

Семинар №6. Экситоны

1. Экситоны большого и малого радиуса
2. Экситонные поляритоны
3. Бозе-конденсация экситонных поляритонов
4. Резонансное комбинационное рассеяние света

Экситон = электрон + дырка

Связанное состояние (квазичастица), возникает благодаря кулоновскому взаимодействию в полупроводниках.

Концентрации свободных носителей в невырожденных п/п малы! $n \sim 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$
(в противном случае - экранировка, экситон не образуется)

В зависимости от радиуса локализации подразделяются на два типа:

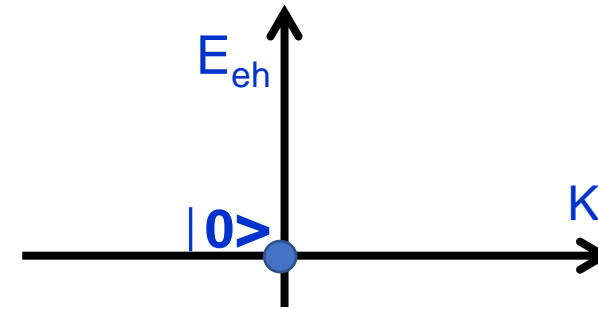
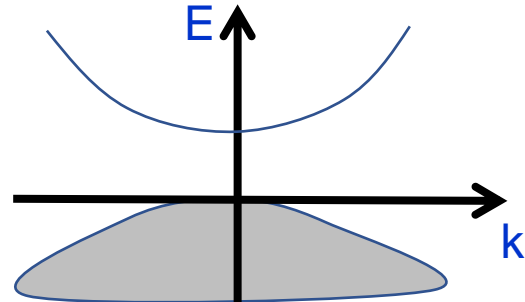


Экситон – 2х-частичное состояние! Его энергетические уровни не могут описываться в одноэлектронном приближении! Как их изобразить?

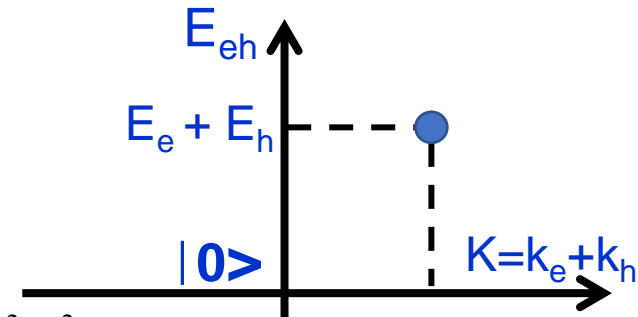
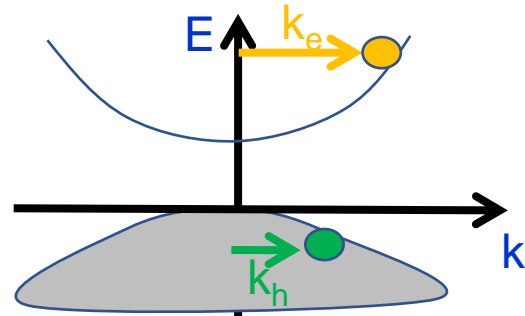
Одноэлектронная схема

Двух частичная схема

Основное состояние

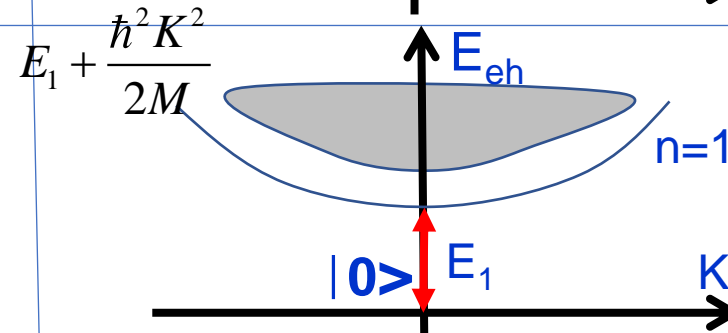


Возбужденное состояние

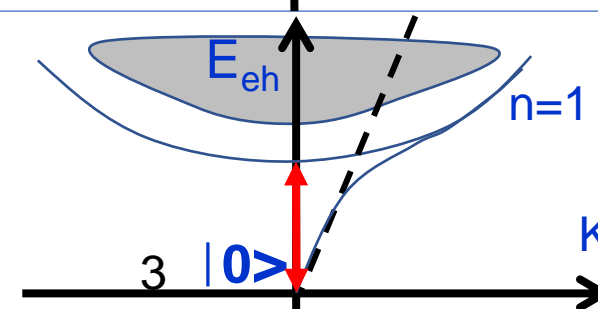
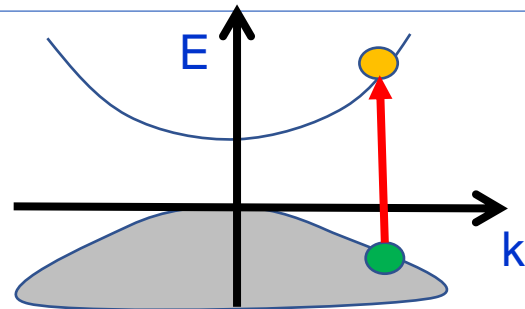


Коррелированное состояние

???



