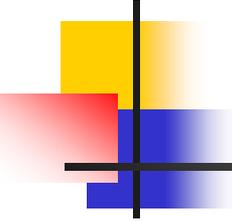


Физика наноустройств.
Устройства оптоэлектроники и
наноэлектроники

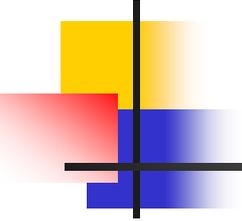
Д.Р. Хохлов

Физический факультет МГУ



Подходы к созданию наноустройств

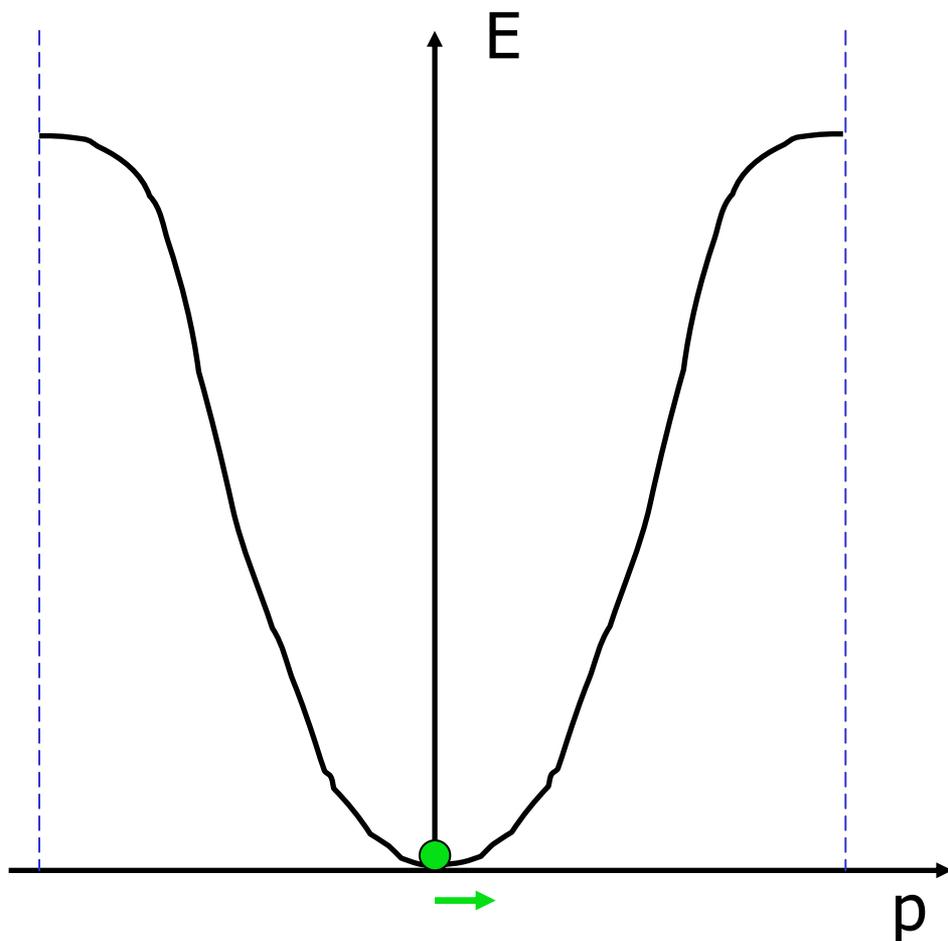
- Сверхрешетки
- Квантовые ямы
- Лазеры на гетеропереходах
- Квантово-каскадные лазеры
- Фотоприемники на квантовых ямах
- Пористый кремний
- Квантовые точки
- Квантовый эффект Холла
- Одноэлектроника
- Спинтроника
- Суперпарамагнетизм



