

# Механизмы межзонной рекомбинации неравновесных носителей заряда в узкозонных квантовых ямах HgCdTe/CdHgTe

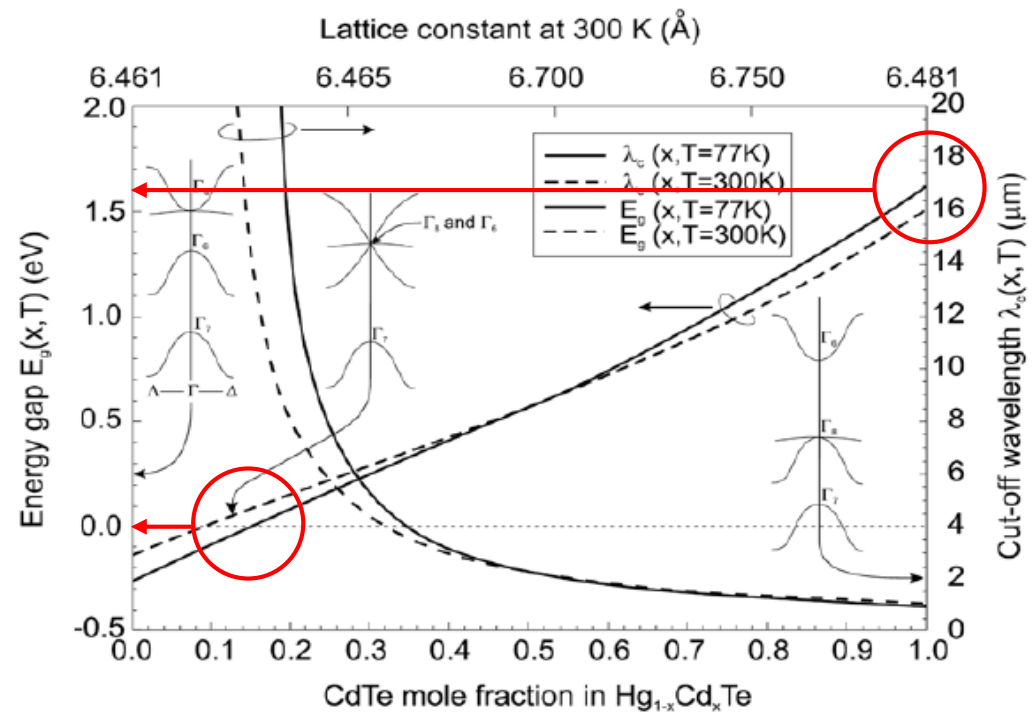
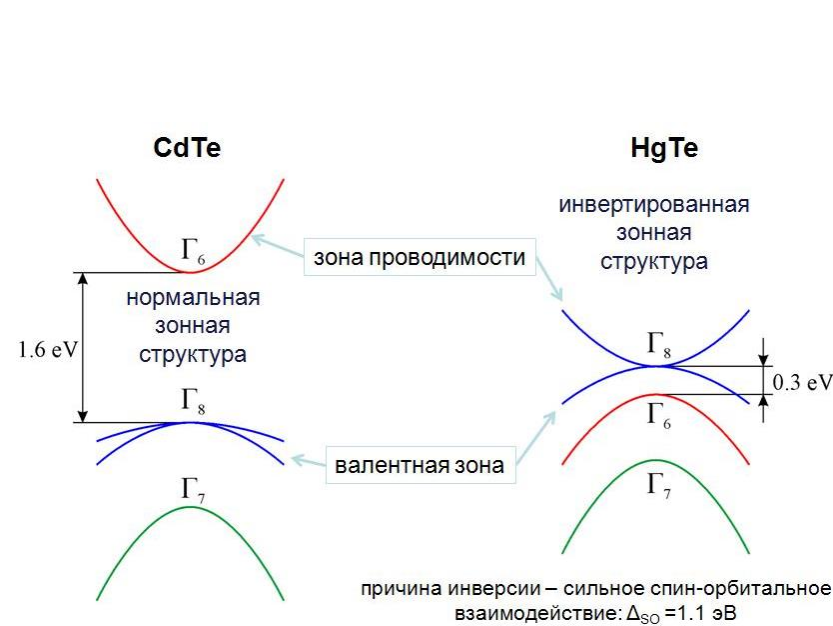
Семинар аспирантов и студентов

В.В. Уточкин (аспирант, 1 курс)

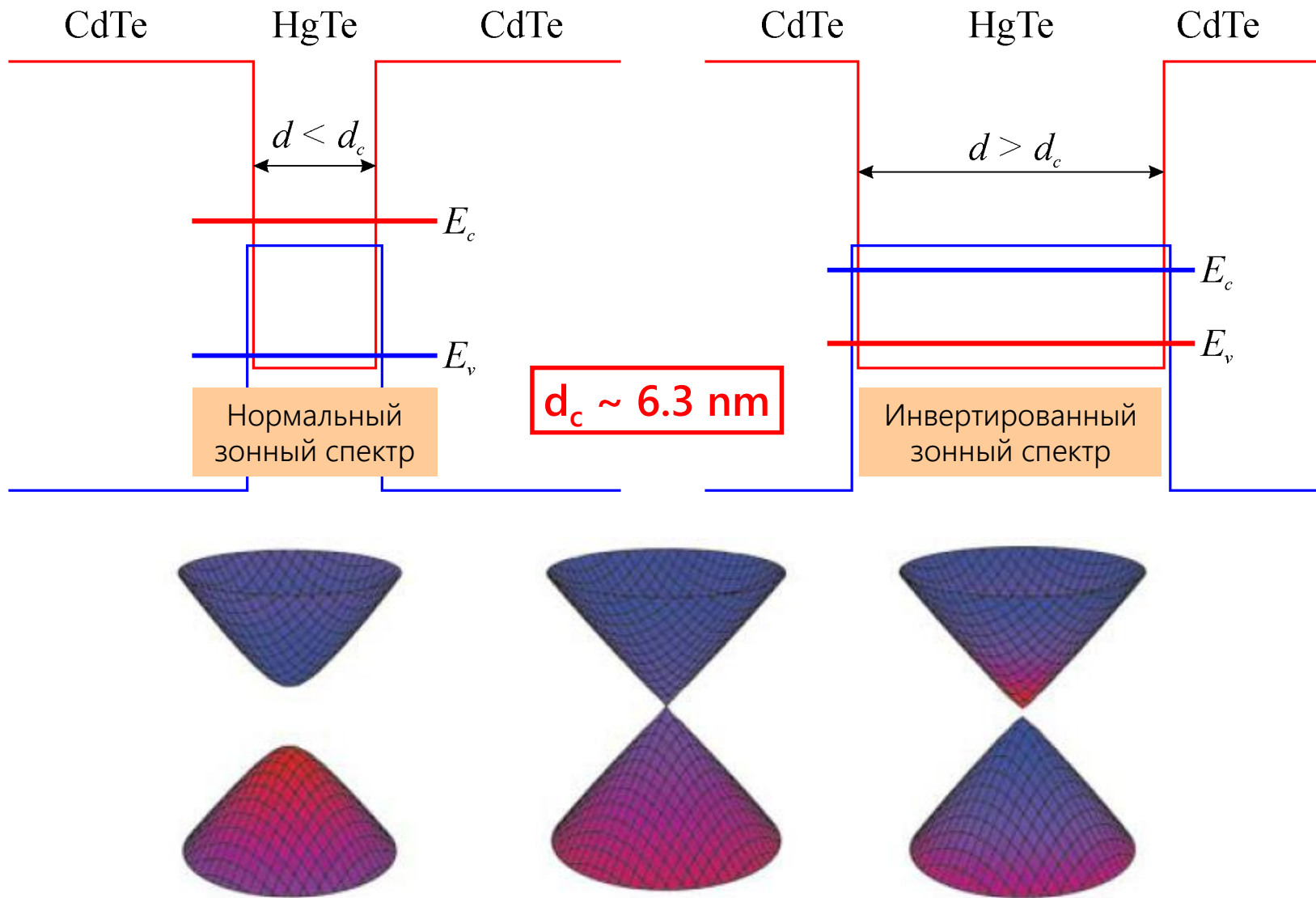
24 декабря 2020

# Введение: HgCdTe

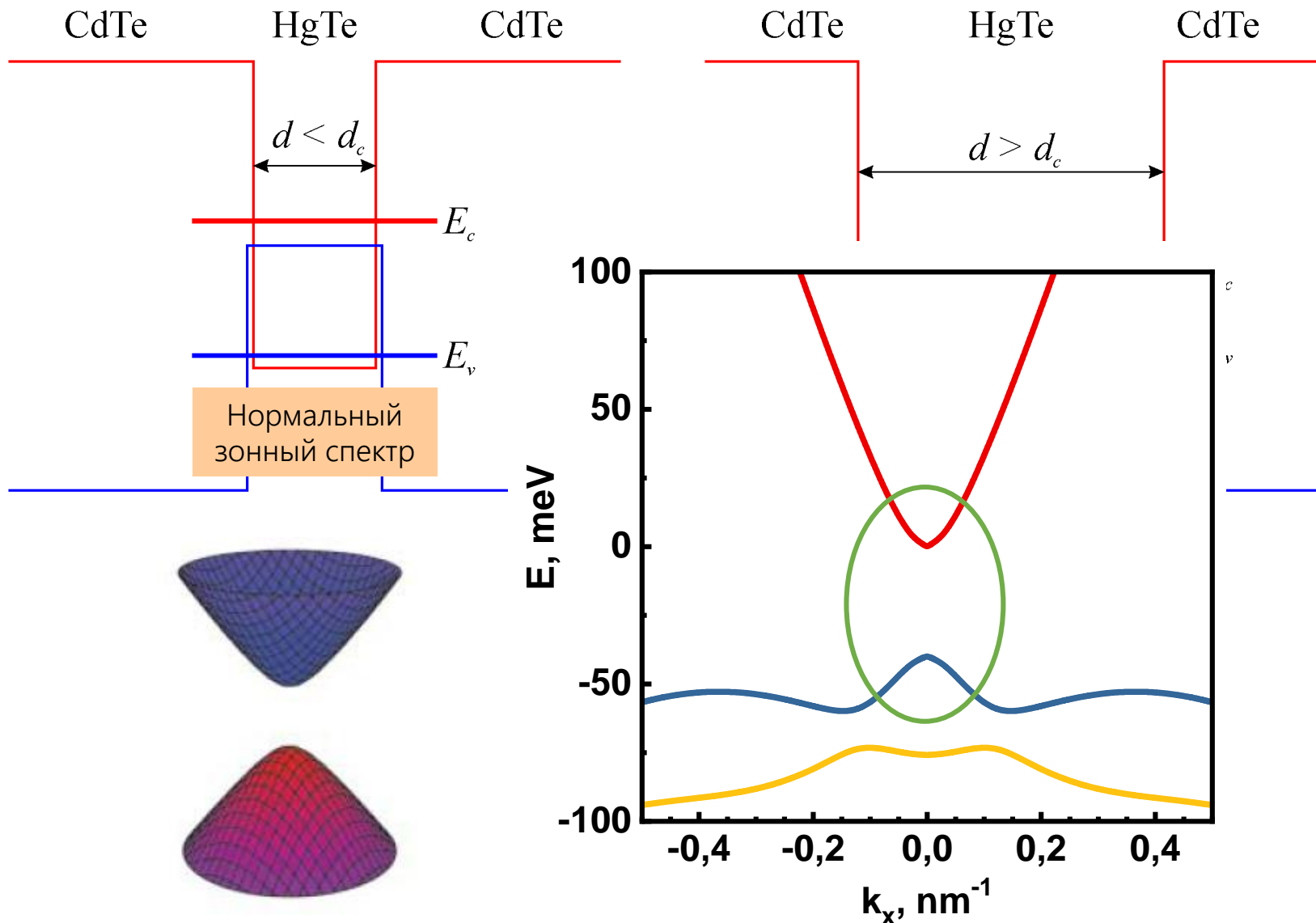
Варьируемая  $E_g$  в твёрдых р-рах  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  : от 1.6 эВ при  $x = 1$  до 0 эВ при  $x = 0.168$