Оптическое поглощение с образованием поляритона



Экситоны Френкеля

Энергия внутримолекулярного взаимодействия больше межмолекулярного (органические проводники, ионные кристаллы и т.д.). Образуются при переходах одного из связанных электронов (с внутренних оболочек) на более высокие энергетические уровни. В кристаллах с ковалентным типом связи (Si,Ge) при переходах в пределах одной связи из s в p состояния.

Т.е. образуется связанное состояние внутри одного атома или молекулы. Электроны и дырки – не квазичастицы (не могут перемещаться по отдельности).

Поле диполя e-h может поляризовать соседний атом. Возбуждение передвигается прыжками (hopping)!

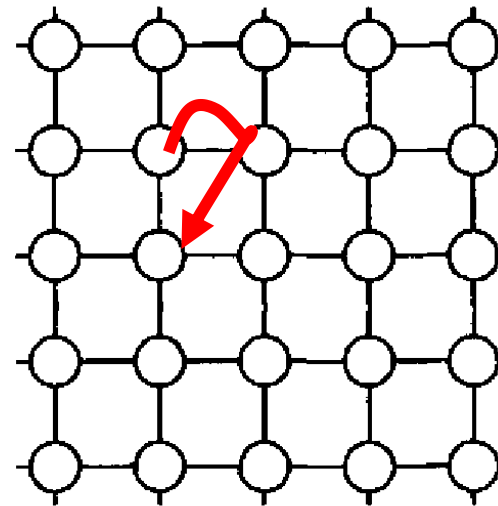
$$V_{ij} \propto \langle \psi_{Ri}(r_e, r_h) | \hat{U} | \psi_{Rj}(r_e, r_h) \rangle \quad i \neq j$$

$$U \propto p \cos(\theta) / r^3$$

p – дип. момент

Ri – коорд. атома

r_e, r_h – коорд. электрона и дырки



Экситоны Френкеля

$$\varepsilon_n = -\frac{\mu e^4}{2\varepsilon\hbar n^2} \propto 1/n^2$$

уровни энергии подобны уровням в атоме водорода

μ – приведенная масса пары

ε – диэлектрическая проницаемость

радиус возбуждения

$$a_{ex} = \frac{\varepsilon\hbar^2}{\mu e^2} < a$$

узкие зоны, большие массы, малые радиусы!

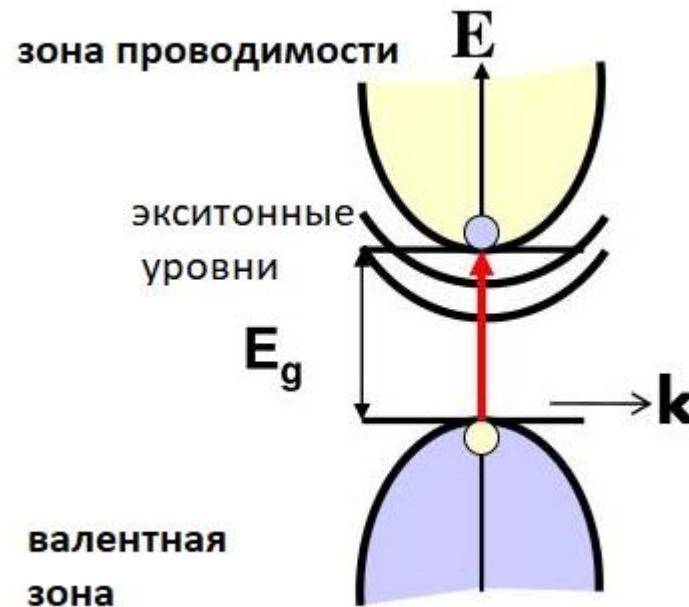
Экситоны Ванье-Мотта

Образуются вследствие кулоновского взаимодействия между электронами и дырками, являющимися квазичастицами. Энергетический спектр формируется не только кулоновским полем электронно-дырочного взаимодействия, но и средним кулоновским полем решетки. Экситон большого радиуса перемещается по ЗОНЕ (не хоппинг!) $a_{ex} \gg a$

