

## PHYSICAL PRINCIPLES OF SEMICONDUCTOR NANOTECHNOLOGY

V. I. BELYAVSKII

*Two main methods of semiconductor heterostructure creating are briefly discussed, namely, molecular beam epitaxy and metalorganic vapor phase epitaxy. A general physical idea is given which determines a heterostructure growth process and interface quality.*

**Кратко рассмотрены два основных способа получения полупроводниковых гетероструктур: метод молекулярно-лучевой эпитаксии и метод осаждения пленок из металлоорганических соединений. Изложены общие представления о физических явлениях, определяющих процесс роста гетероструктуры и качество гетерограниц.**

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ НАНОТЕХНОЛОГИИ

В. И. БЕЛЯВСКИЙ

Воронежский государственный педагогический университет

### ВВЕДЕНИЕ

Характерные линейные размеры функциональных элементов современной микроэлектроники обычно составляют единицы или десятки микрометров. Уже первые попытки исследования и практического использования структур с размерами менее 100 нм показали, что поведение таких наноструктур качественно отличается от поведения тел с большими размерами. Малость линейных размеров (хотя бы в одном измерении) кардинально меняет характер квантовых состояний электронов, ярко проявляя свойства, присущие системам пониженной размерности.

Снижение линейных размеров элементов схем до нескольких единиц или десятков нанометров приводит к тому, что технология соответствующих полупроводниковых структур фактически становится искусством. Нанометровая шкала приводит к необходимости создания таких неоднородных структур, в которых граница раздела между двумя однородными составляющими имеет атомный масштаб. В настоящее время имеется достаточно развитая технология, основанная на эпитаксиальном росте полупроводниковых соединений на монокристаллических подложках и позволяющая получать многочисленные полупроводниковые гетерокомпозиции, так называемые гетероструктуры (ГС). Эпитаксиальный рост на ориентированной атомно-гладкой поверхности монокристалла предполагает послойное наращивание полупроводникового соединения, как совпадающего с материалом подложки, так и, что наиболее важно, существенно отличающегося своими свойствами.

Имеется чрезвычайно много вариантов (гетеропар), с помощью которых можно создать ГС. Однако, чтобы такая ГС нашла применение в микроэлектронике, она должна удовлетворять нескольким весьма жестким требованиям, из которых, пожалуй, главным является требование высокой степени совершенства гетерограницы (поверхности раздела между двумя однородными составляющими ГС). При выполнении этого условия плоские (планарные) ГС, полученные чередованием слоев нанометровой толщины из полупроводниковых соединений разного химического состава, могут рассматриваться как новые, не существующие в природе полупроводники с весьма необычными свойствами. Планарные

ГС являются основой для создания еще более экзотических объектов, имеющих нанометровые размеры не в одном, а в двух или даже трех измерениях. Такие объекты, созданные руками человека, слишком малы, чтобы их можно было рассматривать как макроскопические твердые тела, и в то же время все же столь велики, что своими свойствами и поведением существенно отличаются от атомов и молекул.

Когда характерные размеры системы оказываются сравнимыми с масштабом когерентности электронной волновой функции, проявляется квантовый размерный эффект: свойства системы становятся зависимыми от ее формы и размеров. Способность современной полупроводниковой технологии производить структуры, в которых реализуется квантовый размерный эффект, делает реальным исследование поведения подобных систем пониженной размерности (с почти двумерным, одномерным и даже нульмерным характером электронных состояний) и открывает широкие перспективы их использования в электронике и оптоэлектронике. При этом существенному изменению подвергается сама идеология электронной техники, выдвигая на первый план свойства отдельных квантовых состояний, а не потоков огромного числа электронов. Поэтому создание, исследование и применение структур с линейными размерами меньше чем  $\sim 100$  нм теперь рассматриваются как особое направление в физике, технологии и электронной технике — нанoeлектроника.

## МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВАЯ ЭПИТАКСИЯ

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (molecular-beam epitaxy, MBE) предназначен для выращивания кристаллических структур в сверхвысоком вакууме с помощью пучков атомов или молекул, являющихся компонентами растущего соединения. Таким образом, MBE представляет собой усовершенствование обычного способа напыления металлических пленок испарением в вакууме. Принципы технологии MBE формулировались постепенно. В 1964 году (R.V. Schoolar, J.N. Zemel) с помощью молекулярных пучков были получены совершенные эпитаксиальные пленки PbS на монокристаллической подложке NaCl. В 1968 году (J.E. Davey, T. Pankey, J.R. Arthur) в условиях высокого вакуума были выращены эпитаксиальные пленки GaAs на монокристаллических подложках арсенида галлия. Эти исследования стали основой дальнейшего прогресса по выращиванию совершенных пленок GaAs и других полупроводниковых соединений  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$  методом MBE. Новый этап в развитии и совершенствовании MBE начался в 70-е годы и связан с созданием и промышленным производством соответствующего вакуумного оборудования.

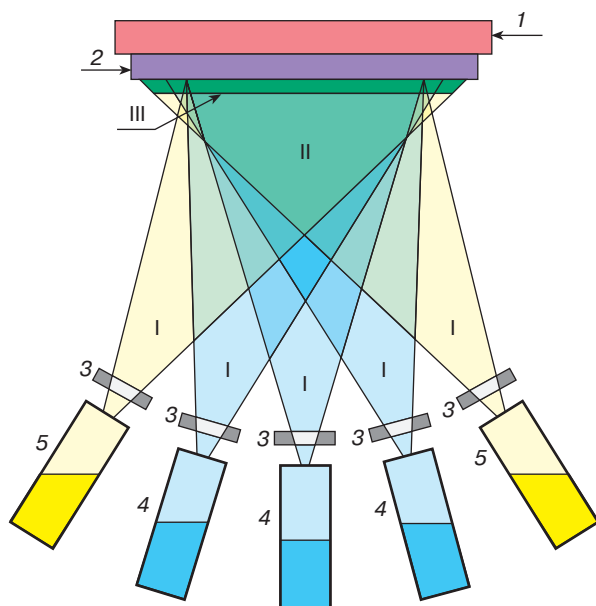
Атомные или молекулярные пучки создаются в эффузионных (эффузия — медленное истечение газов через малые отверстия, исследованное в 1911 году датским физиком М. Кнудсенем) ячейках при до-

статочно высокой температуре и направляются к нагретой до необходимой температуры монокристаллической подложке. Атомы в пучках движутся по инерции в сверхвысоком вакууме, не испытывая столкновений друг с другом или какими-либо иными атомами. Такой баллистический характер транспорта компонентов полупроводникового соединения обеспечивает создание однородных метастабильных твердых растворов даже в таких системах, которые в условиях, близких к термодинамическому равновесию (именно такая ситуация имеет место при традиционных способах выращивания кристаллов), имеют область несмешиваемости. MBE обеспечивает эпитаксиальный рост тонких пленок полупроводниковых соединений за счет реакций между компонентами атомных или молекулярных пучков с поверхностью подложки. Скорость осаждения вещества на подложку по порядку величины обычно составляет один моноатомный слой в секунду. Получение качественных структур возможно при использовании высококачественных источников напыляемых компонентов и при условии точного контроля температур подложки и источников, что может быть реализовано лишь при компьютерном управлении параметрами процесса роста.

Принципиальные элементы установки для выращивания полупроводниковых структур методом MBE, размещаемые в вакуумной камере, показаны на рис. 1. Римскими цифрами обозначены области (зоны), определяющие основные особенности MBE: I — зона генерации молекулярных пучков эффузионными ячейками Кнудсена с механическими заслонками; II — зона смешивания (пересечения) пучков элементов, испаряемых из разных эффузионных ячеек; III — зона кристаллизации на подложке (зона роста).