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



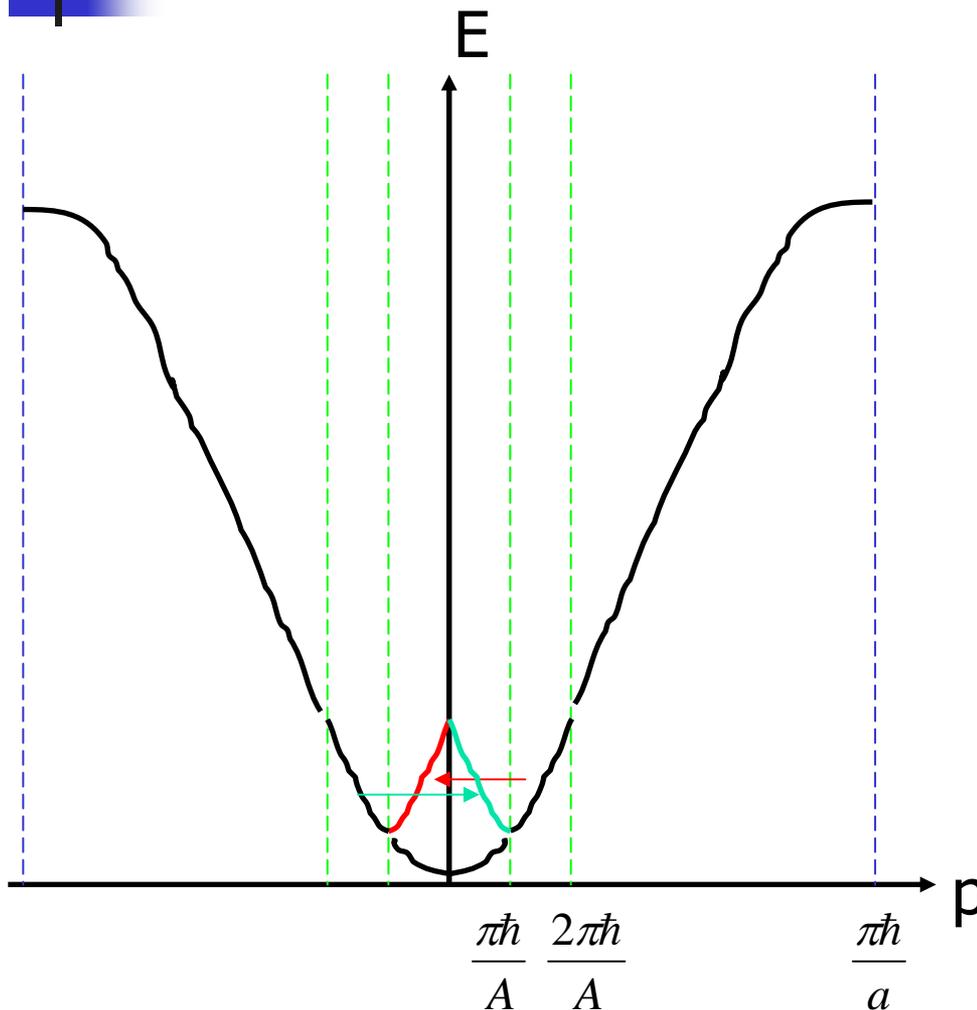
$$\frac{dp}{dt} = eE$$

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

Электрон движется
циклически

$$L = 10^4 \text{ см};$$
$$\omega = 10^2 \text{ Гц}$$

Идея о сверхрешетках



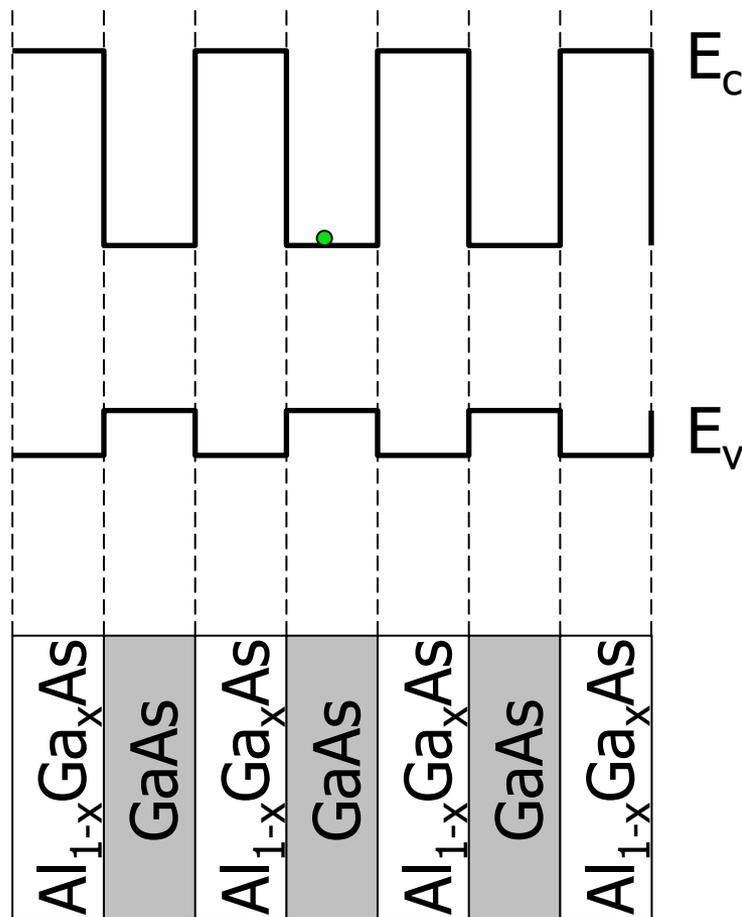
Наложение на один периодический потенциал a еще одного, с большим периодом A

Формирование минизон

$$A=50\text{нм}$$

$$\omega=10^{12}\text{ Гц}$$

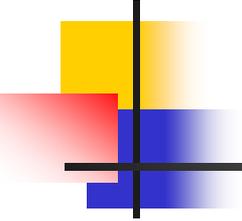
Как создать сверхрешетку?



