

09,03

Экситонное излучение гетероструктур CdTe/ZnTe с двойными ультратонкими узкозонными слоями

© В.Ф. Агемян¹, А.Ю. Серов¹, В.А. Сокольников¹,
Н.Г. Философов¹, Г. Karczewski²

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

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

E-mail: v.agekyan@spbu.ru

(Поступила в Редакцию 30 октября 2018 г.)

Исследованы спектры экситонной люминесценции гетероструктур CdTe/ZnTe, содержащих два тонких слоя CdTe, разделенных барьерами различной толщины. Сложная температурная зависимость интенсивности люминесценции из этих слоев при подбарьерном и надбарьерном способах ее возбуждения позволяет сделать выводы о влиянии толщины барьеров на перенос энергии между слоями CdTe и наблюдать при определенных значениях температуры реализацию возбуждения резонансного типа. Зависимость формы контуров экситонного излучения от уровня возбуждения дает сведения о реальной структуре слоев CdTe толщиной 1.5 и 4.0 монослоя.

Работа поддержана СПбГУ, научная тема № 11.52.454.2016 и National Science Center (Poland), грант № UMO-2017/25/B/ST3/02966.

DOI: 10.21883/FTT.2019.03.47249.297

1. Введение

Исследование строения и свойств ультратонких [от долей монослоя (МС) до нескольких МС] планарных узкозонных включений, внедренных в полупроводниковую матрицу, дает существенные сведения о практически важных типах гетероструктур. Реальное строение таких систем определяется номинальной толщиной слоев, величиной рассогласования постоянной решетки узкозонного слоя и матрицы, а также технологическими условиями, от которых, в частности, зависит величина атомной диффузии в направлении роста гетероструктуры. Ультратонкий слой может быть как однородным, так и состоящим из ансамбля островков — плоских квантовых точек с различными латеральными размерами. Прямым методом для изучения строения слоев является просвечивающая электронная микроскопия. Применение оптических методов позволяет не только изучать реальное строение слоев, но и получить сведения о переносе энергии и динамике фотоносителей и экситонов. К настоящему времени проведено значительное количество исследований оптических свойств гетероструктур с ультратонкими слоями на основе полупроводников групп III–V и II–VI, в том числе типа CdSe/ZnSe, CdTe/ZnTe, а также гетероструктур II–VI с магнитными компонентами [1–12]. Целью нашей работы является изучение переноса энергии и излучательных свойств экситонов в гетероструктурах, содержащих два слоя CdTe, разделенных барьерами ZnTe различной толщины.

2. Описание образцов

Исследована серия гетероструктур CdTe/ZnTe, каждая из которых содержит два слоя CdTe L_1 и L_2 с номинальными толщинами 1.5 и 4 монослоя (МС), которые разделены барьерами ZnTe с толщинами 15, 25, 35, 45 и 55 МС (образцы № 1–5 соответственно). На подложках из полуизолирующего GaAs $\langle 100 \rangle$ были выращены последовательно: слой ZnTe толщиной от 4 до $5 \mu\text{m}$; слой CdTe толщиной 1.5 МС; барьерный слой ZnTe; слой CdTe толщиной 4 МС; покровный слой ZnTe толщиной $0.05 \mu\text{m}$. Для формирования слоев CdTe применялась техника атомного наслаивания (ALD) при температуре 440°C , слой ZnTe выращивались методом молекулярной пучковой эпитаксии (MBE).

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены спектры излучения образцов № 1–5 при надбарьерном возбуждении непрерывным лазером и $T = 5 \text{ K}$. Видно, что спектральное положение экситонного излучения слоев L_1 и L_2 зависит от расстояния между слоями, наибольшие энергии локализации относительно экситона барьера ZnTe имеют место в образце с толщиной барьера 35 МС. Ширины контуров полос излучения экситонов L_2 на половине их высоты (FWHM) составляют от 10 до 20 meV, наименьшие значения FWHM наблюдаются в образцах с максимальным и минимальным расстоянием между слоями L_1 и L_2 . Величина FWHM контуров излучения экситонов L_1 составляет от 2 до 4 meV, это указывает на значительно