$$E_n = \varepsilon_n + E_g + \frac{p_{ex}^2}{2m_{ex}}$$

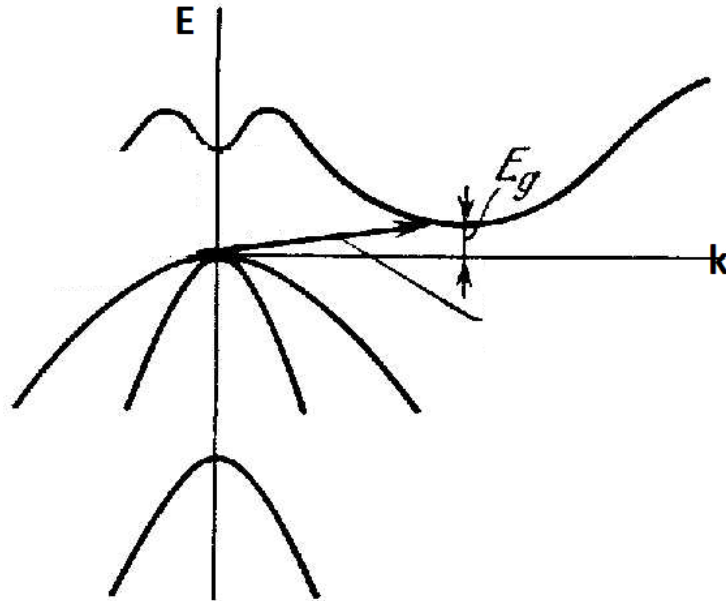
$$p_{ex} = \hbar K_{ex}$$

$$\varepsilon_n \propto 1/n^2$$

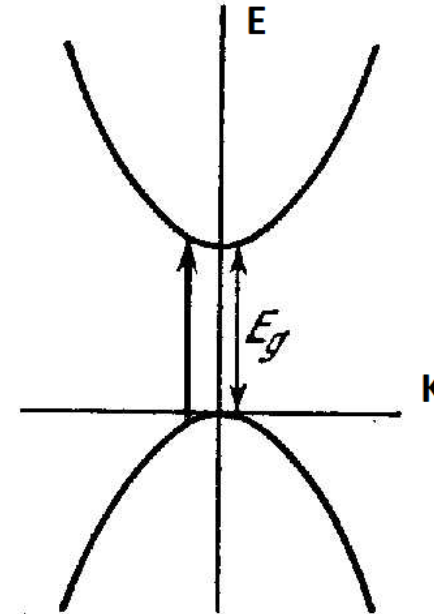


Экситоны Ванье-Мотта

Непрямые
(Si, Ge, ZnS)



Прямые
(GaAs)



Разница – в рекомбинации. Для непрямых экситонов рекомбинация идет с возбуждением фононов. Вероятность таких процессов на 1-3 порядка ниже чисто оптических => равновесная концентрация непрямых экситонов на несколько порядков превышает равновесную концентрацию экситонов

Энергетический спектр
(прямые экситоны большого радиуса)

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \Delta_e \Psi - \frac{\hbar^2}{2m_h} \Delta_h \Psi - \frac{e^2}{\varepsilon|r|} \Psi + E_g \Psi = E_n \Psi$$

$$r = r_e - r_h, \quad M = m_e + m_h,$$

$$\mu = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h}, \quad R = \frac{r_e m_e + r_h m_h}{m_e + m_h} - \text{коорд. центра инерции}$$

$$-\frac{\hbar^2}{2M} \Delta_R \Psi - \frac{\hbar^2}{2\mu} \Delta_r \Psi - \frac{e^2}{\varepsilon|r|} \Psi = (E_n - E_g) \Psi$$

отн. коорд. R – движ. своб. частицы $\Rightarrow \exp \frac{ip_{ex} R}{\hbar}$

отн. коорд. $r \Rightarrow \beta(r)$

$$\Psi(r, R) = \beta(r) \exp \frac{ip_{ex} R}{\hbar}$$

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu} \Delta_r \beta - \frac{e^2}{\varepsilon|r|} \beta = \left(E_n - E_g - \frac{p_{ex}^2}{2M} \right) \beta$$

$$\varepsilon_n = E_n - E_g - \frac{p_{ex}^2}{2M}$$

$\beta(r)$ опис. относит. движ. e и h

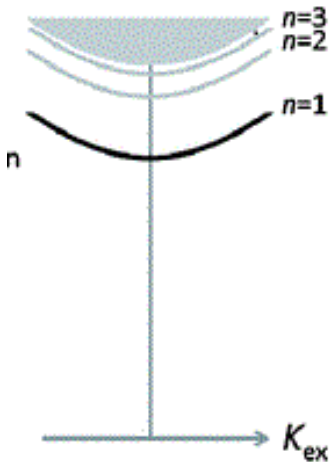
множ. $\exp \frac{ip_{ex}R}{\hbar}$ опис. движ. экситона с квазиимпульсом p_{ex}

$$\beta(r) \propto R_{nl}(r) Y_{lm}(\theta), \quad \varepsilon_n = -\frac{\mu e^4}{2\varepsilon^2 \hbar^2 n^2}$$

$$\text{при } p_{ex} = 0 \quad \beta(r) \propto \frac{\exp(-r/a_{ex})}{\sqrt{\pi a_{ex}^3}}$$

$$E_n = E_g + \frac{p_{ex}^2}{2M} - \frac{\mu e^4}{2\epsilon^2 \hbar^2 n^2}$$

$n = 1, 2, \dots$



оценим энергию связи

$$\epsilon_{связи} = \frac{5 \cdot 10^{-28} \cdot 10^2 \cdot 10^{-40}}{2 \cdot 10^2 \cdot 10^{-54}} = 10^{-14} \approx 10^{-2} \text{ эВ} \approx kT, \quad a_{ex} \approx 10 \text{ нм}$$

\Rightarrow надо охладить!

