18

Температурная зависимость интенсивности люминесценции гетероструктуры $CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te$ при надбарьерном возбуждении

© В.Ф. Агекян[1], М.Э. Лабзовская[1], А.Ю. Серов[1], Н.Г. Философов[1¶], G. Karczewski[2]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия
[2] Institute of Physics PAN,
Warsaw, Poland
[¶]e-mail: n.filosofov@spbu.ru

Поступила в редакцию 25.04.2025 г.
В окончательной редакции 25.04.2025 г.
Принята к публикации 26.05.2025 г.

Исследована температурная зависимость люминесценции квантовой ямы $CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te$ в диапазоне температур 5−200 K. Установлено, что при подбарьерном возбуждении эта зависимость характеризуется двумя каналами безызлучательной рекомбинации с энергиями активации 0.01 и 0.037 eV. При надбарьерном возбуждении в температурной зависимости интенсивности люминесценции квантовой ямы наблюдается особенность, связанная с делокализацией экситонов в барьере $Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te$. Безызлучательная рекомбинация в барьере характеризуется двумя значениями энергии активации: 0.0065 и 0.046 eV. Предложена модель, описывающая влияние температуры на интенсивность люминесценции квантовой ямы и барьера, в которой учитываются делокализация экситонов в барьере и их захват на центры безызлучательной рекомбинации.

Ключевые слова: полупроводники II−VI, гетероструктуры, квантовые ямы, люминесценция, перенос возбуждения.

DOI: 10.61011/OS.2025.07.61111.7888-25

Введение

Свойства люминесценции являются одной из главных характеристик гетероструктур самого разного типа, которая в значительной степени определяет возможности их практического применения [1–8]. Температурная зависимость интенсивности люминесценции гетероструктуры связана с каналами тушения люминесценции, такими как термостимулированный перенос возбуждения на другие элементы гетероструктуры и/или на центры безызлучательной рекомбинации. Эти центры опустошаются при достижении определенной температуры и становятся способными захватывать экситоны и свободные носители. Опустошение центров характеризуется энергией их активации, вследствие чего температурная зависимость тушения люминесценции квантовой ямы (КЯ) должна описываться экспоненциальными функциями. В настоящей работе исследована температурная зависимость люминесценции гетероструктуры с одиночной КЯ CdTe, ограниченной барьерами $Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te$, при различных способах возбуждения люминесценции и построена модель, позволяющая адекватно описать экспериментальные результаты.

Детали эксперимента

Барьерные слои гетероструктуры $CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te$ выращены методом MBE; КЯ толщиной 9.5 nm выращена методом атомного наслаивания; подложкой является (100) GaAs. Люминесценция в диапазоне температур 5−200 K возбуждалась непрерывными лазерами с энергиями фотонов 1.96 eV (плотность мощности 1 W/cm^2) и 2.41 eV (плотность мощности $W = 5$ и 95 W/cm^2).

Результаты и их обсуждение

При повышении температуры от 5 до 100 K интенсивность люминесценции КЯ CdTe ослабляется в 2 раза, в то время как люминесценция барьера $Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te$ деградирует полностью (рис. 1).

В работе [9] показано, что интегральную интенсивность люминесценции КЯ можно описать выражением, содержащим две экспоненциальные функции:

$$I_1(T) = \frac{I_0}{1 - a_1 e^{-E_1/kT} + a_2 e^{-E_2/kT}}. \quad (1)$$

Эта модель предполагает наличие двух центров безызлучательной релаксации с активационными энергиями E_1 и E_2, которые значительно отличаются друг от друга. Подобный подход неоднократно использовался ранее при исследовании гетероструктур типа II−VI и III−V [10–13]. В нашем случае не только определены параметры безызлучательных центров, но и учтен эффект термической делокализации экситонов в барьере.

