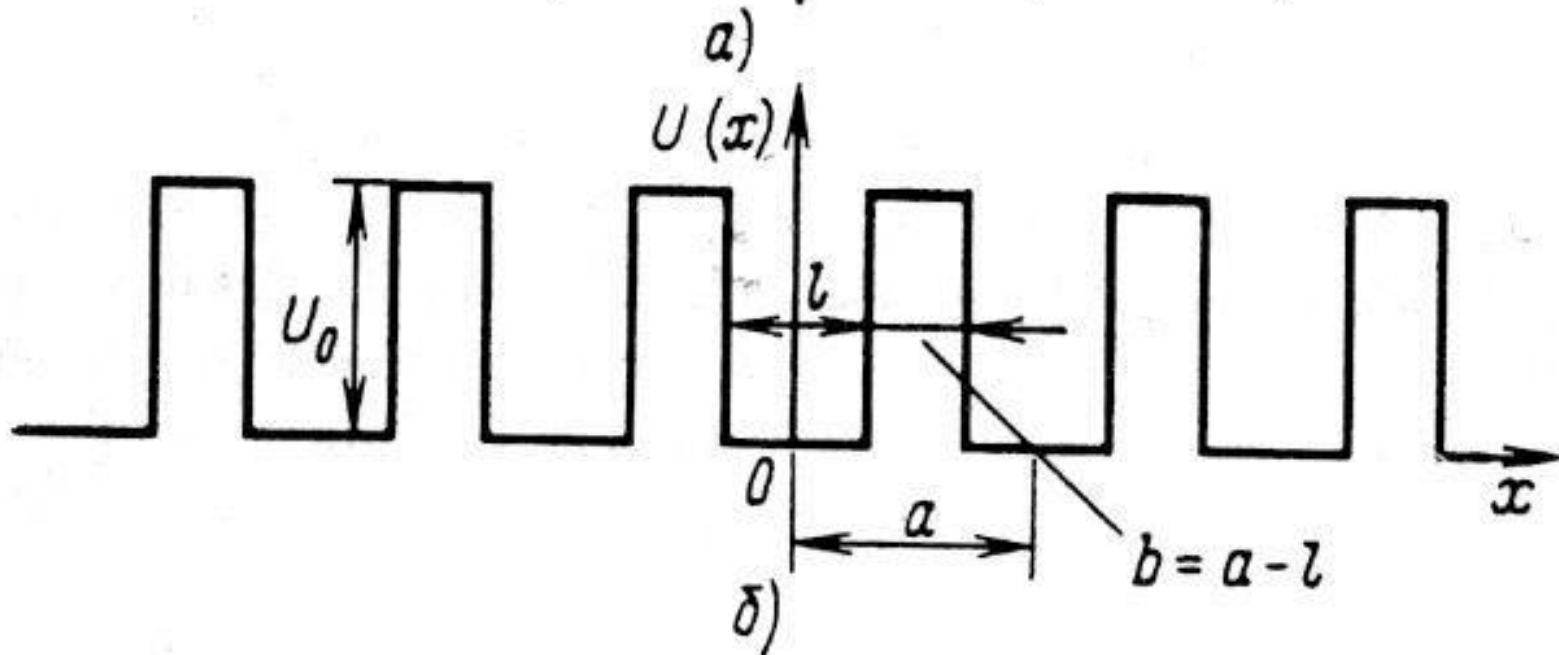
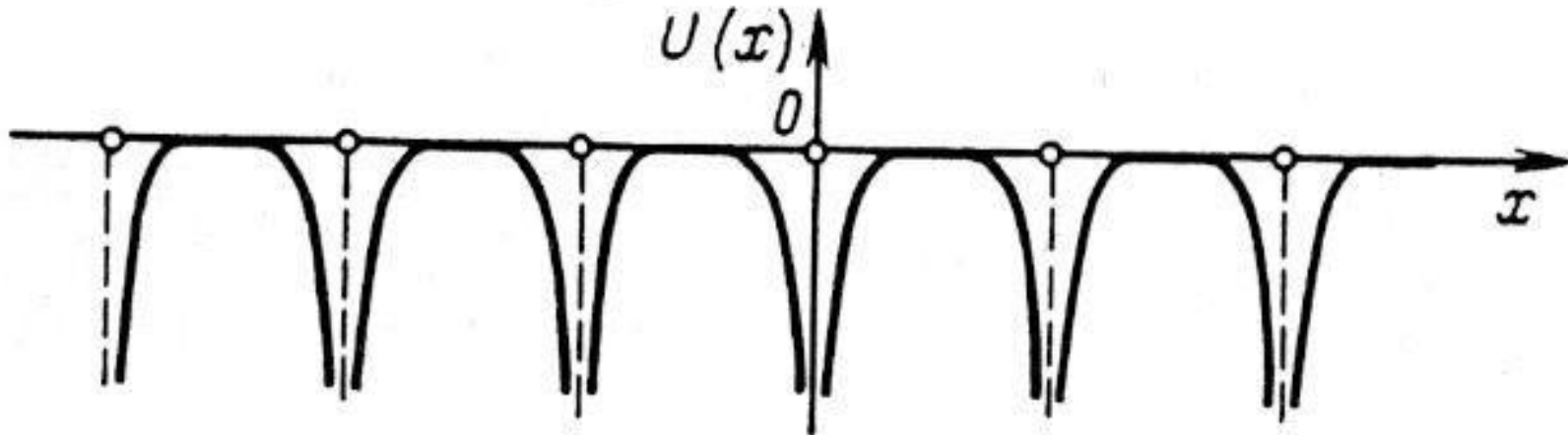
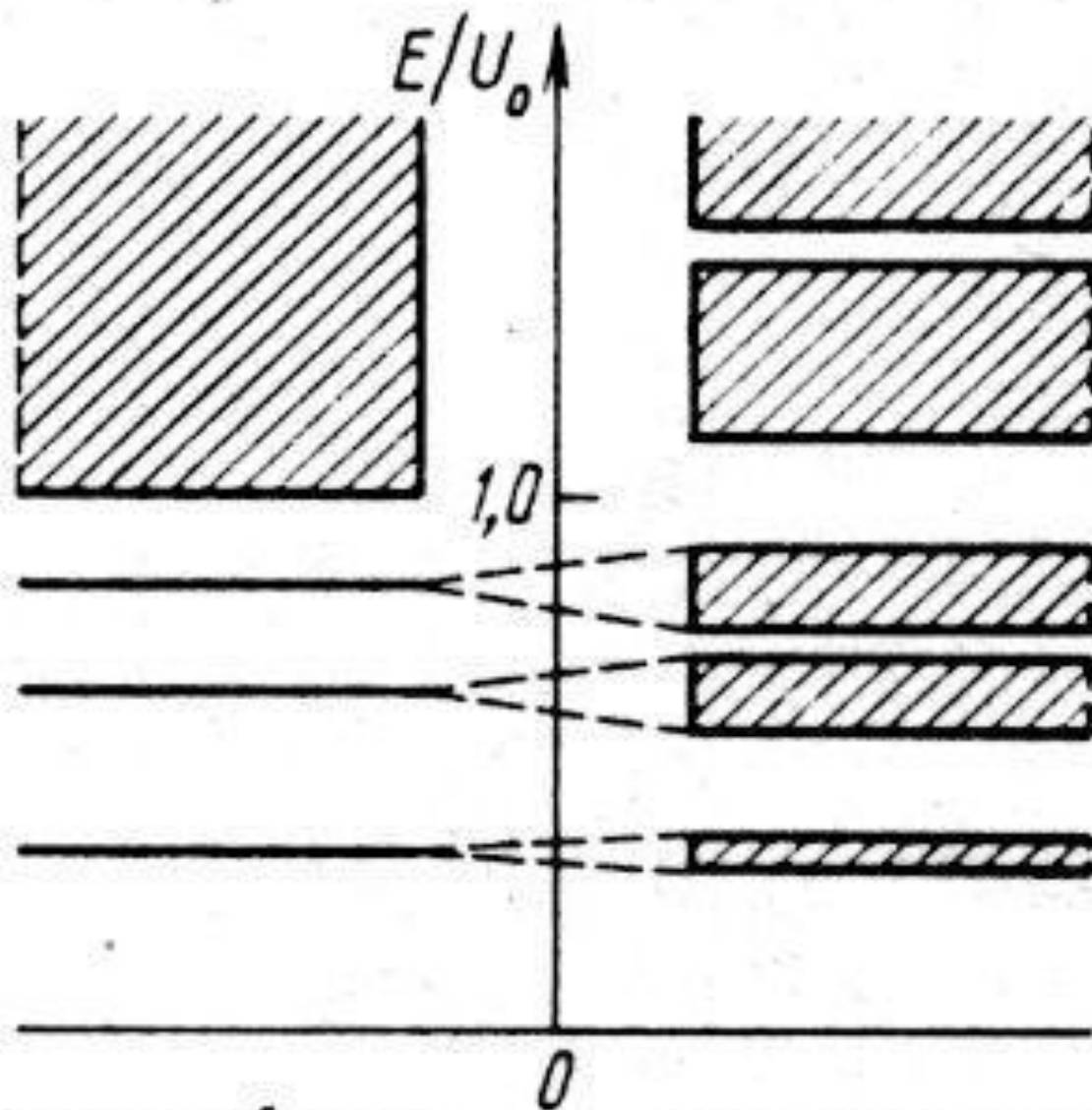