Большой период создается изменением состава

Характерные размеры ~ 10 нм

Требования к контролю толщины ~ 1 нм

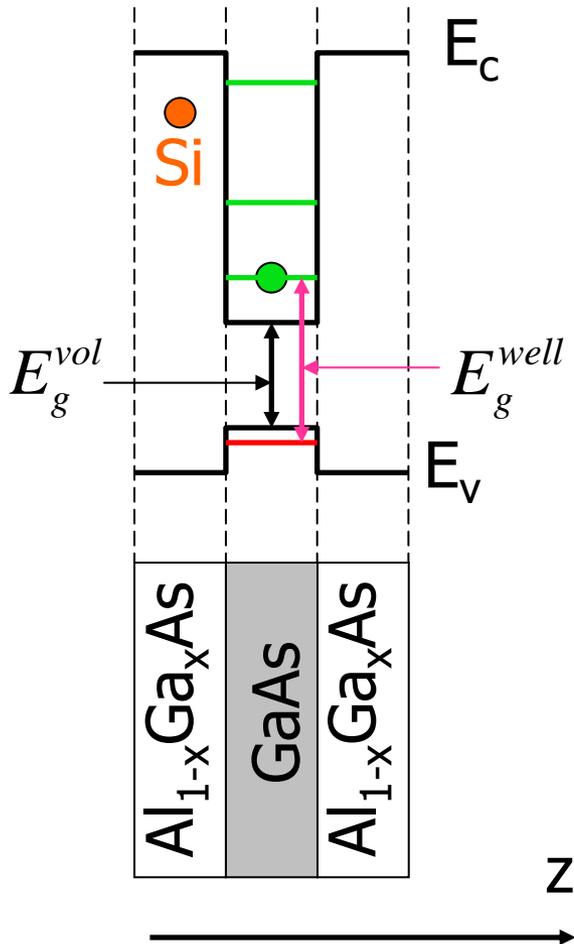


Альтернативный подход

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: $E_z \neq 0$

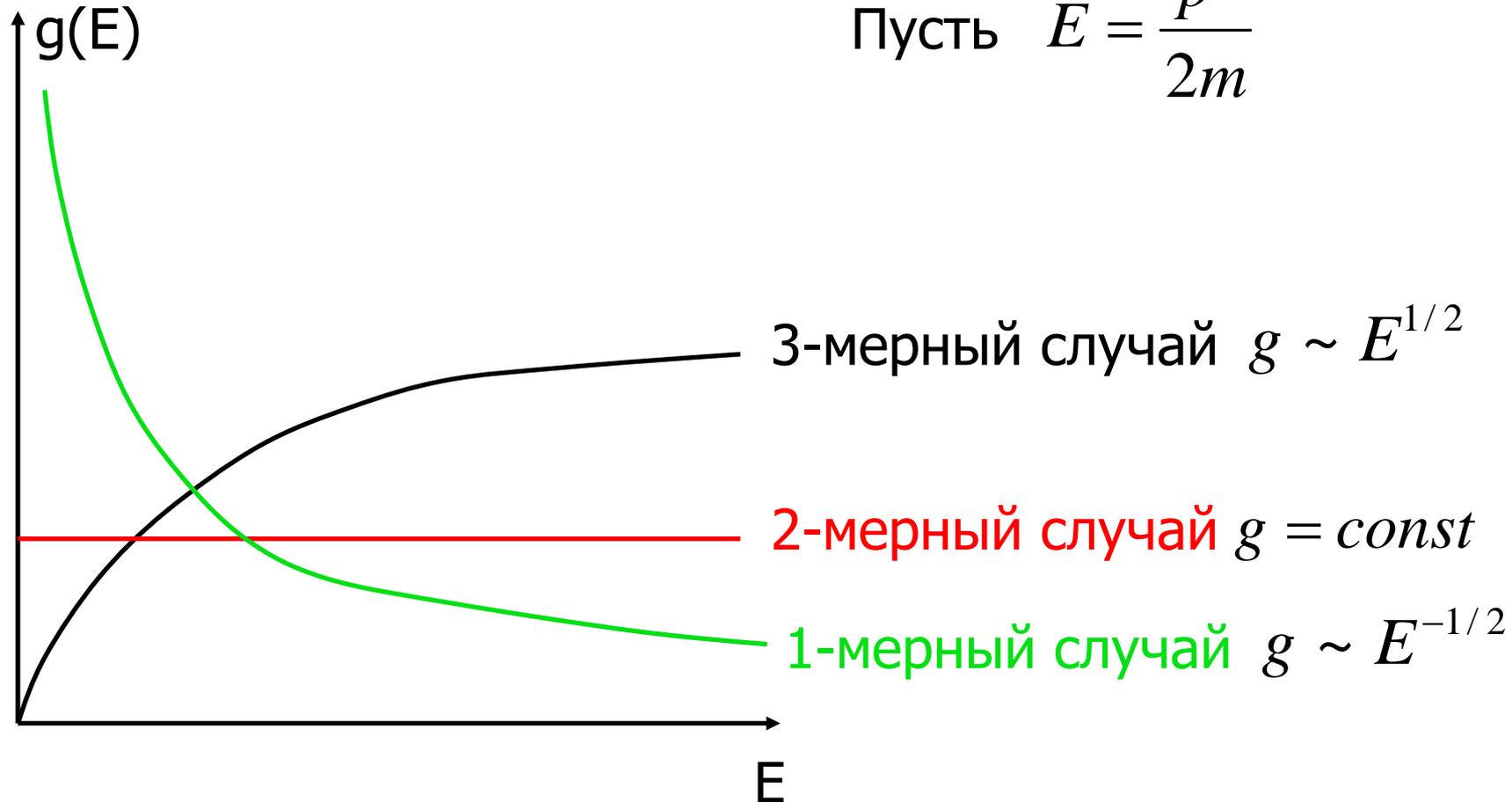
Следовательно: $E_{tot} > E_c$ внутри ямы

