

## Полупроводниковые гетероструктуры: от классических к низкоразмерным, или "конструктор" от Нобелевского лауреата.

Весьма символично, что Нобелевский комитет под занавес XX века счел необходимым присудить премию "за основополагающие работы в области информационных и коммуникационных технологий". Именно в этой области человеческой деятельности в последние десятилетия происходят революционные изменения. И очевидна заслуга исследователей, работающих в области физики полупроводников: компьютеры, Интернет, "новая экономика" - всего этого не существовало бы без полупроводниковой элементной базы. Получилось так, что мне выпала честь первым представлять физику полупроводников в журнале Scientific.ru. Надеюсь, в дальнейшем мои коллеги смогут нарисовать перед читателем полную и красочную картину происходящего в нашей области. Я же ставлю перед собой гораздо более простую задачу - показать хотя бы небольшую часть того удивительного мира, который называется "физика полупроводниковых гетероструктур". И даже еще скромнее: дать общие представления, познакомить с терминологией, подготовив читателя к восприятию в дальнейшем более сложных вещей.

Наверняка многие, хотя бы в связи с присуждением Нобелевской премии выдающемуся российскому ученому Жоресу Ивановичу Алферову, слышали слова "гетероструктуры", "наноструктуры", или совсем загадочное - "квантовые точки". Думаю, что пояснения типа "квантовые точки" - это "искусственные атомы", не слишком прояснили для них ситуацию. Попробуем разобраться, за что дают Нобелевские премии и как делают "искусственные атомы". Но сначала ответим на вопрос, что дали человечеству полупроводниковые гетероструктуры? Логично предоставить слово самому Нобелевскому лауреату. "Развитие физики и технологии полупроводниковых гетероструктур привело к значительным переменам в нашей повседневной жизни. ... Едва ли можно вообразить нашу жизнь без телекоммуникационных систем, основанных на лазерах с двойной гетероструктурой, без гетероструктурных светодиодов и биполярных транзисторов, без малошумящих транзисторов с высокой подвижностью электронов, применяющихся в высокочастотных устройствах, в том числе в системах спутникового телевидения. Лазер с двойной гетероструктурой присутствует теперь фактически в каждом доме в проигрывателе компакт-дисков. Солнечные элементы с гетероструктурами широко используются как для космических, так и для земных программ..." Уже 15 лет на станции "Мир" исправно работают солнечные элементы на основе полупроводниковых гетероструктур.

Следуя заявленной цели, автор считает необходимым начать "от печки" - с основ, с квантовой механики. В классической механике энергия частицы может принимать любое значение, говорят, что энергетический спектр классической частицы является непрерывным. Принципиальное отличие квантовой механики от классической состоит в том, что

энергетический спектр частицы может быть как непрерывным, так и дискретным. При определенных обстоятельствах энергия частицы может принимать ограниченный набор значений. Поясним это на простейшем примере. На рис. 1а изображена одномерная прямоугольная потенциальная яма: если энергия частицы превышает  $U_0$ , то частица может свободно перемещаться вдоль оси  $x$ , если же ее энергия меньше  $U_0$ , то частица локализована в яме. В классической механике энергия частицы в этом случае может иметь любое значение от 0 до  $U_0$ , а в квантовой механике существует конечное число уровней энергии (минимум один в такой одномерной задаче). Число уровней энергии зависит от ширины потенциальной ямы  $s$ , высоты потенциального барьера  $U_0$  и массы частицы. Если мы будем увеличивать ширину ямы ("раздвигать стенки"), число уровней энергии в яме будет расти (рис. 1b). При этом уровни будут располагаться все ближе и ближе друг к другу. В пределе, когда яма станет бесконечно широкой, энергетический спектр станет непрерывным. Именно из-за того, что в атомах электроны находятся в кулоновом поле ионов (т.е. для них имеет место потенциальная яма), атомные спектры представляют собой набор линий.

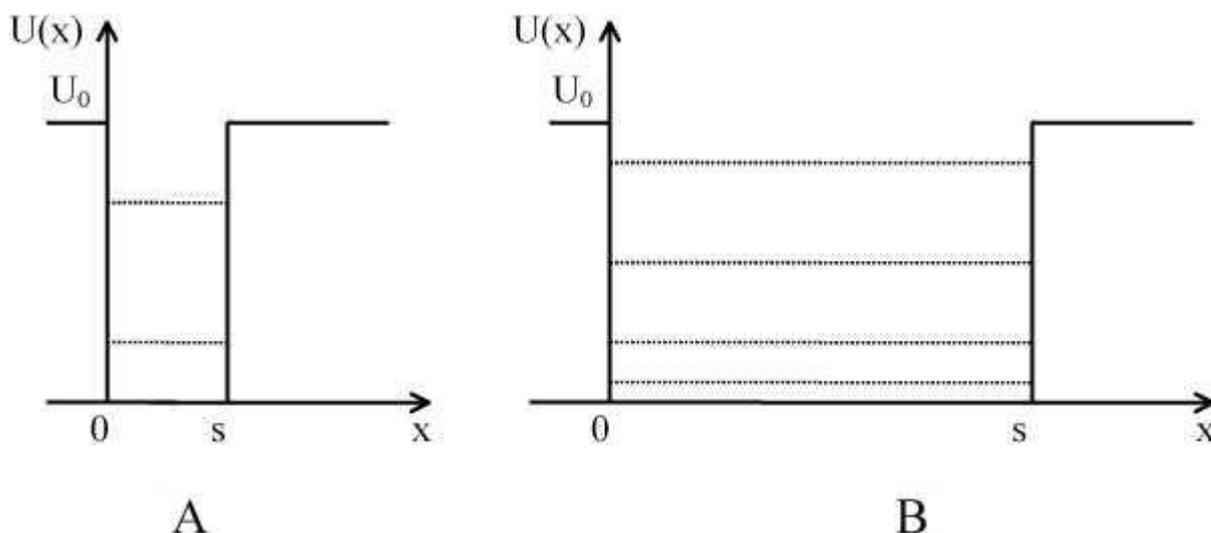


Рис.1. а - одномерная прямоугольная потенциальная яма,  $U(x)$  - потенциальная энергия; б - прямоугольная потенциальная яма отличается от случая а только большей шириной  $s$ .

