

Физика полупроводников и современная электроника

Академик НАН РК Б. Н. Мукашев

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

1. Введение

Физика полупроводников – область физики твёрдого тела, изучающая особенности свойств полупроводников и происходящих в них физических явлений, которые используются при создании полупроводниковых приборов. Полупроводники и полупроводниковые приборы являются основой современной электроники, устройства которой широко используются в информационной и вычислительной технике, оптоэлектронике и солнечной энергетике, телекоммуникации и средствах связи [1-3]. Наибольшее практическое применение находят неорганические кристаллические полупроводниковые материалы, которые по химическому составу разделяются на следующие основные группы: элементарные полупроводники (Si, Ge и др.), соединения типа A^{III}B^V (GaAs, GaN, InP и др.), A^{II}B^V (CdTe, ZnTe и др.) и карбид кремния – SiC, которое является единственным химическим соединением, образуемым элементами IV группы. Важным свойством Si и Ge, A^{III}B^V и A^{II}B^V является возможность образования между собой непрерывного ряда тройных и более сложных полупроводниковых твердых растворов, значительно расширяющих сферу их применения. На основе этих материалов изготавливаются полупроводниковые приборы, к которым относятся твёрдотельная интегральная электроника (микро- и наноэлектроника), диоды и транзисторы (приборы с зарядовой связью, СВЧ и оптоэлектронные приборы. солнечные элементы, лазеры и т.д.) [1-4]. Производство полупроводниковых материалов и приборов является высокотехнологичным, собственно термин «высокие, научноёмкие технологии» возник в связи с разработкой технологий изготовления полупроводниковых приборов и, в первую очередь, микроэлектроники[4].

Однако термины и понятия, характеризующие новые области науки и техники не стандартизо-

ваны и, соответственно, во многих случаях не разработана и общепринятая терминология. Это в полной мере относится и к научноёмким технологиям, так в [5, 6] отмечается «какой-либо одной предпочтительной методологии идентификации высокотехнологичных отраслей промышленности не существует». В то же время, если под технологией понимается совокупность методов и приемов, применяемых на всех стадиях разработки и изготовления определенного вида изделий [4], то научность отражает степень использования в них исследовательских разработок (ИР). Из этого следует, что такие показатели, как добавленная стоимость реализуемого продукта и процент объёма затрат на ИР для научноёмкой отрасли должны быть выше, чем для других, не относящихся к высокотехнологичным отраслям промышленности. Эти показатели являются неотъемлемыми характеристиками научноёмких технологий [4-6]. Например, в США доля затрат на ИР от прибыли в докризисный период составляла [5,6]: в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем ~12%, в компьютерной и фармацевтической ~8% в станкостроительной промышленности ~3% и т.д. Поэтому определение высоких технологий как совокупности информации, знаний, опыта, материальных средств при разработке, используемых при создании и производстве новой продукции и процессов в любой отрасли экономики, имеющих характеристики высшего мирового уровня [4-6], по-видимому, наиболее полно отражает смысловое содержание этого термина.

Достижения в области полупроводниковой электроники несомненны и связаны как с методами получения и модификации свойств полупроводников, так и основными фундаментальными открытиями в физике полупроводников: изобретением транзисторов и микросхем, квантово-размерных эффектов и лазерной генерации, квантового целочисленного и дробного эффекта Холла,

экзитонных эффектов в структурах пониженной размерности, электронных эффектов в состояниях, далеких от термодинамического равновесия. Эти открытия были удостоены ряда Нобелевских премий. Благодаря успехам в исследований, расширилась область использования широкозонных полупроводников в электронике и солнечной энергетике, а спектр их излучения и преобразования солнечной энергии расширился вплоть до ультрафиолетового диапазона. Термин «наноэлектроника», с одной стороны, логически связан с термином «микроэлектроника» и отражает переход современной полупроводниковой электроники от элементов с характерным размером в микронной и субмикронной области к элементам с размером в нанометровой области ($1 \text{ нм} = 0,001 \text{ мкм} = 10^{-9} \text{ м}$). Этот процесс развития технологий отражает эмпирический закон Мура, согласно которому количество транзисторов на кристалле увеличивается в два раза через каждые 24 месяца при сохранении той же стоимости для пользователей. Этот закон выполняется на протяжении более чем 50-ти лет и, по существу, отражает этапы исследования и реализации твёрдотельной электроники [7-9]. Пределы плотности монтажа элементов, которые превышают сто миллионов транзисторов на кристалл, связаны с физическими ограничениями для их минимальных размеров и в настоящее время проводится активная работа как в области совершенствования кремниевых, так и по созданию конкурентоспособных принципиально новых технологий для компьютеров нового поколения [10, 11]. Поэтому, с другой стороны, термин «наноэлектроника» связан с разделом полупроводниковых приборов, действие которых основано на квантово-размерных эффектах. К такимnanoструктурам относятся квантовые ямы, нити, точки и сверхрешётки, которые имеют широкие возможности для практического использования [1-3, 9, 12, 13].

Казахстан не имеет электронной промышленности, поэтому необходимо предусмотреть поэтапную организацию высокотехнологичных, но более простых в исполнении полупроводниковых производств, выпускающих дискретную диодную и транзисторную технику. Эти приборы являются элементной базой для энергоустановок по преобразованию солнечной энергии в электрическую и силовых преобразователей для электроэнергетики. Очевидно, что технологии получения и

производства полупроводниковых материалов имеют первостепенное значение для организации производств, поскольку они являются основой для создания и дискретной, и интегральной электронной техники.

Более чем 90% мирового производства полупроводниковых приборов изготавливается на основе кремния. Физико-химические основы технологии получения кремния для электронной промышленности достигли высокой степени совершенства и, если стоимость пластин при производстве микросхем (более 100 миллионов транзисторов на чип) не является определяющей в общей стоимости конечной продукции, то при изготовлении солнечных батарей (СБ), где одна структура занимает площадь всей пластины, стоимость материала достигает до 40% от её стоимости. Следует отметить, что производство кремниевых СБ в последнее докризисное пятилетие развивалось с годовым приростом почти 50%, причём спрос опережал предложение, а производство сдерживалось дефицитом специального «солнечного» кремния. Поэтому разработчики технологий и производители кремния уделяли и уделяют большое внимание снижению стоимости материала. Предложены ряд металлургических, химических и физических способов очистки технического кремния, который получают методом так называемого карбонтермического восстановления кремния из диоксида кремния [14-23]. Эти методы отличаются исключением хлорсилановых, газовых циклов многоступенчатой очистки технического кремния, вследствие чего достигается значительное снижение стоимости «солнечного» кремния. Другим методом получения технического кремния является метод его аллюмотермического восстановления из диоксида, находящегося в синтетических и техногенных шлаках. Этим методом можно достичь дальнейшего снижения стоимости [18-20].

Для солнечной энергетики наряду с материалами имеет важное значение и технологии изготовления СБ. Кремниевые СБ на пластинах и полученные с использованием тонкоплёночных технологий, занимают в настоящее время ~85 и ~8% мирового производства СБ, соответственно. Оставшаяся доля приходится на производство СБ, использующее полупроводниковые соединения, а также многослойные и высокоэффективные СБ на nanoструктурных материалах [21-23]. Особо следует выделить направление по разработке

методов получения кремниевых подложек низкой стоимости для осаждения эпитаксиальных слоев и синтеза тонкопленочных СБ. Это направление является чрезвычайно актуальным и получило название «*wafer equivalent technology*», которое означает технологию, эквивалентную кремниевым СБ на пластинах, и предусматривает разработку методов получения подложек низкой стоимости для тонкопленочных СБ [21-22]. Другим перспективным направлением является технология получения «солнечного» кремния с использованием метода инженерии дефектов, т.е. путём перевода электрически активных примесей в электрически неактивные нанокластерные формирования – наноцентры [24].

2. Физика полупроводников и основные направления развития полупроводниковой электроники

2.1. Физика полупроводников (ФП). ФП является одной из наиболее динамично развивающихся областей науки, обеспечивающей новыми открытиями, методологическими и технологическими разработками полупроводниковую электронику, которая является основой полупроводниковой электронной промышленности. Продолжающиеся исследования целочисленного и дробного квантового эффекта Холла, гетероструктур и сверхрешёток, открытия полупроводниковых углеродных нанотрубок и графенов, а также новых физических явлений в материалах и устройствах с пониженной размерностью будут определяющими и на ближайшее десятилетие [1-3, 25-29]. В связи с миниатюризацией и увеличением плотности элементов в интегральной электронике не менее важными являются проблемы физики и химии поверхности полупроводников, границ раздела и дефектов кристаллической структуры и примесей. Кроме того в связи с необходимостью создания нового поколения силовых и светоизлучающих приборов, а также фотопреобразователей актуальными остаются работы в области широкозонных соединений $A_{III}B_V$, SiC и твёрдых растворов на основе элементов, образующих эти соединения. Их использование позволяет расширить диапазон рабочих температур по сравнению с кремнием и создавать области с очень высоким удельным сопротивлением, что приводит к повышению быстродействия. Вместе с тем кремний остаётся

основным материалом полупроводниковой электроники и создание чрезвычайно важных для практического использования его новых форм таких, как напряжённый кремний или его существование в виде разнообразных соединений значительно расширяет области его исследований и применений. Кремний также является основным материалом для фотоэнергетики и технологически на его основе достаточно просто создаются наноструктуры.