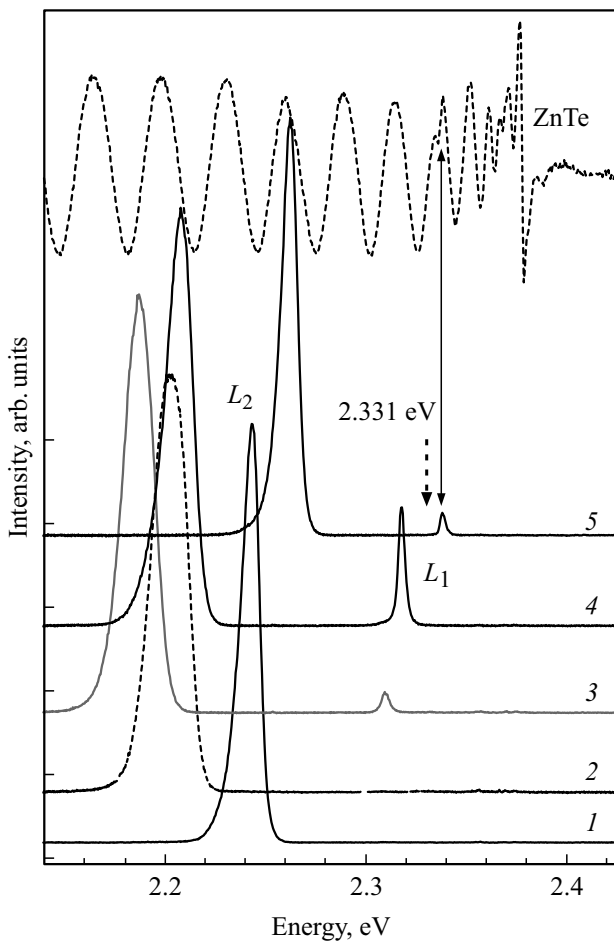


Рис. 1. Спектры излучения экситонов узкозонных слоев CdTe L_1 и L_2 , внедренных в матрицу ZnTe, в образцах №1–5 при надбарьерном возбуждении с энергией фотонов 2.81 eV, $T = 5$ К. Штриховой линией показан спектр отражения образца №5, в котором наблюдаются экситонные резонансы ZnTe и слоя L_1 , а также интерференционные полосы. Пунктирной стрелкой обозначена энергия фотонов, которая использовалась при подбарьерном возбуждении.

большую однородность слоя L_1 . От расстояния между слоями L_1 и L_2 зависят степень перекрытия волновых функций экситонов L_1 и L_2 и величины механических напряжений в области каждого узкозонного слоя. Эти факторы, в свою очередь, влияют на энергию оптических переходов и ширину контуров излучения экситонов. Отметим, что исследование влияния толщины барьерного слоя на люминесценцию структуры CdTe/ZnTe с более толстыми узкозонными слоями проведено в работе [12].

Толщины слоев L_1 и L_2 на порядок меньше, чем размеры экситона, так что экситоны, локализованные на слоях CdTe, принадлежат матрице ZnTe. Толщины барьеров составляют от 1 до 4 радиусов экситона ZnTe, так что на параметры локализации экситона на одном из узкозонных слоев существенно влияет другой узкозонный слой.

Температурная зависимость интенсивности экситонной люминесценции слоя L_2 в образцах №1 и №5 в условиях надбарьерного возбуждения является монотонной, в то время как в образцах №2–4 максимальная интенсивность достигается в области 40–50 К