- Потенциальная энергия электрона в кристалле
  - и модель Кронига и Пенни

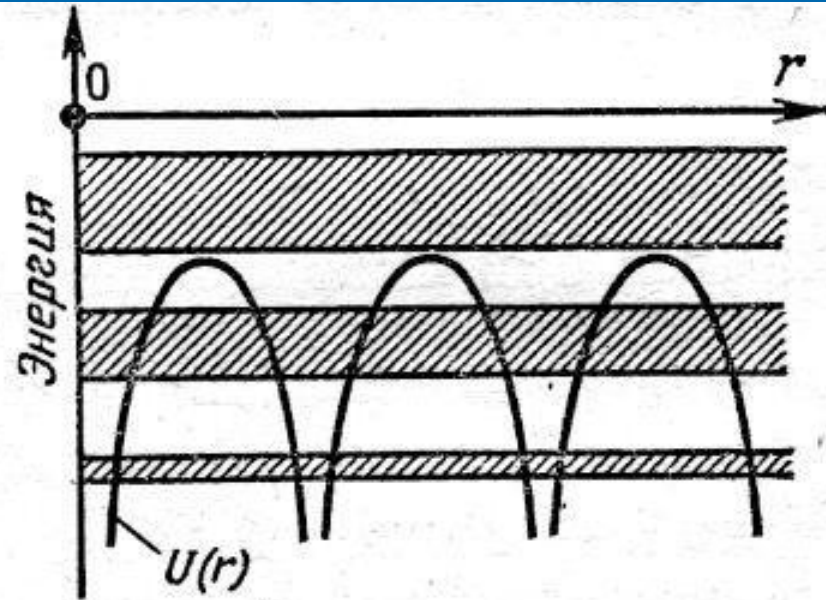
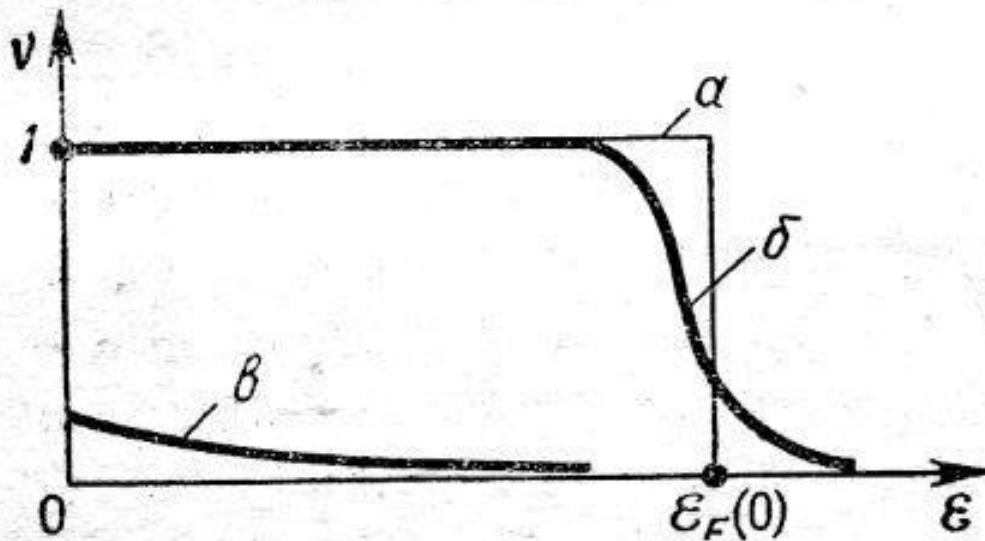




Изолированная  
потенциальная яма

Периодическая  
последовательность ям

# Зонная структура энергии электронов в кристалле



- Распределение электронов
- по энергиям и уровень
- Ферми

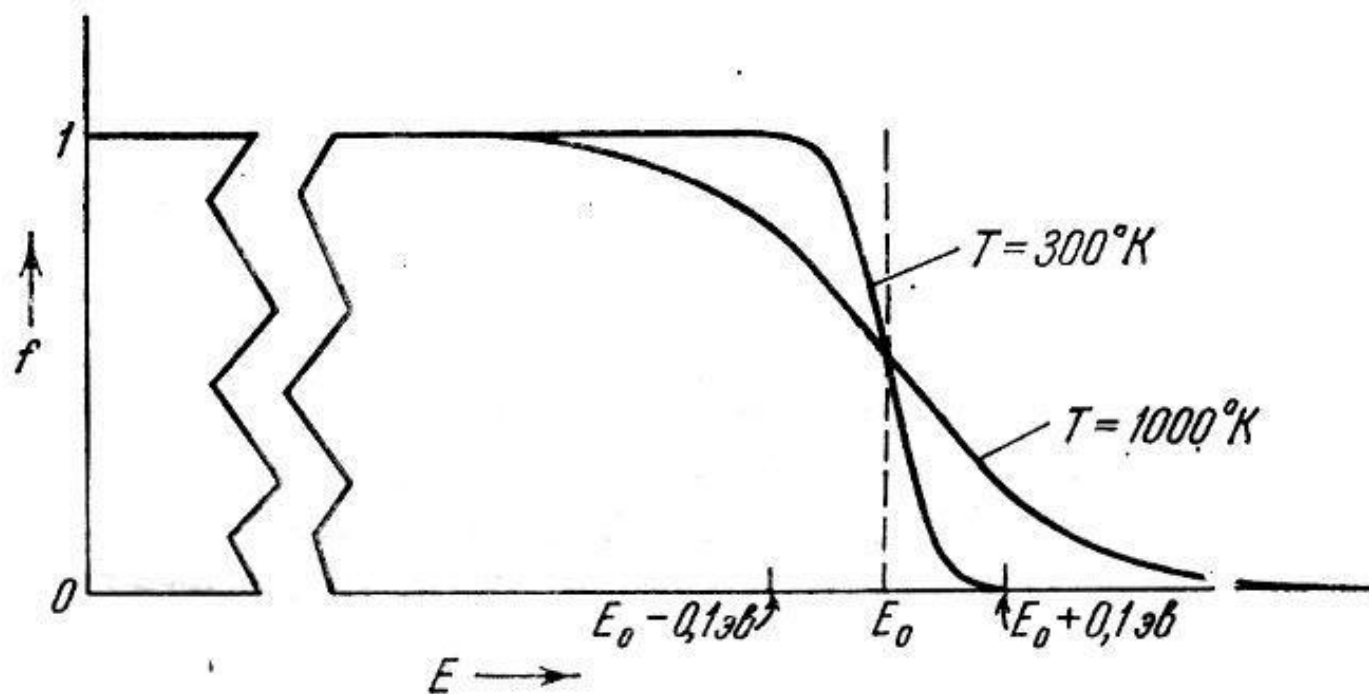


Рис. 9.6. Распределение Ферми  $f$  в функции энергии при двух температурах. Отметим, что изменение  $f$  имеет место только в пределах области шириной порядка нескольких  $kT$  вблизи границы Ферми  $E_0$ . Нулевое значение  $E$  может быть на несколько электронвольт или на много электронвольт ниже  $E_0$ , поскольку выбор значения  $E = 0$  произволен.

