

# Локализация экситонного возбуждения в планарных структурах $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}/\text{Cd}_{0.7}\text{Mg}_{0.3}\text{Te}$

© В.Ф. Агеян, А.Ю. Серов, Н.Г. Философов, G. Karczewski\*

Научно-исследовательский институт физики им. В.А. Фока Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Петергоф, Россия

\* Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

E-mail: avf@VA4678.spb.edu

(Поступила в Редакцию 17 марта 2009 г.)

Исследованы спектры излучения экситона в серии периодических структур с ультратонкими узкозонными включениями  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}$  в матрице  $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$ . Сложная структура спектров люминесценции и их соотношение со спектрами возбуждения свидетельствуют о наличии крупномасштабных флуктуаций толщин узкозонных слоев. Установлено два типа температурной зависимости люминесценции локализованных экситонов: 1) полное подавление излучения выше 80 К; 2) относительное усиление температурно-устойчивой низкоэнергетической полосы, соответствующей локальным утолщениям планарных слоев  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}$ .

Работа выполнена при поддержке гранта „Развитие научного потенциала высшей школы“ № 2.1.1.1812 Министерства науки и образования РФ.

PACS: 73.21.Fg, 78.66.Hf, 78.67.-h

## 1. Введение

В последние годы проведены многочисленные исследования оптических свойств наноструктур на основе полупроводников группы II–VI с ультратонкими слоями узкозонной компоненты — сплошными и островковыми (см., например, [1–7]). На основе спектров люминесценции, возбуждения люминесценции и рамановского рассеяния изучаются строение ультратонких слоев, локализация на них экситонного возбуждения, электрон-фононное взаимодействие (концепция связанного полярона) и другие вопросы. Особый интерес проявляется к системам, которые содержат разбавленные магнитные полупроводники (РМП) группы II–VI. Внимание к гибридным наноструктурам, одна из составляющих которых содержит магнитные атомы, определяется возможностью создания на их основе материалов с сильными магнитными свойствами и высокой магнитной анизотропией. В таких системах благодаря гигантскому зеемановскому расщеплению электронных зон достигается высокая спиновая поляризация электрона. В объемных РМП и наноструктурах на их основе исследуется влияние магнитного поля, плотности мощности возбуждения и температуры на спин-зависимый перенос энергии из зонных состояний на незаполненные  $3d$ -оболочки [8–17]. Экспериментально это можно наблюдать как воздействие поля на относительные интенсивности экситонного и внутрицентрового  $3d$ -излучения, фоточувствительность и времена затухания экситонной люминесценции.

Перспективными объектами для изучения этого круга вопросов являются наноструктуры, содержащие ультратонкие слои РМП. Предметом настоящей работы является исследование люминесценции экситонов, локализованных на периодически расположенных узкозонных нанослоях  $\text{CdMnTe}$  в матрице  $\text{CdMgTe}$ . На спектральный

состав и температурную зависимость этой люминесценции сильно влияет реальное строение узкозонных нанослоев.