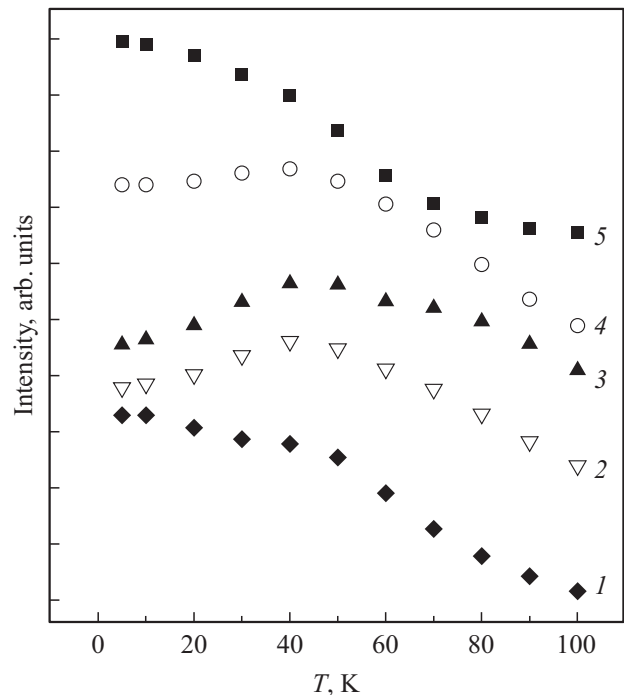


Рис. 2. Температурная зависимость пиковой интенсивности люминесценции экситонов, локализованных на слое L_2 , при надбарьерном возбуждении в образцах №1–5.

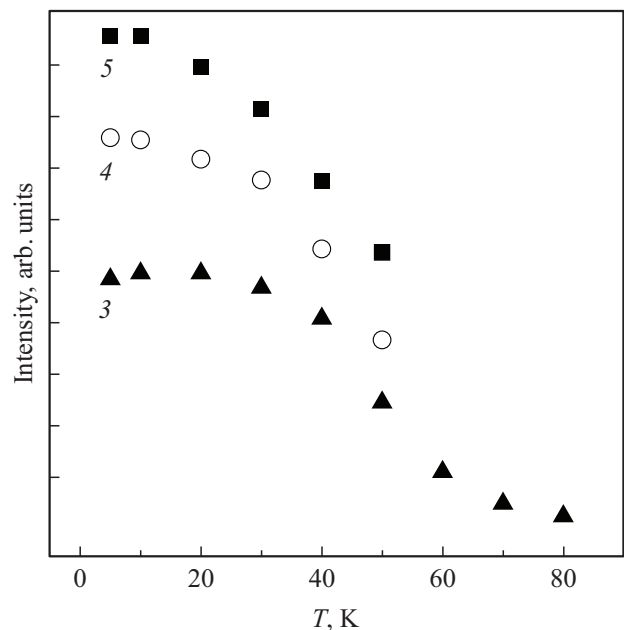


Рис. 3. Температурная зависимость пиковой интенсивности люминесценции экситонов, локализованных на слое L_1 , при надбарьерном возбуждении в образцах №3–5.

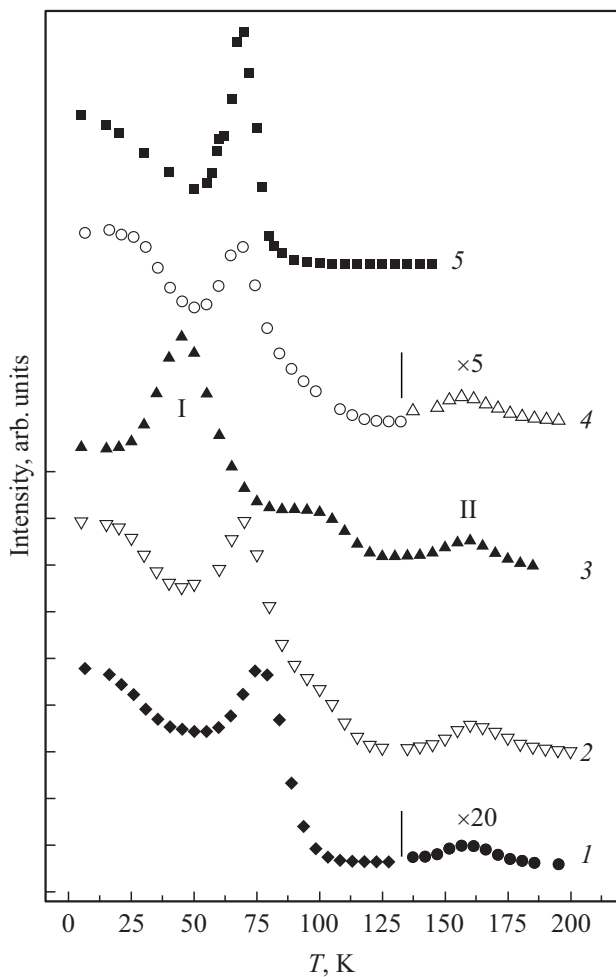


Рис. 4. Температурная зависимость пиковой интенсивности люминесценции экситонов, локализованных на слое L_2 , при подбарьерном возбуждении с энергией квантов 2.331 eV (см. рис. 1) в образцах № 1–5. Происхождение максимумов I и II обсуждается в тексте статьи.

