

12,09

Оптические свойства теллурида цинка с субмонослоями теллурида кадмия

© В.Ф. Агемян¹, А.Ю. Серов¹, Н.Г. Философов¹, И.В. Штром¹, G. Karczewski²

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

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

E-mail: v.agekyan@spbu.ru

(Поступила в Редакцию 28 марта 2016 г.)

Исследованы спектры отражения, люминесценции и рамановского рассеяния эпитаксиальных слоев ZnTe, номинально содержащих двойные субмонослои CdTe. В люминесценции этих гетероструктур доминирует полоса экситона, локализованного на потенциале, созданном узкозонными планарными включениями. Определены характеристики излучения локализованных экситонов, в частности, соотношение интегральной интенсивности излучения и энергии локализации, установлено, что экситоны взаимодействуют с продольными оптическими фононами слоя, обогащенного кадмием. В рамановском рассеянии наблюдается гигантское усиление стоксовской компоненты, резонансной с уровнем локализованного экситона.

Работа в Польше частично поддержана грантом Национального Научного Центра 2014/14/M/ST3/00484.

1. Введение

Включение в полупроводниковые матрицы ультратонких планарных включений, в том числе субмонослоев (SML) с иным элементным составом позволяет получать совершенные гетеросистемы даже при значительном различии постоянных решетки соединений, из которых состоят матрица и ультратонкий слой. В том случае, когда такие слои являются узкозонными по отношению к матрице, появляется локализуемый электронные возбуждения потенциал, величина и профиль которого в направлении роста структуры определяются элементным составом, толщиной и взаимным расположением узкозонных включений. Это позволяет контролировать энергетическое положение и другие параметры экситонов, локализованных на SML узкозонном слое. Отличие таких структур от структур с квантовыми ямами состоит в том, что волновая функция экситона практически вся находится в широкозонной матрице. Возможно дробление узкозонного слоя на nanoостровки, и это требует изучения в каждом конкретном случае.

Представляет интерес исследовать соотношение интенсивностей излучения свободных и связанных экситонов матрицы и экситона, локализованного на узкозонном слое. Это соотношение зависит от расстояния между поверхностью структуры и узкозонным слоем, коэффициентом поглощения для возбуждающего люминесценцию света и динамики носителей и свободных экситонов. Отметим, что при повышении температуры локализованный экситон проходит две стадии делокализации — первая соответствует миграции без отрыва от слоя, вторая — переходу в свободное состояние.

Существует ряд работ, в которых исследована низкотемпературная люминесценция полупроводниковых мат-

риц группы II–VI, содержащих планарные включения узкозонного полупроводника той же группы толщиной от нескольких монослоев (ML) до десятых долей ML. В них изучались и кристаллы ZnSe с SML CdSe и кристаллы ZnTe с SML ZnS [1–3].

В настоящей работе изучены свойства локализованных экситонов в кристаллах ZnTe с двойными SML CdTe и особенности их взаимодействия с фононами SML CdTe. Отметим, что оптические свойства объемного твердого раствора $Zn_{1-x}Cd_xTe$ изучены и интерпретированы не так подробно, как для большинства твердых растворов этой группы вследствие тенденции катионных компонентов к кластеризации.

2. Экспериментальные детали

Кристаллы ZnTe толщиной $4\mu m$ выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке GaAs (100). Образец № 1 является однородным, два других образца номинально содержат на расстоянии $0.5\mu m$ от поверхности по два SML CdTe, разделенных 5ML ZnTe. Концентрация Cd в этих SML составляет 10% (образец № 2) и 50% (образец № 3). При изготовлении гетероструктур принимались меры к тому, чтобы минимизировать вертикальную диффузию катионных компонентов.

Для исследования люминесценции и рамановского рассеяния света применялись непрерывные лазеры с энергиями квантов 2.66 и 2.33 eV.