Аналогично для валентной зоны

Тогда $E_g^{vol} < E_g^{well}$

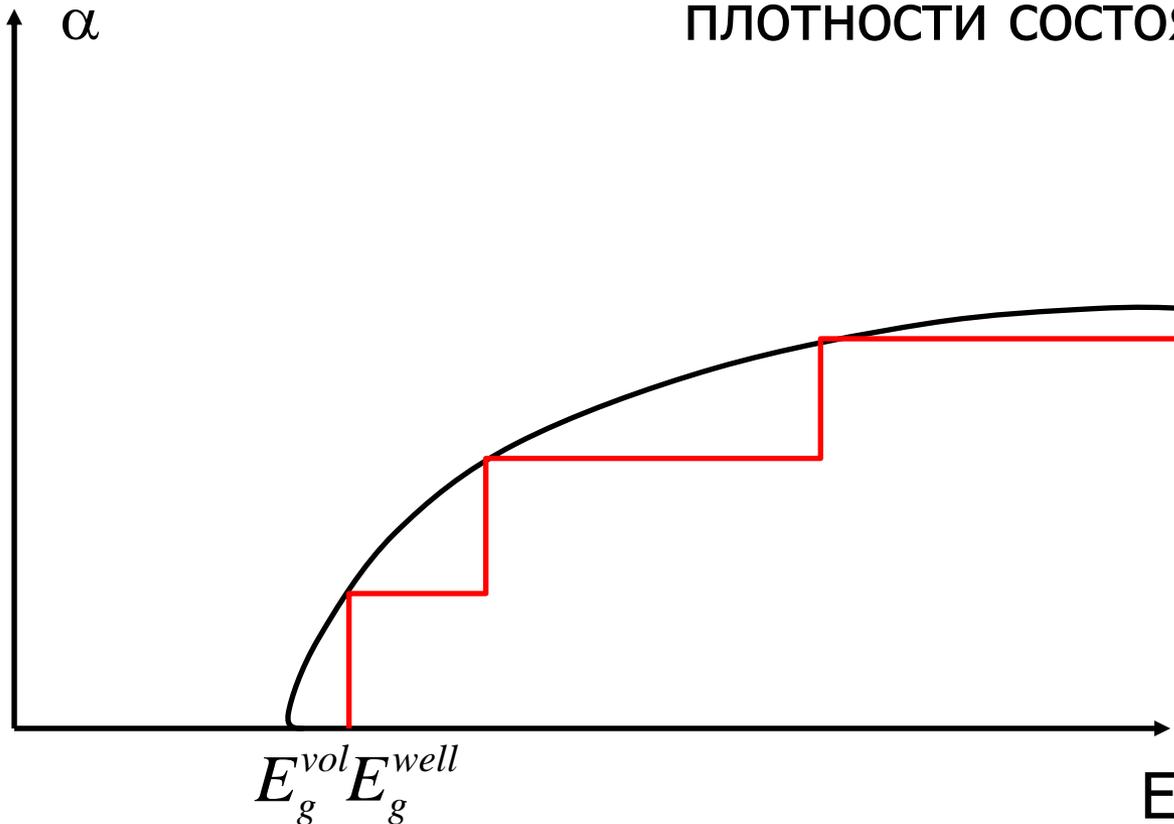
Плотность состояний

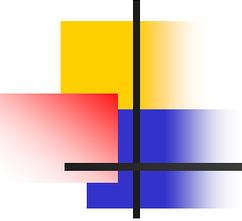
Пусть $E = \frac{p^2}{2m}$



Спектры оптического поглощения

Поглощение пропорционально плотности состояний

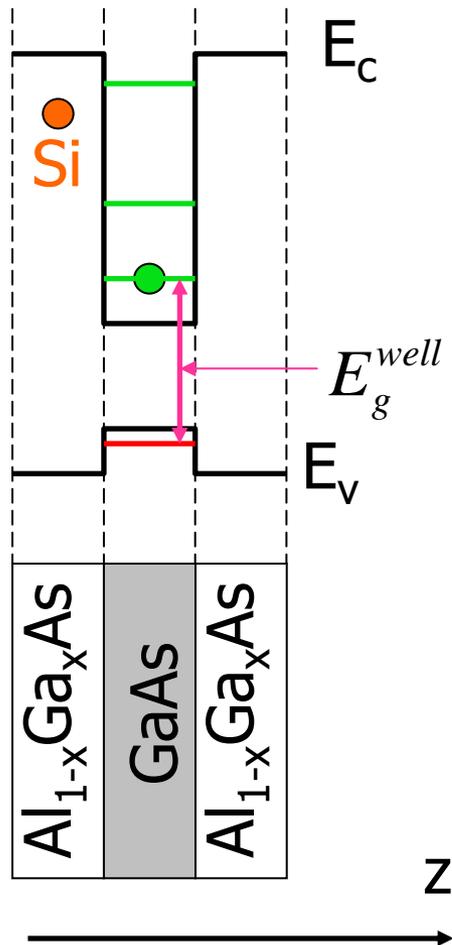




“Band gap engineering”