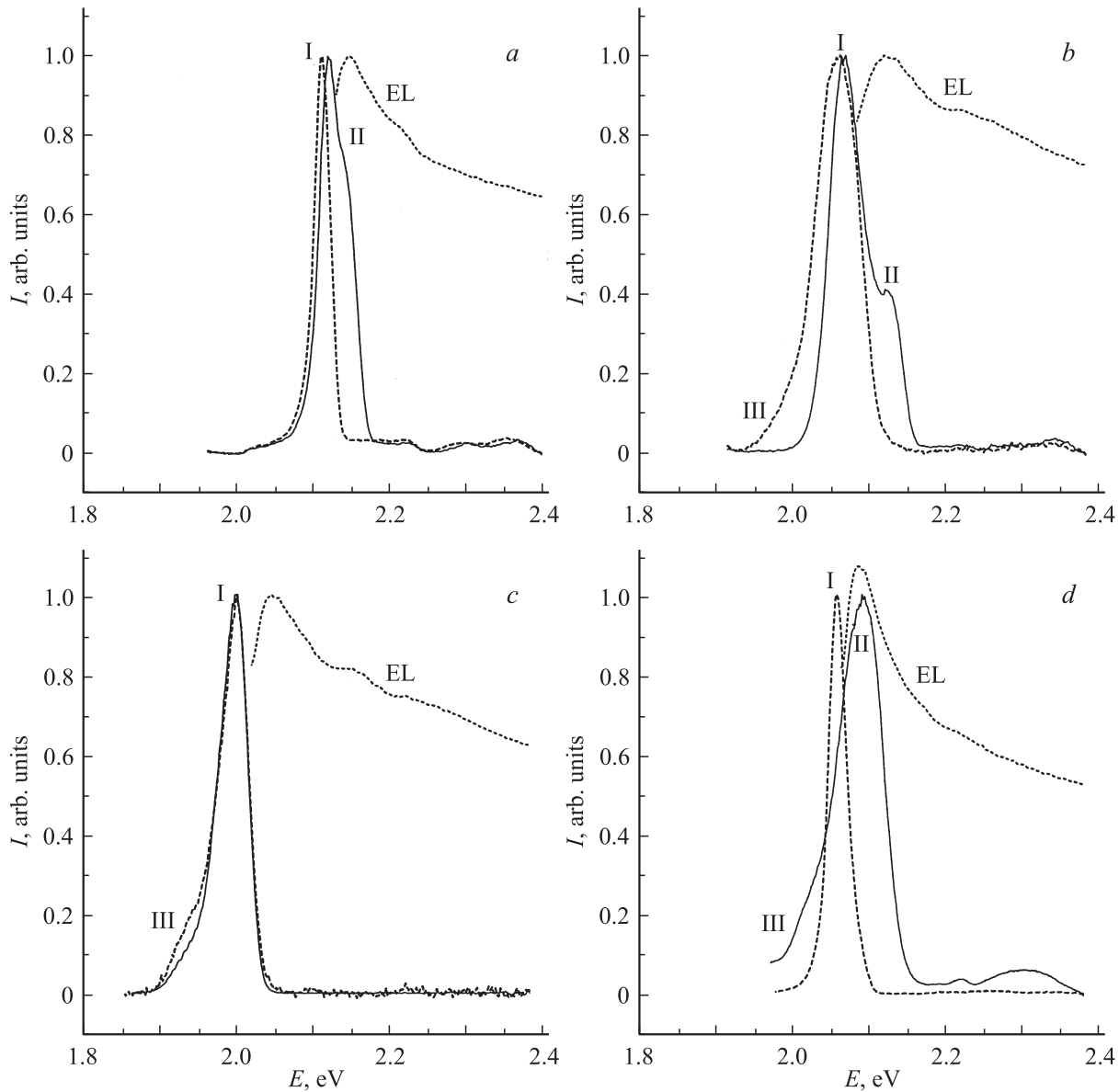
## 2. Эксперимент

Структуры  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}/\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$  были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке GaAs с ориентацией [100] без прерывания роста на интерфейсах. Каждый образец является периодической структурой, состоящей из узкозонных планарных включений  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}$  с толщиной в несколько монослоев (МС), разделенных барьерами  $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$ . Номинальное строение наноструктур: образец № 1 — 6МС  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}/30\text{МС}$   $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$  (4 периода); образец № 2 — 3МС  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}/30\text{МС}$   $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$  (4 периода); образец № 3 — 3МС  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}/4\text{МС}$   $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}/3\text{МС}$   $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}/30\text{МС}$   $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$  (4 периода); образец № 4 — 3МС  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}/12\text{МС}$   $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$  (10 периодов); образец № 5 (контрольный) — слой  $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$  толщиной около  $1\ \mu\text{m}$  без узкозонных включений.

Образцы помещались в оптический криостат Janis Research SHI-4-1 с замкнутым гелиевым циклом, температура изменялась в пределах 5–100 К. Люминесценция возбуждалась непрерывным неодимовым лазером на второй гармонике излучения ионов  $\text{Nd}^{3+}$ . Спектры излучения регистрировались спектрометром МДР-206 с ПЗС-матрицей.

## 3. Результаты и обсуждение

В образцах № 1–4 при 5 К наблюдается яркая фотолюминесценция экситонов, локализованных на узкозонных слоях  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}$ . Энергетическое положение

