

## FIZICĂ ȘI INGINERIE

### ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В CdTe И МНОГОКВАНТОВЫЕ ФОНОН-ПЛАЗМОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ СВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Александру ВАРЗАРЬ

CZU: 535.37:621.315.592

alexandru.varzari@usm.md

*In this article, the problem of radiative band-impurity transitions in CdTe with a large number of phonon – plasmon replicas was resolved within the framework of the Green's function method and the Fluctuation-Dissipation Theorem taking into account the interaction with phonon-plasmon coupling. During the analysis of the correlation function (causal Green's function) in the Random Phase Approximation and Debye-Waller Approximation using second quantization the form-function of the impurity luminescence spectrum with a multiquantum equidistant structure was obtained.*

Одним из важнейших случаев исследования спонтанной излучательной рекомбинации является исследование полупроводников с широкой запрещенной зоной типа A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup>. Одним из самых перспективных полупроводников такого типа является теллурид кадмия, который имеет широкое применение в электронике в качестве детекторов рентгеновского излучения [1], например, в медицине и астрофизике [2], а также в фотовольтаике [3,4].

В экспериментах по фотolumинесценции в CdTe [5] существует множество механизмов излучательной рекомбинации. В данной работе рассматривается область примесной люминесценции, т.е. излучательные переходы зона–примесь.

В эксперименте [6] по фотolumинесценции в CdTe в широком диапазоне мощности возбуждающего лазера **0.01 – 30 mW** наблюдается широкая полоса примесной люминесценции с большим числом фононных повторений, а также было обнаружено [7] сужение эквидистантной структуры с ростом уровня возбуждения.

Целью данной работы является теоретическое обоснование примесной люминесценции в рамках физики твердого тела [8-10], метода функции Грина и ФДТ [11,12] учитывая взаимодействие неравновесных носителей со связанными фонон–плазмонными парами.

Мощность излучательного перехода пропорциональна произведению энергии фотона на скорость спонтанной рекомбинации при термодинамическом равновесии:

$$W = \hbar\omega r(\omega) \quad (1)$$

Скорость спонтанной излучательной рекомбинации с учетом многоквантовых переходов в приближении Дебая – Валлера при термодинамическом равновесии согласно формуле Кубо [14] имеет вид:

$$r(\omega) = \frac{4e^2 N_I |p_{cv}|^2}{3\hbar\omega n c m^2 \pi} \times \int_0^\infty dk_c k_c^2 n_c (1 - n_v) \sum_n F(\vec{n}, \vec{k}_c) F(\vec{n}', \vec{k}_c) \operatorname{Re} \left\{ \int_0^\infty dt e^{i(\omega - \frac{\hbar k_c^2}{2m_e})t} \langle e^{i\vec{k}_c \cdot \vec{U}_n^k(t)} e^{-i(\vec{k}_c \cdot \vec{U}_{n'}^{k'})} \rangle \right\} \quad (2)$$

В уравнении (2) появляется среднее значение коррелятора смещений на равновесной матрице, которое является корреляционной функцией (причинной функцией Грина):

$$S(\vec{k}_c, t) = \langle \exp i\vec{k}_c \cdot (\vec{U}_n^k(t) - \vec{U}_{n'}^{k'}) \rangle \quad (3)$$

Таким образом, задача сводится к расчету корреляционной функции (3).

Корреляционную функцию можно представить в виде экспоненты от бесконечного кумулянтного ряда, точное решение которого может быть найдено в представлении квазичастиц. В этом случае вклад в среднее вносит только вторая кумулянта и корреляционная функция (3) принимает вид:

$$S_Q(\vec{k}_c, t) = \exp \left( -W_q^k - W_q^{k'} + W_{nn'}^{kk'}(\vec{k}_c, t) \right) \quad (4)$$

Расчет коррелятора  $W_{nn'}^{kk'}$  производится в рамках уравнений движения Гейзенберга, расщепления ПСФ с учетом экранирования и многоквантовых процессов. Согласно полученному расчету, коррелятор  $W_{nn'}^{kk'}$  зависит от комбинаций частот связанных фонон-плазмонных мод, а именно – от разностной  $\omega_+ - \omega_-$  и суммарной  $\omega_+ + \omega_-$  частот.