2.2. Полупроводниковая электроника (ПЭ). Основными разделами ПЭ являются интегральная (микросхемы микро- и наноэлектроники) и дискретная электроника. В микросхемах активные (транзисторы) и пассивные (диоды, резисторы и др.) элементы интегрируются на кристалле, а в дискретной (мощные приборы для электроэнергетики, структуры с зарядовой связью, СВЧ и оптоэлектронные приборы, солнечные элементы, лазеры, и др.) изготавливаются в виде отдельных приборов, или в виде матриц для структур с зарядовой связью. Оба направления ПЭ основываются на научных достижений физики полупроводников, но особенно быстрыми темпами развивается интегральная электроника. По образному выражению одного из создателей микроэлектроники, предсказавшего её быстрое развитие Гордона Мура «Если бы автомобилестроение развивалось со скоростью эволюции полупроводниковой промышленности, то сегодня роллс-ройс мог бы проехать полмиллиона миль на одном галлоне бензина, и дешевле было бы его выбросить, чем заплатить за парковку». Это образное выражение подчёркивает существенный характер качественных изменений конечного продукта, имеющий место через каждые два года при **сохранении той же стоимости для пользователей**. Это обеспечивает беспрецедентный рост продажи, и, соответственно прибыли, что в свою очередь поддерживает высокий уровень инвестиций в ИР в области интегральной электроники. Развитие же интегральной электроники осуществляется в двух главных направлениях: **переход от микро- к наноэлектронике** на основе уменьшения топологических размеров их базовых элементов и **переход к наноэлектронике**, на принципиально новой элементной базе, использующей разнообразные низкоразмерные структуры, сверхрешётки (СР), квантовые ямы (КЯ), квантовые нити (КН) и квантовые точки (КТ). Отличительной особенностью

этих наноструктур является проявление квантовых эффектов: размерного квантования, конфайнмента, туннелирования, интерференции электронных состояний и др. [1-3, 10-13, 25-29].

2.3. Интегральные микросхемы. Безусловно доминирующим электронным продуктом с момента их появления на рынке являются кремниевые интегральные микросхемы (ИМ) с характерной масштабно-временной зависимостью миниатюризации их элементов (закон Мура, рис. 2.3.1 [7, 8]).

Объём продаж ИМ в предкризисный период превышал – 200 млрд. долларов США в год. ИМ были изобретены в 1958 году, через десять лет после открытия транзисторного эффекта, но уже в начале 60-х годов, Гордон Мур, анализируя рост схемных блоков интегрированных на кристалл, сформулировал закон, согласно которому число транзисторов на кристалле ИМ должно удваиваться через каждые два года при сохранении

той же стоимости для потребителей (рис. 2.3.1). Этот закон сохраняется на протяжении 50 лет и характеризует чрезвычайно быстрое развитие микроэлектроники и, соответственно её базовых научно-технических областей [1-3, 7-9]. Определяющим фактором при миниатюризации являются топологические размеры, которые уменьшились с 10 мкм в 1970 году до 0.05 мкм в настоящее время. Один из базовых элементов ИМ показан на рис. 2.3.2.

Применение литографии в крайнем ультрафиолетовом диапазоне, разработка трёхмерной конфигурации транзисторов в технологии ИМ, использование напряжённого кремния и других инноваций позволяют ещё, по крайней мере на десять лет, продлить действие этого закона, а в дальнейшем развитие ИМ пойдёт, вероятно, по пути интеграции технологий углеродных нанотрубок и молекулярной электроники с кремниевыми [10-13, 25, 26, 29].

Moore's Law

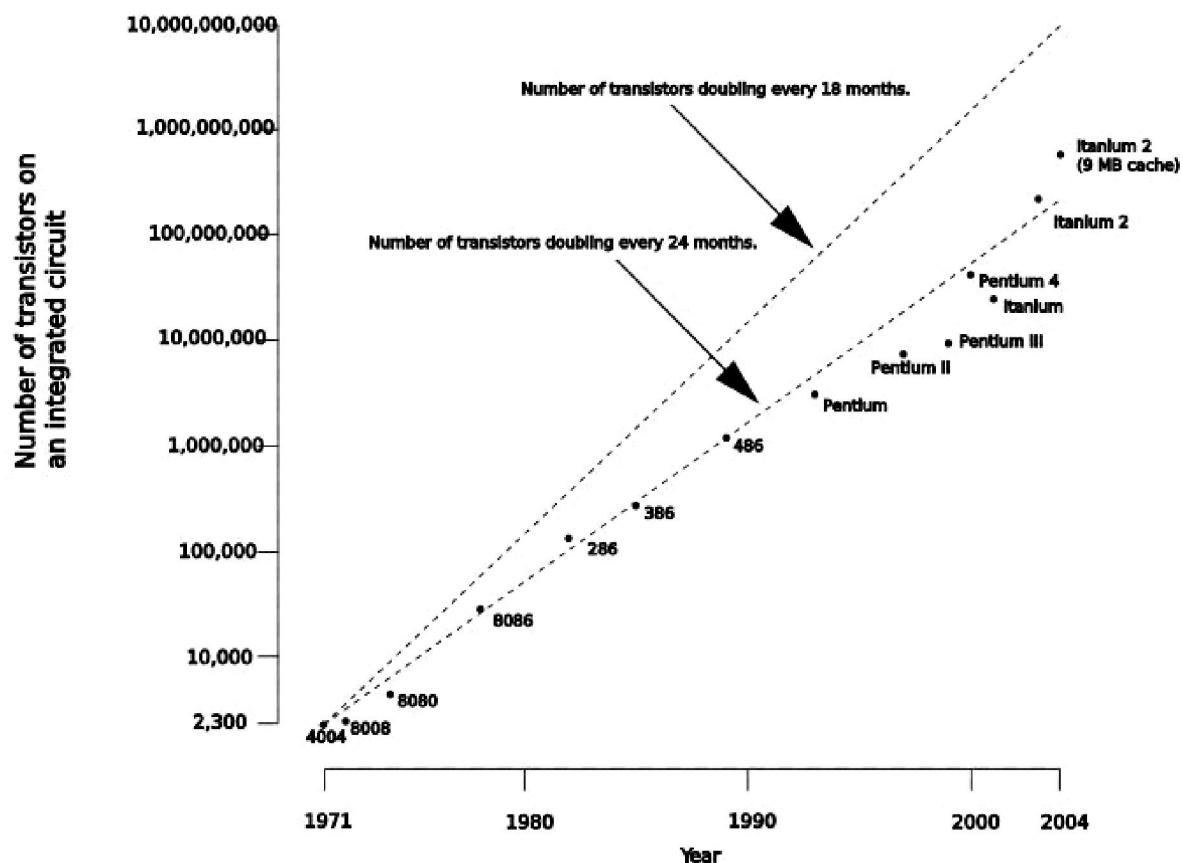


Рис. 2.3.1. Временная зависимость роста числа транзисторов на кристалле ИМ

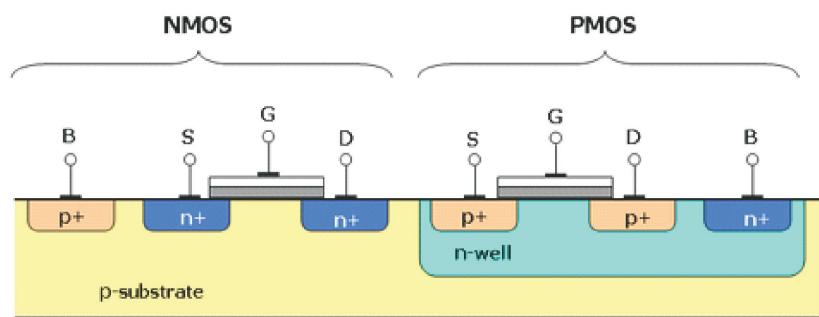


Рис. 2.3.2. Один из базовых элементов современных ИМ – n- и p-канальные транзисторы
(рис. взят из ИНТЕРНЕТ-энциклопедии)

2.4. Полупроводниковые структуры с пониженной разомерностью: квантовыеnanoструктуры и сверхрешетки. Квантово-размерные эффекты и nanoструктуры. Квантово-размерные эффекты. По мере приближения размеров твердотельных структур к нанометровой области, а это образования из единиц и десятков атомов, все больше проявляются квантовые свойства электрона. В его поведении преобладающими становятся волновые закономерности, характерные для квантовых частиц. С одной стороны, это приводит к нарушению работоспособности классических транзисторов, использующих закономерности поведения электрона как классической частицы, а с другой – открывает перспективы создания новых ИМ, уникальных переключающих, запоминающих и усиливающих элементов для информационных

систем. Распространение волновой функции электрона в наноразмерных твердотельных структурах контролируется эффектами, связанными с квантовым ограничением, интерференцией и возможностью туннелирования через потенциальные барьеры.

