

Оптика твердого тела и наноструктур



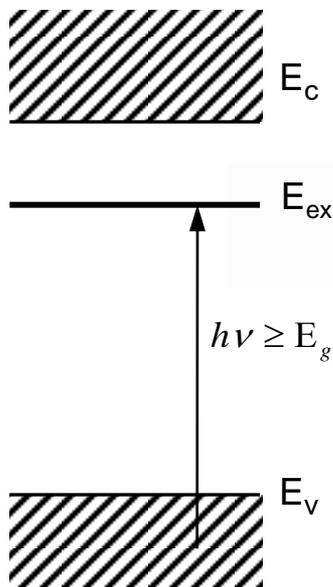
Гончар Кирилл Александрович
Тимошенко Виктор Юрьевич

**Московский Государственный Университет
им. М. В. Ломоносова, Физический факультет**

Лекция 5. Экситонное поглощение света в полупроводниках

- Экситоны Френкеля и Ванье-Мотта.
- Спектр экситона Ванье-Мотта.
- Коллективные эффекты в системе экситонов: электронно-дырочная жидкость и электронно-дырочные капли.
- Фазовый переход Мотта.

Экситоны в твердых телах

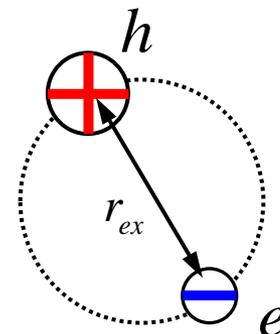


В полупроводниках и диэлектриках возможно поглощение света, которое не сопровождается появлением свободных носителей заряда. Возникающее возбуждение является электрически нейтральным и может быть рассмотрено как квазичастица, состоящая из электрона и дырки и называемая *экситоном* (от “excitation”). Понятие «экситон» было введено Я.И.Френкелем в 1931 г. В полупроводниках экситон был обнаружен в 1951 г. Е.Ф.Гроссом с сотрудниками.

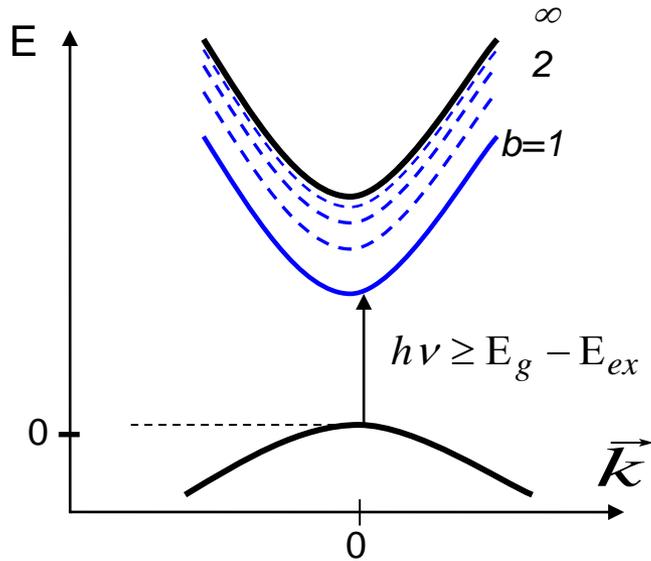
Известны **экситоны Френкеля**, или экситоны малого радиуса $r_{ex} \leq a_0$ – постоянной решетки кристалла; и **экситоны Ванье-Мотта**, или экситоны большого радиуса $r_{ex} \gg a_0$.

Для полупроводников наблюдаются экситоны Ванье-Мотта, которые упрощенно могут быть представлены как атомоподобные квазичастицы, состоящие из электрона и дырки, связанных кулоновским взаимодействием.

Экситон не может быть объяснен классическими моделями (также как и атом). Экситон Ванье-Мотта является уточнением одноэлектронного приближения в зонной теории твердого тела.



Экситон Ванье-Мотта в полупроводнике



Задача об экситоне аналогична задаче об атоме водорода. Тогда можно записать уравнение Шредингера для электрона и дырки, взаимодействующих кулоновскими силами.