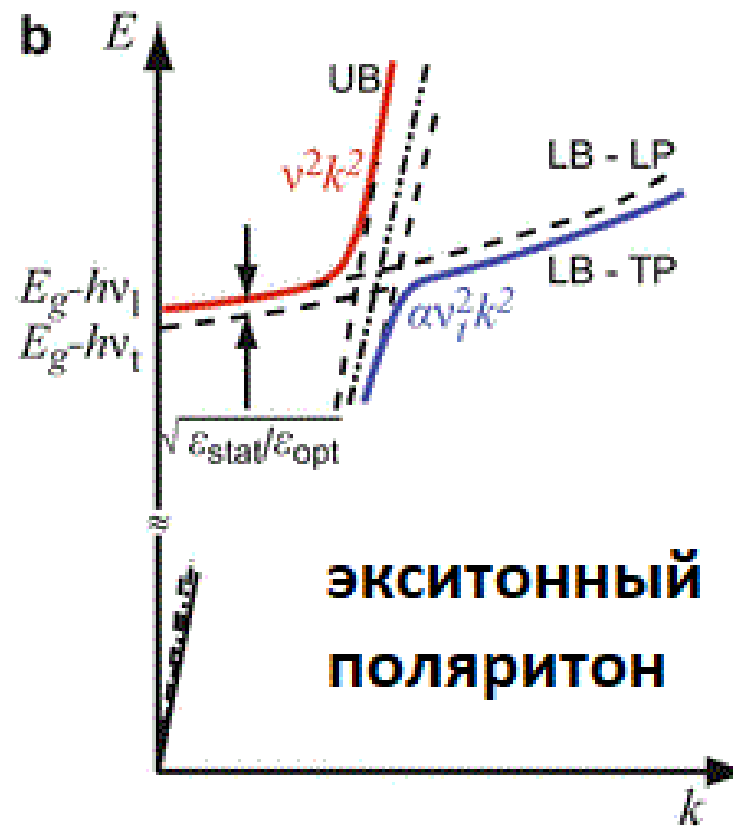
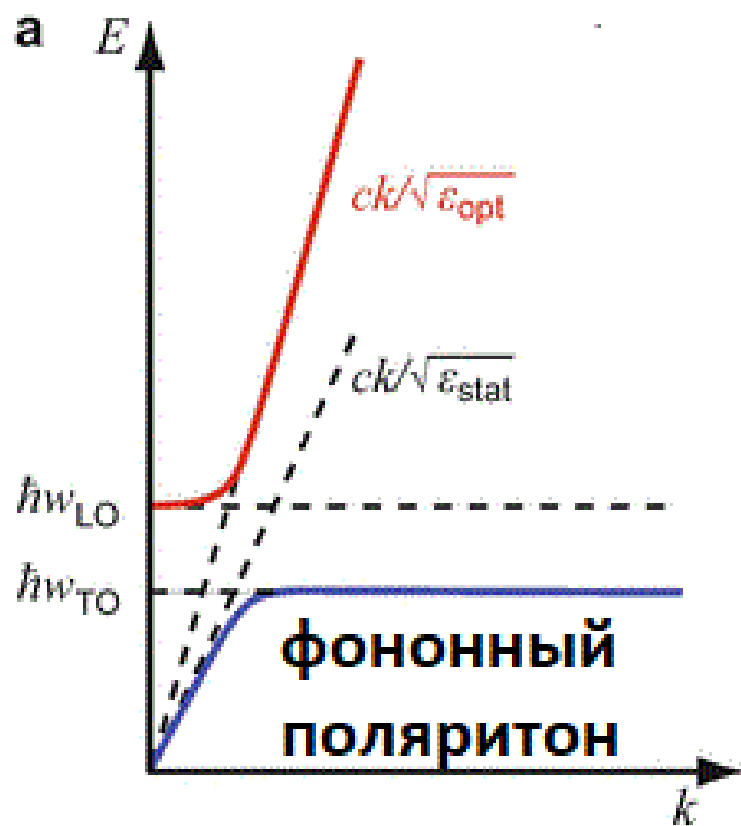
Как увеличить энергию связи экситона и перейти к комнатным температурам?

