

## Излучение света гетероструктурой CdMnTe/CdMgTe с узкими квантовыми ямами

© В.Ф. Агекия<sup>1</sup>, Е.В. Борисов<sup>1</sup>, А.Ю. Серов<sup>1</sup>, Н.Г. Философов<sup>1</sup>, G. Karczewski<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Institute of Physics, Polish Academy of Science, Warsaw, Poland

E-mail: v.agekyan@spbu.ru

Поступила в Редакцию 22 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 22 апреля 2019 г.

Принята к публикации 22 апреля 2019 г.

Исследованы оптические свойства гетероструктуры Cd<sub>0.4</sub>Mn<sub>0.4</sub>Te/Cd<sub>0.5</sub>Mg<sub>0.5</sub>Te с квантовыми ямами толщиной 7 монослоев. Определена температурная зависимость интегральной интенсивности люминесценции барьерного слоя, квантовой ямы и внутрицентровой люминесценции ионов марганца, измерены спектры возбуждения люминесценции. В рамановском рассеянии наблюдаются многочисленные компоненты, соответствующие LO фононам типа CdTe, MgTe и MnTe.

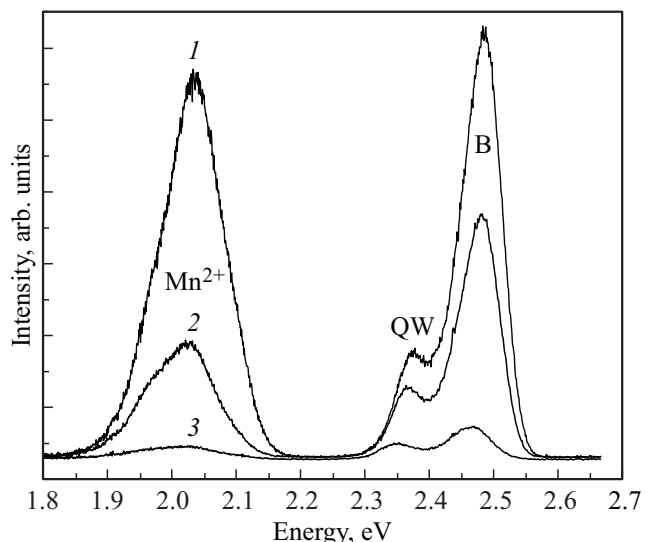
**Ключевые слова:** гетероструктуры II–VI, экситон, люминесценция Mn<sup>2+</sup>, рамановское рассеяние.

DOI: 10.21883/FTT.2019.08.47982.460

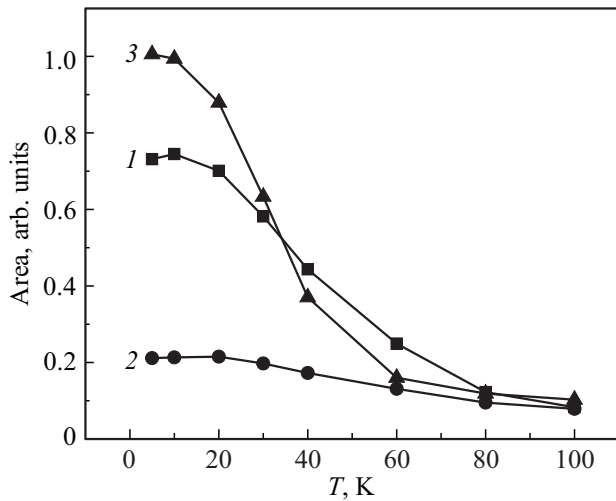
К настоящему времени накоплено много данных относительно оптических свойств гетероструктур на основе полупроводников группы II–VI, в которых тонкие узкозонные слои являются бинарными соединениями, а барьеры либо бинарными соединениями, либо твердыми растворами (см., например, [1–10]). В популярных гетероструктурах CdSe/ZnSe, CdTe/ZnTe, CdTe/Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>Te различие постоянных решетки доходит до 15%. Вследствие этого на интерфейсах возникают сильные напряжения, узкозонные слои в таких гетероструктурах оказываются неоднородными. Обычно эти слои состоят из плоских квантовых точек, характеристики которых (средний латеральный размер, размерная дисперсия, концентрация) чувствительны к номинальной толщине слоя и к технологии роста.