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla_e^2 - \frac{\hbar^2}{2m_h} \nabla_h^2 - \frac{e^2}{\eta \varepsilon |\vec{r}_e - \vec{r}_h|} \right] \Phi(\vec{r}_e, \vec{r}_h) = G \Phi(\vec{r}_e, \vec{r}_h)$$

где e – заряд электрона; m_e и m_h – эффективные массы электрона и дырки; \vec{r}_e, \vec{r}_h и ∇_e^2, ∇_h^2 – соответствующие радиус-векторы и операторы Лапласа для электрона и дырки; $\Phi(\vec{r}_e, \vec{r}_h)$ и G – волновая функция и полная энергия системы; ε – диэлектрическая проницаемость системы (на частотах $\sim G/\hbar$) и η – коэффициент, зависящий от системы единиц (СИ: $\eta = 4\pi\varepsilon_0$, СГС: $\eta = 1$).

Решение задачи проводится введением новых координат $(\vec{r} = \vec{r}_e - \vec{r}_h, \vec{R} = \frac{m_e \vec{r}_e + m_h \vec{r}_h}{m_e + m_h})$ и разложением движения экситона на поступательное и внутренне.

Полная энергия экситона:

$$G_b(\vec{k}_{ex}) = W(\vec{k}_{ex}) + E_b = E_g + \frac{\hbar^2 k_{ex}^2}{2M} - \frac{E_{ex}}{b^2}$$

$$M = m_e + m_h$$

$$m_r^{-1} = m_e^{-1} + m_h^{-1}$$

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

Энергия связи экситона:

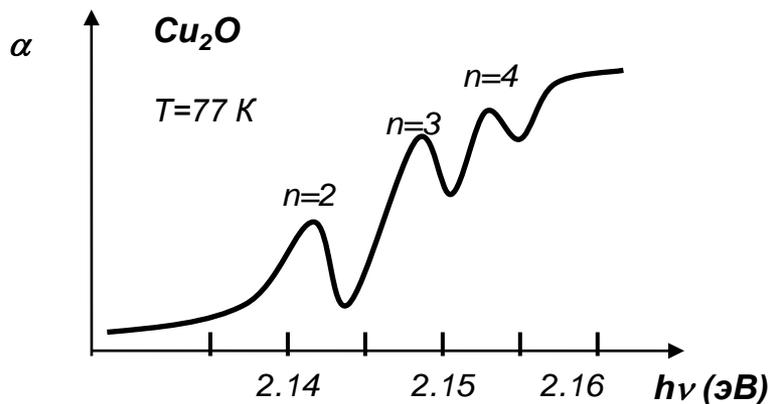
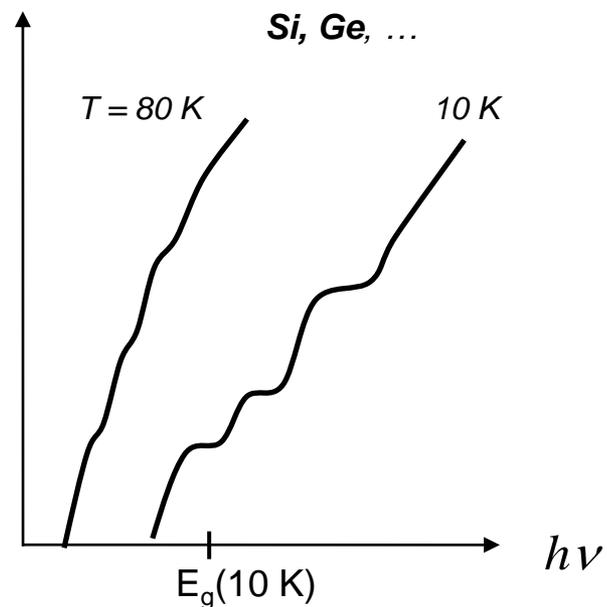
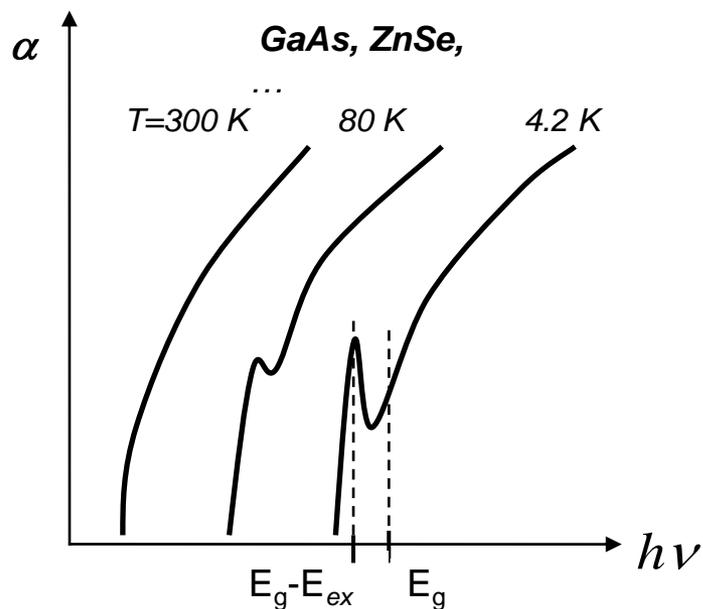
$$E_{ex} \equiv E_1 = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 \varepsilon r_{ex}}$$