Взаимодействие с суммарной частотой  $\omega_+ + \omega_-$  оказывается пренебрежимо слабым, вследствие чего учитывается вклад только разностной частоты  $\omega_+ - \omega_-$ . Таким образом коррелятор  $W_{nn'}^{kk'}$  принимает вид:

$$W_{nn'}^{kk'}(\vec{k}_c, t) = \frac{\hbar k_c^2 S'(0) \omega_+^{-1} \omega_-^{-1}}{4\varepsilon_\infty M_r \omega_+^2 - \omega_-^2} \times \left[ \frac{\omega_T^2 - \omega_-^2}{(2\omega_+ - \omega_-)} \frac{\cos((\omega_+ - \omega_-)t + i \cdot \beta_+/2)}{\sinh(\beta_+/2)} - \frac{\omega_T^2 - \omega_+^2}{(\omega_+ - 2\omega_-)} \frac{\cos((\omega_+ - \omega_-)t - i \cdot \beta_-/2)}{\sinh(\beta_-/2)} \right] \quad (5)$$

Появившиеся параметры  $z_1$  и  $z_2$  в уравнении (5) определяют силу связи:

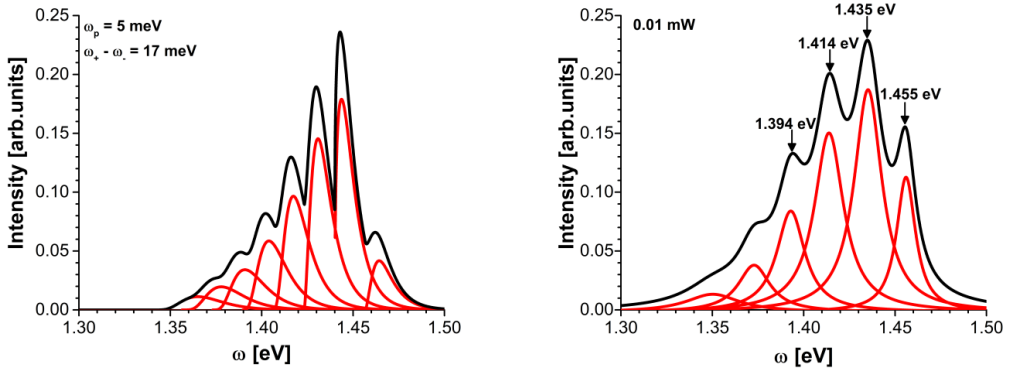
$$z_1 = \frac{\hbar k_c^2 S'(0) \omega_+^{-1} \omega_-^{-1} \omega_T^2 - \omega_-^2}{4\varepsilon_\infty M_r \omega_+^2 - \omega_-^2 (2\omega_+ - \omega_-)}; \quad (6)$$

$$z_2 = -\frac{\hbar k_c^2 S'(0) \omega_+^{-1} \omega_-^{-1} \omega_T^2 - \omega_+^2}{4\varepsilon_\infty M_r \omega_+^2 - \omega_-^2 (\omega_+ - 2\omega_-)}$$

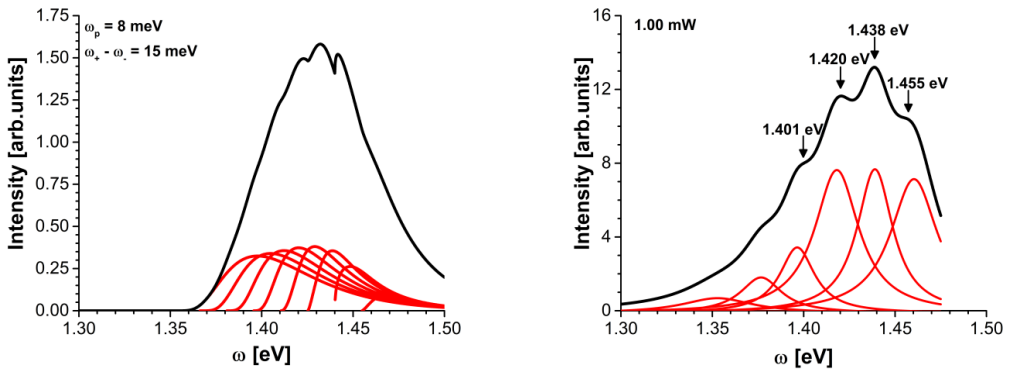
Отношение этих параметров сводится к нулю в точке  $\omega_p \approx 0.695$ .

