

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет физико-математических
и естественных наук

Кафедра
«Общая физика
и методика обучения физике»

Направление подготовки 44.03.05 «Педагогическое образование»
(с двумя профилями подготовки)

Профили подготовки «Физика. Технология»

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему:

**«МЕТОДИЧЕСКОЕ И МУЛЬТИМЕДИЙНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ
ФАКУЛЬТАТИВНЫХ ЗАНЯТИЙ ПО ФИЗИКЕ НА ТЕМУ
«НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ»**

Студент *БЧ* 11.06.2020 г. Бучина Екатерина Николаевна
(подпись, дата) (Ф.И.О. полностью)

Руководитель *КВ* 11.06.20 г. Калинина А.В.
(подпись, дата) (фамилия, инициалы)

Нормоконтролёр *КВ* 11.06.20 г. Калинина А.В.
(подпись, дата) (фамилия, инициалы)

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от _____ № ____)

Заведующий кафедрой *КЗ* Казаков А.Ю.
(подпись) (фамилия, инициалы)

Работа защищена с отметкой ____ (протокол заседания ГЭК от _____ № ____)

Секретарь ГЭК *ПН* Паскевич Н.В.
(подпись) (фамилия, инициалы)

Пенза, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Цель и задачи бакалаврской работы.....	3
ГЛАВА 1. НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ	
1.1. Виды полупроводниковых низкоразмерных структур	
1.1.1. Квантовые ямы.....	5
1.1.2. Квантовые нити.....	11
1.1.3. Квантовые точки.....	13
1.2. Технологии получения низкоразмерных полупроводниковых структур	
1.2.1. Технологии производства квантовых ям.....	15
1.2.2. Технологии производства квантовых нитей.....	16
1.2.3. Технологии производства квантовых точек.....	17
1.3. Практическое использование низкоразмерных полупроводниковых структур в технике	
1.3.1. Практическое использование квантовых ям в технике.....	19
1.3.2. Практическое использование квантовых нитей в технике.....	22
1.3.3. Практическое использование квантовых точек в технике.....	22
ГЛАВА 2. МЕТОДИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ФАКУЛЬТАТИВНЫХ ЗАНЯТИЙ ПО ФИЗИКЕ НА ТЕМУ «НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ»	
2.1. Факультативное занятие на тему «Квантовые ямы и нити. Их использование в технике».....	27
2.2. Факультативное занятие на тему «Квантовые точки и их использование в медицине и технике».....	32
Глава 3. МУЛЬТИМЕДИЙНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ФАКУЛЬТАТИВНЫХ ЗАНЯТИЙ ПО ФИЗИКЕ НА ТЕМУ «НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ»	
3.1. Разработка презентации на тему «Низкоразмерные полупроводниковые структуры »	38
3.2. Разработка презентации на тему использование низкоразмерных полупроводниковых технологий в быту и технике.....	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	42
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	43
Приложение 1	46
Приложение 2.....	52

ВВЕДЕНИЕ

Изучению полупроводников уделяется в настоящее время большое внимание, как с точки зрения технологий, так и фундаментальных физических исследований. В последние годы физика конденсированного состояния смогла изучить полупроводниковые системы, свойства которых радикально отличаются от свойств массивных материалов. Основной областью роста было, без сомнения, изучение таких систем –слоистые структуры, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии или металл-органического химического осаждения из паровой фазы. Эти структуры состоят из полупроводниковых слоев с геометрией поверхности раздела, уровнем легирования и химическим составом, определенными с точностью атомного масштаба. Эти системы теперь обычно называют «низкоразмерными полупроводниковыми структурами» (НРПС). Основная причина необычных свойств НРПС – это квантово-механическое ограничение степеней свободы до двух, одного или даже нуля. Это изменение эффективной размерности с такими малыми масштабами длины (сравнимыми с длиной волны де Бройля), что квантово-размерные эффекты становятся легко наблюдаемыми, что приводит к захватывающим изменениям в электронном транспорте и оптических свойствах. Теперь с НРПС стало возможным заниматься «конструированием запрещенной зоны», чтобы транспортные и другие свойства электронов и дырок могли непрерывно и независимо изменяться, что приводит к интересной физике и новым классам полупроводниковых приборов. Также огромны достижения и успехи в практическом использовании НРПС в быту и технике. В связи с этим, бакалаврская работа, посвященная разработке методического и мультимедийного сопровождения факультативных занятий по физике на данную тематику является актуальной.

Цель бакалаврской работы заключается в формировании первоначальных знаний у школьников в области низкоразмерных

полупроводниковых структур на факультативных занятиях по физике; разработка методического и мультимедийного сопровождения факультативных занятий по физике на тему «Низкоразмерные полупроводниковые структуры».

Исходя из цели работы, были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести анализ учебно-методической литературы по теме исследования.
2. Разработать два факультативных занятия по физике для 10 класса на тему «Квантовые ямы и нити. Их использование в технике» и «Квантовые точки и их использование в медицине и технике».
3. Разработать мультимедийное сопровождение, в виде презентаций факультативных занятий по физике на тему «Низкоразмерные полупроводниковые структуры».

ГЛАВА 1. НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ

1.1. ВИДЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР

1.1.1. КВАНТОВЫЕ ЯМЫ

Квантовая яма – это потенциальная яма с дискретными значениями энергии. Классическая модель, используемая для демонстрации квантовой ямы, ограничивает частицы, которые первоначально могли свободно перемещаться в трех измерениях, в два измерения, заставляя их занимать плоскую область (рис. 1). Когда толщина квантовой ямы становится сопоставимой с длиной волны де Бройля носителей, тогда получается ограничение квантового эффекта, что приводит к уровням энергии, которые называются «энергетическими подзонами», то есть носители имеют только дискретные значения энергии.

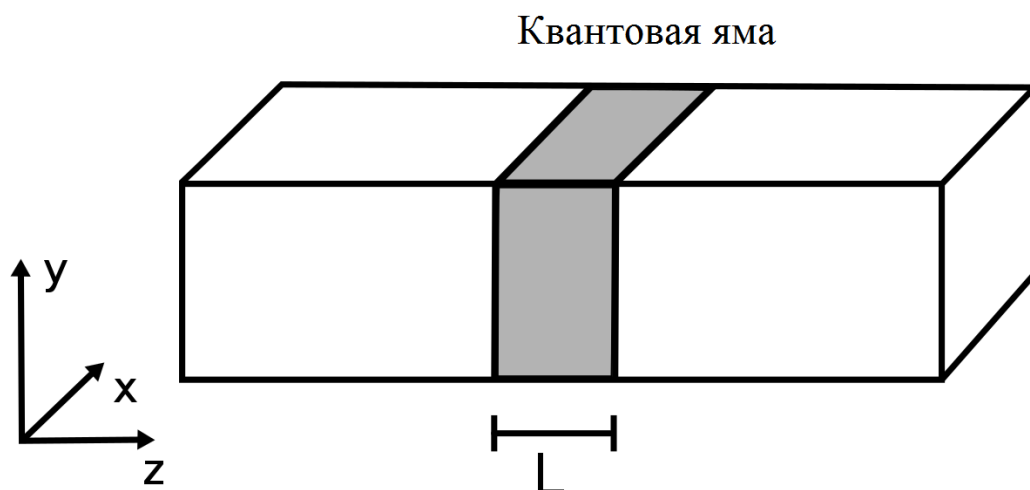


Рис. 1. Схема гетероструктуры нанометрических размеров, которая приводит к квантовым эффектам

На сегодняшний день, имеется разнообразие электронных устройств с квантовыми ямами, которые были разработаны на основе теории систем с квантовыми ямами. Эти устройства нашли применение, например, в лазерах, фотоприемниках, модуляторах и переключателях. Устройства с квантовыми

ямами работают намного быстрее, экономичнее, чем обычные устройства и являются важными для технологической и телекоммуникационной отраслей. Эти устройства с квантовыми ямами в настоящее время заменяют многие, если не все, обычные электрические компоненты во многих электронных устройствах [9].

Полупроводниковая квантовая яма была разработана в 1970 году Эсаки и Цу, которые также изобрели синтетические сверхрешетки [2]. Они предположили, что гетероструктура, состоящая из чередующихся тонких слоев полупроводников с различными запрещенными зонами, должна проявлять интересные и полезные свойства. С тех пор много усилий и исследований было уделено изучению физики систем с квантовыми ямами, а также разработке устройств на их основе.

Разработка устройств с квантовыми ямами в значительной степени объясняется достижениями в технологии выращивания кристаллов. Это связано с тем, что для устройств с квантовыми ямами требуются структуры высокой чистоты с небольшим количеством дефектов. Поэтому, имея большой контроль над ростом этих гетероструктур, можно разрабатывать полупроводниковые устройства, которые могут иметь очень точные свойства.

Квантовые ямы и физика полупроводников были горячей темой в физических исследованиях. Разработка полупроводниковых приборов с использованием структур, состоящих из нескольких полупроводников, привела к Нобелевской премии Жореса Алфёрова и Герберта Кромера в 2000 году.

Теория, связанная с устройствами с квантовыми ямами, привела к значительному прогрессу в производстве и эффективности многих современных компонентов, таких как светодиоды, транзисторы. Сегодня такие устройства широко распространены в современных сотовых телефонах, компьютерах и многих других вычислительных устройствах.

Одна из простейших систем с квантовыми ямами может быть построена путем введения тонкого слоя полупроводникового материала одного типа между двумя слоями другого с разной шириной запрещенной зоны. Рассмотрим в качестве примера два слоя AlGaAs с большой шириной запрещенной зоны, окружающие тонкий слой GaAs с меньшей шириной запрещенной зоны. Давайте предположим, что изменение материала происходит вдоль направления z и, следовательно, потенциальная яма находится вдоль направления z (без ограничения в плоскости x - y). Поскольку запрещенная зона содержащегося материала ниже, чем окружающий AlGaAs, в области GaAs создается квантовая яма (потенциальная яма). Это изменение энергии полосы по всей структуре можно рассматривать как изменение потенциала, который будет ощущать носитель, поэтому в этих ямах могут быть захвачены носители низкой энергии[10].

Диаграмма зонной структуры в квантовой яме GaAs между AlGaAs. Электрон в зоне проводимости или дырка в валентной зоне могут быть заключены в потенциальную яму, созданную в структуре. Доступные состояния в скважинах показаны на рисунке 2. Это состояния типа «частица в коробке». В центральной области GaAs длины d энергия зоны проводимости меньше, а энергия валентной зоны выше. Поэтому и электроны, и дырки могут быть ограничены в области GaAs

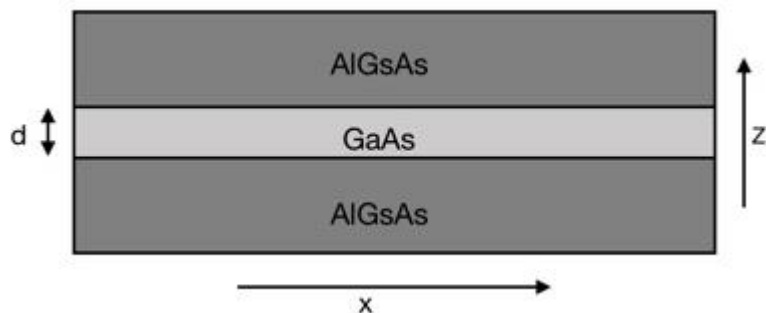


Рис. 2. Гетероструктура из полупроводников AlGaAs (большая ширина запрещенной зоны) и GaAs (меньшая ширина запрещенной зоны) в конфигурации с квантовыми ямами

Внутри квантовой ямы есть дискретные собственные состояния энергии, которые могут иметь носители. Например, электрон в зоне проводимости может иметь более низкую энергию внутри ямы, чем он мог иметь в области AlGaAs этой структуры. Следовательно, электрон в зоне проводимости с низкой энергией может быть захвачен внутри квантовой ямы. Аналогично, дырки в валентной зоне также могут быть захвачены в верхней части потенциальных ям, созданных в валентной зоне. Состояния, в которых могут находиться ограниченные носители, являются состояниями типа «частица в коробке» (рис. 3).

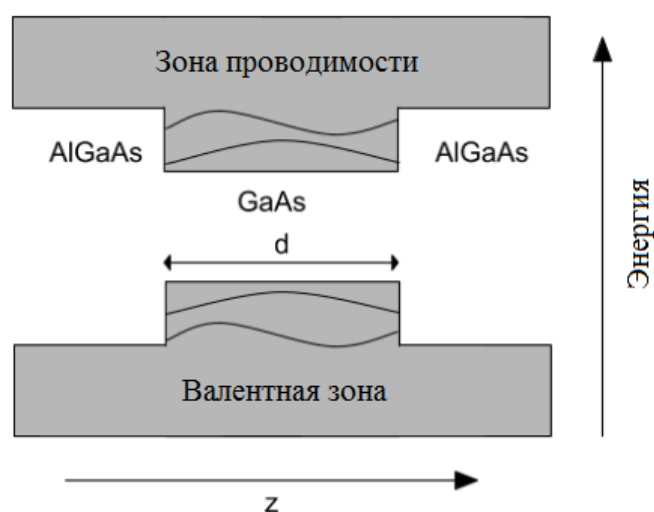


Рис. 3. Диаграмма зонной структуры в квантовой яме GaAs между AlGaAs

Квантовые ямы и устройства с квантовыми ямами – это область физики твердого тела, которая до сих пор широко изучается и исследуется. Теория, используемая для описания таких систем, пользуется важными результатами из областей квантовой физики, статистической физики и электродинамики.