1. Низкоразмерные полупроводниковые структуры
2. Гетероструктуры полупроводник-диэлектрик

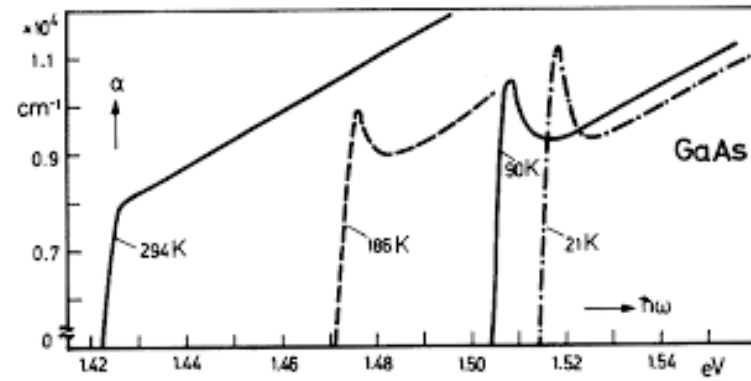
$$\epsilon_n^{3D} = -\frac{B}{n^2}$$

$$\epsilon_n^{2D} = -\frac{B}{\left(n - \frac{1}{2}\right)^2} \Rightarrow \epsilon_1^{2D} = 4\epsilon_2^{3D}$$

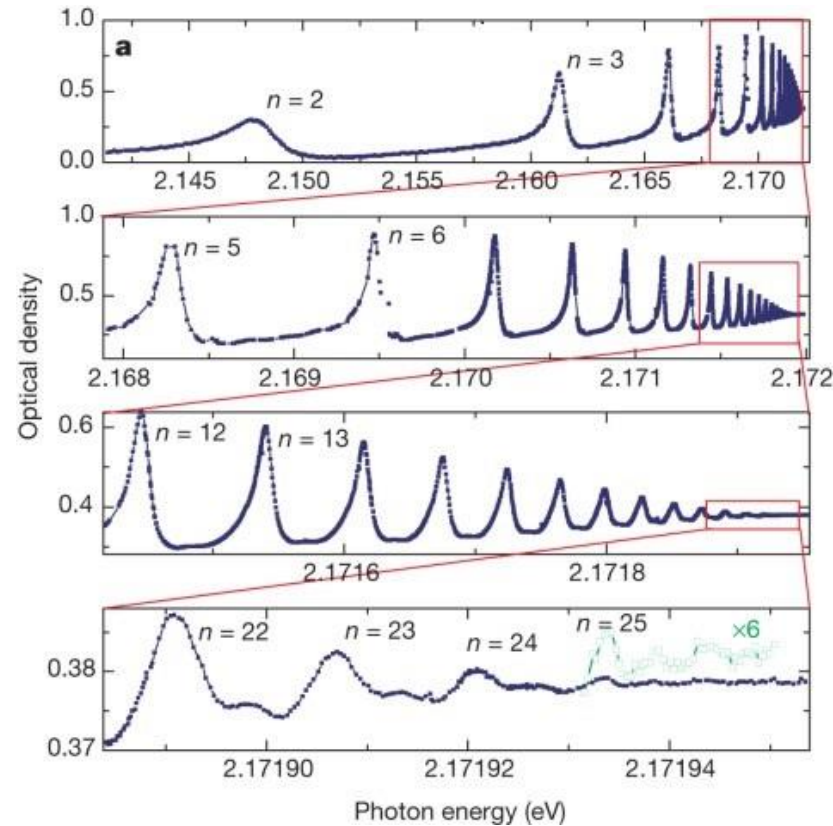
Экситонные поляритоны



Экситонное поглощение



GaAs



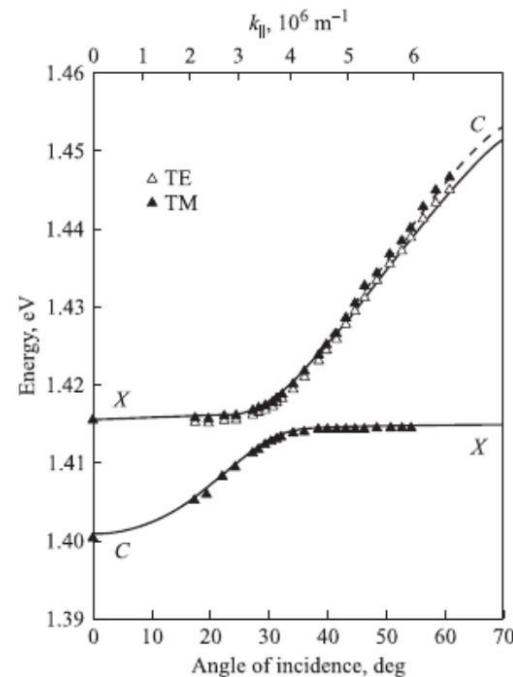
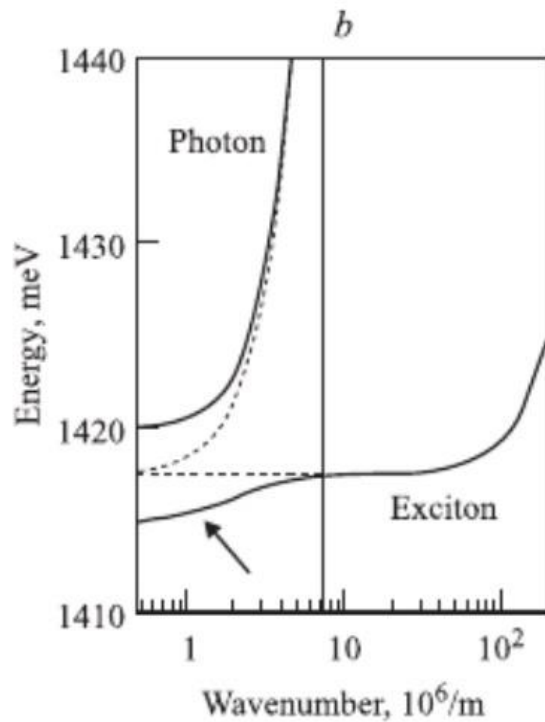
Cu_2O