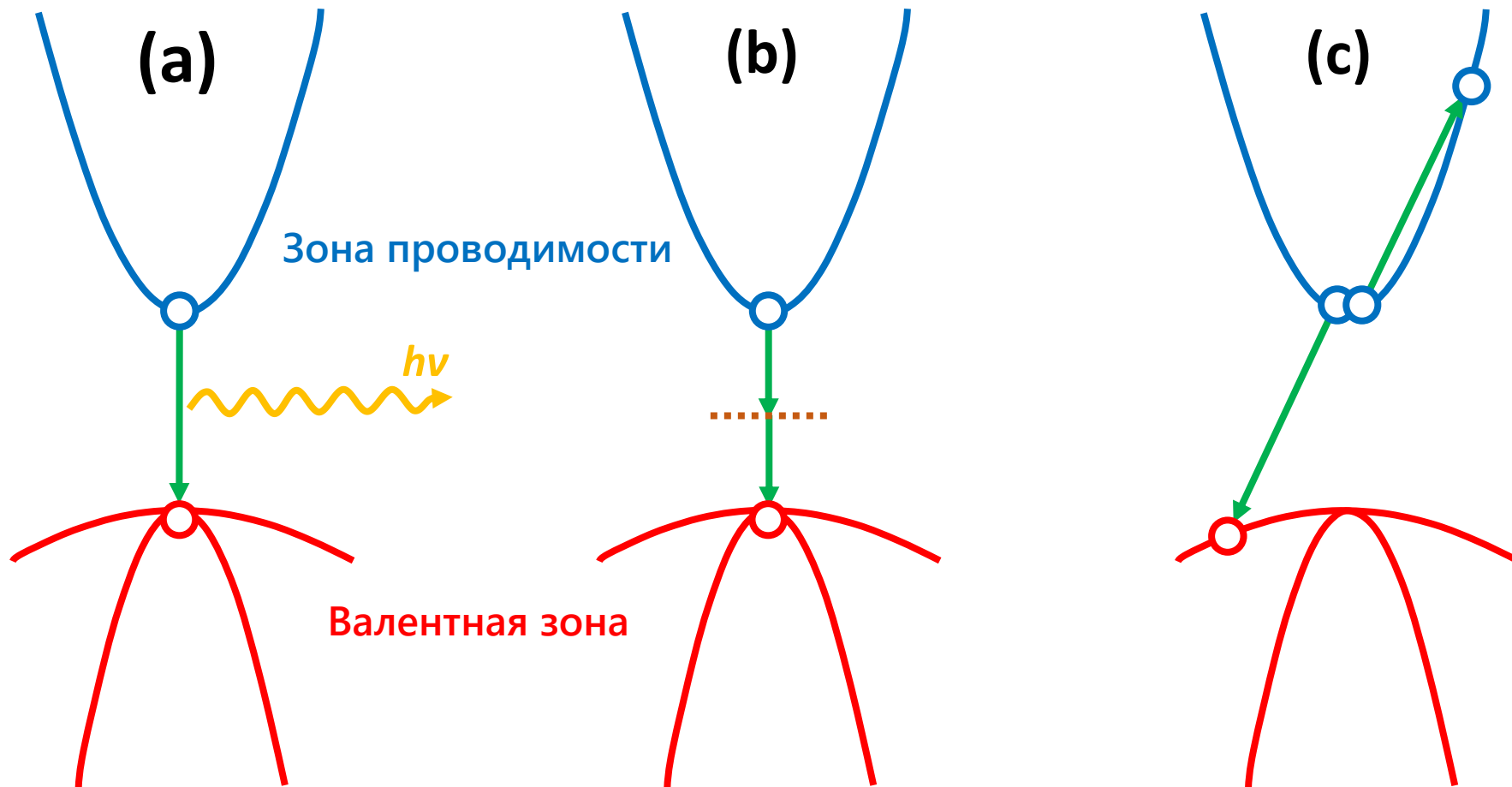
# Введение: КЯ HgCdTe



# Введение: КЯ HgCdTe

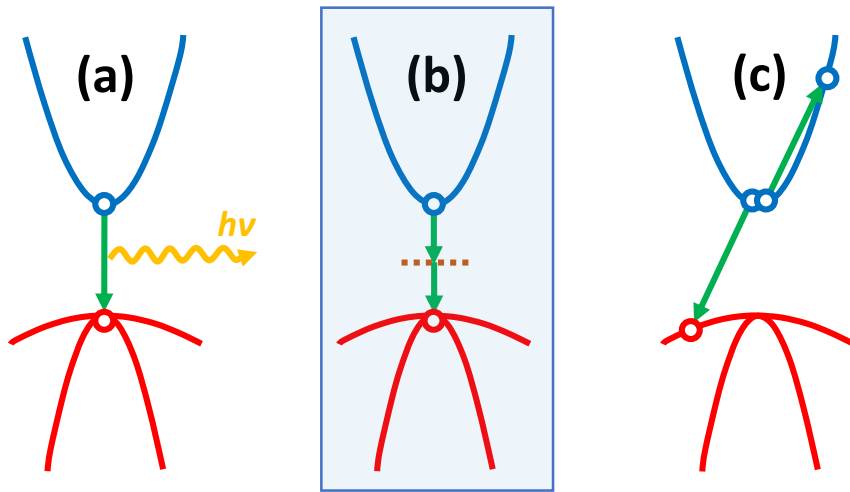


# Механизмы рекомбинации



- (a) излучательная рекомбинация
- (b) рекомбинация Шокли-Рида-Холла
- (c) оже-рекомбинация

# Рекомбинация Шокли-Рида-Холла



$$n_1 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{kT}\right)$$

$$p_1 = N_v \exp\left(-\frac{E_f - E_v}{kT}\right)$$

$$f(E_f) = \frac{n_0}{n_0 + n_1} = \frac{p_0}{p_0 + p_1}$$

приближение малой концентрации дефектов:

$$\tau_{SRH} = \tau_{n_0} \frac{p_0 + p_1 + \delta n}{n_0 + p_0 + \delta n} + \tau_{p_0} \frac{n_0 + n_1 + \delta p}{n_0 + p_0 + \delta p}$$

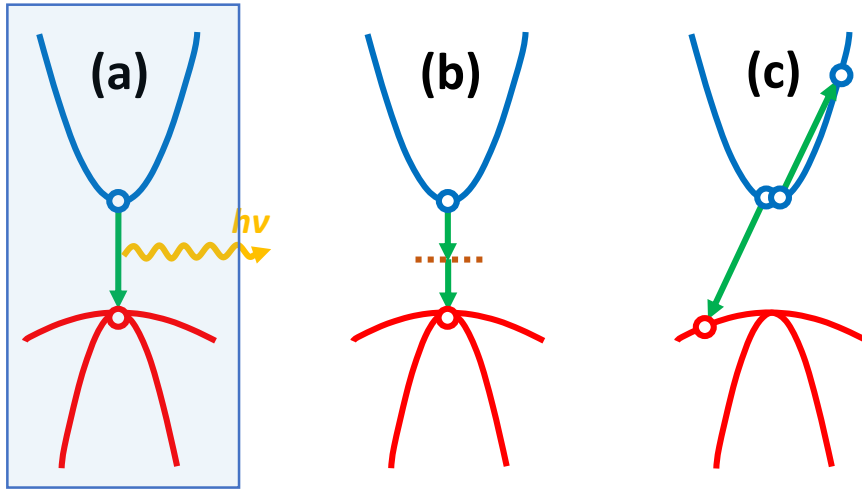
$$\tau_{n_0} = \frac{1}{c_n N_f} \quad \tau_{p_0} = \frac{1}{c_p N_f}$$

в условиях сильного возбуждения:

$$\tau_{SRH} = \tau_{n_0} + \tau_{p_0}$$

В исследуемых нами структурах канал рекомбинации ШРХ насыщается уже при умеренных интенсивностях накачки и не препятствует генерации СИ