Покончив с небольшой вводной частью, мы с чистой совестью можем вернуться к нашим баранам и дать определение гетероструктуры. Гетеропереходом называется контакт двух различных по химическому составу полупроводников (естественно, они различаются ширинами запрещенных зон, постоянными кристаллической решетки и другими параметрами). Гетероструктурой называется полупроводниковая структура с несколькими гетеропереходами (принятое обозначение гетероструктур на основе соединений А и В - А/В, соединения А и В называют гетеропарой). Схематически зонная диаграмма двойной гетероструктуры изображена на рис. 2. Отметим, что носителям заряда (электронам и дыркам) энергетически выгодно находиться в среднем слое. Идея использования структур с гетеропереходами в

полупроводниковой электронике была выдвинута уже на заре развития электроники, в начале пятидесятых годов. На ранней стадии изучения гетероструктур важный теоретический вклад в исследования внес Г.Кремер, разделивший с Ж.И.Алферовым Нобелевскую премию. В 1963 г. Ж.И.Алферов и Г.Кремер независимо сформулировали концепцию полупроводниковых лазеров на основе двойной гетероструктуры [2]. Вскоре после этого Ж.И.Алферов так описал основные преимущества полупроводниковых лазеров на двойной гетероструктуре [3]: "Области рекомбинации, светового излучения и инверсной населенности совпадают и полностью сосредоточены в среднем слое. Благодаря потенциальным барьерам на границе полупроводников с различной шириной запрещенной зоны ... рекомбинация в эмитерах равна нулю. Инверсия населенности для получения стимулированного излучения может быть достигнута чисто инжекционным способом (двойная инжекция), и для ее получения не требуется высокого уровня легирования средней области ... Вследствие заметной разницы в диэлектрических постоянных, свет полностью сосредоточен в среднем слое, играющем роль высококачественного волновода...".

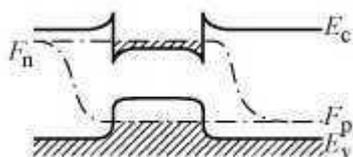


Рис.2. Зонная диаграмма (энергетическая схема) двойной гетероструктуры: внутри полупроводника с большей шириной запрещенной зоны содержится слой (толщиной несколько десятых долей микрона) полупроводника с меньшей шириной запрещенной зоны.  $E_c$  - край зоны проводимости,  $E_v$  - край валентной зоны. Незаштрихованная часть рисунка между кривыми  $E_v$  и  $F_p$  - область, заполненная дырками, заштрихованная часть между кривыми  $E_c$  и  $F_n$  - область, заполненная электронами.  $F_p$  и  $F_n$  - положение уровня Ферми для дырок и электронов, соответственно.

Однако, хотя высказываемые идеи звучали красиво, их в то время мало кто воспринимал всерьез. Подавляющее большинство исследователей скептически относилось к возможности создания "идеального" гетероперехода с бездефектной границей, считая патент лазера на двойной гетероструктуре пустой бумажкой. Скептицизм этот был понятен. Во-первых, необходимо было найти подходящую гетеропару, т.е. два материала с очень близкими постоянными решетки и многими другими хорошо сочетающимися свойствами. Во-вторых, технологии выращивания полупроводниковых структур были далеки от совершенства.

Надо сказать, что практически идеальная гетеропара существовала - еще в 1915 г. было получено соединение AlAs, имеющее очень близкий к GaAs период решетки. Однако было известно, что AlAs является химически нестабильным и разлагается во влажной атмосфере, так что возможность изготовления пригодных для практического применения

устройств на основе гетероструктур GaAs/AlAs казалась малоперспективной. Поэтому группа Ж.И.Алферова поначалу пыталась реализовать свою идею на основе гетеропары GaAs/GaAsP (GaAsP - трехкомпонентный твердый раствор  $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$ ). Однако из-за некоторого несоответствия параметров решетки лазерную генерацию удавалось получить только при низких температурах. К концу 1966 г. стало ясно, что на основе этой гетеропары не удастся реализовать потенциальные преимущества двойной гетероструктуры. Необходимо было искать другие варианты. Как это часто бывает, помог случай: сотрудник группы Ж.И.Алферова, Д.Н.Третьяков, обнаружил, что с кристаллами твердого раствора AlGaAs, пролежавшими более двух лет в ящике стола, за это время ничего не случилось. Открытие было более чем вдохновляющим, так как гетеропара GaAs/AlGaAs позволяла создать решеточно-согласованную гетероструктуру, т.е. избежать возникновения в структуре напряжений. Это очень важно, потому что при превышении некоторой (зависящей от различия параметров решетки) толщины кристаллической решетки в напряженном среднем слое становится выгодным "отстроиться" от периода решетки окружающего материала. Такое "отстроение" происходит путем образования многочисленных дефектов кристаллической структуры (дислокаций несоответствия), что ведет к резкому ухудшению качества структуры. Надо отметить, что и до сих пор гетеропара GaAs/AlGaAs чаще всего используется в исследованиях свойств низкоразмерных полупроводниковых структур!

Исследование свойств гетероперехода GaAs/AlGaAs и усовершенствование технологии выращивания структур - жидкофазной эпитаксии - дало возможность уже в 1970 г. реализовать непрерывный режим лазерной генерации (рис. 3) при комнатной температуре [4]. Сообщение об этом вызвало взрыв интереса к физике и технологии полупроводниковых гетероструктур (в настоящий момент большинство исследователей, работающих в области физики полупроводников, занимаются именно полупроводниковыми гетероструктурами). Практически в то же время было найдено решение, сильно расширяющее возможности подбора решеточно-согласованных гетеропар - использование четверных твердых растворов (в начале исследовались различные составы InGaAsP). Действительно, каждое из соединений (в данном случае - InAs, GaAs, InP, GaP) имеет свою ширину запрещенной зоны и постоянную решетки. Если на графике, по одной из осей которого отложена постоянная решетки, а по другой - ширина запрещенной зоны, поставить четыре точки, соответствующие параметрам этих соединений, то они образуют четырехугольник. Меняя состав четырехкомпонентного раствора  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  (x и y - доли различных компонент), можно получать любые значения постоянной решетки и ширины запрещенной зоны в пределах этого четырехугольника.