3. Результаты и их обсуждение

Вертикальная диффузия кадмия приводит к тому, что два номинальных субмонослоя расплываются в обога-

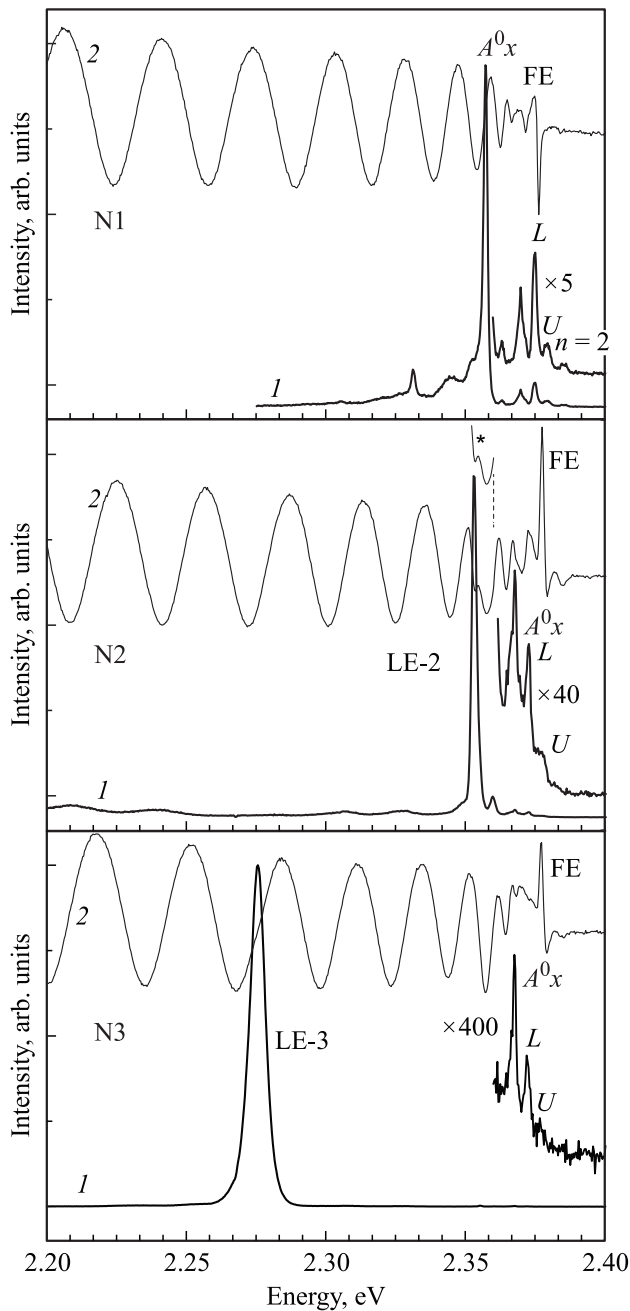


Рис. 1. Спектры люминесценции (*I*) и отражения (*2* и ***) образцов № 1–3 при температуре 5 К. FE — свободный экситон, *U* и *L* — верхняя и нижняя ветви свободного экситона; A^0x — экситон, связанный на нейтральном акцепторе; LE-2 и LE-3 — экситоны, локализованные на слоях ZnTe, обогащенных кадмием; $n = 2$ — возбужденное состояние свободного экситона (предположительно).

щенный кадмием слой толщиной около 10 ML с нерезкими интерфейсами. Количественные данные о диффузии катионов в гетероструктурах группы II-VI содержатся в работах [4–6]. Отношение ионных радиусов Zn^{2+} и Cd^{2+} составляет 1.3, электронные поляризуемости анионов в ZnTe и CdTe равны соответственно 0.33

и 1.31 [7]. Вследствие этих различий возможна кластеризация кадмия с образованием плоских нанокристаллов, что приводит к существенным флуктуациям потенциала как в плоскости слоев, так и в направлении роста структур. Спектры люминесценции и отражения образцов № 1–3 приведены на рис. 1. В люминесценции образца 1 идентифицируются верхняя (*U*) и нижняя (*L*) ветви свободного экситона (FE) и экситон, связанный на акцепторе (A^0x).