# §5 ГЕТЕРОПЕРЕХОДЫ

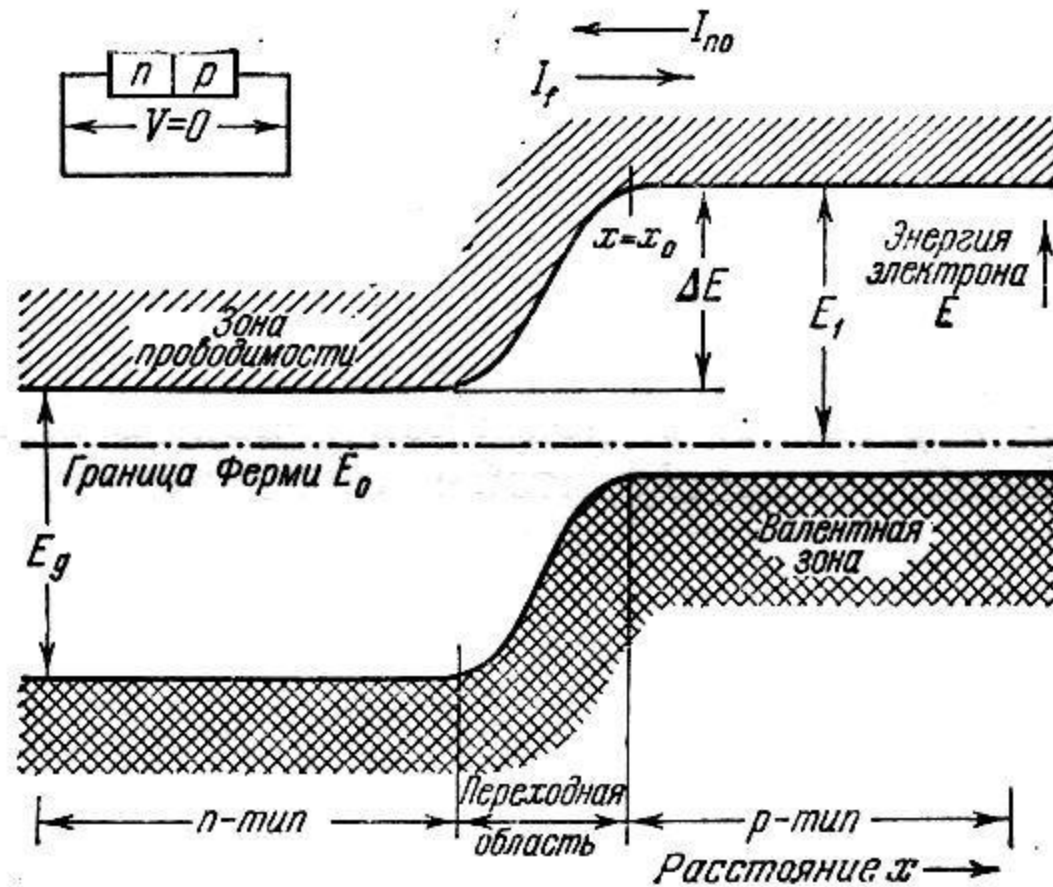


Рис. 11.8. Энергетическая диаграмма  $p-n$ -перехода, находящегося в равновесии. Границы Ферми по обеим сторонам контакта сравниваются, так что дырочные и электронные токи в обоих направлениях оказываются одинаковыми.

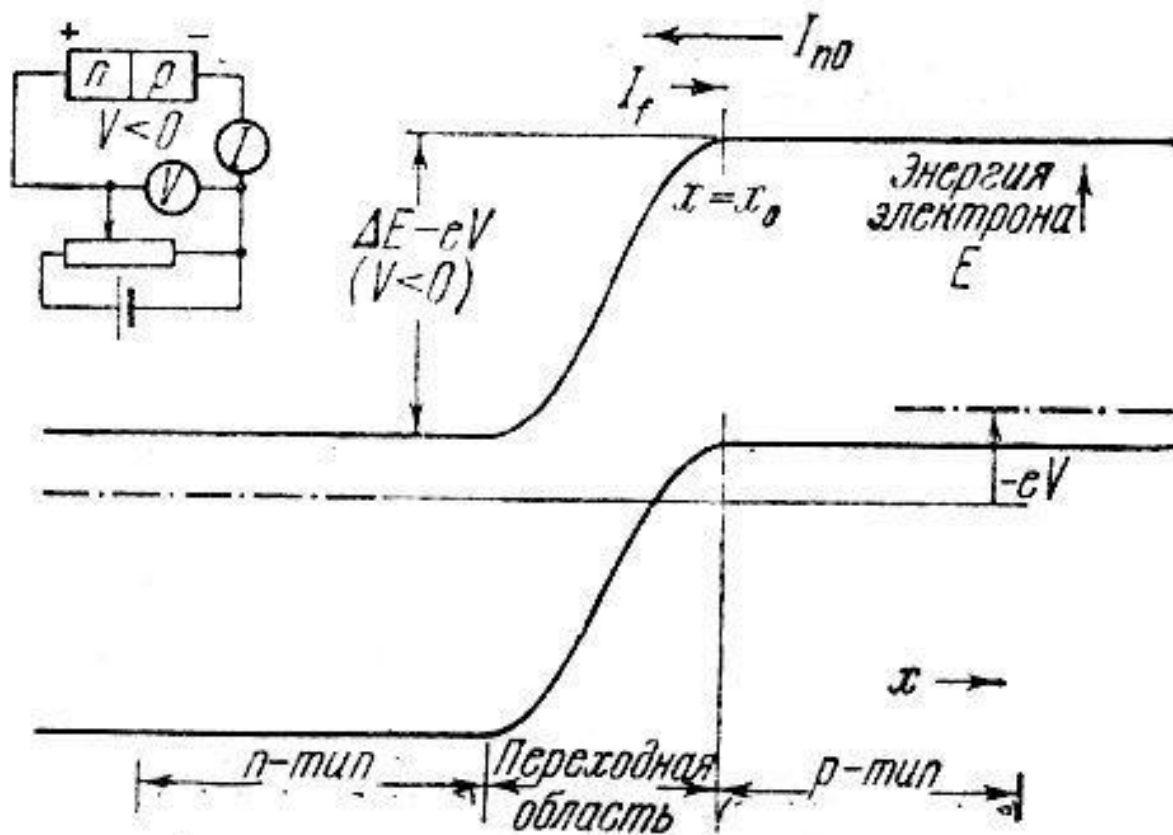


Рис. 11.9. Энергетическая диаграмма  $p-n$ -перехода с приложенным отрицательным смещением. Напряжение  $V < 0$ , ток мал и почти не зависит от  $V$ . Показан только график электронного тока, но дырочный ток также мал и почти не зависит от  $V$ .

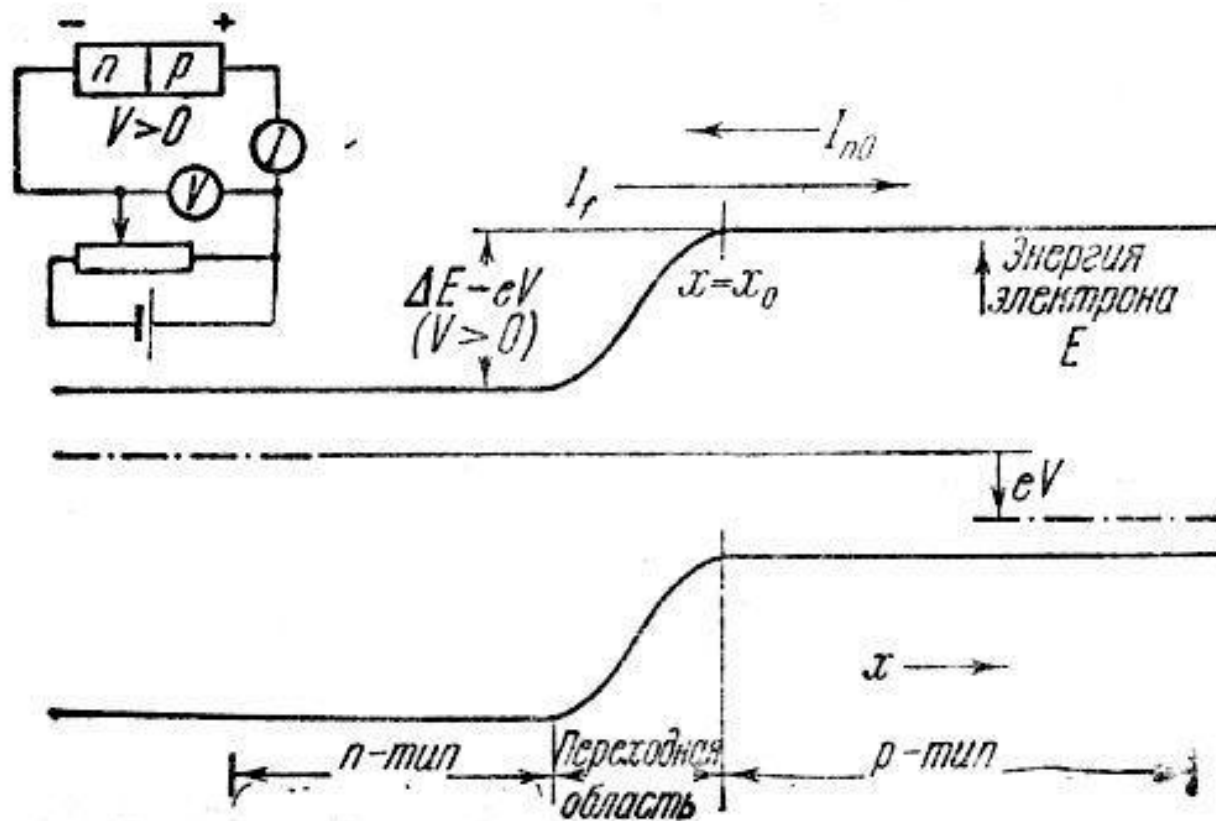
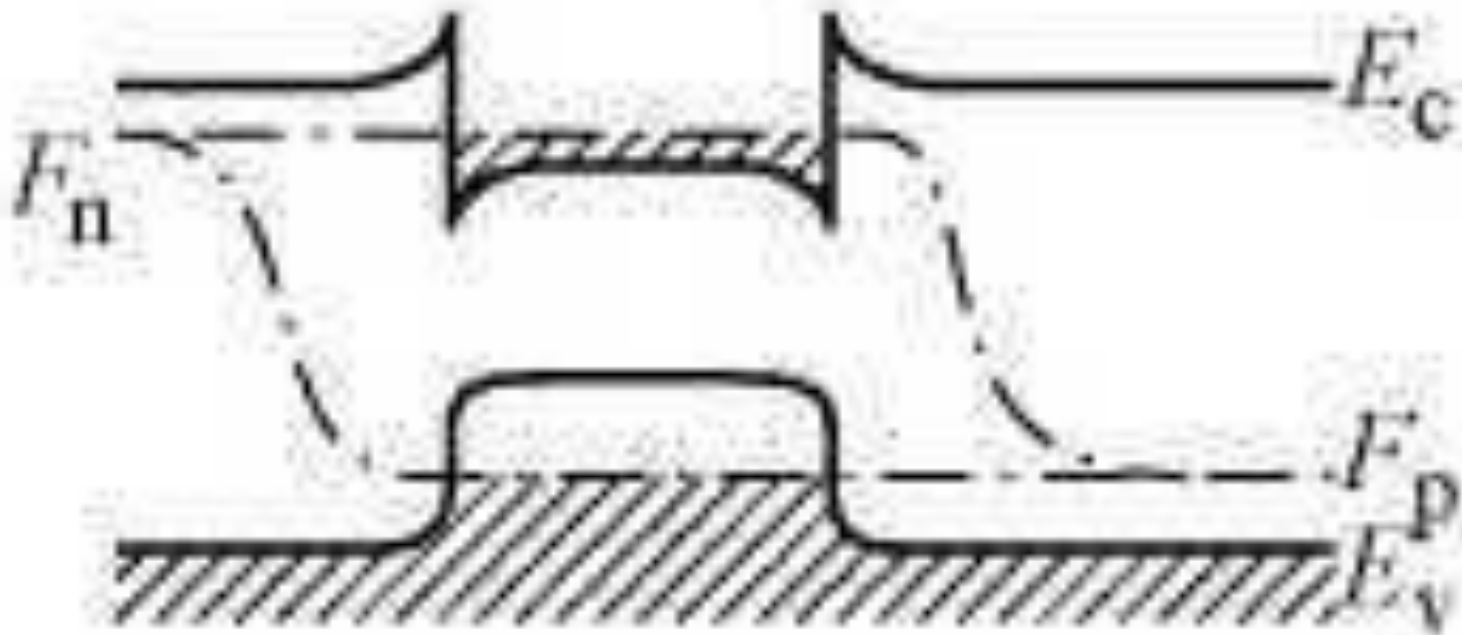


