

Экситонная люминесценция двойных монослоев CdTe в матрице ZnTe

© В.Ф. Агекия¹, А.Ю. Серов¹, Н.Г. Философов¹, G. 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 25 декабря 2020 г.

В окончательной редакции 25 декабря 2020 г.

Принята к публикации 29 декабря 2020 г.

Исследована серия гетероструктур, состоящих из матрицы ZnTe, содержащей два монослоя CdTe, разделенных барьерными слоями различной толщины. Определены зависимости от толщины барьерного слоя ZnTe энергий полос излучения экситона, связанного с узкозонными слоями CdTe, их относительных интенсивностей и температурного поведения. Установлено, что монослои CdTe можно считать независимыми друг от друга при толщине барьерного слоя более 30 монослоев.

Ключевые слова: полупроводники II–VI, гетероструктуры CdTe/ZnTe, экситон, люминесценция.

DOI: 10.21883/FTT.2021.05.50820.273

1. Введение

Гетероструктуры на основе халькогенидов кадмия и цинка применяются в преобразователях солнечной энергии в электрическую [1–5] и в лазерных устройствах, работающих в зеленой и синей областях спектра [6]. Гетероструктуры на основе полупроводников II–VI, как правило, являются напряженными, влияние напряжений на высоту барьеров в дырочных квантовых ямах (КЯ) оказывается на порядок более сильным по сравнению с химическим сдвигом [7]. В связи с большой разницей постоянных решетки в парах CdSe/ZnSe и CdTe/ZnTe, реальная структура КЯ CdSe и CdTe существенно зависит от их толщины и технологии роста слоев (атомное наслаивание или молекулярная пучковая эпитаксия). Оптическими и электронно-микроскопическими методами установлено, что в системе CdTe/ZnTe слой CdTe является однородным при его номинальной толщине менее двух монослоев (ML), более толстые слои распадаются на планарные ансамбли квантовых точек [8–10]. Пониманию взаимодействия между электронными состояниями ультратонких узкозонных слоев в таких системах способствует исследование зависимости их оптических свойств от толщины S барьерного слоя, разделяющего узкозонные слои.

2. Результаты и их обсуждение

Исследуется люминесценция матриц ZnTe, в которые встроены слои CdTe, сформированные методом атомного наслаивания. Изучены образцы, содержащие один слой CdTe толщиной 1 и 2 ML (образцы #1 и 5), и образцы, содержащие два монослоя CdTe со значениями S

равными 12, 8 и 5 ML (образцы #2–4). Как видно из рис. 1, толщина барьера мало влияет на форму контура полосы экситонной люминесценции. Ширина полос люминесценции FWHM в образцах #1–5 составляет около 10 meV при температуре 5 К. Это свидетельствует о том, что основной вклад в ширину уровней энергии вносят флуктуации элементного состава монослоев, которые в

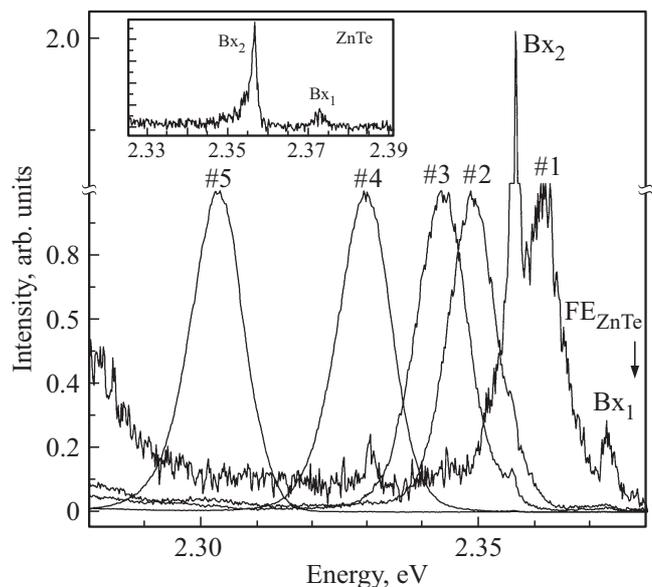


Рис. 1. Спектры люминесценции образцов #1–5, нормированные по максимуму полос экситонной люминесценции. FE ZnTe — энергия экситонного уровня барьерного слоя ZnTe, Bx₁ и Bx₂ — излучение связанных экситонов ZnTe. На вставке показан спектр излучения матрицы ZnTe, не содержащей слоев CdTe. $T = 5$ К.