Квантовое ограничение (конфайнмент) и плотность состояний. Квантовое ограничение хотя бы в одном направлении приводит к увеличению минимальной энергии электрона и дополнительному квантованию энергетических уровней, соответствующих его возбужденному состоянию. Это и является основной причиной того, что электронные свойства наноразмерных структур отличаются от известных объемных свойств материала. На рис. 2.4.1 схематично показаны функции плотности состояний для различных размерностей [26]. Для трёхмерного распределения

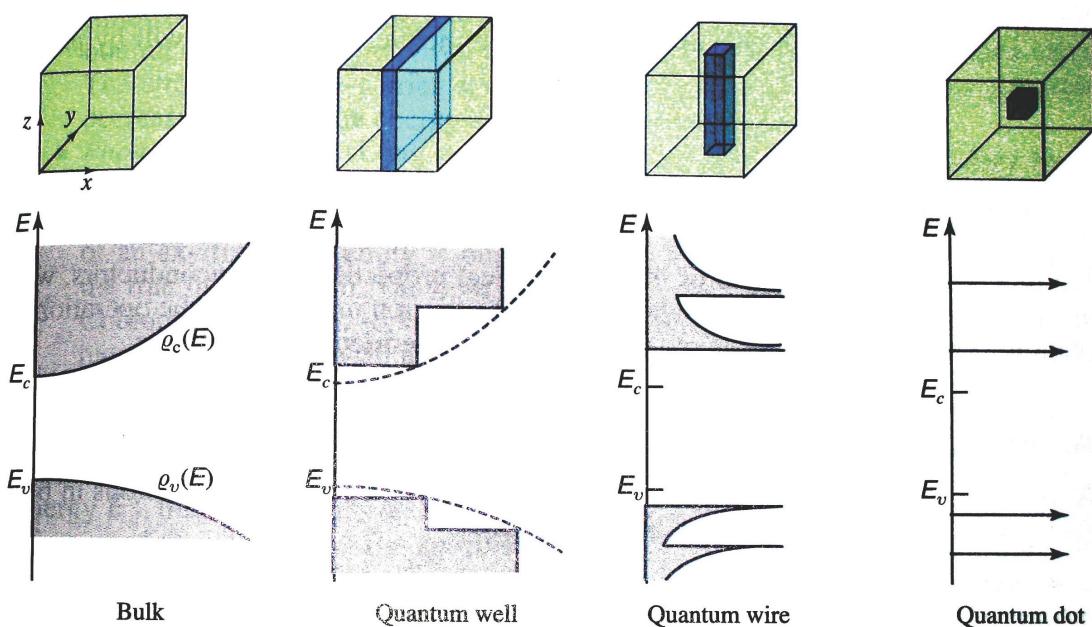


Рис. 2.4.1. Распределения плотности состояний электронов в кристалле, КЯ, КН и КТ [26]

электронов (3Д, кристаллы) – плотность состояний растет с энергией (E) как $E^{1/2}$, в КЯ (2Д) – двумерное распределение имеет вид горизонтальных ступенек, в КН (1Д) – одномерное распределение растет при приближении к энергии очередного квантового уровня, и, наконец, в КТ (0Д) – нулевая размерность, состояния электрона имеют дискретные уровни, также как для изолированного атома.

Интерференционные эффекты. Взаимодействие электронных волн в наноразмерных структурах как между собой, так и с их неоднородностями может сопровождаться интерференцией, аналогичной той, которая наблюдается для световых волн. Отличительная особенность такой интерференции состоит в том, что благодаря наличию у электронов заряда имеется возможность управлять ими с помощью локального электростатического или электромагнитного поля и таким образом влиять на распространение электронных волн.

Туннелирование. Квантовое ограничение, проявляясь в наноразмерных структурах, накладывает специфический отпечаток и на туннелирование. Так, квантование энергетических состояний электронов в очень тонких, периодически расположенных потенциальных ямах приводит к тому, что туннелирование через них приобретает резонансный характер, то есть туннельно пропускаться через такую структуру могут лишь электроны с определенной энергией. Другим специфическим проявлением квантового ограничения является одноэлектронное туннелирование в условиях кулоновской блокады. В этом случае

процесс, например, в структурах диэлектрик – металл, определяется балансом сил кулоновского взаимодействия этого электрона с другими подвижными и неподвижными зарядами в металле, перенос заряда осуществляется отдельными электронами

Квантово-размерные структуры. КЯ – двумерныеnanoструктуры, движение электронов, в которых квантовано в одном направлении. Основные физические явления в КЯ: размерное квантование электронного спектра, квантовый эффект Холла (целочисленный и дробный), возможна реализация систем с очень высокой подвижностью электронов. Основные методы получения квантовых ям на гетероструктурах: металлоорганическая газовая эпитаксия и молекулярно-пучковая эпитаксия. Обычно КЯ создают, помещая тонкий слой полупроводника с узкой запрещенной зоной между двумя слоями материала с более широкой запрещенной зоной. В результате электрон оказывается запертным в одном направлении, что и приводит к квантованию энергии поперечного движения. В то же время в двух других направлениях движение электронов будет свободным, поэтому можно сказать, что электронный газ в квантовой яме становится двумерным. Таким же образом можно подготовить и структуру, содержащую квантовый барьер, для чего следует поместить тонкий слой полупроводника с широкой запрещенной зоной между двумя полупроводниками с узкой запрещенной зоной. Энергетическая схема квантовой ямы, полученной на соединениях ряда $A^{III}B^V$, показана на рис. 2.4.2 [12, 13].

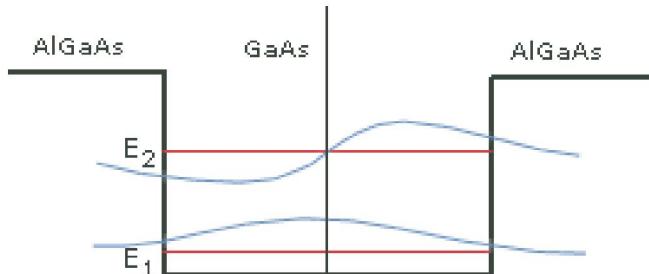


Рис. 2.4.2. Квантовая яма, сформированная в слое полупроводника с узкой запрещенной зоной, заключенном между двумя полупроводниками, обладающими более широкой запрещенной зоной

Важно отметить, что волновые функции электронов на границе ямы не обращаются в нуль. Поэтому возможен процесс туннелирования электрона, т.е. его можно обнаружить и за пределами ямы, в области, где полная энергия меньше потенциальной. КН – это одномерные системы, в которых движение носителей заряда квантовано в двух направлениях.

Первые квантовые нити выполнялись на основе квантовых ям посредством создания потенциального рельефа с помощью двух затворов, расположенных над квантовой ямой. Основные физические явления в квантовых нитях: квантование проводимости, сильно коррелированный электронный транспорт.

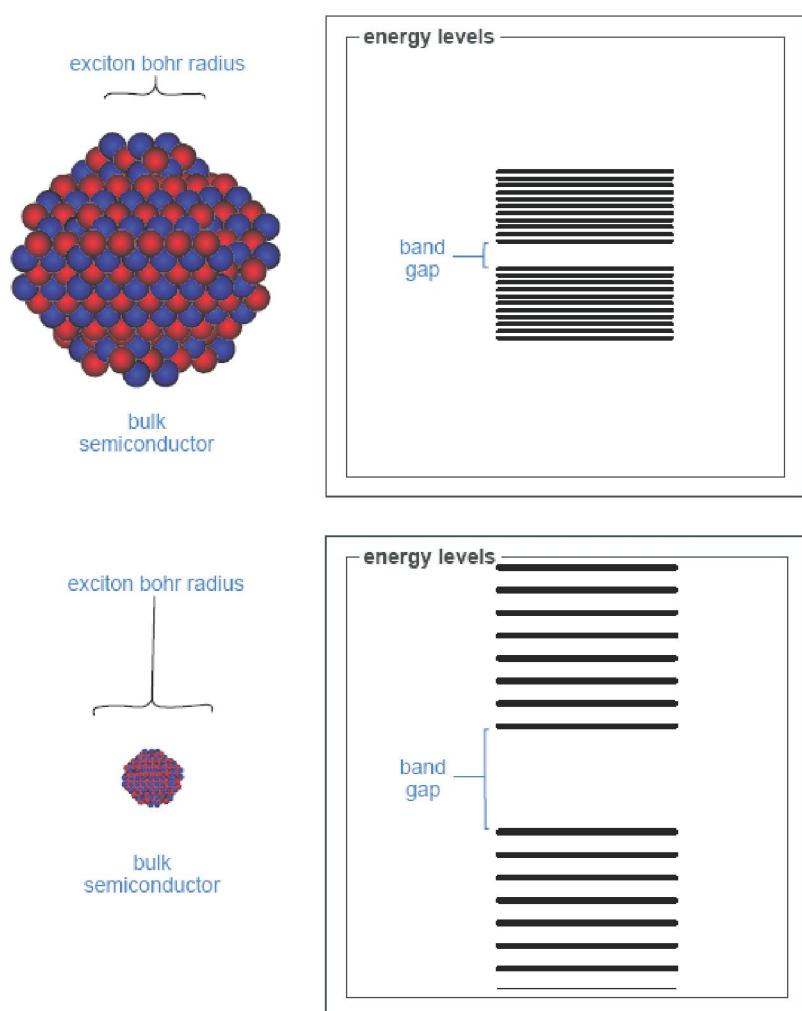


Рис. 2.4.3. Зависимость спектра энергетических уровней от размеров КТ [26-28]

Основные методы получения квантовых проволок те же, что и квантовых ям, плюс использование прецизионного травления или специальных затворов. КТ – нульмерныеnanoобъекты, в которых движение носителей заряда квантовано во всех трех направлениях, и имеют дискретный энергетический спектр, соответствующий электронному спектру одиночного атома, хотя реальный квантовый объект при этом может состоять из сотен или тысяч атомов. Поэтому квантовые точки называют “искусственными атомами”.