Исследованная в настоящей работе гетероструктура выращена методом молекулярной пучковой эпитаксии на подложке GaAs(100), она состоит из 100 периодов Cd<sub>0.4</sub>Mn<sub>0.4</sub>Te/Cd<sub>0.5</sub>Mg<sub>0.5</sub>Te с толщинами слоев 7 и 46 монослоев (МС) соответственно. Интерес гетероструктурам такого типа вызван тем, что в них малы напряжения на интерфейсах. В исследованном нами образце различие постоянных решетки квантовой ямы (КЯ) и барьерного слоя составляет около 0.6%, вследствие чего узкозонный слой формируется как однородная по толщине КЯ. Кроме того, присутствие марганца создает дополнительный канал излучательной рекомбинации в КЯ Cd<sub>0.4</sub>Mn<sub>0.4</sub>Te — внутрицентровую люминесценцию Mn<sup>2+</sup> (ВЛ Mn<sup>2+</sup>), связанную с оптическими переходами в 3d-оболочке [11]. Оптические и магнитооптические свойства содержащих марганец гетероструктур на основе ZnTe были исследованы ранее [12–14].

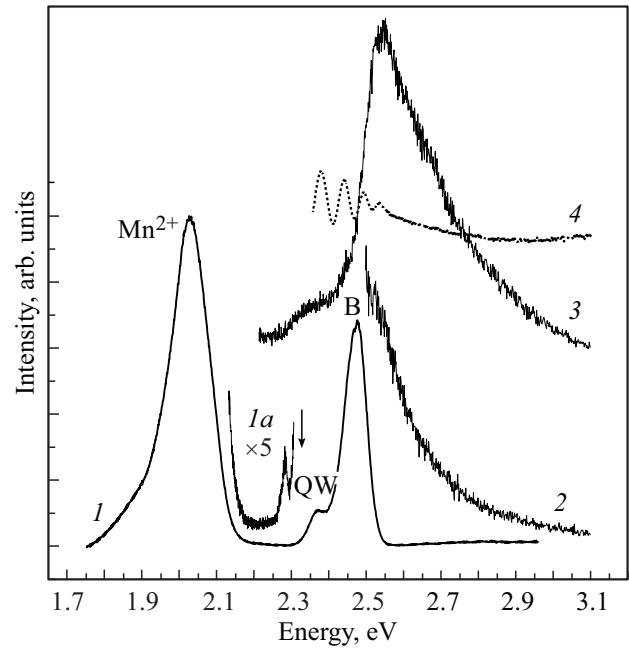
Экситонная люминесценция КЯ Cd<sub>0.4</sub>Mn<sub>0.4</sub>Te имеет малую интенсивность (рис. 1) вследствие эффективного переноса экситонного возбуждения в 3d-оболочку иона марганца. В объемном твердом растворе Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te при  $x = 0,4$  энергии экситонного уровня и порога возбуждения иона марганца совпадают. В нашем случае, благодаря квантово-размерному эффекту, энергия экситонного уровня составляет 2.35 eV, что намного превышает



**Рис. 1.** Спектр излучения гетероструктуры Cd<sub>0.4</sub>Mn<sub>0.4</sub>Te/Cd<sub>0.5</sub>Mg<sub>0.5</sub>Te при температурах 5 (1), 40 (2) и 80 (3) К (надбарьерное возбуждение). В — экситон барьерного слоя Cd<sub>0.5</sub>Mg<sub>0.5</sub>Te, QW — экситон квантовой ямы Cd<sub>0.4</sub>Mn<sub>0.4</sub>Te, Mn<sup>2+</sup> — внутрицентровый переход в ионе марганца.