(рис. 2). Это можно объяснить следующим образом. В образцах № 2–4 повышение температуры инициирует перенос экситонов и свободных носителей из слоя L_1 в слой L_2 . В образце с самым тонким барьером перенос эффективен уже при низких температурах, а в образце с самым толстым барьером деградация излучения слоя L_2 с температурой не восполняется переносом из слоя L_1 . Различия в температурной зависимости люминесценции слоев L_2 в образцах № 2–4 и № 1, 5 указывают на то что, она определяется именно переносом из слоев L_1 , а не из матрицы ZnTe. Температурное ослабление люминесценции экситонов L_1 является монотонным (рис. 3). Этим подтверждается, что температурный максимум в излучении слоя L_2 возникает вследствие переноса экситонов и фотоносителей из слоя L_1 , а не из барьера ZnTe.

При подбарьерном возбуждении с энергией фотонов $h\nu_0 = 2.331$ eV температурная зависимость экситонного излучения слоев L_2 является значительно более сложной (рис. 4). Она определяется температурным сдвигом

уровней энергии экситонов слоя L_1 и матрицы ZnTe относительно $h\nu_0$. При достижении определенной температуры, $h\nu_0$ совпадает с энергией экситонного резонанса или же отличается от него на энергию одного или двух продольных оптических фононов решетки ZnTe, и это приводит к повышению эффективности оптического возбуждения.

Рассмотрим температурную зависимость пикового значения люминесценции экситона L_2 на примере образца № 3. Можно выделить четыре характерных участка: максимум I при 50 К; плато около 100 и 130 К и максимум II при 160 К. При больших плотностях мощности возбуждения удастся наблюдать люминесценцию экситонов обоих слоев L_1 и L_2 и ZnTe вплоть до высоких температур. Оказалось, что максимум II соответствует температуре, при которой энергия барьерного экситона ZnTe совпадает с энергией лазера $h\nu_0$. Максимум I возникает, когда энергия экситона L_1 становится меньше $h\nu_0$ на энергию LO фонона решетки ZnTe равную 26 meV. Плато в области 100 К соответствует разнице энергий экситона барьера и $h\nu_0$ равной энергии LO фонона, плато в области 130 К соответствует разнице энергий экситона L_1 и $h\nu_0$ равной удвоенной энергии LO фонона. Подобные особенности, связанные с резонансными условиями возбуждения, наблюдаются в температурной зависимости люминесценции экситона L_2 для всех образцов, в частности, максимум I для образцов № 1 и № 5 связан с совпадением энергии экситона L_1 с $h\nu_0$.

Зависимость формы контуров экситонного излучения слоев L_1 и L_2 от уровня оптического возбуждения демонстрирует различия в реальном строении этих слоев. При повышении плотности мощности надбарьерного

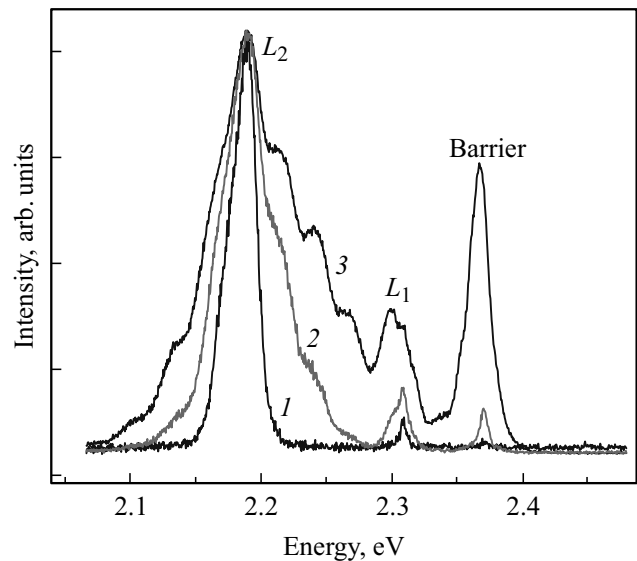


Рис. 5. Нормированные спектры люминесценции образца № 3 при плотностях мощности надбарьерного возбуждения около 1 (1), 10 (2) и 100 (3) kW/cm^2 (импульсное возбуждение с энергией фотонов 3.68 eV), $T = 5$ К. Спектры промодулированы полосами интерференции.