Квантовые точки являются важными nanoобъектами с многочисленными практическими применениями. Многие их важные свойства, такие как поглощение и люминесценция определяются их размерами. Рис. 2.5 является иллюстрацией частоты люминесценции (цвета) от ширины запрещённой зоны КТ от их размера, т. е. КТ теллурида селена размером 5 нм светятся

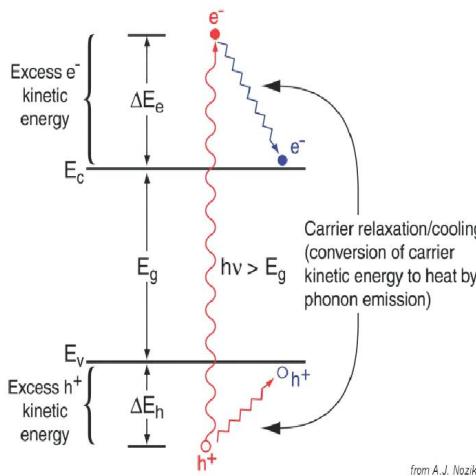
красным цветом, 1,5 нм – фиолетовым. Основные физические явления в квантовых точках: одноэлектронные и однофотонные явления. Методы получения те же, что и для квантовых ям, однако возможно использование прецизионной литографии для создания квантовых точек из квантовых ям.

Сверхрешётки – периодические пленочные системы с толщинами слоев от 1 до 100 нм, синтезируемые на поверхности монокристаллической матрицы. Сверхрешётка представляет собой последовательность чередующихся слоев узко-зонного (яма) и широкозонного (барьер) полупроводников. Появление дополнительного периода (толщина слоя ямы + толщина слоя барьера), превышающего период кристаллической решётки (отсюда термин «сверхрешётка»), приводит к изменению энергетического спектра структуры, т. е. происходит образование естественных

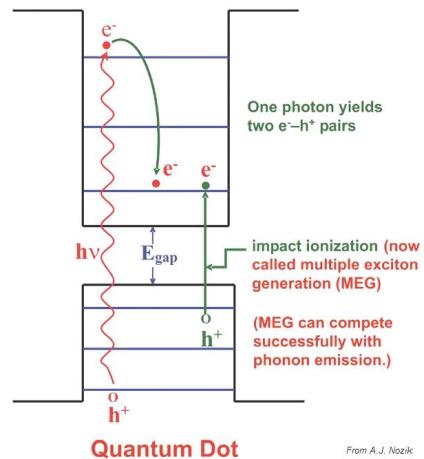
кристаллов из отдельных атомов. Из-за того, что волновые функции электронов перекрываются (электроны «чувствуют» друг друга), система уровней энергии атомов преобразуется в систему энергетических полос (зон), в пределах которых электроны могут свободно перемещаться по кристаллу. Так и в сверхрешетке уровни в отдельных квантовых ямах сливаются в энергетические «минизоны», только, в отличие от естественного кристалла, ширинами минизон можно управлять, меняя толщины барьера. Нобелевский лауреат Лео Эсаки, открывший туннельные эффекты, а впоследствии синтезировавший сверх-

решётки, назвал их «одномерными кристаллами, созданными человеком» [12].

2.5 Применение квантово размерных структур. Фотовольтаика. Фотопреобразователи (ФЭП) преобразуют солнечную энергию в электрическую [1-4]. Механизм преобразования показан на рис. 2.5.1 [27-28]. При поглощении кванта солнечного света с энергией, превышающей ширину запрещённой зоны в кристаллах (3Д), один квант рождает одну электронно-дырочную пару. Эти пары в ФЭП и являются источником генерации электрической энергии.



from A.J. Nozik



from A.J. Nozik

Рис. 2.5.1. Образование электронно-дырочных пар при поглощении фотона в кристалле (а) и КТ (б) [27, 28]

Избыток энергии идёт в этом случае на нагрев кристалла. В КТ при переходе электрона на нижний уровень происходит рождение второй пары, т.е. один квант рождает две пары носителей заряда.

Этот процесс получил название множественной экситонной генерации и приводит к увеличению эффективности ФЭП на КТ. Другой физической причиной, вызывающей увеличение к.п.д. является образование зоны разрешённых состоя-

ний в ФЭП, базовая область которых сформирована из послойного массива квантовых точек различных размеров (рис. 2.5.2). В этом случае в середине запрещённой зоны основного полупроводника образуется дополнительная промежуточная зона разрешённых состояний, что существенно увеличивает энергетический спектр квантов, приводящих к образованию электронно-дырочных пар. Это приводит к значительному увеличению к.п.д. ФЭП. Теоретический предел для ФЭП на

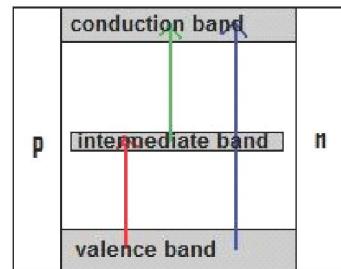
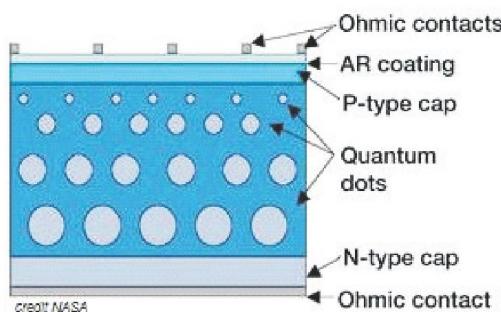


Рис. 2.5.2. ФЭП на основеnanoструктуры, содержащей послойные массивы КТ различных размеров [27]

КТ составляет 63,2% по сравнению с 40,7% для обычных ФЭП [27]. В настоящее время несколько лабораторий сообщили о синтезе послойного массива КТ InAs в GaAs, кроме того предложены новые методы создания структур на КТ [27, 28].

Другим примером использования квантово размерных структур являются высокоеффективные гетероструктурные элементы с концентрированием солнечной энергии (рис. 2.5.3), которое может осуществляться, например, с помощью линз Френеля с коэффициентом концентрации до 1000 крат [33]. Солнечное излучение, падающее,

например, на поверхность 40x40 мм, концентрируется на площади менее 3 мм². Элементы при этом не нагреваются из-за малой единичной мощности (~1 Вт) солнечного излучения, собираемого минилинзами. В таких концентраторных фотоэлектрических системах стоимость электроэнергии может быть уменьшена более чем в 2 раза, благодаря снижению в 1000 раз площади солнечных элементов. При этом удельный энергосъем в концентраторных фотоэнергосистемах может быть увеличен в 3 раза за счет большего КПД и обеспечения постоянной ориентации на Солнце.

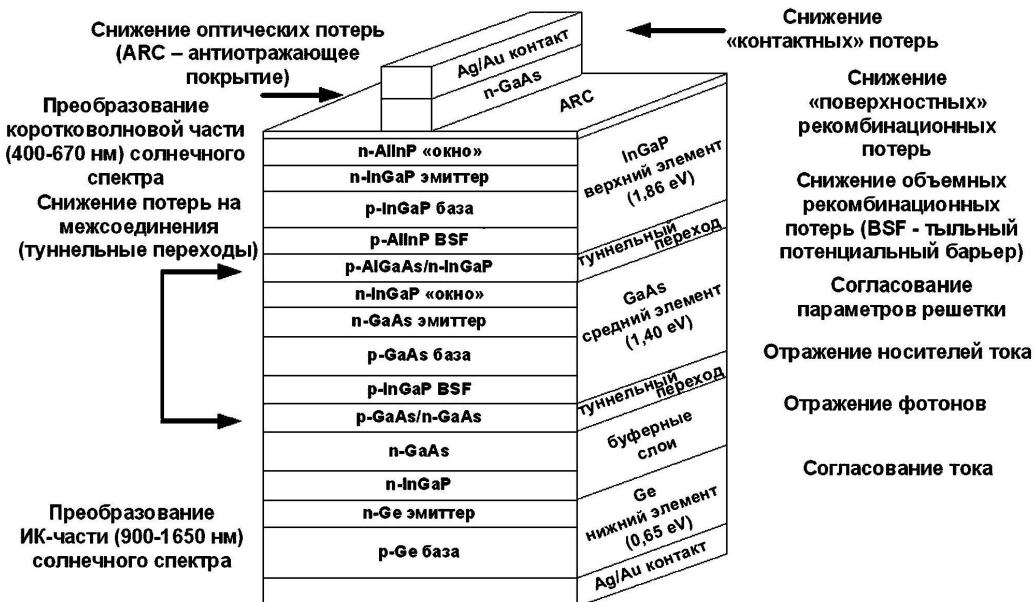


Рис. 2.5.3. Гетероструктурный каскадный ФЭП, обеспечивающий к.п.д. > 35% при концентрации 1000 «солнц» [33]

Технология изготовления таких ФЭП и действующие макеты солнечных электростанций на них разработаны в Физико-техническом институте им А.Ф. Иоффе в Санкт-Петербурге, в одном из ведущих мировых центров в области физики полупроводников и полупроводниковой электроники [13, 33].