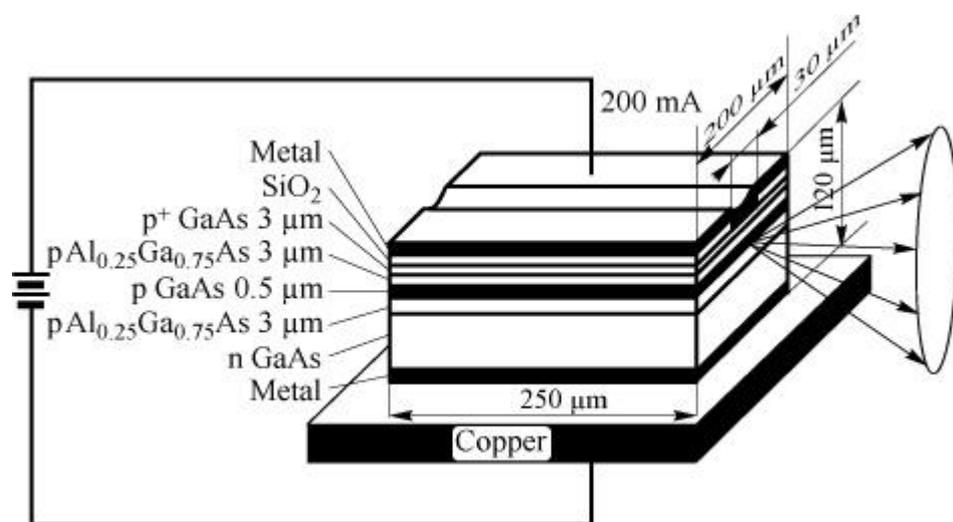


Рис. 3. Схематическое изображение первого в мире полупроводникового лазера (полоскового), работавшего в непрерывном режиме при комнатной температуре.

В том же 1970 г. случилось другое важное событие, появилась работа Л.Эсаки и Р.Цу [5], посвященная исследованию свойств сверхрешеток - нового вида полупроводниковых гетероструктур. Основным мотивом их деятельности было желание реализовать на базе подобных структур "блоховский осциллятор", или, если подойти к вопросу с практической стороны, создать сверхвысокочастотный генератор. Так было положено начало новому разделу физики полупроводников - физике низкоразмерных структур.

Но прежде чем рассказать о том, что же представляет собой сверхрешетка, разберемся с более простой структурой. На рис 2. изображена обычная двойная гетероструктура. Проведем небольшой мысленный эксперимент: будем уменьшать толщину среднего слоя. Неизбежно наступит момент, когда квазичастицы (электроны и дырки) "почувствуют" конечность толщины слоя (рис. 4). Ситуация с точностью до наоборот отвечает описанной выше для одномерной потенциальной ямы: для тонких слоев начинают проявляться эффекты размерного квантования, непрерывный спектр "сменяется" дискретным набором уровней энергии. Правда, есть важное отличие от рассмотренного выше случая - в направлении роста структуры мы действительно имеем потенциальную яму. Но электроны и дырки могут свободно перемещаться в плоскости слоя, поэтому спектр в реальности является не дискретным, а непрерывным, и существует не набор уровней, а набор энергетических "подзон". Каков характерный размер (в данном случае - толщина слоя), при котором начинают играть существенную роль квантовомеханические эффекты? Он должен быть сопоставим с длиной волны электрона (дырки), которая вблизи дна зоны проводимости (потолка валентной зоны) составляет десятки постоянных решетки, т.е. толщина слоя должна быть в пределах одного-двух десятков нанометров. Подобные гетероструктуры с тонкими (несколько нанометров) слоями называются "квантовыми ямами".

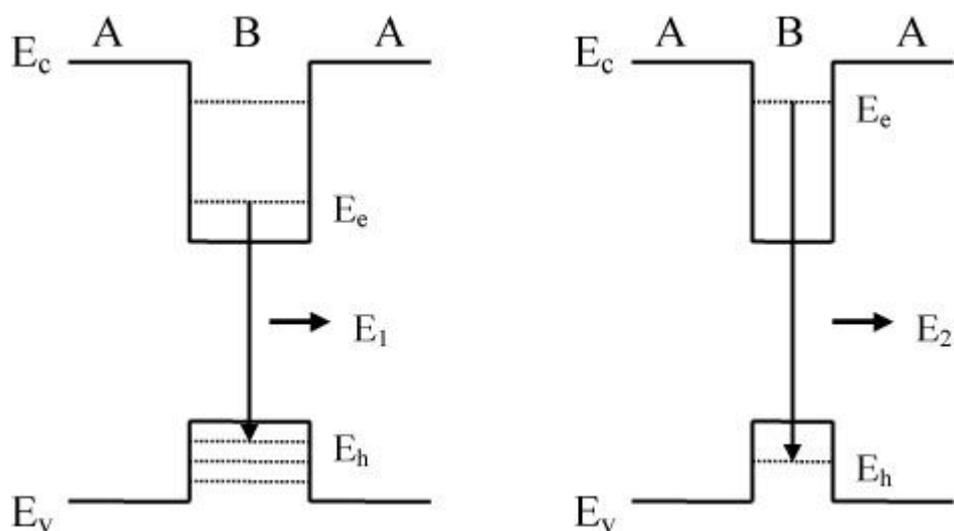


Рис. 4. Уменьшение толщины слоя материала В приводит к появлению уровней размерного квантования ( $E_c$  и  $E_v$  - края зоны проводимости и валентной зоны, соответственно,  $E_e$  и  $E_h$  - уровни размерного квантования для электронов и дырок). Энергетический спектр определяет спектр излучения структуры и, таким образом, энергия испускаемого при рекомбинации электрона и дырки фотона ( $E_1$  и  $E_2$  на схемах слева и справа) определяется уже не только ширинами запрещенных зон материалов А и В, но и шириной слоя (потенциальной ямы), поэтому  $E_2 > E_1$ . Примечание. Уровней энергии для дырки в более мелкой потенциальной яме больше, чем для электрона в более глубокой, так как эффективная масса у дырки больше, чем у электрона.

