

08

Зависимость кинетики люминесценции экситонов в гетероструктуре CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te от толщины квантовых ям и температуры

© А.Ю. Серов¹, Н.Г. Философов¹, В.Ф. Агемян¹, С.Ю. Вербин¹, А.А. Калиничев¹,
О.С. Комарова², И.В. Штром^{1,3}

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

² Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

³ Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: n.filosofov@spbu.ru, i.shtorm@spbu.ru

Поступило в Редакцию 12 ноября 2025 г.

В окончательной редакции 12 декабря 2025 г.

Принято к публикации 12 декабря 2025 г.

Исследована люминесценция гетероструктуры CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te, содержащей четыре квантовые ямы, в диапазоне температур 5–140 К. Установлены зависимости времени затухания люминесценции квантовых ям CdTe от их толщины и температуры.

Ключевые слова: квантовые ямы CdTe, экситон, люминесценция с временным разрешением.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.08.62678.20569

Кинетика люминесценции является одной из ключевых характеристик квантовой гетероструктуры, в значительной мере определяющей возможности ее практического использования как элемента оптоэлектронных устройств. Люминесценция с временным разрешением изучалась на широком круге гетероструктур, в основном относящихся к группам III–V (см, например, [1–7]). Предмет настоящей работы — исследование влияния на кинетику экситонной люминесценции квантовых ям CdTe их толщины и температуры.

Зависимость времени затухания экситонной люминесценции τ от толщины квантовых ям и температуры теоретически рассмотрена в работе [1]. Показано, что

$$\tau \propto E_B^{-1} \Delta(T)/r(T), \quad (1)$$

где E_B — энергия связи электрона и дырки в экситоне, $\Delta(T)$ — величина однородного уширения экситонной линии, $r(T) = 1 - \exp[-(\Delta(T)/k_B T)]$ — доля экситонов в пределах $\Delta(T)$, которая участвует в излучательной рекомбинации, величина E_B зависит от толщины квантовой ямы.

Свойства $\Delta(T)$ теоретически изучены в работах [1,8]. В [8] рассмотрены различные вклады в однородную ширину линий экситонов в зависимости от толщины квантовой ямы CdTe/CdZnTe. Показано, что рассеяние экситонов на акустических фонах заметно усиливается с уменьшением толщины квантовых ям начиная с 7 nm, тогда как экситон-экситонное рассеяние, напротив, ослабляется.

Объектом является гетероструктура CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te с квантовыми ямами толщиной 1.3, 2.6, 5.2 и 10.4 nm (далее QW1, QW2, QW3, QW4 соответственно), выращенная на подложке GaAs(100). Барьерные слои толщиной 19.8 nm формировались

методом молекулярно-пучковой эпитаксии, квантовые ямы — методом атомного наслаивания.

Образцы помещались в гелиевый криостат замкнутого цикла SHI-4-1 (Janis Research Co., Inc.). Люминесценция гетероструктуры в непрерывном режиме возбуждалась гелий-кадмиевым лазером Plasma Lab HCL-49M с энергией фотонов 2.82 eV, спектры регистрировались с применением монохроматора МДР-204 (ЛОМО Фотоника). При измерении кинетики люминесценции образцы помещались в гелиевый криостат замкнутого цикла Montana Instruments. Для возбуждения люминесценции использовался лазер PicoQuant LDH-1B-450-B (энергия фотонов 2.75 eV, средняя мощность 16 μ W, частота следования импульсов 1 MHz, длительность импульса 50 ps). Диаметр лазерного пятна на образце был равен 1.3 μ m, пиковая плотность мощности в импульсе составляла $1.5 \cdot 10^7$ W/cm². Спектральное разделение сигнала осуществлялось с помощью монохроматора МДР-41 (ЛОМО Фотоника). Измерение кинетики люминесценции проводилось методом коррелированного по времени счета одиночных фотонов с использованием системы ECOPRS-CCR-SW/TW-85 (SCONTEL, Москва, Россия). Система, построенная на основе криостата замкнутого цикла с системой гашения вибраций (Montana Cryostation), регистрирует фотоны с помощью сверхпроводящих детекторов одиночных фотонов в сочетании с одномодовым оптоволоком. Временное разрешение модуля детектирования составляет 50 ps. Реализация метода коррелированного по времени счета одиночных фотонов осуществлялась с использованием потокового цифрового преобразователя времени TimeTagger Ultra (Swabian Instruments, Штутгарт, Германия). Общее время функции отклика системы составляло около 100 ps.

