

09,12

Оптические свойства гетероструктуры CdTe/CdMgTe, легированной различными способами

© В.Ф. Агекян¹, С.Ю. Вербин¹, G. Karczewski², А.Ю. Серов¹, Н.Г. Философов^{1,¶}, И.В. Штром¹

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

² Institute of Physics, Polish Academy of Science, Warsaw, Poland

¶ E-mail: n.filosofov@spbu.ru

Поступила в Редакцию 28 октября 2022 г.

В окончательной редакции 28 октября 2022 г.

Принята к публикации 1 ноября 2022 г.

Исследованы спектры отражения и люминесценции гетероструктуры CdTe/CdMgTe, легированные йодом, который вводился либо в барьерный слой, либо в широкую квантовую яму CdTe. Показано, как способ и уровень легирования влияет на спектры и на температурную зависимость интенсивность экситона квантовой ямы.

Ключевые слова: гетероструктура CdTe/CdMgTe, легирование, экситон, люминесценция.

DOI: 10.21883/FTT.2023.02.54309.509

Гетероструктуры CdTe/Cd_{1-x}Mg_xTe являются объектом многочисленных исследований (см, например, [1–5]), поскольку при замещении кадмия магнием постоянная кристаллической решетки изменяется незначительно, и это позволяет сформировать интерфейс хорошего качества. В настоящей работе исследованы спектры отражения и люминесценции серии гетероструктур CdTe/Cd_{1-x}Mg_xTe, содержащих одну квантовую яму (КЯ) CdTe шириной 100 nm и легированных различными способами. Экситонный резонанс барьерного слоя находится в области 2.1 eV, что соответствует $x = 0.3$. Легирование донорами производилось с помощью источника молекул ZnI₂. В образцах #2 и 3 теллур замещался йодом в слоях толщиной 1 монослой и 5 монослоев соответственно. Эти слои формировались в барьере на расстоянии 15 nm от интерфейса. В образцах #4–6 равномерно легировалась КЯ CdTe при температурах источника ZnI₂ 130, 140 и 150°C. При таком способе легирования объемных образцов CdTe указанные температуры соответствуют концентрации доноров $4 \cdot 10^{15}$, $1 \cdot 10^{16}$ и $4 \cdot 10^{16}$ cm⁻³. Был также изготовлен нелегированный контрольный образец #1.

Радиус основного состояния экситона в CdTe составляет 6.5 nm, так что в исследованных структурах имеет место режим слабого размерного квантования. В этом случае ограничение в направлении роста гетероструктуры влияет на движение экситона как целого.

На рис. 1–3 представлены спектры отражения образцов #1–5, в которых контур резонанса свободного экситона (FE) является обращенным. Это свидетельствует о том, что безэкситонный слой около интерфейса КЯ имеет значительную толщину, вследствие чего КЯ для экситона эффективно сужается. В спектрах наблюдается система полос, примыкающая к контуру FE со стороны

высоких энергий, которая соответствует квантованию величины волнового вектора экситона. По мере повышения уровня легирования эти полосы уширяются. В спектрах отражения образцов #3–5 наблюдаются особенности с низкоэнергетической стороны от контура FE, которые проявляются и в спектрах излучения.

В спектрах люминесценции нелегированного и слабо легированного образцов #1 и 2 наблюдается только полоса FE (рис. 1). В спектрах люминесценции образцов #4 и 5 наряду с полосой FE присутствует узкая полоса экситона, связанного на доноре йода, которая

