

Физика наноустройств.  
Устройства оптоэлектроники и  
наноэлектроники

---

Д.Р. Хохлов

*Физический факультет МГУ*



# Подходы к созданию наноустройств

---

- Сверхрешетки
- Квантовые ямы
- Лазеры на гетеропереходах
- Квантово-каскадные лазеры
- Фотоприемники на квантовых ямах
- Пористый кремний
- Квантовые точки
- Квантовый эффект Холла
- Одноэлектроника
- Спинтроника
- Суперпарамагнетизм

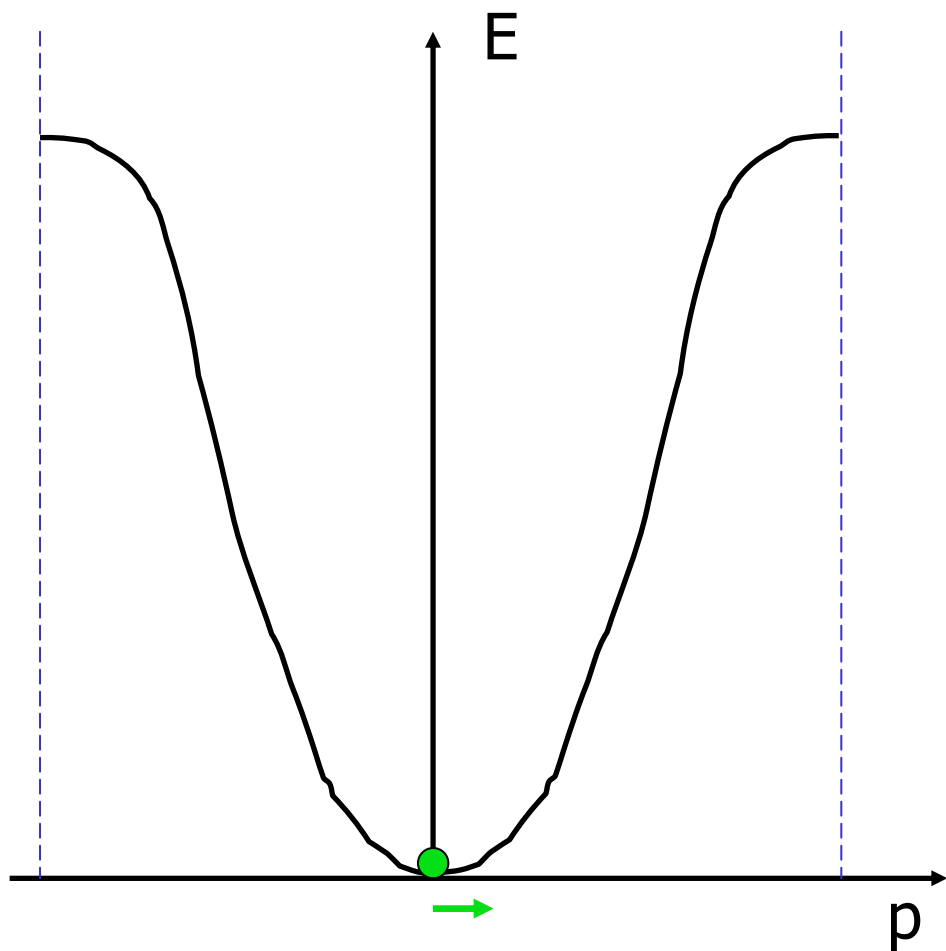


# Основная идея

---

- Ограничение размера кристалла существенно сказывается на его электрических, оптических и магнитных свойствах
- Электрические, оптические и магнитные свойства определяются не только собственно материалом, но и его размерами и формой

# Движение электрона в постоянном электрическом поле



$$\frac{dp}{dt} = eE$$

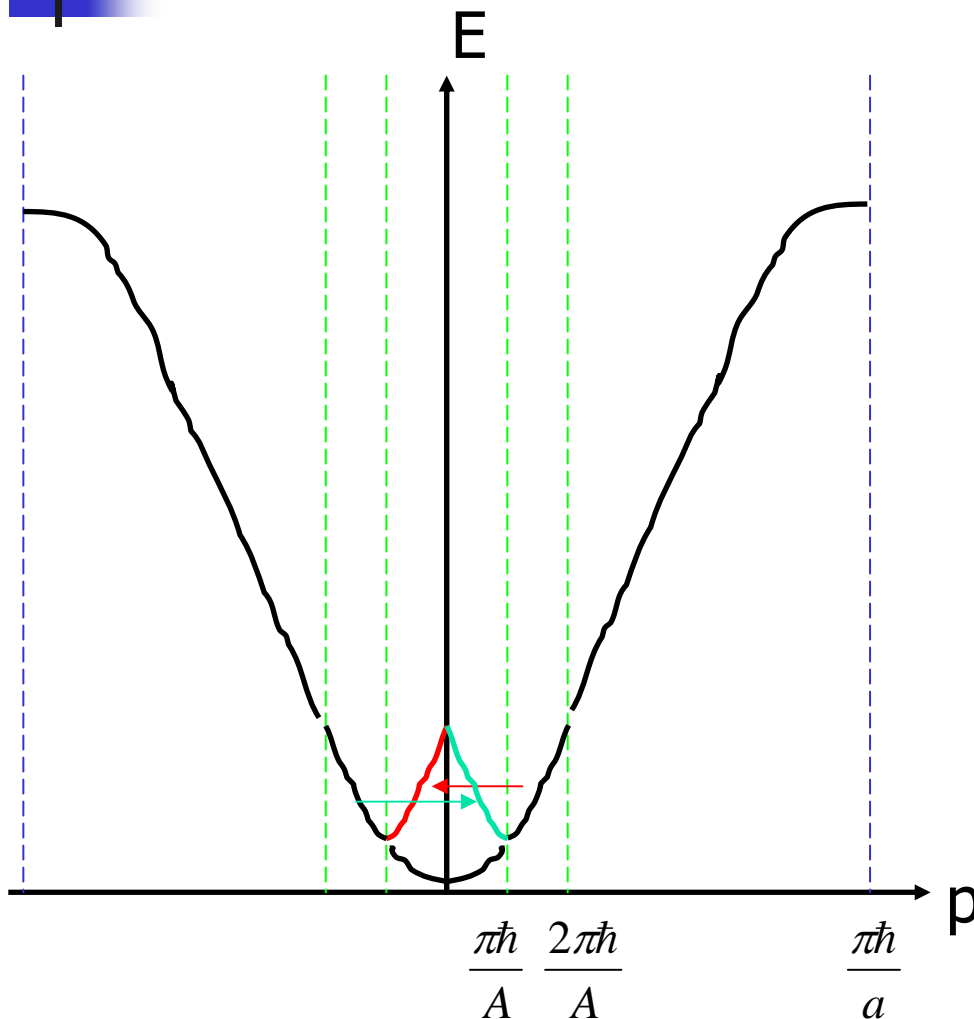
$$m = \left( \frac{\partial^2 E}{\partial p^2} \right)^{-1}$$

