

УДК 621.315.592

Исследование температурной зависимости вклада экситонов и свободных носителей в люминесценцию гетероструктуры CdTe/CdMgTe

© В.Ф. Агекян¹, С.Ю. Вербин¹, А.Ю. Серов¹, Н.Г. Философов^{1,¶}, И.В. Штром^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
194034 Санкт-Петербург, Россия

² Институт аналитического приборостроения,
198095 Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: n.filosofov@spbu.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 24 июня 2025 г.

Принята к публикации 18 сентября 2025 г.

Исследованы спектры люминесценции и спектры возбуждения люминесценции в надбарьерной области энергии гетероструктуры CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te с единичной квантовой ямой при температурах 5–100 К. Установлено, что люминесценция в максимуме полосы барьера определяется релаксацией экситонов во всем интервале температур, тогда как в формирование люминесценции низкоэнергетического крыла полосы люминесценции барьера и люминесценции квантовой ямы при низких температурах основной вклад вносят свободные носители.

Ключевые слова: квантовые ямы II–VI, теллурид кадмия, люминесценция, перенос энергии.

DOI: 10.61011/FTP.2025.07.61999.7841

1. Введение

В спектрах люминесценции объемных полупроводников и полупроводниковых гетероструктур при низких температурах и невысоких уровнях оптического возбуждения проявляются лишь переходы, связанные с наиболее низкими электронными уровнями. Информацию об энергиях возбужденных уровней можно получить из спектров возбуждения люминесценции (СВЛ), которые иногда называют спектрами псевдопоглощения (pseudoabsorption). При изучении гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) СВЛ, как правило, регистрируются в подбарьерной области спектра, где расположены дискретные возбужденные уровни КЯ [1,2]. Представляет интерес исследование СВЛ КЯ, а также барьерного слоя при надбарьерном возбуждении, это даст информацию о вкладе экситонов и свободных носителей в процесс релаксации возбуждения в зависимости от строения гетероструктуры и температуры. Отметим, что работы по оптике гетероструктур в значительной степени фокусируются на исследовании экситонов и их комплексов, однако изучение влияния свободных носителей на оптические свойства гетероструктур также представляет значительный интерес [3–5]. Если обратиться к оптике полупроводников группы II–VI, то гетероструктуры на основе CdTe наряду с гетероструктурами на основе ZnO пользуются наибольшим вниманием (см., например, [6–9]), они перспективны в прикладном отношении, в частности, как материал для солнечных элементов [10].

2. Эксперимент и обсуждение

Объектом исследования является гетероструктура CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te с единичной КЯ толщиной 9.6 нм, изготовленная методом МПЭ. Были изучены спектры люминесценции и отражения, СВЛ изучены в интервале энергий 2.2–3.0 эВ, они регистрировались в максимуме и на половине высоты контура полосы излучения.

На рис. 1 представлены спектры люминесценции, отражения и СВЛ гетероструктуры. Видно, что при $T = 5$ К есть заметный стоксов сдвиг между экситонным резонансом в спектре отражения и полосой люминесценции КЯ CdTe. Это означает, что при низких температурах экситонное излучение идет из уширенных областей КЯ.

2.1. СВЛ барьерного слоя

При низких температурах низкоэнергетическое крыло люминесценции барьера, который является твердым раствором (ТР) с катионным замещением, формируется в основном люминесценцией мелких связанных экситонов. На эту же область накладывается люминесценция экситонов, локализованных на глубоких потенциалах твердого раствора, этот вклад сохраняется и при более высоких температурах, однако следует учитывать, что концентрация глубоких случайных потенциалов невелика. Резкая перестройка спектра возбуждения люминесценции уже при низких температурах в области 15–20 К указывает на то, что при низких температурах