В люминесценции образца № 2 наблюдается интенсивная полоса (LE-2) экситона, локализованного на обогащенном кадмием слое. Энергетическое расстояние между полосами LE-2 и FE ZnTe равно сдвигу экситонного резонанса в объемном кристалле $Zn_{1-x}Cd_xTe$ при увеличении x от 0.00 до 0.04. Из спектров, приведенных на рис. 2, следует, что LO-фонон, формирующий фонные реплики полосы LE-2, имеет энергию 23 meV, тогда как энергия LO-фонона решетки ZnTe составляет 26 meV. Таким образом, экситон LE-2 взаимодействует с продольными оптическими колебаниями, распространяющимися в плоскости тонкого слоя, обогащенного кадмием.

В люминесценции образца № 3 доминирует полоса локализованного экситона LE-3, ее сдвиг относительно FE ZnTe соответствует сдвигу экситонного резонанса в объемном кристалле $Zn_{1-x}Cd_xTe$ при увеличении x от 0.00 до 0.13. Полосы LE-2 и LE-3 имеют форму близкую к гауссовской, ширины полос на полувысоте контура (FWHM) для LE-2 и LE-3 равны 2 и 10 meV соответственно. Такая разница значений FWHM определяется тем, что с увеличением концентрации кадмия усиливаются статистические флуктуации локализуемого потенциала. Увеличение концентрации кадмия в 5 раз приводит к увеличению интегральной интенсивности полосы излучения экситона в 20 раз при $T = 5$ К. Это отражает связь величин энергии локализации экситона и квантового выхода люминесценции.

Продольный оптический фонон, взаимодействующий с экситоном LE-3, имеет энергию 22 meV (рис. 2), что естественно связать с более высокой, чем в образце № 2 концентрации кадмия. Отметим, что такое „смягчение“ частот LO-колебаний решетки в слоях, обогащенных кадмием, свидетельствует в пользу отсутствия существенной кластеризации кадмия при его малых относительных концентрациях.

В спектрах отражения образцов, за исключением FE, проявляется лишь локализованный экситон LE-2 (рис. 1), что связано с сочетанием большой силой осциллятора и узости соответствующего резонанса.

Температурная зависимость интегральных интенсивностей полос излучения A^0x , LE-2 и LE-3 приведена на рис. 3. Энергии комплексов A^0x и LE-2 относительно уровня FE почти одинаковы, однако температура диссоциации комплекса LE-2 значительно выше. Причиной этого является различие механизмов диссоциации — низкая температура распада комплекса A^0x определяется отрывом слабо связанного электрона.

Потенциалы, локализирующие экситоны, расположены на расстоянии около 10 экситонных радиусов от поверхности образцов № 2 и № 3. Коэффициент поглощения