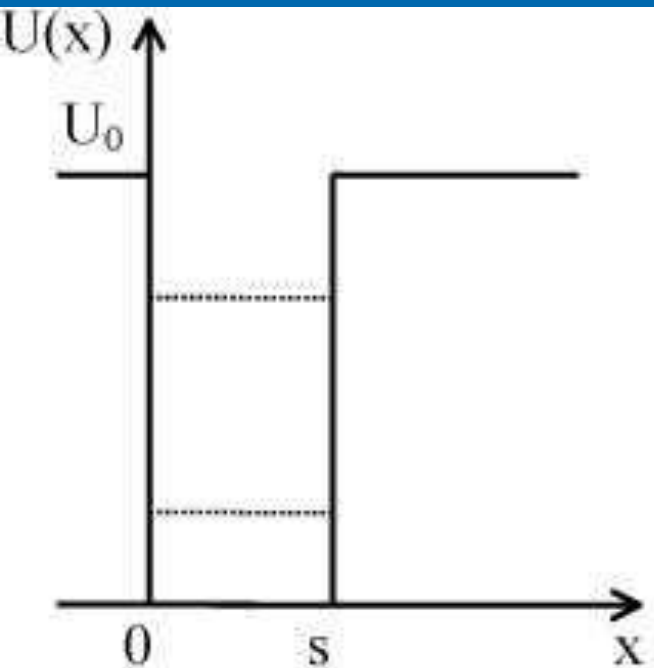
Рис. 11.10. Энергетическая диаграмма  $p-n$ -перехода с приложенным положительным смещением. Напряжение  $V > 0$ , ток велик и быстро изменяется при изменении  $V$ . Дырочный ток не показан, но он также велик и чувствителен к изменению  $V$ .

# §6 ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

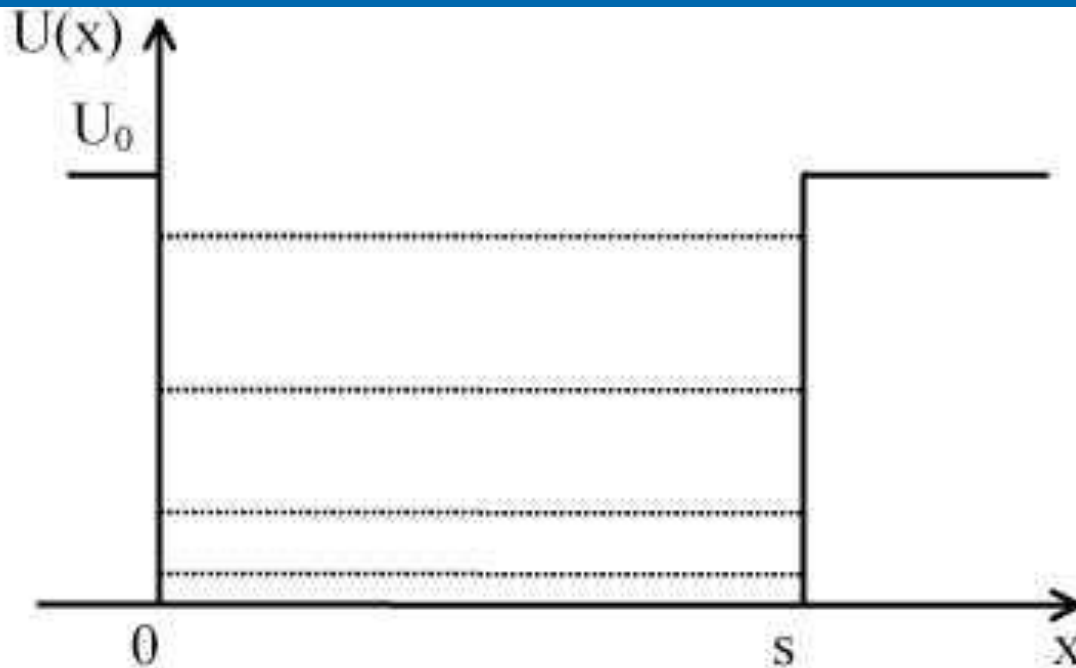
## Зонная диаграмма двойной гетероструктуры