Существует естественный предел уменьшения толщины квантовой ямы: нельзя вырастить сплошной слой тоньше, чем один атомный слой. И, конечно, структуры с такими ультратонкими (десятые доли нанометра) слоями были выращены. На секунду остановитесь и попытайтесь представить - один-два-три слоя атомов (!!) в окружении другого материала. Возможно ли, чтобы этот тончайший слой как-то проявил себя? И вообще, возможно ли избежать того, чтобы через некоторое время слой просто не "рассосался" (атомы одного сорта не перемешались с атомами другого сорта)? На эти вопросы есть совершенно определенные ответы. 1. Как это ни удивительно, иногда следы присутствия такого слоя можно увидеть ... невооруженным глазом. Дело в том, что введение тончайшего слоя полупроводника В в матрицу полупроводника А радикально меняет спектр люминесценции структуры. В нем доминирует именно линия излучения квантовой ямы, намного превосходя по интенсивности все остальные линии - даже столь тонкая квантовая яма служит эффективной ловушкой для электронов и дырок. И, скажем, вместо зеленого света структура с ультратонкой квантовой ямой светит желтым или красным (в зависимости от толщины). 2. У автора в ящике стола лежат структуры с ультратонкими квантовыми ямами и квантовыми точками (о них речь впереди) CdTe в ZnTe, выращенными в новосибирском Институте физики полупроводников более десяти лет назад. За это время эти структуры десятки раз помещали в криостат, охлаждая до 5 К и снова отогревая. И с ними ничего не случилось! Они светят так же интенсивно и в том же диапазоне, как и десять лет назад.

## "Искусственные кристаллы"

Вернемся теперь к сверхрешеткам. Сверхрешетка представляет собой последовательность чередующихся слоев более узкозонного (яма) и более широкозонного (барьер) полупроводников, по сути, набор связанных квантовых ям. Появление дополнительного периода (толщина слоя ямы + толщина слоя барьера), превышающего период кристаллической решетки (отсюда термин "сверхрешетка"), приводит к изменению энергетического спектра структуры. Хорошая аналогия тут - образование естественных кристаллов из отдельных атомов. Из-за того, что волновые функции электронов перекрываются (электроны "чувствуют" друг друга), система уровней энергии атомов преобразуется в систему энергетических полос (зон), в пределах которых электроны могут свободно перемещаться по кристаллу. Так и в сверхрешетке уровни в отдельных квантовых ямах сливаются в энергетические "минизоны", только, в отличие от естественного кристалла, ширинами минизон можно управлять, меняя толщины барьеров. С некоторой долей условности можно сказать, что сверхрешетка представляет собой "одномерный кристалл", созданный человеком. Именно термин "созданный человеком кристалл" и употребил в своей работе Л.Эсаки.

### **Лирическое отступление во славу технологии.**

Нельзя не сказать хотя бы нескольких слов о современных методиках получения полупроводниковых гетероструктур. Один из основных методов выращивания гетероструктур - молекулярно-пучковая эпитаксия. Из специальных ячеек, в которых содержатся исходные компоненты, происходит медленное напыление вещества на шайбу из полупроводникового материала (подложку). Скорости роста (слой с толщиной один микрон выращивается несколько часов) и другие условия таковы, что происходит послойный рост атомных слоев (!), что позволяет добиться высокого кристаллического совершенства получаемых структур. Естественно, процедура напыления протекает в высоком вакууме (в современных установках в отсутствие потоков вещества из ячеек можно получить вакуум не хуже нескольких единиц на  $10^{-11}$  торр). Высокотехнологичные установки дают возможность, контролируемым образом изменяя условия (температуру подложки, давление потоков из источников с различными компонентами (в частности, открывая и закрывая заслонки у разных ячеек) и т.д.) получать сложные гетероструктуры с заданными свойствами.

Пропев дифирамбы могучей дорогостоящей современной технике, обратим внимание на очень важную вещь. Мы говорили об изменении энергетического спектра структуры вследствие локализации электронов и дырок в квантовой яме. А будут ли эти квазичастицы, локализованные в столь тонком слое, вести себя также, как в объемном (трехмерном) полупроводнике: фактически "для жизни" им остаются только два

измерения? Разве это не должно соответствующим образом изменить свойств "электронной подсистемы" кристалла? Понижение размерности действительно имеет место быть! В случае квантовых ям поэтому говорят о "двумерном электронном газе". И, соответственно, квантовые ямы можно назвать квазидвумерными структурами. Нет никакой возможности отразить в данной статье всю совокупность явлений, связанных с подобным изменением "эффективной размерности пространства". Могу только сказать, что за открытие и исследование квантового эффекта Холла (целочисленного и дробного, когда квазичастицы ведут себя так, будто имеют дробный заряд!) при изучении свойств двумерного электронного газа присуждено две Нобелевские премии. Проиллюстрирую "физику" только на одном примере.

### **"Двумерные атомы".**

В простейшем атоме, атоме водорода, где один электрон взаимодействует с одним протоном, можно получить аналитическое решение задачи на определение энергетического спектра. В полупроводниках при низких температурах существуют водородоподобные "квазиатомы" - экситоны. Экситон представляет собой связанное состояние электрона и дырки, возникающее в результате кулоновского взаимодействия. Еще более точной будет аналогия со связанным состоянием электрона и позитрона, позитронием, поскольку экситон нестабилен, т.е. имеет конечное время жизни. Образующие экситон электрон и дырка могут рекомбинировать (аннигилировать), испустив фотон. Но электрон и дырка взаимодействуют не в вакууме, а в среде с диэлектрической проницаемостью порядка 10, и, кроме того, эффективная масса этих квазичастиц меньше массы свободного электрона (грубо говоря, чтобы корректно описать поведение электрона, "живущего" в кристаллической решетке, можно считать его частицей с массой, отличной от массы свободного электрона). Поэтому энергия связи экситона в полупроводниках примерно на три порядка меньше, чем энергия связи электрона и протона в атоме водорода. Так что экситоны в объемных полупроводниках не доживают до комнатной температуры (даже если в институте не топят), с ростом температуры за счет взаимодействия с колебаниями решетки происходит диссоциация экситона - распад на электрон и дырку.