Электрон движется  
циклически

$$L = 10^4 \text{ см};$$

$$\omega = 10^2 \text{ Гц}$$

# Идея о сверхрешетках



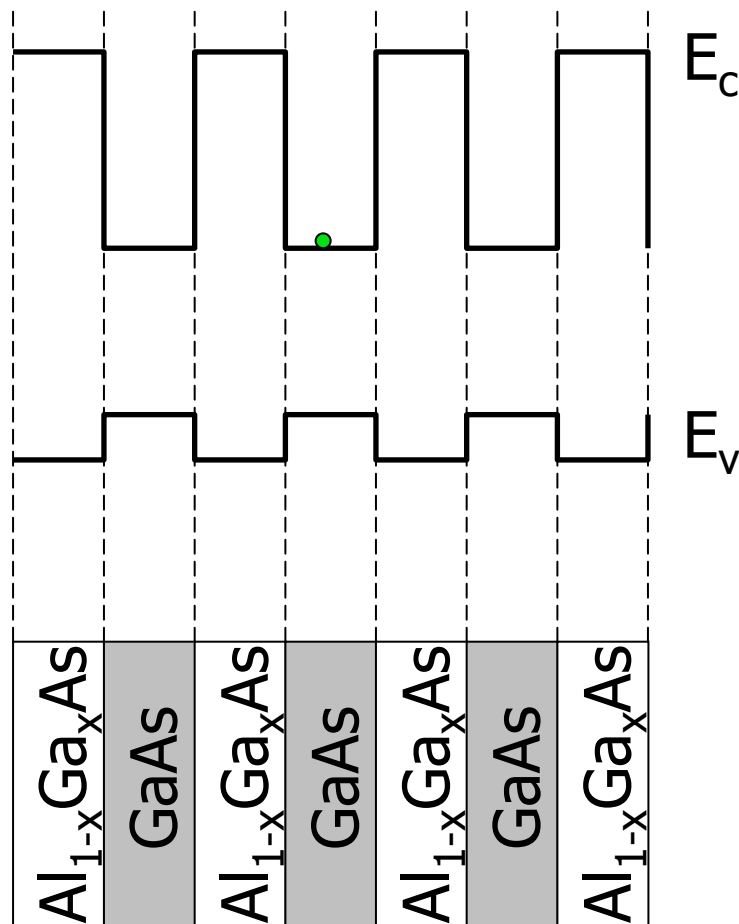
Наложение на один периодический потенциал  $a$  еще одного, с большим периодом  $A$

Формирование минизон

$$A = 50 \text{ нм}$$

$$\omega = 10^{12} \text{ Гц}$$

# Как создать сверхрешетку?



Большой период создается изменением состава

Характерные размеры  $\sim 10$  нм

Требования к контролю толщины  $\sim 1$  нм



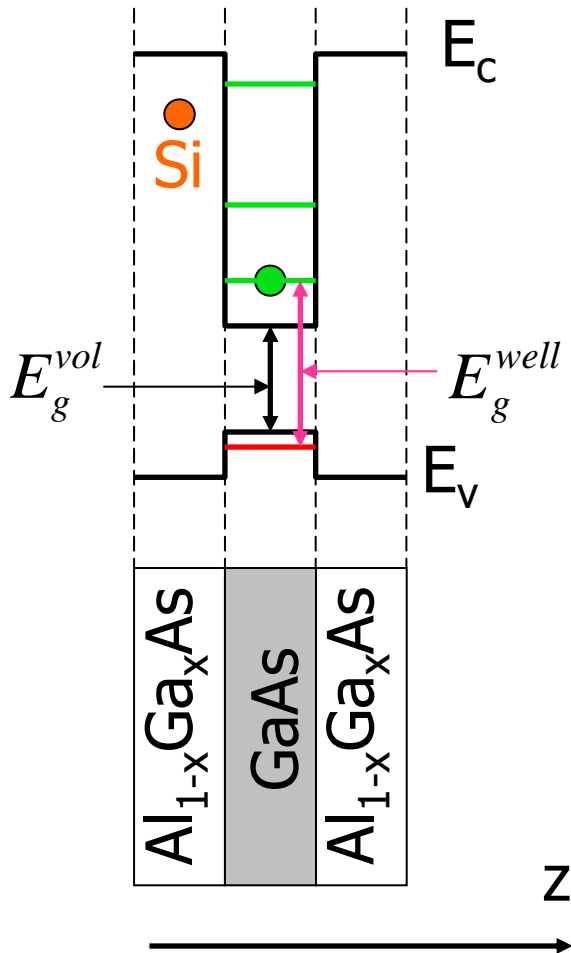
# Альтернативный подход

---

Создание «динамической  
сверхрешетки» путем воздания волны  
плотности вещества – мощным  
ультразвуком