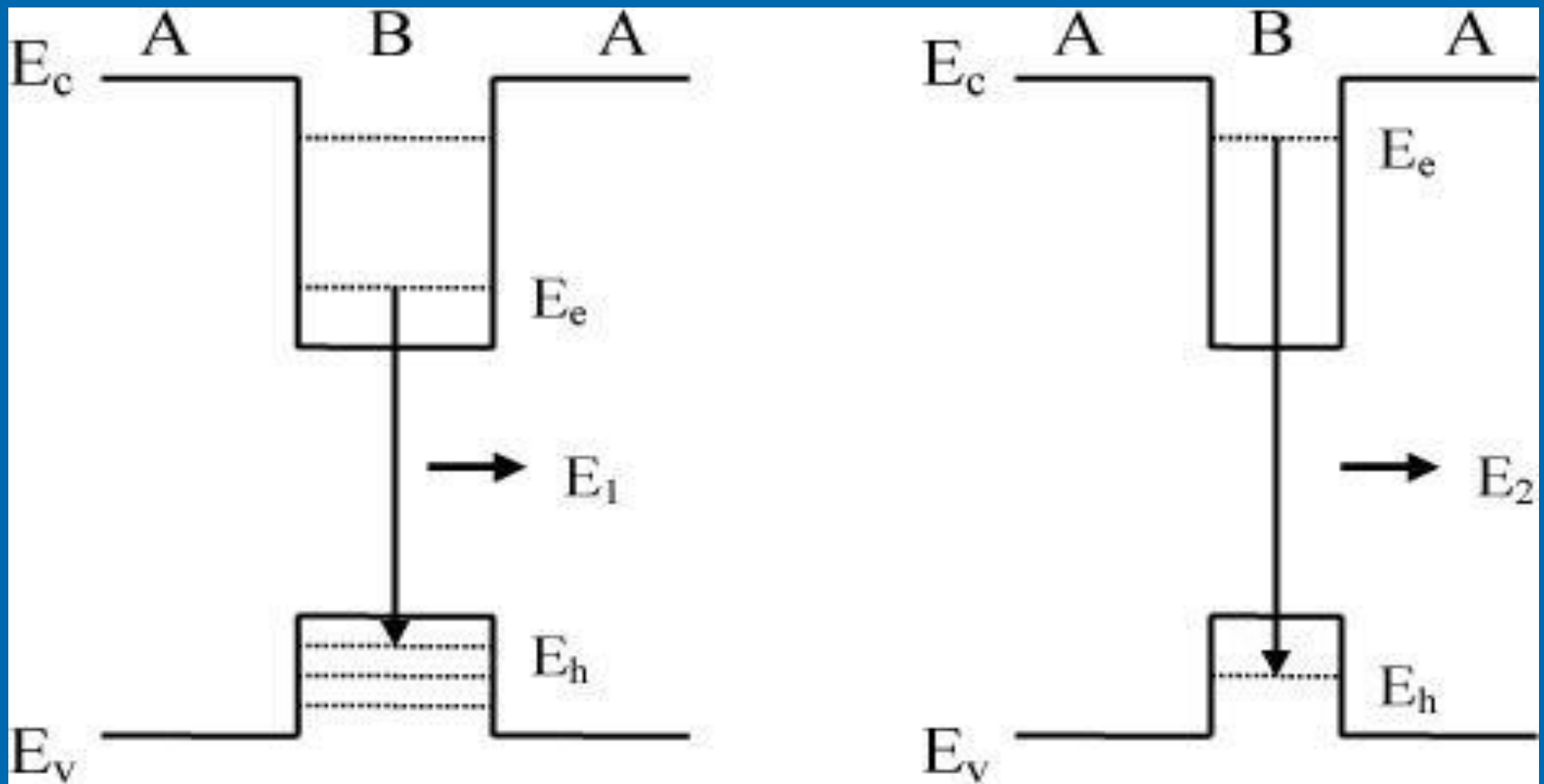


A

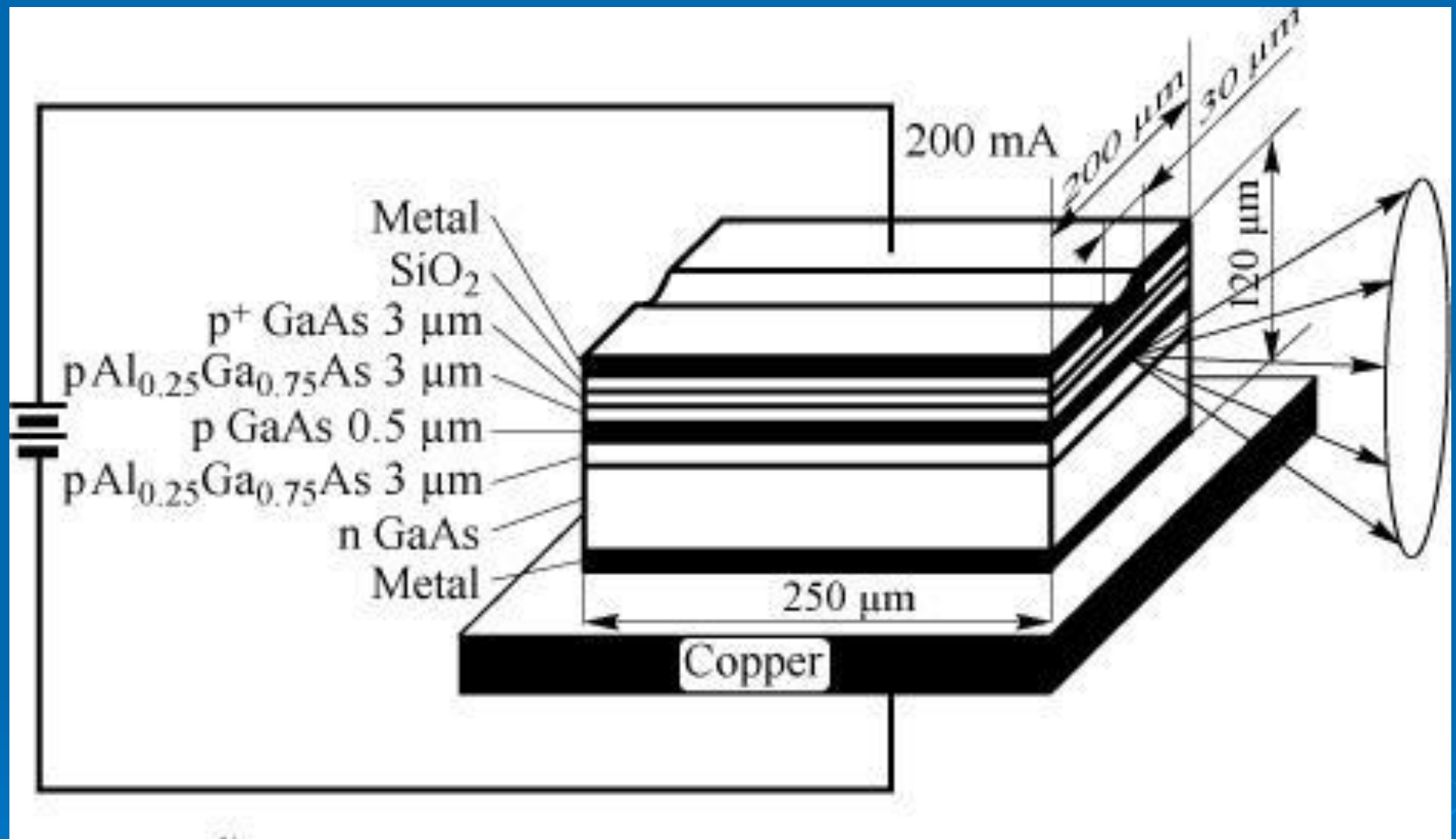


B

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



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



- Схематическое изображение первого в мире полупроводникового лазера (полоскового), работавшего в непрерывном режиме при комнатной температуре (Алферов, 1970).

*Квантовые  
ямы- квазидвумерные  
структуры,*

*нити –  
квазиодномерные,*

*точки -  
квазинульмерные*

## §7 Квантовые точки

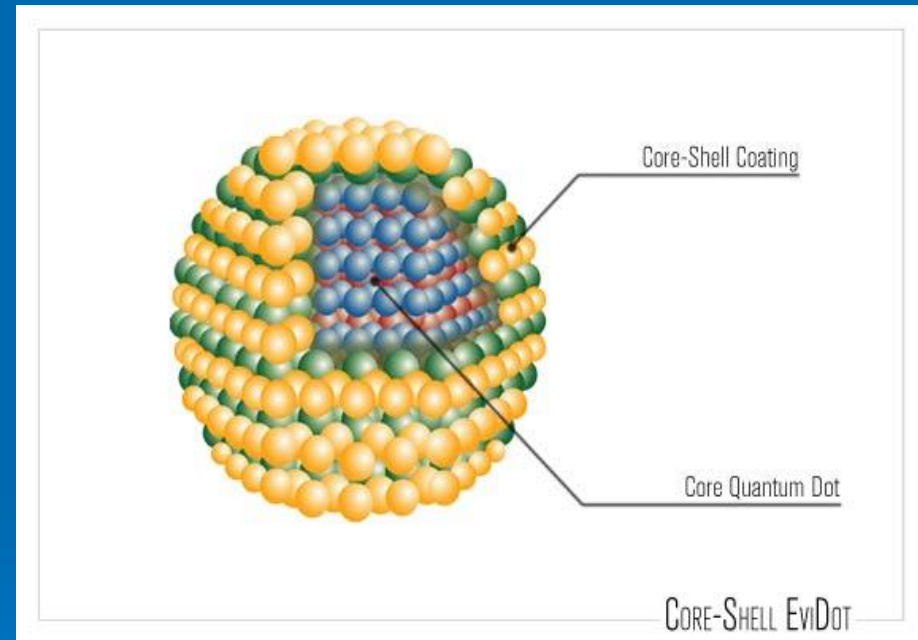
- Это гигантская молекула размером порядка 1 нм
- Состоит из  $10^3 - 10^5$  атомов, созданные на основе обычных неорганических полупроводниковых материалов Si, InP, CdSe

Квантовая точка: почему квазиультимерная?...

- ⊕ «Захватывает» электрон и ограничивает его движение → это энергетическая ловушка нанометрового размера!