Бозе-конденсация экситонов в микрорезонаторах

Бозе-конденсация при $T < T_{кр}$ длина волны де-Бройля превышает межчастичное расстояние, происходит заполнение низшего состояния с $p=0$

Бозе-конденсация в квазидвумерных п/п гетероструктурах, помещенных в микрорезонатор
Гетероструктура - с КЯ, это нужно для создания режима разреженного экситонного газа $na_{ex}^2 \ll 1$ (n – поверхностная плотность экситонов)

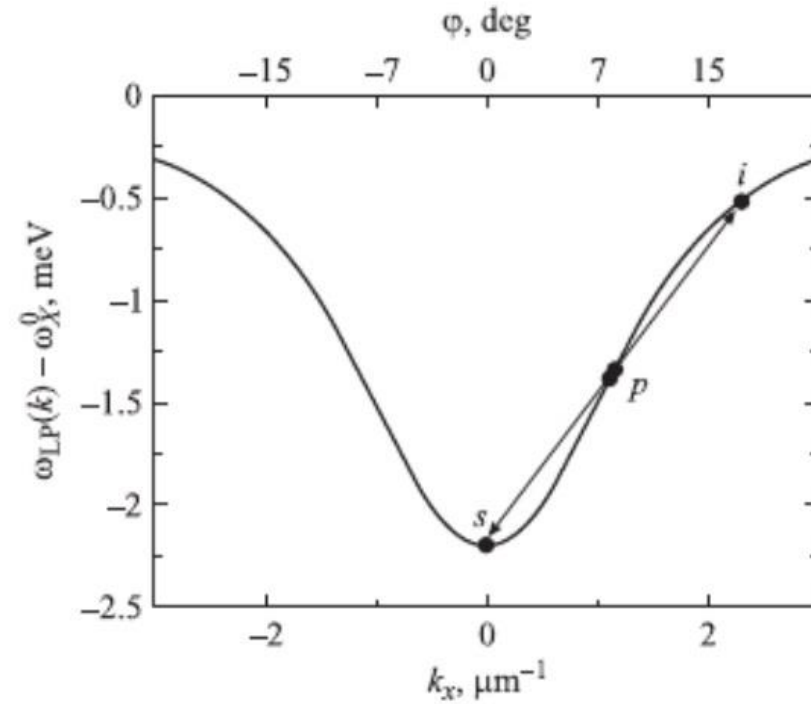
$$\lambda_{dBr} = \sqrt{\frac{h^2}{mkT}} \geq \frac{1}{\sqrt{n}} \Rightarrow T_{кр} = \frac{nh^2}{mk} \quad (10 - 100K!)$$



Расщепление уровней пропорционально частоте Раби:

$$\Omega_R = \frac{\langle d \rangle E_0}{\hbar}$$

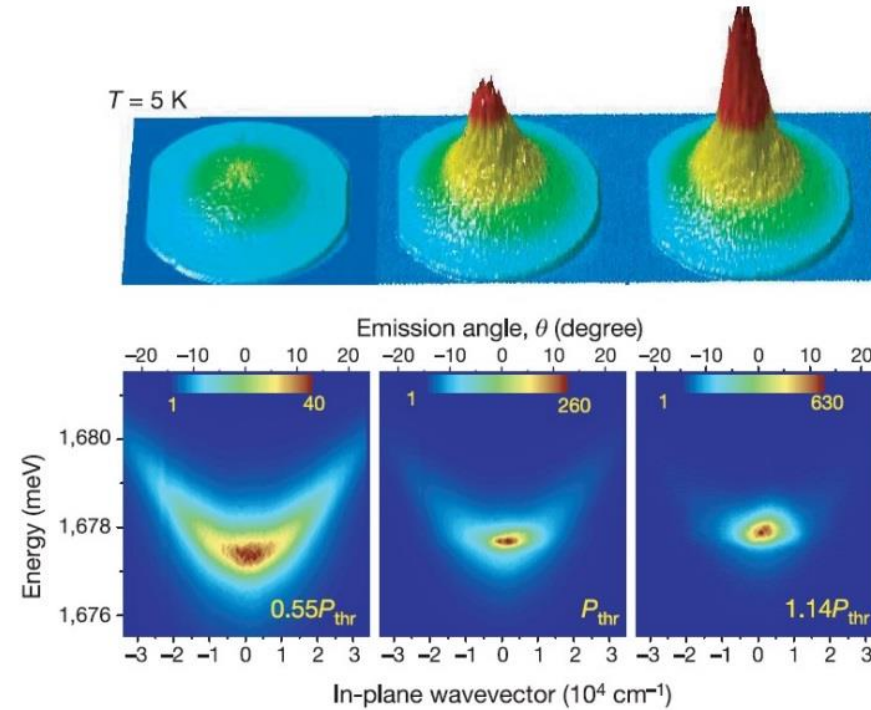
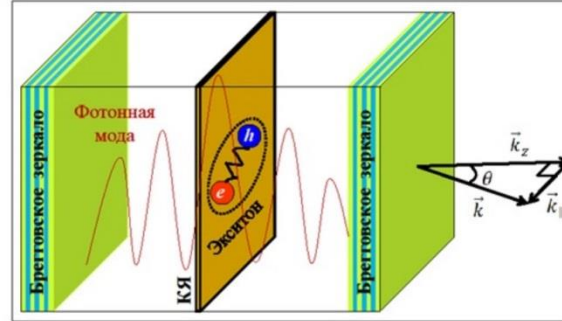
Оптическое параметрическое рассеяние (ОКР)



$$2k_p = k_s + k_i, \quad 2\omega_p = \omega_s + \omega_i$$

$$2\omega_{LP}(k_p) = \omega_{LP}(k_s) + \omega_{LP}(2k_p - k_s)$$

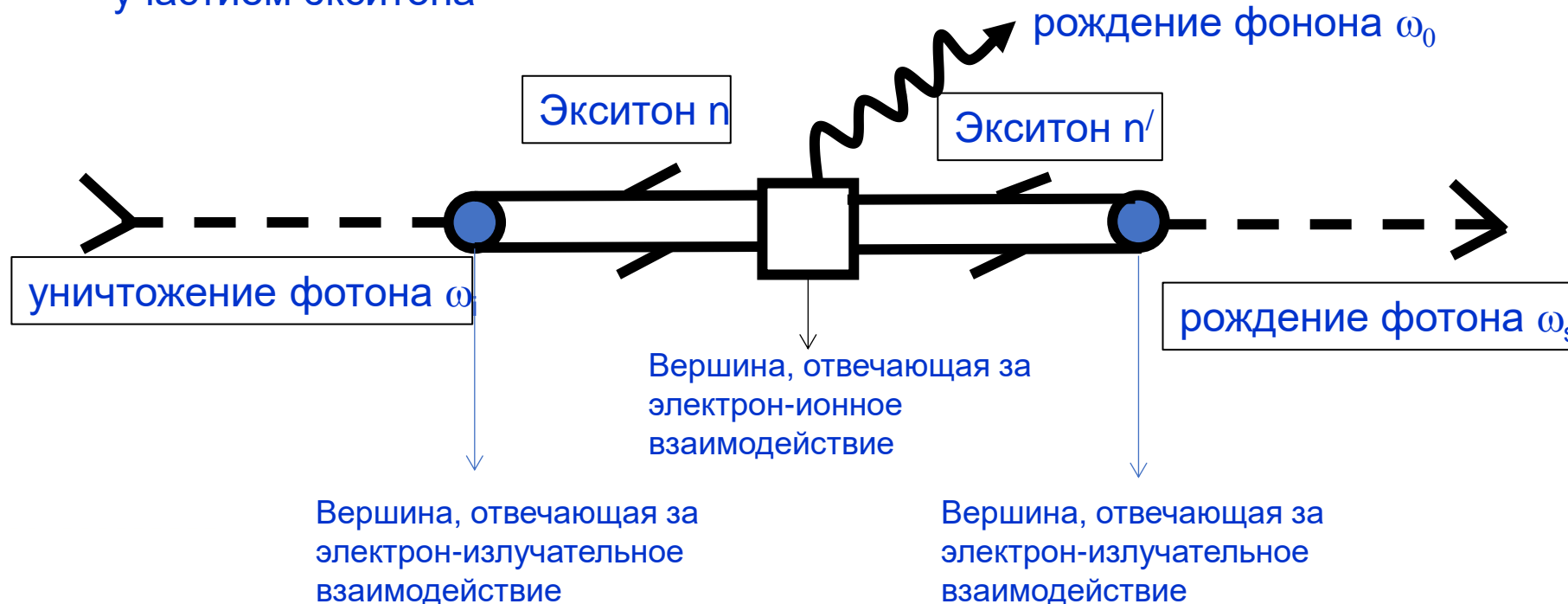
Бозе-конденсация экситонов в микрорезонаторах



Излучение поляритонной моды в зависимости от плотности фотовозбуждения. При повышении плотности фотовозбуждения и увеличении числа поляритонов в системе пороговым образом образуется макрозанполненное состояние.