Зону роста можно условно разделить на три части, первая из которых представляет собой кристаллическую подложку или очередной выросший моноатомный слой, вторая — газовую смесь компонентов ГС в приповерхностной области, а третья является переходным слоем, геометрия которого и протекающие в нем процессы сильно зависят от выбора условий роста. Следовательно, если необходимо вырастить ГС методом MBE, нужно иметь возможность надлежащим образом регулировать структуру и состав переходного слоя. Для выращивания кристаллографически совершенных структур следует так подбирать режим роста, чтобы переходной слой был максимально тонким, то есть моноатомным. Это условие может быть выполнено, если поток атомов, падающих на подложку, близок к потоку атомов, испаряющихся с подложки. В этом режиме рост структуры осуществляется путем образования и дальнейшего роста двумерных зародышей на атомно-плоской поверхности.

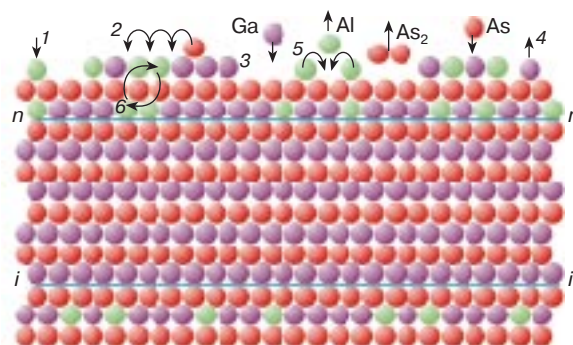
Эпитаксиальный рост по методу MBE включает в себя элементарные процессы (рис. 2):



**Рис. 1.** Схема установки МВЕ для получения легированных тройных соединений. Вся установка размещается в камере сверхвысокого вакуума: 1 – блок нагрева, 2 – подложка, 3 – заслонка отдельной ячейки, 4 – эффузионные ячейки основных компонентов ГС, 5 – эффузионные ячейки легирующих примесей

- 1) адсорбция (прилипание) падающих на подложку атомов или молекул, составляющих выращиваемое соединение;
- 2) миграция (поверхностная диффузия) адсорбированных атомов по поверхности подложки (может предваряться диссоциацией молекул выращиваемого соединения);
- 3) встраивание атомов, составляющих ГС, в кристаллическую решетку подложки или растущий монокристаллический слой;
- 4) термическая десорбция атомов, не встроившихся в кристаллическую решетку;
- 5) образование и дальнейший рост двумерных зародышей кристалла на подложке или на поверхности растущего слоя;
- 6) взаимная диффузия атомов, встроившихся в кристаллическую решетку.

Ионно-ковалентный характер и значительная величина энергии химических связей в полупроводниковых соединениях  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$  приводят к тому, что в результате адсорбции и миграции по поверхности атомы катионов  $A$  и анионов  $B$  замещают вполне определенные положения в кристаллической решетке, то есть за время роста одного монокристаллического слоя (обычно за это время (~1 с) атом совершает несколько тысяч диффузионных прыжков, пока он не займет свое окончательное место в ре-