# В чем же суть квантовых точек?

- ◇ искусственные аналоги атомов водорода, гелия и других элементов + их положительно и отрицательно заряженные ионы
- ◇ КТ позволяют управлять свойствами квантовых объектов!
- ◇ Возможность возбуждать в КТ необходимые электронные состояния

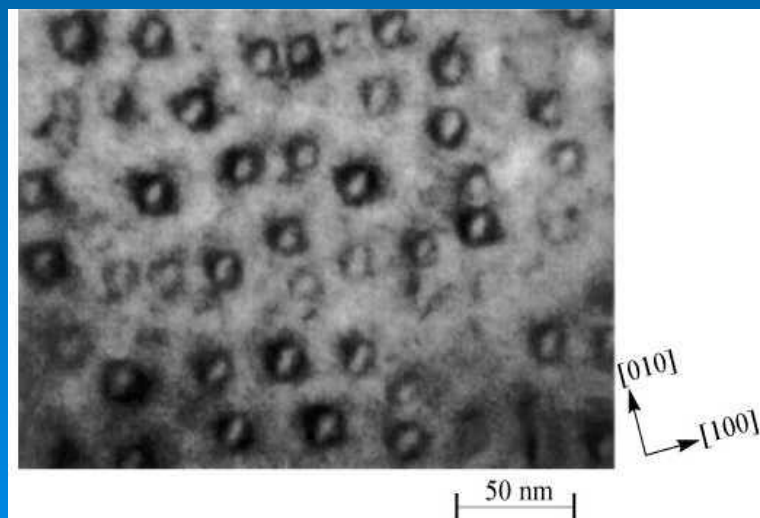


# Как выращивают квантовые точки?

Центральный объект- **гетеронаноструктуры** с квантовыми ямами и квантовыми сверхрешетками из таких ям на основе арсенида галлия (GaAs) и его твердых растворов разного состава.

## Способы выращивания:

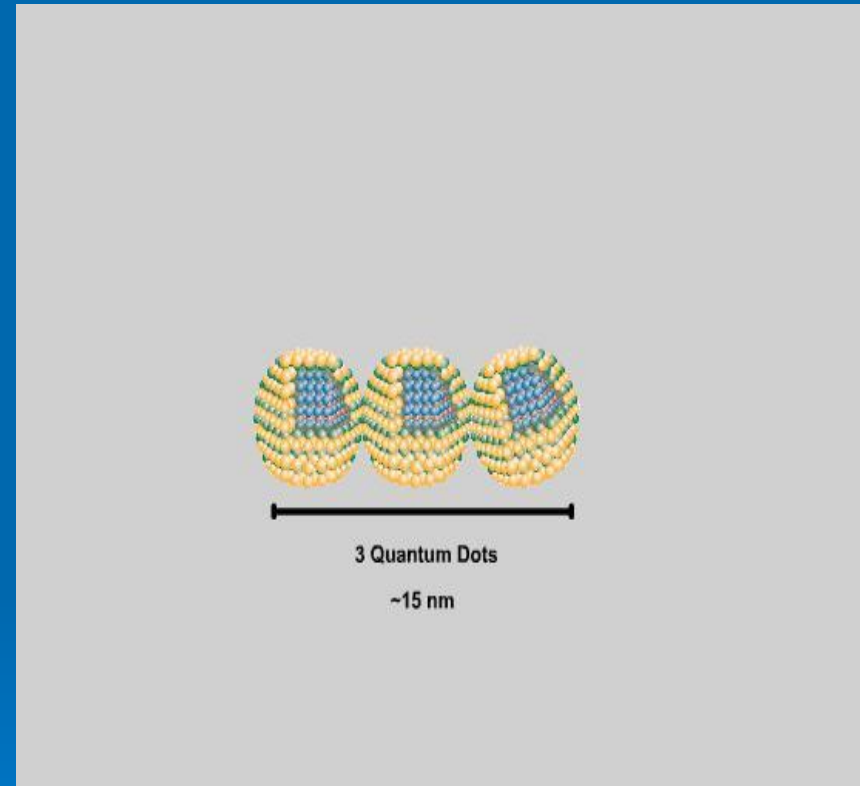
- ✓ как часть большого полупроводникового кристалла
- ✓ синтезировать в виде отдельных наночастиц



Изображение квантовых точек InAs в матрице GaAs (вид сверху), полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии

# Наиболее яркие представители КТ:

- ❖  $\text{InGaAs}$  (индий-галлий-арсенидовые) КТ → «большие» КТ, размер  $\approx 50$  нм, состоят из  $\approx 1$  млн. атомов  $\text{In}$ ,  $\text{Ga}$ ,  $\text{As}$
- ❖  $\text{CdSe}$  (кадмий-селеновые) КТ → размер  $\approx$  несколько нм





## Творцы КТ:

Японские исследователи **Я. Аракава** и **Х. Сакаки** в начале 80-х г.г. → указали роль КТ для улучшения работы полупроводниковых лазеров

**1986 год**- первые попытки создания полупроводниковых квазинульмерных объектов на основе GaAs учеными из «**Texas Instruments**» во главе М.А.Ридом методом литографии → они получены КТ  $\approx 250$  нм.

В «**Bell Laboratories**» достигли 30-45 нм.

**30-е г.г.**- идея самоорганизации КТ, высказанная Странски и Крастановым.

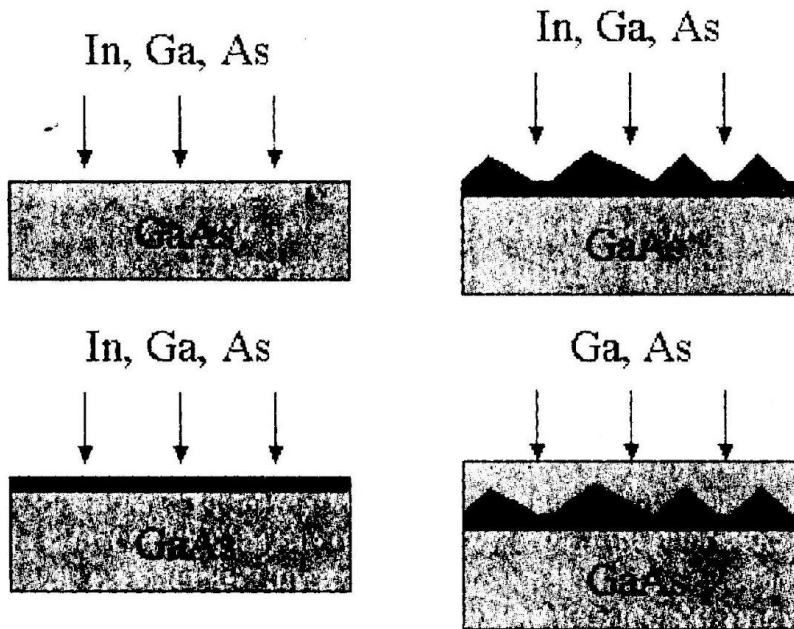
**90- г.г.**- группа академика Ж.И.Алферова в сотрудничестве с группой профессора Д.Бимберга из Берлина продемонстрировала эффективную работу лазера на InGaAs/GaAs КТ

# Самоорганизация КТ

Метод самоорганизации (метод Странски–Крастанова) →

при некоторых условиях во время осаждения вещества на гладкую поверхность могут образовываться островки.

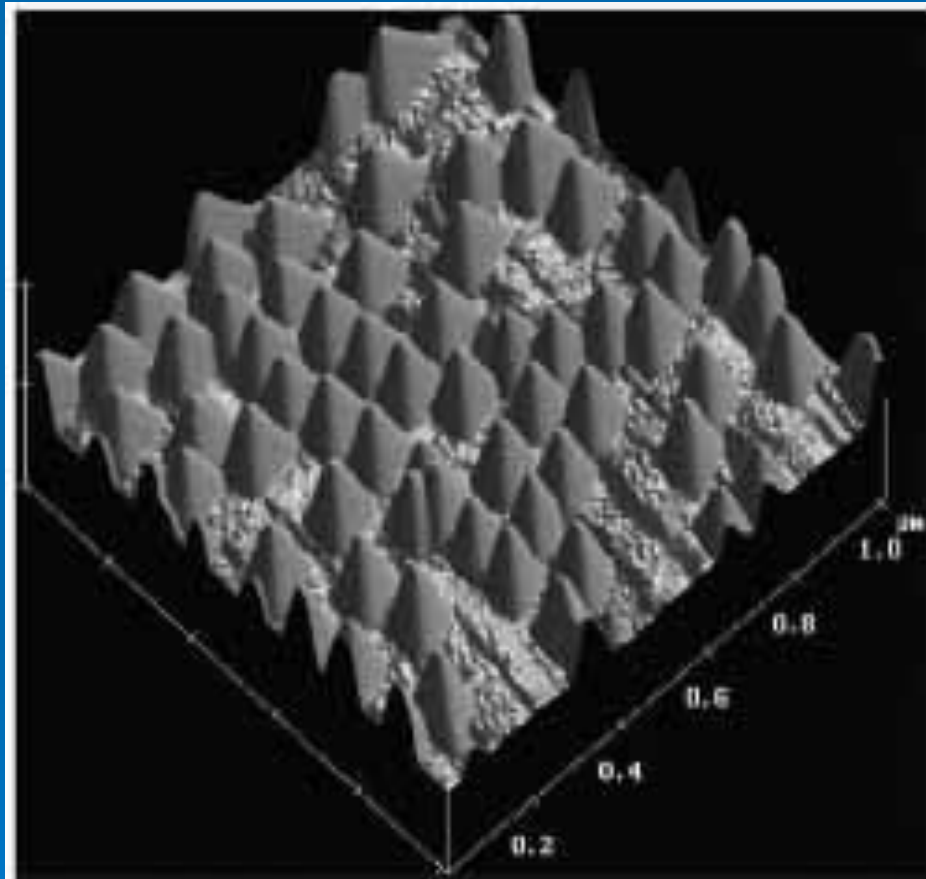
Сначала на арсенид-галлиевой подложке формируется смачивающий слой из арсенида галлия-индия. Потом на нем образуются квантовые точки, а затем их покрывают еще одним слоем материала подложки и процесс повторяют. В зависимости от предназначения выращивают от 1 до 50–100 слоев квантовых точек