- 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

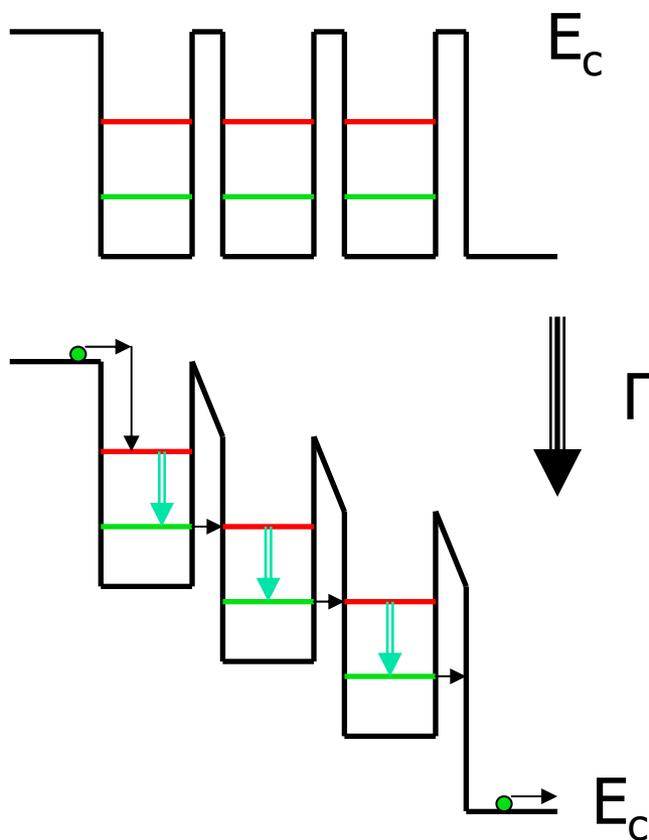
Примеры использования



Лазеры на двумерных гетероструктурах

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

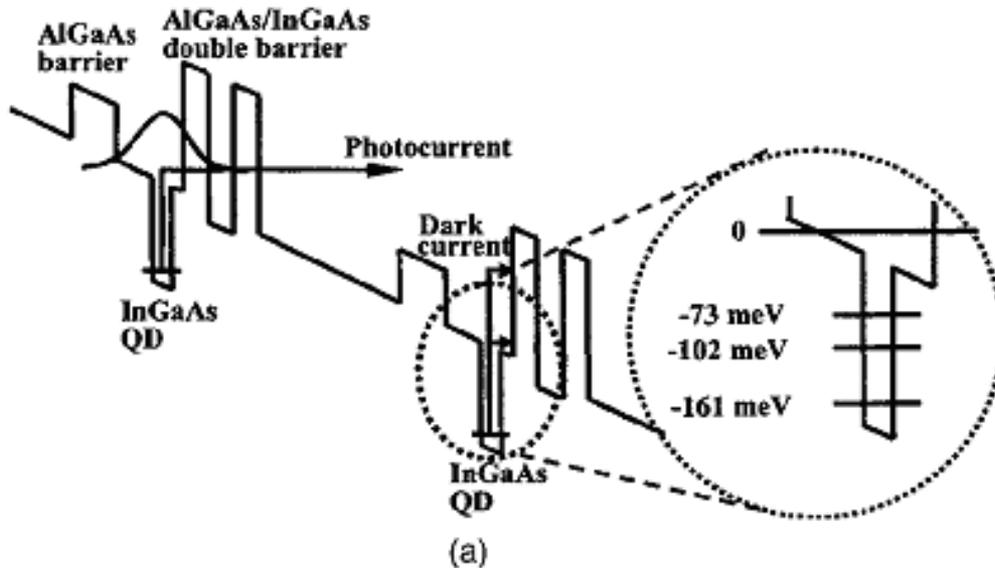
Квантово-каскадные лазеры



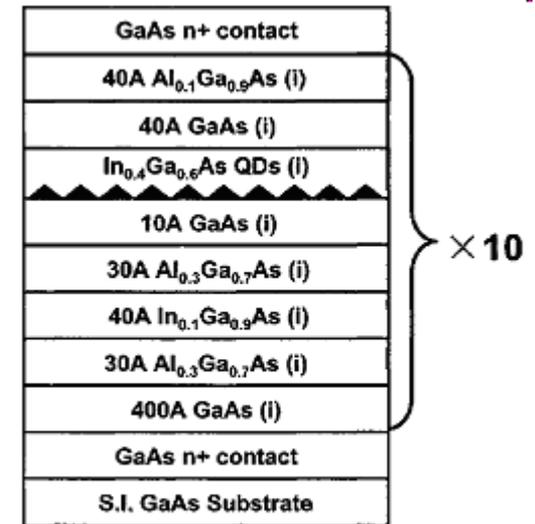
Приложение электрического поля

Каскадная генерация излучения
Длина волны – до 30 мкм

Фотоприемники на квантовых ямах

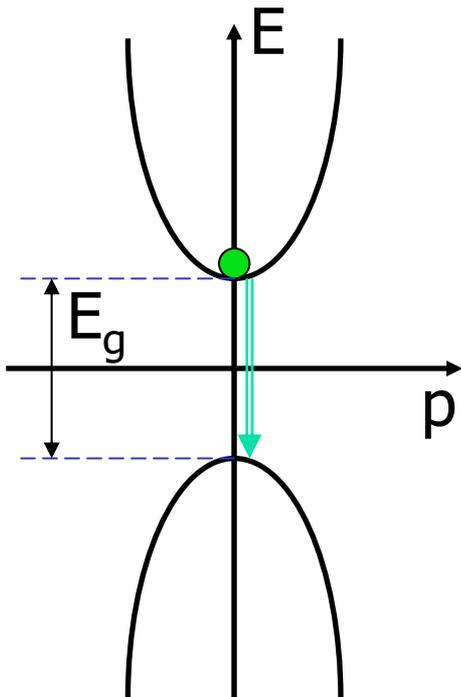


Матричные фотоприемники на множественных квантовых ямах

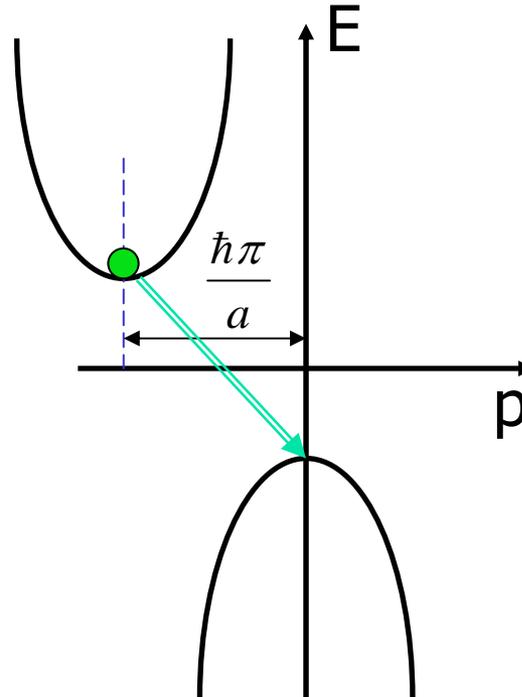


Нанопористые материалы (пористый кремний)