Температурная зависимость интенсивности люминесценции КЯ при подбарьерном возбуждении непрерывным лазером с энергией фотонов 1.96 eV при плотности мощности $W = 1$ W/cm^2 хорошо аппроксимируется функцией вида (1) с параметрами $E_{Q1} = 0.01$ eV,

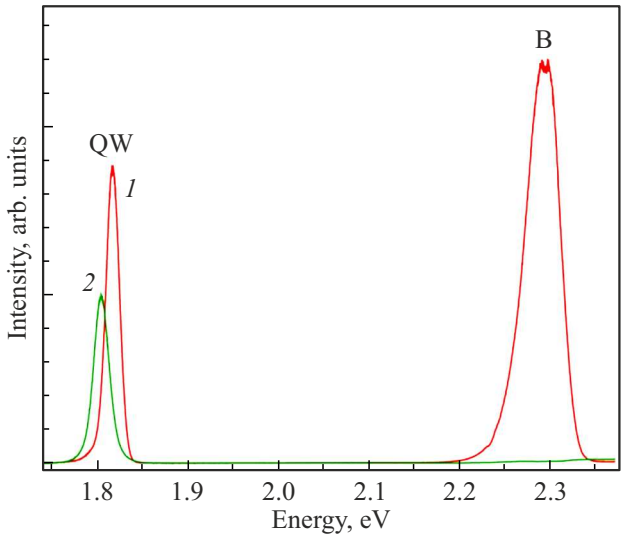

Рис. 1. Спектры люминесценции КЯ (QW) и барьера B гетероструктуры CdTe/Cd$_{0.6}$Mg$_{0.4}$Te при $T = 5$ K (*1*) и $T = 100$ K (*2*).

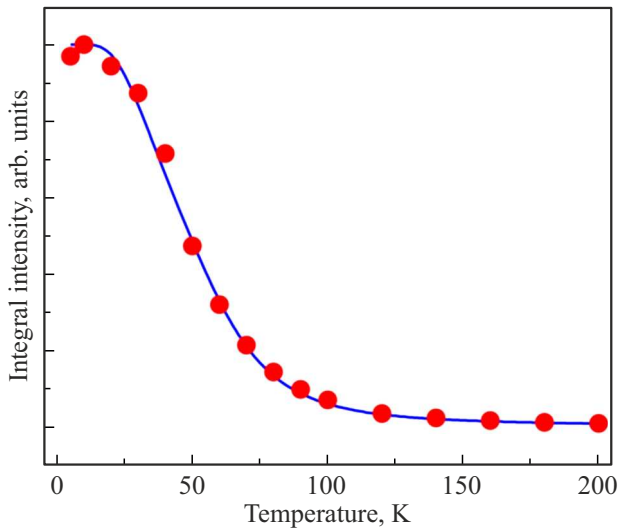

Рис. 2. Температурная зависимость интегральной интенсивности люминесценции КЯ CdTe/Cd$_{0.6}$Mg$_{0.4}$Te при подбарьерном возбуждении с энергией 1.96 eV. Точки — эксперимент, сплошная кривая — аппроксимация формулой (1) со значениями $E_{Q1} = 0.01$ eV, $E_{Q2} = 0.0037$ eV, $a_{Q1} = 9$, $a_{Q2} = 940$.

$E_{Q2} = 0.0037$ eV, $a_{Q1} = 9$, $a_{Q2} = 940$ (рис. 2), энергии E_{Q1} и E_{Q2} характеризуют каналы безызлучательной рекомбинации в КЯ.

Температурная зависимость интенсивности люминесценции барьера также может быть описана экспоненциальной функцией вида (1). Проведенные расчеты дают для барьера $E_{B1} = 0.0065$ eV, $E_{B2} = 0.046$ eV, $a_{B1} = 3$ и $a_{B2} = 12\,000$. (рис. 3). Можно считать, что эти активационные энергии не связаны с переносом экситонов из барьера в КЯ, поскольку объем КЯ много меньше объема барьера. Они характеризуют делокализацию экситонов в барьере.