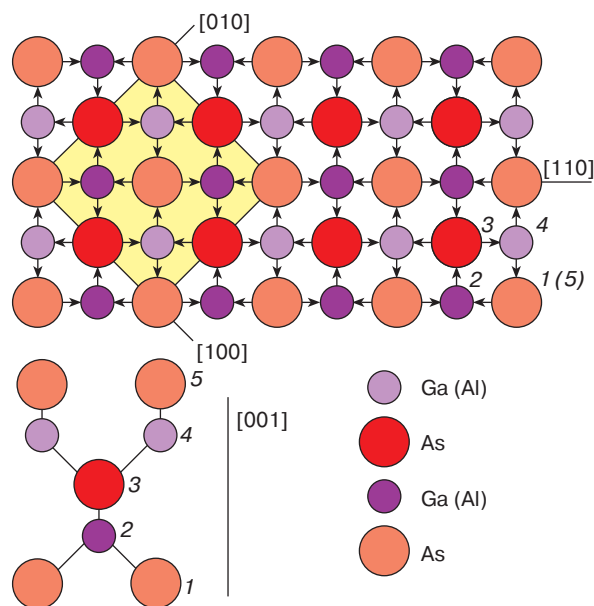


**Рис. 2.** Элементарные процессы в зоне роста: 1 – адсорбция атомов из зоны смешивания на поверхности, 2 – миграция (поверхностная диффузия) адсорбированных атомов по поверхности, 3 – встраивание адсорбированных атомов в кристаллическую решетку, 4 – термическая десорбция, 5 – образование поверхностных зародышей, 6 – взаимная диффузия. Над растущей поверхностью показаны атомы газовой смеси компонентов в приповерхностной области. Буквами  $n-n$  и  $i-i$  показаны нормальная и инвертированная поверхности раздела растущей ГС. Область между этими поверхностями представляет собой квантовую яму шириной  $L$

шетке) происходит своеобразная самоорганизация растущей структуры.

Наиболее распространенной кристаллической решеткой для соединений  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$  является так называемая структура цинковой обманки  $ZnS$ , показанная на рис. 3. Если поверхность подложки параллельна одной из граней элементарного куба с индексами Миллера (001), то эпитаксиальный рост осуществляется последовательным наращиванием анионных и катионных слоев, как это показано на рис. 2, где схематически представлена ГС  $Al_xGa_{1-x}As-GaAs$ , в которой слой арсенида галлия заключен между двумя слоями твердого раствора алюминия (с атомной концентрацией  $x$ ) в арсениде галлия. Алюминий, близкий по своим химическим свойствам галлию, замещает атомы галлия в решетке  $GaAs$ , не приводя при этом к сколько-нибудь существенному изменению межатомных расстояний.

Каждый полупроводник (например,  $GaAs$  или  $Al_xGa_{1-x}As$ ) может быть выращен послойно при фиксированной скорости роста, когда температура подложки обеспечивает оптимальную для данного соединения скорость поверхностной диффузии. Поскольку химические связи в разных полупроводниковых соединениях различны, то различны и энергии активации поверхностной диффузии катионов, входящих в состав этих соединений. Поэтому качество гетерограниц может быть существенно разным в зависимости от того, какое из соединений при выбранном температурном режиме растет первым. Границы принято называть нормальными, если компонент с более низкой температурой плавления



**Рис. 3.** Кристаллическая структура цинковой обманки. Вверху – проекция на плоскость (001), перпендикулярную оси роста. Выделена грань элементарного куба в плоскости (001). Цифрами указаны атомы, заполняющие слой в плоскости (001), стрелки указывают последовательность слоев, как это показано на рисунке внизу, где представлена проекция структуры на плоскость (110)

растет первым (например,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  на GaAs); для обратной последовательности используется термин “инвертированная граница”. На рис. 2 проекции этих двух границ изображены линиями с буквенными индексами  $n$  и  $i$  соответственно. Чтобы получить более гладкие и совершенные гетерограницы, используется методика прерывания роста или методики осаждения пульсирующим пучком. Сглаживание поверхности в течение времени прерывания роста (само прерывание осуществляется механическим перекрытием на некоторый промежуток времени заслонок эффузионных ячеек) обусловлено поверхностной миграцией и/или сублимацией атомов, адсорбированных на поверхность выращенного монослоя.

Температура подложки определяет соотношение между потоками адсорбции и десорбции атомов, входящих в состав растущей структуры. Это соотношение может быть охарактеризовано коэффициентом прилипания атома данного сорта к поверхности, на которой происходит эпитаксиальный рост. Коэффициент прилипания показывает, какая часть падающего потока адсорбируется на поверхности. При адсорбции анионного компонента, например мышьяка при росте арсенида галлия, важную роль играет то, в какой молекулярной форме ( $\text{As}_2$  или  $\text{As}_4$ ) анионный компонент доставляется на поверхность, где происходят диссоциация молекул и по-

следующее встраивание атомов в кристаллическую решетку.

