

Физика наностроустройств.  
Устройства оптоэлектроники и  
наноэлектроники

---

Д.Р. Хохлов,  
В.Ю. Тимошенко

*Физический факультет МГУ*



# Подходы к созданию наноустройств

---

- Сверхрешетки
- Квантовые ямы
- Лазеры на гетеропереходах
- Квантово-каскадные лазеры
- Фотоприемники на квантовых ямах
- Фотонные кристаллы
- Квантовый эффект Холла
- Одноэлектроника
- Спинтроника
- Суперпарамагнетизм
- Устройства памяти

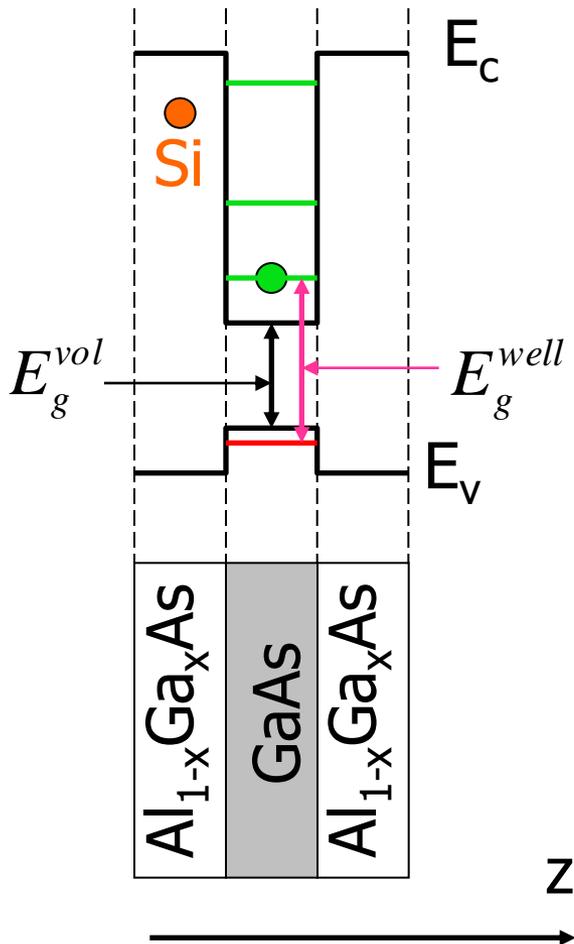


# Основная идея

---

- 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

# «Квантовые ямы»



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

Важно:  $E_z \neq 0$

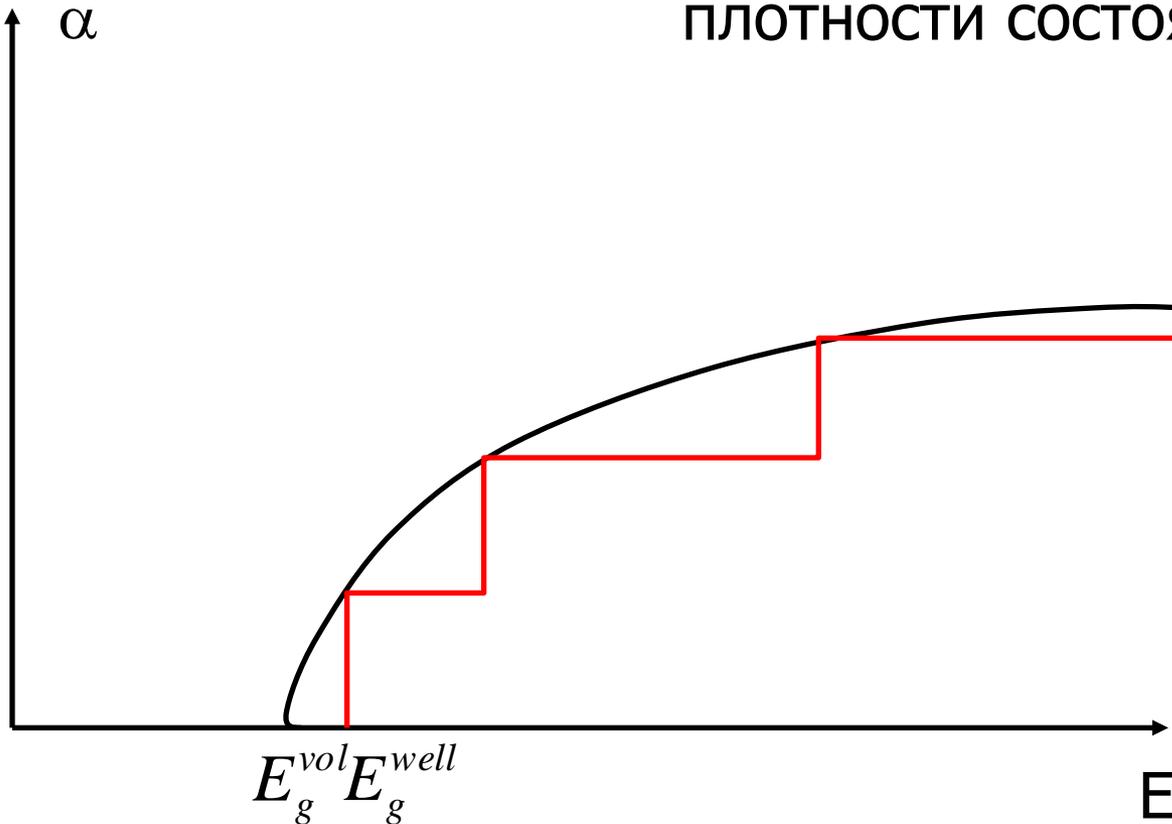
Следовательно:  $E_{tot} > E_c$  внутри ямы