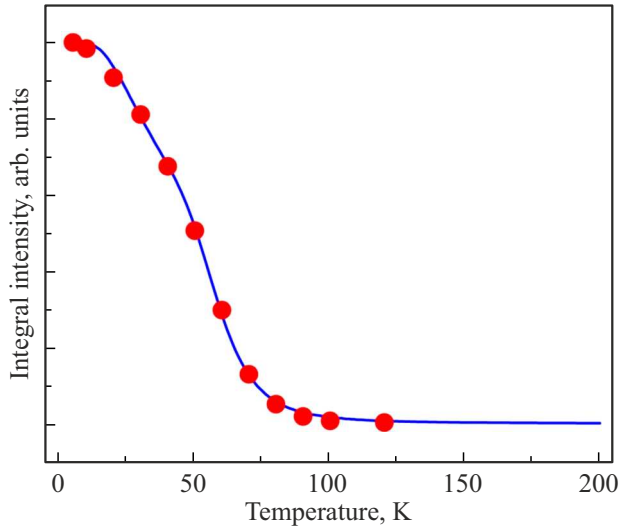

Рис. 3. Температурная зависимость интенсивности люминесценции барьера Cd$_{0.6}$Mg$_{0.4}$Te при ее возбуждении с энергией 2.41 eV при плотности мощности возбуждения $W = 5$ W/cm^2. Точки — эксперимент, сплошная кривая — аппроксимация формулой вида (1) с $E_{B1} = 0.0065$ eV, $E_{B2} = 0.046$ eV, $a_{B1} = 3$ и $a_{B2} = 12\,000$.

Температурная зависимость интенсивности люминесценции КЯ при надбарьерном возбуждении существенно отличается от зависимости при подбарьерном возбуждении. Она имеет максимум около $T = 50$ K, что не описывается в рамках модели, содержащей две экспоненты. Для адекватного описания этой зависимости в условиях надбарьерного возбуждения следует рассматривать не только два канала безызлучательной рекомбинации КЯ, но и влияние температуры на скорость переноса возбуждения из барьера в КЯ. При низкой температуре вследствие локализации экситонов в барьере, который является твердым раствором, ограничена релаксация экситонов из барьерных слоев в КЯ. Повышение температуры инициирует образование свободных экситонов в барьере и ускорение их перехода в КЯ. Этот процесс, по нашему мнению, определяется энергиями E_{B1} и E_{B2}, измеренными по температурному затуханию люминесценции барьера. Кроме того, при температурном росте концентрации свободных экситонов в барьере увеличивается и вероятность их захвата на центры безызлучательной рекомбинации.

Таким образом, модель, адекватно описывающая температурную зависимость люминесценции КЯ, учитывает

1) воздействие на люминесценцию КЯ центров безызлучательной рекомбинации, которые характеризуются энергиями активации E_{Q1} и E_{Q2}, полученными из эксперимента в условиях подбарьерного возбуждения (рис. 2),

2) делокализацию экситонов барьера, которая определяется энергиями активации E_{B1} и E_{B2}, полученными из данных по температурному затуханию люминесценции барьера (рис. 3),

