов металла. Так, фаза Si(111)4×1 In может рассматриваться как упорядоченный массив квазиодномерных проводников. Таким образом, возникает возможность с помощью процессов самоорганизации на поверхности формировать отдельные нанопроволоки заданной формы.

Массив наноточек на поверхности можно создать с помощью процесса самосборки. В результате островкового роста формируются атомные кластеры, каждый из которых содержит несколько атомов. Типичное значение концентрации островков варьируется в диапазоне 10^{10} – 10^{13} см⁻². Процессы зародышеобразования и роста островков имеют стохастическую природу, поэтому островки располагаются случайным образом. Свойства кластеров сильно зависят от размеров, и для практических применений важно создавать кластеры с идентичными размерами и структурой, с высокой пространственной однородностью. На рис.5 показан упорядоченный массив самоорганизованных кластеров в системе In/Si(100).

Атомное строение кластера Si₇In₆ представлено на рис.5б. Нанокластеры имеют пирамидальную форму и состоят из семи атомов кремния (малые серые кружочки) и шести атомов индия (большие черные кружочки). Такой кластер Si₇In₆ обнаруживает свойства полупроводника с шириной запрещенной зоны около 1,0 эВ. Кластер может быть легирован, например, атомами Pb. В этом случае формируются симметричные модифицированные кластеры Si₆In₆Pb, также обладающие полупроводниковыми свойствами, но ширина запрещенной зоны увеличивается до 1,2–1,3 эВ.

Модифицированный кластер Si₆In₈ может быть использован в качестве элемента наноэлектронных схем, в частности, атомного ключа, элемента памяти, логического вентиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Щука А.А.** Наноэлектроника. – М.: Физматкнига, 2007.
2. www.ntmdt.ru.
3. **Николис Г., Пригожин И.** Самоорганизация в неравновесных системах. / Под ред. д.х.н. Ю.А.Чизмадзе. – М.: Мир, 1979.
4. **Масару Эмото.** Энергия воды для самопознания и исцеления. – М.: ООО «Издательский дом «София», 2006.
5. **Елецкий А.В.** Перспективы применения углеродных нанотрубок. – Российские нанотехнологии, 2007, т.2, № 5–6.
6. **Малыгин А.А.** Нанотехнология молекулярного наслаивания. – Российские нанотехнологии, 2007, т.2, № 3–4.
7. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике. Отв. редактор А.Л. Асеев. – Новосибирск, изд-е СО РАН, 2004.
8. **Суздаев И.П.** Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: КомКнига, 2006.