Лазеры с КЯ и КТ. Основное влияние на свойства лазеров оказывает изменение плотности состояний, происходящее под влиянием размерного квантования. Если в массивном полупроводнике в непосредственной близости от края зоны эта величина мала, то в квантово-размерной системе она вблизи края не убывает (рис. 2.3). Создание лазеров с квантово-размерной активной областью позволило получить непрерывную генерацию при комнатной температуре и в дальнейшем снизить пороговый ток инжекционного лазера до величин ~ 50 A/cm². Благодаря иной

энергетической зависимости плотности состояний меняется не только величина порогового тока, но и его температурная зависимость. Она становится более слабой, в силу чего непрерывную генерацию удается получить не только при комнатной температуре, но и при более высоких температурах.

Можно выделить ряд других особенностей лазеров. Для лазеров на квантовых ямах является возможность их частотной перестройки путём изменения ширины квантовой ямы. В КТ энергетический спектр меняется еще более радикально, чем в квантовых ямах, поэтому лазеры на КТ обладают существенно большим коэффициентом усиления, меньшей пороговой плотностью тока, полной невосприимчивостью к температуре решетки, лучшими динамическими характеристиками и большими возможностями для контроля за энергией кванта излучения [13].

Фотоприемники на КЯ и КТ. Для создания приемников инфракрасного излучения использовались процессы оптической ионизации квантовых ям. Принцип приемника весьма прост: выброс носителей в зону проводимости широкозонного полупроводника (потенциального барьера) увеличивает проводимость в направлении, перпендикулярном слоям гетероструктуры. По своему действию такой приемник напоминает примесный фоторезистор, где в роли центров выступают квантовые ямы. Для самой распространенной гетеросистемы $\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$ диапазон фоточувствительности структуры лежит в области длин волн порядка 8 мкм, соответствующей одному из окон атмосферной прозрачности и потому очень важной для практических применений. Основным достоинством структур на квантовых ямах является большая стабильность и меньший разброс параметров, что особенно важно для матричных фоточувствительных структур. Приемники на основе квантовых ям могут составить конкуренцию фоточувствительным структурам на основе твердых растворов CdHgTe – важнейшему типу приемников для данного спектрального диапазона.

В настоящее время достигнуты определённые успехи и в разработке фотоприемников на КТ. Большинство этих работ выполнено на основе соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ (GaAs, InAs, InGaAs) и Ge/Si. В последнее время получены высокие значения параметров фотоприемников в ближнем, среднем и дальнем ИК-диапазонах на структурах Ge/Si с КТ [33].

Из других применений устройств на КТ следует отметить разработку логических устройств для будущих нанокомпьютеров. При очень высокой плотности логических элементов необходимо максимально низкое потребление энергии на одно переключение. Для таких целей предложено использовать в логических элементах массивы связанных взаимодействующих квантовых точек. Эти новые приборы для реализации вычислений логических булевых функций называют квантово-точечными клеточными автоматами (QCA – Quantum Cellular Automata). Практическое изготовление устройств на основе клеточных автоматов находится в самой начальной стадии и требует разрешения целого ряда проблем, в основном технологических [10, 11].

3. Дискретная электроника для электроэнергетики

Основным материалом для изготовления диодов, тиристоров и мощных транзисторов является кремний и можно отметить также использование GaAs и гетероструктур на его основе. Однако наиболее перспективным становится освоение широкозонных материалов: карбида кремния SiC и нитридов III-й группы. Широкомасштабные исследования SiC и изготовление на его основе приборов является одним из главных направлений развития полупроводниковой электроники. Благодаря уникальным свойствам SiC: большая ширина запрещенной зоны (3–3,3 эВ для различных политипных форм), высокой теплопроводности (3–5 Вт/см К), превосходящей при комнатной температуре теплопроводность меди, этот материал будет основным для высокотемпературной, радиационно – стойкой и мощной электроники [35]. Прорыв в решении технологических проблем произошёл с использованием метода осаждения SiC из паровой фазы (CVD – метода, chemical vapor deposition). В настоящее время получены основные, в первую очередь, для электроэнергетики, полупроводниковые приборы. На основе 4Н-SiC были изготовлены мощные диоды, тиристоры и биполярные транзисторы, способные выдерживать напряжение в несколько киловольт и пропускать прямой ток плотностью до 10^4 – 10^5 А/см². Для изготовления приборов используется в основном 4Н-политип карбида кремния, который обладает рядом преимуществ по сравнению с другими политипами: высокой и почти изотропной подвижностью основных носителей, относительно небольшими величинами энергии активации легирующих примесей. Кроме того, технология этого политипа в настоящее время отработана лучше, чем для других SiC-политипов. Высоковольтные биполярные SiC-приборы продемонстрировали существенные преимущества по сравнению с аналогичными кремниевыми и арсенидгаллиевыми: меньшие прямые падения напряжения при больших плотностях тока, более высокие рабочие температуры и более высокое быстродействие [35]. Появление этих и других приборов означает создание промышленной основы для карбидкремниевой электроники и, в первую очередь фирмой Cree Inc., США, мирового лидера в области SiC-электроники (Cree Inc., 27703 Durham NC, USA).

4. Кремний – основной материал полупроводниковой электроники

Более 90% приборов полупроводниковой электроники, причём во всех её основных направлениях, в настоящее время изготавливаются на основе кремния. Обычно металлургический кремний чистотой 98-99% очищают до уровня 99,9999 («солнечный» кремний, чистотой 6N для изготовления солнечных элементов и от 9N to 11N электронный кремний для ИМ и электронных приборов). В настоящее время производится более 30 тыс. тонн электронного и около 70 тыс. тонн «солнечного» кремния. Электронный материал получают двумя химическими процессами: трихлорсилановым и моносилановым, которые производят ~80% и ~20% кремния высшего качества, соответственно. Это один из наиболее стабильных секторов высокотехнологичной экономики [36].

Полупроводниковая фотоэнергетика (ПФЭ) является одной из наиболее быстро развивающихся отраслей энергетики. Так, ежегодное увеличение её установленных мощностей за последние пять лет до кризисного периода в среднем составило почти 50% [21-23, 36]. Согласно прогнозируемому росту ПФЭ её установленная

мощность должна вырасти почти на два порядка и составить ~1000 GWp к 2030 г., такое беспрецедентное увеличение, в первую очередь, определяется национальными программами, обеспечивающими инвестиции и рынок. Можно констатировать, что становится реальностью прогнозы увеличения объёма продаж электроэнергии с 5,8 миллиардов евро в 2004 г. до 25 миллиардов евро в 2010 г., соответствующее ежегодной реализации 5,8 GWp. Например, важным является и такой социальный аспект, как создание рабочих мест ПФЭ индустрией, число которых должно составить к 2020 в ЕС 200 000, а в мире более 2 000 000 [22, 23].

Базовыми элементами (ПФЭ) являются фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), конвертирующие солнечную энергию в электрическую. В настоящее время около 90 % ФЭП изготавливаются на основе пластин поли- и монокристаллического кремния, а оставшуюся часть составляют тонкопленочные ФЭП, в том числе изготовленные с использованием полупроводниковых соединений (рис. 4.1). По существующим прогнозам лидирующая роль этого материала, благодаря уникальным физико-химическим свойствам и высокому уровню развития кремниевых технологий, сохранится, по крайней мере, на ближайшие

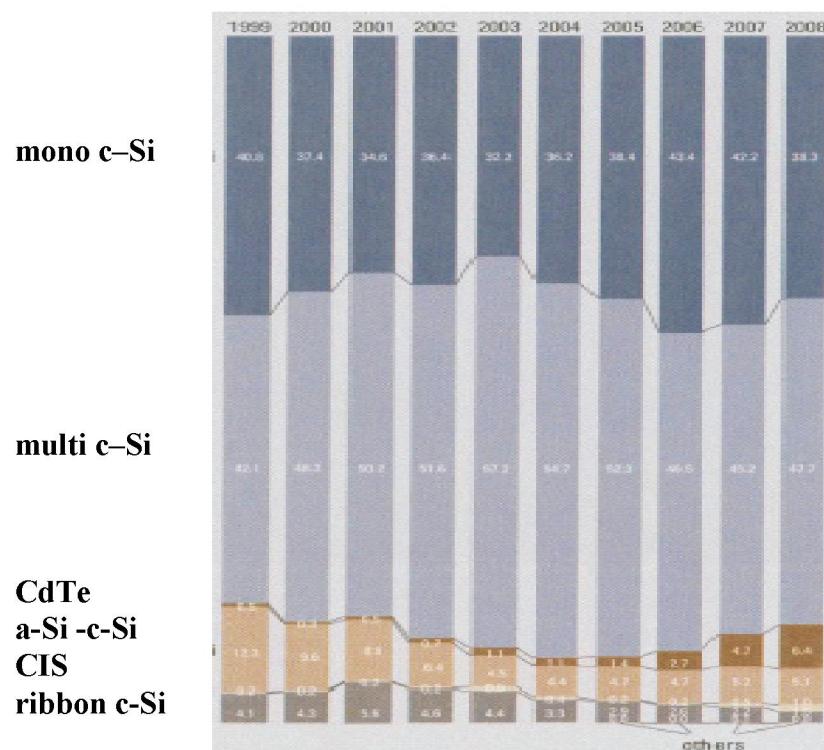


Рис. 4.1. Распределение на рынке ПФЭ технологий изготовления ФЭП на основе различных материалов [21]

10–15 лет, пока станут конкурентоспособными другие технологии. Несмотря на относительно высокую стоимость электроэнергии, производимой ПФЭ, установленные мощности ниже запланированных [22, 23, 36]. Сдерживающими факторами её широкомасштабного использования является дефицит и стоимость «солнечного» кремния, который вследствие более низких требований по содержанию примесей, значительно дешевле «электронного» кремния [14–18, 36, 37]. Поэтому в последнее время уделяется большое внимание совершенствованию существующих и разработке новых методов получения и очистки «солнечного» кремния. Этот элемент по степени распространённости в земной коре занимает второе место после кислорода, составляя 25% по весу, что особенно важно при планировании производства больших объёмов ПФЭ. Если ещё несколько лет назад основным материалом для ПФЭ был поликристаллический кремний, производимый электронной промышленностью, то уже в 2008 году были введены заводы, ориентированные на выпуск «солнечного» кремния. Его производство в настоящее время более чем в 2 раза превышает производство электронного кремния.