Простейшей моделью системы с квантовыми ямами является модель бесконечных скважин. В этой модели предполагается, что стенки/барьеры потенциальной ямы бесконечны. Это приближение довольно нереалистично, поскольку потенциальные ямы, создаваемые в квантовых ямах, обычно имеют порядок нескольких сотен миллиэлектронвольт, что намного меньше, чем предполагаемый бесконечно высокий потенциал. Однако в первом

приближении модель бесконечной скважины служит простой и полезной моделью, которая дает некоторое представление о физике квантовых ям [3].

Рассмотрим бесконечную квантовую яму, ориентированную в направлении z , такую, что носители в яме ограничены в направлении z , но могут свободно перемещаться в плоскости x - y . мы выбираем квантовую яму для перехода от $z = 0$ до $z = d$. Мы предполагаем, что носители не имеют потенциала внутри скважины и что потенциал в области барьера бесконечно высок.

Уравнение Шредингера для носителей в модели бесконечной скважины имеет вид:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(z)}{\partial z^2} = E \psi(z), \quad (1)$$

где $\hbar$ – постоянная Планка, m – эффективная масса носителей. Эффективная масса носителя – это масса, которую «чувствует» электрон в своей квантовой среде, и, как правило, она различается в разных полупроводниках, поскольку значение эффективной массы сильно зависит от кривизны полосы. Отметим, что m может быть эффективной массой электронов в скважине в зоне проводимости или для дырок в скважине в валентной зоне.

Волновые функции решения не могут существовать в барьерной области ямы из-за бесконечно высокого потенциала. Следовательно, путем наложения следующих граничных условий можно получить допустимые волновые функции:

$$\psi(d) = \psi(0) = 0. \quad (2)$$

Тогда решение уравнения (1) с граничными условиями (2) имеет вид:

$$\psi_n(z) = \sqrt{\frac{2}{d}} \sin(k_n z), \quad k_n = \frac{n\pi}{d}. \quad (3)$$

На рис. 4 показаны волновые функции для первых двух уровней. Стены в этой модели предполагаются бесконечно высокими. Волновые функции решения синусоидальны и стремятся к нулю на границе скважины.

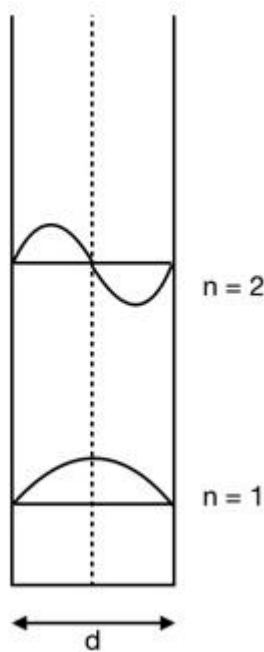


Рис. 4. Первые два энергетических состояния в модели с бесконечной ямой

Индекс n ($n > 0$) обозначает целое квантовое число, а k_n – волновой вектор, связанный с каждым состоянием, приведенным выше. Соответствующие дискретные энергии определяются как:

$$E_n = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{n\pi}{d} \right)^2.$$

Простая модель бесконечных скважин обеспечивает хорошую отправную точку для анализа физики систем с квантовыми ямами и эффектов квантового ограничения. Модель правильно предсказывает, что энергии в скважине обратно пропорциональны квадрату длины скважины. Это означает, что точный контроль ширины полупроводниковых слоев, то есть длины скважины, позволит точно контролировать уровни энергии, допустимые для носителей в скважинах. Это невероятно полезное свойство для разработки запрещенной зоны. Кроме того, модель показывает, что уровни энергии пропорциональны инверсии эффективной массы. Следовательно, тяжелые и легкие отверстия будут иметь разные энергетические состояния при попадании в скважину. Тяжелые и легкие дыры возникают, когда максимумы валентных зон с различной кривизной совпадают; в результате чего получаются две разные эффективные массы.

Недостаток модели бесконечной скважины состоит в том, что она предсказывает гораздо больше энергетических состояний, чем существует, поскольку стенки реальных квантовых ям конечны. Модель также не учитывает тот факт, что в действительности волновые функции не стремятся к нулю на границе скважины, а «просачиваются» в стенку (из-за квантового туннелирования) и экспоненциально затухают до нуля. Это свойство позволяет проектировать и производить сверхрешетки и другие новые устройства с квантовыми ямами и лучше описывается моделью с конечными ямами.

1.1.2. КВАНТОВЫЕ НИТИ

Квантовый провод является электропроводящим проводом, в котором квантовые эффекты влияют на транспортные свойства. Обычно такие эффекты появляются в размере нанометров, поэтому их называют нанопроводами.

Электроны испытывают квантовое ограничение в поперечном направлении, если диаметр проволоки весьма мал. В следствии этого, их поперечная энергия будет ограничена серией дискретных значений. Одним из следствий этого квантования является то, что классическая формула для расчета электрического сопротивления провода,

$$R = \rho \frac{l}{A},$$

неприменима для квантовых проволок (ρ – удельное сопротивление, l – длина проводника, A – площадь поперечного сечения проводника).

Для того чтобы вычислить сопротивление провода, нужно выполнить точный расчет поперечных энергий ограниченных электронов. В результате квантования энергии электрона электрическая проводимость определяется как кратная величина $2e^2/h$, где e – заряд электрона, а h – постоянная Планка. Фактор два возникает из-за вырождения спина. Единственный баллистический квантовый канал, то сеть без внутреннего рассеяния имеет

проводимость, равную этому кванту проводимости, а проводимость ниже этого значения при наличии внутреннего рассеяния [11].

Значимость квантования обратно пропорциональна диаметру нанопроволоки для данного материала. Это может зависеть от того, как электронов проводимости взаимодействуют с атомами в данном материале. Как показывает практика, полупроводники способны продемонстрировать четкое квантование проводимости для значительных поперечных размеров проволоки. Это, в свою очередь, объясняется тем, что электронные моды из-за ограничения пространственно расширяются. Из-за того что их длины волн Ферми значительно велики, они имеют низкое энергетическое распределение. Это значит, что нанопроволоки возможны только в пределах нескольких градусов от абсолютного нуля.

Для металлов квантование, которое соответствует состояниям с маленькой энергией, можно наблюдать только для атомных проволок. Квантование сопротивления наблюдается даже при комнатной температуре, благодаря очень маленькой длине волны проволоки и большому распределению энергии.

Углеродная нанотрубка является примером квантовой проволоки. Металлическая одностенная углеродная нанотрубка, довольно короткая, поэтому имеет внутреннее рассеяние (баллистический транспорт), и имеет проводимость, которая в два раза превышает кванту проводимости, $2e^2/h$. Фактор два возникает потому, что углеродные нанотрубки имеют два пространственных канала [5].

Структура нанотрубки значительно влияет на ее электрические свойства. Для данной (n, m) нанотрубки, если $n = m$, нанотрубка является металлической; если $n-m$ кратно 3, то нанотрубка является полупроводниковой с очень маленькой шириной запрещенной зоны, в противном случае нанотрубка является умеренным полупроводником. Таким образом, все нанотрубки $(n = m)$ являются металлическими.

1.1.3. КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ

Квантовые точки (КТ) – это маленькие полупроводниковые частицы размером несколько нанометров, которые обладают оптическими и электронными свойствами, и отличаются от более крупных частиц из-за квантовой механики. Они являются основной темой в нанотехнологиях. Электрон в квантовой точке способен возбуждаться до состояния более высокой энергии, когда квантовые точки освещаются ультрафиолетовым светом. Этот процесс отвечает за переход электрона из валентной зоны в зону проводимости. Возбужденный электрон может упасть обратно в валентную зону, высвободив свою энергию за счет излучения света. Это излучение света (фотолюминесценция) показано на рис. 5. Цвет этого света зависит от разности энергий между зоной проводимости и валентной зоной.

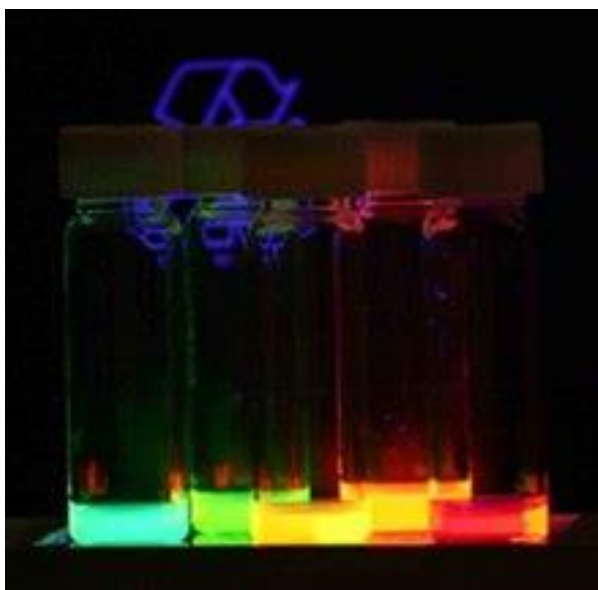


Рис. 5. Коллоидные квантовые точки, облученные ультрафиолетом

Наноразмерные полупроводниковые материалы плотно ограничивают либо электроны, либо электронные дыры. Квантовые точки иногда называют искусственными атомами, подчеркивая их особенность, имея связанные дискретные электронные состояния, такие как естественные атомы или молекулы [9]. Электронные волновые функции в квантовых точках напоминают подобные в реальных атомах. Соединяя две или более таких

квантовых точек, можно получить искусственную молекулу, которая проявляет гибридизацию даже при комнатной температуре.

Квантовые точки имеют промежуточные свойства между объемными полупроводниками и дискретными атомами или молекулами. Их оптоэлектронные свойства изменяются в зависимости от размера и формы [5, 6]. Большие квантовые точки диаметром 5–6 нм излучают более длинные волны с такими цветами, как оранжевый или красный. Меньшие квантовые точки 2–3 нм излучают более короткие волны, давая цвета, такие как синий и зеленый. Конкретные цвета варьируются в зависимости от точного состава квантовой точки [17].

Некоторые квантовые точки представляют опасность для здоровья человека и окружающей среды при определенных условиях. Примечательно, что исследования токсичности квантовых точек были сконцентрированы на кадмий содержащих частицах, но пока еще, не продемонстрированы на животных моделях. Исследования *invitro*, основанные на клеточных культурах, показывают, что токсичность квантовых точек обусловлена многими факторами, как и физико-химическими характеристиками и их окружением. Оценить токсичность сложно, так как к этим факторам относятся такие свойства, как размер квантовой точки, заряд, концентрация и т.д. [17].

Исследователи расширили понимание токсичности квантовой точки, но все же в литературе видны большие расхождения, и остается много не закрытых вопросов. Токсичность квантовых точек может быть динамичной в зависимости от таких факторов окружающей среды, как уровень pH, освещенность и тип клеток, традиционные методы оценки токсичности химических веществ, таких как LD50, не применимы для квантовых точек. Поэтому ученые находятся в разработке новых подходов и адаптации уже существующих методов для этого класса материалов.

1.2. ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

1.2.1. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КВАНТОВЫХ ЯМ

Квантовые ямы сформированы в полупроводниках. Они включают в себя арсенид галлия, зажатый между двумя слоями материала с более широкой запрещенной зоной, арсенид алюминия. Эти структуры могут быть выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии или химического осаждения из паровой фазы с контролем толщины слоя до монослоев.

Тонкие металлические пленки могут также поддерживать состояния с квантовыми ямами, в частности, тонкие металлические наслоения, выращенные на металлических и полупроводниковых поверхностях. Интерфейс вакуум-металл ограничивает электрон (или дырку) с одной стороны и, как правило, абсолютной щелью с полупроводниковыми подложками или спроецированной запрещенной зоной с металлическими подложками.

Существует три основных подхода к выращиванию материальной системы КЯ: согласованная по решетке, сбалансированная по деформации и деформированная [13].

Система с решеткой

В системе с решеткой скважина и барьер имеют постоянную решетки, аналогичную материалу подложки [13]. При этом методе разность запрещенных зон имеет минимальную дислокацию, но также минимальный сдвиг в спектре поглощения.