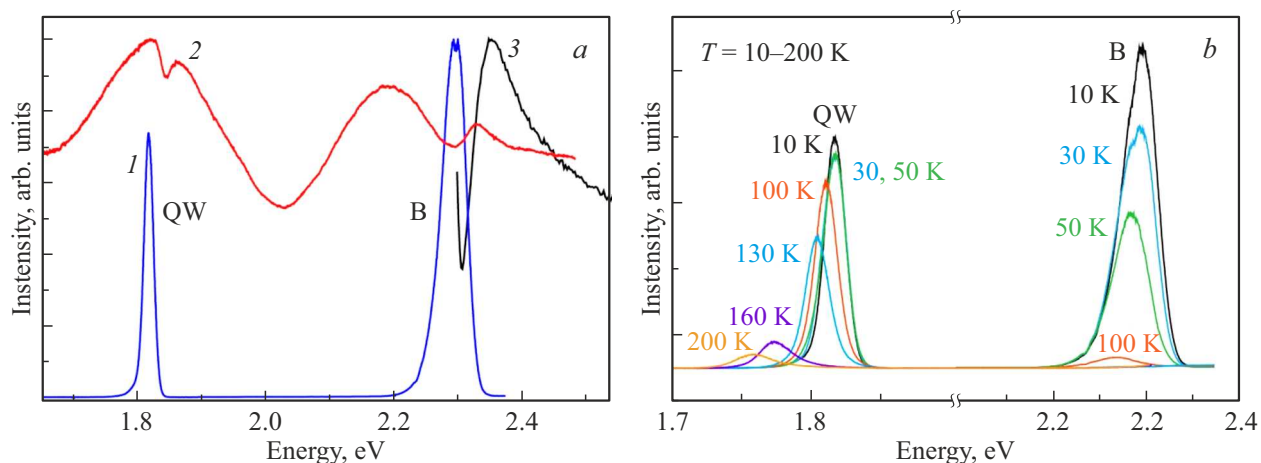


Рис. 1. *a* — спектры люминесценции (1), отражения (2) и СВЛ барьера (3) гетероструктуры $\text{CdTe}/\text{Cd}_{0.6}\text{Mg}_{0.4}\text{Te}$ при $T = 5 \text{ K}$; QW и B — излучение КЯ и барьера. *b* — спектры люминесценции в температурном интервале 10–200 K.

длинноволновый край полосы излучения формируется экситонами, связанными на мелких примесях.

Максимум СВЛ при регистрации сигнала на низкоэнергетическом крыле полосы люминесценции барьера при $T = 5 \text{ K}$ находится около 2.6 эВ, что на 0.25 эВ выше уровня энергии свободного экситона (СЭ) барьера (рис. 2). Это означает, что основным механизмом образования связанных экситонов является не захват СЭ, а последовательный захват носителей разного знака. Энергетическое положение максимума СВЛ определяется двумя факторами. С увеличением энергии свободных носителей усложняется процесс их остывания, что понижает эффективность их захвата на мелкие примесные уровни. В то же время носители, рождающиеся вблизи экстремумов зон, обладают малыми импульсами, они

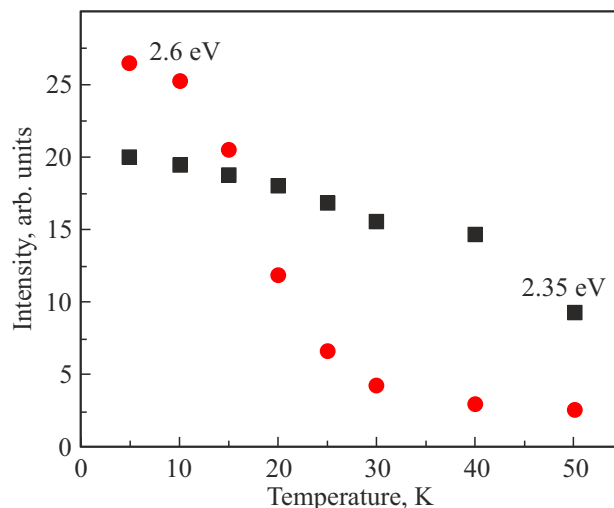


Рис. 3. Температурная зависимость интенсивности сигнала в двух областях СВЛ при регистрации сигнала на низкоэнергетическом крыле полосы излучения барьерного слоя.

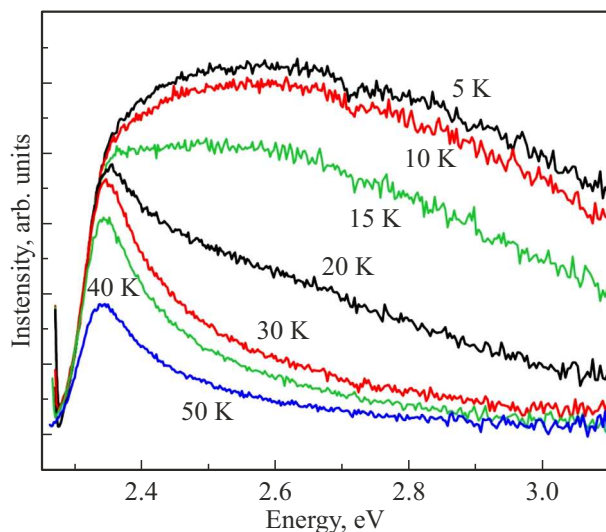


Рис. 2. СВЛ в интервале температур 5–50 K при регистрации сигнала на низкоэнергетическом крыле полосы излучения барьерного слоя.