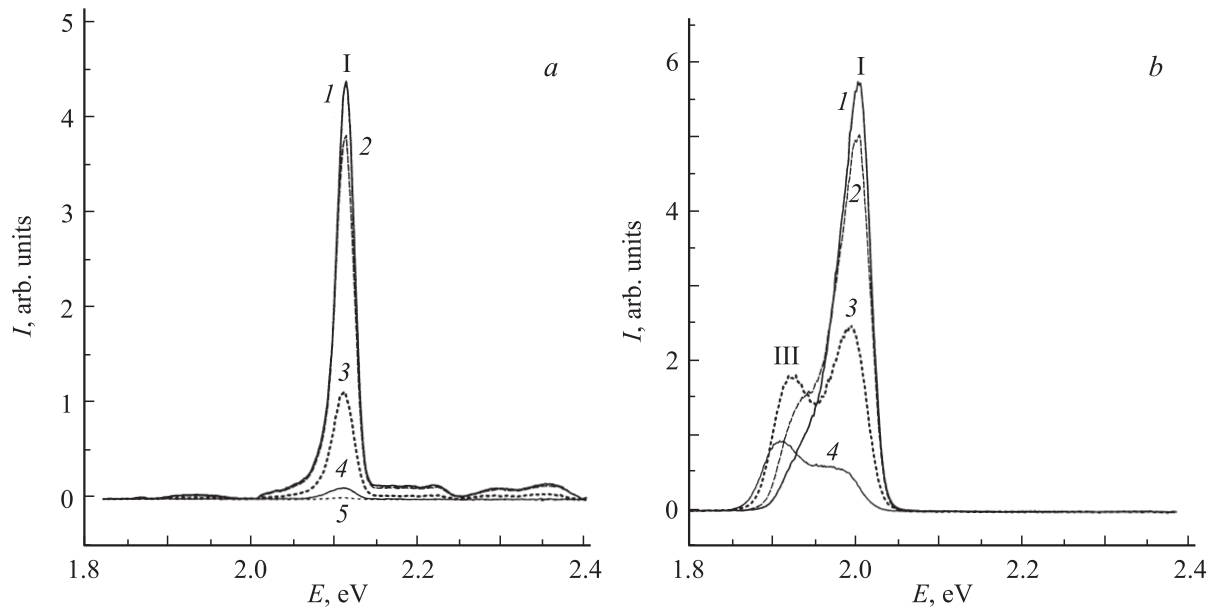


**Рис. 1.** Люминесценция экситонов в структурах  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}/\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$  при  $T = 5$  К. Образцы № 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d). Сплошными и штриховыми линиями показаны номерные по максимуму спектры, полученные от разных областей образца. I и III — излучение уширенных участков узкозонных слоев, II — излучение слоев с номинальной толщиной. EL — спектры возбуждения люминесценции.

полос излучения зависит от строения перидов и элементного состава сверхрешеток. Максимальным интенсивностям экситонного излучения соответствует энергия 2.11 (№ 1), 2.05 (№ 2), 2.00 (№ 3) и 2.07 eV (№ 4). Эти значения энергии определяются не только номинальными параметрами узкозонных нанослоев, но и их реальной структурой, в частности локальными уширениями нанослоев. Следует также принять во внимание некоторый разброс истинных концентраций катионных компонент в слоях  $\text{CdMnTe}$  и  $\text{CdMgTe}$  от образца к образцу. Рассмотрим форму спектров люминесценции наноструктур (рис. 1).

В образце № 1 слои  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}$  имеют толщину, достаточную для того, чтобы значительная доля

волновой функции экситона оказалась в образованной ими квантовой яме (КЯ). Полоса излучения I, имеющая слабый длинноволновый хвост, является в этом образце самой узкой (ширина на полувысоте контура составляет 0.02 eV). Однако в некоторых областях структуры наблюдается коротковолновое плечо II, близкое к максимуму спектра возбуждения люминесценции (EL) (рис. 1, a). Спектр EL отражает плотность электронных состояний, так что коротковолновое плечо является излучением экситонов из тех областей образца, где КЯ имеет толщину 6 МС. Основное излучение (полоса I) идет из расширений КЯ с толщиной 7 МС, длинноволновый хвост соответствует более широкому участку КЯ.



**Рис. 2.** Люминесценция экситонов в структурах  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}/\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$ . *a* — образец № 1 при температурах 5 (1), 20 (2), 40 (3) и 80 (5); *b* — образец № 3 при температурах 5 (1), 40 (2), 80 (3) и 120 К (4). I и III — излучение уширенных участков узкозонных слоев.

В спектре образца № 2 основная полоса I в 3 раза шире, и всегда присутствует более слабая полоса III со стороны низких энергий. Узкозонный слой в этом образце очень тонкий, вследствие чего монослойные флуктуации его толщины изменяют энергию локализации экситона значительно сильнее, чем в образце № 1. Полоса I является излучением экситонов из слоев  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}$  с толщиной 4 МС, полоса III соответствует большим расширениям нанослоев. Как и в предыдущем случае, в образце № 2 есть участки, где в спектре люминесценции наблюдается полоса, совпадающая с максимумом EL (излучение экситонов из слоев  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}$  с толщиной 3 МС) (рис. 1, *b*).