Система с балансировкой деформаций

В системе с балансировкой деформаций скважина и барьер растут таким образом, что увеличение постоянной решетки одного из слоев компенсируется уменьшением постоянной решетки в следующем по сравнению с материалом подложки. Выбор толщины и состава слоев влияет на требования к запрещенной зоне и ограничения на транспортировку

носителя. Этот подход обеспечивает наибольшую гибкость при проектировании, предлагая большое количество периодических квантовых ям с минимальной релаксацией деформации [13].

Напряженная система

Напряженная система выращивается с ямами и барьерами, которые не похожи по постоянной решетки. Напряженная система сжимает всю структуру. В результате структура способна вместить только несколько квантовых ям.

1.2.2. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КВАНТОВЫХ НИТЕЙ

Изготовление квантовых нитей происходит несколькими способами. Наиболее очевидный из них, «вырезание» узкой плоскости с помощью литографической техники из самой структуры (рисунок 6, а) или щели в затворе Шоттки (рисунок 6,б).

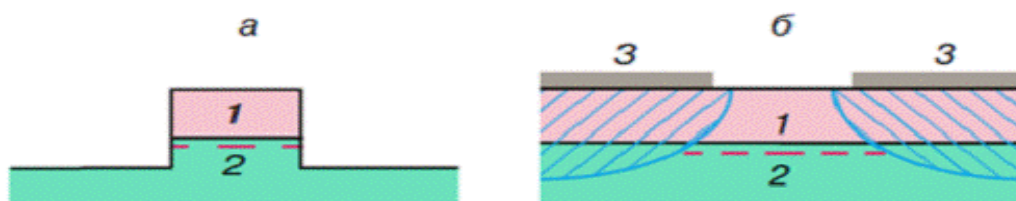


Рис. 6. Полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми нитями: где 1 – полупроводник с широкой запрещённой зоной, 2 – полупроводник с узкой запрещённой зоной, 3 – металлический затвор

Слой обеднения мы можем увидеть из образования поверхностного состояния на свободной поверхности полупроводника и на боковых гранях вырезанной полосы. Этот слой рождает дополнительное сужение проводящего канала, следовательно, квантовые эффекты, мы можем наблюдать, и в более широких полосах. Таким образом, для получения электронных нитей ширина полосы не играет важной роли.

Вот и еще один метод. Металлическим электродом покрывают поверхность полупроводниковой структуры, он образует контакт Шоттки и имеет узкую щель. Если гетерограница находится достаточно близко от поверхности, то везде, кроме узкой области под щелью, будут отсутствовать

двумерные электроны. К преимуществу можно отнести, что поменяв напряжение на затворе, можно управлять эффективной шириной квантовой нити и концентрацией носителей в ней: меняя напряжение на затворе, мы можем управлять эффективной шириной квантовой нити и концентрацией носителей в ней.

1.2.3. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Есть несколько способов изготовления квантовых точек. Возможные методы включают коллоидный синтез, самосборку и электрическое стробирование.

Коллоидный синтез

Коллоидные полупроводниковые нанокристаллы синтезируются из растворов, как и традиционные химические процессы, но продукт не выпадает в осадок в виде твердого вещества и не растворяется [8]. Раствор нагревают до высокой температуры, предшественники разлагаются с образованием мономеров, которые, впоследствии, и образуют нанокристаллы. Температура является важным фактором для роста нанокристаллов. Она должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить возможность перегруппировки и отжига атомов в процессе синтеза, и при этом быть достаточно низкой, чтобы способствовать росту кристаллов. Концентрация мономеров является не менее важным фактором, который необходимо строго контролировать во время роста нанокристаллов. Процесс роста нанокристаллов может происходить в двух разных режимах: «фокусировка» и «дефокусировка». При высоких концентрациях мономеров критический размер – это размер, при котором нанокристаллы не растут и не сжимаются, является относительно небольшим, это и приводит к росту многих частиц. В этом режиме маленькие частицы растут быстрее, чем крупные, так как более крупным кристаллам нужно больше количество атомов для роста, чем маленьким. Это и приводит к фокусировке распределения по размерам. Фокусировка по размеру является оптимальной,

если концентрация мономера поддерживает такое состояние, что средний размер наличествующего нанокристалла всегда чуть больше критического размера. Со временем концентрация мономера будет уменьшаться, критический размер станет больше, чем уже имеющийся средний размер, и распределение «расфокусируется».

Большие партии квантовых точек могут быть синтезированы посредством коллоидного синтеза. Метод коллоидного синтеза имеет ряд преимуществ для коммерческого применения: масштабен, удобство настольных условий, и является менее токсичен из всех различных форм синтеза.

Плазменный синтез

Синтез плазмы стал один из самых популярных газофазных подходов для получения квантовых точек, особенно с ковалентными связями [10]. Например, кремниевые (Si) и германиевые (Ge) квантовые точки были синтезированы с использованием нетепловой плазмы. Размер, форма, поверхность и состав квантовых точек могут контролироваться в нетепловой плазме. Легирование, возможно выглядит довольно сложным для квантовых точек, но так же реализовано в синтезе плазмы. Квантовые точки, которые образуются плазмой, обычно имеют форму порошка, для которого возможно будет проведена модификация поверхности. Это может привести к отличному диспергированию квантовых точек либо в органических растворителях, либо в воде (то есть, в коллоидных квантовых точках).

Основной процесс для производства квантовых точек, который имеет большой масштаб для коммерческих применений, называется высокотемпературным двойным впрыском. Этот процесс получения применяется к широкому диапазону размеров и состава квантовых точек.

Другой подход к массовому производству коллоидных квантовых точек воспроизведен в переносе популярной методологии горячего впрыска для синтеза в техническую систему непрерывного потока. Изменения между партиями, которые возникают из-за потребностей во время упомянутой

методологии, возможно преодолеть путем использования технических компонентов для смешивания и роста, и для регулирования транспортировки и температуры. Для производства полупроводниковых наночастиц на основе CdSe этот метод настроен на объем производства кг в месяц. Так как использование технических компонентов дает возможность легко обмениваться со стороны максимальной пропускной способности и размера, он способен дополнительно увеличиваться до десятков или даже сотен килограммов.

1.3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР В ТЕХНИКЕ

1.3.1. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАНТОВЫХ ЯМ В ТЕХНИКЕ

Есть два фактора электронов в квантовых ямах, которые приводят к улучшению производительности оптических приборов, например, лазерные диоды. Первый фактор, это наличие в электронах квантовых ям плотности состояния в зависимости от энергии, встречающаяся в объемный материалах. И, второй фактор изменение эффективной массы дырок в валентной зоне, которая соответствует массе электронов в валентной зоне. Квантовые ямы обширно используются в диодных лазерах, так же в красных лазерах для DVD-дисков и лазерных указок, инфракрасных лазерах в волоконно-оптических передатчиках или голубых лазерах. Они также используются для изготовления НЕМТ (транзисторов с высокой подвижностью электронов), для использования в электронике с низким уровнем шума. Инфракрасные фотоприемники так же основаны на квантовых ямах и используются для инфракрасной визуализации.

С помощью легирования скважины или барьера КЯ донорными примесями, можно образовать двумерный электронный газ. Данная структура способствует созданию проводящего канала НЕМТ и может

обладать интересными свойствами при низкой температуре. Например, как особенность, можно считать эффект Холла, который наблюдается в сильных магнитных полях. Акцепторные присадки смогут привести к образованию двумерного дырочного газа.

Насыщаемый поглотитель

Квантовая яма может быть изготовлена как насыщаемый поглотитель, используя его свойство насыщаемого поглощения. Насыщаемые поглотители широко используются в лазерах с пассивной синхронизацией мод. Полупроводниковые насыщающиеся поглотители (SESAM) использовались для лазерной синхронизации мод еще в 1974 году, когда германий р-типа использовался для синхронизации мод CO₂-лазером, который генерировал импульсы ~ 500 пс. SESAM нашего времени являются полупроводниковыми одиночными ямами III-V или, могут быть некотором количеством квантовых ям, которые выращивают на брэгговских отражателях. Первоначально они использовались в схеме резонансной импульсной модельной синхронизации (RPM) в качестве пусковых механизмов для титан-сапфировых лазеров, которые использовали KLM в качестве быстро насыщаемого поглотителя. RPM – это еще один метод синхронизации мод со связанной полостью. В отличие от лазеров APM, которые используют нерезонансную фазовую нелинейность типа Керра для укорачивания импульсов, RPM может использовать амплитудную нелинейность, которая обеспечивает эффектами заполнения резонансных полос полупроводников. SESAM, из-за простоты своей конструкции, в скором времени, превратились во внутриволноводные сатурационные поглотители. С этого времени, применение SESAM дало возможность увеличить на несколько порядков длительность импульсов, среднюю мощность, энергию импульса и частоту повторения ультрабыстрых твердотельных лазеров. К преимуществу SESAM относится то, что с легкостью можно контролировать параметры поглотителя в широком диапазоне значений [18].

Термоэлектрика

Перспективным в квантовых ямах оказалось то, что они способны собирать энергию в качестве термоэлектрических приборов. Есть доказательство, что их изготовление становится легче, и они способны работать при комнатной температуре. Скважины связывают центральную полость с двумя электронными резервуарами. Сама центральная полость поддерживается при более высокой температуре, чем резервуары. Колодцы действуют как фильтры, позволяющие электронам определенных энергий проходить через них. В целом, большая разница температур между полостью и резервуарами увеличивает поток электронов и выходную мощность.

Применением преобразования отработанного тепла из электрических цепей, может служить компьютерный чип, в котором преобразованное тепло уходит обратно в электричество, при этом уменьшается потребность в охлаждении и энергии для питания чипа.

Солнечные батареи

Для повышения эффективности солнечных элементов, так же предложены КЯ. Теоретический максимальный КПД традиционных однопереходных ячеек составляет около 34%, в большей степени из-за их невозможности захватывать много разных длин волн света. Многопереходные солнечные элементы, состоящие из нескольких р-п-переходов различных запрещенных зон, которые соединены последовательно, способны повышать теоретическую эффективность за счет расширения диапазона поглощенных длин волн, но из-за их сложности и стоимости изготовления имеется ограничение в использовании. Но, с иной стороны, ячейки, состоящие из р-і-п-перехода, содержащие одну или несколько квантовых ям во внутренней области, приводят к увеличению фототока в темном токе, что способствует увеличению эффективности по сравнению с обычными р-п-ячейками [16]. Фотоны энергии на глубине ямы поглощаются в скважинах и генерируют электронно-дырочные пары. В условиях комнатной температуры эти фотогенерированные носители обладают достаточной тепловой энергией,

чтобы покинуть скважину быстрее, чем скорость рекомбинации. Многопереходные солнечные элементы с квантовыми ямами могут изготавливаться с помощью таких методов, как молекулярно-лучевая эпитаксия или химическое осаждение из паровой фазы.

1.3.2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАНТОВЫХ НИТЕЙ В ТЕХНИКЕ

Электронные устройства

Нанопроволоки применяются в использовании транзистора. Они могут использоваться в качестве одного из основных элементов в современных электронных схемах. Основная задача транзистора – обеспечить хороший контроль затвор канала. Из-за высокого соотношения сторон обмотка диэлектрика затвора вокруг канала нанопроволоки может привести к хорошему электростатическому контролю потенциала канала, тем самым эффективно включая и выключая транзистор [4].

Зондирование с использованием полупроводниковых нанопроволок

Аналогично транзисторам, методология Bio / Chem-FET основывается на обнаружении локального изменения плотности заряда или так называемого «эффекта поля», характер которого направлен на распознавание между целевой молекулой и поверхностным рецептором.

Это изменение поверхностного потенциала влияет на устройство Chem-FET точно так же, как напряжение «затвора», что приводит к заметному и измеримому изменению проводимости устройства.

1.3.3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В ТЕХНИКЕ

Квантовые точки особенно перспективны для оптических применений благодаря их высокому коэффициенту экстинкции [7].

Изменчивость размера квантовых точек интересна для многих потенциальных приложений. К примеру, большие КТ имеют большой сдвиг спектра в сторону красного, чем маленькие точки и показывают менее явные квантовые свойства. а маленькие точки, с вою очередь, дают возможность использовать более тонкие квантовые эффекты (рис.7).

Квантовые точки могут использоваться в диодных лазерах, усилителях и биологических сенсорах. Высококачественные квантовые точки так же используются для оптического кодирования и мультиплексирования, благодаря их широким профилям возбуждения и узким или симметричным спектрам излучения. Квантовые точки дают новые возможности для изучения внутриклеточных процессов на уровне одной молекулы, клеточной визуализации высокого разрешения, долгосрочных наблюдений *invivo* за клеточным транспортом, нацеливания на опухоли и диагностики.