# Излучательная рекомбинация

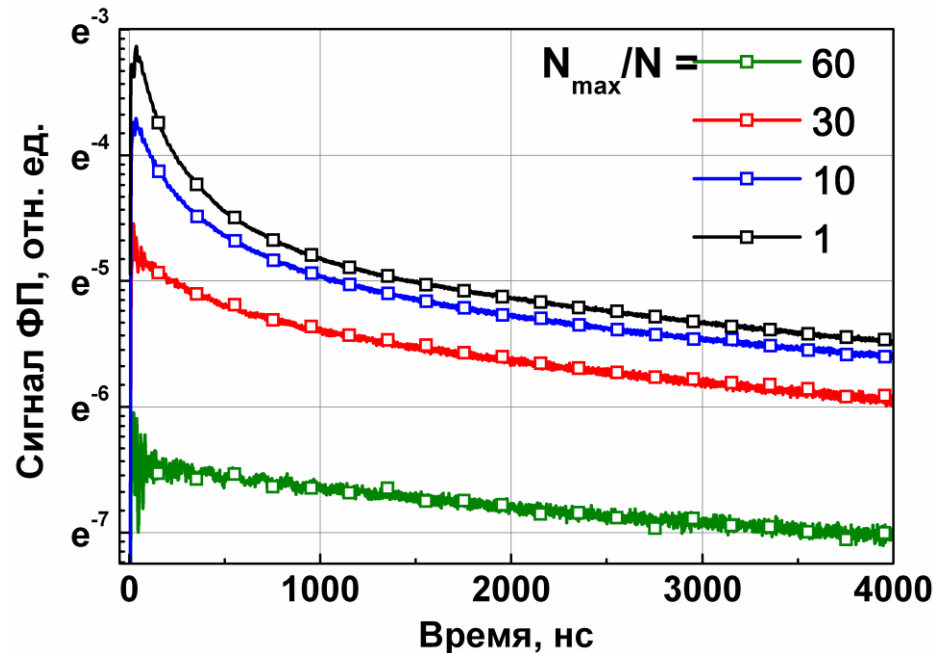


$$\frac{d\delta n}{dt} = G - R = G - B_r np$$

тепловое равновесие,  $n_0 p_0 = n_i^2$ :

$$R_0 = G_0 = B_r n_0 p_0 = B_r n_i^2$$

$$R_r = B_r np - G_0 = B_r (np - n_0 p_0) = B_r (np - n_i^2)$$

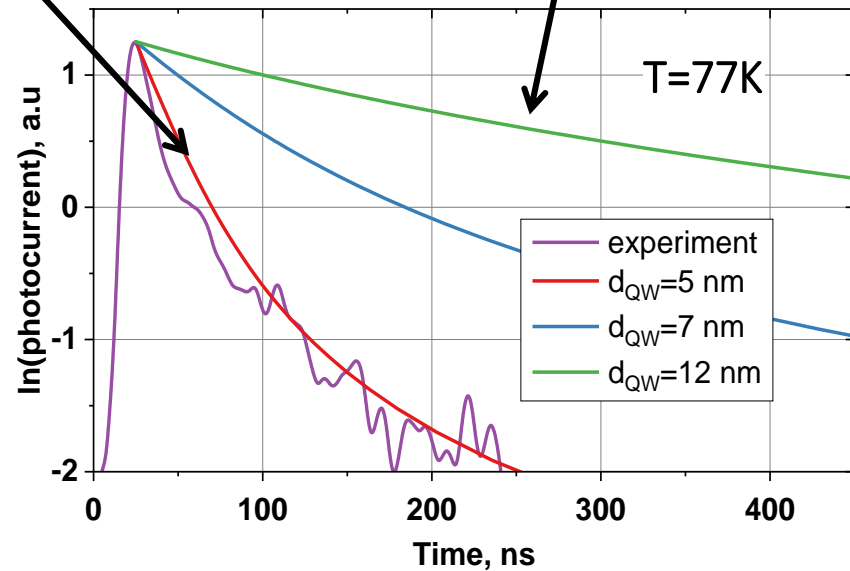
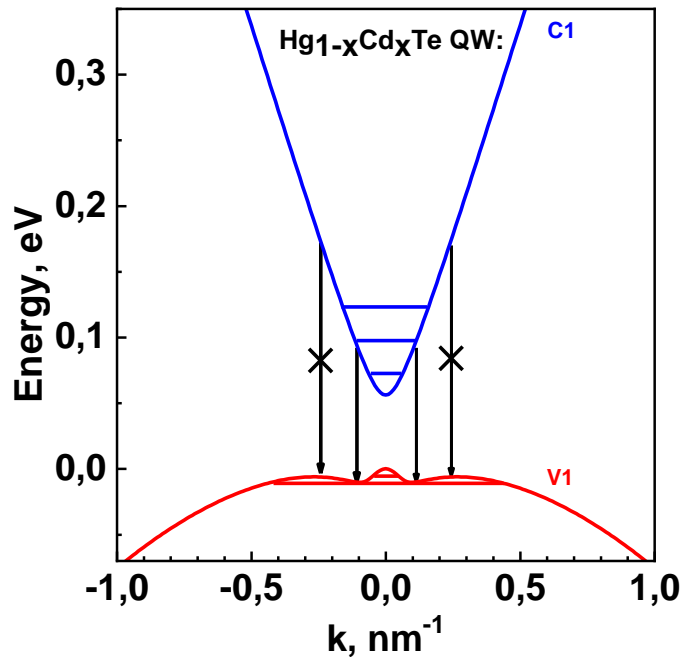
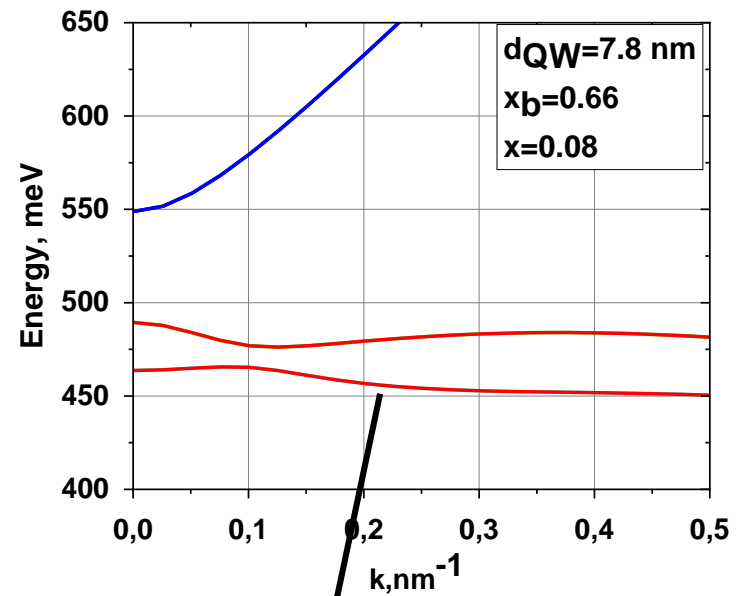
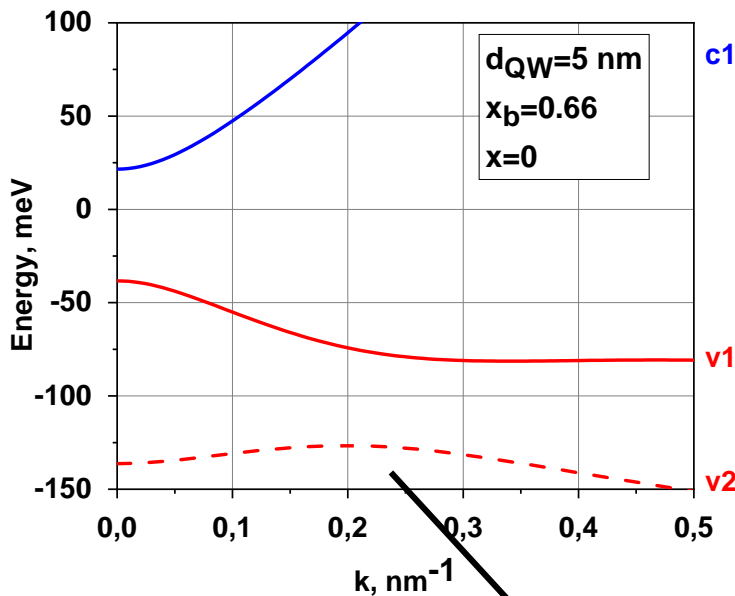


$$\tau_r = \frac{\delta n}{R_r} = \frac{1}{B_r (n_0 + p_0 + \delta n)}$$

$$-\frac{d\delta n}{dt} = \frac{B_r (n_0 + p_0 + \delta n) \delta n}{1} \quad \text{при } t \ll \tau_0$$

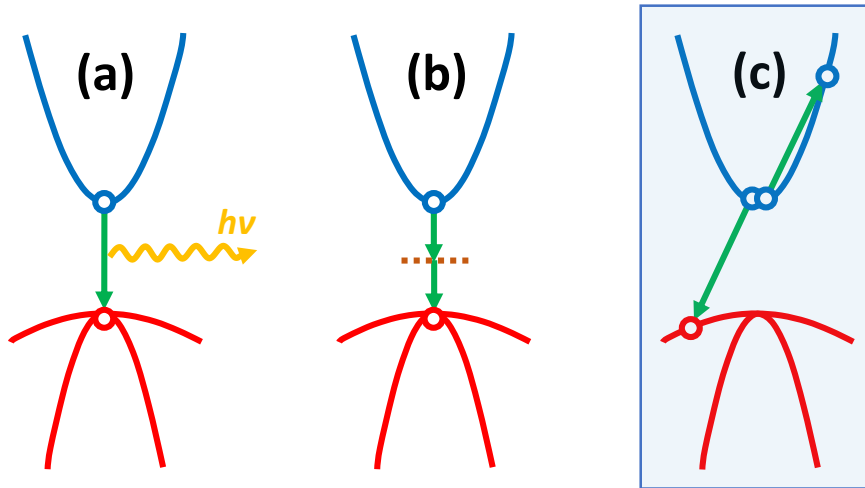
$$\delta n(t) = \frac{\delta n_0}{1 + t \left( \frac{\delta n}{(n_0 + p_0) \tau_0} \right)} \quad \tau_0 = \frac{1}{B_r (n_0 + p_0)}$$

# Излучательная рекомбинация





# Оже-рекомбинация



$$n = n_0 + \delta n, ; p = p_0 + \delta p;$$

$$\delta n = \delta p \text{ (оптическое возбуждение)}$$

слабое возбуждение:  $\delta n, \delta p \ll n_0$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - \frac{\delta n}{\tau} \quad \tau = \frac{1}{2(\gamma_n + \gamma_p)n_i^2}$$