Прямозонный
полупроводник



Непрямозонный
полупроводник



$$E_g = \hbar\omega$$

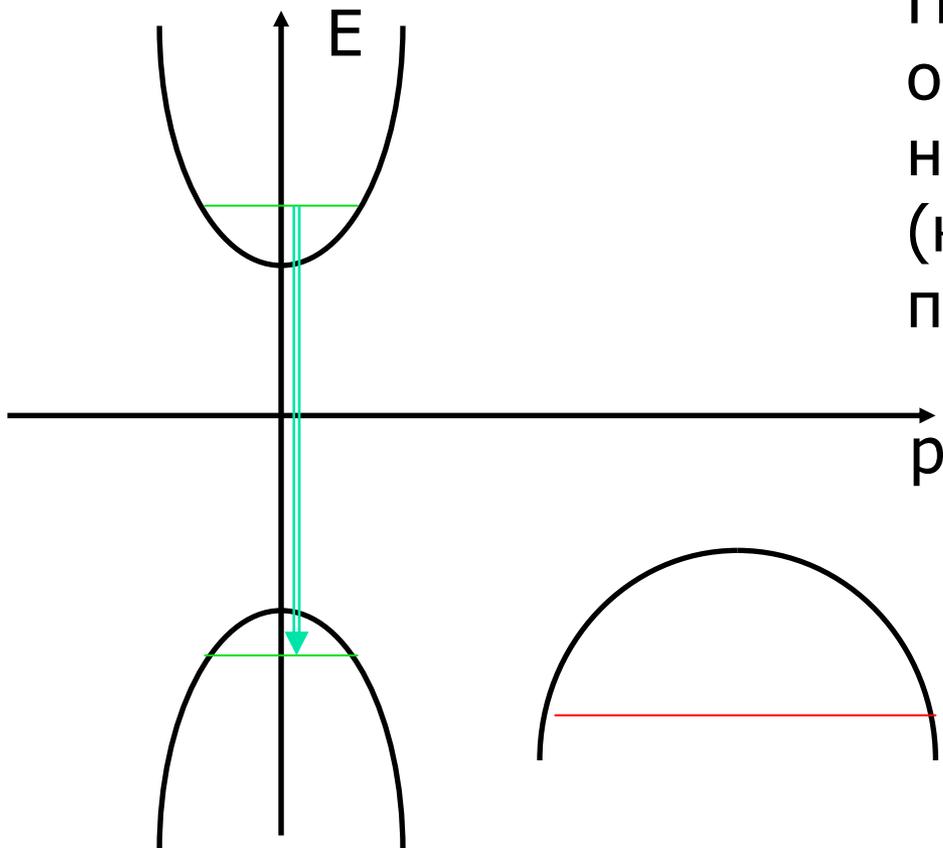
$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$$

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

Закон сохранения
импульса

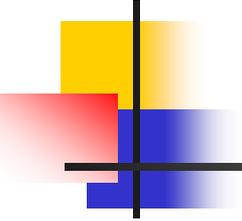
$$P_{ph} = \Delta p_e$$

Пористый кремний (продолжение)



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

и излучать

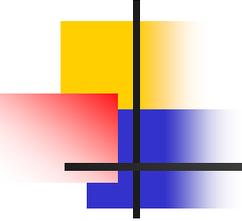


Пористый кремний (продолжение)

- 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

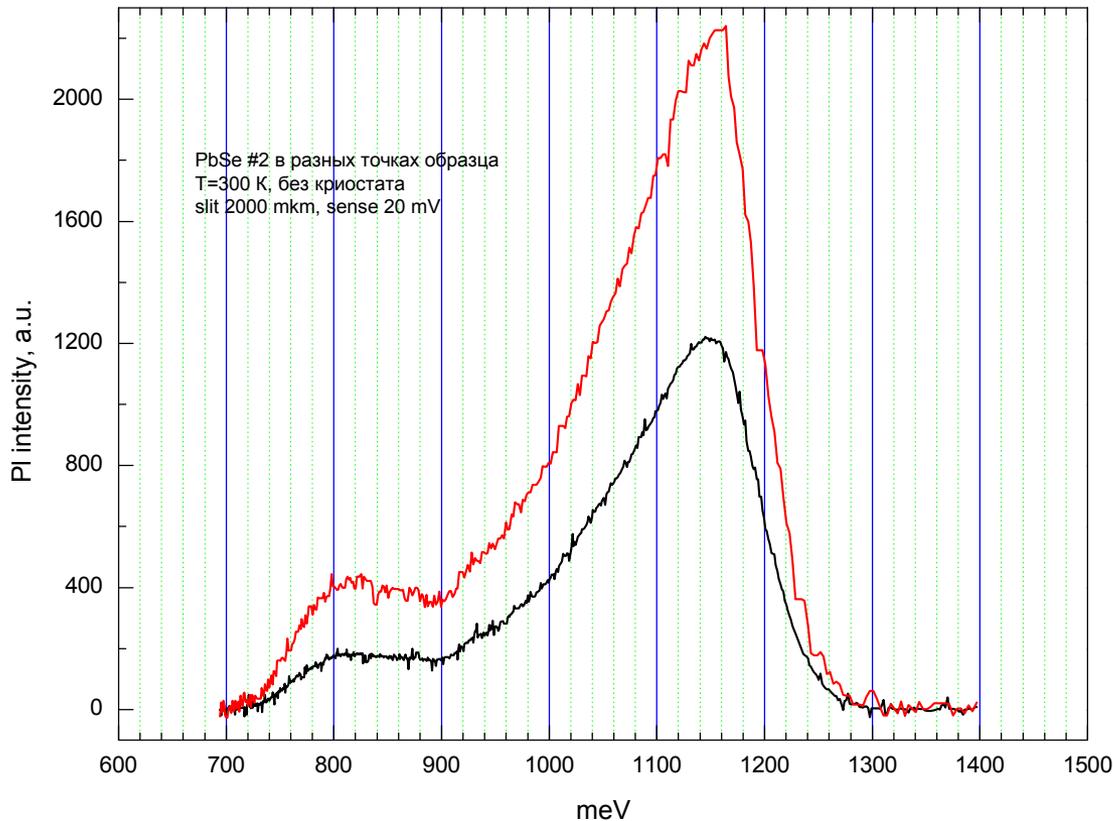
Недостатки:

Разброс по размерам

Неупорядоченность расположения

Трудности с электрическим возбуждением

Квантовые точки PbSe в коллоидном растворе

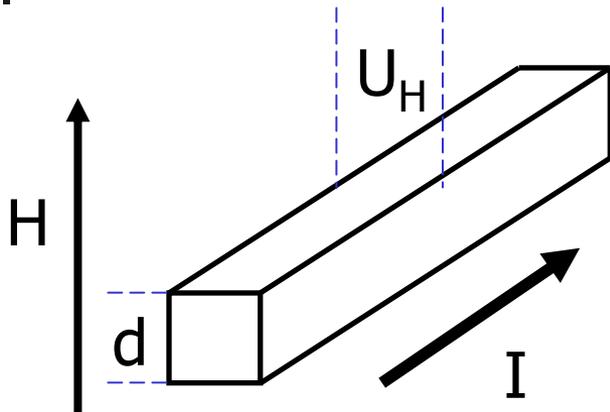


Размер точек –
5 нм

Ширина
запрещенной зоны
объемного PbSe –

~200 meV

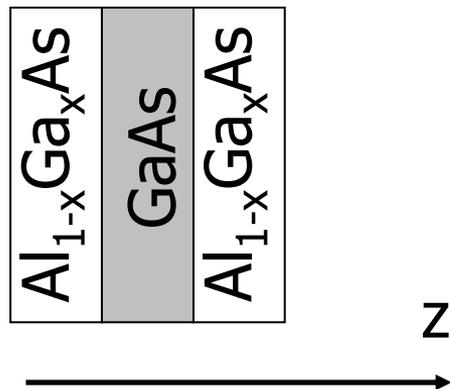
Квантовый эффект Холла



Обычный эффект Холла

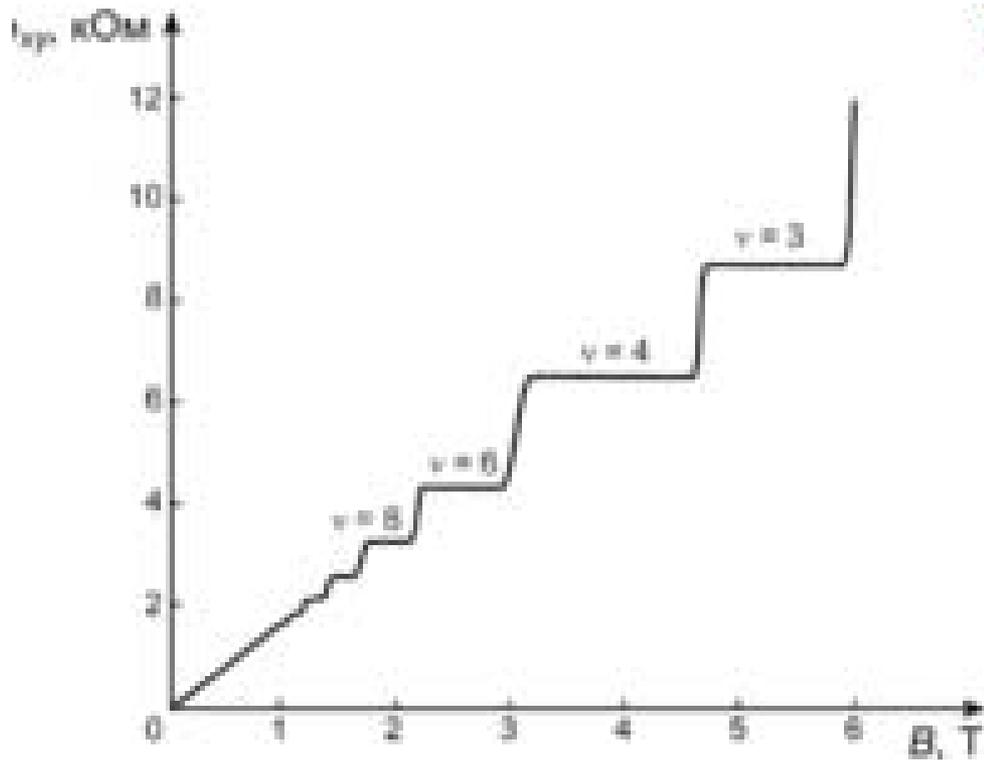
$$R_H = \frac{U_H}{I} = \frac{\mathfrak{R}H}{d} \quad \mathfrak{R} = \frac{1}{nec}$$

Квантовый эффект Холла



H вдоль z
I вдоль x
 U_H вдоль y

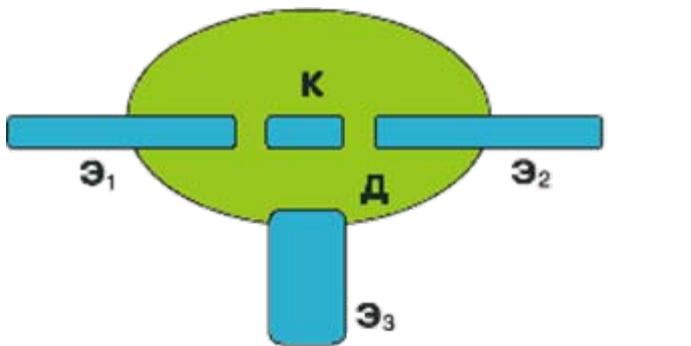
Квантовый эффект Холла (продолжение)