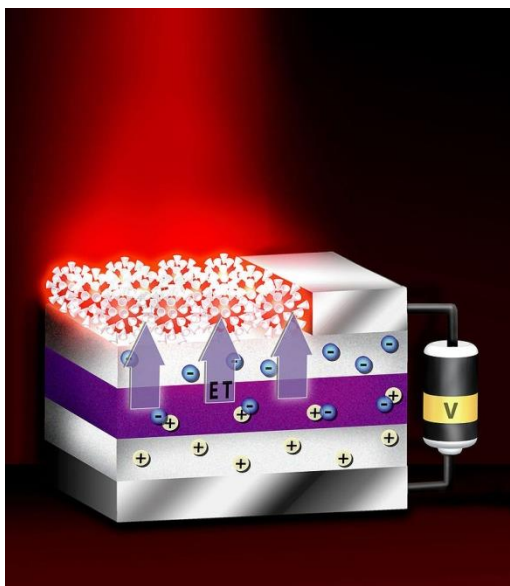


Рис. 7. Устройство, которое производит видимый свет посредством передачи энергии от тонких слоев квантовых ям к кристаллам над слоями

Нанокристаллы CdSe являются эффективными триплетными фотосенсибилизаторами [8]. Лазерное возбуждение малых наночастиц CdSe способствует извлечению энергии возбужденного состояния из квантовых точек в объемный раствор, который открывает возможность для широкого спектра потенциальных применений, таких как фотодинамическая терапия, фотоэлектрические устройства, молекулярная электроника и катализ.

Биология

В современной биологии используются разные виды красителей. Квантовые точки, как оказалось, превзошли традиционные виды красителей. Одна из очевидных причин – это яркость [7], а также их стабильность, что делает намного меньше фотообесцвечивания). Выявлено, что квантовые точки в 20 раз ярче и в 100 раз стабильнее, чем традиционные флуоресцентные репортеры.

Не обошло и стороной применение квантовых точек для высокочувствительной клеточной визуализации. Например, усовершенствованная фотостабильность КТ позволило получить много последовательных изображений в фокальной плоскости, которые возможно реконструировать в трехмерное изображение с высоким разрешением. Еще одним приложением стало использование фотостабильности зондов с КТ, то есть это отслеживание молекул и клеток в реальном времени в течение длительных периодов времени. Антитела, стрептавидин, пептиды, ДНК, и др. могут использоваться для наведения квантовых точек на специфические белки на клетках. Ученые могут наблюдать квантовые точки в лимфатических узлах мышей больше 4 месяцев.

Квантовые точки могут иметь антибактериальные свойства, подобные наночастицам, и могут убивать бактерии в зависимости от дозы. Механизм, квантовые точки которого могут убивать бактерии, заключается в нарушении функций антиоксидантной системы в клетках и подавлении антиоксидантных генов. Так же, КТ могут и повредить клеточную стенку. Выявлено, что квантовые точки эффективны против грамположительных и грамотрицательных бактерий [12].

Квантовые точки используют для нацеливания на опухоль. В условиях *in vivo* возможны две схемы нацеливания: активное нацеливание и пассивное нацеливание. Активное нацеливание КТ функционализируются специфичными для опухоли сайтами связывания для избирательного связывания с опухолевыми клетками. В случае пассивного нацеливания,

используется проникновение и удержание опухолевых клеток для доставки зондов с квантовыми точками. Быстрорастущие опухолевые клетки имеют более проницаемые мембраны, чем здоровые клетки, это и позволяет проникать мелким наночастицам в организм клетки. Кроме того, в опухолевых клетках отсутствует эффективная лимфодренажная система, что приводит к последующему накоплению наночастиц.

Фотоэлектрические устройства

Такие свойства квантовых точек, как перестраиваемый спектр поглощения и высокие коэффициенты экстинкции, дают заинтересованность для технологий сбора света, таких как фотогальваника. КТ способны повысить эффективность и снизить стоимость современных кремниевых фотоэлектрических элементов.

Квантовая точка солнечных элементов

Ароматические самосборные монослои (SAM) способны улучшить выравнивание полос на электродах для повышения эффективности. Этот метод обеспечил рекордную эффективность преобразования мощности (PCE) в 10,7%. SAM располагается между пленочным переходом коллоидной квантовой точки (CQD) ZnO-PbS, чтобы модифицировать выравнивание полосы через дипольный момент составляющей молекулы SAM, и настройка полосы может быть изменена через плотность, диполь и ориентацию молекулы SAM [4].

Дисплеи на квантовых точках

Дисплеи на квантовых точках имеют значимость, так как они способны отображать более точные цвета. Обычный цветной жидкокристаллический дисплей (ЖКД) обычно подсвечивается люминесцентными лампами (CCFL) или обычными белыми светодиодами, которые фильтруются по цвету для получения красных, зеленых и синих пикселей. Дисплеи на КТ применяют голубые светодиоды, а не белые светодиоды в качестве источников света. Часть излучаемого света преобразуется в чистый зеленый и красный свет с помощью надлежащих цветных квантовых точек, которые помещают перед

синим светодиодом, или с использованием листа рассеивателя с квантовыми точками в оптическом стекле задней подсветки. Пустые пиксели тоже используются, чтобы синий светодиод генерировал синие оттенки. Этот тип белого света в качестве подсветки ЖК-панели способен обеспечить лучшую цветовую гамму при меньших затратах, чем комбинация светодиодов RGB с использованием трех светодиодов [10].

Другим методом, с помощью которого можно достичь отображения квантовых точек, является электролюминесцентный (EL) или электроэмиссионный метод. Это включает в себя встраивание квантовых точек в каждый отдельный пиксель. Затем они активируются и контролируются с помощью приложения электрического тока. Поскольку это часто излучение света, достижимые цвета могут быть ограничены в этом методе. Электроизлучающие телевизоры QD-LED существуют только в лабораториях.

Способность КТ точно преобразовывать и настраивать спектр делает их привлекательными для ЖК-дисплеев. Предыдущие ЖК-дисплеи могут расходовать энергию, превращая красно-зеленый слабый, сине-желтый насыщенный белый свет в сбалансированное освещение. При использовании квантовых точек, на экране будут видны лишь необходимые цвета для идеальных изображений.

Фотоприемные устройства

Фотоприемники на квантовых точка изготавливаются путем обработки раствора или из обычных монокристаллических полупроводников. Обычные монокристаллические полупроводниковые КДП не могут интегрироваться с гибкой органической электроникой из-за несовместимости условий их роста с технологическими окнами, необходимыми для органических полупроводников. Такие коллоидные фотоприемники используются в камерах видимого и инфракрасного света, промышленного контроля, машинного зрения, спектроскопии и флуоресцентной биомедицинской визуализации.

ГЛАВА 2 . МЕТОДИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ФАКУЛЬТАТИВНЫХ ЗАНЯТИЙ ПО ФИЗИКЕ НА ТЕМУ «НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ»

2.1. ФАКУЛЬТАТИВНОЕ ЗАНЯТИЕ НА ТЕМУ «КВАНТОВЫЕ ЯМЫ И НИТИ. ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ТЕХНИКЕ»

К. Д. Ушинский говорил, что приохотить обучающихся гораздо важнее, чем приневоливать. Но обучение это не только интересные виды работ, оно должно приобщать к радости умственного труда, давать удовлетворение от открытия, победы. Предметом ученического исследования является первооткрытие открытого в науке. Задачами является познание еще неопознанного.

В современных условиях обучениях предоставляется возможность осуществлять изучение различных тем, помимо обязательного курса средней образовательной школы. Факультативные занятия вызывают усиленный интерес учащихся, что приводит к углубленному и прочному усвоению материала.

Тема: «Квантовые ямы и нити. Их использование в технике».

Цель занятия:

- получение новых знаний и углубление по теме полупроводниковые структуры;
- развитие мышления, познавательных интересов, интеллектуальных и творческих способностей в процессе получения новых знаний;
- воспитание коллективизма, чувства ответственности за свою команду.

Задача: углубить и систематизировать полученные знания.

Форма обучения: индивидуальная, групповая.

Оборудование: проектор, ноутбук (для презентации), карточки-задания.

Ход занятия

Вступительное слово учителя: Добрый день, юные исследователи. Сегодня мы будем знакомиться с новыми понятиями в физике, такими как «квантовые ямы и квантовые нити» (класс разделен на две группы, в начале недели был роздан материал, который учащиеся подготовили к сегодняшнему занятию). Прошу придумать вам название своим командам и мы начинаем (команды: потенциальная яма и нанопровода).

Учитель: первыми будут выступать команда «потенциальная яма». Конспектируем, задаем вопросы.

Обучающийся 1 (вводит понятие квантовой ямы, все сопровождается презентацией).

Квантовая яма – это потенциальная яма с дискретными значениями энергии. Классическая модель, используемая для демонстрации квантовой ямы, ограничивает частицы, которые первоначально могли свободно перемещаться в трех измерениях, в два измерения, заставляя их занимать плоскую область. Когда толщина квантовой ямы становится сопоставимой с длиной волны де Бройля носителей, тогда получается ограничение квантового эффекта, что приводит к уровням энергии, которые называются «энергетическими подзонами», то есть носители имеют только дискретные значения энергии.

Полупроводниковая квантовая яма была разработана в 1970 году Эсаки и Цу, которые также изобрели синтетические сверхрешетки. Они предположили, что гетероструктура, состоящая из чередующихся тонких слоев полупроводников с различными запрещенными зонами, должна проявлять интересные и полезные свойства. С тех пор много усилий и исследований было уделено изучению физики систем с квантовыми ямами, а также разработке устройств с квантовыми ямами.

Обучающийся 2: Технология изготовления квантовых ям.

Квантовые ямы сформированы в полупроводниках. Они включают в себя арсенид галлия, зажатый между двумя слоями материала с более

широкой запрещенной зоной, арсенид алюминия. Эти структуры могут быть выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии или химического осаждения из паровой фазы с контролем толщины слоя до монослоев.

Существует три основных подхода к выращиванию материальной системы КЯ: согласованная по решетке, сбалансированная по деформации и деформированная [13].

Система с решеткой

В системе с решеткой скважина и барьер имеют постоянную решетки, аналогичную материалу подложки [13]. При этом методе разность запрещенных зон имеет минимальную дислокацию, но также минимальный сдвиг в спектре поглощения.

Система с балансировкой деформаций

В системе с балансировкой деформаций скважина и барьер растут таким образом, что увеличение постоянной решетки одного из слоев компенсируется уменьшением постоянной решетки в следующем по сравнению с материалом подложки. Выбор толщины и состава слоев влияет на требования к запрещенной зоне и ограничения на транспортировку носителя. Этот подход обеспечивает наибольшую гибкость при проектировании, предлагая большое количество периодических квантовых ям с минимальной релаксацией деформации [13].

Напряженная система

Напряженная система выращивается с ямами и барьерами, которые не похожи по постоянной решетки. Напряженная система сжимает всю структуру. В результате структура способна вместить только несколько квантовых ям.

Обучающийся 3: Практическое использование квантовых ям в технике.

Квантовые ямы обширно используются в диодных лазерах, так же в красных лазерах для DVD-дисков и лазерных указок, инфракрасных лазерах в волоконно-оптических передатчиках или голубых лазерах. Они также

используются для изготовления НЕМТ (транзисторов с высокой подвижностью электронов), для использования в электронике с низким уровнем шума. Инфракрасные фотоприемники так же основаны на квантовых ямах и используются для инфракрасной визуализации.

С помощью легирования скважины или барьера КЯ донорными примесями, можно образовать двумерный электронный газ. Данная структура способствует созданию проводящего канала НЕМТ и может обладать интересными свойствами при низкой температуре. Например, как особенность, можно считать эффект Холла, который наблюдается в сильных магнитных полях. Акцепторные присадки смогут привести к образованию двумерного дырочного газа.

Учитель: теперь выслушаем команду «нанопровода». Задаем вопросы.

Обучающийся 4 (вводит понятие квантовая нить, все сопровождается презентацией).

Квантовый провод является электропроводящим проводом, в котором квантовые эффекты влияют на транспортные свойства. Обычно такие эффекты появляются в размере нанометров, поэтому их называют нанопроводами.

Обучающийся 5: Технология изготовления квантовых нитей.

Изготовление квантовых нитей происходит несколькими способами. Наиболее очевидный из них, «вырезание» узкой плоскости с помощью литографической техники из самой структуры или цели в затворе Шоттки.

Слой обеднения мы можем увидеть из образования поверхностного состояния на свободной поверхности полупроводника и на боковых гранях вырезанной полосы. Этот слой рождает дополнительное сужение проводящего канала, следовательно, квантовые эффекты, мы можем наблюдать, и в более широких полосах. Таким образом, для получения электронных нитей ширина полосы не играет важной роли.