Относительные объёмы мирового производства поликристаллического кремния различными технологиями показаны на рис. 4.2. Следует отметить, что если в 2007 году доминировали два химических процесса: трихлорсилановый и моносилановый, которые производили ~76% и ~21%, соответственно, то в 2011 ожидается увеличение с 3 до 17% (!) доли «солнечного» кремния, производимого metallurgическими методами.

Эти методы полностью исключают использование хлорсиланов и основаны на совершенствовании метода карботермического восстановления кремния из диоксида кремния. Достижение необходимой чистоты материала осуществляется путём металлургических переделов и использования высокочистых исходных веществ: кварца и углерода [16, 17]. В отличие от хлорсилановых, металлургические технологии обладают существенно меньшим расходом электроэнергии на кг производимого кремния и более благоприятны с точки зрения экологии. Однако, если использование дорогостоящих хлорсилановых технологий, как было отмечено во введении, является экономически оправданным для микроэлектроники, где вследствие сверхвысокой плотности монтажа (сотни миллионов транзисторов на пластину) микросхем и их многофункциональности, стоимость кремниевой подложки не столь существенна в стоимости единицы конечного продукта, то в ПФЭ стоимость материала достигает до 40% от стоимости ФЭП [1, 14–18, 37]. Поэтому чрезвычайно важным является использование и дальнейшая разработка технологий, снижающих себестоимость «солнечного» кремния. Для этого и прогнозируется в краткий период существенно увеличить использование металлургических методов получения «солнечного» кремния, а их развитию и широкомасштабному использованию уделяется большое внимание. К настоящему времени разработаны две технологии, одна из которых реализована в промышленном масштабе, другая – в виде пилотной линии. В первой – процесс восстановления сопровождается пиро-

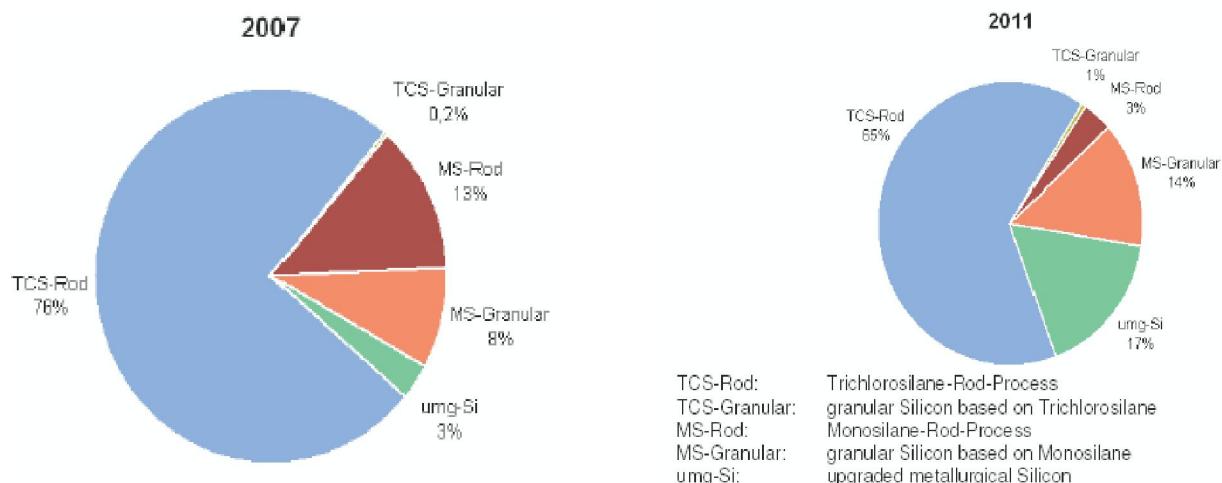


Рис. 4.2. Распределение на рынке «солнечного» кремния, выпускаемого с использованием различных технологий [14, 15]

металлургической (шлаковой) очисткой с последующим гидрометаллургическим (кислотным) рафинированием [16]. В другой – кремний получают в реакторах специальной конструкции в виде смеси гранул диоксида и карбида кремния. Затем высокочистый кремний получают в результате взаимодействия карбида кремния с моноокисью кремния [17]. В обоих методах на заключительной стадии «солнечное» качество обеспечивается применением физических способов очистки, т.е. расплавлением и направленной кристаллизацией или выращиванием кремния по методу Чохральского.

Наряду с карботермическим методом восстановления кремния из кварца (диоксида кремния) разрабатывается также метод алюминотермического восстановления кремния из диоксида кремния, содержащегося в силикатных шлаках

(СШ). В этом случае процесс происходит одновременно со шлаковой очисткой и на начальном этапе обеспечивал получение кремния чистотой 99,95% [35]. Развитие этого метода в Физико-техническом институте (Алматы, КЗ) показало [18-20, 39], что алюмотермическое восстановление кремния из кварца, входящего в состав фосфорных шлаков (ФШ) – отходов производства фосфорной промышленности, позволяет получать промежуточные кремнийсодержащие сплавы (КСС). Состав КСС варьируется в зависимости от соотношения основных реагирующих компонент и в одном случае продуктом рафинирования КСС является компенсированный кремний 99,998 % (рис. 4.3), а в другом КСС находится в виде высокоактивных тройных сплавов (Ca-Al-Si, рис. 4.4), из которого был получен моносилан (рис. 4.5).

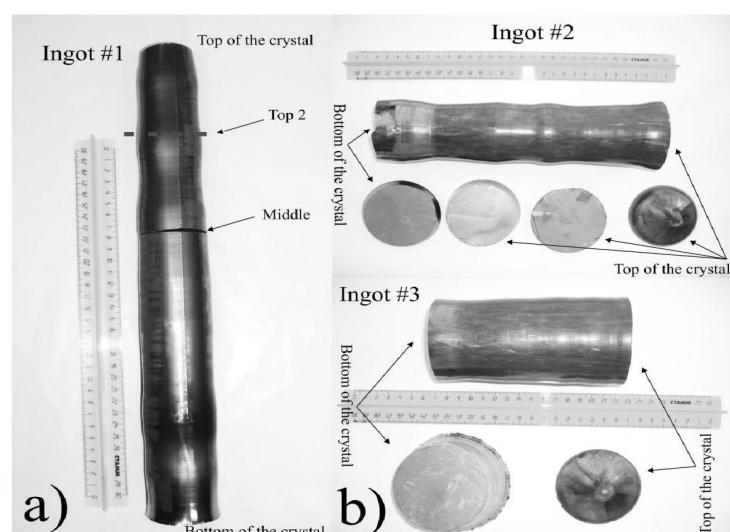


Рис. 4.3. Моно- и поликристаллы кремния, полученные по технологии, разработанной в ФТИ (Алматы, КЗ, диаметр ~40 мм, длина ~400 мм) [36]

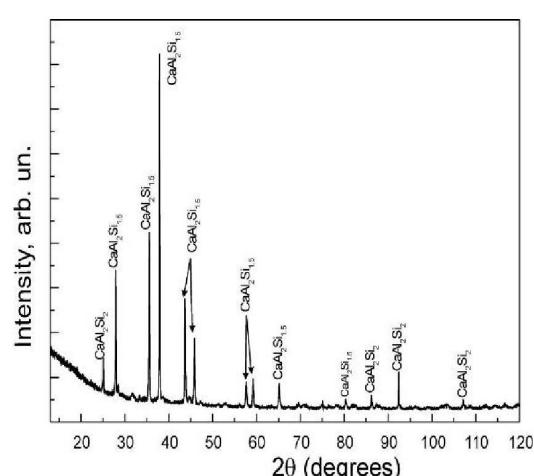


Рис. 4.4. Фазовый анализ (Ca-Al-Si) сплавов

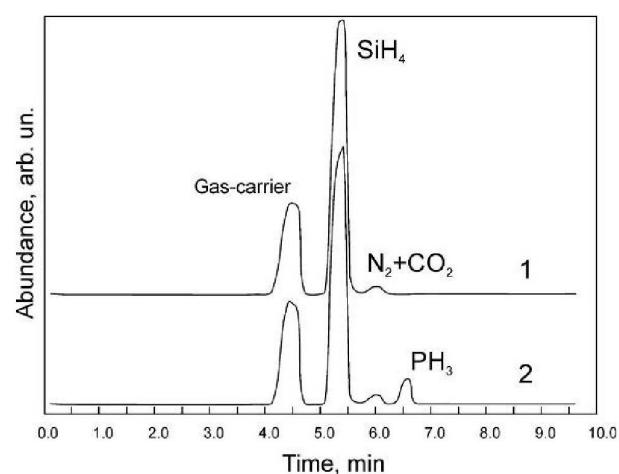


Рис. 4.5. Хромотограмма моносилана, полученного гидролизом (Ca-Al-Si)

Путём оптимизации параметров процесса в пиро- и гидрометаллургическом цикле и/или использованием современных методов сегрегационной очистки можно достичь «солнечной» чистоты кремния, полученного данным методом. Следует отметить, что выращенные компенсированные монокристаллы могут быть использованы в «wafer equivalent technology», т. е. удовлетворяют требованиям этой технологии, а синтезированный моносилан имеет большие перспективы применения как в технологии получения электронного кремния, так и в тонко-плёночной полупроводниковой электронике.