Проблема – частоты должны быть  
очень высокими –  $10^{10}$ - $10^{12}$  Гц

# «Квантовые ямы»



$$E_{tot} = E_z + E_{x,y} = E_z + \frac{p_{x,y}^2}{2m}$$

Важно:  $E_z \neq 0$

Следовательно:  $E_{tot} > E_c$  внутри ямы

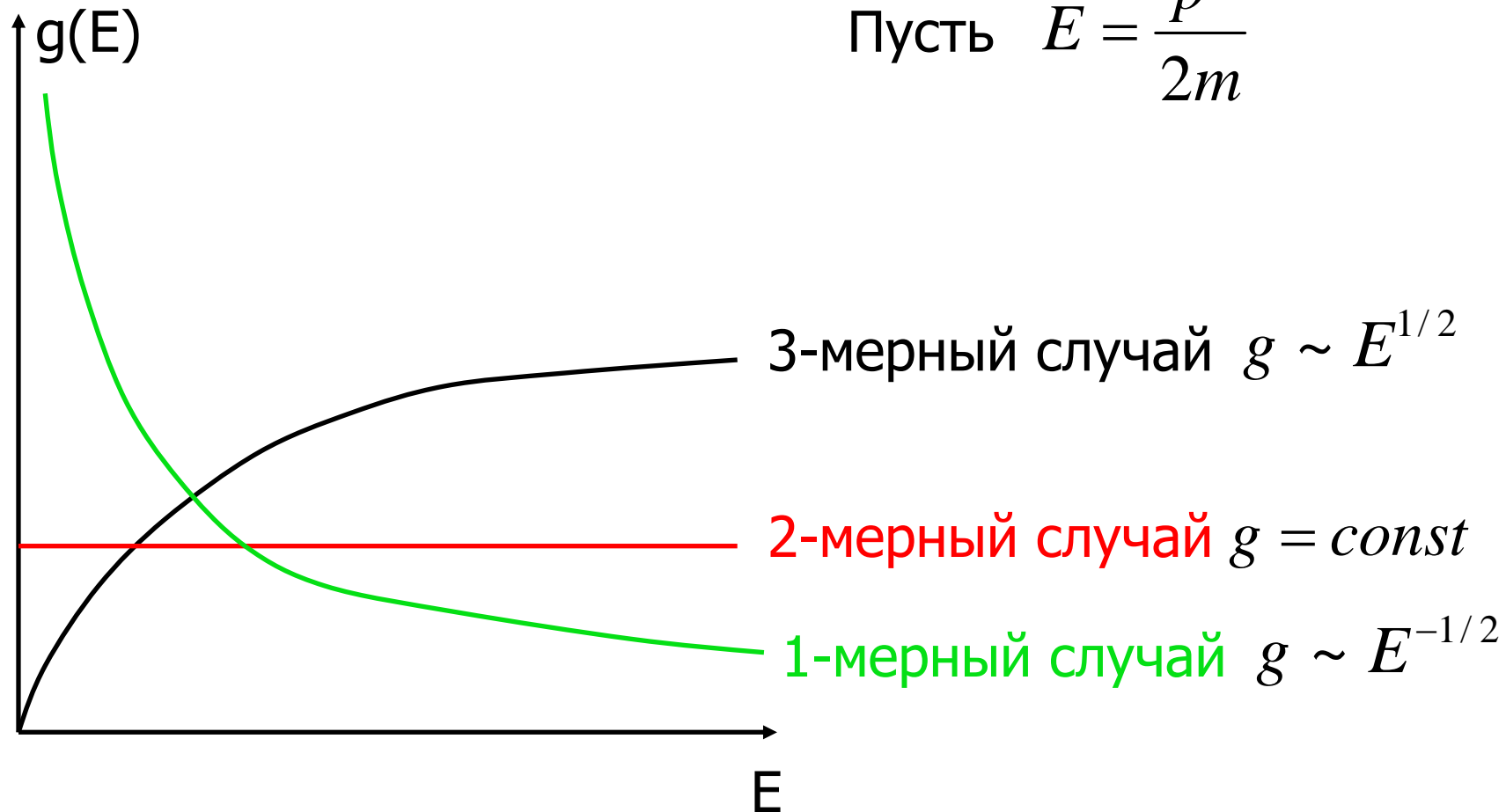
Аналогично для валентной зоны

Тогда  $E_g^{vol} < E_g^{well}$



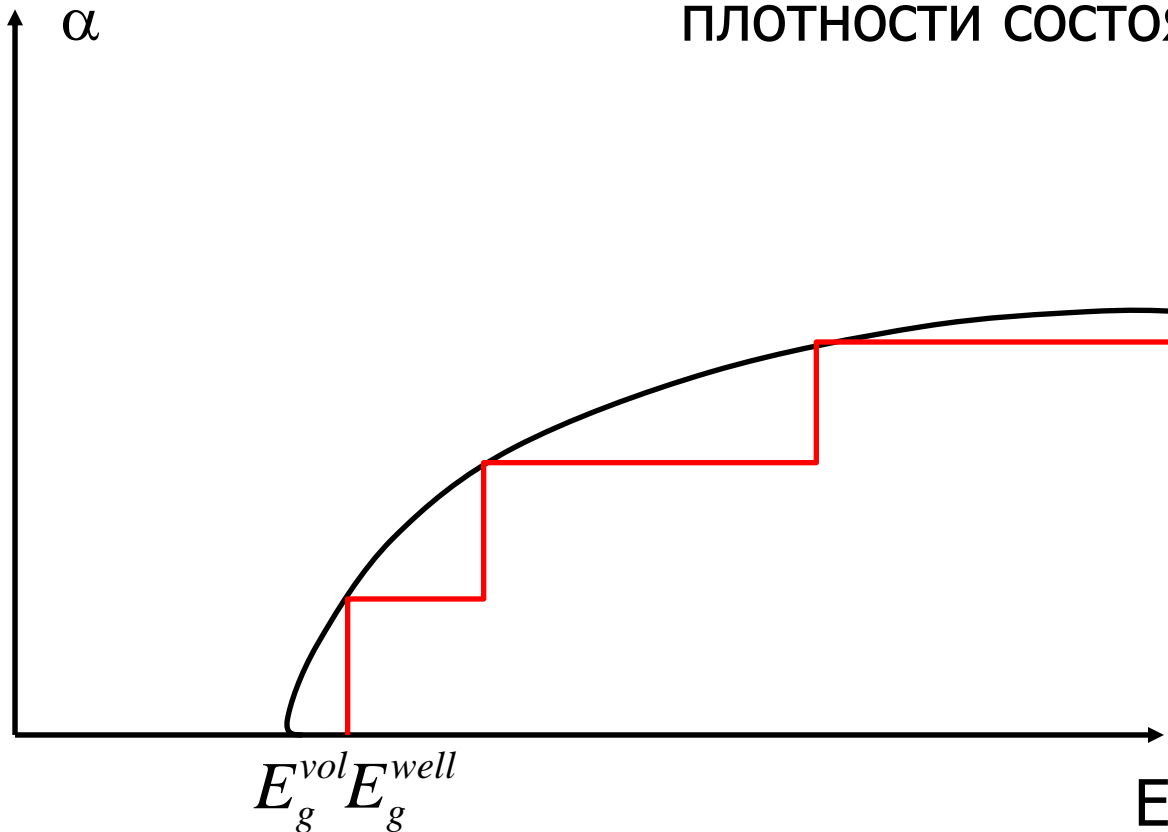
# Плотность состояний

Пусть  $E = \frac{p^2}{2m}$



# Спектры оптического поглощения

Поглощение пропорционально плотности состояний