Вот и еще один метод. Металлическим электродом покрывают поверхность полупроводниковой структуры, он образует контакт Шоттки и

имеет узкую щель. Если гетерограница находится достаточно близко от поверхности, то везде, кроме узкой области под щелью, будут отсутствовать двумерные электроны. К преимуществу можно отнести, что поменяв напряжение на затворе, можно управлять эффективной шириной квантовой нити и концентрацией носителей в ней: меняя напряжение на затворе, мы можем управлять эффективной шириной квантовой нити и концентрацией носителей в ней.

Обучающийся 6: Практическое использование квантовой нити в технике.

Нанопроволоки применяются в использовании транзистора. Они могут использоваться в качестве одного из основных элементов в современных электронных схемах. Основная задача транзистора – обеспечить хороший контроль затвор канала. Из-за высокого соотношения сторон обмотка диэлектрика затвора вокруг канала нанопроволоки может привести к хорошему электростатическому контролю потенциала канала, тем самым эффективно включая и выключая транзистор.

Учитель: теперь посмотрим, как вы усвоили новый материал. Раздаю карточки-задания обеим командам. Время на обсуждение 15 минут.

Карточка 1 с заданием для команды «нанопровода»:

1) Что такое квантовая яма?
Ответ:
2) Технология изготовления квантовых ям?
Ответ:
3) Практическое использование в технике квантовых ям?
Ответ:

Карточка 2 для команды «потенциальная яма»:

1) Что такое квантовая нить?
Ответ:
2) Технология изготовления квантовой нити?
Ответ:
3) Практическое использование квантовых нитей в технике?
Ответ:

Учитель: Молодцы, ребята. Материал усвоен. Как вам сегодняшнее занятие? Узнали что-то новое и интересное для себя? К следующему занятию прошу, так же командами, приготовить небольшой кроссворд на тему квантовых нитей и квантовой ямы. Спасибо за занятие!

2.2. ФАКУЛЬТАТИВНОЕ ЗАНЯТИЕ НА ТЕМУ « КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В МЕДИЦИНЕ И ТЕХНИКЕ

Тема: «Квантовые точки и их использование в медицине и технике».

Цель занятия:

- познакомить учащихся с новым понятием, с основными достижениями в области нанотехнологий в современном мире;
- развитие мышления, познавательных интересов, интеллектуальных и творческих способностей в процессе получения новых знаний;
- воспитание коллективизма, чувства ответственности за свою команду.

Задача: углубить и систематизировать полученные знания.

Форма обучения: индивидуальная, групповая.

Оборудование: проектор, ноутбук (для презентации).

Ход занятия

Вступительное слово учителя: Здравствуйте, юные исследователи. Сегодня у нас новая тема, но для начала проверим ваше домашнее задание. Все подготовили кроссворд? Давайте обсудим и приступим к получению новых знаний.

Ребята, наверное, уже у каждого дома есть плазменные ТВ, спутниковые связи, компьютерные технологии. Мы знаем, что есть продвижения в медицине, доступны стали процедуры УЗИ и томография. Исследованием нанотехнологий заинтересованно много специалистов с различными направлениями, и поэтому нанотехнологии мы можем увидеть во многих сферах жизнедеятельности.

Потребность в развитии высокоточной техники привело людей к тому, что они стали получать полупроводниковые нанокристаллы, то есть квантовые точки. Это и есть тема нашего занятия. Квантовая точка – это, полученный специальным образом, наноразмерный объект, в силу своих малых размеров обладающий не непрерывным, а дискретным энергетическим спектром. Внутри квантовой точки обычно находится несколько электронов, которые удерживаются там электромагнитными полями. Такую конфигурацию электромагнитных полей физики обычно называют потенциальной ямой, из-за того что, однажды "провалившись" в эту яму, электрон без посторонней помощи уже не может оттуда "выбраться". Обычно квантовую точку изображают так, как показано на нашем рисунке (рис. 8).

Размеры квантовой точки настолько ничтожны, что по законам квантовой механики в ней начинают проявляться эффекты квантования энергетических уровней, на которых могут находиться электроны. Это значит, что электрон, который находится внутри квантовой точки, может иметь не любую энергию, а только одну из набора определенных значений, зависящих от конфигурации точки, ее размеров, окружения и т.д.

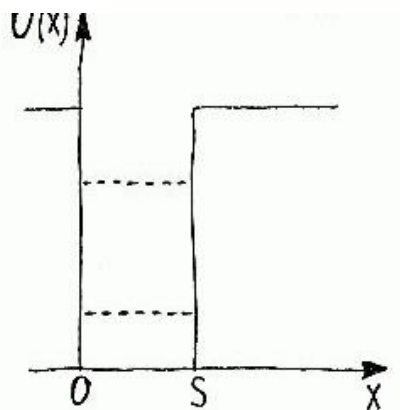


Рис. 8. Квантовая точка

С чем можем аналогию провести? С поведением электрона в атоме, где он тоже может «вращаться» только по определенным «орбитам». Ученые иногда называют квантовые точки «искусственными атомами», хоть и реальная квантовая точка при этом может состоять из сотен или даже нескольких тысяч атомов.

Характеристики квантовой точки можно менять в широких пределах, это позволяет получить структуры с удивительными свойствами, аналогов которых не существует в природе. С помощью таких структур инженеры надеются осуществить довольно много новых технологий и усовершенствовать часть уже существующих.

С помощью квантовых точек можно создавать мощные, недорогие, и миниатюрные лазеры с рабочими длинами волн от инфракрасного света до ультрафиолета, которые перекроют, этим образом, весь видимый диапазон. Частота, а значит, и цвет лазерного излучения будет зависеть от размеров квантовых точек, а его, оказалось, легко менять. Это может позволить улучшить уже существующую технологию, например, как плотность записи на компакт – диск. Его можно было увеличить в сотни, а то и тысячи раз.

В области биологии, квантовые точки играют немаловажную роль. Исследователи надеются получить, с помощью квантовых точек, новые методики и диагностики. Оказалось, что живой организм хорошо воспринимает квантовые точки, если ввести в одну из клеток или даже во все. Если быть точнее, организм их просто не замечает. Отсюда, у

исследователей появилась мысль на создание идентификационных маркеров биомолекул. Принцип в том, что при облучении светом, квантовая точка, будет светиться определенным светом, который не зависит от цвета падающего на точку освещения. Длина волны излучения зависит от типа материала, размеров и формы самой точки и тех молекул, которые ее окружают.

Наверное, вы уже знали, что для окрашивания различных структур применяют биологические красители, родамин или радиоактивные изотопы. Естественно, у них, имеются недостатки: все они бывают ядовитые, изотопы – радиоактивны, время жизни у них небольшое 1-2 часа. Что-же меняется с появлением квантовых точек? Они являются более тонким инструментом регистрации биомолекул. То есть, вводя квантовую точку внутрь клетки, можно заставить ее совершить одно из двух возможных действий: соединиться с некоторой заранее определенной молекулой, либо оставаться, насколько это будет осуществимо, на месте и реагировать изменением своего свечения на "проплывающие мимо" молекулы. Для того, чтобы применить "первое умение" квантовой точки на практике, поступают следующим образом: в первой пробирке их "настраивают" так, чтобы они соединялись с одним типом молекул, во второй – с другим типом и так далее, потом все пробирки смешивают и вводят получившийся препарат в клетку. При этом происходит как бы "окрашивание" разных участков клетки в разные цвета, на самом же деле, просто часть квантовых точек присоединяется к, скажем, мембране, часть – к лизосомам, часть – к молекулам ядра. Фотографии таких "раскрашенных" клеток, полученные в флуоресцентном свечении, выглядят на редкость ярко и красочно.

Как же получить такие маленькие объекты, да еще и нужной нам формы и размеров? С помощью AFM (AtomicForceMicroscopy – Атомно-Силовая Микроскопия) уже сейчас удастся манипулировать отдельными атомами, выстраивая из них необходимые нам объекты. Но этот способ еще очень дорог: одна квантовая точка, полученная таким методом, будет стоить

не одну тысячу долларов, а ведь для реального использования необыкновенных свойств квантовых точек нужно получать огромные массивы, состоящие, как минимум, из тысяч подобных объектов.

Сейчас существует много недорогих методов получения квантовых точек. Это литография или химический метод. Но более широко используется метод спонтанного формирования наноразмерных островков одного полупроводникового материала в матрице другого. Эта реакция происходит при взаимодействии молекулярных пучков (паров) осаждаемого материала с подложкой матрицы в условиях сверхвысокого вакуума. Этот метод так и называется – молекулярно-пучковой эпитаксией. Принцип работы: внутрь завакуумированной рабочей камеры помещается подложка, на которой выращиваются квантовые точки и несколько тиглей с нагревательными элементами, в которые помещают напыляемые на подложку вещества. Когда источники разогреваются, вещество внутри них начинает испаряться и, через узкое отверстие в крышке тигля, выходит в рабочую камеру. При этом размеры тиглей и температура нагревателей подбираются таким образом, чтобы давление паров испаряемых материалов было достаточным для формирования прямолинейно распространяющихся молекулярных пучков. Нагреватели располагаются так, чтобы максимумы распределений интенсивности пучков пересекались на подложке. Попадая на подложку, атомы из пучка начинают встраиваться в кристаллическую решетку матрицы, но пока на подложке не закончит формироваться первый слой вещества, второй расти не будет, это приводит к почти бездефектному росту кристалла при совпадении параметров решетки растущего материала с параметром решетки подложки. Параметры решетки, это расстояние между двумя узлами кристаллической решетки. В случае же получения массива квантовых точек, для эпитаксии используют вещество, период кристаллической решетки которого не совпадает с периодом кристаллической решетки подложки. Атомы исходного вещества начинают встраиваться в кристаллическую решетку матрицы подложки, полностью

повторяя ее морфологию. Они взаимодействуют с оборванными связями атомов верхнего слоя подложки и как бы "достраивают" решетку, фиксируясь в незанятых местах. В кристаллической решетке подложки оказываются атомы другого элемента, которые сильнее или слабее взаимодействуют друг с другом, возникают упругие натяжения верхнего, вновь наращенного слоя. Пока этот слой достаточно тонкий, напряжения не приводят к его деформации, но, начиная с некоторого момента, он "раскалывается" на отдельные островки. На следующем рисунке показано образование пирамидальных островков арсенида индия в результате деформации плоских слоев этого же полупроводника (пунктирная линия), выращенных на подложке из арсенида галлия (рис. 9).

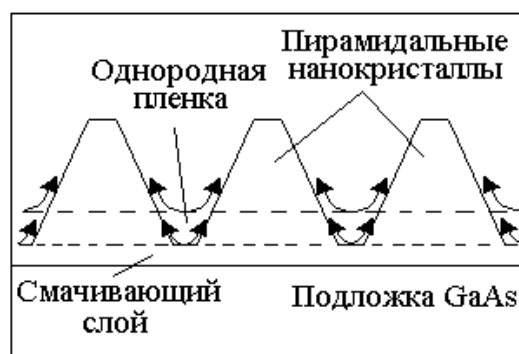


Рис. 9. Образование пирамидальных островков InAs

Почему же образуются островки, а не обычная плоская поверхность? Движущей силой в данном случае является стремление системы к минимуму энергии. При несовпадении параметров решетки возникают упругие деформации как растущего слоя, так и подложки. Если в процессе роста поверхность остается плоской (пунктир на рисунке), то энергия упругой деформации растет, а энергия поверхности не изменяется. При определенной толщине такая ситуация становится энергетически невыгодной. Минимуму энергии системы будет соответствовать образование трехмерных островков пирамидок (на рисунке показано стрелками), в которых основание будет сильно деформировано, но деформация будет убывать по мере удаления от подложки к вершине пирамидки. Ура! Это и есть те самые квантовые точки.

Ученые продолжают бороться за усовершенствование и снижение стоимости уже существующих методов, так и за появление новых.

Учитель: Ребята, как вы усвоили данный материал? Задавайте вопросы. Даю вам задание: каждому придумать по два вопроса на нашу тему. Время на подготовку 5 минут.

Учитель: Вы огромные молодцы! Спасибо за занятие!

ГЛАВА 3. МУЛЬТИМЕДИЙНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ФАКУЛЬТАТИВНЫХ ЗАНЯТИЙ ПО ФИЗИКЕ НА ТЕМУ «НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ»

3.1. РАЗРАБОТКА ПРЕЗЕНТАЦИИ НА ТЕМУ «НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ»

В данной главе я опишу мультимедийное сопровождение факультативных занятий, которые подойдут, как и для предложенные мною в главе 2, так и для других занятий на данную тему.

Презентация **«Как создаются квантовые структуры»** (Приложение 1).

В **1 слайде** идет подготовка учащихся к новой теме. Прежде чем знакомиться с основными приемами современной нанотехнологии, рассмотрим, кратко, структуру энергетического спектра полупроводников. Затрагиваем появление потенциальной ямы.

На **2 слайде** продолжаем описывать создание квантовой ямы. Показываем на рисунке квантовую яму, сформированную в слое полупроводника с узкой запрещенной зоной, которая находится между двумя полупроводниками, обладающими более широкими запрещенными зонами.