Радиус экситона:

$$r_{ex} = \frac{\eta \varepsilon \hbar^2}{m_r e^2} = a_B \varepsilon \frac{m_0}{m_r}$$

$a_B = 0.053$ нм – это боровский радиус в атоме водорода

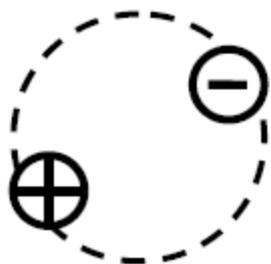
Примеры спектров экситонного поглощения



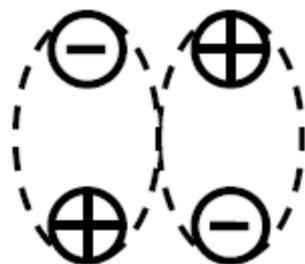
$E_{ex}=2-16$ мэВ, что меньше, чем энергия теплового движения при комнатной температуре (26 мэВ).

Наблюдение экситонных пиков поглощения в объеме полупроводника возможно при низких температурах. В полупроводниковых наноструктурах энергия связи возрастает и экситоны стабильны даже при комнатной температуре.

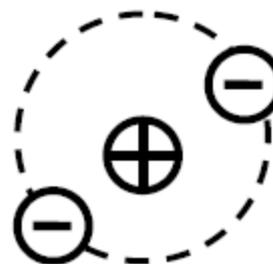
ЭКСИТОН И ЭКСИТОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ



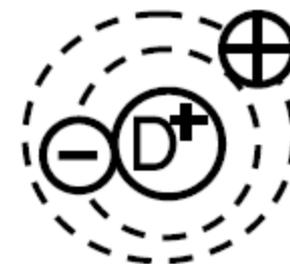
экситон



*биэкситон
(экситонная
молекула)*



*трион
(экситонный
ион)*

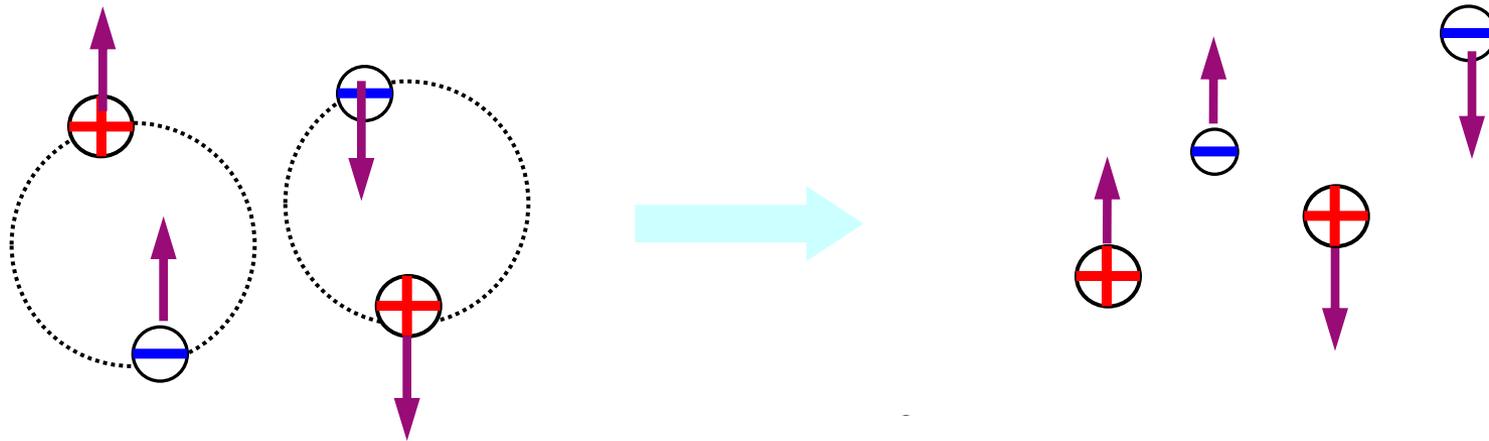


*связанный
экситон
(на доноре)*

Кулоновское взаимодействие между фотовозбужденными электронами и дырками может приводить к возникновению не только изолированных свободных экситонов, но и их комплексов,

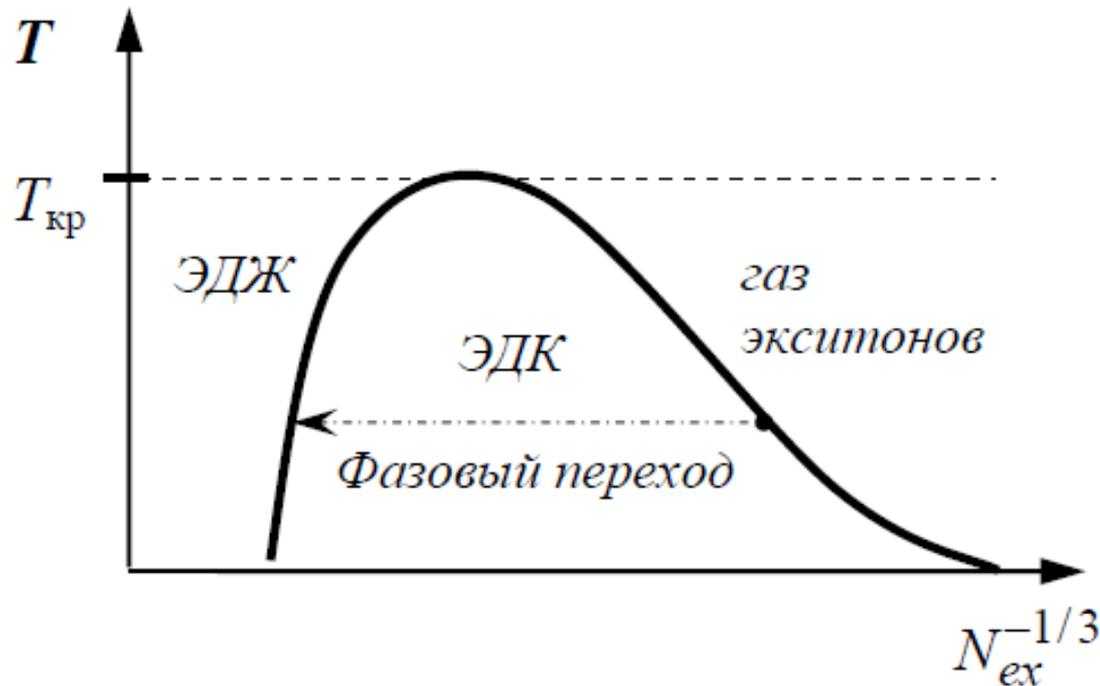
Энергия связи биэкситона обычно меньше или порядка $E_{ex}/2$, тогда как энергия связи связанного экситона может намного превышать E_{ex} .