Что же будет происходить с экситоном при "понижении размерности"? Решая уравнение Шредингера в чисто двумерном случае, мы получим ответ: энергия связи экситона должна увеличиться в четыре раза. Действительно, энергия связи экситона в квантовых ямах возрастает (экситоны в квантовых ямах могут существовать и при комнатной температуре), но не столь сильно. Необходимо учесть, что чисто двумерная ситуация - идеализация. В реальности высота потенциального барьера всегда конечна, как и ширина квантовой ямы

(толщина слоя), поэтому экситон никогда не становится чисто двумерным. Энергия связи экситона имеет максимум при некоторой "промежуточной" ширине квантовой ямы. Дело в том, что по мере уменьшения толщины ямы из-за конечности высоты барьера уровень энергии выталкивается вверх и экситон становится "все более трехмерным" (можно сказать, что "эффективная размерность системы" повышается).

### **"Вверх по лестнице, ведущей вниз".**

После квазидвумерных структур должны по идее идти квазиодномерные и квазинульмерные. Они существуют. "Квантовые проволоки" (иногда их называют "квантовыми нитями") - квазиодномерные структуры. Носители заряда в квантовой проволоке локализованы в двух направлениях и могут свободно перемещаться в одном, вдоль проволоки. И, наконец, квазинульмерные структуры - "квантовые точки". На первых порах наряду с неустоявшимся еще термином "квантовые точки" бытовал термин "квантовые ящики", на мой взгляд, "более наглядный". По существу, это трехмерные потенциальные ямы, т.е. квазичастицы локализованы во всех трех направлениях. Естественно, характерные размеры такого объекта, называй ли его "точкой" (с точки зрения человека) или "ящиком" (с точки зрения электрона), - те же самые несколько нанометров. Полная - во всех направлениях - локализация приводит к тому, что энергетический спектр подобной структуры по-настоящему дискретен. Именно по этой причине квантовые точки иногда называют "искусственными атомами" - эти изготовленные человеком объекты нанометровых размеров имеют квазиатомый (дискретный) энергетический спектр.

У вас, видимо, возникает законный вопрос: вырастить квантовую яму просто, ввели тонкий слой одного полупроводника в матрицу другого, и пожалуйста, однако как же получить квантовые проволоки и квантовые точки? Можно, конечно "вырезать" полоски (квантовые нити) или квантовые точки из выращенных плоских слоев с помощью литографии, иногда так и поступают. Однако это не самый удобный и легкий путь. Как говорится в одном рекламном ролике, "есть способ лучше" - спонтанное формирование квантовых точек в процессе роста. Помните, как важно было на первом этапе найти "идеальную гетеропару", материалы с близкими постоянными решетки? Так вот, с развитием технологии оказалось, что напряжения в структуре могут играть и положительную роль. При росте ультратонких напряженных слоев иногда оказывается термодинамически выгодным не двумерный (послойный) рост, а трехмерный рост - распад сплошного слоя на массив отдельных островков-включений (рис. 5). Так происходит, например, в наиболее хорошо исследованной системе InAs/GaAs, где постоянные решетки соединений InAs и GaAs различаются на 7 %. В этой системе самопроизвольно формируются квантовые точки в форме ... пирамидок с

квадратным основанием (сторона квадрата порядка 12 нм) и высотой до 6 нм. Но возможны варианты - в системе CdSe/ZnSe (те же 7 % разницы постоянных решетки) квантовые точки образуются в форме плоских "блинчиков". Надеюсь, у меня еще будет возможность более подробно рассказать на страницах Scientific.ru об этих удивительных объектах.

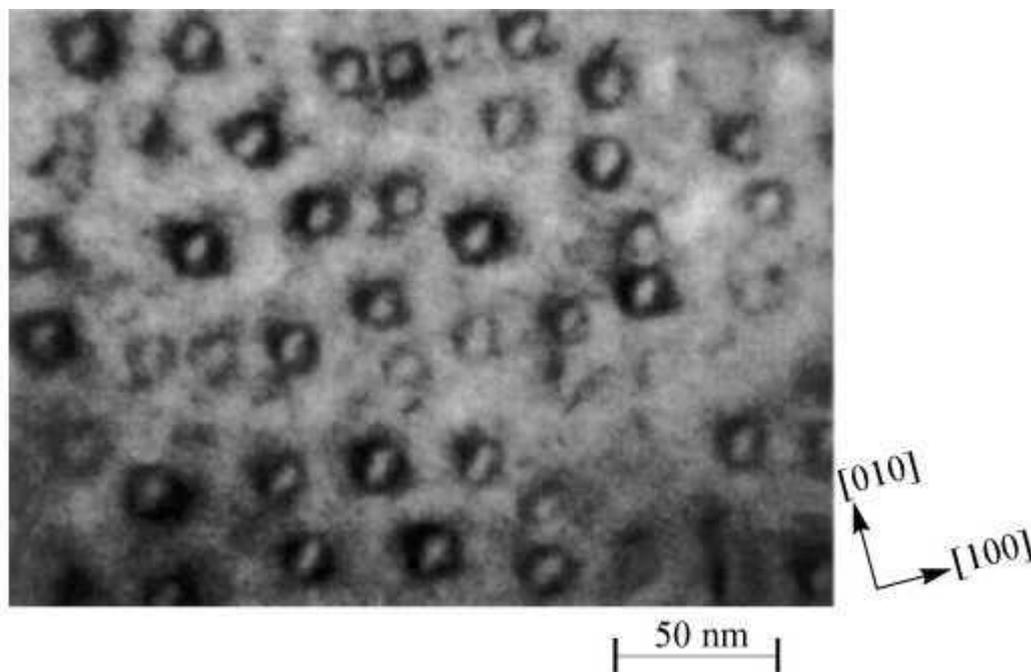


Рис. 5. Изображение квантовых точек InAs в матрице GaAs (вид сверху), полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Важно отметить, что формирование квантовых точек происходит без образования дислокаций несоответствия (говорят о системе когерентно напряженных трехмерных островков).