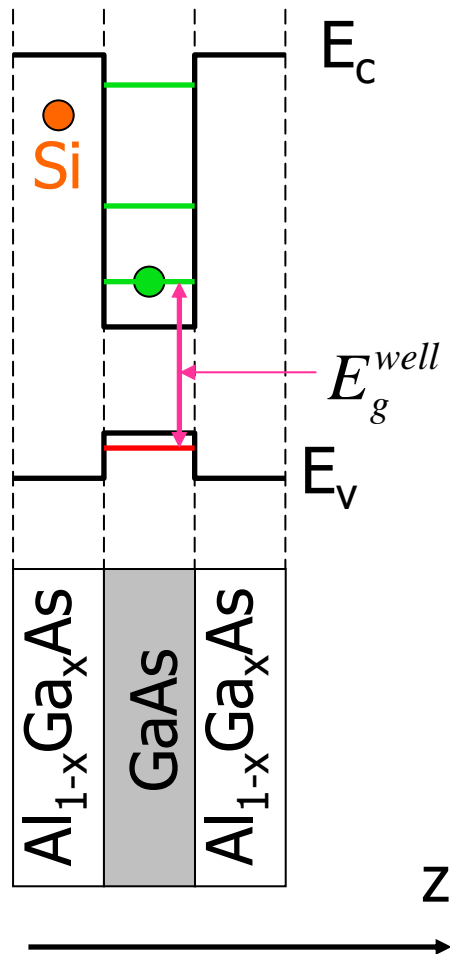


# “Band gap engineering”

---

- Изменяя параметры квантовой ямы (ширину, высоту, форму) можно изменять расположение уровней размерного квантования
- Если есть несколько квантовых ям, то можно добиваться появления эффектов, нехарактерных для исходного материала

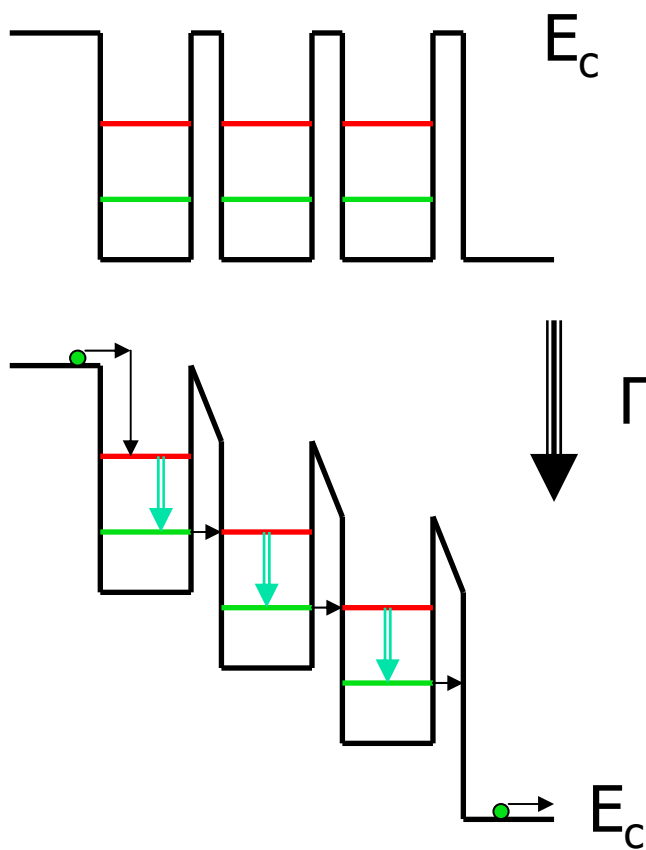
# Примеры использования



Лазеры на двумерных гетероструктурах

Излучение происходит при энергии кванта  $E_g^{well}$  которая зависит от параметров квантовой ямы