Энергетическое положение полос экситонной люминесценции образцов #1–5 и их относительная интенсивность в максимуме, $T = 5\text{ K}$

Образец #	Энергетическое положение, eV	Интенсивность, arb. units
1	2.362	1
2	2.351	12
3	2.345	16
4	2.331	66
5	2.306	77

действительности состоят из твердого раствора CdZnTe с высоким содержанием кадмия.

Из данных таблицы следует, что интенсивность экситонной люминесценции резко зависит от толщины барьерного слоя. Эту зависимость можно интерпретировать следующим образом. По мере увеличения расстояния между монослоями CdTe растёт степень проникновения волновой функции экситонов, локализованных на монослоях CdTe, в барьерный слой. Это уменьшает амплитуду волновой функции в узкозонном монослое. Кроме того, увеличивается вероятность переноса энергии на примесные центры в ZnTe и, соответственно, уменьшается квантовый выход экситонной люминесценции. О наличии примесных центров в ZnTe свидетельствует присутствие в спектре излучения узких линий связанного экситона ZnTe, а также широкой полосы в длинноволновой области.

Энергетическое положение полосы экситонной люминесценции позволяет оценить ослабление взаимодействия между монослоями CdTe в зависимости от S . На рис. 2 показана зависимость от S энергетического расстояния ΔE между дном зоны проводимости ZnTe и максимумом люминесценции экситона узкозонных

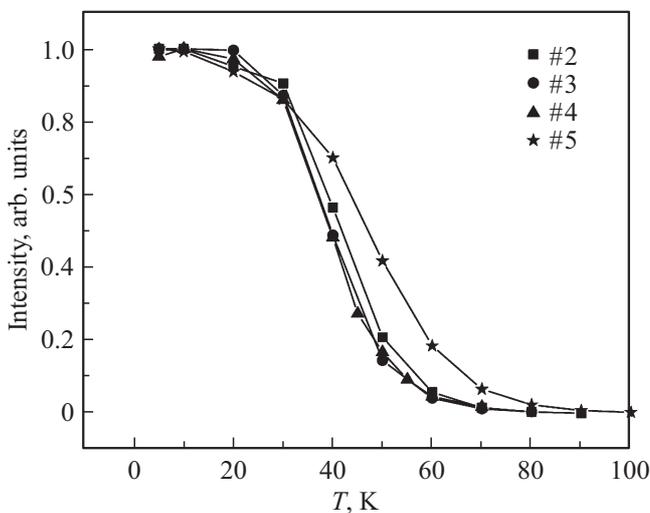


Рис. 2. Температурная зависимость интенсивности люминесценции образцов #2–5 в максимуме экситонной полосы.

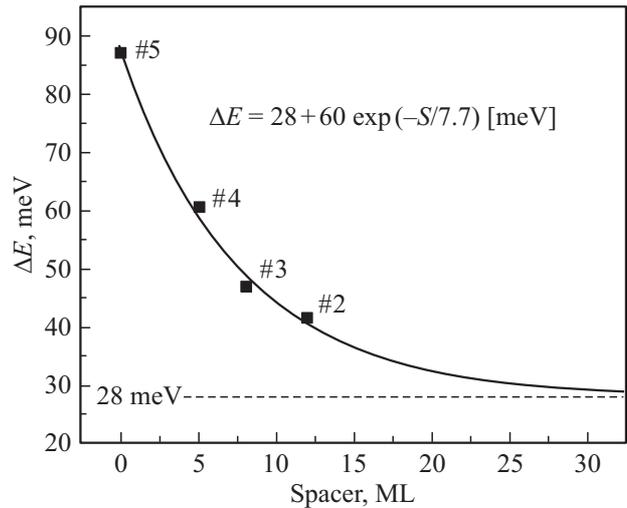


Рис. 3. Энергетическое расстояние ΔE между дном зоны проводимости ZnTe и максимумами полос экситонной люминесценции исследованных образцов. Штриховой линией показано значение ΔE для образца #1, содержащего один монослой CdTe. $T = 5\text{ K}$.