Кроме того, температура подложки определяет скорость поверхностной диффузии, предвещающей встраивание атомов в кристаллическую решетку. Эта температура должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить необходимое число ( $\sim 10^4$ ) диффузионных прыжков атома на поверхности, прежде чем он займет свое положение в решетке. При этом среднее перемещение атома по поверхности за время  $t$  определяется как  $x = \sqrt{D_s t}$ , где

$$D_s = D_{s0} \exp\left(-\frac{E_{sd}}{T}\right)$$

– коэффициент поверхностной диффузии. Предэкспоненциальный фактор  $D_{s0} = a^2\nu$ , где  $a$  – длина диффузионного прыжка (расстояние между соседними эквивалентными положениями атома на поверхности роста),  $T$  – температура в энергетических единицах,  $\nu \approx 10^{12} \text{ c}^{-1}$  – частота колебаний атома на поверхности. Энергия активации поверхностной диффузии  $E_{sd}$  в полупроводниках обычно составляет 1–1,5 эВ, поэтому за одну секунду атом в среднем смещается на несколько десятков или сот межатомных расстояний при температуре подложки 600–800°C. Такое смещение как раз и соответствует приблизительно  $10^4$  диффузионным прыжкам.

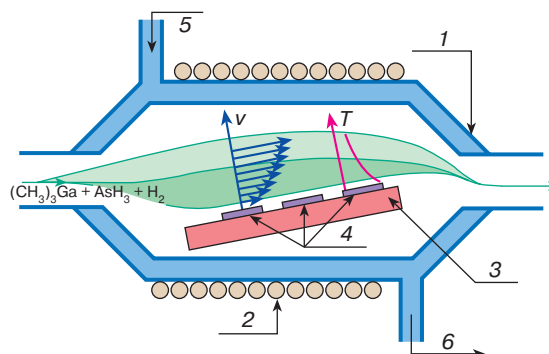
Существенное увеличение температуры подложки нежелательно по двум причинам: во-первых, оно может привести к уменьшению коэффициентов прилипания, во-вторых, к активизации взаимной диффузии, то есть диффузии атомов между слоями. Поскольку ГС представляют собой резко неоднородные (на атомном масштабе) по химическому составу структуры, то с течением времени за счет процессов взаимной диффузии эти структуры должны либо переходить в термодинамически равновесное состояние с однородным распределением концентраций всех компонентов, либо расслаиваться на фазы вполне определенного состава. Однако поскольку энергия активации взаимной диффузии атомов в полупроводниках обычно составляет 4–5 эВ, а предэкспоненциальный фактор имеет тот же порядок величины, что и в случае поверхностной диффузии, то очевидно, что в интервале температур 600–800°C этот эффект пренебрежимо мал, поскольку среднее смещение атома в результате взаимной диффузии даже за несколько десятков часов оказывается существенно меньшим межатомного расстояния. Это утверждение тем более справедливо для комнатной температуры, при которой обычно работают приборы, элементами которых являются ГС. Выбор и поддержание оптимальной температуры роста являются одним из важнейших условий осуществления МВЕ.

## ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК ИЗ МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Методика осаждения пленок из металлоорганических (МОС) соединений (metalorganic vapor phase epitaxy, MOVPE), известная также как МОС-гидридная технология, наиболее существенно отличается от методики МВЕ характером массопереноса: атомные или молекулярные пучки без объемной диффузии в МВЕ и газовый поток смеси компонентов реакции с диффузией в направлении фронта роста ГС в MOVPE.

Еще в 1968 году было показано (Н.М. Manasevit), что газофазные смеси металлоорганического соединения триметилгаллия  $(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$  и гидрида мышьяка  $\text{AsH}_3$  при осуществлении реакции пиролиза (разложения при повышенной температуре) в атмосфере молекулярного водорода  $\text{H}_2$  при температурах 600–700°C в реакторе открытого типа могут быть использованы для выращивания эпитаксиальных пленок GaAs. В дальнейшем были выполнены исследования, показавшие эффективность методики MOVPE для выращивания различных полупроводниковых соединений в виде тонких пленок субмикронных размеров. В настоящее время большинство соединений  $\text{A}_3\text{B}_5$ ,  $\text{A}_2\text{B}_6$  и  $\text{A}_4\text{B}_4$  могут быть получены в методике MOVPE. Общая проблема, возникающая при выращивании различных полупроводниковых структур, заключается в оптимальном выборе металлоорганических соединений для реакций пиролиза в процессе роста.