Пожалуй, наше путешествие подходит к логическому концу. Как нельзя вычерпать кружкой море, так в одной статье невозможно дать развернутую картину происходящего в физике низкоразмерных структур и нарисовать перспективы практического применения гетероструктур и наноструктур (как вы, наверно, уже догадались, этот термин говорит о характерных размерах структурных элементов - нанометры). Ограничусь одним примером. С точки зрения практического применения история развития полупроводниковых лазеров - это в значительной степени история борьбы за снижение их порогового тока, при котором начинается лазерная генерация. Действительно, большие токи - это большие рассеиваемые мощности, соответственно, перегрев и ускоренная деградация полупроводниковой структуры. Малые пороговые токи - это долгоживущие миниатюрные лазерные устройства. На рис. 6 показана временная эволюция пороговой плотности тока полупроводниковых лазеров. Видно, сколь велика "заслуга" полупроводниковых гетероструктур (в особенности низкоразмерных структур) - пороговую плотность тока удалось снизить более чем на три порядка! На графике не отражены последние достижения, связанные с появлением лазеров на квантовых точках (см. подпись).

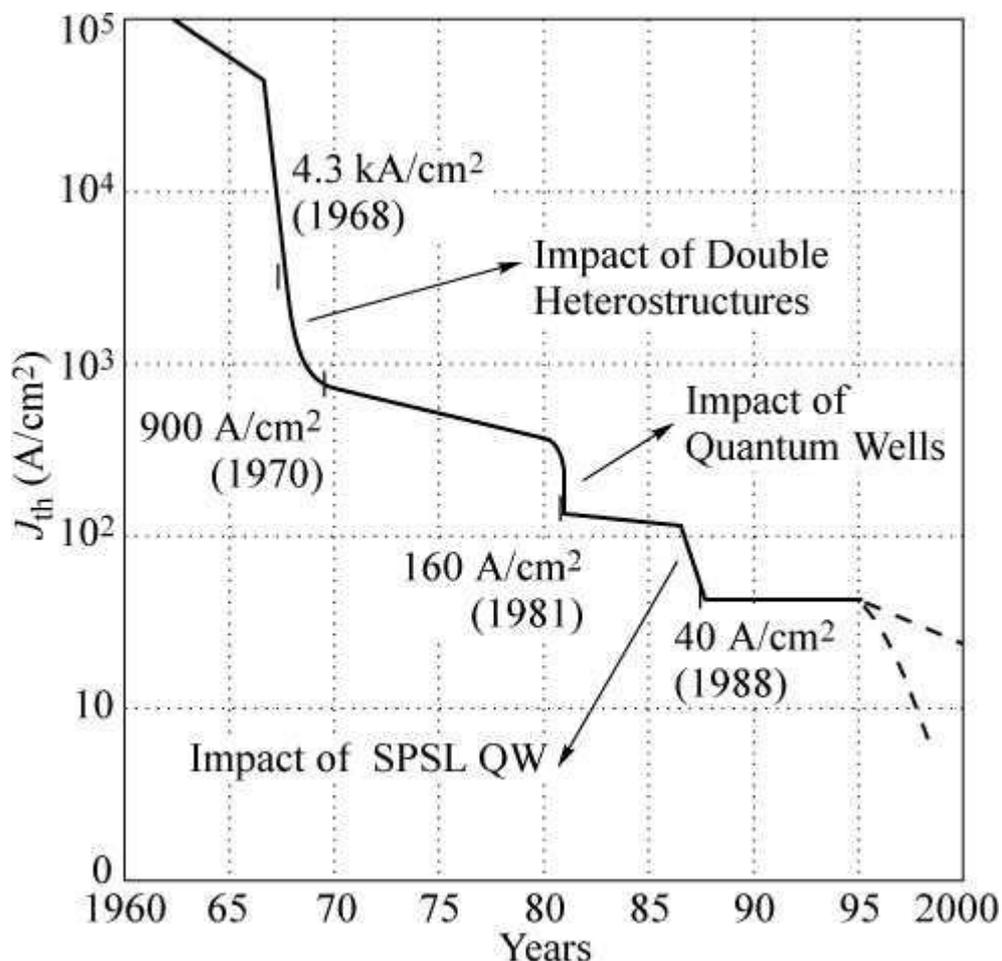


Рис. 6. Эволюция порогового тока полупроводниковых лазеров. Стрелками показаны важные этапы, слева направо: влияние двойных гетероструктур, влияние квантовых ям, влияние гетероструктур, содержащих квантовую яму "в окружении" короткопериодных сверхрешеток (рекордный для своего времени результат 40 А/см<sup>2</sup> был получен в Физико-техническом институте им.А.Ф.Иоффе). Данный график отражает ситуацию на момент середины 1990-х годов, в настоящее время лазеры на квантовых точках имеют пороговые плотности тока порядка 15 А/см<sup>2</sup>.

Подытожим. Если классические гетероструктуры открыли новые технологические горизонты, то использование низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур дает исследователям, технологам и инженерам практически неограниченную свободу рук. Можно сказать, что Нобелевский лауреат подарил человечеству своего рода "конструктор". Поскольку в наноструктурах существенную роль играют квантовомеханические эффекты, можно даже сказать "квантовый конструктор". Путем подбора параметров гетероструктуры (материалы, толщины (см. рис. 4) и последовательность расположения слоев etc.) исследователи теперь в состоянии получать структуры с требуемыми свойствами. Например, просто меняя номинальную толщину слоя CdTe в матрице ZnTe с 0.3 до 1.2 нм, мы изменяем длину волны излучения (при температуре 5 К) с 530 до 620 нм, т.е "переезжаем" из зелено-желтой области видимого спектра в красную.

Наверно, под занавес стоит сказать пару слов и о том, как обстоят дела с исследованием низкоразмерных структур в России в настоящее время.

Сложные методики роста, сложные экспериментальные методики - все это требует значительных финансовых затрат. Современная установка для молекулярно-лучевой эпитаксии, к примеру, стоит порядка миллиона долларов. Тем не менее, пока уровень российских научных работ в этой области остается достаточно высоким. И Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе, директором которого в настоящее время является Ж.И.Алферов, по праву можно назвать ведущим в России исследовательским центром в области полупроводниковых наноструктур. Высокий творческий потенциал, умелое использование советского технологического задела и широкая международная кооперация позволяют исследователям из питерского Физтеха быть на переднем краю. Хочется, пользуясь случаем, еще раз поздравить их и пожелать им новых успехов.

1. Ж.И.Алферов. ФТП, т.32, 3 (1998). Если кто-то интересуется историей развития полупроводниковых гетероструктур, то он может познакомиться с ней из первых рук: здесь <http://www.ioffe.rssi.ru/journals/ftp/1998/01/page-3.html> можно получить статью в формате pdf.