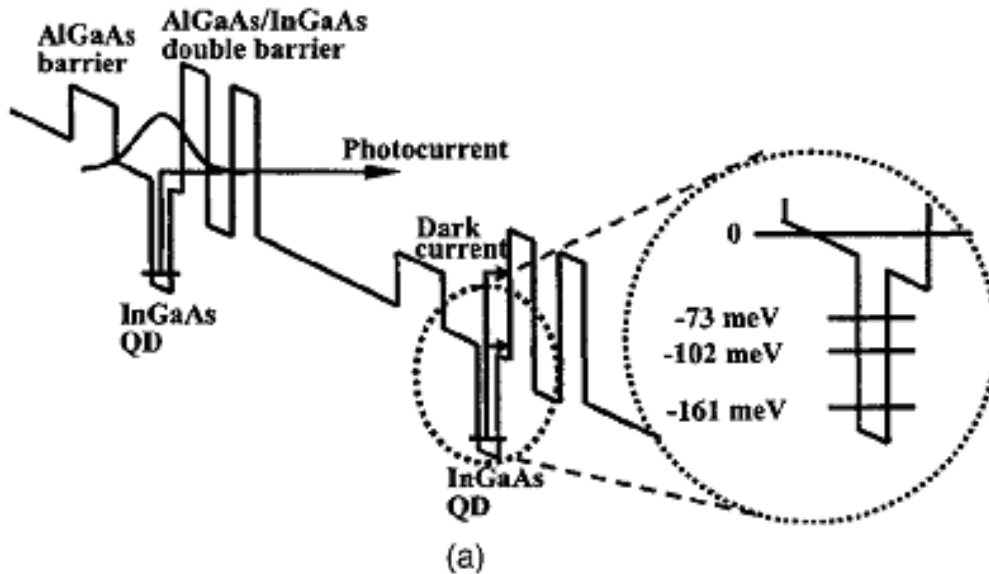
# Квантово-каскадные лазеры



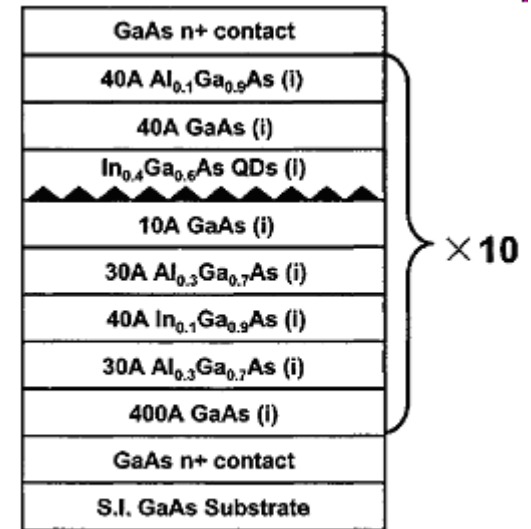
Приложение электрического поля

Каскадная генерация излучения  
Длина волны – до 30 мкм

# Фотоприемники на квантовых ямах

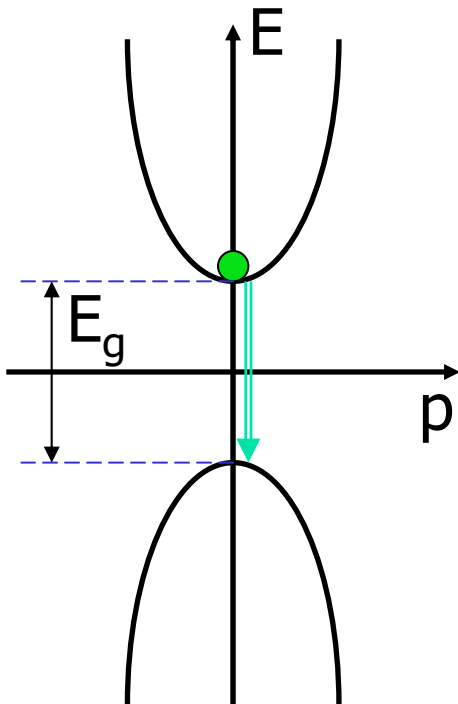


Матричные фотоприемники на множественных квантовых ямах

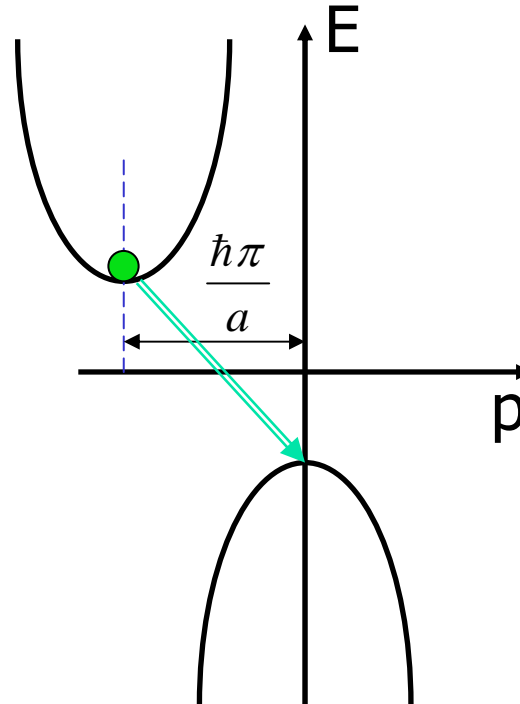


# Нанопористые материалы (пористый кремний)

Прямозонный  
полупроводник



Непрямозонный  
полупроводник



$$E_g = \hbar \omega$$

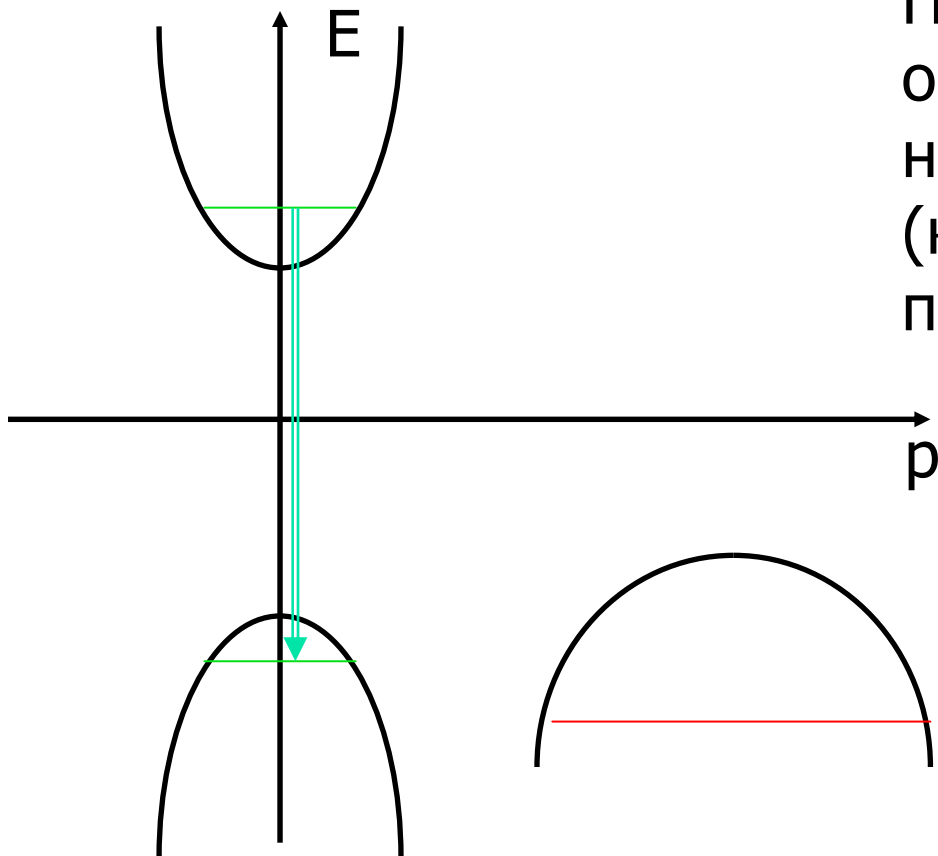
$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$$

$$P_{ph} = \frac{2\pi\hbar}{\lambda}$$

Закон сохранения  
импульса

$$P_{ph} = \Delta p_e$$

