

## Люминесценция структур CdMnTe/CdMgTe с периодически расположенными узкозонными включениями

© В.Ф. Агекян<sup>†</sup>, G. Karczewski\*, А.Ю. Серов, Н.Г. Философов

НИИ физики им. В.А. Фока Санкт-Петербургского государственного университета,  
198504 Санкт-Петербург, Россия

\* Institute of Physics, Polish Academy of Sciences,  
02-668 Warsaw, Poland

(Получена 25 октября 2011 г. Принята к печати 31 октября 2011 г.)

Исследованы спектры экситонного и внутрицентрового излучения планарных структур с периодически расположенными слоями Cd<sub>0,9</sub>Mn<sub>0,1</sub>Te (номинальная толщина — один монослой), которые разделены барьерами Cd<sub>0,5</sub>Mg<sub>0,5</sub>Te различной толщины. Сложная структура спектров и характер их изменения в интервале температур 5–80 К указывают на неоднородность слоев Cd<sub>0,9</sub>Mn<sub>0,1</sub>Te, на значительную роль вертикальной диффузии, на корреляцию неоднородностей в направлении роста при малом расстоянии между узкозонными слоями Cd<sub>0,9</sub>Mn<sub>0,1</sub>Te. Существенным фактором, влияющим на спектральный состав и квантовый выход экситонного излучения, является соотношение радиуса экситона и периода структуры.

### 1. Введение

Управление свойствами наноструктур с помощью встраивания в них тонких слоев с определенным образом подобранным элементным составом представляет интерес как с научной, так и с практической точек зрения. Это позволяет осуществлять  $\sigma$ -легирование барьеров и квантовых ям (КЯ), встраивать двумерные потенциалы, на которых локализуется экситонное возбуждение, создавать магнитные слои, повышающие на порядки влияние внешнего магнитного поля на электронные уровни наноструктур.

К настоящему времени изучен целый ряд двумерных наноструктур группы II–VI, содержащих ультратонкие планарные слои. Оптические методы и просвечивающая электронная микроскопия дают существенную информацию об истинном строении и элементном составе таких систем [1–7]. Результаты исследований показывают, что планарные узкозонные слои толщиной порядка монослоя (МС) имеют сложную структуру при значительном несоответствии параметров решетки этих слоев и барьеров. Так, при изучении системы CdSe/ZnSe было установлено [4], что слои CdSe толщинами от долей МС до нескольких МС образуют две системы плоских наноостровков со средними размерами около 10 и 100 нм, при этом длина диффузии атомов кадмия в барьер ZnSe велика, она составляет 3–4 монослоя. Аналогичные результаты были получены для структуры с КЯ ZnCdSe толщиной 6 МС, разделенными барьерами ZnSe [6]. На примере системы CdTe/ZnMgTe показано, что неоднородность слоев приводит к немонотонным температурным зависимостям интегральной интенсивности люминесценции и ширины полос излучения [8]. Следствием несоответствия параметров решетки являются вертикальная корреляция строения ультратонких слоев и ее зависимость от толщины барьеров [9,10].