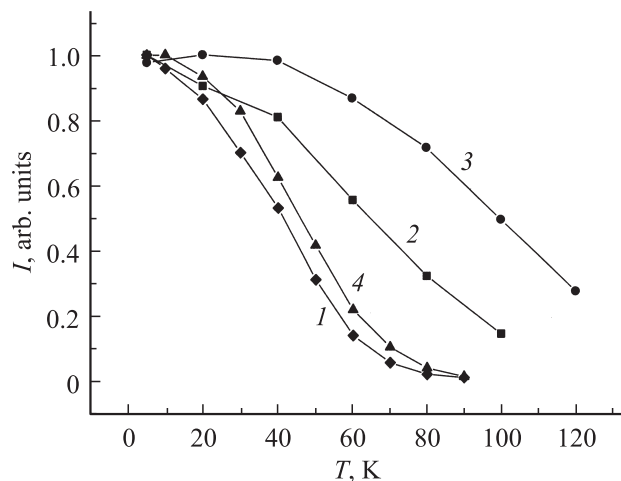
В образце № 3 полоса I в 2 раза шире, чем в образце № 1, и также наблюдается слабая полоса III. Сложный нанослой в образце № 3 является КЯ со встроенным прозрачным барьером, так что электронные состояния КЯ узкозонных слоев объединены. Благодаря этому ширина полосы I меньше, чем в образце № 2 с самым тонким узкозонным слоем (рис. 1, *c*).

Образец № 4 имеет такие же узкозонные слои, как и образец № 2, однако широкозонные слои  $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$  в нем значительно тоньше. Диаметр экситона в  $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$  можно определить по известным значениям диэлектрической проницаемости для  $\text{CdTe}$  и  $\text{MgTe}$ , если принять, что эффективные массы носителей в  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  увеличиваются с ростом  $x$  приблизительно так же, как в  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  [18] (эти твердые растворы имеют близкие зависимости ширины запрещенной зоны от соотношения концентраций катионных компонент). Диаметр экситона можно оценить как 7–8 нм (21–24 МС), т. е. в образце № 4 волновая функция экситона охватывает соседние узкозонные слои.

Толщина барьерного слоя достаточно велика, чтобы флуктуации толщины соседних узкозонных слоев не коррелировали между собой, так что влияние этих флуктуаций на энергию локализации экситона уменьшается. В результате этого полоса излучения I в образце № 4, как правило, узка и симметрична. В люминесценции от некоторых участков, как и в образце № 1, наблюдается коротковолновая полоса III, совпадающая по энергии с максимумом EL (рис. 1, *d*).

Сложная структура спектров излучения локализованных экситонов и большая ширина полос свидетельствуют о том, что интерфейсы в исследованных образцах не являются гладкими на характерной длине порядка размера экситона. В исследованных структурах порог возбуждения внутрицентровых переходов в ионе  $\text{Mn}^{2+}$  расположен немного выше уровней локализованных экситонов, поэтому люминесценция  $3d$ -оболочки  $\text{Mn}^{2+}$  не наблюдается. Люминесценция образца № 5 — твердого раствора  $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$  — на порядок слабее, чем в образцах, содержащих узкозонные слои.

В образцах № 1 и 4, где при 5 К наблюдаются узкие и симметричные основные полосы I, происходит их быстрое гашение с ростом температуры (рис. 2, *a*). В излучении образцов № 2 и 3 с ростом температуры относительно усиливается полоса III (рис. 2, *b*). Возникновение полос I и III можно объяснить существованием двух уровней локализации — на минимальных утолщениях узкозонного слоя и на более существенных утолщениях. При этом энергии локализации возрастают при уменьшении номинальной толщины узкозонного слоя. Температурное подавление локализации экситонов приводит в первую очередь к тушению полосы I. Что же касается полосы III, то в определенном температур-



**Рис. 3.** Температурная зависимость интегральной интенсивности люминесценции экситонов в структурах  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}/\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$  (образцы № 1–4). Интенсивности нормированы при  $T = 5\text{ K}$ . Номера кривых соответствуют номерам образцов.