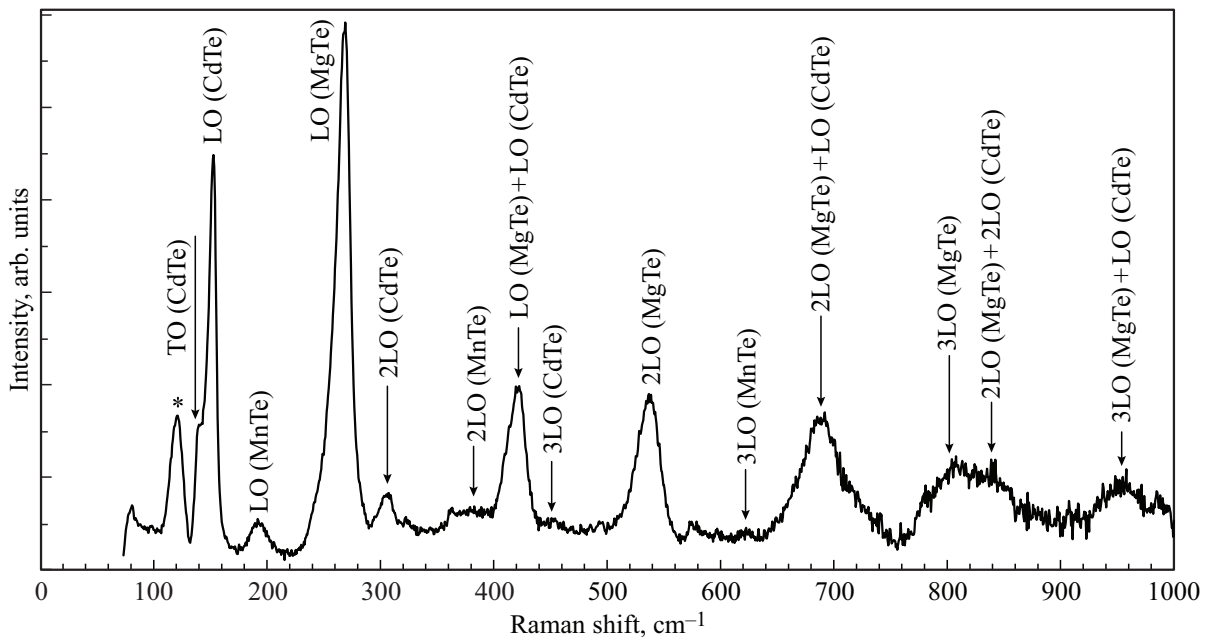


**Рис. 2.** Температурная зависимость интегральной интенсивности полос люминесценции гетероструктуры  $\text{Cd}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}/\text{Cd}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}\text{Te}$ . 1 — экситон барьерного слоя  $\text{Cd}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}\text{Te}$ , 2 — экситон квантовой ямы  $\text{Cd}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$ , 3 — внутрицентровый переход в  $\text{Mn}^{2+}$ .



**Рис. 3.** Спектры люминесценции, возбуждения люминесценции и отражения гетероструктуры  $\text{Cd}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}/\text{Cd}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}\text{Te}$  при  $T = 5$  К. 1 — спектр люминесценции при надбарьерном возбуждении; 1a — спектр люминесценции при энергии возбуждения 2.331 eV (вертикальная стрелка), пик соответствует фоновой реплике резонансного излучения экситона квантовой ямы; 2 — спектр возбуждения люминесценции экситона квантовой ямы; 3 — спектр возбуждения внутрицентровой люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  4 — спектр отражения, пунктиром показаны интерференционные полосы, наблюдающиеся ниже энергии экситона барьерного слоя.

шает энергию порога возбуждения 3d-оболочки  $\text{Mn}^{2+}$  равную 2.15 eV. Отметим, что прямой перенос энергии из барьерного слоя  $\text{Cd}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}\text{Te}$  на ионы марганца, по-видимому, ограничен пространственным разделением волновых функций 3d-оболочки марганца и электронных состояний барьерного слоя. Однако, поскольку КЯ в нашем образце имеют малую толщину, перекрытие этих



**Рис. 4.** Спектр рамановского рассеяния гетероструктуры  $\text{Cd}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}/\text{Cd}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}\text{Te}$  в геометрии „назад“, энергия возбуждения 2.54 eV,  $T = 300$  К. Около стоксовских компонент указаны фононы типа CdTe, MgTe и MnTe, которые участвуют в формировании компонент. Звездочкой отмечена компонента, которая, по-видимому, относится к квазилокальным колебаниям в области акустических ветвей.

волновых функций в области интерфейса может играть существенную роль.

С ростом температуры люминесценция КЯ ослабляется медленнее, чем ВЛ  $Mn^{2+}$  и люминесценция барьерных слоев (рис. 1, 2). Причиной температурного тушения ВЛ  $Mn^{2+}$  является усиление миграции внутри-центрального возбуждения по ионам марганца, вследствие чего возникает кооперативного эффект [15,16].