п/п  $n$ -типа:  $n \approx n_0 \gg \delta p$   $\tau = \frac{1}{\gamma_n n^2}$

п/п  $p$ -типа:  $p \approx p_0 \gg \delta n$   $\tau = \frac{1}{\gamma_p p^2}$

$$R_n = \gamma_n n^2 p$$

$$R_p = \gamma_p p^2 n$$

$$\gamma_{n,p} = \gamma(T)$$

уравнение баланса:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G + (\beta_n n - \gamma_n n^2 p) + (\beta_p p - \gamma_p p^2 n)$$

при  $G = 0$  и тепловом равновесии:

$$\beta_n = \gamma_n n_i^2$$

$$\beta_p = \gamma_p n_i^2$$

сильное возбуждение:  $\delta n, \delta p \gg n_0$

$$\tau = \frac{1}{2(\gamma_n + \gamma_p)\delta n^2}$$

# Пороговая энергия оже-рекомбинации

(в случае параболических законов дисперсии)

**ЗСКИ и ЗСЭ:**

$$p_1 + p_2 + p_3 = p_4, \quad p_4 \sim \sqrt{2m_e E_g}$$

$$E_{kin} = \frac{p_1^2}{2m_e} + \frac{p_2^2}{2m_e} + \frac{p_3^2}{2m_{hh}}$$

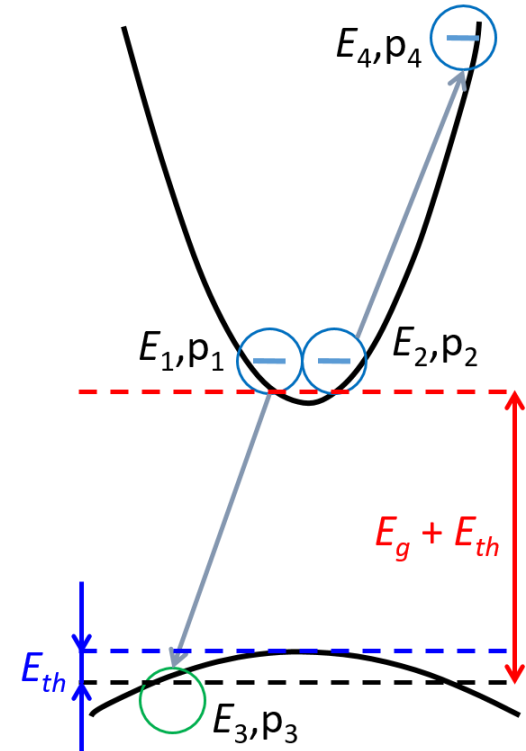
$$p_3 \gg p_1, p_2 \Rightarrow p_3 \sim p_4 \sim \sqrt{2m_e E_g}$$

$$E_{kin} \sim \frac{p_3^2}{2m_{hh}} = \frac{2m_e}{2m_{hh}} E_g = \frac{m_e}{m_{hh}} E_g = \mu E_g = E_{th}, \quad \mu \ll 1$$

Точные расчёты дают (В.Н. Абакумов, В.И. Перель, И.Н. Ясиевич «Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках»):

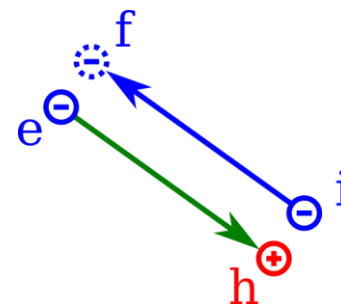
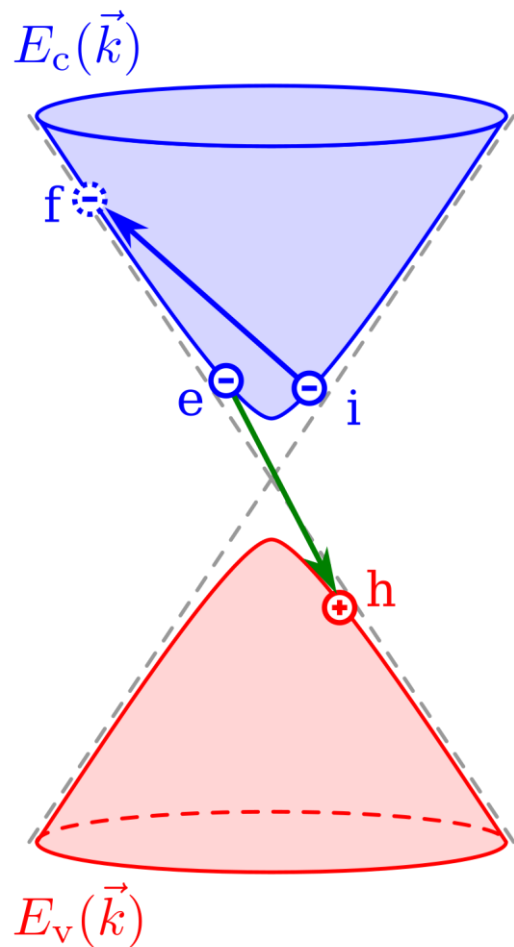
$$E_{th} = \frac{\mu}{1 + \mu} E_g, \quad \mu = \frac{m_e}{m_h}$$

$$R_{Auger} \propto \exp\left(-\frac{E_{th}}{T}\right)$$



# Пороговая энергия оже-рекомбинации

(в случае гиперболических законов дисперсии)

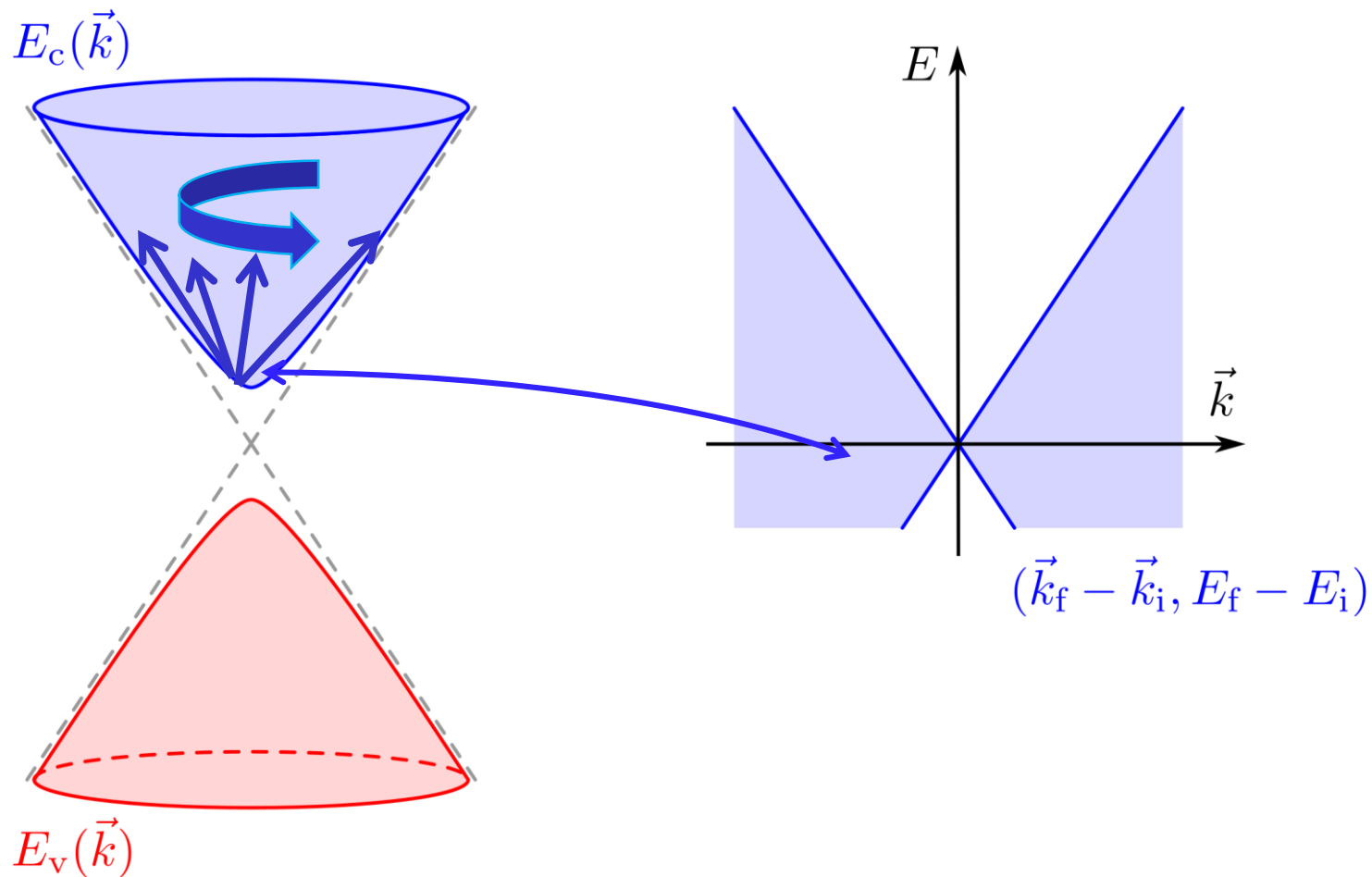


ЗСЭ и ЗСКИ:

$$\vec{k}_f - \vec{k}_i = -(\vec{k}_h - \vec{k}_e)$$
$$E_f - E_i = -(E_h - E_e)$$