# Пористый кремний (продолжение)



При размерном ограничении ранее непрямозонный полупроводник (кремний) может стать прямозонным

и излучать





# Пористый кремний (продолжение)

---

- При электрохимическом травлении на поверхности кремния появляются столбики нанометрового размера глубиной несколько микрон

**Он излучает в видимом диапазоне!**

- Проблемы:
  - неоднородность по размеру
  - окисление поверхности



# Квантовые точки

---

- Ограничение размера по двум направлениям – «квантовые проволоки» или «квантовые нити» - 1-D системы
- Ограничение размера по трем направлениям – «квантовые точки» - 0-D системы
- Преимущества:
  - Локализация волновых функций в одной точке пространства
  - Высокое структурное совершенство при нанометровых размерах

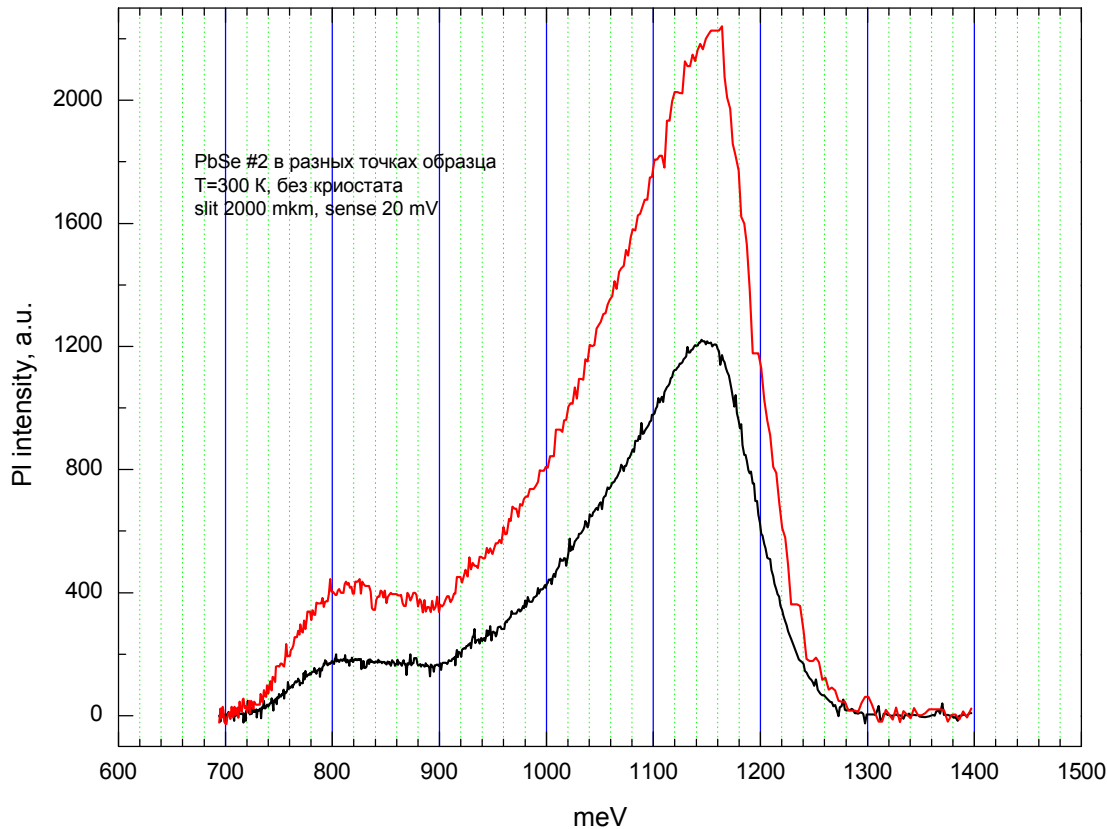
## Недостатки:

Разброс по размерам

Неупорядоченность расположения

Трудности с электрическим возбуждением

# Квантовые точки PbSe в коллоидном растворе

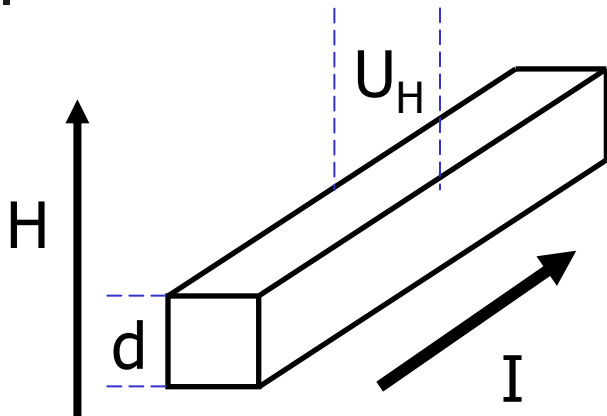


Размер точек –  
5 нм

Ширина  
запрещенной зоны  
объемного PbSe –

**~200 meV**

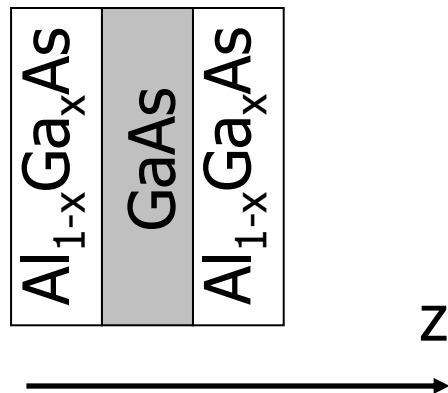
# Квантовый эффект Холла



Обычный эффект Холла

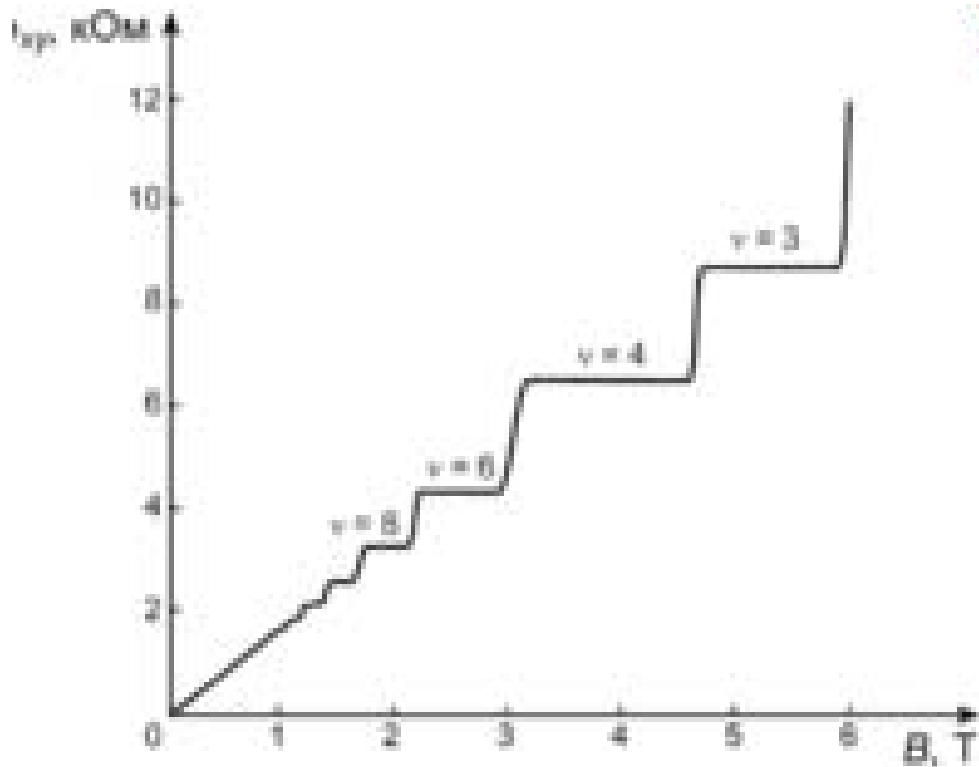
$$R_H = \frac{U_H}{I} = \frac{\mathfrak{R}H}{d} \quad \mathfrak{R} = \frac{1}{nes}$$

Квантовый эффект Холла



$H$  вдоль  $z$   
 $I$  вдоль  $x$   
 $U_H$  вдоль  $y$

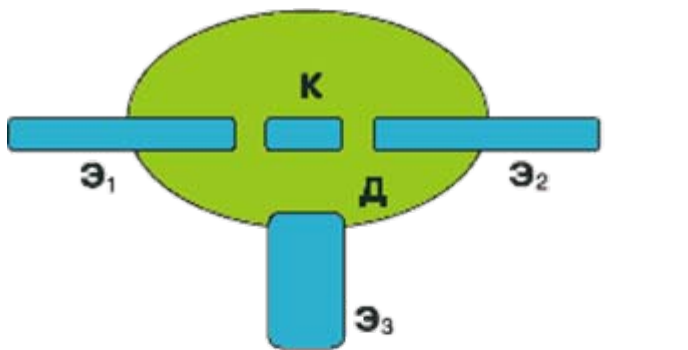
# Квантовый эффект Холла (продолжение)