Аналогично для валентной зоны

Тогда  $E_g^{vol} < E_g^{well}$

# Спектры оптического поглощения

Поглощение пропорционально плотности состояний



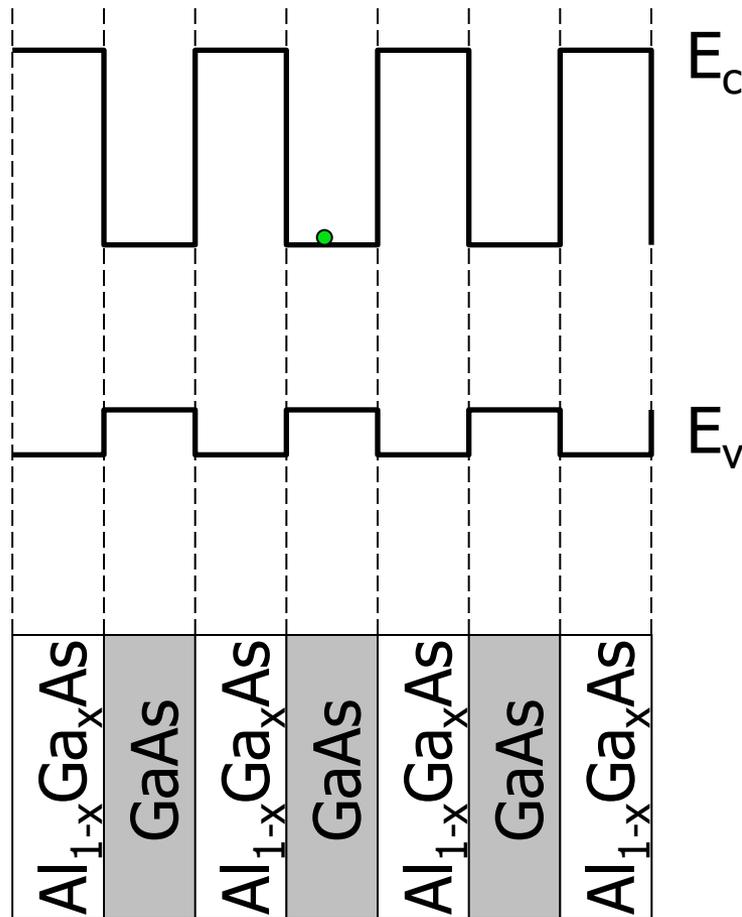


# “Band gap engineering”

---

- 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

# Как создать сверхрешетку?



Большой период создается изменением состава

Характерные размеры  $\sim 10$  нм

Требования к контролю толщины  $\sim 1$  нм



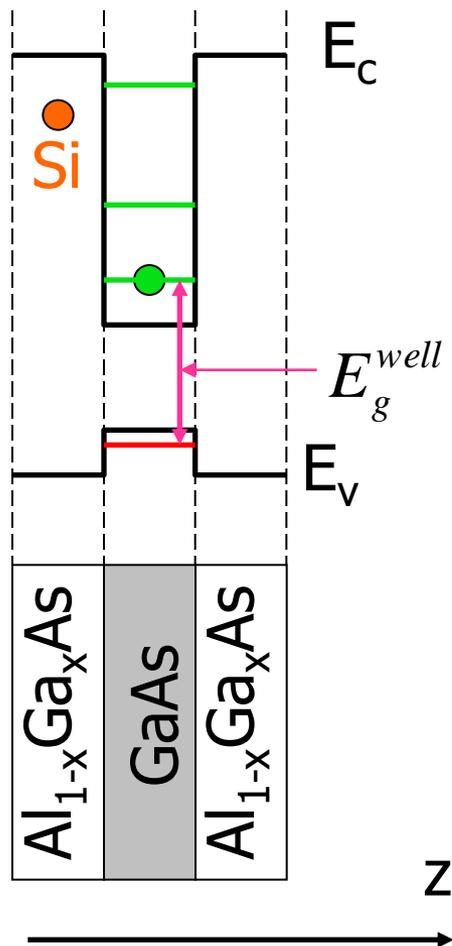
# Альтернативный подход

---

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

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

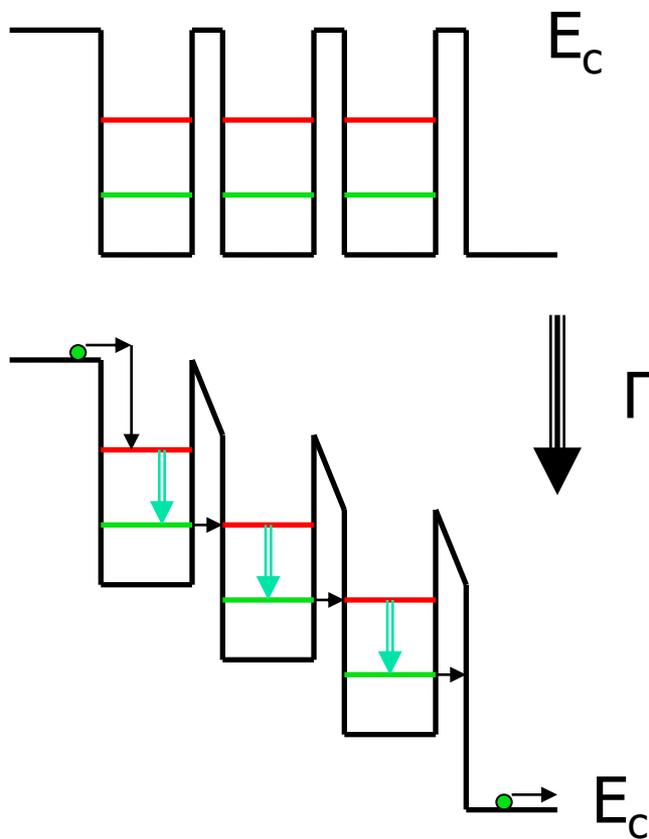
# Примеры использования



Лазеры на двумерных гетероструктурах