Информация о реальной структуре ультратонких слоев, содержащих оптически активные магнитные ионы марганца, может быть получена на основе изучения экситонной люминесценции в магнитном поле и внутрицентровой  $3d$ -люминесценции ионов Mn<sup>2+</sup>. Теллурид марганца является антиферромагнетиком, и, если вертикальная диффузия незначительна, последовательное нанесение одного или нескольких слоев Te–Mn–Te приведет к образованию двумерного антиферромагнитного слоя. В таком случае внешнее магнитное поле, направленное вдоль оси структуры, индуцирует слабое внутреннее поле, магнитный сдвиг спектра экситонной люминесценции невелик и линейен по полю. При существенной вертикальной диффузии магнитный слой превращается в парамагнитный твердый раствор с большой долей магнитных ионов, имеющих нескомпенсированные магнитные моменты. В соответствии с этим при приложении внешнего поля сдвиг спектра экситонной люминесценции будет значительным с характерным насыщением в сильном поле. Определенные сведения могут быть получены из анализа интенсивности и спектрального положения полосы внутрицентровой люминесценции (ВЛ) Mn<sup>2+</sup> и ее кинетики. На интенсивность и кинетику ВЛ Mn<sup>2+</sup> влияет эффективность миграции внутрицентрового возбуждения по ионам марганца. При высокой концентрации Mn в двумерном слое большая часть ионов марганца входит в состав кластеров, и в этом случае велика вероятность безызлучательных процессов (кооперативный эффект, тушение на дефектах). Кинетика ВЛ Mn<sup>2+</sup> должна изменяться при переходе от двумерной системы к трехмерной. Этот вопрос исследовался на примере матриц ZnS, в которые встраивались монослои, легированные марганцем. При расстоянии между легированными слоями < 30 МС наблюдалось изменение кривых затухания ВЛ Mn<sup>2+</sup>, которое интерпретировалось как начало межслоевого переноса внутрицентрового возбуждения [11]. О размытии монослоев MnTe в структурах типа CdTe/MnTe/CdMgTe свидетельствуют зависимости сдвигов полос экситонной люминес-

<sup>†</sup> E-mail: avf@VA4678.spb.edu  
vfag@rambler.ru

ценции КЯ CdTe различной ширины от величины внешнего магнитного поля [12]. Свидетельства образования парамагнитных слоев в области интерфейсов получены для систем с барьерами из разбавленных магнитных полупроводников CdTe/CdMnTe [13] и CdSe/CdMnSe [14]. Спектральное положение полосы ВЛ определяется кристаллическим полем на ионе марганца, которое зависит от элементного состава ближайшего катионного окружения [15].

## 2. Характеризация структур

Объектом нашего исследования являются периодические структуры Cd<sub>0.9</sub>Mn<sub>0.1</sub>Te/Cd<sub>0.5</sub>Mg<sub>0.5</sub>Te с номинальной толщиной слоев Cd<sub>0.9</sub>Mn<sub>0.1</sub>Te 1 МС. Толщины слоев Cd<sub>0.5</sub>Mg<sub>0.5</sub>Te составляют 40, 15, 4 МС (образцы #1, #2 и #3 соответственно), число периодов во всех образцах равно 100. Изучены структура и температурная зависимость спектров экситонной люминесценции и ВЛ Mn<sup>2+</sup>.

Ширина запрещенной зоны Cd<sub>0.9</sub>Mn<sub>0.1</sub>Te и Cd<sub>0.5</sub>Mg<sub>0.5</sub>Te равна 1.7 и 2.5 эВ соответственно, так что МС Cd<sub>0.9</sub>Mn<sub>0.1</sub>Te должны создавать потенциалы, локализуя экситоны. Толщина МС Cd<sub>0.5</sub>Mg<sub>0.5</sub>Te равна 0.32 нм, радиус экситона  $r_{eh}$  в Cd<sub>0.5</sub>Mg<sub>0.5</sub>Te оценивается как 30 нм, так что расстояние  $L_B$  между планарными узкозонными включениями в образце #1 много больше  $r_{eh}$ , в образце #3  $L_B \ll r_{eh}$ , в образце #2 значения  $L_B$  и  $r_{eh}$  близки друг к другу.

Внедрение регулярно расположенных МС Cd<sub>0.9</sub>Mn<sub>0.1</sub>Te в матрицу Cd<sub>0.5</sub>Mg<sub>0.5</sub>Te на деле приводит, вследствие вертикальной диффузии, к образованию твердого раствора CdMgMnTe с периодически изменяющимися относительными концентрациями катионных компонент. Локализация экситонного возбуждения возможна на статистических флуктуациях твердого раствора вообще, но наиболее сильные потенциалы образуются в областях с наименьшей концентрацией магния.

Дополнительный беспорядок в систему вносят флуктуации элементного состава в плоскости слоев. Выше говорилось об образовании плоских островков в системе CdSe/ZnSe с субмонослойными включениями ZnSe. Отметим, что постоянные решетки в системах CdSe–ZnSe и CdTe–ZnTe различаются на 11–12%, в системах MnTe–CdTe–MgTe — на 1–2%. Вследствие этого в нашем случае структурирование в плоскости сверхтонких слоев CdMnTe должно быть значительно более слабым.