2. Ж.И.Алферов, Р.Ф.Казаринов. Авторское свидетельство N 181737, заявка N 950840 с приоритетом от 30 марта 1963 г.; H.Kroemer. Proc. IEEE, v.51, 1782 (1963).

3. Ж.И.Алферов. ФТП, т.1, 436 (1967).

4. Ж.И.Алферов, В.М.Андреев, Д.З.Гарбузов, Ю.В.Жиляев, Е.П.Морозов, Е.Л.Портной, В.Г.Трофим. ФТП, т.4, 1826 (1970).

5. L.Esaki, R.Tsu. IBM J.Res.Dev., v.14, 61 (1970).

## РОЖДЕНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР

А. ЖУКОВ, канд. физ.-мат. наук.

Санкт-петербургский Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе, лаборатория физики полупроводниковых гетероструктур, которой заведует академик Ж. И. Алферов. Здесь на установках молекулярно-пучковой эпитаксии выращиваются кристаллы с заданными свойствами. Основная цель такого рода установок - создание полупроводниковых гетероструктур, когда требуется очень тщательно контролировать толщины - с точностью до одного атомного слоя, это несколько ангстрем (А), ангстрем -  $10^{-10}$  метра (или  $10^{-4}$  микрона), - а также физические и электрические свойства кристаллических слоев полупроводника на атомном уровне. Контролируя потоки напыляемых атомов и молекул, здесь меняют свойства полупроводника. Вот что рассказал специальному корреспонденту журнала "Наука и жизнь" старший научный сотрудник лаборатории, кандидат физико-математических наук А. Жуков.



*Ж. И. Алферов в своей лаборатории. Слева - механик "золотые руки" В. П. Кузьмин. Ленинград, Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе, 1970-е годы.*

Рост кристалла происходит в вакуумной камере, причем вакуум здесь более высокий, чем в космосе. Постоянно работающие насосы накачивают жидкий азот, охлаждающий камеру.

Заглянуть внутрь и увидеть, как атомы падают на подложку, конечно, невозможно, но мы знаем, что это так. Работа идет круглосуточно, за сутки обычно выращивают от двух до восьми новых структур. Когда структура "готова", пластину диаметром от 5 до 7,5 сантиметра, на которой она выращивалась, отдают на измерение и исследование полученных свойств.

Подложка - это достаточно объемный кристалл, абсолютно одинаковый по толщине. Он служит затравкой, на которой мы выращиваем полупроводниковые гетероструктуры. Такая подложка устанавливается на держатель, который погружается в вакуумный шлюз. Он откачивается, подложка вместе с держателем передается в другую камеру, потом еще в одну - там уже высокий вакуум, а оттуда переходит в ростовую камеру. Здесь с помощью манипуляторов открываются вакуумные затворы и подложка ставится на манипулятор ростовой камеры. Затворы закрываются, подложка поворачивается "лицом" к молекулярным источникам, и начинается процесс роста.

Молекулярных источников несколько, можно увидеть лишь их внешнюю оболочку, сами они находятся глубоко внутри, в вакууме. Электрические выводы нагревают эти источники до нужной температуры. Когда металл или какой-то другой элемент нагревается, над его поверхностью образуется "газ" атомов и молекул, летящих в сторону подложки. Прервать этот поток позволяют электрически управляемые заслонки.

Падая на подложку, служащую своего рода механическим держателем, атомы или молекулы встраиваются в кристаллическую структуру и как бы ее наращивают. Но в отличие от самой подложки - заготовки, которая остается неизменной, в выращиваемой структуре можно менять химический состав ее слоев, добавляя примеси и делая эти слои электрически активными. Таким образом мы управляем самой кристаллической и электрической структурой выращиваемых слоев. Толщина подложки 400 микрон, толщина активного слоя выращенной полупроводниковой гетероструктуры всего 2 микрона, но именно эти 2 микрона и делают ее прибором, конечно, если полученный результат удовлетворит всем заданным параметрам. Весь процесс управляется компьютером, задача человека - написать нужную программу и контролировать температурный режим, работу заслонок и т.д.

В лаборатории Алферова есть и другие установки молекулярно-пучковой эпитаксии, на них исследуются гетероструктуры на основе кремния. Кремний, как известно, - основной материал для производства интегральных схем. А здесь мы занимаемся полупроводниками на основе арсенида галлия, так называемыми прямозонными полупроводниками, которые могут быть использованы в светоизлучающих приборах. Арсенид галлия и ему подобные полупроводниковые материалы - основа оптоэлектроники, то есть лазерных коммуникаций и фотоприемников, фотоприема лазерных коммуникаций.

Установка, на которой мы работаем, не промышленная, она "маленькая". Размеры промышленных установок значительно больше. Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе промышленным производством приборов не занимается, но даже эта установка может удовлетворить потребность в их мелкосерийном производстве, если такая задача встанет.

Подробнее см.: <https://www.nkj.ru/archive/articles/5823/> (Наука и жизнь, РОЖДЕНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР)

## ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ АЛФЁРОВА

*Физик, инженер, лектор, педагог, общественный и государственный деятель; профессор ЛЭТИ, ЛПИ, ректор СПбГЭТУ; академик, председатель президиума Санкт-Петербургского научного центра РАН, вице-президент АН СССР (РАН); член 30 национальных АН, научных сообществ; почетный доктор и профессор 40 отечественных и зарубежных научно-образовательных учреждений; глава научной школы; директор Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе; научный руководитель инновационного центра в Сколково; главный редактор журнала «Письма в Журнал технической физики»; кавалер орденов Октябрьской Революции, Ленина, «Знак Почета», Трудового Красного Знамени, «За заслуги перед Отечеством» четырех степеней, а также многих других орденов и медалей СССР, России и других государств; лауреат Ленинской премии, Нобелевской премии по физике за 2000 г. (вместе с Г. Крёмером), премии Балантайна Института Франклина (США) и других премий; народный депутат СССР, депутат ГД ФС РФ, Жорес Иванович Алфёров (род. 1930) является основоположником нового направления – физики гетероструктур, оптоэлектроники и электроники на их основе.*

Здесь перечислена лишь часть забот и наград академика, но нас интересует в первую очередь главное научное достижение Ж.И. Алфёрова, за которое он был удостоен благодарности человечества и самых почетных премий, в том числе Нобелевской по физике (2000) – «за развитие полупроводниковых гетероструктур для высокоскоростной и оптоэлектроники». Гетероструктурой в физике полупроводников называют выращенную на основном материале (подложке) слоистую структуру из различных полупроводников, отличающихся физико-энергетическими характеристиками материалов: шириной запрещенных зон, положением потолка валентной зоны и дна зоны проводимости. В месте контакта двух различных полупроводников формируется т. н. гетеропереход с повышенной концентрацией носителей, который, собственно, и используется затем в электронике.