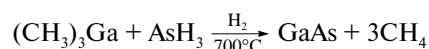
Металлоорганические соединения образуют широкий класс веществ, имеющих химические связи металл–углерод или металл–кислород–углерод, а также координационные соединения металлов и органических молекул. Соединения, представляющие интерес для выращивания полупроводниковых структур, при комнатной температуре, как правило, являются жидкостями, хотя некоторые из соединений, используемых в технике MOVPE, находятся в твердом состоянии. Эти соединения могут быть легко перенесены в зону реакции в потоке газа-носителя, например молекулярного водорода, проходящего через жидкий источник или над поверхностью твердого источника. Гидриды, применяемые в полупроводниковой технологии, при комнатной температуре являются газами и обычно используются в виде разбавленной смеси с  $\text{H}_2$ . Металлоорганические и гидридные компоненты смешиваются в газовой фазе и подвергаются пиролизу в атмосфере  $\text{H}_2$  в потоке через реактор открытого типа (рис. 4), действующий при атмосферном или пониженном давлении. Температура пиролиза обычно составляет от 600 до 800°C. Энергия для разогрева газовой смеси подводится от радиочастотного генератора или мощной лампы. Происходит разогрев графитового столика, на котором размещаются монокристаллические подложки. Газовая смесь вблизи подложек также нагревается до высокой температуры, тогда



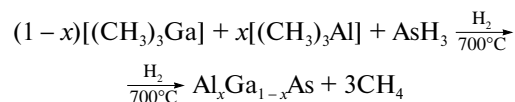
**Рис. 4.** Схема горизонтального реактора открытого типа с охлаждаемыми стенками для MOVPE: 1 – кварцевый корпус, 2 – катушка ВЧ-генератора для нагревания подложки, 3 – блок нагревания, 4 – подложки, 5 – водяное охлаждение (впуск), 6 – водяное охлаждение (выпуск). Схематически показано распределение скоростей  $v$  и температуры  $T$  в газовом потоке в диффузионном слое вблизи подложки (масштаб не соблюден)

как стенки камеры реактора остаются холодными, например за счет водяного охлаждения. Такой режим обеспечивает осаждение продуктов реакции на подложках и приводит к относительно малым потерям компонентов реакции на стенках камеры. Кристаллизация в процессе MOVPE возникает при прохождении газовой смеси компонентов реакции в потоке газа-носителя вблизи нагретой подложки и идет в условиях, существенно более близких к термодинамическому равновесию, чем при МВЕ.

Чаще всего используются метиловые или этиловые металлоорганики из-за относительной простоты приготовления и легкости пиролиза в атмосфере молекулярного водорода. Эти соединения поставляют атомы металлов с побочными продуктами в виде метана или этана. Химическая реакция в частном случае MOVPE роста арсенида галлия из триметилгаллия и гидрида мышьяка может быть записана как



Подобные реакции используются для выращивания других двойных, а также тройных и четверных соединений. Например, рост  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  описывается уравнением

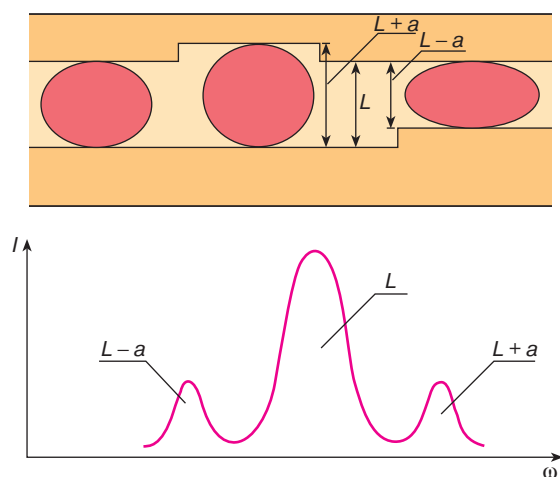


В этом случае атомная концентрация  $x$  алюминия в твердом растворе  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  прямо связана с относительными начальными парциальными давлениями триметилгаллия и триметилалюминия в газовой фазе.