Максимум спектра возбуждения люминесценции (СВЛ) ВЛ  $Mn^{2+}$  близок к энергии экситона  $Cd_{0.5}Mg_{0.5}Te$  (рис. 3), при этом перенос энергии может происходить как напрямую от экситона барьерного слоя, так и через экситон КЯ. Этот максимум смещен относительно максимума экситонного поглощения барьерного слоя и максимума СВЛ экситона КЯ в сторону высоких энергий. Причинами этого могут быть большая величина коэффициента поглощения в экситонном максимуме и значительная толщина исследуемой многопериодной гетероструктуры равная  $1.5 \mu m$ .

Спектр рамановского рассеяния  $Cd_{0.4}Mn_{0.4}Te/Cd_{0.5}Mg_{0.5}Te$  регистрировался в геометрии „назад“ при возбуждении лазером с энергией фотонов  $2.54 eV$ . Он содержит многочисленные полосы, соответствующие, в основном, LO фононам типа CdTe, MgTe, MnTe, энергия которых в актуальных твердых растворах равна  $153, 282$  и  $193 cm^{-1}$  соответственно, и их комбинациям (рис. 4). Относительная интенсивность 1LO, 2LO и 3LO компонент типа CdTe, спадает значительно быстрее, чем в случае компонент типа MgTe ( $1:0, 10:0, 03$  и  $1:0, 30:0, 15$  соответственно). Эти отношения характеризуют ионность валентных связей Cd–Te и Mg–Te.

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке National Science Centre (Poland), гранты № 2017/25/B/ST3/02966 и № 2018/30/M/ST3/00276. и научной темы СПбГУ INI 2019 id 36463378 с использованием оборудования Научного парка СПбГУ (ресурсный центр „Оптические и лазерные методы исследования вещества“).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Z. Wilamowski, W. Jantsch, W. Faschinger. J. Magn. Mater. **140–144**, 1697 (1995).
- [2] T.W. Kim, M. Jung, H.L. Park, S.D. Lee. Phys. Rev. B **52**, 1467 (1995).
- [3] G. Prechtl, W. Heiss, S. Mackowski, A. Bonanni, G. Karczewski, H. Sitter, W. Jantsch. Semicond. Sci. Technol. **15**, 506 (2000).
- [4] F. Tinjod, I. Besombes, L. Marsal, R. Kheng, Y. Mariette. Phys. Status Solidi B **229**, 591 (2002).
- [5] A. Kudelski, K. Kowalik, A. Golnik, G. Karczewski, J. Kossut, J.A. Gai. J. Lumin. **112**, 127 (2005).
- [6] Y. S. No, T.W. Kim, H.S. Lee, H.L. Park. Appl. Surf. Sci. **243**, 143 (2005).
- [7] A.M. Kapitonov, U. Woggon, D. Kayser, D. Hommel, T. Itoh. J. Lumin. **112**, 177 (2005).
- [8] A. Alfaro-Martinez, I. Hernandez-Calderon. Microelectron. J. **39**, 594 (2008).
- [9] V.F. Agekyan, P.O. Holtz, G. Karczewski, V.N. Kats, E.S. Moskalenko, A.Yu. Serov, N.G. Filosofov. Semiconductors **45**, 1353 (2011).
- [10] A. Reznitsky, M. Eremenko, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, S.V. Ivanov. Phys. Status Solidi B **252**, 1717 (2015).
- [11] V.F. Agekyan. Phys. Solid State **44**, 2013 (2002).
- [12] M.C. Debnath, Z.H. Chen, K. Kayanuma, I. Souma, K. Sato, A. Murayama, Y. Oka. Phys. Status Solidi B **229**, 695 (2002).
- [13] L.H. Bai, Z.H. Chen, F.Z. Wang, S.H. Huang, L.X. Sun, Y.N. Zhang, H. Xiong, I. Souma, A. Murayama, Y.Oka, S.C. Shen. J. Lumin. **119–120**, 541 (2006).
- [14] V.F. Agekyan, I. Akai, N.G. Filosofov, T. Karasawa, G. Karczewski, A.Yu. Serov, N.N. Vasil'ev. Phys. Status Solidi B **244**, 3265 (2007).
- [15] В.В. Овсянкин, П.П. Феофилов. Оптика и спектроскопия **37**, 262 (1973).
- [16] V.F. Agekyan, A.Yu. Serov, N.G. Filosofov, I.V. Shtrom, G. Karczewski. Opt. Spectr. **121**, 507 (2016).

Редактор К.В. Емцев