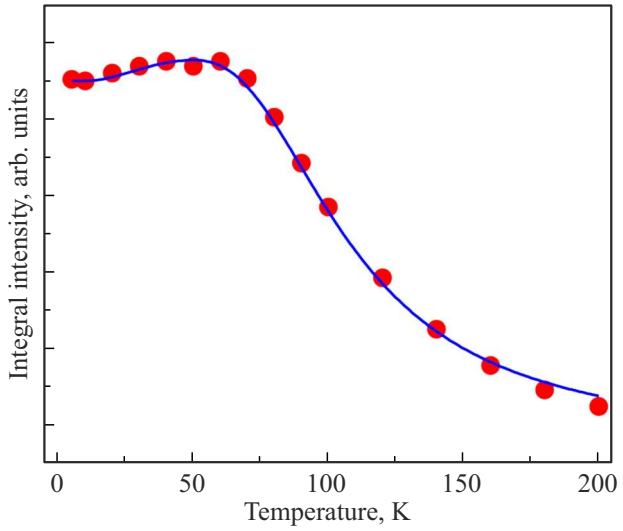

Рис. 4. Температурная зависимость интегральной интенсивности люминесценции КЯ $CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te$ при надбарьерном возбуждении с энергией 2.4 eV при плотности мощности 5 W/cm^2. Точки — эксперимент, сплошная кривая — аппроксимация формулой (2). $E_{Q1} = 0.01$ eV, $E_{Q2} = 0.0037$ eV, $a_{Q1*} = 0.5$, $a_{Q2*} = 60$, $E_{B1} = 0.0065$ eV, $E_{B2} = 0.046$ eV, $a_{B1} = 3$ и $a_{B2} = 12\,000$, $E_3 = 0.039$ eV, $a_5 = 3000$.

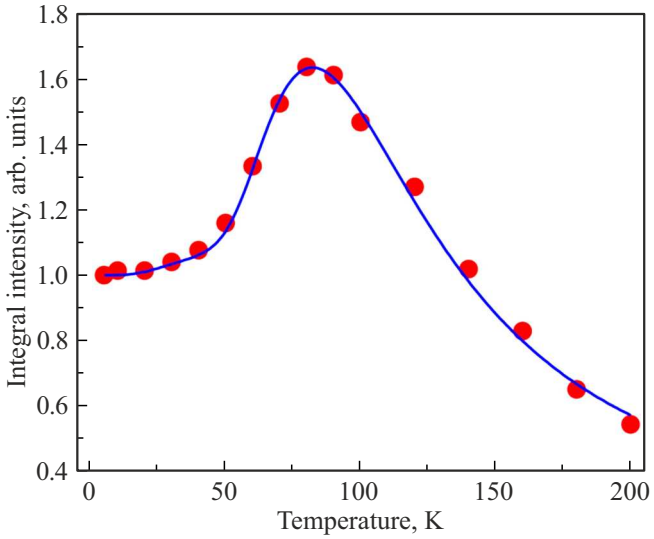

Рис. 5. Температурная зависимость интегральной интенсивности люминесценции КЯ $CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te$ при надбарьерном возбуждении с энергией 2.41 eV при плотности мощности 95 W/cm^2. Точки — эксперимент, сплошная кривая — аппроксимация формулой (2) со значениями параметров, указанными в тексте работы.

3) температурное увеличение в барьерном слое концентрации свободных экситонов, которые релаксируют как в КЯ, так и на центры безызлучательной рекомбинации в барьере. Эти процессы характеризуется активационной энергией E_3, которая является подгоночным параметром, и константой a_3.

Итак, температурная зависимость интенсивности люминесценции КЯ $CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te$ при надбарьерном возбуждении (рис. 4) описывается следующими выражениями:

$$I_2(T) = \frac{I_0 + A\left(a_{B1}e^{-\frac{E_{B1}}{kT}} + a_{B2}e^{-\frac{E_{B2}}{kT}}\right)I_3(T)}{1 + a_{Q1*}e^{-\frac{E_{Q1}}{kT}} + a_{Q2*}e^{-\frac{E_{Q2}}{kT}}}, \quad (2)$$

где $A = 0.18$, $I_0 = 1$, $E_{Q1} = 0.01$ eV, $E_{Q2} = 0.0037$ eV, $a_{Q1*} = 0.5$, $a_{Q2*} = 60$, $E_{B1} = 0.0065$ eV, $E_{B2} = 0.046$ eV, $a_{B1} = 3$, $a_{B2} = 12\,000$, $E_3 = 0.039$ eV, $a_3 = 3000$.