Выращивание слоистых полупроводниковых ГС методом MOVPE требует изменения состава газовой смеси в реакторе. Скорость, с которой может быть обеспечено необходимое изменение, зависит от геометрии реактора и полного потока газа через реактор. При высоких скоростях потока такое изменение состава может быть осуществлено достаточно быстро, поэтому могут быть получены гетеропереходы с практически резкой гетерограницей. Использование методики MOVPE для выращивания ГС  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}$  позволяет получать структуры весьма высокого качества, в которых толщина отдельных слоев составляет всего 5–6 межатомных расстояний.

### ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРУКТУРЕ ГЕТЕРОГРАНИЦ

Гетерограницы в реальных ГС не являются идеально плоскими. Даже в наиболее качественных структурах, выращенных по методике МВЕ, из-за неизбежных флуктуаций потоков напыляемых веществ в отдельных местах границы процесс роста может идти с некоторым запаздыванием или, наоборот, опережением. Возникает характерная островковая структура границы, представляющей совокупность плоских участков, выступающих друг относительно друга на одно-два межатомных расстояния (рис. 5). Сами плоские участки границы также не являются идеальными: процессы взаимной диффузии при температуре роста протекают крайне медленно, тем не менее они могут приводить к локальным (атомного масштаба) изменениям концентраций компонентов ГС. Таким образом,



**Рис. 5.** Островковое строение гетерограниц в ГС с квантовой ямой (выделены области барьерных слоев). Овалами схематически показаны экситоны, возникшие в отдельных областях ГС. Внизу также схематически представлена зависимость интенсивности  $I$  экситонной люминесценции от частоты  $\omega$  излучаемого света

гетерограницы в качественных ГС можно представлять как плоскости (определяющие средние положения границ) с островками разного знака, причем в характерных латеральных (то есть вдоль границы) размерах островков можно выделить два существенно разных масштаба: типичные размеры больших островков могут составлять сотни, тысячи и даже более межатомных расстояний, тогда как типичные размеры малых островков составляют всего несколько межатомных расстояний.

Структура гетерограниц является важным фактором, определяющим поведение носителей тока (электронов и дырок) в ГС. В частности, неровности (шероховатости) границ могут оказывать заметное влияние на латеральную подвижность носителей. Поэтому, для того чтобы получить ГС с тонкими проводящими слоями и достаточно высокой латеральной подвижностью, необходимо выращивать такие структуры, в которых крупномасштабные неоднородности границ превышают длину свободного пробега носителя (определяется главным образом температурой).

Толщиной слоев ГС (например, шириной  $L$  квантовой ямы, изображенной на рис. 2 и 5) определяются энергии размерного квантования электронов и дырок. Действительно, уже из соображений размерности ясно, что характерная величина наименьшей энергии электрона и дырки в потенциальной яме ширины  $L$  может быть записана как

$$E_{\text{sq}} = \frac{\hbar^2}{2m^*L^2},$$

где  $m^*$  — эффективная масса электрона или дырки. Уровни размерного квантования естественно проявляются в оптических спектрах поглощения и излучения (наиболее четко в экситонных спектрах). Поэтому по этим спектрам можно судить, например, о ширине выращенной квантовой ямы. Действительно, если в одной структуре ширина ямы равна  $L$ , а в другой —  $L + \delta L$ , то относительное изменение характерной энергии размерного квантования составляет

$$\frac{\delta E_{\text{sq}}}{E_{\text{sq}}} \approx -\frac{2\delta L}{L}.$$

В достаточно узких структурах (несколько единиц или десятков межатомных расстояний) это отношение может иметь заметную величину, даже когда  $\delta L$  равно одному-двум межатомным расстояниям. Таким образом, появляется достаточно естественная возможность оптическими методами измерять расстояния, существенно меньшие длины волны видимого света (так, длина волны света в красной области спектра равна  $\sim 700$  нм).