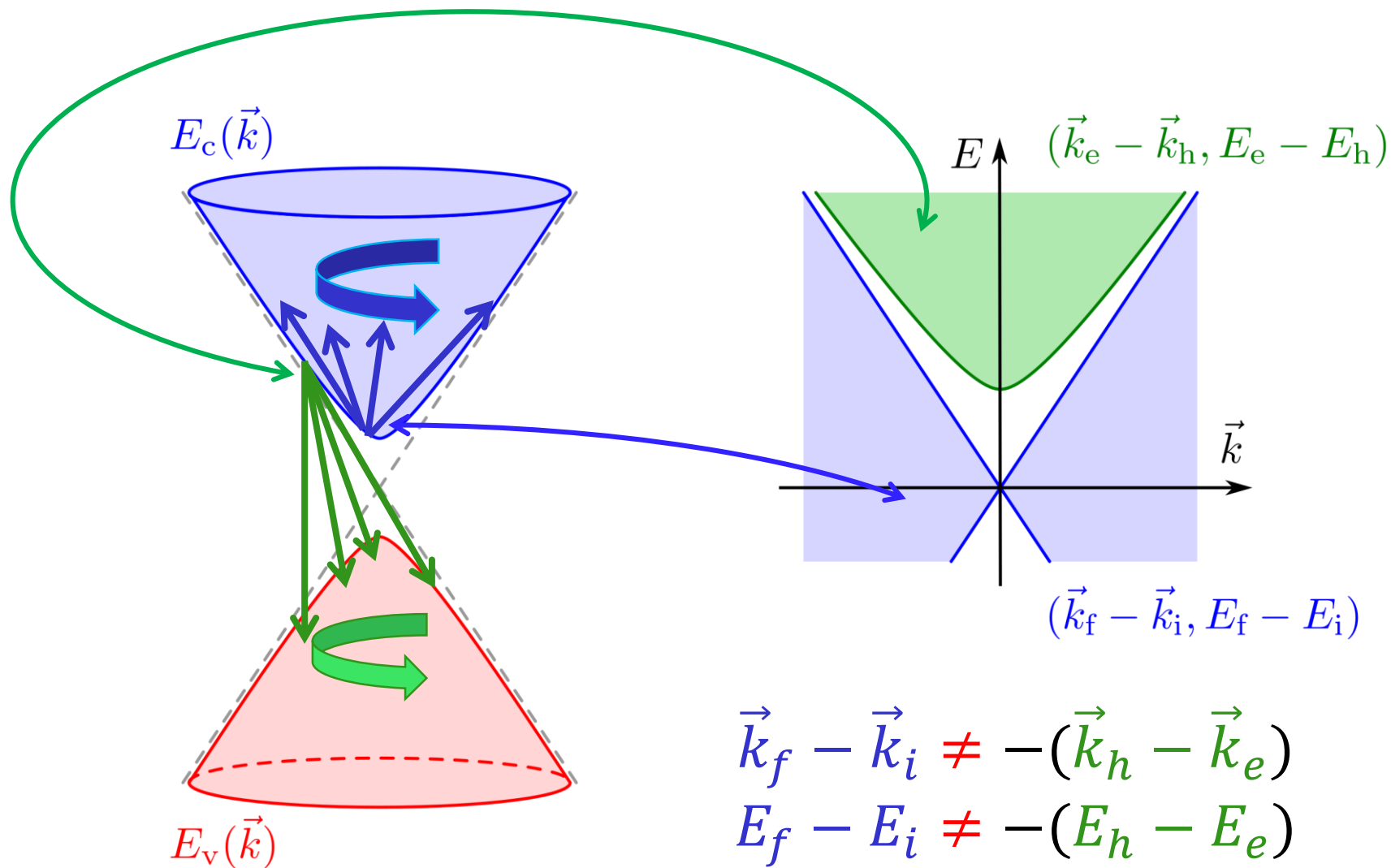
# Пороговая энергия оже-рекомбинации

(в случае гиперболических законов дисперсии)



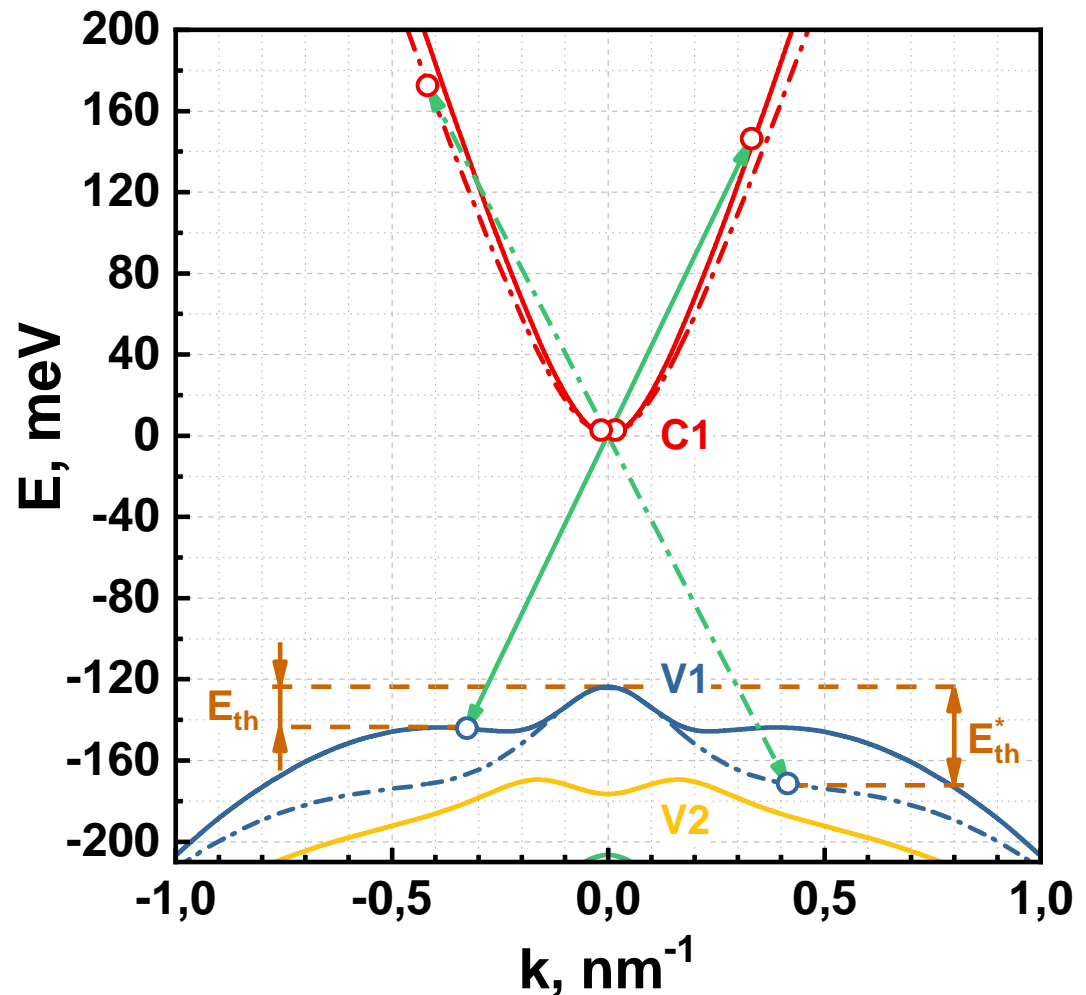
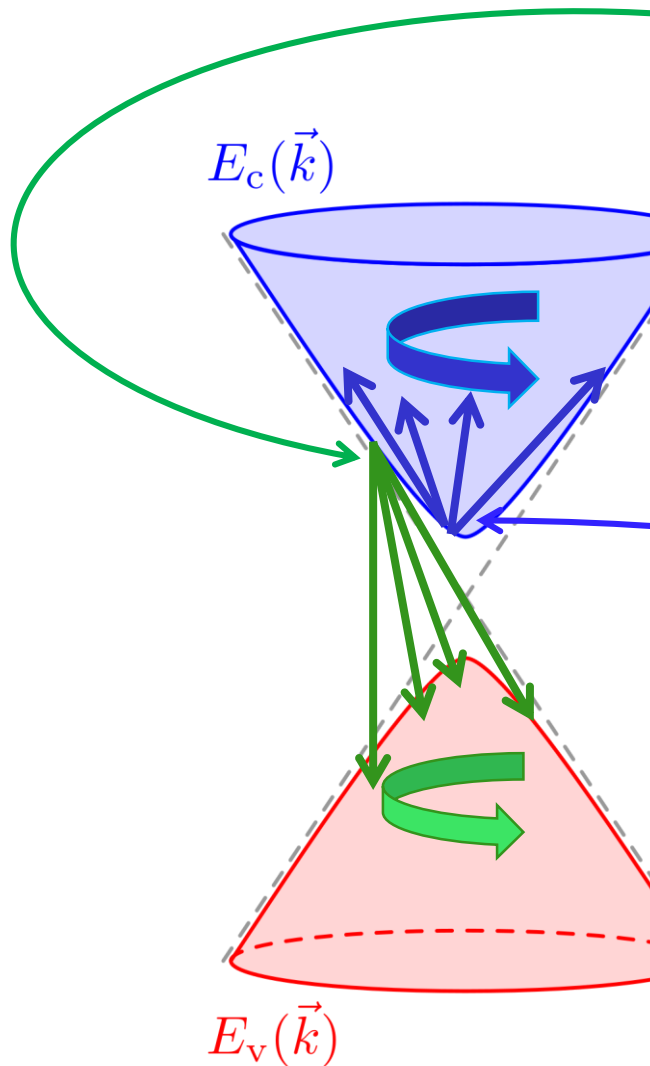
# Пороговая энергия оже-рекомбинации

(в случае гиперболических законов дисперсии)



