

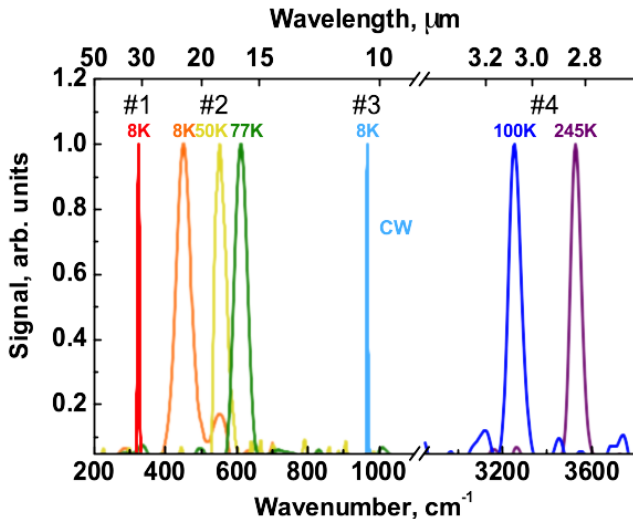
Исследование порога Оже-процессов в гетероструктурах с КЯ $Hg_xCd_{1-x}Te$.

Выполнил: Куликов Н.С.
Научный руководитель: Морозов С.В.

ИФМ РАН

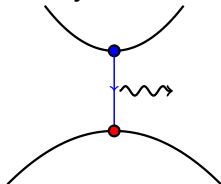
2019

Было получено стимулированное излучение на длинах волн $\sim 30 \mu m$ в структурах HgCdTe при $T = 8 K$.



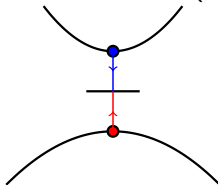
Можно ли поднять рабочую температуру?

Излучательная



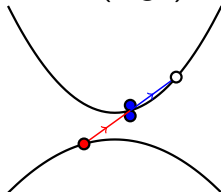
Целевой процесс - нужно только усиливать, а остальное - подавлять.

Шокли-Рида-Холла (SRH)



Происходит с участием примесей. \Rightarrow В чистых материалах - нет.

Оже (Auger)



Пороговый эффект. \Rightarrow Можно повысить порог, тем самым подавив процесс.

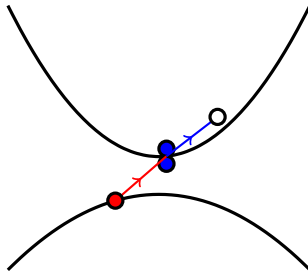
- В этом процессе участвует 3 частицы. Для такого процесса должны выполняться законы сохранения энергии, импульса. \Rightarrow Это возможно только для определённых состояний системы, что объясняет наличие порога.

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_3 = \vec{k}_f;$$

$$\varepsilon_1(\vec{k}_1) + \varepsilon_2(\vec{k}_2) - \varepsilon_3(\vec{k}_3) = \varepsilon_f(\vec{k}_f);$$

Здесь \vec{k}_i , ε_i : $i = 1, 2, 3$ - начальные импульсы частиц и соответствующие им ветви дисперсионного соотношения, индекс f - конечному состоянию.

- Минимальная "кинетическая" энергия носителей заряда, при которой возможны такие процессы - пороговая энергия ε_{th} .



Невозможный процесс.

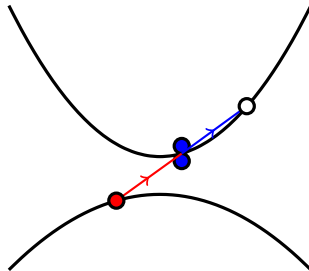
- В этом процессе участвует 3 частицы. Для такого процесса должны выполняться законы сохранения энергии, импульса. \Rightarrow Это возможно только для определённых состояний системы, что объясняет наличие порога.

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_3 = \vec{k}_f;$$

$$\varepsilon_1(\vec{k}_1) + \varepsilon_2(\vec{k}_2) - \varepsilon_3(\vec{k}_3) = \varepsilon_f(\vec{k}_f);$$

Здесь \vec{k}_i , ε_i : $i = 1, 2, 3$ - начальные импульсы частиц и соответствующие им ветви дисперсионного соотношения, индекс f - конечному состоянию.

- Минимальная "кинетическая" энергия носителей заряда, при которой возможны такие процессы - пороговая энергия ε_{th} .