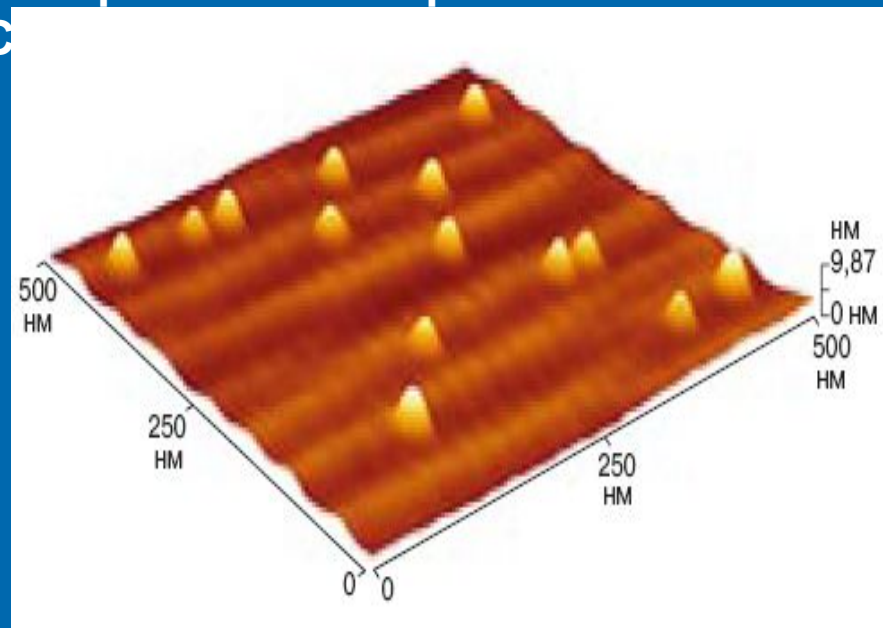
Суть образования островков методом Странски–Крастанова можно понять, проделав простой эксперимент. Возьмем лист бумаги и, положив ладони на его противоположные края, начнем аккуратно сдвигать их навстречу друг другу. При сближении на миллиметр изменения формы не заметны, хотя некое напряжение в волокнах бумаги уже создано. А при дальнейшем движении оно станет столь большим, что лист выгнется вверх, чтобы высвободить накопившуюся энергию

# Изображение поверхности слоя

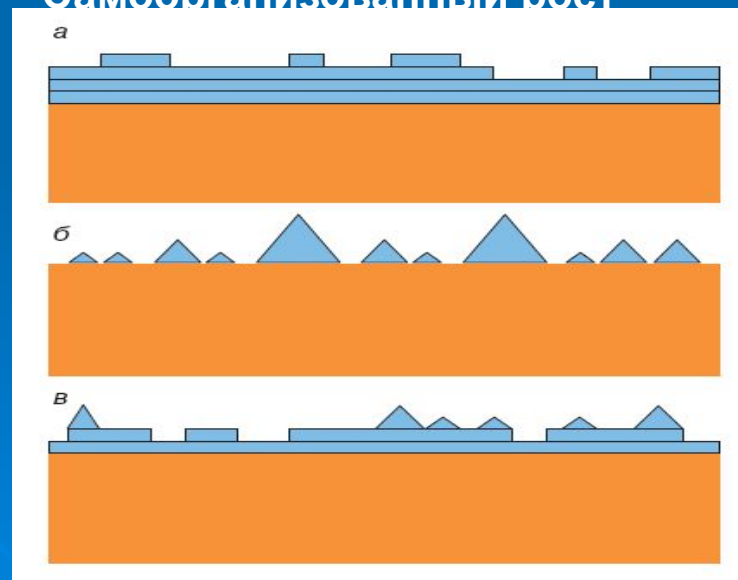
С



Изображение КТ PbSe на поверхности слоя PbTe



## Самоблуживаемый слой



# Светлое будущее КТ

☉инжекционные

полупроводниковые лазеры  
для волоконно-оптических  
линий связи

☉использование КТ для  
оптоэлектронной памяти  
нового типа или в  
спинтронике

☉КТ в роли источников  
единичных фотонов  
квантовой криптографии

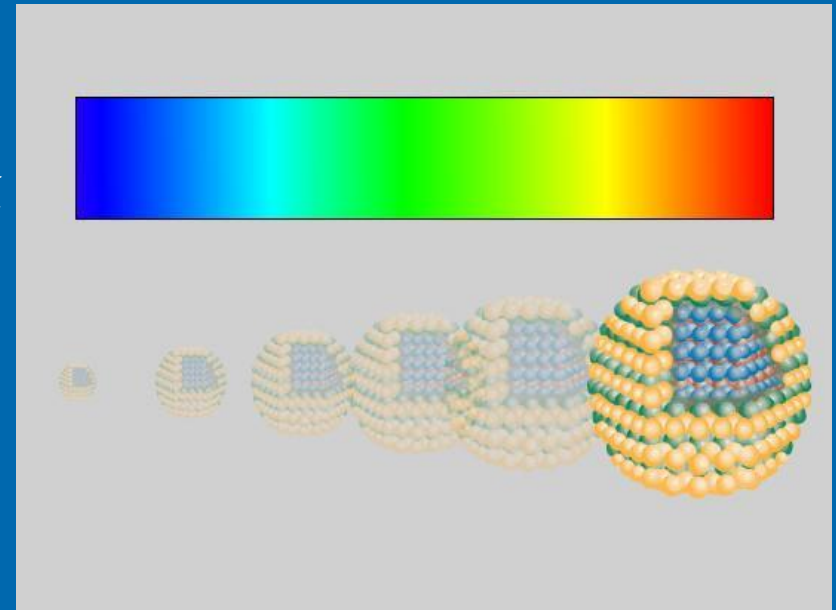
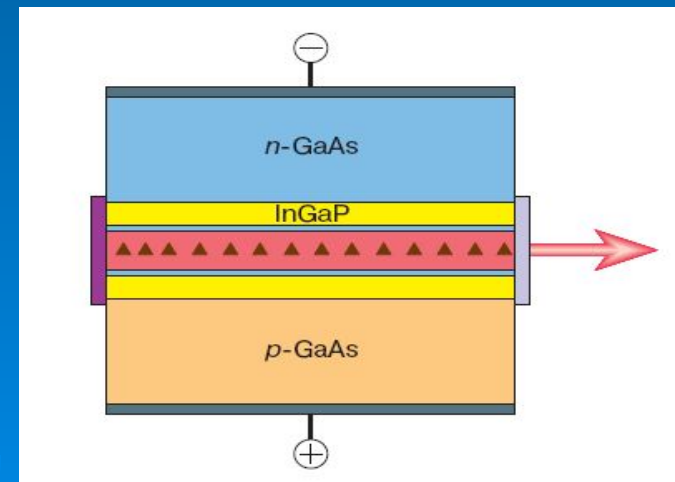
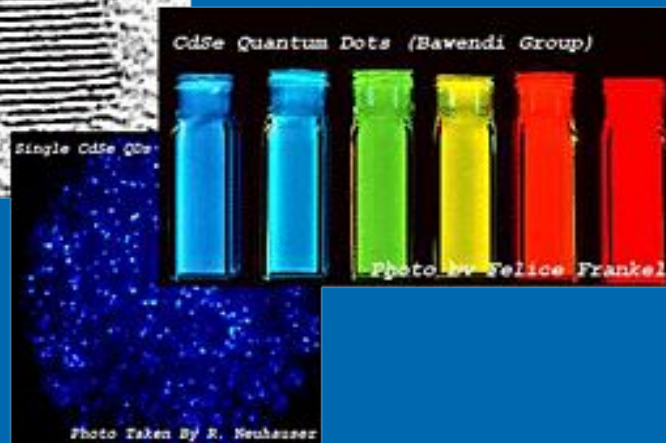
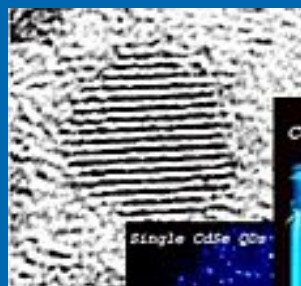
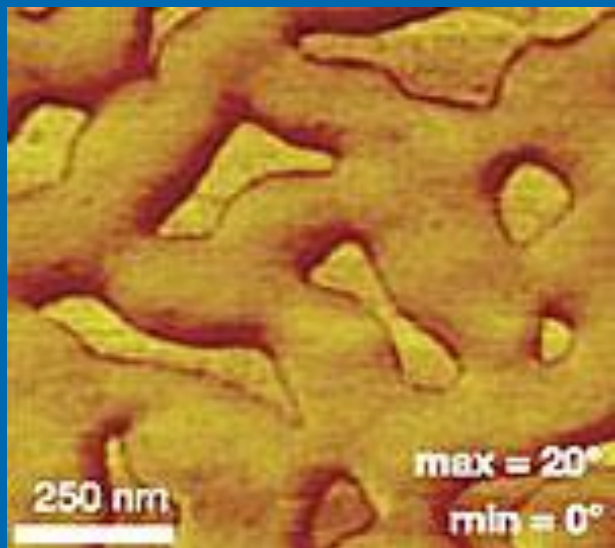