легко связываются в СЭ, и это снижает их вклад в образование связанных экситонов. Из рис. 2 и 3 видно, что форма СВЛ резко изменяется в интервале температур 10–30 K, так что при $T = 20 \text{ K}$ максимум спектра уже совпадает с уровнем СЭ барьера. Такая трансформация СВЛ коррелирует с тепловым распадом связанных экситонов. При $T > 30 \text{ K}$ вклад свободных носителей уже незначителен, и при дальнейшем росте температуры форма СВЛ не изменяется.

Центр полосы люминесценции барьера при низких температурах соответствует излучению экситонов, локализованных на случайных потенциалах, которые возникают вследствие статистических флуктуаций относительных концентраций компонент ТР барьера [11]. При измерении сигнала в центре полосы максимум

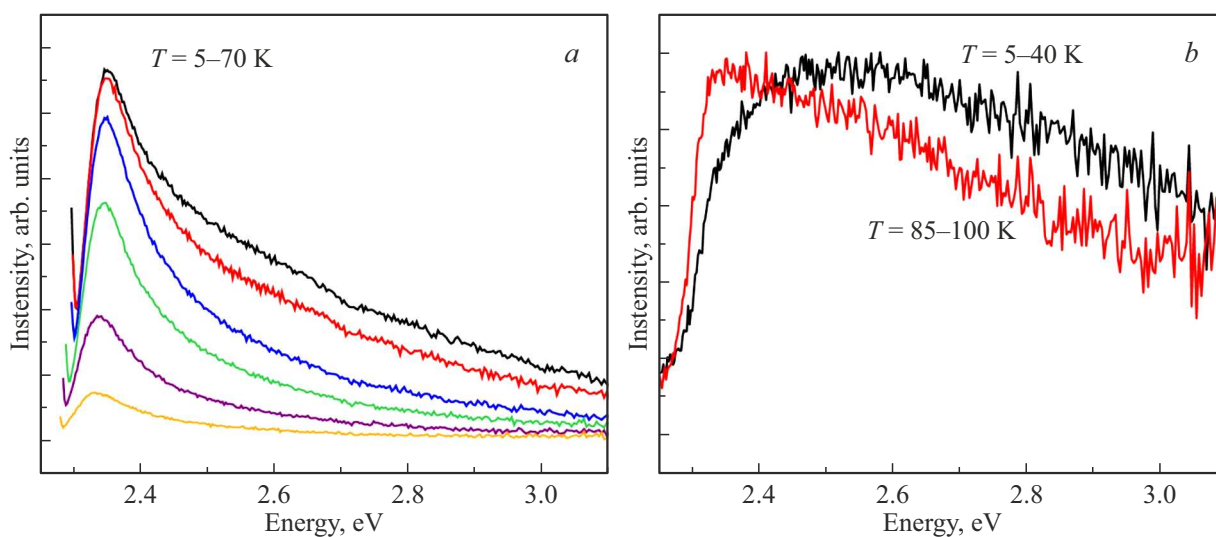


Рис. 4. *a* — СВЛ в интервале температур 5–70 К при регистрации сигнала в центре полосы излучения барьерного слоя. *b* — нормированные по максимуму СВЛ КЯ CdTe в интервале температур 5–100 К.

СВЛ совпадает с уровнем СЭ барьерного слоя во всем интервале температур 5–70 К (рис. 4, *a*). В отличие от предыдущего случая вклад свободных носителей незначителен даже при низких температурах, и он относительно уменьшается по мере повышения температуры образца. Можно сделать вывод, что локализованные экситонные состояния, характерные для ТР, образуются через релаксацию СЭ как целого.