5. Кремниевая фотоэнергетика – перспективы развития

На основе анализа материалов 22-24 Европейских конференций по преобразованию солнечной энергии в электрическую и Программы ЕС по стратегическому развитию ПФЭ [14-18, 22, 23, 39] можно выделить следующие основные направления исследований по развитию и разработке новых технологий для ФЭП, как солнечных элементов(СЭ), так и модулей(СМ):

1. Кремниевые технологии, реализуемые на пластинах (КТП);
2. Тонко-плёночные технологии(ТПТ);
3. Новые технологии.

Эти направления, в свою очередь, разделяются на СЭ первой генерации (КТП), второй (ТПТ) и третьей – многослойные СЭ, к которым также относятся рассмотренные нами ранее СЭ, использующие концентраторы солнечной энергии. Следует отметить, что СЭ на КТП реализуются в рамках каждого из приведенных выше трех направлений. Например, использование встроенных структур, трансформирующих спектр солнечного излучения, или предотвращающих термализацию носителей заряда, позволит в будущем создавать с использованием СЭ на КТП с к.п.д. до 50%.

В соответствии с программами ЕС для развития всех видов технологий определены следующие временные интервалы для работ по развитию существующих или разработке новых технологий и их поэтапной реализации, вплоть до коммерческого продукта:

- первый этап или краткосрочная перспектива, 2008-2013 гг.;
- второй этап или среднесрочная перспектива, 2013-2020 гг.;

– третий этап, долгосрочная перспектива до 2030 г. и далее.

Сформулированы следующие общие проблемы для всех типов СЭ, которые должны решаться на всех временных этапах. Это уменьшение потребления материалов, увеличение эффективности преобразования (к.п.д.), создание высокозэффективных производств для достижения основной цели: снижения стоимости электроэнергии, производимой СЭ до конкурентного уровня.

Известно, что создание модулей на основе КТП содержит 6 этапов: 1) производство кремния, 2) процессы рафинирования, 3) выращивание слитков, 4) резка слитков на пластины, 5) изготовление СЭ и 6) сборка модулей. В каждом из этих этапов достигнут не только существенный прогресс, но и разработаны дорожные карты их исполнения на долгосрочную перспективу.

В настоящее время производство СЭ не обеспечивает потребности рынка, что объясняется недостатком полупроводникового кристаллического кремния, поэтому, в первую очередь, необходимы новые технологии получения кремния и изготовления СЭ, для уменьшения его потребления на единицу вырабатываемой мощности (g/W_p), что подразумевает увеличение к.п.д., площади и, в конечном счёте, стоимости. В настоящее время для снижения стоимости разрабатываются новые технологии получения солнечного кремния; улучшены технологии реализации этапов 2, 3 и 4, что позволило уменьшить толщину СЭ с 400 мк (20 g/W_p) в 1990 г. до 200 мк в 2006 г. (10 g/W_p) при увеличении площади от 100 до 240 см² и к.п.д. модулей с 10 до 13%, соответственно. В дальнейшем предстоит разработать новые технологии, в частности, широкомасштабного промышленного освоения прямых методов получения солнечного кремния, с целью снижения стоимости этого материала к 2013 г. до 15-25 Евро/кг (в настоящее время ~ 50), а к 2030 г. менее 10-15 Евро/кг; разработать методы пассивации, гетерирования, диагностики и контроля дефектов, технологии совершенствования существующих приборов и получения новых структур, эпитаксиальные структуры на подложках низкой стоимости, СЭ, включающие конверторы энергии и/или нанокластерные слои, а также совершенствование технологий этапов 2-6, что позволит уменьшить потребление Si до 5 g/W_p , < 3 g/W_p , < 2 g/W_p , толщину < 150, < 120 и

<100мкм, увеличить к.п.д. модулей >17%, >20% и >25% к 2013, 2020, 2030г и далее, соответственно.

Тонкопленочные (ТП) СЭ получаются осаждением на подложках больших размеров, так типичные размеры для стеклянных подложек ~ м².

Известно, что широкое распространение, особенно в Японии, получили СЭ и модули на основе a-Si, с к.п.д. 9,5 и 6,5%, соответственно. В дальнейшем предполагается промышленное освоение создания СЭ и модулей с двумя a-Si/mk-Si и тремя переходами a-Si/mk-Si/ SiGe с к.п.д. СЭ 12%, 13% и модулей 8,5%, 9%, соответственно. В средне- и долгосрочной перспективе будут использованы гибкие подложки, разработаны установки для осаждения больших площадей ТП, интегрированы наноструктурированные материалы и конверторы энергии в СЭ на Si ТП, с к.п.д. 11 и 13%. Развитие технологий предполагает использование концепций и технологий для создания новых СЭ. Например, технология создания СЭ на основе поли-кремния использует те же методы осаждения a-Si:H и mk-Si, но при более высоких температурах. Поликристаллический слой наносится при температуре выше 600С, что позволяет создавать не p-i-n, а p-n структуры с высоким качеством электронных слоев и к.п.д. ~ 15%. Промышленное освоение данной технологии предполагается в ближайшие 5 лет, в течение которых должны быть разработаны подложки, сохраняющие свойства при высоких температурах. В настоящее время в этом направлении проводятся также работы с органическими и другими материалами.

Новые технологии создаются на базе новых идей и разрабатывают концепции по созданию высокоэффективных СЭ на долгосрочную перспективу. Практически во всех предлагаемых концепциях используются нанотехнологии. Основная идея заключается в повышении эффективности использования активных слоев, без изменения их фундаментальных физических свойств, т.е. необходимо, чтобы активные слои более полно использовали солнечный спектр. В таких структурах верхний с меньшей шириной запрещенной зоны (эмиттерный) слой содержит низкоразмерные нановключения (ямы, проволоки или точки) для генерации больших токов, а базовый остается широкозонным, что обеспечивает высокие напряжения и тем самым оптимальную выходную мощность. В других вариантах промежуточ-

ный слой содержит металлические кластеры, уменьшающие концентрацию фононов и предотвращающие процессы термализации горячих носителей либо технологию создания СЭ на периферийных областях конверторов энергии (up/down), адаптирующих спектр солнечного излучения и т.д. Например, КТП при реализации новых концепций могут создавать СЭ с эффективностью до 50% (предел для традиционных кремниевых СЭ 28%) и сохранить доминирующее положение на долгосрочную перспективу.

6. Исследования в Казахстане

В Физико-техническом институте (Алматы, КЗ) выполняются исследования по физике дефектов и примесей в кремнии и таких широкозонных полупроводников как оксиды цинка и олова. Исследования по дефектам в кремнии были удостоены Государственной премии КЗ в области науки и техники в 2001 году, а основные результаты опубликованы в Успехах Физических Наук [40]. Из исследований, выполненных в последнее пятилетие, можно отметить обнаружение эффектов кластеризации и гетерирования дефектов в кристаллическом и пористом кремнии [41-45], а также результаты по синтезу и исследованию оксидов [46-48]. В области полупроводникового материаловедения важным достижением является получение чистого металлургического кремния и моносилана 18-20,39. В Казахском Национальном университете следует отметить работы в области некристаллических полупроводников, а также по исследованиям и технологиям изготовления ФЭП на кремнии и полупроводниковых соединениях

7. Рекомендации для Казахстана

Для производства металлургического и полупроводникового кремния необходимы кварциты (SiO_2). Казахстан обладает громадными запасами этого материала. Так, недра страны содержат 265 млн. тонн кварцитов, пригодных для получения полупроводникового кремния и 65 млн. тонн высокочистого кварца. По данным из различных источников «SILICIUM KZ», «LANCASTER GROUP, KZ» и некоторые другие подготовили к реализации ряд проектов по производству поликристаллического кремния, фотоэлектрических преобразователей, модулей, фотоэнергетических

установок в различных областях Казахстана. Ясно, что рассмотрение проектов и отбор одного проекта для реализации должен быть проведён на основе тендера и все необходимые ресурсы необходимо направить на строительство одного комплексного завода, включающего на первом этапе следующие производства: обогащения кварца и высокочистых углеродных стержней, металлургического кремния, чистотой 98,5-99 % (в настоящее время основным поставщиком этого материала на рынок является Норвегия ~4-5 USD/kg), трихлорсилана (а также, возможно, моносилана) и поликристаллического кремния солнечного качества. Проект должен содержать решение вопросов инфраструктуры, включая энергообеспечение, производства исходных материалов и должен отвечать требованиям комплексного производства. На втором этапе конкурс на проект должен включать задания по производству блоков поликристаллического кремния методом направленной кристаллизации и росту монокристаллов кремния; по технологической линии для резки блоков и монокристаллов на пластины и изготовления ФЭП на кремниевых пластинах с расходом материала не более 8-10 г на Wр при площади ФЭП не менее 250 см² и проекты по grid-on и grid-off системам. На этом этапе следует также рассмотреть также проекты по тонкоплёночным ФЭП – каскадные ФЭП на основе амофных и микрокристаллических кремниевых структур (наличие производства моносилана позволит реализовать такие проекты).