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

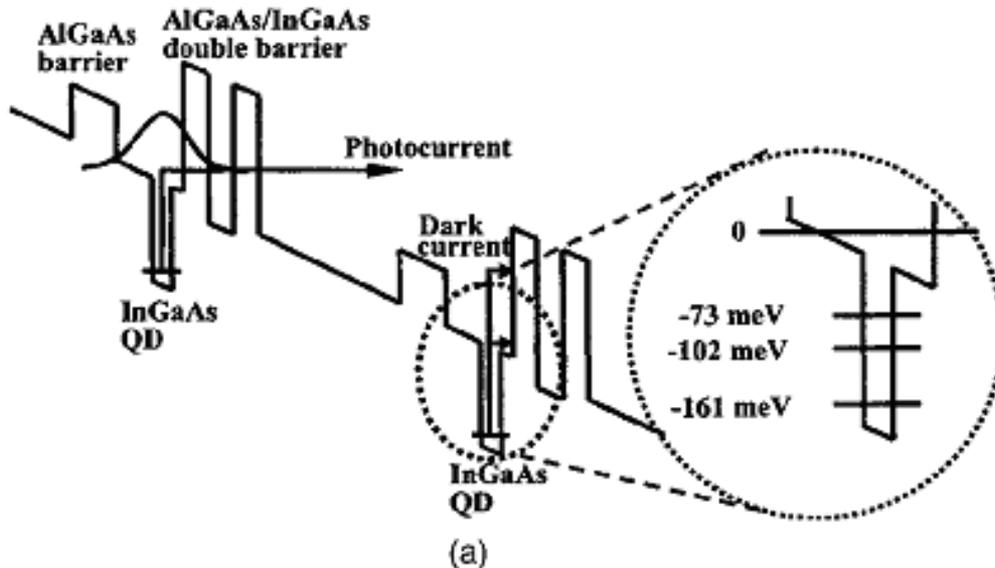
# Квантово-каскадные лазеры



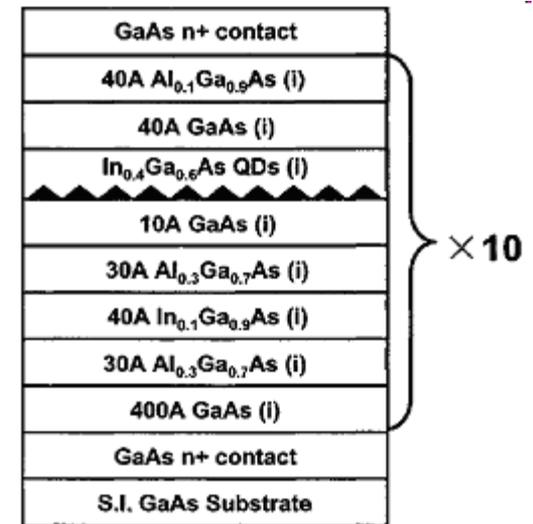
Приложение электрического поля

Каскадная генерация излучения  
Длина волны – до 30 мкм

# Фотоприемники на квантовых ямах



Матричные фотоприемники на множественных квантовых ямах

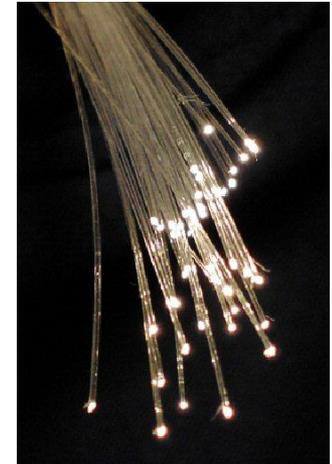
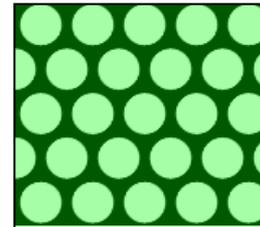
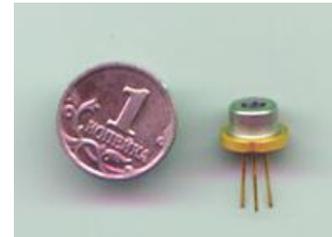


# Фотоника и нанофотоника

Фотоника как область науки началась в 1960 с изобретением **лазера**, а также с изобретения **лазерного диода** в 1970-х с последующим развитием **оптоволоконных систем связи** как средств передачи информации, использующих световые методы.