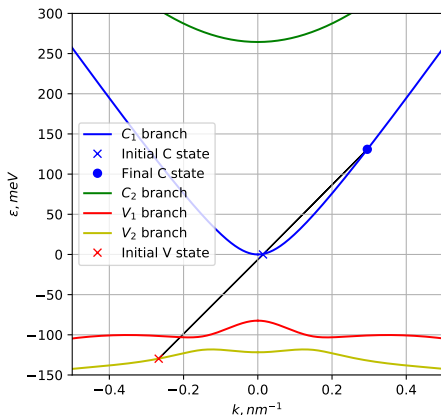


Как найти порог Оже-процессов?

- Дисперсионные соотношения в HgCdTe получаются в модели Кейна 8x8.
- Требуется минимизировать для каждой 4-ки начальных и конечных состояний функцию, характеризующую "кинетическую" добавку с учётом сохранения энергии:

$$K(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3) = \varepsilon_f(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_3) - \beta \varepsilon_g;$$

- При этом, начальные и конечные состояния могут быть на разных ветвях - матричные элементы перехода не равны нулю.



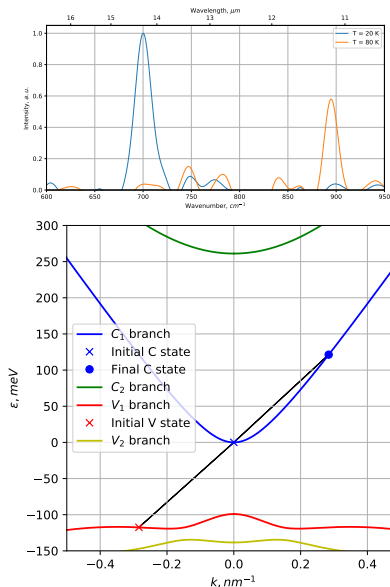
Сравнение с экспериментом $14\ \mu\text{m}$

При сопоставлении экспериментальных данных и теоретических расчетов порога была получена эмпирическая формула связи критической для стимулированного излучения температуры и пороговой энергии:

$$T_{cr} \approx \varepsilon_{th}/2;$$

Для её демонстрации была выбрана структура состава $\text{Hg}_{0.903}\text{Cd}_{0.097}\text{Te}/\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$, имеющая 10 квантовых ям толщиной $7.4\ \text{nm}$. Было получено СИ в диапазоне $11 - 14\ \mu\text{m}$ при температурах $18 - 85\ \text{K}$.

Искомый процесс имеет тип ССНС и при $T = 80\ \text{K}$ соответственно $\varepsilon_g = 99\ \text{meV}$, пороговая энергия $\varepsilon_{th} \approx 18.4\ \text{meV}$, это соответствует $T_{cr} \approx 100\ \text{K}$.

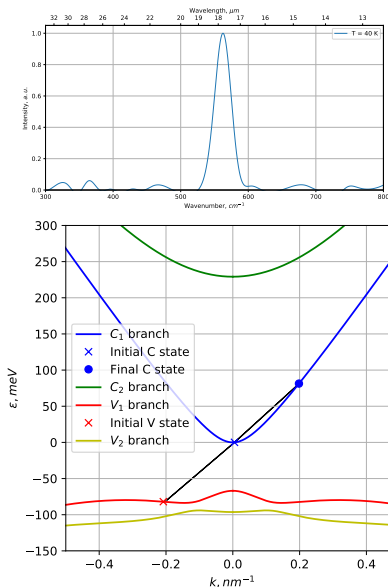


Сравнение с экспериментом $18\ \mu m$

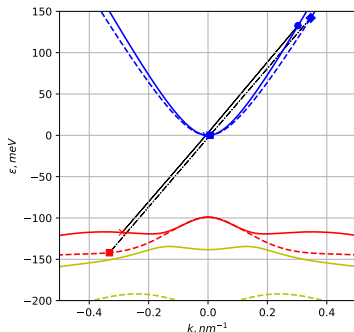
Аналогично для структуры, рассчитанной на длину волны $18\ \mu m$:

$Hg_{0.9}Cd_{0.1}Te/Cd_{0.65}Hg_{0.35}Te$, имеющая 10 квантовых ям толщиной $8.7\ nm$. Было получено СИ в диапазоне $18\ \mu m$ при температуре $50\ K$.

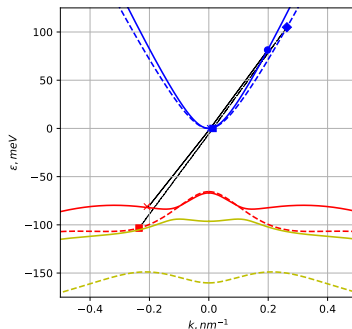
Искомый процесс имеет тип ССНС и при $T = 40\ K$ соответственно $\varepsilon_g = 67\ meV$, пороговая энергия $\varepsilon_{th} \approx 15\ meV$, это соответствует $T_{cr} \approx 80\ K$.