# Пороговая энергия оже-рекомбинации

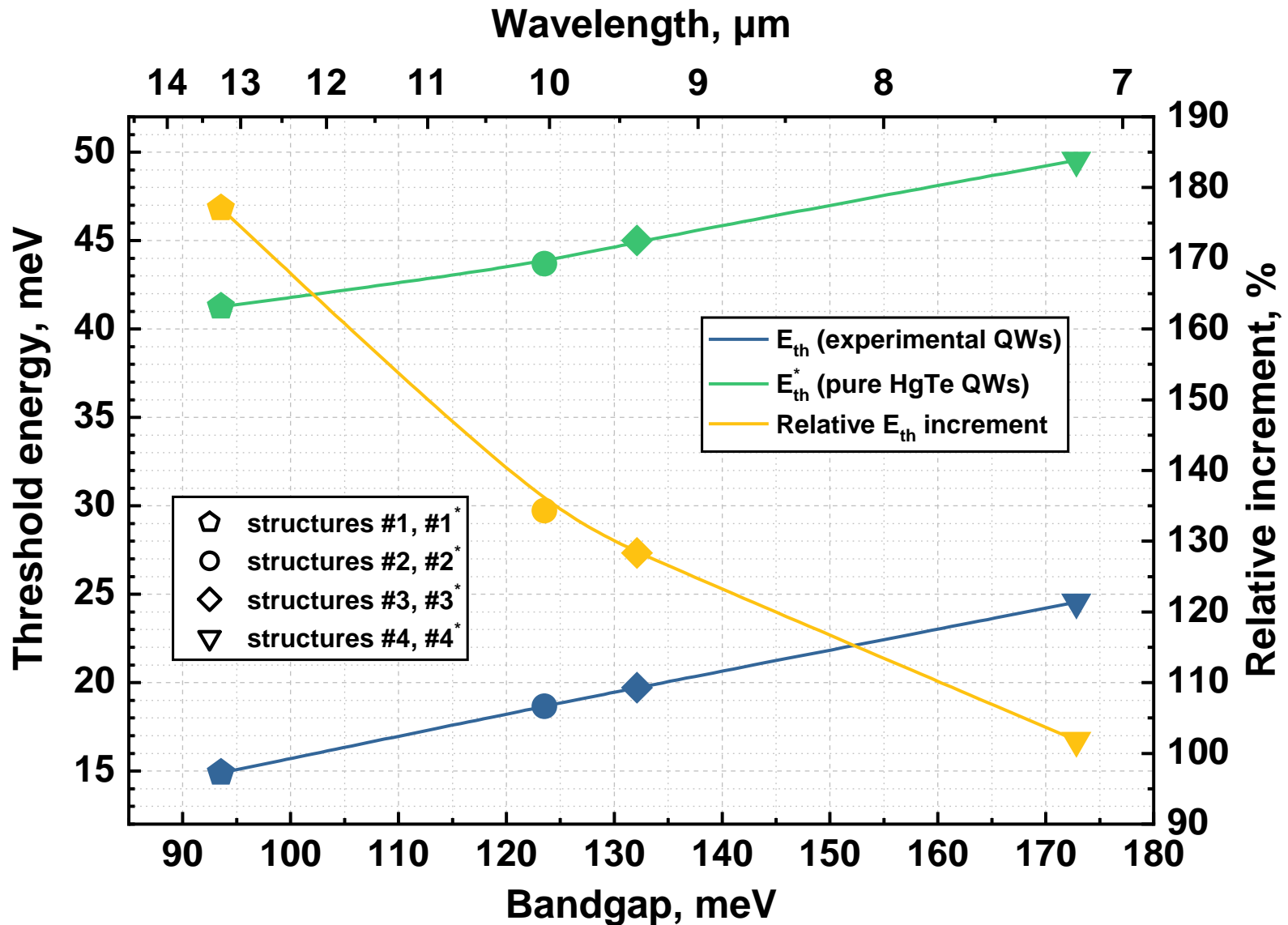
(в случае гиперболических законов дисперсии)



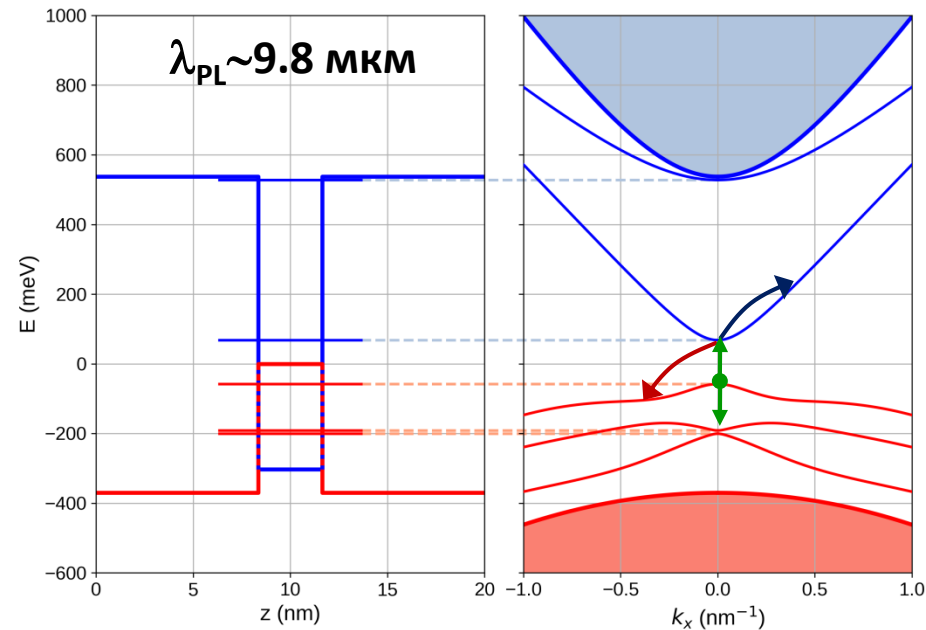
Hg<sub>0.892</sub>Cd<sub>0.108</sub>Te 6.1 nm QW vs. HgTe 3.2 nm QW

# Пороговая энергия оже-рекомбинации

(в случае гиперболических законов дисперсии)



# Беспороговая оже-рекомбинация в КЯ

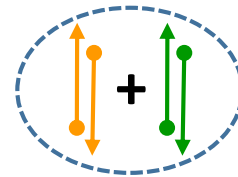
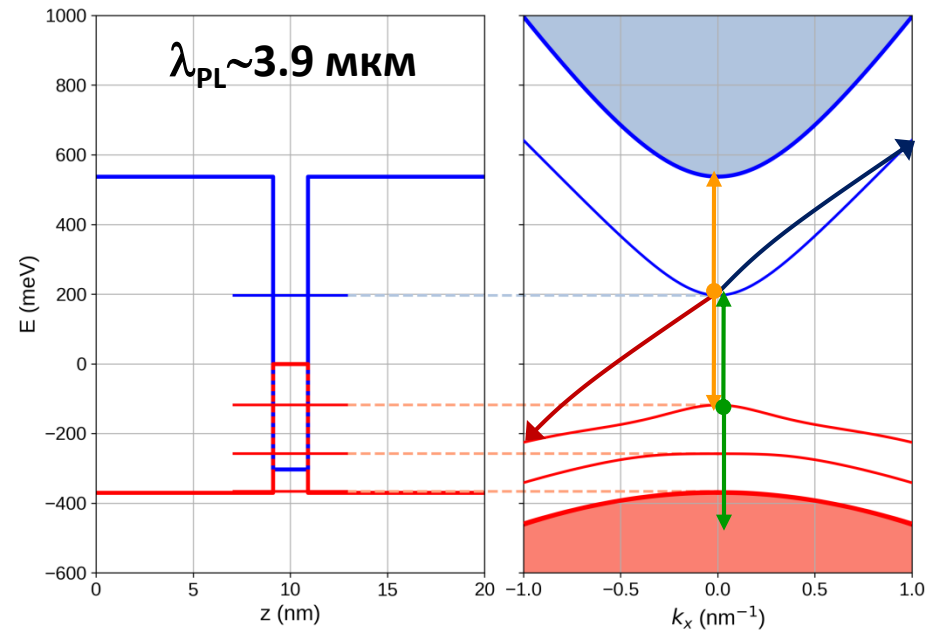


Пороговая («объемная») оже-рекомбинация

В более узкозонных структурах для дальнего ИК диапазона (**10+ мкм**):

Только «классические» оже-процессы

**Нет беспороговых процессов!**



Беспороговые оже-процессы с переходом носителей в барьерные слои

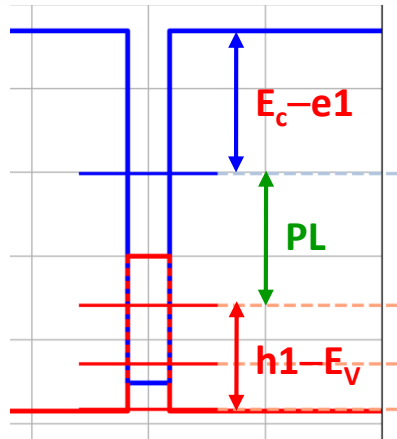
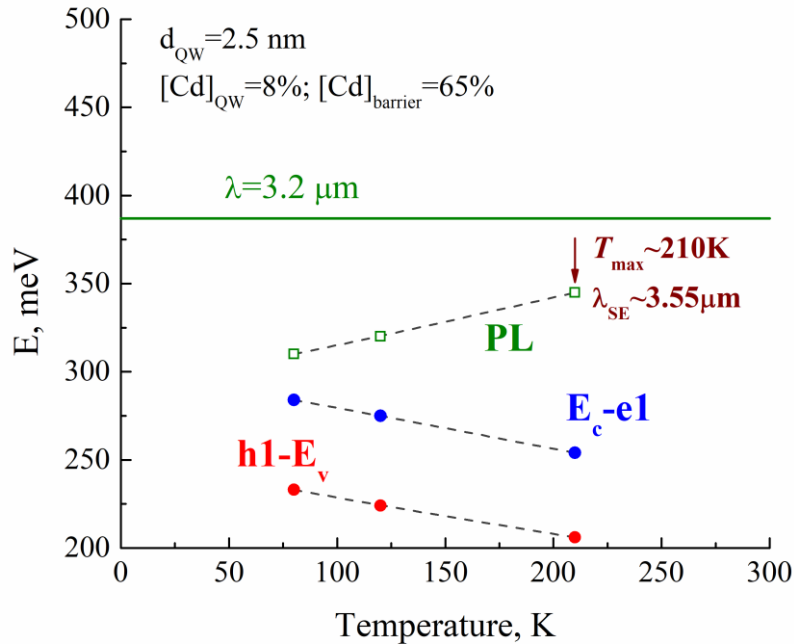
В структурах для диапазона **3-5 мкм**:

Возможны как «классические» оже-процессы, так и оже-процессы с выбросом носителей из КЯ в состояния континуума!