Исходя из уравнения (5) была получена форм-функция спектра излучательных переходов зона-примесь с учетом многоквантовых процессов в зависимости от частоты излучения и плазменной частоты, отражающей уровень возбуждения:

$$F_{\text{ЛМ}}(\omega, \omega_p) = \sum_{n=\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \exp\left(\frac{n\beta_-}{2}\right) I_n\left(\frac{z_1 \omega_{nm}}{\sinh \beta_- / 2}\right) \frac{(z_2 \omega_{nm})^m}{m!} \times \left(1 + \exp\left(\frac{\hbar \omega_{LO}}{k_B T_e} (\omega_{nm} - \mu)\right)\right)^{-1} (\omega_{nm})^{1/2} (1 + \nu \omega_{nm})^{-4} \Theta(\omega_{nm}) \quad (7)$$



**Рис.1.** Спектр примесного излучения при низких уровнях возбуждения (0.01 mW); слева – теоретическая кривая, справа – экспериментальная (4.7K)



**Рис.2.** Спектр примесного излучения при высоких уровнях возбуждения; слева – теоретическая кривая, справа – экспериментальная (4.7K)

### Выводы

Согласно полученным численным расчетам, каждая n-я реплика обусловлена излучением фотона, n-m продольных фононов, связанных с плазмонами,

и поглощением такого же числа связанных с фононами плазмонов. При низких уровнях возбуждения наблюдается многоквантовая эквидистантная структура с ярко выраженными пиками. С ростом уровня возбуждения расстояние между репликами уменьшается и, таким образом, при высоких уровнях возбуждения фонон-плазмонных реплик наблюдаться не будет. Полученные теоретические спектральные зависимости находятся в согласии с экспериментом.

### Литературные ссылки:

1. LIMOUSIN, O. New trends in CdTe and CdZnTe detectors for X-and gamma-ray application. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2003, vol.504, p.24-37.
2. Del SORDO, S. et al. Progress in the Development of CdTe and CdZnTe Semiconductor Radiation Detectors for Astrophysical and Medical Applications. In: *Sensors*, 2009, vol.9, p.3491-3526.
3. ARCE-PLAZA, A. et al. CdTe thin films: Deposition techniques and applications. In: *Coatings and Thin-Film Technologies*, 2019, p.131-148.
4. KHRYPUNOV, G. et al. Recent developments in evaporated CdTe solar cells. In: *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2006, vol.90, pp.664-677.
5. ПАНОСЯН, Ж.Р. Излучательная рекомбинация в кристаллах теллурида кадмия. В: *Труды ФИАН СССР*, 1973, т.68, с.147.
6. ROTARU, C. et al. Low-temperature Photoluminescence Studies of CdTe Thin Films Deposited on CdS/ZnO/Glass Substrates. In: *IOMRS Online Proceedings Library*, 2013, vol.1538, p.261-2673.
7. VARZARI, A. et al. Multi-quantum band-to-impurity optical transitions in CdTe luminescence and phonon-plasmon replicas. In: *EMRS-2023 Spring Meeting Symposium B*.
8. PLATZMANN, P.M., WOLFF, P.A. *Waves and Interactions in Solid State Plasmas*. New York: Academic Press, 1973, p.285.
9. KITTEL, C. *Introduction to Solid State Physics*. 8th ed. New York: John Wiley & Sons, 2015, p.680.
10. ЗУБАРЕВ, Д.Н. *Неравновесная статистическая термодинамика*. Москва: Наука, 1971, с.415.
11. ЗУБАРЕВ, Д.Н. Двухвременные функции Грина в статистической физике. В: *Труды УФН*, 1960, т.71, с.71.
12. БОГОЛЮБОВ, Н.Н., ТЯБЛИКОВ, С.В. Запаздывающие и опережающие функции Грина в статистической физике. В: *ДАН СССР*, 1959, т.126, с.53.
13. KUBO, R.A. General Expression for the Conductivity Tensor. In: *Can. Journ. Phys.*, 1956, vol.34, p.1274.

Рекомендовано  
Серджиу ВАТАБУ, докт., конф.