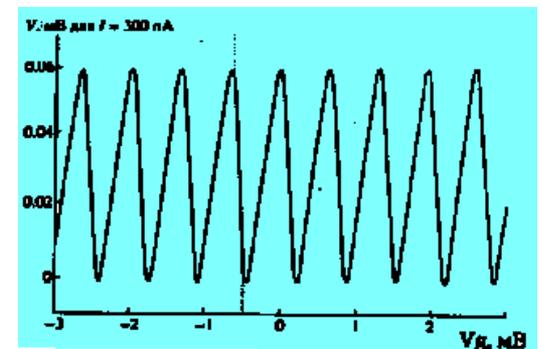
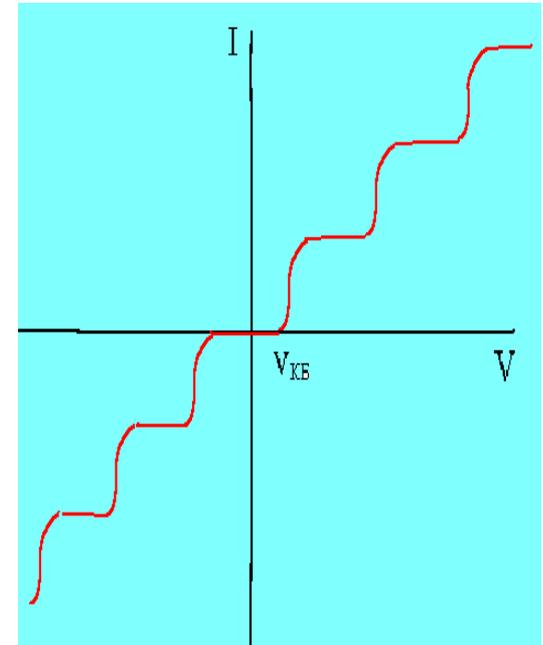
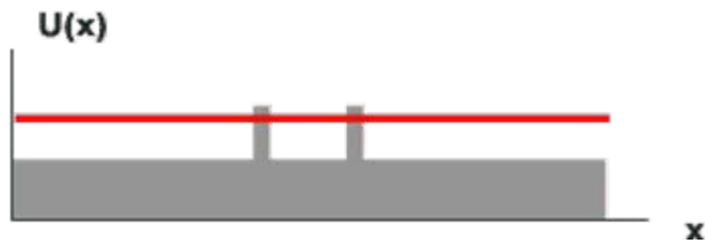
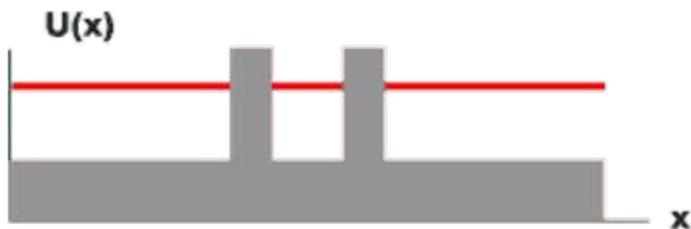
$$R_H = \frac{\hbar}{e^2} \cdot \frac{1}{n}$$

n - целое

Одноэлектроника

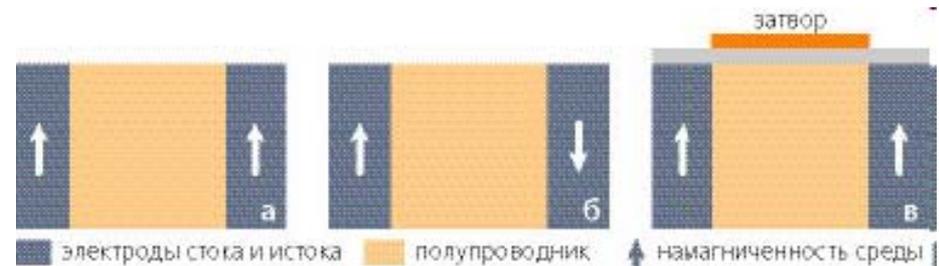
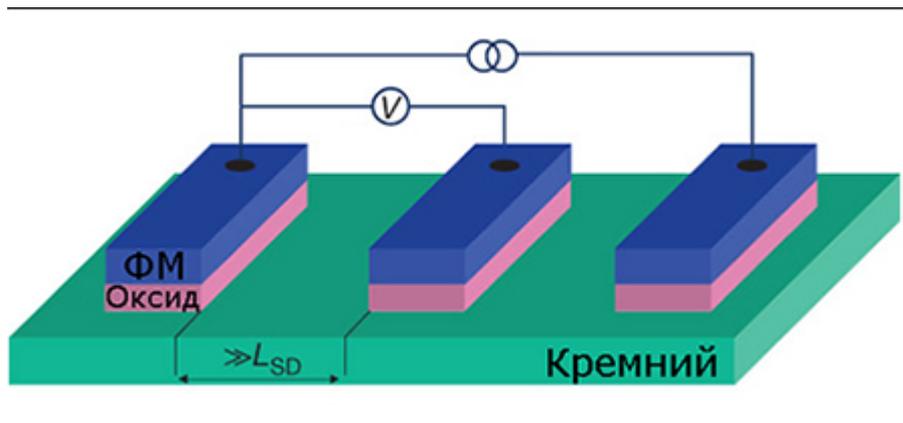


$$V_{КБ} = e/2C$$

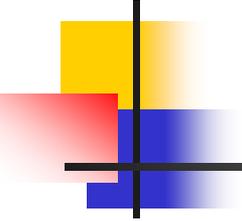


Спинтроника

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.