слоев. Эта зависимость может быть представлена в виде

$$\Delta E = 28 + 60 \cdot \exp(-S/7.66) \text{ meV}.$$

Видно, что монослои CdTe можно считать изолированными друг от друга, когда S превышает 30 ML.

В интервале температур 5–80 K величина FWHM изменяется незначительно в пределах 10–11 meV. По-видимому, температурное уширение полос за счет взаимодействия экситонов с фононами компенсируется уменьшением их неоднородного уширения.

Температурная зависимость интенсивности люминесценции экситона, как следует из рис. 3, практически одинакова в образцах #2–4, несмотря на большое различие энергетического расстояния между максимумом полосы люминесценции экситона узкозонного слоя и экситонным уровнем барьерного слоя ZnTe (рис. 1). В структурах CdTe/ZnTe дырочные КЯ являются мелкими, поэтому значения температуры, при которых дырка делокализуется, вызывая тем самым гашение экситонной люминесценции, мало отличаются друг от друга во всех исследованных образцах. Слабой локализацией дырки объясняется и тот факт, что температурное гашение экситонной люминесценции начинается уже при $T = 20\text{ K}$. Естественно, что экситонная люминесценция в образце #5 является наиболее интенсивной и устойчивой к повышению температуры. Что касается энергетического положения полос экситонного излучения в образцах #1–5, то оно определяется, в основном, увеличением энергии уровня электрона с ростом толщины барьерного слоя (переход от узкозонного слоя толщиной 2 ML к изолированным слоям толщиной 1 ML).

3. Заключение

Проведенное исследование позволило установить, что в системе CdTe/ZnTe монослои CdTe можно считать изолированными друг от друга, если толщина барьерного слоя превышает 30 нм. Определена зависимость интенсивности экситонной люминесценции, связанной с монослоями CdTe, от толщины барьерного слоя.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке научной темы СПбГУ INI 2019 id 36463378 с использованием оборудования Научного парка СПбГУ и гранта 2018/30/M/ST3/00276 National Science Center (Poland).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Misra, J.A. Aguiar, S. Gardner, Xhan Sang, R.R. Unocic, A. Munshi, W.S. Sampath, C.S. Ferekides, M.A. Scarpulla. *ACS Appl. Energy Mater.* **3**, 1749 (2020).
- [2] S. Uličná, P.J.M. Isherwood, P.M. Kaminski, J.M. Walls, J. Li, C.A. Wolden. *Vacuum* **139**, 159 (2017).
- [3] H. Xue, R. Wu, Y. Xie, Q. Tan, D. Qin, H. Wu, W. Huang. *Appl. Sci.* **6**, 197 (2016).
- [4] C.A. Wolden, A. Abbas, J. Li, J.M. Walls. *Solar Energy Mater. Solar Cells* **147**, 203 (2016).
- [5] X. Zheng, E. Colegrove, J.N. Duenow, J. Moseley, W.K. Metzger. *J. Appl. Phys.* **812**, 053102 (2020).
- [6] O.G. Okhotnikov. *Semicond. disk lasers: physics and technology*. Wiley-VCH (2010).
- [7] N.G. Filosofov, A.Yu. Serov, G. Karczewski, V.F. Agekian, H. Mariette, V.P. Kochereshko. *AIP Adv.* **10**, 085224 (2020).
- [8] S.H. Jin, S.H. Kim, J.C. Choi, H.S. Lee. *J. Nanosci. Nanotechnology* **17**, 4132 (2017).
- [9] Y.S. No, T.W. Kim, H.S. Lee, H.L. Park. *Appl. Surf. Sci.* **243**, 143 (2005).
- [10] V.F. Agekian, A.Yu. Serov, N.G. Filosofov, G. Karczewski. *Phys. Solid State* **62**, 1056 (2020).

Редактор К.В. Емцев