3 слайд. Описываем наилучший метод приготовления квантовых структур – метод молекулярно-лучевой эпитаксии. Выращиваем тонкий слой полупроводника, направляя поток атомов или молекул на тщательно очищенную подложку. Выращивание структуры производят в глубоком

вакууме, чтобы избежать загрязнений, потому что некоторые потоки атомов одновременно летят на подложку. Весь процесс управляется компьютером, химический состав и кристаллическая структура выращиваемого слоя контролируются в процессе роста. Чтобы вырастить квантовую яму, необходимо во время роста менять химический состав атомов, летящих на растущий слой.

4 слайд. Даем определение квантовой точке.

Основным фактором для создания КТ является наличие трехмерной потенциальной ямы, где носители заряда заперты по всем трем пространственным координатам.

В **5 слайде**, мы описываем рисунок, на котором показаны квантовые точки, созданные на границе раздела арсенида галлия и арсенида алюминия-галлия.

Внешний вид квантовых точек также существенно зависит от условий их получения. Существует несколько способов производства квантовых точек.

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии, устройство которого мы наблюдали на слайде 3.

На **6 слайде** представлена установка моэгидридной газофазной эпитаксии.

При моэгидридной газофазной эпитаксии (МОСГЭ) гетероструктуры выращиваются в газофазном реакторе при атмосферном давлении. Газовой фазой в реакторах является горячий поток водорода, который смешан с атомами осаждаемого вещества. Для формирования квантовой точки источники полупроводников молекул добавляется в реактор по очереди. В диапазоне температур рабочей области 430-650 °С наиболее качественные гетероструктуры выращивались при рабочей температуре около 580 °С.

7 слайд. Метод коллоидного синтеза. Показываем аппаратура синтеза, кристалл CdSe, квантовую точку в защитной оболочке.

Коллоидный синтез происходит в жидкой фазе. Например, для коллоидного синтеза нанокристалов CdSe, диметил кадмия и селеновую пудру растворяют в триалкилфосфине, затем полученную смесь впрыскивают в разогретый до температуры 350 °С триоктилфосфин. Рабочая температура выращивания нанокристалов 280-300 °С. При выращивании можно менять рост, диаметр и форму нанокристалла.

К преимуществу метода можно отнести массовое производство квантовых точек, гибкое управление технологическими параметрами. К недостаткам: необходимость во многих случаях эмпирически подбирать параметры технологического процесса.

8 слайд. Переходим к понятию квантовые нити. Затрагиваем эффект Холла.

В **9 слайде** даем представление эффекта Холла.

10 слайд. Продолжаем мысль из слайда 8. Говорим о том, что необходимо иметь, чтобы сделать одномерные электронные системы. Обсуждаем представленную на слайде формулу.

В **11 слайде** переходим к описанию метода изготовления квантовых нитей. Рассказываем о более очевидном – «вырезание».

12 слайд. Вопрос-ответ. Проверка полученных знаний.

- 1) Какие методы существуют для изготовления квантовых точек?
- 2) Сформулируйте определение, что такое «квантовые нити»?
- 3) Как создают квантовые ямы?
- 4) Что нового и интересного вы узнали для себя?

3.2. РАЗРАБОТКА ПРЕЗЕНТАЦИИ НА ТЕМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В БЫТУ И МЕДИЦИНЕ

Презентация «Использование НП технологий в быту и медицине» (Приложение 2).

1 слайд. Знакомство с темой.

На **2 слайде** идет описание применения квантовых ям. Представлены красные лазеры, лазерные указки, инфракрасный лазер для оптических передатчиков и синих лазерах.

3 слайд. Представлены инфракрасные фотодетекторы, основанные на использовании квантовых ям. Например, резонансный туннельный диод использует квантовую яму между двумя барьерами для создания отрицательного дифференциального сопротивления.

4 слайд. Применение квантовой нити в технике. Описывается работа лазера. Работа лазера в режиме генерации происходит при усилении света в резонаторе больше полных потерь. Если потери равные в резонаторе, то для достижения порога генерации нужно инжектировать в активную область лазера тем меньше носителей, чем больше плотность состояний вблизи края зоны. То есть, для уменьшения порогового тока нужно иметь структуру с высокой плотностью состояний.

5 слайд. Применение квантовых точек в технике. Описывается защита изделий от фальсификации, с помощью чернил с квантовыми точками.

6 слайд. Описывается использование маркера в медицинских и биологических исследованиях. Использование квантовых точек в качестве флуоресцентных меток для изучения опухолевых клеток.

7 слайд. Дисплеи на квантовых точках. Прототип первого дисплея. Использование в нем квантовых точек.

8 слайд. Лазер на квантовых точках. Преимущество лазера на квантовых точках, от традиционного полупроводникового лазера.

9 слайд. Энергетика. Принцип тонкопленочных солнечных батарей.

10 слайд. Интересный факт. «Солнечная краска» -солнечная батарея.

11 слайд. Интересный факт. Метод изготовления солнечных элементов из квантовых точек.

12 слайд. Интересный факт. Проект окон – солнечных батарей.

12 Слайд. Итог занятия.

13. Слайд. Вопрос-ответ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обучающихся сам предмет физика – предмет открытия чего-то нового, подтверждение теории практикой, объяснение различных процессов экспериментом. И очень важно, чтобы занятия давали ученику возможность не только узнать интересную информацию, но и дать пищу для размышления, для творчества. Для этого и нужно вводить факультативные занятия с темами, которые не присутствуют в школьной программе. Это даст возможность расширить свой кругозор, возможно, приведет к открытиям юных исследователей.

К сожалению, не во всех школах есть возможность проводить эксперименты, в виду недостатка оборудования. Да и есть такие темы занятий, которые невозможно провести в рамках кабинета физики. Мы знаем, что привлечь ребенка лишь теорией трудно. Но мы живем в век новых технологий и интернета, благодаря чему мы можем создавать мультимедийное сопровождение любому уроку и факультативному занятию. Это позволяет нам привлечь внимание обучающегося, заинтересовать его в данной теме, наглядно объяснить тот или иной физический процесс.

В свою очередь, хочу сказать, что выбранная мною тема актуальна сейчас и будет актуальна еще много лет. Ведь наука не стоит на месте. А использование низкоразмерных полупроводниковых структур дает для исследователей неограниченную возможность новых открытий.

Поставленные в бакалаврской работе цели и задачи полностью выполнены.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адачи, Садао (1982). Msgstr "Материальные параметры двоичных файлов In1-xGaхAsyP1-y и связанных с ними". Журнал прикладной физики. 53 (12): 8775–8792. DOI: 10.1063 / 1.330480. ISSN 0021-8979.
2. Андерсон, Нил Г. (13 апреля 1995 года). «Идеальная теория солнечных элементов с квантовыми ямами». Журнал прикладной физики. 78 (3): 1850–1861. Bibcode: 1995JAP 78.1850A. DOI: 10.1063 / 1.360219. ISSN 0021-8979.
3. Андерсон, Р. Л. (1960). "Германо-галлиевые арсенидные гетеропереходы [Письмо в редакцию]". Журнал IBM исследований и разработок. 4 (3): 283–287. DOI: 10.1147 / rd.43.0283. ISSN 0018-8646.
4. Асаи, Хиромитсу; О, Кунишиге (1983). «Сдвиг запрещенной зоны энергии с упругой деформацией в эпитаксиальных слоях GaхIn1 – хР на подложках (001) GaAs». Журнал прикладной физики. 54 (4): 2052–2056. DOI: 10.1063 / 1.332252. ISSN 0021-8979.
5. Барнхем, Кит; Баллард, Ян; Барнс, Дженни; Коннолли, Джеймс; Гриффин, Пол; Kluftinger, Benjamin; Нельсон, Дженни; Цуй, Эрнест; Захариу Александр (1997-04-01). «Квантовые колодцы солнечных батарей». Прикладная наука о поверхности. Материалы восьмой международной конференции по твердым пленкам и поверхностям. 113-114: 722–733. Bibcode: 1997ApSS..113..722B. DOI: 10.1016 / S0169-4332 (96) 00876-8. ISSN 0169-4332.
6. Барнхем, К.; Захариу А. (1997). «Квантовые колодцы солнечных батарей». Прикладная наука о поверхности. 113-114: 722–733. Bibcode: 1997ApSS..113..722B. DOI: 10.1016 / S0169-4332 (96) 00876-8.
7. Воронов В.К., Подоппелов А.В. Современная физика: Учебное пособие. – М.: КомКнига, 2005. – 512 с.

8. Гекельман, Стефан; Лакнер, Дэвид; Керхер, Кристиан; Димрот, Фрэнк; Бетт, Андреас В. (2015). «Исследования солнечных батарей $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, выращенных MOVPE». IEEE Журнал Фотовольтаики. 5 (1): 446–453. DOI: 10.1109 / jphotov.2014.2367869.

9. Derkacs, D .; Chen, W. V .; Мэтью, П. М .; Lim, S.H .; Ю., П. К. Л .; Ю., Э. Т. (2008). «Рассеяние света, вызванное наночастицами, для улучшения характеристик солнечных элементов с квантовыми ямами». Письма по прикладной физике. 93 (9): 091107. Bibcode: 2008ApPhL..93i1107D. DOI: 10.1063 / 1.2973988.

10. Джайн, Нихил; Geisz, JohnF .; Франция, Райан М .; Норман, Андрей Г .; Штайнер, Майлз А. (2017). «Улучшенный сбор тока в солнечных элементах GaInAsP 1,7 эВ, выращенных на GaAs методом парофазной эпитаксии металлов». IEEE Журнал Фотовольтаики. 7 (3): 927–933. DOI: 10.1109 / jphotov.2017.2655035.

11. JohnWiley&Sons, «Квантовые провода и точки», Квантовые колодцы, Провода и точки, Ltd, 2006-01-27, с. 243–270, doi: 10.1002 / 0470010827.ch8, ISBN 978-0-470. -01082-2

12. Кинг Р., Лоу Д., Фетцер С., Шериф Р., Эдмондсон К., Курц С., ... и Карам Н. Х. (2005, июнь). Пути к 40% -эффективному концентратору фотовольтаики. В учеб. 20-я Европейская конференция по фотоэлектрической солнечной энергии (стр. 10-11).

13. Марк; Испасою, Радуга (2017), Касап, Сафа; Кэппер, Питер, "Квантовые скважины, сверхрешетки и разработка запрещенных зон", Справочник электронных и фотонных материалов Springer, SpringerInternationalPublishing, р. 1, doi: 10.1007 / 978-3-319-48933-9_40, ISBN 978-3-319-48931-5

14. Нельсон, Дж.; Рахман, М.; Barnham, K.W.J.; Робертс, J.S .; Баттон С. (июнь 1993 года). «Устойчивый выход носителя из одиночных квантовых ям». IEEE журнал квантовой электроники. 29 (6): 1460–1468. Bibcode: 1993IJQE ... 29.1460N. DOI: 10.1109 / 3.234396. ISSN 0018-9197.

15. Odoh, E.O., & Njapba, A. S. (2015). Обзор полупроводниковых приборов с квантовыми ямами. *Adv. Phys. Теор. Appl*, 46, 26-32.
16. Ramey, S. M. ; Хой Р. (2003). «Моделирование солнечных батарей с множественными квантовыми ямами, включая захват, выход и рекомбинацию фотовозбужденных носителей в квантовых ямах». *IEEE Транзакции на электронных устройствах*. 50 (5): 1179–1188. Bibcode: 2003ITED ... 50.1179R. DOI: 10.1109 / TED.2003.813475.
17. Sayed, Ислам Э. Х.; Джайн, Никхил; Steiner, Myles A. ; Geisz, John F. ; Bedair, S.M. (2017). «100-периодная сверхрешеточная солнечная батарея InGaAsP / InGaP с квантовой эффективностью подзоны, приближающейся к 80%». *Письма по прикладной физике*. 111 (8): 082107. Bibcode: 2017ApPhL.111h2107S.
18. Сотманн, Б.Р. ; Санчес Р.; Jordan, A.N.; Бюттикер, М. (2013). «Мощный энергетический комбайн на основе резонансно-туннельных квантовых ям». *Новый журнал физики*. 15 (9): 095021. arXiv: 1309.7907. Bibcode: 2013NJPh ... 15i5021S. DOI: 10.1088 / 1367-2630 / 15/9/095021.
19. Тан Д.Я., Чжан Х., Чжао Л.М., Ву Х. (2008). "Наблюдение векторных солитонов с высокой степенью поляризации и фиксации в волоконном лазере" (PDF). *Письма о физическом обзоре*. 101 (15): 153904. arXiv: 0903.2392. Bibcode: 2008PhRvL.101o3904T.doi: 10,1103 / PhysRevLett.101.153904. PMID18999601. Архивировано из оригинального (PDF) 20 января 2010 года.
20. Фуджи, Хиромаса; Топрасертпонг, Касидит; Ван Юньпэн; Ватанабе, Кентаро; Сугияма, Масаказу; Накано, Йошиаки (2014). «100-периодные квантовые ямы InGaAs / GaAsP с запрещенной зоной 1,23 эВ для высокоэффективных солнечных элементов GaAs: на пути к согласованным по току тандемным элементам на основе Ge». *Прогресс в фотовольтаике: исследования и применение*. 22 (7): 784–795. DOI: 10.1002 / ppr.2454.