возбуждения образца № 3 от 1 до 100 kW/cm^2 полоса L_1 уширяется незначительно, в то время как полоса L_2 становится сильно асимметричной и распространяется в область высоких энергий вплоть до энергии экситона L_1 (рис. 4). Можно сделать вывод, что слой L_2 является ансамблем nanoостровков с сильной латеральной размерной дисперсией, в то время как более тонкий слой L_1 представляет собой однородный слой твердого раствора CdZnTe. Плоские квантовые точки слоя L_2 связаны между собой, так что в условиях слабого оптического возбуждения фотоносители и экситоны релаксируют на островки большого размера. При сильном оптическом возбуждении эти состояния насыщаются, и оптически активными становятся островки меньших размеров, которым соответствует меньшая энергия локализации экситона относительно уровня экситона ZnTe. О насыщении слоев L_1 и L_2 свидетельствует появление экситонной люминесценции ZnTe которая не наблюдается при слабом оптическом возбуждении.

Благодаря малой толщине и однородности слоя L_1 соответствующий ему экситонный резонанс хорошо наблюдается в спектрах отражения (см. рис. 1), в то время как экситон более мощного островкового слоя L_2 в отражении проявляется слабо.

4. Заключение

При различных температурах и уровнях оптического возбуждения исследована экситонная люминесценция гетероструктур CdTe/ZnTe, содержащих два слоя CdTe с номинальной толщиной 1.5 и 4 нм, которые разделены барьерами ZnTe различной толщины. Установлено, что более тонкий слой CdTe является однородным, в то время как более толстый слой состоит из плоских островков со значительной латеральной размерной дисперсией. В условиях подбарьерного возбуждения с энергией фотонов 2.331 eV при некоторых значениях температуры реализуется резонансное возбуждение экситонов, приводящее к увеличению квантового выхода люминесценции.

Список литературы

- [1] P. Paki, R. Leonelli, L. Isnard, R.A. Masut. Appl. Phys. Lett. **74**, 1445 (1999).
- [2] V.S. Bagaev, V.V. Zaytsev, V.V. Kalinin, S.R. Okyabrskii, A.F. Plotnikov. Solid State Commun. **88**, 777 (1993).
- [3] Z. Wilamowski, W. Jantsch, W. Faschinger. J. Magn. Magn. Mater. **140–144**, 1697 (1995).
- [4] G. Prechtl, W. Heiss, S. Mackowski, A. Bonanni, G. Karczewski, H. Sitter, W. Jantsch. Semicond. Sci. Technol. **15**, 506 (2000).
- [5] Y.S. No, T.W. Kim, H.S. Lee, H.L. Park. Appl. Surf. Sci. **243**, 143 (2005).
- [6] A.M. Kapitonov, U. Woggon, D. Kayser, D. Hommel, T. Itoh. J. Lumin **112**, 177 (2005).
- [7] A. Alfaro-Martinez, I. Hernandez-Calderon. Microelectron. J. **39**, 594 (2008).
- [8] В.Ф. Агемян, Р.О. Holtz, G. Karczewski, В.Н. Кац, Е.С. Москаленко, А.Ю. Серов, Н.Г. Философов. ФТП **45**, 1353 (2011).
- [9] В.Ф. Агемян, Н.А. Грунина, А.Ю. Серов, Н.Г. Философов, G. Karczewski. ФТТ **56**, 2081 (2014).
- [10] A. Reznitsky, M. Eremenko, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, S.V. Ivanov. Phys. Status Solidi B **252**, 1717 (2015).
- [11] Г.В. Будкин, М.В. Еременко, А.Н. Резницкий. ЖЭТФ **151**, 870 (2017).
- [12] S.Y. Jin, S.Y. Kim, J.C. Choi, H.S. Lee. J. Nanosci. Nanotechnol. **17**, 4132 (2017).

Редактор К.В. Емцев