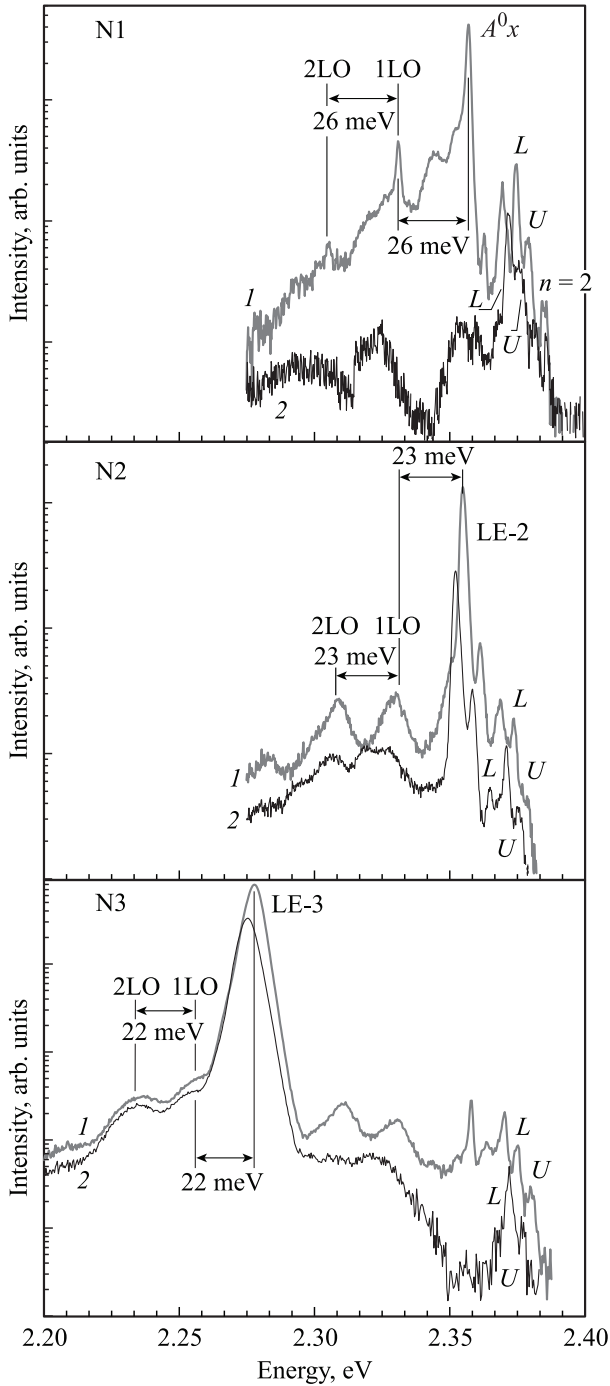


Рис. 2. Спектры люминесценции образцов № 1–3 при температурах 5 (1) и 40 К (2) в полулогарифмическом масштабе. *U* и *L* — верхняя и нижняя ветви основного состояния свободного экситона, *n* = 2 — возбужденное состояние свободного экситона (предположительно), A^0_x — экситон, связанный на нейтральном акцепторе, LE-2 и LE-3 — экситоны, локализованные на слоях ZnTe, обогащенных кадмием. 1LO и 2LO — фонные реплики полос A^0_x , LE-2 и LE-3, соответствующие рождению одного и двух продольных оптических фононов.

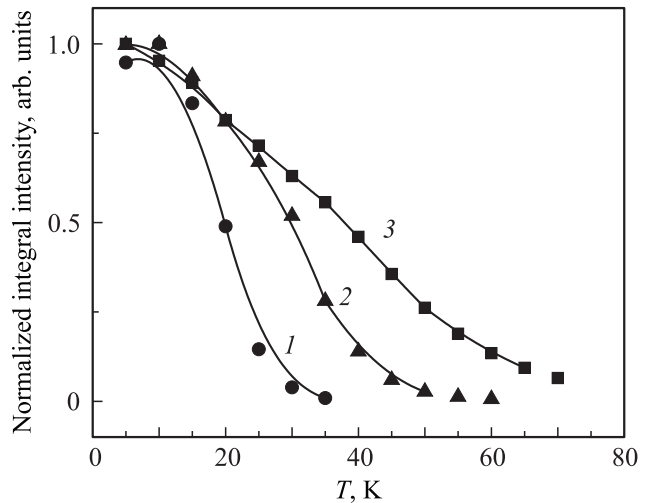


Рис. 3. Температурные зависимости интегральных интенсивностей полос излучения A^0_x -экситона, связанного на нейтральном акцепторе, (образец № 1) (1) и LE-2 (2), LE-3 (3) — экситонов, локализованных на слоях ZnTe, обогащенных кадмием (образцы № 2 и 3).