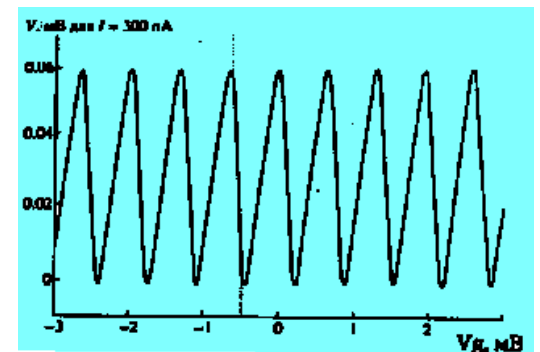
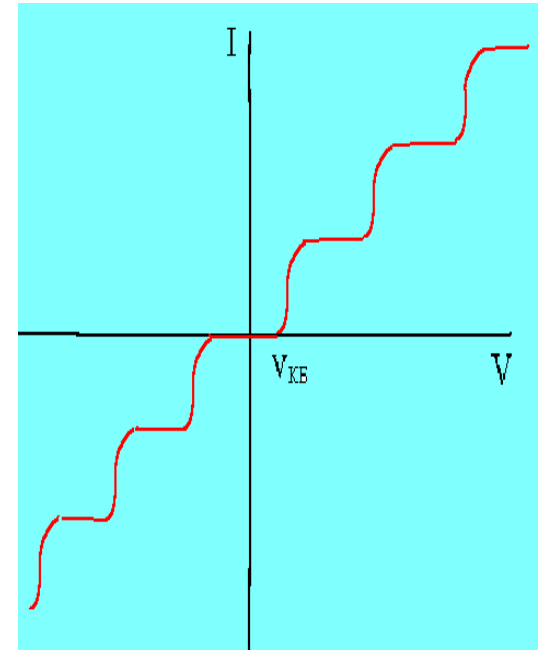
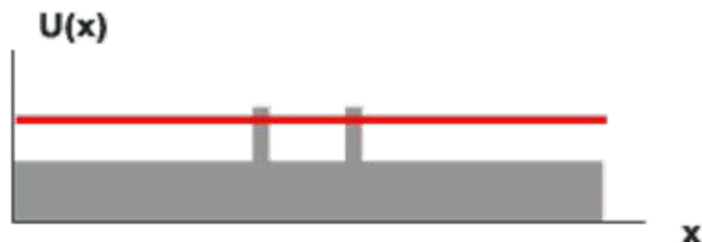
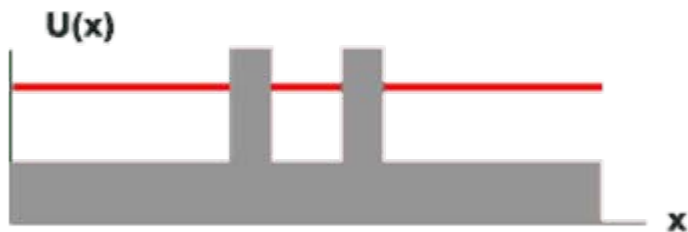
$$R_H = \frac{\hbar}{e^2} \cdot \frac{1}{n}$$

$n$  - целое

# Одноэлектроника

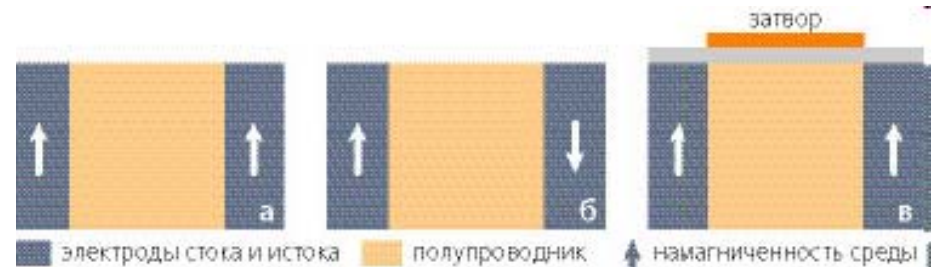
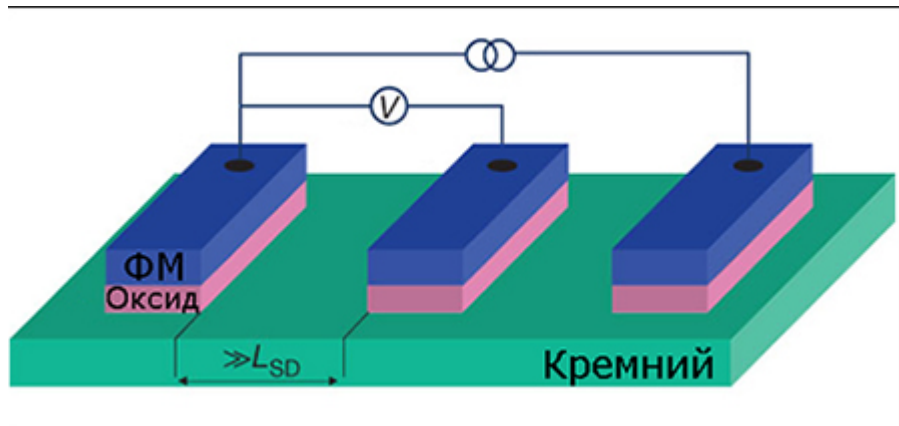


$$V_{КБ} = e/2C$$



# Спинтроника

Раздел квантовой электроники,  
занимающийся изучением спинового токопереноса



Спиновые нанотранзисторы



# Суперпарамагнетизм

---

- Парамагнетики:  $\chi = C/T$ , где  $C \sim N_{\text{маг}}$
- Ферромагнетики: спонтанное упорядочение магнитных моментов при  $T < T_c$

Адиабатическое размагничивание – способ получения сверхнизких температур

Цикл:

- введение магнитного поля
- охлаждение до температуры гелия
- помещение в адиабатические условия
- выведение магнитного поля



# Суперпарамагнетизм (продолжение)

## ■ Проблемы

- у парамагнетиков мала величина  $N_{\text{маг}}$
- у ферромагнетиков происходит спонтанное упорядочение при  $T < T_c$

Решение:

Наноразмерные кластеры ферромагнитных материалов –  
ведут себя как парамагнетики с большим  $N_{\text{маг}}$   
внутри кластера упорядочение есть, а между  
кластерами – нет.