## 3. Экситонная люминесценция

Спектры излучения образцов #1–3 приведены на рис. 1 и 2. Экситонная люминесценция образца #1 при 5 К представляет собой асимметричную полосу, которая с ростом температуры симметризуется (рис. 2, а). Люминесценция образца #2 при 5 К на 2 порядка слабее, при повышении температуры до 80 К высокоэнергетическая полоса полностью затухает и в излучении

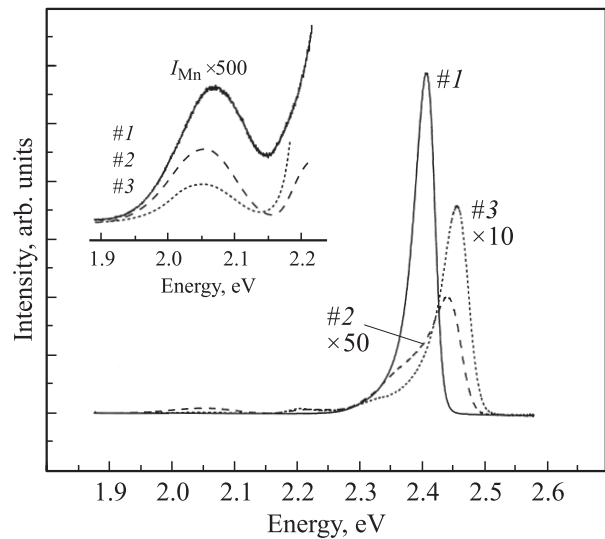
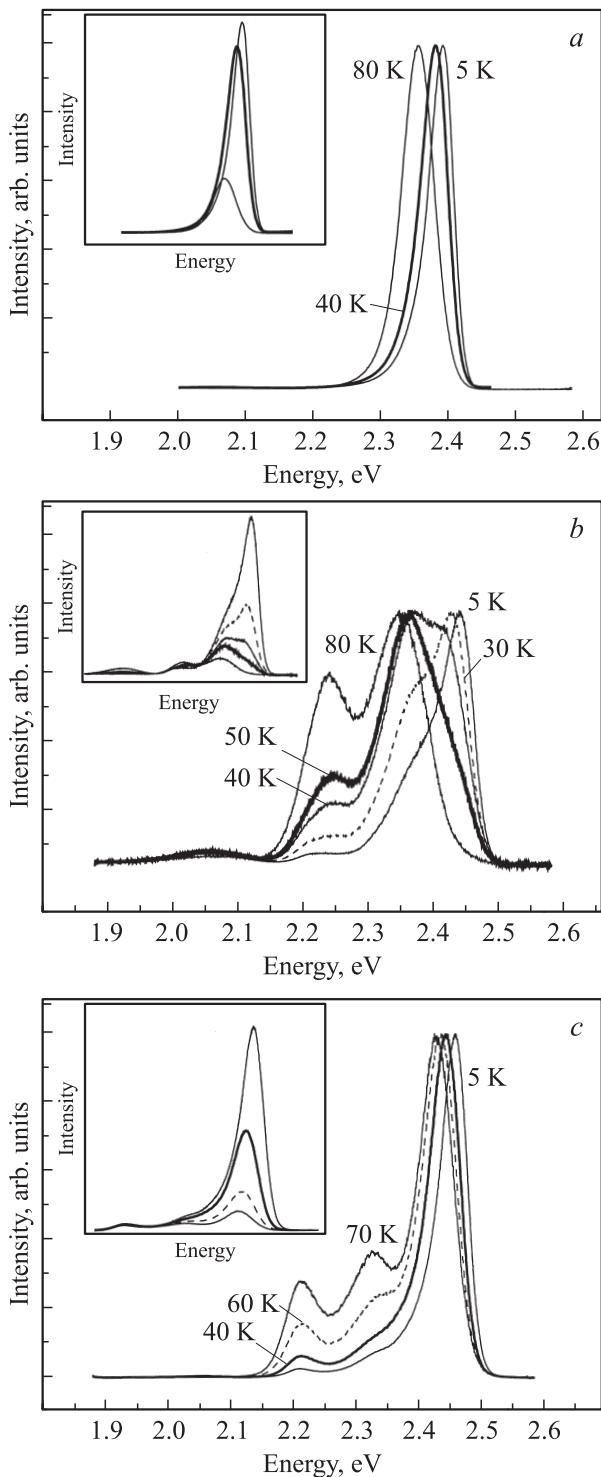