Приложение 1. Слайды презентации «Как создаются квантовые структуры»

Слайд 1



Как создаются квантовые структуры?

Познакомимся с основными приемами современной нанотехнологии, однако прежде необходимо рассмотреть структуру энергетического спектра полупроводников. Этот спектр состоит из разрешенных и запрещенных энергетических зон, которые сформированы из дискретных уровней атомов, образующих кристалл. Самая высокая энергетическая зона называется зоной проводимости. Ниже зоны проводимости расположена валентная зона, а между ними лежит запрещенная зона энергий. У одних полупроводников запрещенные зоны широкие, а у других более узкие. На рис. 1 мы видим такую границу узкозонного и широкозонного полупроводников. Для электронов, движущихся в узкозонном полупроводнике и имеющих энергию меньше E_{c2} , граница будет играть роль потенциального барьера. Два гетероперехода ограничивают движение электрона с двух сторон и как бы образуют потенциальную яму.

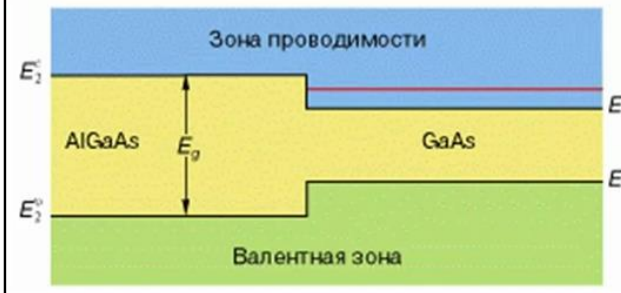


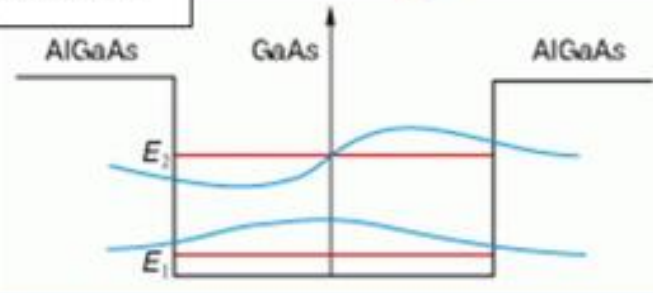
Рис. 1. Энергетические зоны на границе двух полупроводников - гетероструктуре. E_{c1} и E_{c2} - границы зоны проводимости и валентной зоны, E_g - ширина запрещенной зоны. Электрон с энергией меньше E_{c2} может находиться только справа от границы

Слайд 2

Таким способом и создают квантовые ямы, помещая тонкий слой полупроводника с узкой запрещенной зоной между двумя слоями материала с более широкой запрещенной зоной. В результате электрон оказывается запертым 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 приготовить и структуру, содержащую квантовый барьер, для чего следует поместить тонкий слой полупроводника с широкой запрещенной зоной между двумя полупроводниками с узкой запрещенной зоной.

Квантовые ямы.

Рис. 2. Квантовая яма, сформированная в слое полупроводника с узкой запрещенной зоной, заключенном между двумя полупроводниками, обладающими более широкой запрещенной зоной



Слайд 3

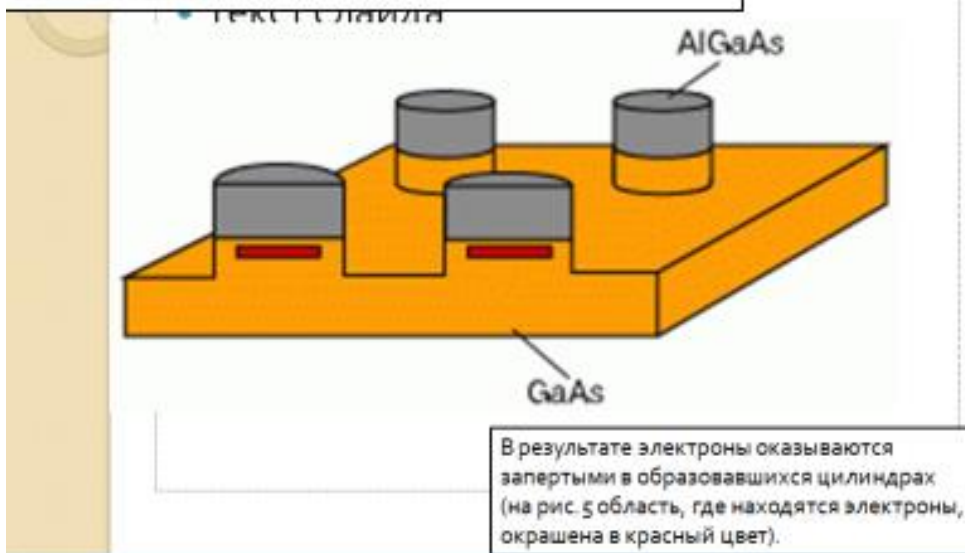


Слайд 4



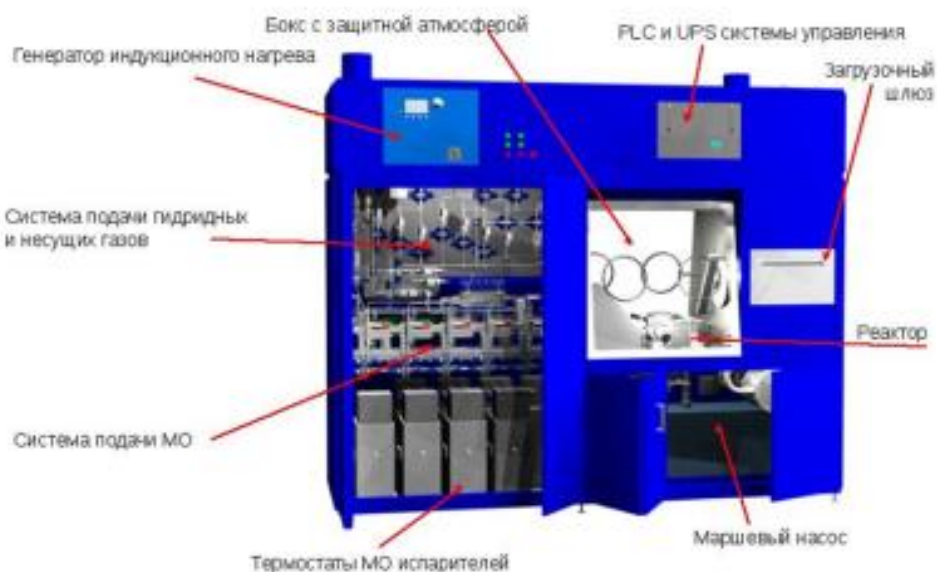
Слайд 5

В большинстве случаев решающим фактором для создания квантовой точки является наличие трехмерной потенциальной ямы, в которой носители заряда оказываются заперты по всем трем пространственным координатам. На рис. 5 показаны квантовые точки, созданные на границе раздела арсенида галлия и арсенида алюминия-галлия.



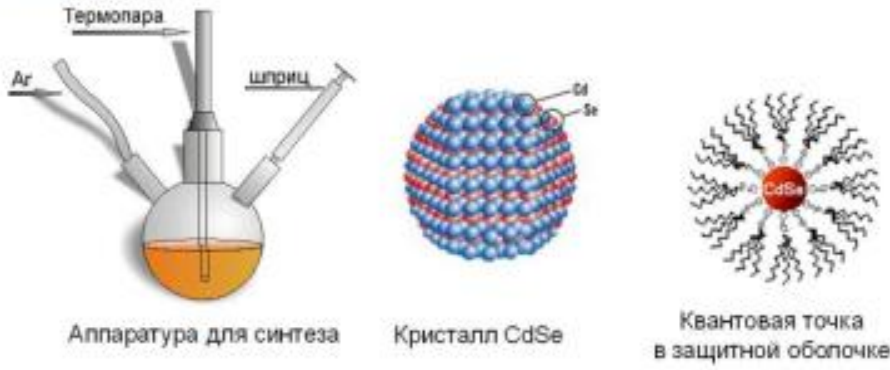
Слайд 6

Установка МОС-гидридной эпитаксии



Слайд 7

Метод коллоидного синтеза



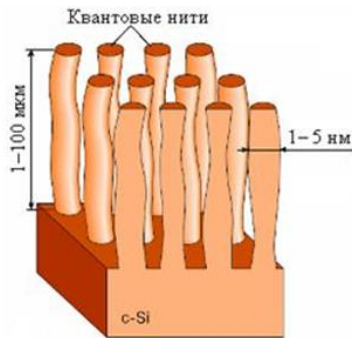
Аппаратура для синтеза Кристалл CdSe Квантовая точка в защитной оболочке

$$(C_{17}H_{33}COO)_2Cd + (C_8H_{17})_3PSe \rightarrow CdSe \downarrow$$

в присутствии «защиты» – олеиновой кислоты
растворитель – $C_6H_5OC_6H_5$, $t = 130-250\text{ }^{\circ}C$

Слайд 8

Квантовые нити.



Квантовые нити

1-100 мкм

1-5 нм

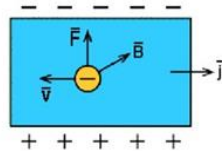
c-Si

В полупроводниковых структурах, где движение электронов по одной из координат ограничено, начинают проявляться эффекты квантования вдоль этой координаты. В результате свободное движение электронов из трехмерного становится двумерным, что кардинально меняет большинство электронных свойств и является причиной новых интересных эффектов, в том числе квантового эффекта Холла.

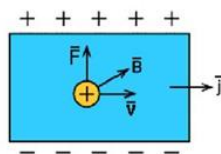
Вполне естественно сделать еще один шаг на этом пути и создать (или по крайней мере попытаться это сделать) одномерные электронные системы, часто называемые квантовыми нитями.

Эффект Холла

Действие силы Лоренца на движущийся отрицательный заряд



Действие силы Лоренца на движущийся положительный заряд



- **Эффектом Холла** называется возникновение поперечного электрического поля и разности потенциалов в проводнике или полупроводнике, по которым проходит электрический ток, при помещении их в магнитное поле, перпендикулярное к направлению тока.
- Если в магнитное поле с индукцией B поместить проводник или электронный полупроводник, по которому течет электрический ток плотности j , то на электроны, движущиеся со скоростью v в магнитном поле, действует сила Лоренца F , отклоняющая их в определенную сторону

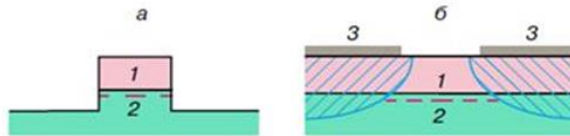
- Для этого необходимо иметь нечто действительно напоминающее тонкую нить, где движение электронов резко ограничено в двух направлениях из трех и лишь вдоль оси нити (будем называть ее осью x) остается свободным. При этом за счет малых поперечных размеров нити движение в плоскости yz квантуется, и его энергия может принимать лишь некоторые дискретные значения, так что полный закон дисперсии имеет вид:

$$E = E_1 + \frac{p_k^2}{2m}$$

- где m - эффективная масса электронов. Видно, что каждому дискретному уровню E_i соответствует целый набор возможных состояний, отличающихся импульсом pk . При этом обычно говорят не об уровне, а о подзоне размерного квантования с номером i .
- Как уже говорилось, переход от трех- к двумерным электронным системам раскрыл перед исследователями целую новую область с большим количеством принципиально новых физических явлений. Можно надеяться, что то же самое произойдет и при новом шаге в область одномерных систем.

Слайд 11

Методы изготовления квантовых нитей.



Полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми нитями, полученные с помощью субмикронной литографии за счет вытравливания узкой полоски из самой структуры (а) или щели в затворе Шоттки (б): 1 – полупроводник с широкой запрещенной зоной (например, AlGaAs), 2 – полупроводник с узкой запрещенной зоной (например, GaAs), 3 – металлический затвор. Образующийся вблизи гетерограницы узкий электронный канал показан штриховой линией. Заштрихованы области обеднения электронами

- Наиболее очевидный из них - это непосредственное "вырезание" узкой полоски с помощью литографической техники (рис. 10).

Слайд 12

Вопрос – ответ.