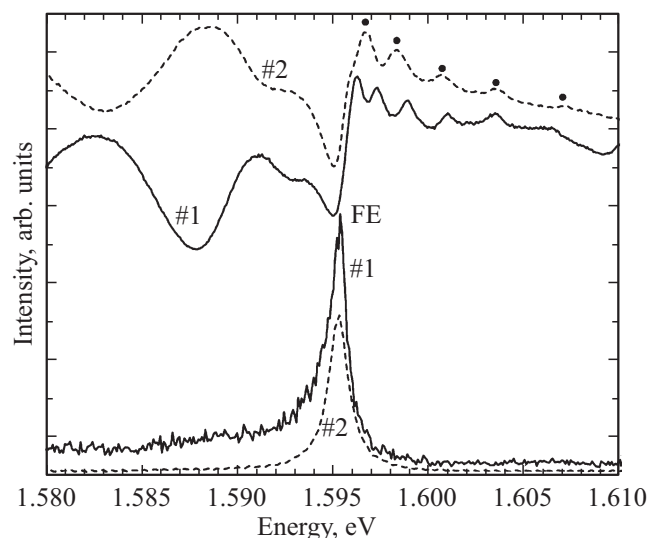


Рис. 1. Спектры отражения и люминесценции образцов #1 и 2, $T = 5$ K. FE — свободный экситон, точками на рис. 1–3 обозначены полосы, возникающие вследствие квантования величины волнового вектора экситона.

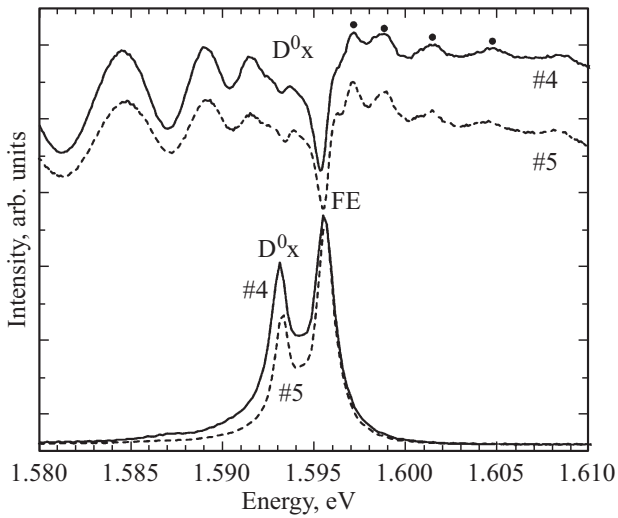


Рис. 2. Спектры отражения и люминесценции образцов #4 и 5, $T = 5$ К. FE — свободный экситон, D_x^0 — экситон, связанный на нейтральном доноре.

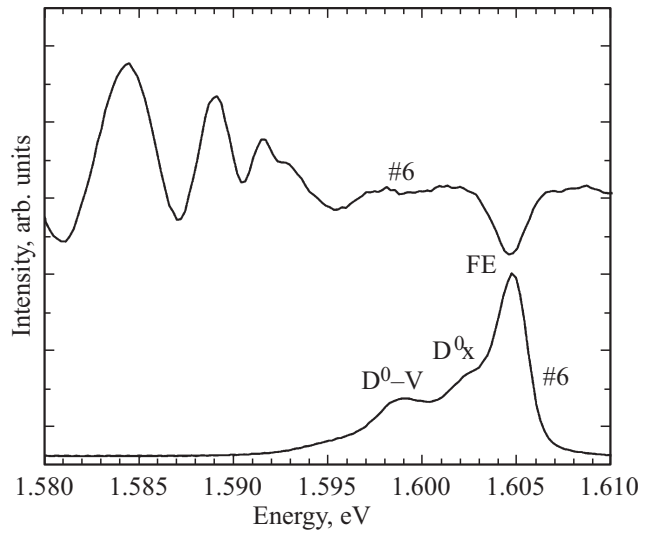


Рис. 4. Спектры отражения и люминесценции образца #6, $T = 5$ К. FE — свободный экситон, D_x^0 — экситон, связанный на нейтральном доноре, D^0-V — предположительно переход донор-валентная зона.