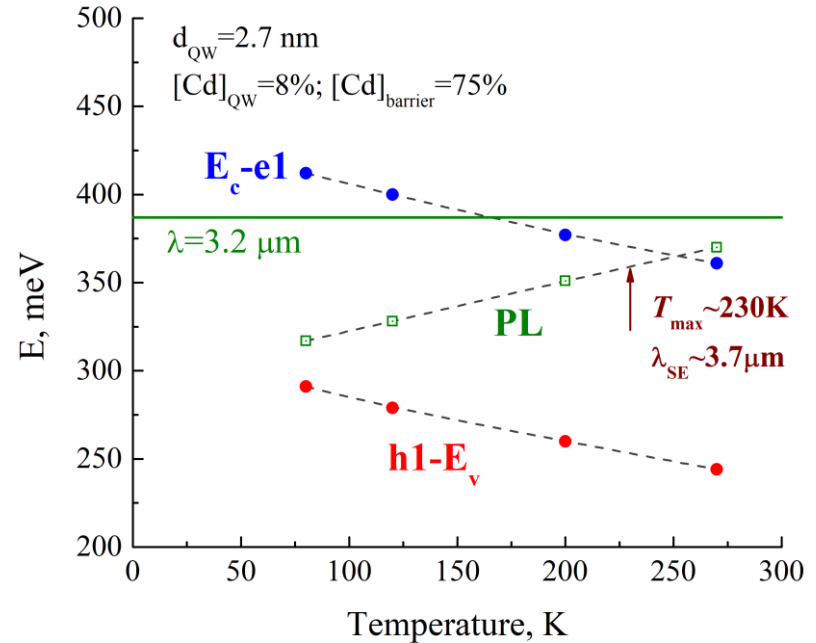
# Беспороговая оже-рекомбинация в КЯ

Hg<sub>0.92</sub>Cd<sub>0.08</sub>/Cd<sub>0.65</sub>Hg<sub>0.35</sub>Te QWs



$E_{\text{th}}(\text{CCHC}) \sim 55 \text{ meV}$

Hg<sub>0.92</sub>Cd<sub>0.08</sub>/Cd<sub>0.75</sub>Hg<sub>0.25</sub>Te QWs



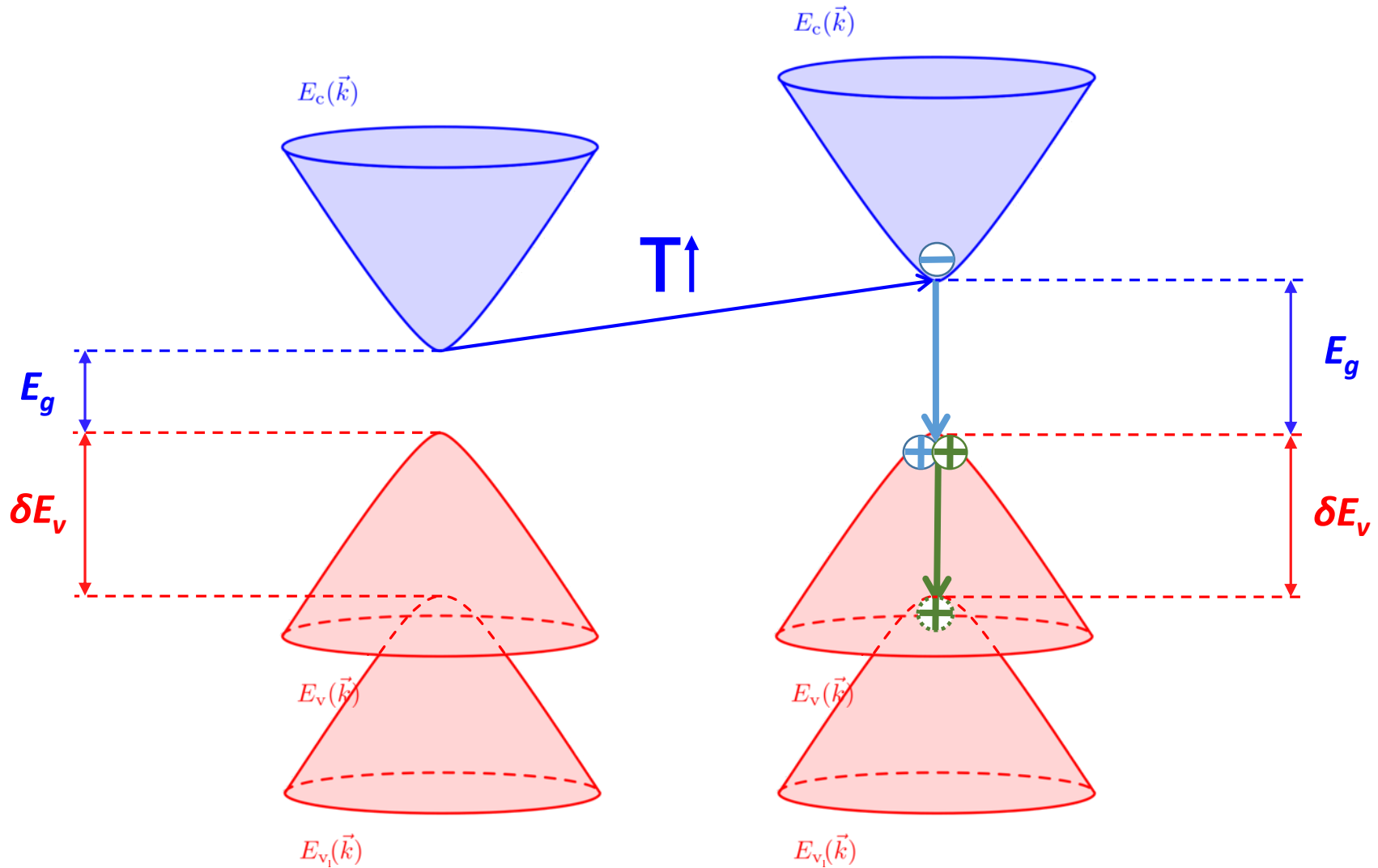
$E_{\text{th}}(\text{CCHC}) \sim 58 \text{ meV}$

Прямой расчет темпов излучательной  
и пороговой оже-рекомбинации:

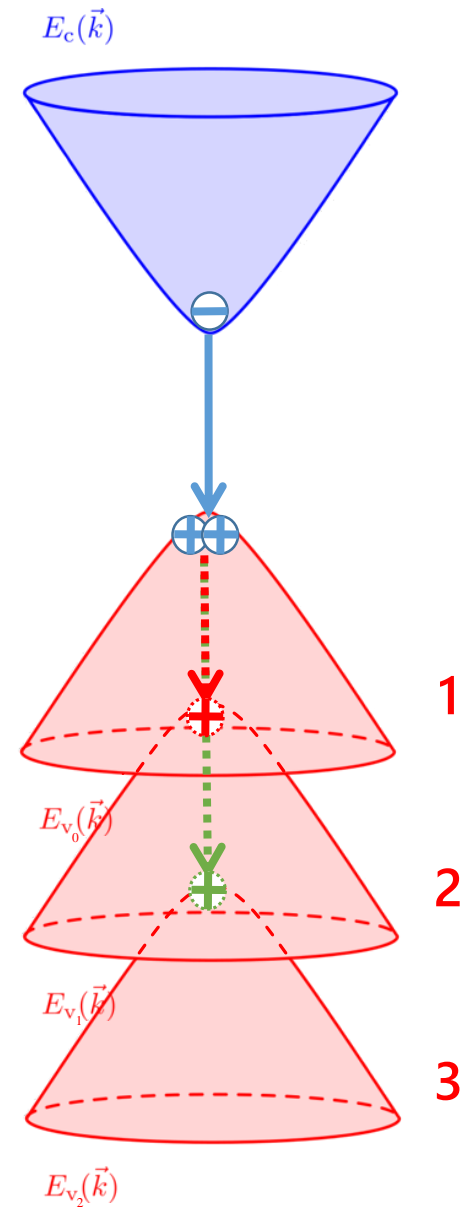
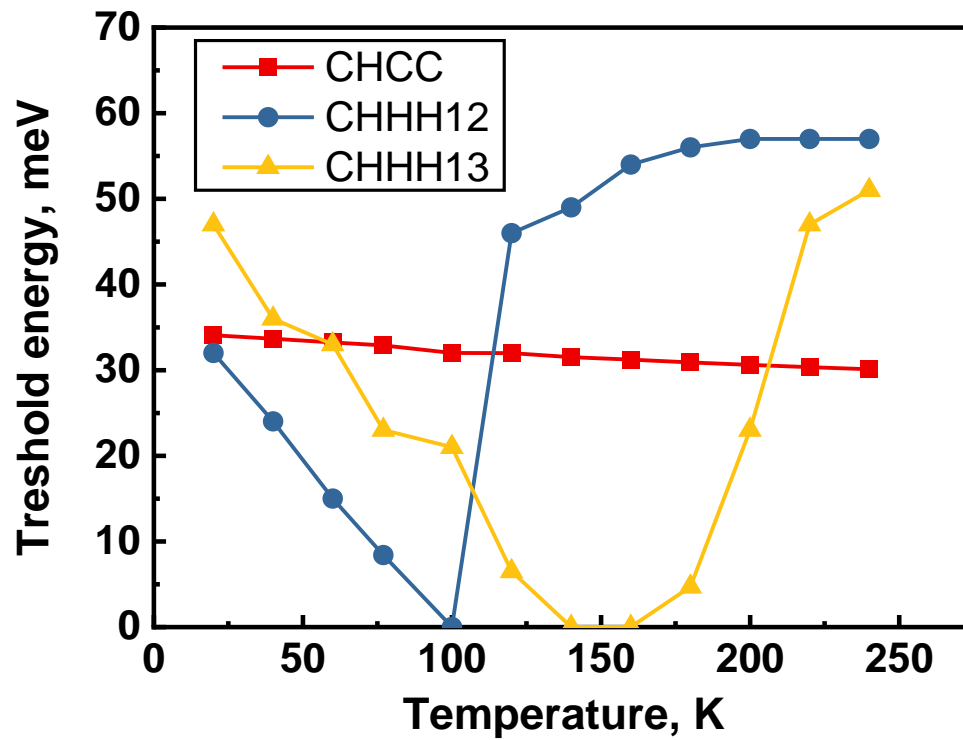
$$\tau_{\text{Auger}}/\tau_{\text{rad}} \sim 30 !$$

при  $T=250 \text{ K}$ ,  $n \sim 2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