ном интервале она усиливается, что можно объяснить ослаблением захвата экситонов и носителей заряда на уровни с меньшей энергией локализации. Поскольку в образце № 3 пары нанослоев  $\text{CdMnTe}$  разделены очень тонким широкозонным слоем, возможна корреляция толщин парных слоев. В результате могут возникать участки с сильным уширением нанослоев и соответственно с сильной локализацией экситонов. Экспериментально это проявляется в температурной устойчивости длинноволновой полосы III.

На рис. 3 приведены температурные зависимости интегральной интенсивности люминесценции. Видно, что в образцах № 1 и 4, где наблюдаются сравнительно узкие и симметричные полосы, температурное тушение экситонной люминесценции происходит гораздо быстрее, чем в образцах № 2 и 3. Это различие, по-видимому, связано с разной степенью локализации экситонов относительно их движения в плоскости узкозонных включений. Концентрационные флуктуации в барьере  $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$  усиливают локализацию экситонов в отдельных областях исследованных планарных наноструктур. Вопрос о том, почему в образцах № 1 и 4 при температурах выше 100 K практически полностью подавлена экситонная люминесценция, требует дополнительного изучения.

Таким образом, спектры люминесценции локализованных экситонов указывают на значительные крупномасштабные флуктуации толщин тонких слоев  $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}$  в матрице  $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$ .

## Список литературы

[1] U. Woggon, W. Petri, A. Dinger, S. Petillon, M. Hetterich, M. Grun, K.P. O'Donnell, H. Kalt, C. Klingshirn. *Phys. Rev. B* **55**, 1364 (1997).

[2] F. Tinjod, S. Becombes, L. Marsal, K. Kheng, H. Mariette. *Phys. Status Solidi B* **229**, 591 (2002).

[3] A.M. Kapitonov, U. Woggon, D. Kayser, D. Hommel, T. Itoh. *J. Lumin.* **112**, 177 (2005).

[4] T. Kryshab, J.A. Andraca, L.V. Borkovska, N.O. Korsunska, Ye.F. Venger, Yu.G. Sadofyev. *Microelectron. J.* **39**, 418 (2008).

[5] A. Alvaro-Martinez, I. Hernandez-Calderon. *Microelectron. J.* **39**, 594 (2008).

[6] A. Klochikhin, A. Reznitsky, B. Dal Don, H. Priller, H. Kalt, C. Klingshirn, S. Permogorov, S. Ivanov. *Phys. Rev. B* **69**, 085 308 (2004).

[7] J.S. Kim, H.M. Kim, H.L. Park, J.C. Choi. *Solid State Commun.* **137**, 115 (2006).

[8] S. Lee, M. Dobrowolska, J.R. Furdyna. *Phys. Rev. B* **72**, 075 320 (2005).

[9] H. Falk, W. Heimbrodt, P.J. Klar, J. Hübner, M. Oestreich, W.W. Rühle. *Phys. Status Solidi B* **221**, 781 (2002).

[10] K. Subata, E. Nakayama, I. Suoma, A. Murayma, Y. Oka. *Phys. Status Solidi B* **229**, 473 (2002).

[11] M. Godlewski, V.Yu. Ivanov, A. Khachapuridze, S. Yatsunencko. *Phys. Status. Solidi B* **229**, 533 (2002).

[12] M. Nawrocki, Yu.G. Rubo, J.P. Laskaray, D. Coquillat. *Phys. Rev. B* **52**, R 2241 (1995).

[13] E. Oh, D.G. Choi, Shin Kim, S. Lee, J.K. Furdyna, D.G. Oh. *Solid State Commun.* **135**, 471 (2005).

[14] I.A. Bulanova, G.Yu. Rudko, W.M. Chen, A.A. Toporov, S.V. Sorokin, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev. *Appl. Phys. Lett.* **82**, 1700 (2003).

[15] M. Chali, J. Kossut, E. Janik, W. Heiss. *Semicond. Sci. Technol.* **19**, 359 (2004).

[16] В.Ф. Агеян, Н.Н. Васильев, I. Akai, T. Karasawa, G. Karczewski, А.Ю. Серов, Н.Г. Философов. *ФТТ* **49**, 1117 (2007).

[17] В.Ф. Агеян, И.А. Пономарева, А.Ю. Серов, Н.Г. Философов, G. Karczewski. *ФТТ* **50**, 336 (2008).

[18] F. Long, P. Harrison, W.E. Hadston. *J. Appl. Phys.* **79**, 6939 (1996).