Спектр люминесценции квантовых ям QW1–4 и барьера представлен на рис. 1. При низких темпера-

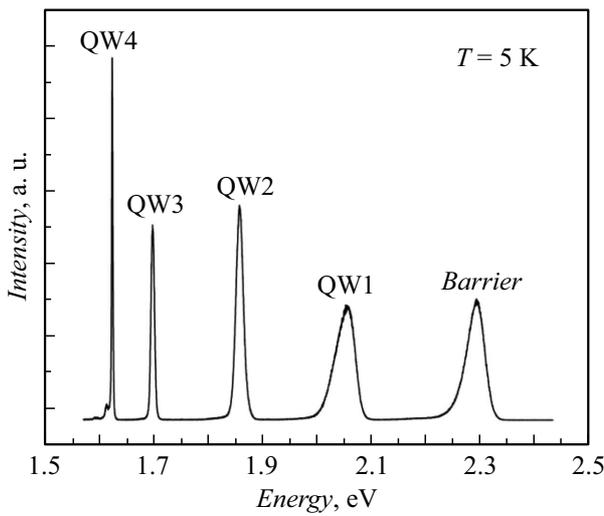


Рис. 1. Спектр люминесценции квантовых ям и барьера гетероструктуры CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te, полученный при непрерывном возбуждении.

турах свободные экситоны барьера либо релаксируют в квантовые ямы, либо локализируются на случайных потенциалах твердого раствора Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te. В этом случае интенсивность и кинетика люминесценции барьера определяется большим временем жизни локализованных экситонов. При росте температуры локализация экситонов в барьере ослабляется, это приводит к тушению люминесценции барьера и уменьшению времени ее затухания (рис. 2, *a*). Что касается люминесценции квантовых ям, то ее затухание с ростом температуры имеет существенно другой характер. Рис. 2, *b* иллюстрирует изменение кинетики люминесценции квантовой ямы QW3. При температуре вплоть до 40 K на кинетических кривых проявляются два экспоненциальных участка. Соответствующие им времена затухания τ_1 и τ_2 при $T = 5$ K составляют 400 и 1150 ps, при этом медленная компонента имеет интенсивность на два порядка меньше, чем быстрая. Возможный вклад в медленную компоненту τ_2 связан с излучением экситонов, локализованных на мелких примесях. Наряду с этим другой возможной причиной увеличения времени жизни люминесценции QW3 является туннельная излучательная рекомбинация электронов и дырок, локализованных в уширенных участках квантовой ямы. В этом случае кинетика люминесценции определяется тем, насколько удалены друг от друга эти участки. При повышении температуры вклад медленной компоненты уменьшается в связи с ослаблением локализации, в итоге затухание люминесценции при температурах выше 40 K описывается одной экспонентой.

Зависимости времени затухания люминесценции τ_1 квантовых ям QW1–4 от их толщины и температуры, находящиеся в согласии с теоретическими представлениями, показаны на рис. 3 и 4. Наименьшее время затухания люминесценции τ_1 при температурах ниже 30 K

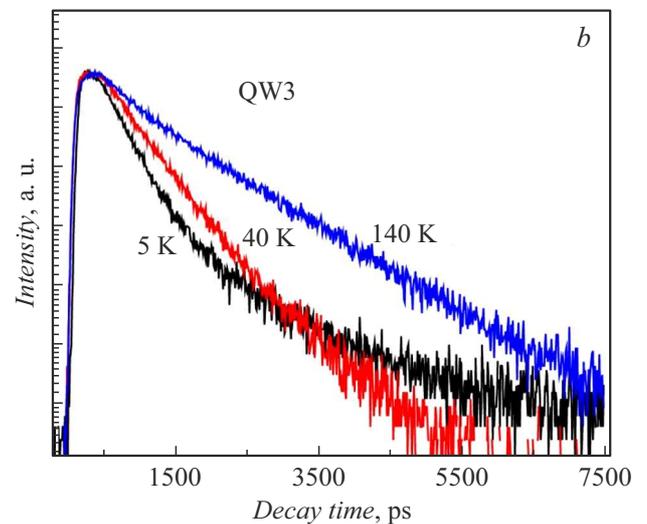
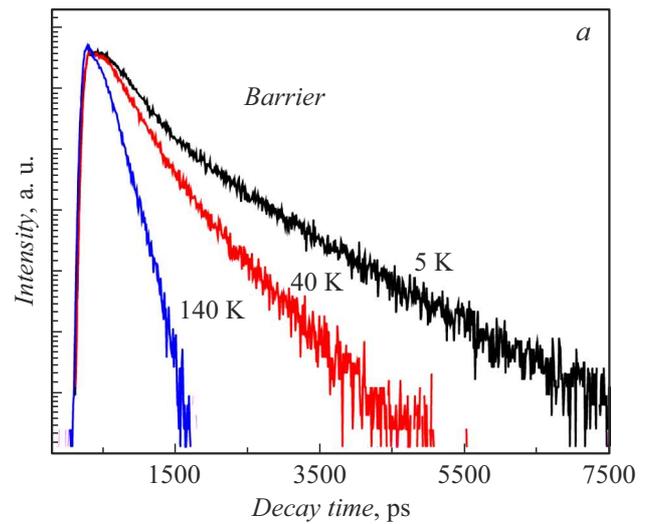