*Ж.И. Алфёров*

Полупроводниковые гетероструктуры, полученные Алфёровым и его сотрудниками в результате фундаментальных исследований в области полупроводников, чрезвычайно интересные с научной точки зрения, нашли широчайшее применение в современной технике. По одним только своим габаритам они не идут ни в какое сравнение с традиционными радиосхемами. Слои полупроводников, имеющие толщину в несколько атомов, представляют собой крохотные кристаллики, рядом с которыми резисторы, конденсаторы, лампы выглядят мастодонтами. Скажем, размеры активного элемента полупроводникового лазера колеблются в диапазоне от 50 мкм до 1 мм.

Эти структуры идут для изготовления электронных устройств – лазерных диодов, на которых основана работа современных компьютеров, Интернета, сотовой связи, лазерных компакт-дисков, устройств, декодирующих товарные ярлыки, лазерных указок, спутниковых антенн, систем космической связи. На основе гетероструктур работают мощные светодиоды, используемые в светофорах, лампах тормозного освещения в автомобилях, дисплеях. Появление гетерогенных структур привело к созданию производства солнечных батарей – основы будущей солнечной энергетики, которая, по мнению Алфёрова, «к концу XXI столетия, если не раньше, в значительной степени заменит атомные и тепловые электростанции».

Надо сказать, что это открытие первыми поспешили использовать зарубежные инженеры и предприниматели, но это не вина его авторов, а наша с вами беда.

Какова же история открытия?

В 1960-х гг. в мире возникла идея совершенствования полупроводниковой техники за счет гетеропереходов, которая какое-то время не поддавалась реализации. Многочисленные попытки создания всевозможных приборов, работающих на этом принципе, заканчивались ничем только из-за того, что для результативного гетероперехода надо было найти идеальную гетеропару – это было сделать не легче, чем создать идеальную семью.

Доказав, что в гетероструктурах можно эффективно управлять световыми и электронными потоками, и применив в своих исследованиях специальную методику, позволявшую варьировать ширину запрещенной зоны, показатель преломления, величину электронного сродства, эффективную массу носителей тока и другие параметры полупроводника, Алфёров в результате многочисленных экспериментов, ежедневно длящихся у него до часа ночи, смог подобрать идеальную гетеропару: арсенид алюминия и арсенид галлия (AlAs/GaAs), а затем GaAs/AlGaAs, отличавшуюся большей стойкостью к окислению на воздухе. Эти гетеропары вскоре обрели в мире электроники мировую известность.

На основе полученных гетеропар были созданы гетероструктуры, отвечавшие требованиям идеальной модели, и в 1969 г. сконструирован первый в мире полупроводниковый гетеролазер. Область применения лазеров поначалу была весьма ограниченной, поскольку они могли работать только при низких температурах, иногда не выше 200 К.

В 1970 г. на смену AlGaAs-системе Алфёровым и его сотрудниками были предложены соединения InGaAsP, позволившие создать более совершенные лазеры, нашедшие широкое применение в качестве источников излучения в волоконно-оптических линиях связи повышенной дальности.

В 1970-х гг. ученый разработал первые в мире технологии радиационно-стойких солнечных элементов на основе AlGaAs/GaAs-гетероструктур и организовал крупномасштабное производство гетероструктурных солнечных элементов для космических батарей. Одна из них была установлена в 1986 г. на космической станции «Мир» и эффективно проработала на орбите весь положенный ей срок эксплуатации.

В 1993 г. в лаборатории Алфёрова были сконструированы полупроводниковые лазеры на основе структур с квантовыми точками – «искусственными атомами».

В 1995 г. ученый продемонстрировал инжекционный гетеролазер с использованием квантовых точек на подложках GaAs, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре, что резко повысило возможность его применения и тут же развязало руки создателям быстродействующих элементов электронной техники.

У такого лазера не оказалось конкурентов – он практически безынерционен, его КПД превышает в несколько раз КПД прочих лазеров, а длину волны можно изменять на любую другую.

Исследования Алфёрова позволили кардинально улучшить параметры большинства полупроводниковых приборов, создать для оптической и квантовой электроники широчайшие возможности ее совершенствования и заложить основы принципиально новой электроники на основе гетероструктур – т. н. «зонной инженерии».

Предположения ученого, высказанные им 15 лет назад, что «в XXI веке на основе квантовых точек будут созданы уникальные по свойствам лазеры и транзисторы, появятся совершенно новые приборы и, наверное, возникнет то, что сегодня предсказать невозможно», сбылись.

Следующим шагом в развитии гетероструктур стало применение новых способов обработки информации, когда, смоделировав процесс, можно стало создавать структуры, состоящие из цепочек атомов, имеющих уже не микро-, а наноразмеры (нанометр – одна миллиардная доля метра), и на смену микроэлектронике получить нанотехнологии.

В многочисленных интервью и публикациях Ж.И. Алфёрова, весьма озабоченного состоянием науки и образования в современной России, можно найти много жестких и поучительных высказываний.

«Если развалится образование, остановится наука, то прекратится и... "воспроизводство гениев". Наступит всеобщее мозговое затмение».

«Всегда полезно брать уроки у истории... Когда в 1921 году Рождественский, Иоффе и Крылов поехали в первую после Гражданской войны заграничную командировку закупать научное оборудование, а денег на это у государства не было, они обратились к Ленину и Луначарскому. И им выделили средства из золотого запаса. В Физико-технический институт поступили тогда 42 ящика с приборами, и по оснащению он стал одним из первых в мире. Чем не исторический урок для нынешнего российского руководства?»