2.2. СВЛ квантовой ямы

В СВЛ КЯ при $T = 5\text{--}40\text{ К}$ доминирует вклад свободных носителей, а максимум спектра смещен относительно уровня СЭ барьерного слоя на 0.25 эВ, в этом интервале температур форма СВЛ практически одинакова (рис. 4, *b*). В интервале температур 40–85 К спектр изменяется, а при $T > 50\text{ К}$ его максимум совпадает с уровнем СЭ барьера. Можно сделать вывод, что при низких температурах вклад экситонов в перенос возбуждения из барьерного слоя в КЯ подавляется их локализацией на случайных потенциалах в барьерном слое. По этой причине КЯ преимущественно заселяется свободными носителями. Повышение температуры переводит экситоны барьерного слоя в свободное состояние, вследствие чего их вклад в заселение КЯ становится преобладающим.

3. Заключение

Таким образом, анализ СВЛ показывает, что экситоны, связанные на мелких примесях, образуются при последовательном захвате носителей разного знака, тогда как на случайных потенциалах барьерного ТР локализуются СЭ. Температурное изменение формы СВЛ дает

возможность отследить процессы распада экситонно-примесных комплексов и перехода локализованных экситонов барьера в свободное состояние, вследствие чего при высоких температурах в переносе возбуждения в КЯ доминируют экситоны.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта Санкт-Петербургского государственного университета № 129360164.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] P.O. Holz, M. Sundaram, J.L. Merz, A.C. Gossard. Phys. Rev. B, **40**, 10021 (1989).
- [2] V.F. Agekyan, N.G. Filosofov, G. Karczewski, A.N. Resnitsky, A.Yu. Serov, A.S. Smirnov, I.V. Shtrom, S.Yu. Verbin. St. Petersburg State Polytech. Univ. J.: Phys. Math., **16**, 49 (2023).
- [3] T. Siebadji, O. Daniel, M. Ziegler, O. Crégut, P. Gilliot, C. Morhain, A. Balocchi, M. Gallart. J. Appl. Phys., **138**, 054303 (2025).
- [4] M. Perlangeli, F. Proietto, F. Parmigiani, F. Cilento. J. Optical Soc. Am. B, **41**, 127 (2024).
- [5] H.P. Piyathilaka, R. Sooriyagoda, H. Esmailpour, V.R. Whiteside, T.D. Mishima, M.B. Santos, I.R. Sellers, A.D. Bristow. Sci Rep., **11**, 10483 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-89815-y
- [6] I.A. Akimov, M. Salewski, I.V. Kalitukha, S.V. Poltavtsev, J. Debus, D. Kudlacik, V.F. Sapega, N.E. Kopteva, E. Kirstein, E.A. Zhukov, D.R. Yakovlev, G. Karczewski, M. Wiater, T. Wojtowicz, V.L. Korenev, Yu.G. Kusrayev, M. Bayer. Phys. Rev. B, **96**, 184412 (2017).

- [7] L.V. Kotova, D.D. Belova, R. Andre, H. Mariette, V.P. Kochereshko. Semiconductors, **57**, 161 (2023).
- [8] M. Deresza, M. Wiaterb, G. Karczewskib, T. Wojtowiczbc, J. Łusakowska. Acta Phys. Polon. A, **132**, 390 (2017).
- [9] Ue. Kalsoom, R. Yi, J. Qu, L. Liu. Front. Phys., **9**, 612070 (2021). DOI: 10.3389/fphy.2021.612070
- [10] A. Romeo, E. Artegiani. Energies, **14** (6), 1684 (2021). <https://doi.org/10.3390/en14061684>
- [11] S. Permogorov, A. Reznitsky. J. Luminesc., **52**, 201 (1992).

Редактор А.Н. Смирнов

Investigation of the temperature dependence of the exciton and free carrier contribution to the luminescence of the CdTe/CdMgTe heterostructure

V.F. Agekyan¹, S.Yu. Verbin¹, A.Yu. Serov¹,
N.G. Filosofov¹, I.V. Shtrom^{1,2}

¹ St. Petersburg State University,
194034 St. Petersburg, Russia

² Institute of Analytical Instrumentation,
198095 St. Petersburg, Russia

Abstract The luminescence spectra and excitation luminescence spectra in the above-barrier energy region of the CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te heterostructure with a single quantum well at temperatures of 5–100 K have been studied. It has been shown that the luminescence at the maximum of the barrier band is determined by the relaxation of excitons over the entire temperature range, while free carriers contribute significantly to the luminescence of the quantum well and the low-energy side of the barrier band at low temperatures.