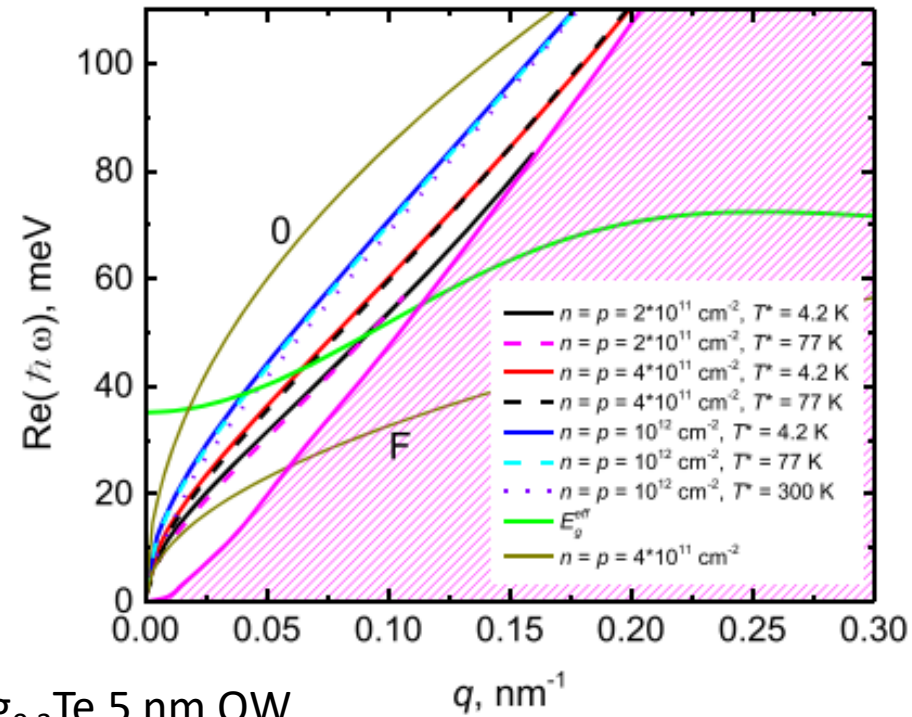
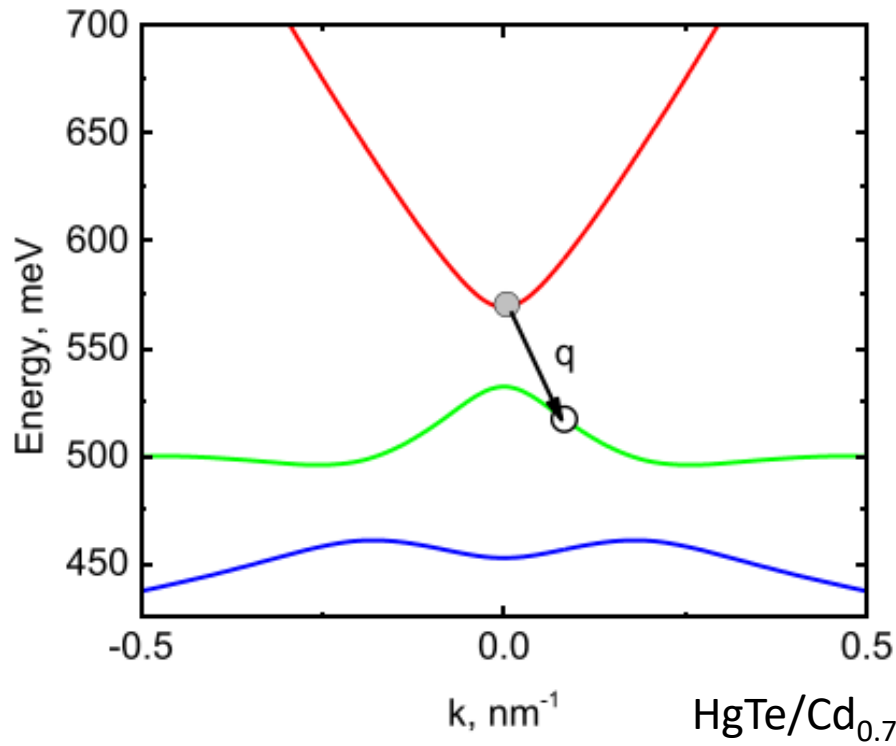
# “Резонансные” СНН оже-процессы



# “Резонансные” СННН оже-процессы



# Плазмонная рекомбинация

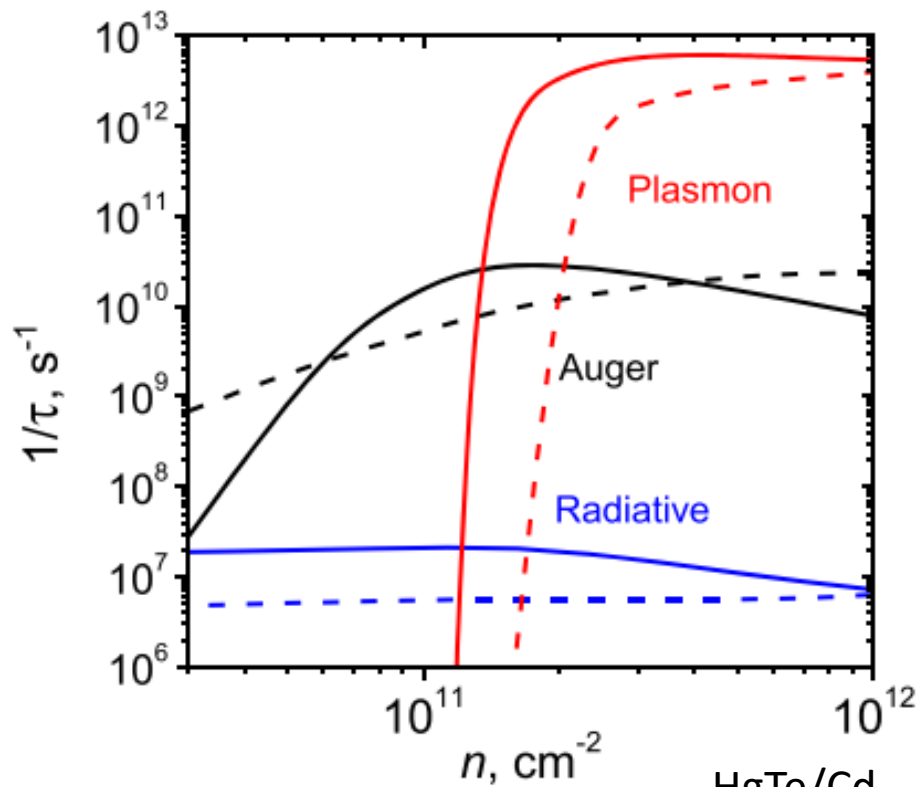


$$\omega = \sqrt{\frac{2\pi e^2 q}{\varepsilon} \left( \frac{n}{m_e} + \frac{p}{m_h} \right)}$$

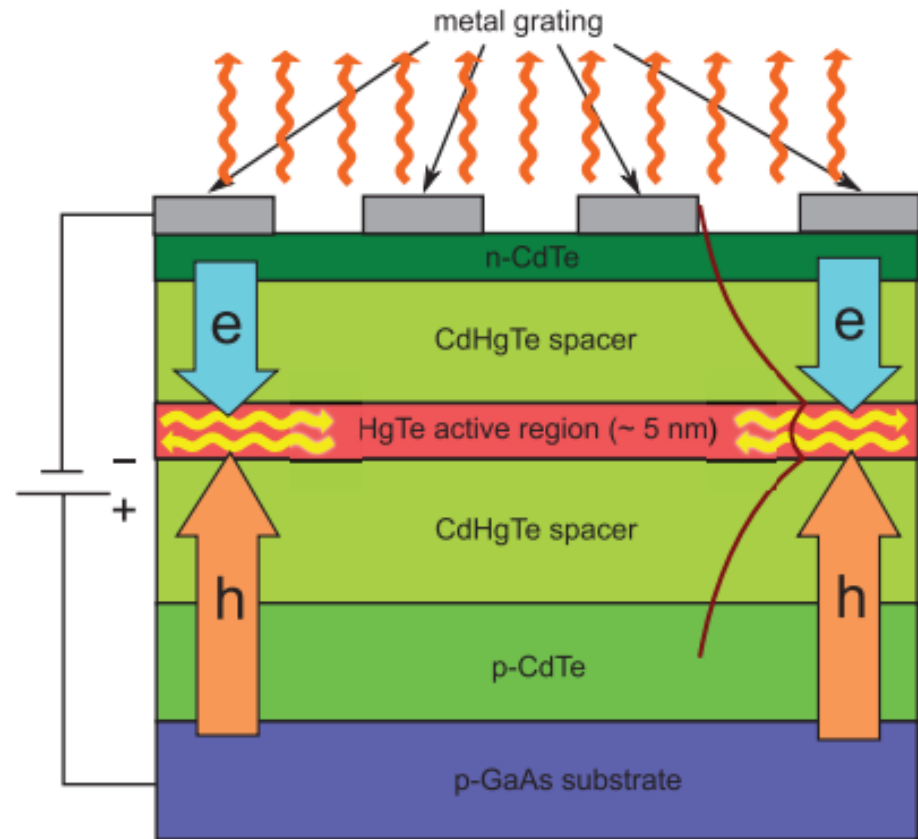
$E_g^{\text{eff}}(q)$  – минимум  $\varepsilon_e(\mathbf{k}) + \varepsilon_h(\mathbf{k} - \mathbf{q})$  по  $k$

$$\hbar\omega_{\text{max}}(q) = \varepsilon(k_f + q) - \varepsilon(k_f)$$

# Плазмонная рекомбинация



HgTe/Cd<sub>0.7</sub>Hg<sub>0.3</sub>Te 5 nm QW



V. Ya. Aleshkin *et al* 2020 *J. Phys. Commun.* **4** 11501

K. Kapralov *et al* 2020 *J. Phys.: Condens. Matter* **32** 065301

## Заключение

- В КЯ HgCdTe спектр носителей квазигиперболический в окрестности  $k=0$ , что подавляет пороговую оже-рекомбинацию
- Пороговая энергия оже определяется высотой «боковых максимумов» - спектральных особенностей в 1-й валентной подзоне
- В исследованных КЯ возможны как «классическая» пороговая оже-рекомбинация, так и специфичные беспороговые оже-процессы
- Для подавления беспороговой оже-рекомбинации необходим рост структур с высокими барьерами, а подавление пороговой оже-рекомбинации также требует роста максимально «чистых» ям
- Высота боковых максимумов может определять времена излучательной рекомбинации при высоких уровнях накачки