Кулоновское экранирование и бозе-эйнштейновская конденсация в системе экситонов



Если $N_{ex} \geq r_{ex}^3$, что с учетом $r_{ex} \sim 10$ нм соответствует $N_{ex} \geq 10^{18}$ см⁻³, то происходит экранирование электрического поля в каждом экситоне окружающими экситонами. В результате возникает *неидеальный газ экситонов*. Рассматривая коллективные эффекты в неидеальном газе экситонов, следует принять во внимание, что изначально каждый экситон представляет собой связанное состояние 2-х фермионов (электрона и дырки) и поэтому может быть рассмотрен как бозе-частица. Поэтому принцип запрета Паули не применим, и при увеличении N_{ex} , в принципе, возможна *бозе-эйнштейновская конденсация* в газе экситонов.

Фазовый переход в системе экситонов

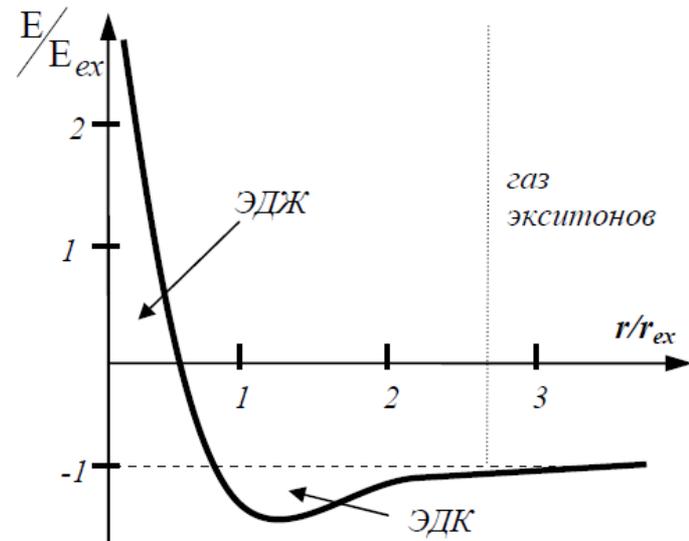


С ростом концентрации экситонов возрастает роль эффектов диэлектрического экранирования кулоновского взаимодействия в экситоне. В результате при достаточно большой N_{ex} возможно разрушение связанного состояния электрона и дырки и образование электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ), частицы в которой подчиняются статистике Ферми-Дирака. Переход от бозе-газа экситонов к фермиевской ЭДЖ – фазовый переход Мотта.

Коллективные образования в системе экситонов: Электронно-дырочные капли и жидкость

В диапазоне N_{ex} , промежуточном между бозе-газом экситонов и ЭДЖ, возможно появление особого вида коллективных нефермиевских возбуждений – *электронно-дырочных капель* (ЭДК), которые были предсказаны Л.В.Келдышем в 70-х годах 20-го века. Возможность образования ЭДК может быть понята из рассмотрения зависимости полной энергии системы экситонов, нормированной на N_{ex} и E_{ex} , от среднего расстояния между экситонами, т.е. $N_{ex}^{-1/3}$, выраженного в единицах r_{ex} , а

$$E = E_{ферм} + E_{обм} + E_{коррел} \approx -\frac{B}{r} + \frac{A}{r^2} - C$$



Итоги Лекции 5:

- При поглощения света в полупроводниках вблизи запрещенной зоны возможно появление экситонов, которые являются нейтральными квазичастицами с энергией связи, зависящей от диэлектрической проницаемости среды.
- При увеличении концентрации экситонов возникают экситонные молекулы и другие комплексы.
- При больших концентрациях экситонов происходит образование ЭДК и ЭДЖ.
- Переход от газа экситонов к ЭДЖ является фазовым переходом Мотта.