Для реализации конкурса и проведения тендера необходимо принять соответствующие законы (как, например, в Германии др.) по льготному налогообложению, которое сделает привлекательным площадку для ведущих производителей ПФЭ и инвесторов. 10 крупных производителей Германии, Норвегии, США и Японии контролируют около 50% мирового рынка ПФЭ и именно их следует привлечь к участию в конкурсах и реализации проектов, отобранных в результате тендера.

Список использованных источников

1. Siffert P., Krimmel E. // Silicon, Evolution and Future of a Technology. 2004. Springer. P. 549.
2. Лебедев А. Физика полупроводниковых приборов. М.: Ф-Мар., 2008.
3. Balkanski M., Wallis R. Semiconductor Physics and Applications. 2000. Oxford Press. P. 487.
4. Физическая энциклопедия / Под ред. А. Прохорова. М.: «Большая Российская энциклопедия», 1998. В 5-ти т.
5. Абдулов А., Кулькин А. Наукоемкие технологии и их роль в современной экономике // РФФИ. 2007. Проект № 02-06-2004.
6. Science and Engineering Indicators. 2000. National Science Board, Wash. 2000.
7. Hutcheson G. The Economic Implications of Moore's Law. P. 11-38 // Into the Nano Era: Moore's Law Beyond Planar Silicon CMOS, 2009, Springer. V. 106. 345 p.
8. Moore G. Proc of the 50th International Solid State Circuit Conference, 2003, February 9-13. San Francisco, USA. P. 5-16.
9. Bohojeck. History of Semicond. Engineering. 2007. Springer. 387 p.
10. DiVincenzo D. Quantum Computing. P. 297-313 // Into the Nano Era: Moore's Law Beyond Planar Silicon CMOS. 2009, Springer. V. 106. 345 p.
11. Kamins T. Beyond CMOS Electronics: Self Assembled Nanostructures. P. 227-256 // Into the Nano Era: Moore's Law Beyond Planar Silicon CMOS. 2009, Springer. V. 106. 345 p.
12. Handbook of Nanotechnology, Bhushan Ed., Springer, 2004. P. 1222. <http://kbogdanov1.narod.ru/nanothechnology/AFM.htm>
13. Алферов Ж., Копьев П., Сурик Р. и др. Нано- и микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3-13.
14. Hesse K., Schindlbeck E., Freiherr H. An Overview on Silicon Feedstock, in Proceedings 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3–7 September, 2007. Milan, Italy. P. 806-810.
15. Hesse K., Dornberger E., Schindlbeck E. Silicon Feedstock-Factors for Differentiation, in Proceedings 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1–5 September, 2008. Valencia, Spain. P. 1062-1065.
16. Peter K., Kopecek R., Soiland A., Enebakk E. Future Potencial for SoG-Si Feedstock from Metallurgical Process Route // Proceedings 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1–5 September, 2008. Valencia, Spain. P. 947-950.
17. Wornes A., Ovreliid E., Raanes O., Greevligr B., Santeen S., Wiersma B., Talhgar H. Direct Route for the Production of Solar-Grade Silicon from Metallurgical-Grade Silicon, in Proceedings 16th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules // Materials and Processes. 2006. P. 42-49.
18. Mukashev B., Abdullin Kh., Tamendarov M., Turmaganbetov T., Beketov B., Page M., Kline D. Solar Energy Materials & Solar Cells. 2009. oi:10.1016/j.solmat.2009.06.011.
19. Tamendarov M., Mukashev B., Abdullin Kh., Beketov B., et al. Method of Obtaining Pure Silicon. Kazakhstan Patent N 17865. 2004, October 12.
20. Tamendarov M., Mukashev B., Abdullin Kh., Beketov B., et al. Method of Obtaining Silane, Kazakhstan Patent N 17866. 2004, October 12.
21. PNTON International, science & technology, cell production 2008 survey. 2009, March, P. 170-206.
22. A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology. Photovoltaic Technology Platform. European Communities, 2007.
23. Implementation Plan for the Strategic Research Agenda of the European Photovoltaic Technology Platform. European Communities, 2009.

24. Istratov A., Buonassisi T., Weber E. Structural, Elemental and Chemical Complex Defects in Silicon and Their Impact on Silicon Devices. P. 79-112 // Into the Nano Era: Moore's Law Beyond Planar Silicon CMOS. 2009. Springer. V. 106. 345 p.
25. Kroemer H., et al. Nano-whatever: do we really know where we are heading? // Phys. stat. sol. 2005.
26. Saleh B., Teich M. Fundamentals of Photonics. 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc. 2007.
27. "Quantum Dots Explained", Evident Technologies. 2008. <http://www.evidenttech.com/quantum-dots-explained.html>.
28. Arthur J. Nozik. Multiple exciton generation in semiconductor quantum dots // Chemical Physics Letters 457. 2008. P. 3-11.
29. Мукашев Б. Наноматериалы и нанотехнологии // Вестник НАН РК. 2010. № 1.
30. Luque A., et al. // Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2009. Humburg, Germany, 21-24 September, plenary paper.
31. Barnham K., et al. // Quantum Well Solar Cells and Quantum Dot Concentrators in Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion, 2006. P. 517.
32. Adams J., et al. // Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2009. Humburg, Germany, 21-24 September, plenary paper.
33. Андреев В. Нанотехнологии для солнечной фотоэнергетики // Междунар. науч. журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2007. АЭЭ 2(46).
34. Двуреченский А. // Изв. РАН. Сер. Физич. 2009. Т. 73, № 1. С. 71-75.
35. Иванов П., Левинштейн М., Мнацаканов Т., Palmour J., Agarwal A. // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39, вып. 8.
36. Flynn H., Bradford T. Polysilicon: Supply, Demand and Implications for the PV Industry 2006 // Report of Prometheus Institute for Sustainable Development (<http://www.prometheus.org>).
37. Pizzini S., Acciari M., Binetti S. From Electronic Grade to Solar Grade Silicon // Chances and Challenges in Photovoltaics, Physica Status Solidi (a), 2005. **202**. P. 2928-2942.
38. Dietl J. Refining of Metallurgical-Grade Silicon// Silicon for Photovoltaics. 1987. V. 2. P. 285-352.
39. Abdullin Kh., Beketov B., Chumikov G., Mukashev B., Tamendarov M., Turmagambetov T., Page M., Kline D. // «Compensated silicon crystals and monosilane by metallurgy route». In Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2009. Humburg, Germany, 21-24 September.
40. Мукашев Е., Абдуллин Х., Горелкинский Ю. // Успехи Физ. наук. 2000. Т. 170. С. 143-155.
41. Gorelkinskii Yu.V., Abdullin Kh.A., Mukashev B.N., Kalykova G.K., Serikkanov A.S. // Influence of nanocrystalline structure of surface on boron gettering from silicon. Materials Science and Engineering. 2006. 822-825. P. 2611.
42. Gorelkinskii Yu.V., Abdullin Kh.A., Kalykova G.K., Kikkarin S.M., Mukashev B.N. // Stable ultraviolet photoluminescence of nanoporous Si. Materials Science and Engineering. 2008. B147. P. 258-261.
43. Mukashev B.N., Gorelkinskii Yu.V., Abdullin Kh.A. // Self-interstitials and Nanoclusters in Crystalline Silicon. AIP Conference Proceedings. 2005. V. 722. P. 241-244.
44. Gorelkinskii Yu.V., Abdullin Kh.A., Kalykova G.K., Turmagambetov T.S., Mukashev B.N. // Electron Spin Resonance of Light Holes in Porous Silicon. Physica B: Physics of Condensed Matter, DOI 10.1016/j.physb.2009.08.117.
45. Gorelkinskii Yu.V., Abdullin Kh.A., Mukashev B.N., Turmagambetov T.S. // Self-Interstitials and Related Defects in Irradiated Silicon. Physica B: Physics of Condensed Matter, DOI 10.1016/j.physb.2009.08.115.
46. Mukhamedshina D., Mit' K., Beisenkhanov N., Dmitriyeva E., Valitova I. // Journal of Materials Science: Materials in Electronics 2008 19:S382-S387.
47. Gritskova E., Mukhamedshina D., Mit' K., Dolya N., Abdullin Kh. // Physica. B 2009, doi:10.1016/j.physb.2009.08.307.
48. Mukashev B., Aimagambetov A., Mukhamedshina D., Beisenkhanov N., Mit' K., Valitova L., Dmitrieva E. // Superlattices and microstructures. 2007. V. 10. P. 103-109.