Рис. 1. Спектры экситонного излучения структур Cd<sub>0.9</sub>Mn<sub>0.1</sub>Te/Cd<sub>0.5</sub>Mg<sub>0.5</sub>Te (образцы #1, #2 и #3) при  $T = 5$  К. На вставке — спектры внутрицентральной люминесценции ионов Mn<sup>2+</sup>.

проявляются только более глубокие локализованные состояния (рис. 2, б). Люминесценция образца #3 при  $T = 5$  К на порядок слабее по сравнению с образцом #1. При низкой температуре доминирует высокоэнергетическая полоса, которая к 80 К затухает, и в спектре остаются полосы, обусловленные более глубокими локализованными состояниями (рис. 2, в). Во всех образцах высокоэнергетические полосы с ростом температуры от 5 до 80 К сдвигаются в область низких энергий на 0.03 эВ, тогда как спектральное положение полос более глубоких состояний в области 2.2 эВ остается неизменным. Обращает на себя внимание то, что в образце #1 интенсивность высокоэнергетической полосы мало изменяется в интервале 5–40 К, в то время как в образцах #2 и #3 в том же интервале температур она ослабляется вдвое. Таким образом, спектр люминесценции является наиболее простым при больших расстояниях между узкозонными слоями Cd<sub>0.5</sub>Mg<sub>0.5</sub>Te, на которых локализуется экситонное возбуждение. В этом случае связь между соседними слоями Cd<sub>0.9</sub>Mn<sub>0.1</sub>Te не возникает даже при значительной вертикальной диффузии катионных компонент. Вследствие этого в образце #1 нет вертикально связанных обогащенных кадмием областей локализации экситонов. Поскольку расстояние между узкозонными слоями в образце #1 много больше радиуса экситона, его локализация происходит на одном слое Cd<sub>0.9</sub>Mn<sub>0.1</sub>Te. Слабый низкоэнергетический хвост линии излучения соответствует локализации возбуждения при низкой температуре на участках узкозонного слоя, обогащенных кадмием. При повышении температуры локализация ослабляется, что проявляется в спектре как симметризация контура люминесценции. Благодаря взаимодействию экситона лишь с одним узкозонным слоем и двумерному характеру движения экситона (ми-



**Рис. 2.** Нормированные на максимальную интенсивность спектры экситонного излучения структур  $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te/Cd_{0.5}Mg_{0.5}Te$  при различных температурах. Образцы: *a* — #1, *b* — #2, *c* — #3. На вставках — те же спектры в ненормированном виде.

грация в плоскости слоя) люминесценция образца #1 имеет высокий квантовый выход со сравнительно слабой температурной зависимостью вплоть до 50 К. При даль-

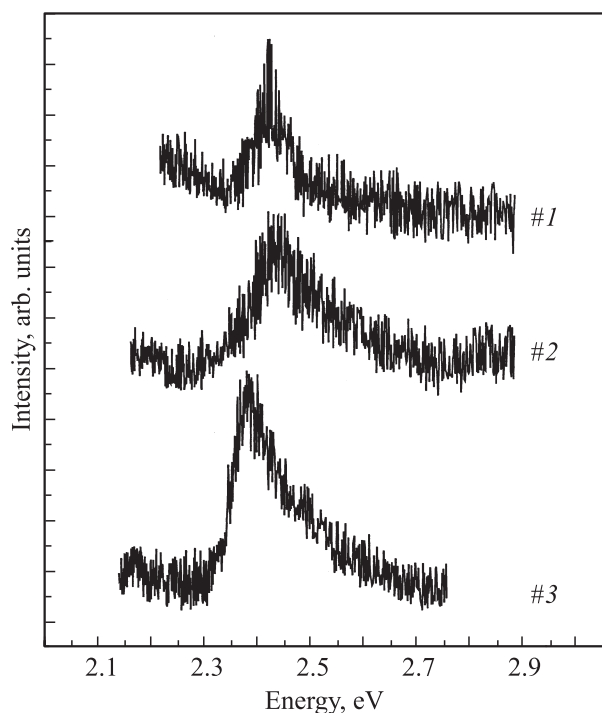
нейшем нагревании образца излучение быстро ослабляется вследствие делокализации экситонов.