Резонансное рассеяние (КР и РМБ)

1. Если частота накачки попадает в резонанс с частотой квазичастицы, то наблюдается усиление эффекта КР или РМБ на порядки.
2. Общий подход строится на микроскопической теории, использующей технику диаграмм Фейнмана
3. Учитываются процессы, вносящие вклад в однофононное рассеяние с участием экситона



Первая вершина дает член вида
в вероятность рассеяния

$$\sum_n \frac{\langle n | H_{eR}(\omega_i) | i \rangle}{[+\hbar\omega_i - (E_n - E_i)]}$$

Вторая вершина дает
множитель:

$$\sum_n \frac{\langle n' | H_{e-ion}(\omega_0) | n \rangle \langle n | H_{eR}(\omega_i) | i \rangle}{[\hbar\omega_i - (E_n - E_i) - \hbar\omega_0 - (E_{n'} - E_n)][\hbar\omega_i - (E_n - E_i)]}$$

Третья вершина дает
множитель:

$$\sum_n \frac{\langle i | H_{eR}(\omega_i) | n' \rangle}{[\hbar\omega_i - (E_n - E_i) - \hbar\omega_0 - (E_{n'} - E_n) - \hbar\omega_s - (E_i - E_{n'})]} =$$

$$\sum_n \frac{\langle i | H_{eR}(\omega_i) | n' \rangle}{[\hbar\omega_i - \hbar\omega_0 - \hbar\omega_s]} = \delta(\hbar\omega_i - \hbar\omega_0 - \hbar\omega_s), \text{ м.к. } \hbar\omega_i - \hbar\omega_0 - \hbar\omega_s = 0$$

Вероятность рассеяния можно найти с помощью ЗПФ:

$$P = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle f | H | i \rangle|^2 \rho$$

$$P \propto \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{n,n'} \left| \frac{\langle i | H_{eR}(\omega_i) | n' \rangle \langle n' | H_{e-ion}(\omega_0) | n \rangle \langle n | H_{eR}(\omega_i) | i \rangle}{[\hbar\omega_i - (E_n - E_i) - \hbar\omega_0 - (E_{n'} - E_n)][\hbar\omega_i - (E_n - E_i)]} \right|^2 \delta(\hbar\omega_i - \hbar\omega_0 - \hbar\omega_s)$$

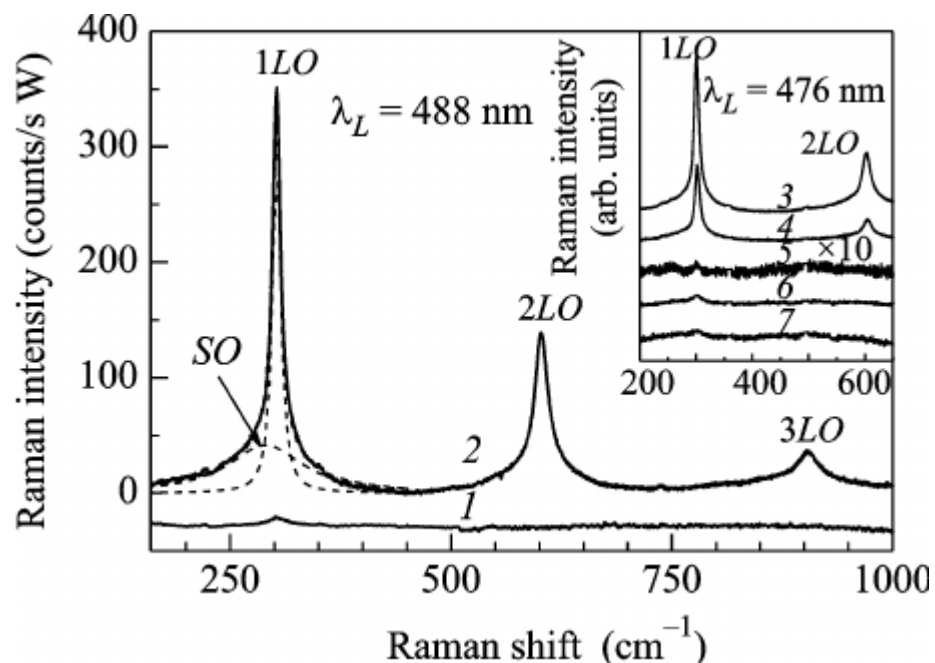
+ еще 5 диаграмм с другим порядком вершин и частиц...

$$\hbar\omega_i \rightarrow (E_n - E_i)$$

рост вероятности рассеяния на порядок!

В рассеянии видно:

- многофононные рамановские спектры
- запрещенные переходы
- рассеяние в наноструктурах



CdS

Спасибо за внимание!