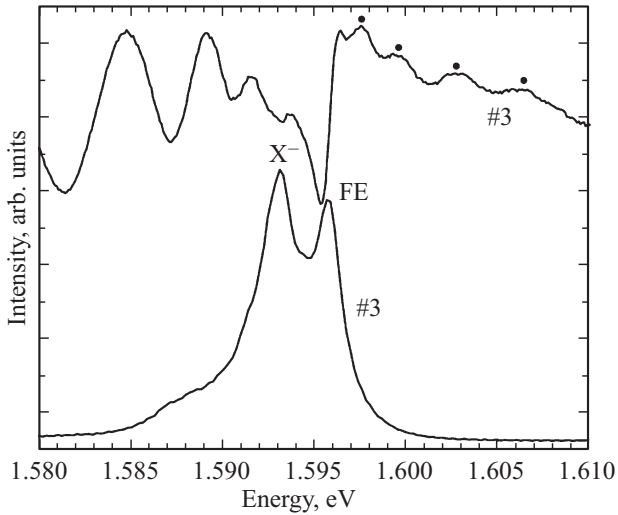


Рис. 3. Спектры отражения и люминесценции образца #3, $T = 5$ К. FE — свободный экситон, X^- — трион.

согласуется с вышеуказанной особенностью в спектрах отражения (рис. 2). Ее положение относительно энергии FE соответствует известным данным для объемных кристаллов CdTe:I [6]. В люминесценции образца #3 также присутствует полоса, совпадающая со слабой особенностью спектра отражения, которая заметно уширена по сравнению с полосами связанных экситонов в спектрах образцов #4 и 5 (рис. 3). Поскольку в КЯ образца #3 присутствует значительное количество свободных электронов, перешедших с доноров барьерного слоя, эту полосу естественно интерпретировать как излучение отрицательно заряженного триона, свойства которого изучены в работах [7–11]. Большая ширина этой полосы по сравнению с полосами связанных экситонов объясняется подвижностью триона.

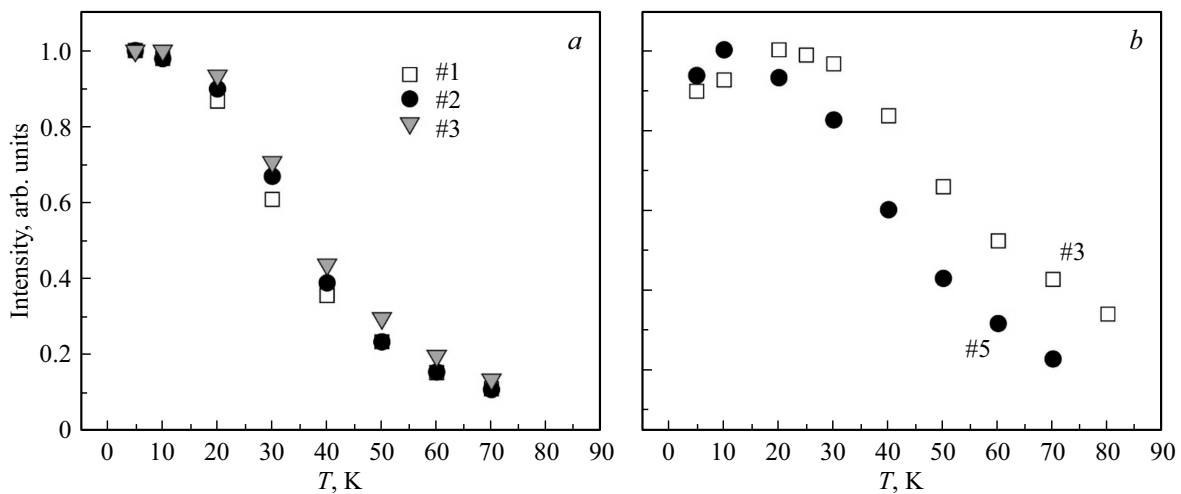


Рис. 5. Температурная зависимость интенсивности полосы излучения свободного экситона в образцах #1, 2 и 4 (a) и в образцах #3 и 5 (b).