В образце #3 расстояние между слоями  $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te$  близко по величине к длине вертикальной диффузии катионов, вследствие чего периодические изменения концентрации кадмия в направлении роста структуры оказываются слабо выраженными. Кроме того, волновая функция экситона распространяется в образце #3 на несколько узкозонных слоев, вследствие чего влияние на экситон периодического изменения катионного состава в направлении роста структуры ослабляется. В отличие от предыдущего случая, в образце #3 наблюдается постепенное уменьшение интенсивности люминесценции с ростом температуры. Излучение из глубоких локализованных состояний проявляется в образце #3 сильнее, чем в образце #1. По-видимому, вертикальная связь между узкозонными слоями способствует появлению крупных обогащенных кадмием образований.

В образце #2 толщина слоев  $Cd_{0.5}Mg_{0.5}Te$  несколько превышает длину вертикальной диффузии катионных компонент и величину экситонного радиуса. По этим причинам неоднородность катионного состава вдоль направления роста и в плоскости слоев, а также чувствительность экситона к отдельным локализуемым потенциалам в данном образце сильнее, чем в предыдущих двух случаях. Это согласуется с более сложным спектральным составом излучения, где наблюдается несколько полос с сильно различающимися температурными зависимостями интенсивности. При росте температуры в образце #2 происходит резкое перераспределение излучения в пользу более глубоких локализованных состояний. Отметим, что уменьшение интегральной интенсивности экситонной люминесценции в образце #1 в интервале 5–80 К в несколько раз слабее, чем в образцах #2 и #3.

#### 4. Внутрицентровая люминесценция ионов марганца

Полоса ВЛ  $Mn^{2+}$  в образце #1 сдвинута в высокоэнергетическую сторону по сравнению с ее положением в образцах #2 и #3 (рис. 1). Известно, что кристаллическое поле, действующее на ион марганца, ослабляется, когда в ближайшем катионном окружении ионы кадмия и марганца замещаются ионами магния. Этим объясняется положение полосы в образце с наибольшими расстояниями между встроенными слоями  $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te$  в случае существенной вертикальной диффузии марганца. Образцы #1–3 содержат одинаковое число ионов марганца, однако интенсивность полосы ВЛ  $Mn^{2+}$  ослабляется при уменьшении расстояния между слоями  $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te$  (рис. 1). Это является следствием вертикальной диффузии катионов, которая приводит к пространственному перекрытию позиций ионов марганца из соседних слоев  $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te$ . В этой ситуации миграция внутрицентрового возбуждения идет не только в плоскости слоев, но и в направлении роста структуры,



**Рис. 3.** Спектры возбуждения внутрицентральной люминесценции  $Mn^{2+}$  в структурах  $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te/Cd_{0.5}Mg_{0.5}Te$  при  $T = 5$  К.

что способствует усилению безызлучательных процессов. Максимум спектров возбуждения ВЛ  $Mn^{2+}$  находится в области экситонного поглощения (рис. 3). Отсюда следует, что основным механизмом возбуждения ионов марганца является перенос энергии зонных состояний в  $3d$ -оболочку.

## 5. Заключение

Таким образом, люминесценция периодических систем, состоящих из ультратонких слоев  $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te$  и барьеров  $Cd_{0.5}Mg_{0.5}Te$ , имеет сложную структуру, зависящую от толщины барьеров. Это свидетельствует о неоднородности слоев  $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te$  и существенном влиянии на излучательные свойства соотношения толщины барьеров и экситонного радиуса.