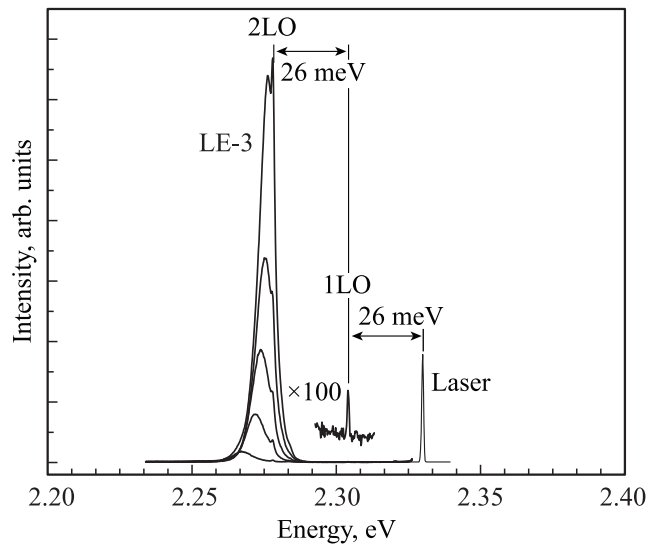


Рис. 4. Компоненты 1LO и 2LO резонансного рамановского рассеяния и полоса LE-3 люминесценции в образце № 3 при температурах 5 (верхний спектр), 30, 40, 50 и 70 К.

ZnTe для фотонов с энергией 2.66 eV равен $6 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$, так что интенсивность возбуждающего люминесценцию света на уровне слоев, обогащенных кадмием, в десятки раз меньше, чем на поверхности образцов. Несмотря на указанные обстоятельства, полосы LE-2 и LE-3 в излучении образцов № 2 и № 3 на порядки интенсивнее, чем полосы A^0_x и FE матрицы ZnTe. Это свидетельствует об эффективной локализации экситонов из всего возбужденного светом объема на слоях, обогащенных узкозонной компонентой, и о высоком квантовом выходе люминесценции этих локализованных состояний.

В спектре рамановского рассеяния образца № 3 при возбуждении ниже края собственного поглощения ZnTe лазером с энергией 2.33 eV энергия LO-фонона равна 26 meV. При $T = 5$ К стоксовская компонента 2LO имеет интенсивность, во много раз превосходящую интенсивность компоненты 1LO (рис. 4). Это объясняется совпадением энергий компоненты 2LO и локализованного экситона LE-3, то есть имеет место резонанс по рассеянному свету. При повышении температуры полоса LE-3 ослабляется и сдвигается в сторону низких энергий, вследствие чего интенсивность компоненты 2LO в рассеянии быстро падает.

Выводы

Таким образом, экситон-фононная люминесценция изученных в работе гетероструктур свидетельствует о том, что локализованный экситон взаимодействует с фононами ультратонкого слоя, обогащенного кадмием. Квантовый выход люминесценции быстро растет при увеличении энергии локализации экситона. Узкозонный ультратонкий слой эффективно локализует экситоны из широкозонной области, толщина которой на порядок превышает размер экситона, и тем самым подавляет люминесценцию свободных экситонов.

Список литературы

- [1] U. Woggon, D. Miller, F. Kalina, B. Gerlach, D. Kayser, K. Leonardi, D. Hommel. *Phys. Rev. B* **67**, 045 204 (2003).
- [2] A.V. Kapitonov, U. Woggon, D. Kayser, D. Hommel, T. Itoh. *J. Lumin.* **112**, 177 (2005).
- [3] J.S. Kim, H.M. Kim, H.L. Park, J.C. Choi. *Solid State Commun.* **137**, 115 (2006).
- [4] A. Barcz, G. Karczewski, T. Wojtowicz, M. Sadlo, J. Kossut. *Appl. Phys. Lett.* **72**, 206 (1998).
- [5] A. Severyn, T. Wojtowicz, G. Karczewski, A. Barcz, R. Jakiela. *Thin Solid Films* **367**, 220 (2000).
- [6] V.F. Agekian, N.A. Grunina, A.Yu. Serov, N.G. Filosofov, G. Karczewski. *Phys. Solid State* **56**, (11), 2149 (2014).
- [7] S.H. Sohn, Y. Hamakawa. *J. Phys. Soc. J.* **61**, 2129 (1992).