Контур экситонного отражения в спектре образца #6 сдвинут в область высоких энергий на 10 meV относительно его положения в спектрах образцов #3–5 (рис. 4). Возможной причиной сдвига является сужение КЯ для экситона вследствие увеличения толщины безэкситонного слоя при сильном легировании КЯ. В спектре люминесценции образца #6 наблюдаются слабая полоса экситона, связанного на доноре, и полоса, которую можно отнести к переходу донор–валентная зона. При легировании КЯ происходит замещение атомов кадмия цинком, однако в твердом растворе CdZnTe ZnTe является широкозонной компонентой, так что при незначительной относительной концентрации цинка не возникают потенциалы, на которых может связаться экситон. Внедрение атомов цинка приводит к появлению центров рассеяния, этим можно объяснить уширение экситонной структуры в спектре люминесценции образца #6.

Температурные зависимости интенсивности полос FE приведены на рис. 5. Для нелегированного и слабо легированных образцов #1, 2, 4 эта зависимость является монотонной. В спектрах люминесценции образцов #3 и 5 полоса FE усиливается в узком интервале температур выше 5 К вследствие делокализации связанных на доноре экситонов и диссоциации трионов.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГУ № 93020138 (В.Ф. Агемян, С.Ю. Вербин, А.Ю. Серов, Н.Г. Философов и И.В. Штром) и гранта УМО-2021/41/В/ST3/03651 (G. Karczewski).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Deresz, M. Wiater, G. Karczewski, T. Wojtowicz, J. Łusakowski. *Acta Phys. Polonica* **132**, 390 (2017).
- [2] L. Viñ a, R. André, V. Ciulin, J.D. Ganiere, B. Deveaud. *Institut Phys. Conf. Ser.* 171, G4_2 (2003).
- [3] Grigelionis, K. Nogajewski, G. Karczewski, T. Wojtowicz, M. Czapkiewicz, J. Wrobel, H. Boukari, H. Mariette, J. Łusakowski. *Phys. Rev. B* **91**, 075424 (2015).
- [4] A.A. Kiselev, E.L. Ivchenko, A.A. Sirenko, T. Ruf, M. Cardona, D.R. Yakovlev, W. Ossau, A. Waag, G. Landwehr, *J. Crystal Growth* **184–185**, 831 (1998).
- [5] D. Wasik, Z. Adamus, M. Baj, J. Siwiec-Matuszyk, T. Wojtowicz, E. Janik, J. Kossut. *Phys. Status Solidi C* **1**, 751 (2004).
- [6] N. C. Giles, Jaesun Lee, D. Rajavela, C. J. Summers. *J. Appl. Phys.* **73**, 4541 (1993).
- [7] G. Mackh, M. Hilpert, D.R. Yakovlev, W. Ossau, H. Heinke, T. Litz, F. Fischer, A. Waag, G. Landwehr. *Phys. Rev. B* **50**, 14069 (1994).
- [8] E. Vanelle, M. Paillard, X. Marie, T.Amand, P. Gilliot, D. Brinkmann, R. Le'vy, J. Cibert, S. Tatarenko. *Phys. Rev. B* **62**, 2696 (2000).
- [9] J. Tribollet, F. Bernardot, M. Menant, G. Karczewski, C. Testelin, M. Chamarro. *Phys. Rev. B* **68**, 23531 (2003).
- [10] D. Sanvitto, R.A. Hogg, A.J. Shields, D.M. Whittaker, M.Y. Simmons, D.A. Ritchie, M. Pepper. *Phys. Rev. B* **62**, R13294 (2000).
- [11] M.T. Portella-Oberli, V. Ciulin, S. Ilaacke, J.-D. Ganiere, P. Kossacki, M. Kutrowski, T. Wojtowicz, B. Deveaud. *Phys. Rev. B* **66**, 155305 (2002).

Редактор К.В. Емцев