## Список литературы

- [1] W. Grieshaber, A. Haury, J. Cibert, Y. Merle d'Aubigné, A. Wasiela, J.A. Gaj. Phys. Rev. B, **53**, 4891 (1996).
- [2] S. Lee, M. Dobrowolska, J.K. Furdyna, H. Luo, L.R. Ram-Moham. Phys. Rev. B, **53**, 16 939 (1996).
- [3] N. Peranio, A. Rosenauer, D. Herthsen, S.V. Sorokin, I.V. Sedova, S.V. Ivanov. Phys. Rev. B, **61**, 16 015 (2000).
- [4] D. Litvinov, D. Herthsen, A. Rosenauer, H. Preis, E. Kurtz, C. Klingshirn. Phys. Status Solidi B, **224**, 147 (2001).
- [5] D. Litvinov, A. Rosenauer, D. Herthsen, N.N. Ledentsov. Phys. Rev. B, **61**, 16 819 (2000).

- [6] A. Klochikhin, A. Reznitsky, B. Dal Don, H. Priller, H. Kalt, C. Klingshirn, S. Ppermogorov, S. Ivanov. Phys. Rev. B, **69**, 085 308 (2004).
- [7] A.M. Kapitonov, U. Woggon, D. Kayser, D. Hommel, T. Itoh. J. Luminesc., **112**, 177 (2005).
- [8] F. Tinjod, L. Besombes, L. Marsal, K. Kheng, H. Mariette. Phys. Status Solidi B, **229**, 591 (2002).
- [9] X. Lui, M. Dobrowolska, J.K. Furdyna, S. Lee. Physica E, **32**, 65 (2006).
- [10] D. Litvinov, A. Rosenauer, D. Herthsen, H. Preis, K. Fuchs, S. Bauer. J. Appl. Phys., **89**, 3695 (2001).
- [11] W. Park, T.C. Jones, S. Schon, W. Tong, M. Chaichimansur, B.K. Wagner, C.J. Summers. J. Cryst. Growth, **184/185**, 1123 (1998).
- [12] В.Ф. Агекян, P.O. Holz, G. Karczewski, B.H. Кац, E.C. Москаленко, А.Ю. Серов, Н.Г. Философов. ФТП, **45**, 1353 (2011).
- [13] D.R. Yakovlev, G. Mackh, B. Kuhl-Heinrich, W. Ossau, A. Waag, G. Landwehr, R. Hellman, E.O. Göbel. Phys. Rev. B, **52**, 12 033 (1995).
- [14] I.I. Reshina, S.V. Ivanov, I.V. Sedova, S.V. Sorokin. Semicond. Sci. Technol., **23**, 075 029 (2008).
- [15] В.Ф. Агекян, Н.Н. Васильев, А.Ю. Серов, Н.Г. Философов. ФТТ, **42**, 816 (2000).

Редактор Л.В. Шаронова

## Luminescence of $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te/Cd_{0.5}Mg_{0.5}Te$ periodical structures with narrowband inclusions

V.F. Agekyan, G. Karczewski\*, A.Yu. Serov, N.G. Filosofov

Fock Institute of Physics,  
St. Petersburg State University,  
198504 St. Petersburg, Peterhof, Russia  
\* Institute of Physics, Polish Academy of Sciences,  
02-668 Warsaw, Poland

**Abstract** Exciton and  $Mn^{2+}$  intracenter luminescence is studied in  $Cd_{0.5}Mg_{0.5}Te$  matrixes with periodically embedded  $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te$  narrowband layers. The  $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te$  inclusions of one monolayer in nominal thickness were separated by 40, 15, and 4  $Cd_{0.5}Mg_{0.5}Te$  monolayers for three samples under consideration. The spectral properties of the exciton luminescence and its temperature behavior point to a nonuniformity of  $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te$  layers as well an important role of the vertical diffusion. This diffusion contributes to correlation of the areas enriched with manganese in the growth direction. The relation between the exciton size and structure period is of importance for the spectral properties and quantum yield of the exciton luminescence.