- 1) Какие методы существуют для изготовления квантовых точек?
- 2) Сформулируйте определение, что такое «квантовые нити»?
- 3) Как создают квантовые ямы?
- 4) Что нового и интересного вы узнали для себя?

Приложение 2. Слайды презентации «Использование низкоразмерных полупроводниковых технологий в быту и медицине»

Слайд 1

Использование низкоразмерных полупроводниковых технологий в быту и медицине.

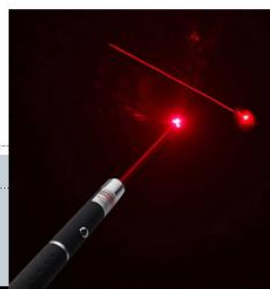
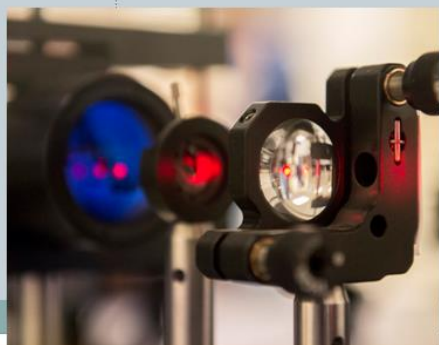


Слайд 2

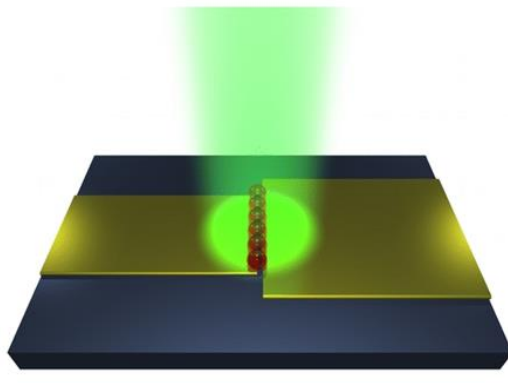
Применение квантовой ямы в технике.

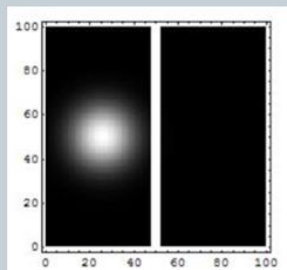
Квантовые ямы широко используются в лазерных диодах, включая красные лазеры для DVD и лазерных указок, инфракрасных лазерах для оптических передатчиков и синих лазерах

ЛАЙДА



Слайд 3





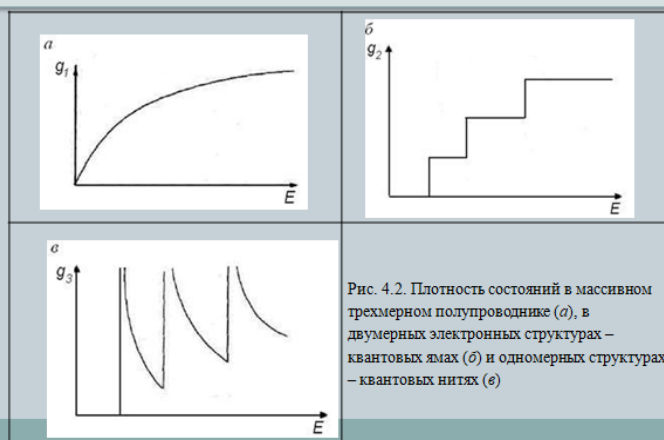
Туннельный эффект –
преодоление микрочастицей
потенциального барьера

Используются в транзисторах с высокой подвижностью электронов. Инфракрасные фотодетекторы также основаны на использовании квантовых ям. Например, резонансный туннельный диод использует квантовую яму между двумя барьерами для создания отрицательного дифференциального сопротивления

Слайд 4

Применение квантовой нити в технике.

В свое время значительный прогресс в создании лазеров был связан с использованием полупроводниковых структур, содержащих квантовые ямы. Причина этого становится ясной после сравнения рис. 4.2, а и откуда следует, что плотность состояний вблизи края зоны в квантовых ямах имеет конечную величину, т. е. значительно превосходит плотность состояний в массивном полупроводнике, обращаясь в нуль на краю. Рис. 4.2, в указывает на то, что в квантовых нитях можно ожидать еще большего улучшения характеристик лазеров из-за обращения плотности состояний в бесконечность.

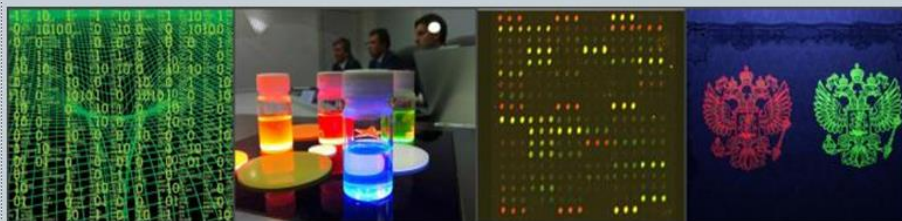


Слайд 5

Применение квантовой точки в технике.



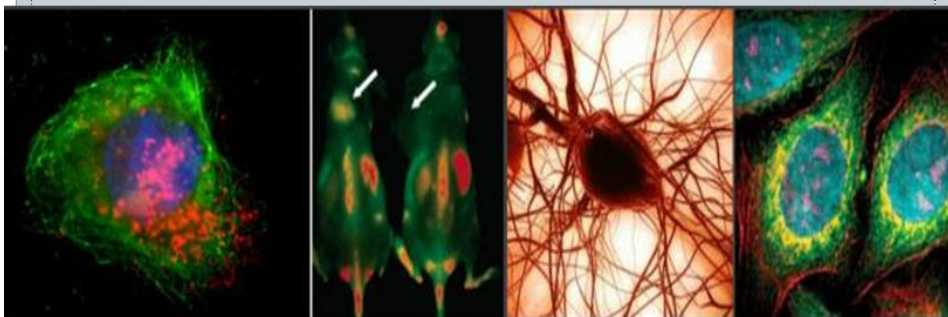
Защита документов и изделий от фальсификации: ценных бумаг, банкнот, удостоверений личности, штампов, печатей, сертификатов, свидетельств, пластиковых карт, товарных знаков. Система многоцветного кодирования на основе квантовых точек может быть коммерчески востребована для цветовой маркировки продукции в пищевой, фармацевтической, химической промышленности, ювелирных изделий, произведений искусства.



Слайд 6

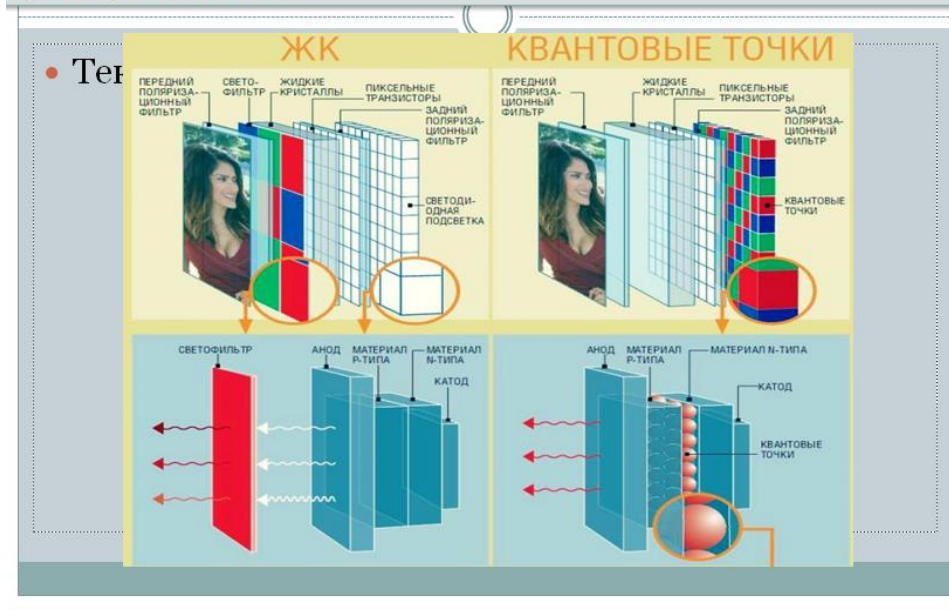
Маркер в медицинских и биологических исследованиях. Благодаря тому, что на поверхность квантовых точек можно нанести биологические маркеры, фрагменты ДНК и РНК, реагирующие на определенный тип клеток, их можно использовать в качестве контраста в биологических исследованиях и диагностике рака на ранних стадиях, когда опухоль еще не определяется стандартными методами диагностики.

Использование квантовых точек в качестве флуоресцентных меток для изучения опухолевых клеток *in vitro* — одна из наиболее перспективных и быстро развивающихся сфер применения квантовых точек в биомедицине.



Слайд 7

Дисплеи на квантовых точках: QLED – технология создания дисплеев LCD со светодиодной подсветкой на квантовых точках уже опробована передовыми производителями электроники. Применение этой технологии позволяет сократить энергопотребление дисплея, увеличить световой поток по сравнению с LED экранами на 25-30%, более сочные цвета, четкая цветопередача, глубина цвета, возможность делать экраны сверхтонкими и гибкими.



Слайд 8

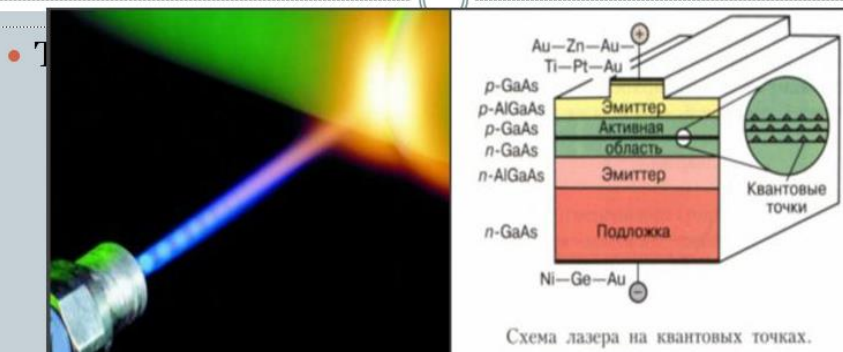
Прототип первого дисплея, по этой технологии был представлен компанией **Samsung** в феврале 2011, а первый компьютерный дисплей выпустила компания **Philips**.

В нем квантовые точки используются для получения красного и зеленого цветов из спектра излучения синих светодиодов, что обеспечило близкую к естественной цветопередачу. В 2013 году компания **Sony** выпустила QLED экран, работающий по такому же принципу. В текущий момент эта технология производства больших экранов не имеет широкого применения из-за высокой себестоимости производства.



Слайд 9

Заголовок слайда



Лазер на квантовых точках. Лазер, рабочей средой которого являются квантовые точки в излучающей области, имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными полупроводниковыми лазерами на основе квантовых ям. У них лучше характеристики по полосе частот, интенсивности шума, они менее чувствительны к изменениям температуры.

Слайд 10

Энергетика. На основе квантовых точек также разработаны несколько моделей тонкопленочных солнечных батарей. В их основе лежит следующий принцип действия: фотоны света попадают на фотоэлектрический материал, содержащий квантовые точки, стимулируют появление пары электрона и дырки, энергия которых равна или превосходит минимальную энергию, необходимую электрону данного полупроводника для того, чтобы перейти из связанного состояния в свободное. Изменяя размеры нанокристаллов материала можно варьировать «энергетическую производительность» фотоэлектрического материала.



В 2011 г. исследователи из университета Нотр-Дам предложили «солнечную краску» на основе диоксида титана, нанесение которой может превратить любой объект в солнечную батарею. У нее довольно низкое КПД (всего 1%), но зато она дешева в производстве и может производиться в больших объемах.

Слайд 11

В 2014 г. Ученые из Массачусетского технологического института представили метод изготовления солнечных элементов из ультратонких слоёв квантовых точек, КПД их разработки – 9%, а главное ноу-хау заключается в технологии объединения квантовых точек в пленку.

- Текст слайда



Слайд 12



В 2015 г. Лаборатория Центра передовых технологий солнечной фотовольтаики в Лос-Аламосе предложила свой проект окон-солнечных батарей с КПД 3,2%, состоящих из прозрачного люминесцентного квантового концентратора, который может занимать достаточно большую площадь, и компактных солнечных фотозаэлементов.

Слайд 13

Как видим потенциально сферы практического применения квантовых точек широки и разнообразны, теоретические разработки ведутся сразу в нескольких направлениях. Массовому внедрению их в различных сферах препятствует ряд ограничений: дороговизна производства самих точек, их токсичность, несовершенство и экономическая нецелесообразность самой технологии производства. Но наука не стоит на месте, в ближайшем будущем нас ждут большие открытия.



Слайд 14

Вопрос-ответ.



- Вам понравилось сегодняшнее занятие?
- Что-то было для вас ново?
- Что интересного и познавательного вы узнали для себя?