$\lambda \approx 14 \mu m$



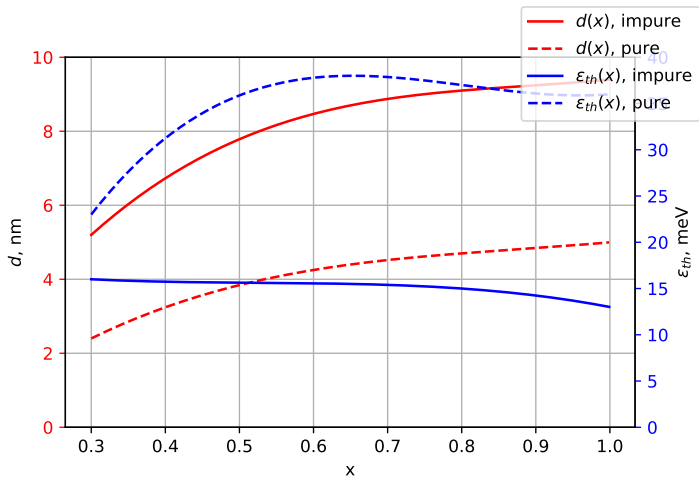
$\lambda \approx 18 \mu m$



- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| — C_1 branch, impure | — V_1 branch, impure |
| × Initial C state, impure | × Initial V state, impure |
| ● Final C state, impure | — V_1 branch, pure |
| --- C_1 branch, pure | --- Initial V state, pure |
| ■ Initial C state, pure | — V_2 branch, impure |
| ◆ Final C state, pure | --- V_2 branch, pure |

Можно видеть разницу в пороговых энергиях для обеих структур. Она обусловлена наличием или отсутствием боковых максимумов.

Порог оже-рекомбинации vs. состав барьера



Как можно видеть, существует значительный максимум ε_{th} при составе барьера $\text{Hg}_{0.33}\text{Cd}_{0.67}\text{Te}$. Аналогичные расчёты можно провести и для других структур.

- При сравнении экспериментально полученной критической температуры с рассчитанным порогом оже-процессов наблюдается эмпирическая закономерность $T_{cr} \approx \varepsilon_{th}/2$.
- При фиксированной величине ширины запрещённой зоны, увеличение концентрации кадмия в ямах ведёт к снижению порога.
- При фиксированной величине запрещённой зоны максимальная величина порога наблюдается при концентрации кадмия в барьерах 0.55 – 0.65.

- [1] Vladimir Rumyantsev, Mikhail Fadeev, Vladimir Aleshkin, Nikita Kulikov, Vladimir Utochkin, Nikolai Mikhailov, Sergey Dvoretiskii, Sergey Pavlov, Heinz-Wilhelm Hübers, Vladimir Gavrilenko, et al. Carrier recombination, long-wavelength photoluminescence, and stimulated emission in hgcdte quantum well heterostructures. *physica status solidi (b)*, page 1800546, 2019.
- [2] VV Rumyantsev, NS Kulikov, AM Kadykov, MS Zholudev, MA Fadeev, V Ya Aleshkin, S Winnerl, NN Mikhailov, SA Dvoretiskii, VI Gavrilenko, et al. Hgcdc based quantum well heterostructures for long-wavelength lasers operating in 5-15 thz range. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1092, page 012126. IOP Publishing, 2018.
- [3] Дмитрий Владимирович Козлов, В В Румянцев, Н С Куликов, А М Кадыков, М А Фадеев, В В Уточкин, Н Н Михайлов, С А Дворецкий, В И Гавриленко, Г В Хьюберс, et al. Особенности фотолюминесценции двойных акцепторов в гетероструктурах hgte/Cdhgte с квантовыми ямами в терагерцовом диапазоне. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 109(10):679–684, 2019.

- [4] В.В. Румянцев, Н.С. Куликов, А.М. Кадыков, Фадеев, А.В. М.А., Иконников, А.С. Казаков, М.С. Жолудев, В.Я. Алешкин, В.В. Уточкин, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, С.В. Морозов, and В.И. Гавриленко. Влияние особенностей зонного спектра на характеристики стимулированного излучения в узкозонных гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe . *Физика и техника полупроводников*, 52:1263, 2018.
- [5] В.В. Уточкин, В.Я. Алёшкин, Н.С. Куликов, А.А. Дубинов, В.И. Гавриленко, М.А. Фадеев, В.В. Румянцев, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, and С.В. Морозов. Исследование пороговой энергии оже-рекомбинации в волноводных структурах с квантовыми ямами $\text{HgTe}/\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$ в области 14 мкм. *Физика и техника полупроводников*, 2019.