Некоторые основные элементы и устройства фотоники:

- лазер
- светодиод
- оптоволокно
- фотонный кристалл
- оптический усилитель и т.п.

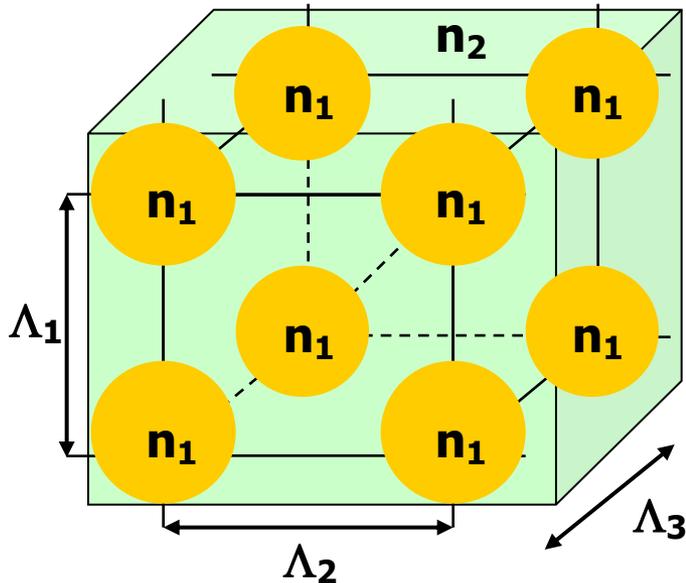


**Нанофотоника** является разделом фотоники, в котором исследуются явления со считанным количеством фотонов и исследуются поведение света на нанометровой шкале, в том числе при взаимодействии с наночастицами и наноструктурами.

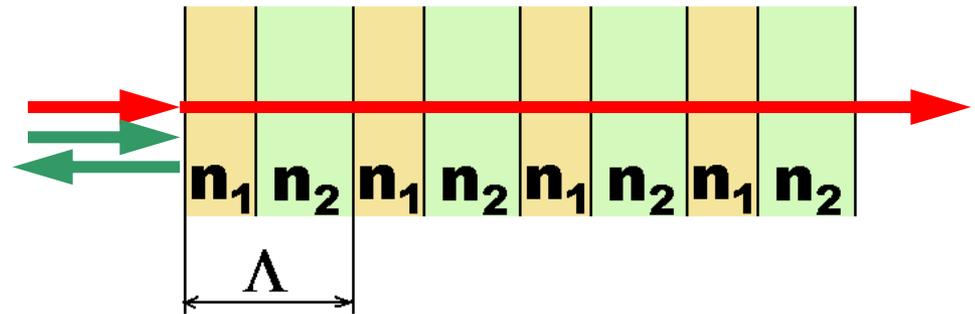
# Фотонные кристаллы

Основное свойство фотонного кристалла – существование **фотонной запрещенной зоны** – области частот фотонов, которые не могут распространяться внутри фотонного кристалла.

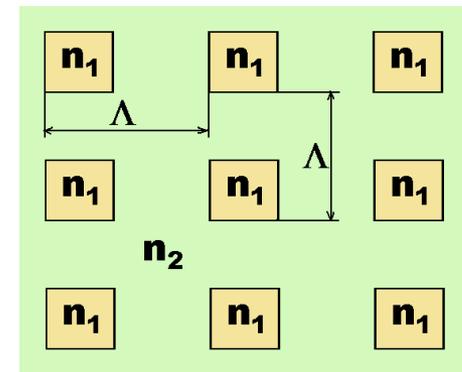
## Трехмерный фотонный кристалл



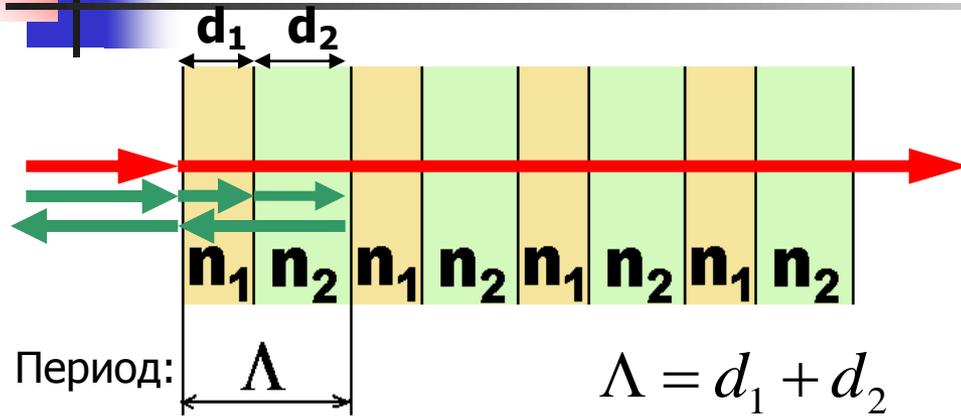
## Одномерный фотонный кристалл



## Двумерный фотонный кристалл



# Как образуется фотонная запрещенная зона ?



Максимумы в спектре коэффициента отражения **R** и минимумы в пропускании **T** для длин волн, соответствующих серединам **фотонных запрещенных зон**:

$$\lambda_m = 2(n_1 d_1 + n_2 d_2) / m$$

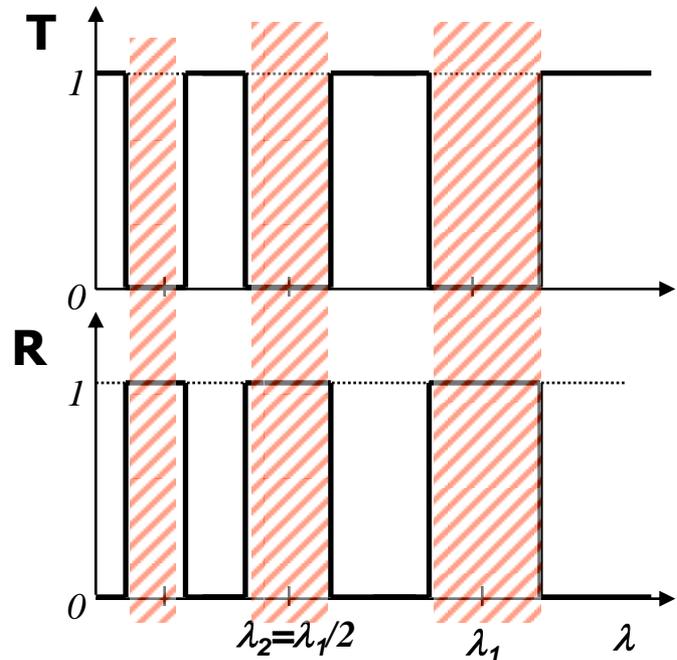
Практически важный частный случай для основной фотонной запрещенной зоны ( $m = 1$ ) :

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_1 / 4$$

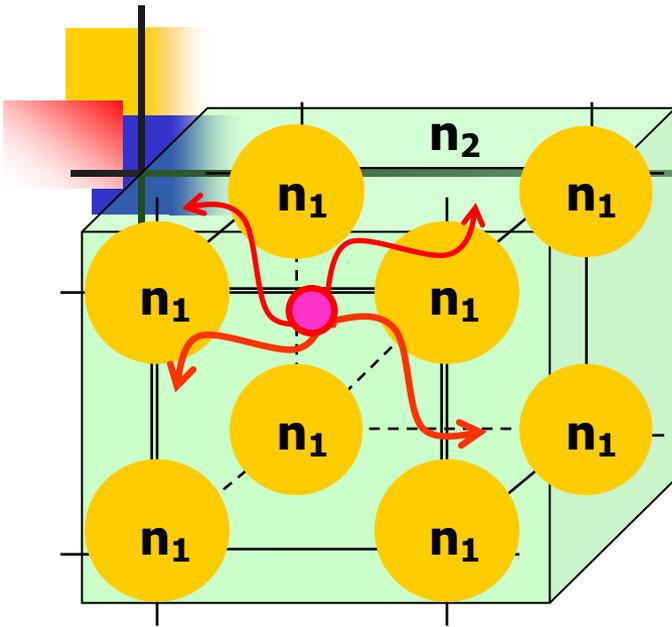
Интерференция волн, отраженных от пары слоев, будет конструктивной при выполнении **условия Брэгга**:

$$2(n_1 d_1 + n_2 d_2) = m \lambda_m$$

$$m = 1, 2, 3, \dots$$



# Перспективы фотонных устройств

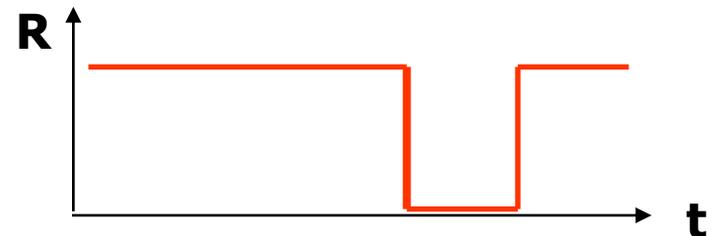
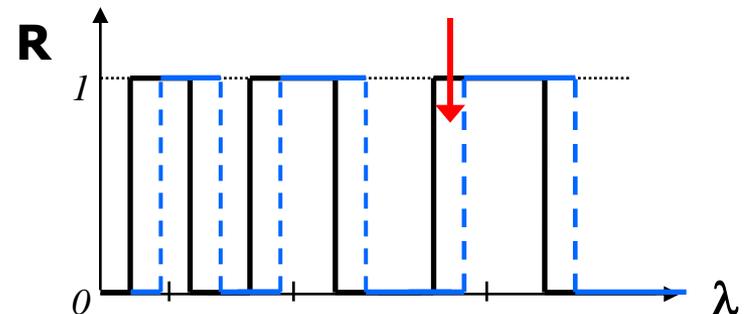