Схема инжекционного полупроводникового лазера на СКТ



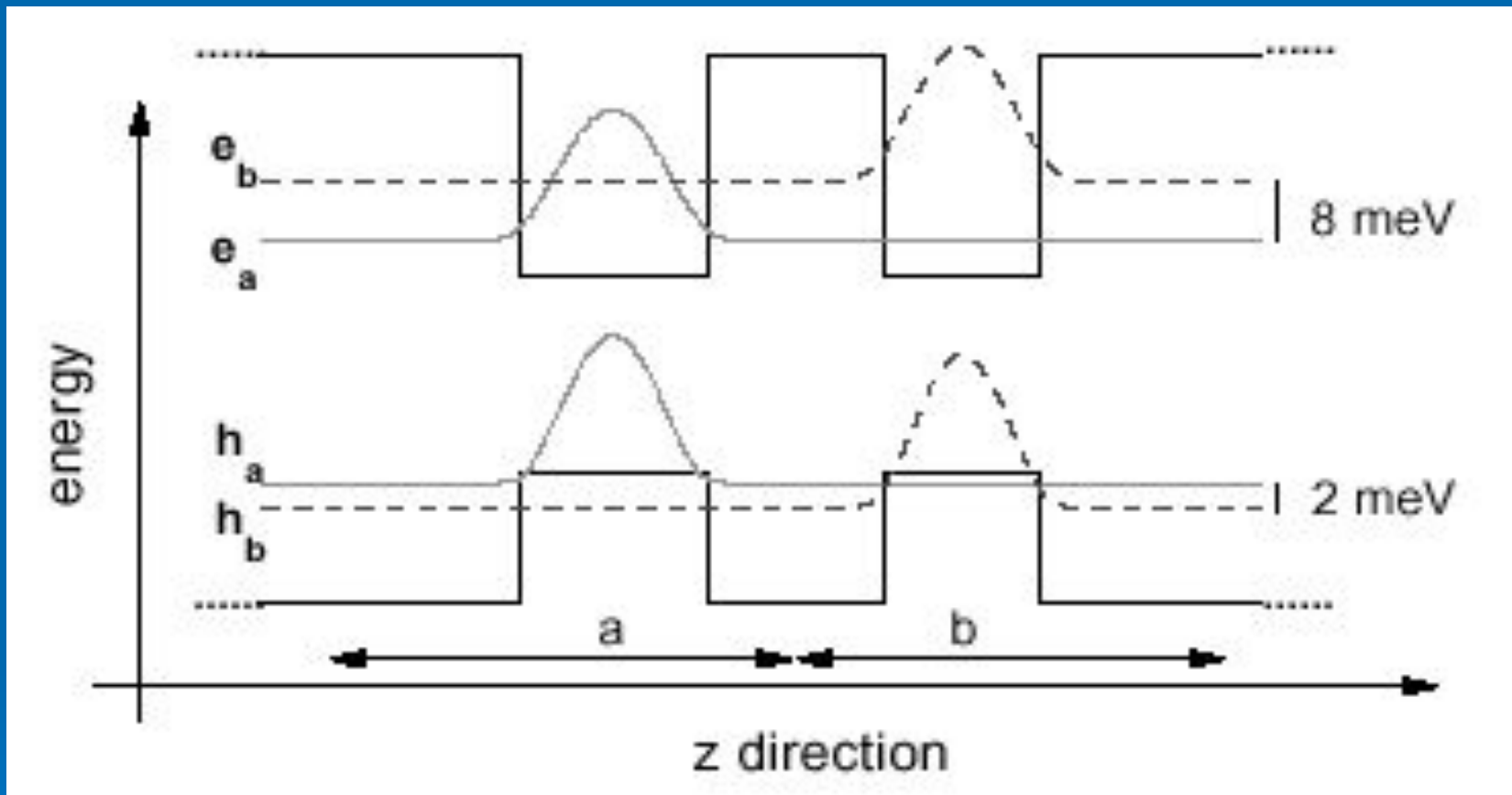
# Излучение света на квантовых точках



## Поверхность органического светодиода на КТ

☼ новый вид оптоэлектронных устройств, который может привести к созданию качественно новых плоских дисплеев, способных заменить ЖК. Излучение света с 25-ти кратным улучшением излучательной способности!

# Двойные квантовые точки



- Схематическое представление профиля потенциала для электронов ( $a$ ) и дырок ( $b$ ) вдоль направления роста цепочек QD. Эта конфигурация позволяет селективно создавать/разрушать электрон-дырочные пары (экситоны) в точках  $a$  и  $b$ . Однако, ширина энергетического барьера между точками (50 E) такова, что предотвращает одночастичное туннелирование и в то же время допускает важное кулоновское взаимодействие между точками.

# «Физический минимум» на начало XXI века

## □ Макрофизика

1. Управляемый ядерный синтез.
2. Высокотемпературная и комнатотемпературная сверхпроводимость.
3. Металлический водород. Другие экзотические вещества.
4. Двумерная электронная жидкость (аномальный эффект Холла и некоторые другие эффекты).
5. Некоторые вопросы физики твердого тела (гетероструктуры в полупроводниках, переходы металл—диэлектрик, волны зарядовой и спиновой плотности, мезоскопика).
6. Фазовые переходы второго рода и родственные им. Некоторые примеры таких переходов. Охлаждение (в частности, лазерное) до сверхнизких температур. Бозе-эйнштейновская конденсация в газах.
7. Физика поверхности. Кластеры.
8. Жидкие кристаллы. Сегнетоэлектрики.
9. Фуллерены. Нанотрубки.
0. Поведение вещества в сверхсильных магнитных полях.
1. Нелинейная физика. Турбулентность. Солитоны. Хаос. Странные аттракторы.
2. Разеры, гразеры, сверхмощные лазеры.
3. Сверхтяжелые элементы. Экзотические ядра.
4. Квантовые компьютеры.

## □ Микрофизика

5. Спектр масс. Кварки и глюоны. Квантовая хромодинамика. Кварк-глюонная плазма.
6. Единая теория слабого и электромагнитного взаимодействия.  $W^+$ - $W^-$  и  $Z^0$ -бозоны. Лептоны.
7. Стандартная модель. Великое объединение. Суперобъединение. Распад протона. Масса нейтрино. Магнитные монополи.
8. Фундаментальная длина. Взаимодействие частиц при высоких и сверхвысоких энергиях. Коллайдеры.
9. Несохранение  $CP$ -инвариантности.
0. Нелинейные явления в вакууме и в сверхсильных электромагнитных полях. Фазовые переходы в вакууме.
1. Струны.  $M$ -теория.



# □ **Астрофизика**

2. Экспериментальная проверка общей теории относительности.
3. Гравитационные волны, их детектирование.
4. Космологическая проблема. Инфляция. L-член. Связь между космологией и физикой высоких энергий.
5. Нейтронные звезды и пульсары. Сверхновые звезды.
6. Черные дыры. Космические струны(?).
7. Квазары и ядра галактик. Образование галактик.
8. Проблема темной материи (скрытой массы) и ее детектирования.
9. Происхождение космических лучей со сверхвысокой энергией.
10. Гамма-всплески. Гиперновые.
11. Нейтринная физика и астрономия. Нейтринные осцилляции.