Следует отметить, что в выражении (2) ожидаемо уменьшились значения a_{Q1*} и a_{Q2*}. Причиной этого является насыщение центров безызлучательной рекомбинации при увеличении количества экситонов и носителей, попадающих в КЯ. Для подтверждения этого предположения мы увеличили плотность мощности надбарьерного возбуждения до $W = 95$ W/cm^2 и получили температурную зависимость интегральной интенсивности люминесценции КЯ $CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te$, представленную на рис. 5.

Как и следовало ожидать, коэффициенты a уменьшились, при этом значения E не изменились. Новый набор параметров в выражении (2) выглядит следующим образом: $E_{Q1} = 0.01$ eV, $E_{Q2} = 0,0037$ eV, $a_{Q1*} = 0.3$, $a_{Q2*} = 40$, $E_{B1} = 0.0065$ eV, $E_{B2} = 0.046$ eV, $a_{B1} = 0.51$ и $a_{B2} = 4000$. $E_3 = 0.039$ eV, $a_3 = 1100$, $A = 0.33$.

Итак, исследовано влияние температуры и уровня возбуждения на интенсивность люминесценции КЯ $CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te$ и предложена модель, адекватно описывающая экспериментальные результаты.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

[1] Fang, Y., Wang, L., Sun, Q.T. Lu, Zh. Deng, Z. Ma, Y. Jiang, H. Jia, W. Wang, J. Zhou, H. Chen. Sci. Rep., **5**, 12718 (2015).
[2] Guang Pu, Xue Yu, Guang Pu, Fen Xi. Chinese PMID, **27** (4), 625-8 (2007).
[3] T. Wendav, I.A. Fischer, M. Virgilio, G. Capellini, F. Oliveira, M.F. Cerqueira, A. Benedetti, S. Chiussi, P. Zaumseil, B. Schwartz, K. Busch, J. Schulze. Phys. Rev. B, **94**, 245304 (2016).
[4] G.S. Buller, S.J. Fancey, J.S. Massa, A.C. Walker, S. Cova, A. Lacaita. Appl. Opt., **35** (6), 916-921 (1996).
[5] G. Martino, G. Pistone, S. Savasta, O. Di Stefano, R. Girlanda. J. Phys.: Condens. Matter, **18** (8), 2367–2378 (2006). DOI: 10.1088/0953-8984/18/8/002

[6] Z. Sobiesierski, S.A. Clark, R.H. Williams, A. Tabata, T. Benyattou et al. Appl. Phys. Lett., **58**, 1863 (1991). DOI: 10.1063/1.105055
[7] A. Tabata, T. Benyattou, G. Guillot, M. Gendry, G. Hollinger, P. Viktorovitch. Appl. Phys. Lett., **58**, 1863 (1991). DOI: 10.1063/1.105055
[8] P.N. Saeta, A.C. Gallagher. Phys. Rev. B, **55** (7), 4563 (1997).
[9] A.N. Reznitsky, A.A. Klochikhin, M.V. Eremenko. Semiconductors, **48**, 332 (2014).
[10] Н.Г.‘Философов, Г.В. Будкин, В.Ф. Агекян, G. Karczewski, А.Ю. Серов, С.Ю. Вербин, И.В. Штром, А.Н. Резницкий. ФТП, **57**, 555 (2023).
[11] Н.Г. Философов, В.Ф. Агекян, С.Ю. Вербин, А.Н. Резницкий, А.Ю. Серов, И.В. Штром, И.В. Илькив, Р.Р. Резник, Г.Э. Цырлин. ФТТ, **67**, 28 (2025).
[12] 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 Polytechnical University J.: Physics and Mathematics, **16**, 49 (2023). DOI: 10.18721/JPM.161.108
[13] Y. Fang, L. Wang, Q. Sun, T. Lu, Zh. Deng, Z. Ma, Y. Jiang, H. Jia, W. Wang, J. Zhou, H. Chen. Sci. Rep., **5**, 12718 (2015).