Замедление времени жизни фотона  $\tau_{rad}$

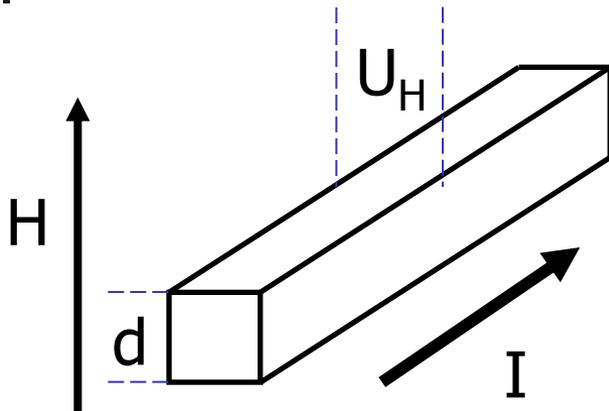
Еще одно применение фотонных кристаллов связано с использованием **контролируемых законов дисперсии** для света вблизи края фотонной зоны, что дает возможность реализовать условия для эффективных волновых нелинейно-оптических взаимодействий.

В 3D фотонных кристаллах возможно пленение излучения с длиной волны, соответствующей фотонной запрещенной зоне. Это нужно для создания **лазеров со сверхнизкими порогами генерации**.

Управляемые светом или электрическим полем фотонные кристаллы могут быть использованы как элементы **оптических усилителей, переключателей и транзисторов**, что дает возможность построить оптические устройства обработки информации.



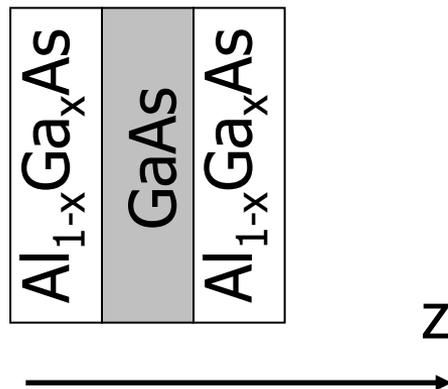
# Квантовый эффект Холла



Обычный эффект Холла

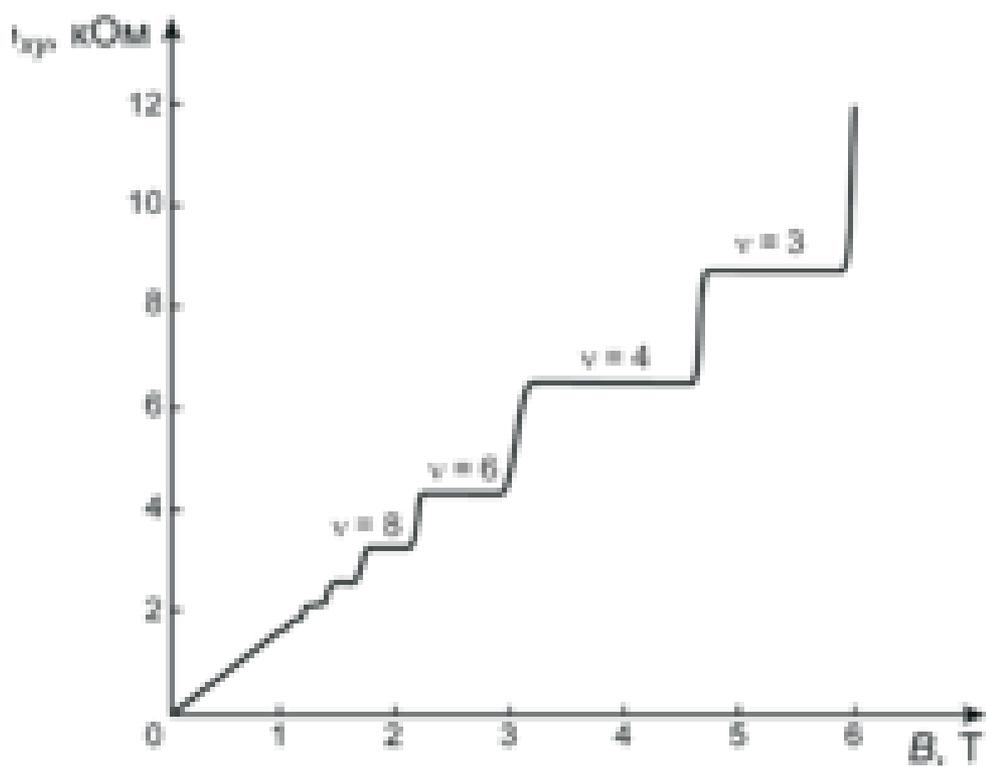
$$R_H = \frac{U_H}{I} = \frac{\mathfrak{R}H}{d} \quad \mathfrak{R} = \frac{1}{nes}$$