Рис. 2. Кинетика затухания люминесценции квантовой ямы барьера (*a*) и QW3 (*b*).

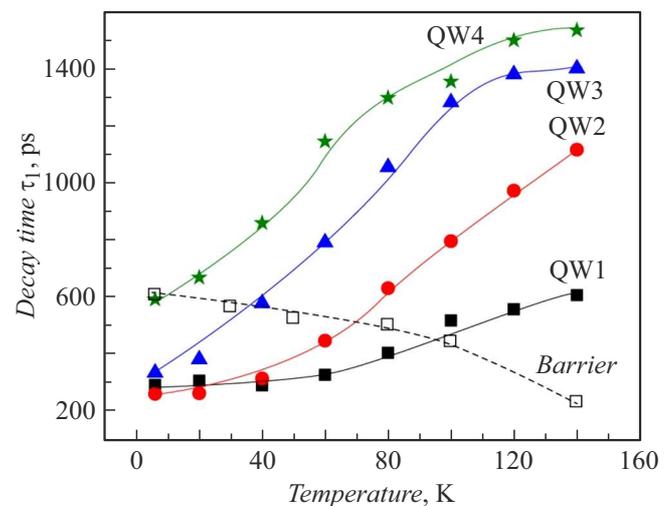


Рис. 3. Температурные зависимости времен затухания люминесценции барьера и быстрой компоненты τ_1 люминесценции квантовых ям QW1–4.

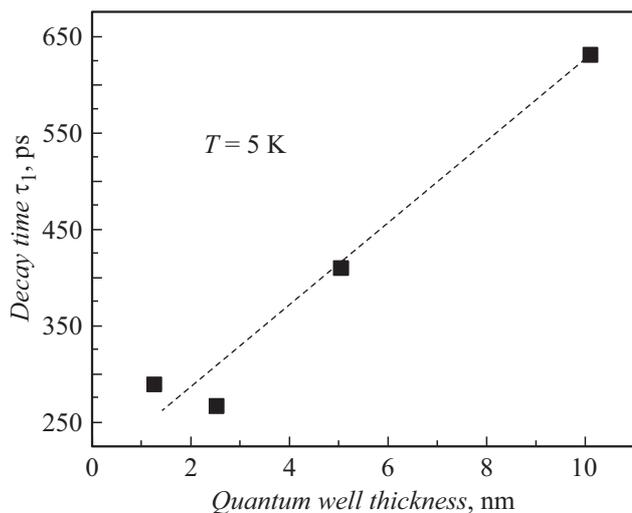


Рис. 4. Зависимость времени затухания люминесценции τ_1 от толщины квантовой ямы при температуре 5 К.

наблюдается в QW2. Это можно объяснить наибольшей энергией связи экситона в указанной квантовой яме.

Обращают на себя внимание слабая зависимость величины τ_1 от толщины квантовых ям QW1–3 при $T < 40$ К и усиление этой зависимости при $T > 40$ К. На наш взгляд, это связано с влиянием гетерограниц QW1–3, вблизи которых наиболее вероятно присутствие дефектов, влияющих на время затухания люминесценции. Это влияние сильнее проявляется в тонких ямах, вследствие чего величина τ_1 мало изменяется для QW1 и QW2 при температурах ниже 60 и 40 К соответственно. При более высоких температурах происходит увеличение τ_1 , которое определяется соотношением $\Delta(T)/r(T)$ в (1).