Экситонные спектры позволяют судить и о качестве гетерограниц в выращенной ГС. Поскольку характерный размер экситона может быть оценен как величина порядка 10–100 межатомных расстояний

(то есть он оказывается существенно меньшим по сравнению с характерным латеральным размером больших островков), то в качественных структурах с квантовой ямой экситоны существуют как бы независимо в трех ямах шириной  $L$  и  $L \pm \delta L$  (рис. 5). Эти экситоны фактически неподвижны, так как их латеральному движению препятствуют мелкомасштабные неоднородности границ. Поэтому экситон данного типа дает не одну, а три серии линий в оптических спектрах. Эти линии как раз соответствуют значениям ширины квантовой ямы  $L$  и  $L \pm \delta L$ , как это схематически показано на рис. 5. По отношению интенсивностей линий можно судить о структуре границ и даже о том, насколько качественно отличаются нормальные и инвертированные гетерограницы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

МВЕ является сложной и достаточно дорогостоящей современной технологией получения полупроводниковых гетерокомпозиций и может использоваться для создания высококачественных структур как для физических исследований, так и для приборных применений. Технология MOVPE является более простой, более производительной и более дешевой по сравнению с МВЕ и в последнее время вполне успешно конкурирует с ней при создании ГС для многих приборных применений. Перед другими способами получения тонкопленочных структур МВЕ и MOVPE обладают многими преимуществами, из которых важнейшими являются следующие:

1) возможность получения высококачественных монокристаллических структур при использовании сверхвысокого вакуума и высокочистых источников напыляемых веществ;

2) возможность выращивания ГС со сверхтонкими слоями и резким изменением химического состава на гетерограницах за счет относительно низкой температуры роста практически при отсутствии взаимной диффузии;

3) возможность селективного легирования (вплоть до моноатомных слоев) и создания структур со сложным профилем химического состава;

4) возможность контроля толщины слоев ГС и качества гетерограниц непосредственно в процессе роста (для этого в вакуумной камере размещается соответствующее оборудование).

Такие структуры обладают особыми и исключительно разнообразными по своему характеру квантовыми состояниями электронов, и их можно рассматривать как некие созданные руками человека и нереализуемые в природе твердые тела.

Общие представления о наноструктурах, некоторых возможностях их использования в электронике, а также об электрических и оптических свойствах наноструктур с квантовыми ямами можно получить из статей [1–4]. Настоящая статья во многом использует информацию, содержащуюся в [1–4]. Более детально с основами полупроводниковой нанотехнологии можно познакомиться обратившись к книгам [5, 6]. Оптическим методам исследования гетероструктур посвящен подробный обзор [7].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Демиковский В.Я. Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое? // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 80–86.
2. Шик А.Я. Квантовые нити // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5, С. 87–92.
3. Белявский В.И. Экситоны в низкоразмерных системах // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 93–99.
4. Борисенко В.Е. Нанoeлектроника – основа информационных систем XXI века // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 100–104.
5. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры: Пер. с англ. / Под ред. Ж.И. Алферова, Ю.В. Шмарцева. М.: Мир, 1989.
6. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. М.: Мир, 1989.
7. Herman M.A., Bimberg D., Christen J. // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 70, № 2. P. R1–R52.

\* \* \*

Владимир Ильич Белявский, физик-теоретик, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой общей физики Воронежского государственного педагогического университета. Область научных интересов: физика полупроводниковых низкоразмерных систем, теория дислокаций в полупроводниках, оптика полупроводников и естественных сверхрешеток, теория внутреннего трения в твердых телах и физика аморфных металлических сплавов. Автор более 100 научных публикаций.