Квантовый эффект Холла



H вдоль z  
I вдоль x  
U<sub>H</sub> вдоль y

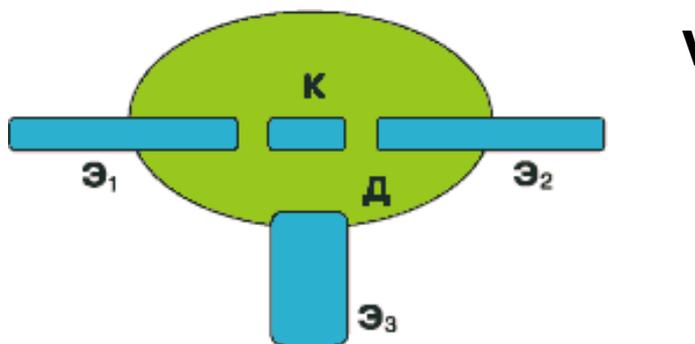
# Квантовый эффект Холла (продолжение)



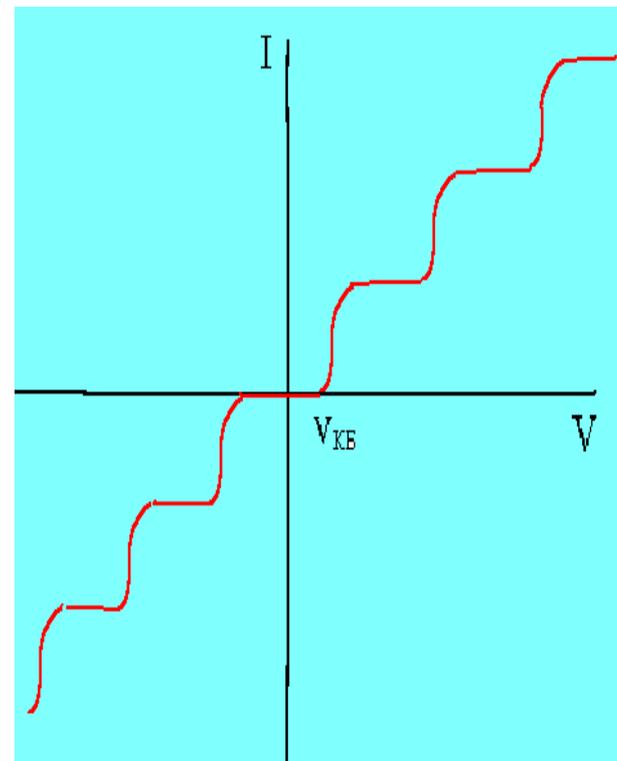
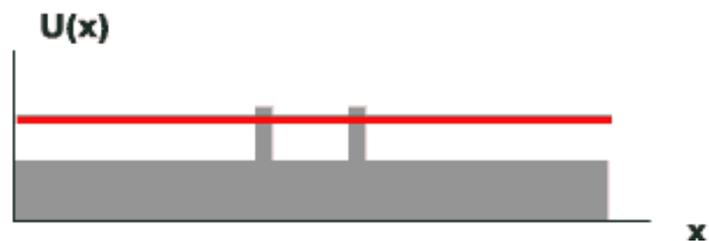
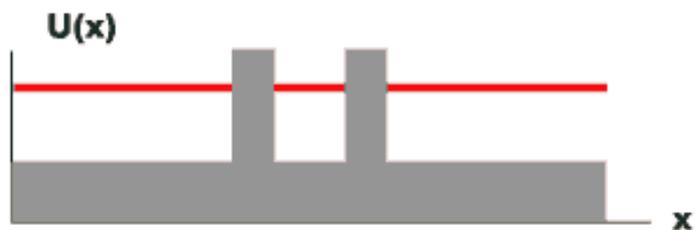
$$R_H = \frac{\hbar}{e^2} \cdot \frac{1}{n}$$

$n$  - целое

# Одноэлектроника

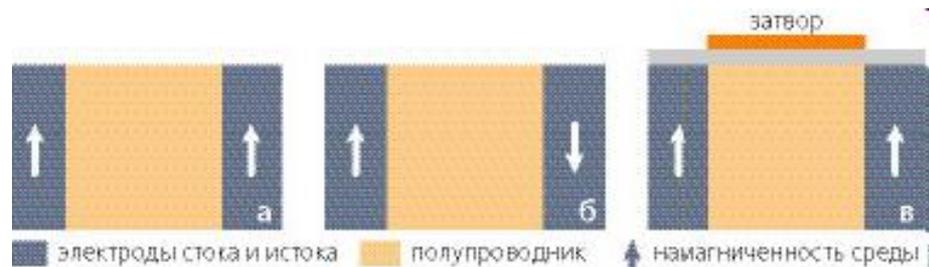
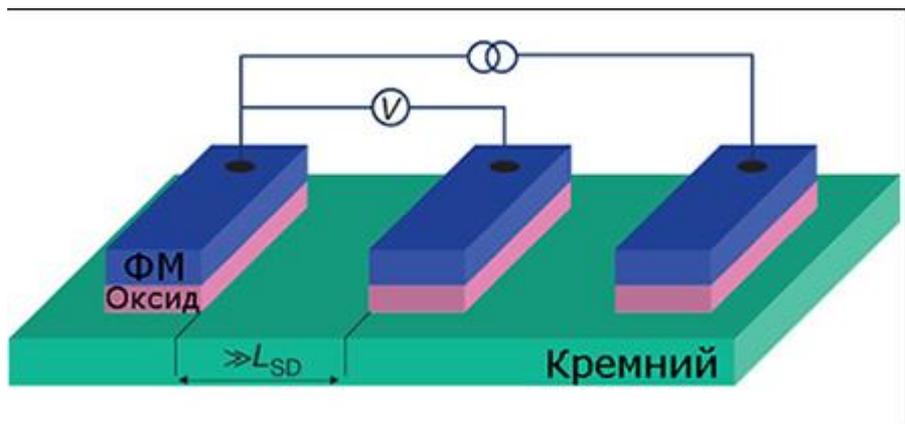