Обращает на себя внимание изменение производной зависимости τ_1 от температуры в QW3 и QW4 при $T > 100$ К. На наш взгляд, это связано с увеличением подвижности экситонов, что приводит к усилению их гашения на центрах безызлучательной рекомбинации и соответственно к замедлению роста τ_1 . Подвижность экситонов зависит от толщины квантовой ямы, этим можно объяснить отсутствие замедления роста τ_1 в QW1 и QW2 в том же температурном интервале.

В работе [9] исследовалась кинетика люминесценции квантовых ям CdTe/Cd_{0.75}Mn_{0.25}Te. По данным этой работы время затухания люминесценции при уменьшении толщины квантовой ямы от 30 до 3.4 nm изменялось лишь незначительно (от 170 до 140 ps) и слабо зависело от температуры. Эти данные расходятся с нашими результатами как по величинам времен затухания в целом, так и по их изменению в зависимости от толщины квантовой ямы. Причиной такого расхождения является, видимо, то, что плотность мощности импульсного возбуждения в нашем случае на порядки выше использованной в работе [9]. При низком уровне возбуждения кинетика люминесценции в большой степени определяется переносом энергии на центры безызлучательной

рекомбинации. Об этом свидетельствует, в частности, наблюдавшееся в [9] резкое уменьшение времени затухания люминесценции квантовой ямы толщиной 5 nm при температурах выше 50 К. При сильном возбуждении безызлучательные центры насыщаются, и этот канал диссипации энергии перестает влиять на кинетику затухания экситонной люминесценции.

Сравнение наших результатов с данными, полученными в работах [1,2], показывает, что характерные величины времен затухания люминесценции в квантовых ямах CdTe и GaAs и изменение этих времен в зависимости от толщины квантовых ям и температуры близки друг к другу.

Благодарности

Кинетика люминесценции измерялась на оборудовании ресурсного центра „Лазерные и оптические методы исследования вещества“ Научного парка СПбГУ.

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] J. Feldmann, G. Peter, E.O. Göbel, P. Dawson, R. Moore, C. Foxon, R.J. Elliot, Phys. Rev. Lett., **59**, 2337 (1987). DOI: 10.1103/PhysRevLett.59.2337
- [2] H. Jeong, I.-J. Lee, J.-C. Seo, M. Lee, D. Kim, S.-J. Park, S.-H. Park, U. Kim, Solid State Commun., **85**, 111 (1993). DOI: 10.1016/0038-1098(93)90357-S
- [3] W. Chen, V.F. Aguekian, N.N. Vassiliev, A.Yu. Serov, N.G. Filosofov, J. Chem. Phys., **123**, 124707 (2005). DOI: 10.1063/1.2046667
- [4] В.Ф. Агемян, I. Akai, Н.Н. Васильев, Т. Karasawa, G. Karczewski, А.Ю. Серов, Н.Г. Философов, ФТТ, **49** (6), 1117 (2007). [V.F. Agekian, I. Akai, N.N. Vasil'ev, T. Karasawa, G. Karczewski, A.Yu. Serov, N.G. Filosofov, Phys. Solid State, **49** (6), 1175 (2007). DOI: 10.1134/S106378340706025X].
- [5] O. Labeau, P. Tamarat, B. Lounis, Phys. Rev. Lett., **90**, 257404 (2003). DOI: 10.1103/PhysRevLett.90.257404
- [6] W. Liu, C. Mounir, G. Rossbach, T. Schimpke, A. Avramescu, H.-J. Lugauer, M. Strassburg, U. Schwarz, B. Deveaud, G. Jacopin, Appl. Phys. Lett., **112**, 052106 (2018). DOI: 10.1063/1.5009728

- [7] Е.А. Европейцев, Ю.М. Серов, Д.В. Нечаев, В.Н. Жмерик, Т.В. Шубина, А.А. Торопов, Письма в ЖЭТФ, **113** (8), 507 (2021). DOI: 10.31857/S1234567821080036 [E.A. Evropeitsev, Yu.M. Serov, D.V. Nechaev, V.N. Jmerik, T.V. Shubina, A.A. Toropov, JETP Lett., **113** (8), 504 (2021). DOI: 10.1134/S0021364021080038].
- [8] L.C. Andreani, F. Tassone, F. Bassani, Solid State Commun., **77**, 641 (1991). DOI: 10.1016/0038-1098(91)90761-J
- [9] A. Polhmann, R. Hellmann, E.O. Göbel, D.R. Yakovlev, W. Ossau, A. Waag, R.N. Bicknell-Tassius, G. Landwehr, Appl. Phys. Lett., **61**, 2929 (1992). DOI: 10.1063/1.108025