$$V_{\text{КБ}} = e/2C$$

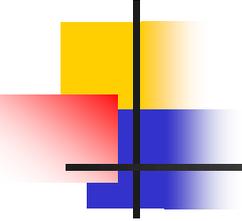


# Спинтроника

Раздел квантовой электроники,  
занимающийся изучением спинового токопереноса



Спиновые нанотранзисторы



# Суперпарамагнетизм

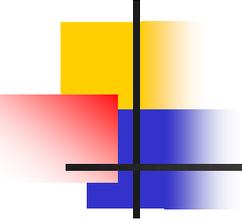
---

- Парамагнетики:  $\mu \geq 1$  ( $\mu = 1 + 4\pi\chi$ ,  $\chi = C/T$ , где  $C \sim N_{\text{маг}}$ )
- Ферромагнетики: спонтанное упорядочение магнитных моментов при  $T < T_c$

Адиабатическое размагничивание – способ получения сверхнизких температур ( $T \leq 10^{-1} - 10^{-6}$  К)

Цикл:

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



# Суперпарамагнетизм (продолжение)

---

- Проблемы

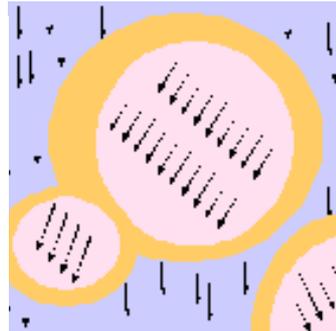
- у парамагнетиков мала величина  $N_{\text{маг}}$
- у ферромагнетиков происходит спонтанное упорядочение при  $T < T_c$

Решение:

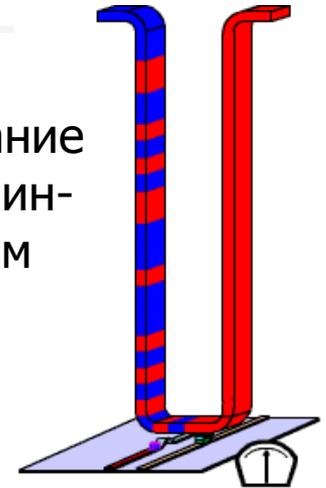
Наноразмерные кластеры ферромагнитных материалов –  
ведут себя как парамагнетики с большим  $N_{\text{маг}}$   
внутри кластера упорядочение есть, а между  
кластерами – нет.

# Наномагнетизм и устройства памяти и записи/считывания информации

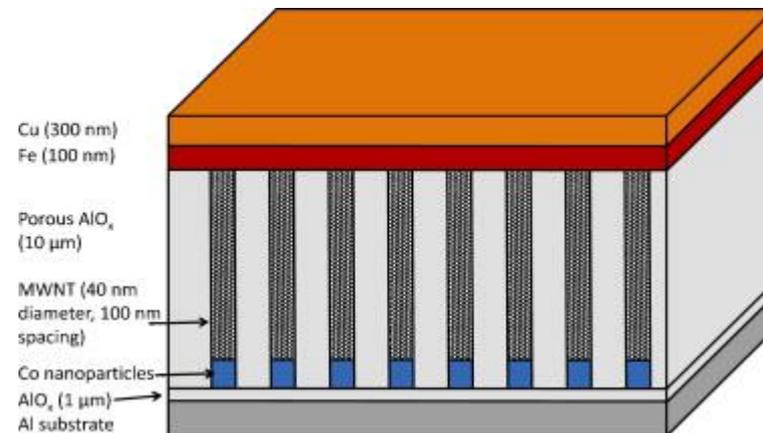
Для записи информации в магнитных наноматериалах пока доминирует горизонтальный способ намагничивания.

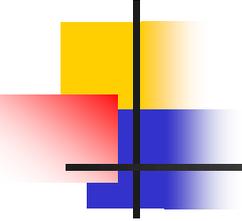


Магнитная запись/считывание информации спин-поляризованным током



Большие перспективы открываются с **вертикальным способом намагничивания** для более плотной записи информации, а также с развитием новой сферы применения магнитных наноструктур – **спинтроники**





# Основные выводы

---

- Полупроводниковые гетероструктуры (квантовые ямы и квантовые точки) являются перспективными для создания новых светоизлучающих и фоточувствительных.
- Фотонные кристаллы представляют интерес для создания новых устройств фотоники, лазерной физики и обработки информации.
- Существующие магнитные устройства записи, хранения и считывания информации уже используют наноматериалы. Дальнейшая перспектива связана с развитием вертикально способа записи и созданием устройств спинтроники.