

# Люминесценция CdMgTe с ультратонкими нанослоями CdMnTe

© В.Ф. Агемян, И.А. Пономарева, А.Ю. Серов, Н.Г. Философов, G. Karczewski\*

Научно-исследовательский институт физики им. В.А. Фока Санкт-Петербургского государственного университета, 198504 Санкт-Петербург, Петергоф, Россия

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

E-mail: avf@VA4678.spb.edu

(Поступила в Редакцию 18 июня 2007 г.)

В люминесценции сверхрешеток  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  с узкозонными нанослоями  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$ , имеющими номинальную толщину 0,5, 1,5 и 3,0 монослоя, наблюдаются полосы экситонного излучения барьеров  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  и нанослоев, а также внутрицентровая люминесценция ионов  $\text{Mn}^{2+}$ . Во всех образцах излучение нанослоев  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$  состоит из двух полос, которые на основании зависимости люминесценции от толщины нанослоя и температуры отнесены к экситонам, локализованным на двумерных и нульмерных потенциалах. Во внутрицентровом излучении  $\text{Mn}^{2+}$   $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$  толщиной 3,0 монослоя заметно проявляется миграция возбуждения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации (грант РНП 2.1.1.362 по развитию научного потенциала высшей школы).

PACS: 71.35.-y, 71.70.Ch, 78.55.Et, 78.67.De

## 1. Введение

К настоящему времени выполнено много работ по спектрам излучения объемных широкозонных кристаллов группы II–VI с планарными включениями узкозонной изоэлектронной компоненты с номинальными толщинами от десятых долей монослоя (МС) до нескольких МС. В частности, подробно исследованы системы  $\text{CdTe}/\text{ZnTe}$  [1],  $\text{CdSe}/\text{ZnSe}$  [2,3],  $\text{ZnS}/\text{ZnTe}$  [4] (см. также ссылки [5–30] в статье [2]). Изучалась локализация экситонов не только на отдельных слоях узкозонной компоненты, но и на последовательностях близкорасположенных слоев. Малая толщина узкозонных включений, как правило, обеспечивает хорошее качество структур даже при существенном различии параметров решетки базовых бинарных соединений. Вводя в матрицу узкозонные слои и изменяя их толщины, можно проследить переход от локализации на малых кластерах, на островковых включениях с различными латеральными размерами и на сплошных нанослоях минимальной толщины к квазидвумерной локализации в узких квантовых ямах и в квантовых точках, имеющих уровни размерного квантования.

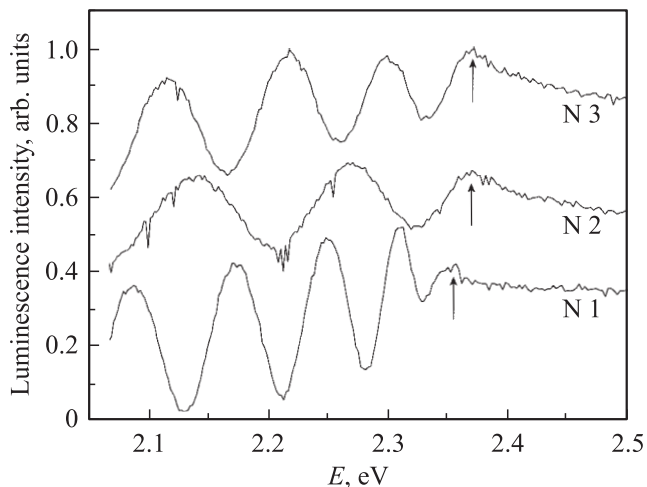
В нашей работе исследуется излучение матрицы  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ , содержащей слои  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ . Присутствие в слоях ионов марганца с максимально возможным магнитным моментом недостроенной  $3d$ -оболочки делает эту систему интересной для изучения магнитной анизотропии при приложении внешнего поля вдоль слоев  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  и перпендикулярно им.

## 2. Образцы для исследований

Сверхрешетки  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  изготовлены методом МПЭ без прерывания роста после нанесения узкозонного слоя. На подложке (100) GaAs

последовательно выращивались буферные слои  $\text{CdTe}$  ( $4\ \mu\text{m}$ ) и  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  ( $1.4\ \mu\text{m}$ ), сверхрешетка  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  и защитный слой  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  (50 nm). Сверхрешетки образцов № 1, 2 и 3 содержат слои  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$  номинальной толщиной 0,5, 1,5 и 3,0 МС соответственно, разделенные барьерами  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  толщиной 50 МС. Число периодов в сверхрешетках равно 60 (№ 1), 40 (№ 2) и 20 (№ 3). Величина  $y$  несколько изменяется от образца к образцу (в пределах  $0.42 < y < 0.46$ ), ее точное значение устанавливается по положению экситонного пика в спектрах отражения и спектрах возбуждения люминесценции барьеров (матрицы). Ожидается, что тонкие слои  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$  напряжены однородно и псевдоморфны.

Матрица  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  является твердым раствором, в котором различие ионных радиусов катионов является значительным (0,082 nm для  $\text{Mg}^{2+}$  и 0,114 nm для  $\text{Cd}^{2+}$ ), однако постоянные решетки  $\text{CdTe}$  и  $\text{MgTe}$  отличаются друг от друга менее чем на 1% (для  $\text{CdTe}$  и  $\text{MnTe}$  — 2%). Тем не менее объемные кристаллы  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  и  $\text{Cd}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Mg}_y\text{Te}$ , выращенные по методу Бриджмена, содержат структурные дефекты. Причиной их образования может быть переход сфалерит–вуртцит, который происходит в этих твердых растворах при определенном соотношении концентраций катионных компонент. Методом дифракции рентгеновских лучей было установлено, что в кристаллах  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  и  $\text{Cd}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Mg}_y\text{Te}$  есть тенденция к упорядоченному размещению катионных атомов и к микродвойникованию [5]. Вследствие невысокого качества объемных кристаллов квантовый выход экситонной люминесценции в них низок [6]. Методом МПЭ выращиваются гораздо более совершенные кристаллические слои этих твердых растворов, и в образцах № 1–3 при низких температурах наблюдается яркая люминесценция широкозонной матрицы  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ . Высокому квантовому выходу люминес-



**Рис. 1.** Спектры отражения  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  (образцы № 1, 2 и 3) при  $T = 84\text{ K}$ . Стрелками указан экситонный максимум  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ .

ценции способствуют сильные флуктуации случайного потенциала в  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ , эффективно локализуя носители и экситоны даже при сравнительно высоких температурах. Большая величина флуктуаций может быть обусловлена значительным различием электронных поляризуемостей ионов  $\text{Cd}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  ( $10.9 \cdot 10^{-4}$  и  $0.94 \cdot 10^{-4} \text{ nm}^3$  соответственно [7]).

В спектре отражения образцов наблюдается интерференция, параметры которой определяются в основном толщиной широкозонных компонент структур-буферных слоев и матрицы  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ , однако определенную роль играет и толщина встроенных в матрицу узкозонных слоев. Интерференционная картина с высокоэнергетической стороны ограничена краем экситонного поглощения  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  (рис. 1).

### 3. Люминесценция локализованных экситонов

В спектрах люминесценции образцов № 1–3 при надбарьерном возбуждении аргоновым лазером с плотностью мощности  $0.1 \text{ W/cm}^2$  присутствуют полосы экситонов, локализованных в барьере  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  (B) и на включениях  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$  (I, II), а также полоса  $3d$ -излучения  $\text{Mn}^{2+}$ . При нагревании от  $14\text{ K}$  люминесценция всех образцов ослабляется, и сильно изменяется относительная интенсивность полос излучения.

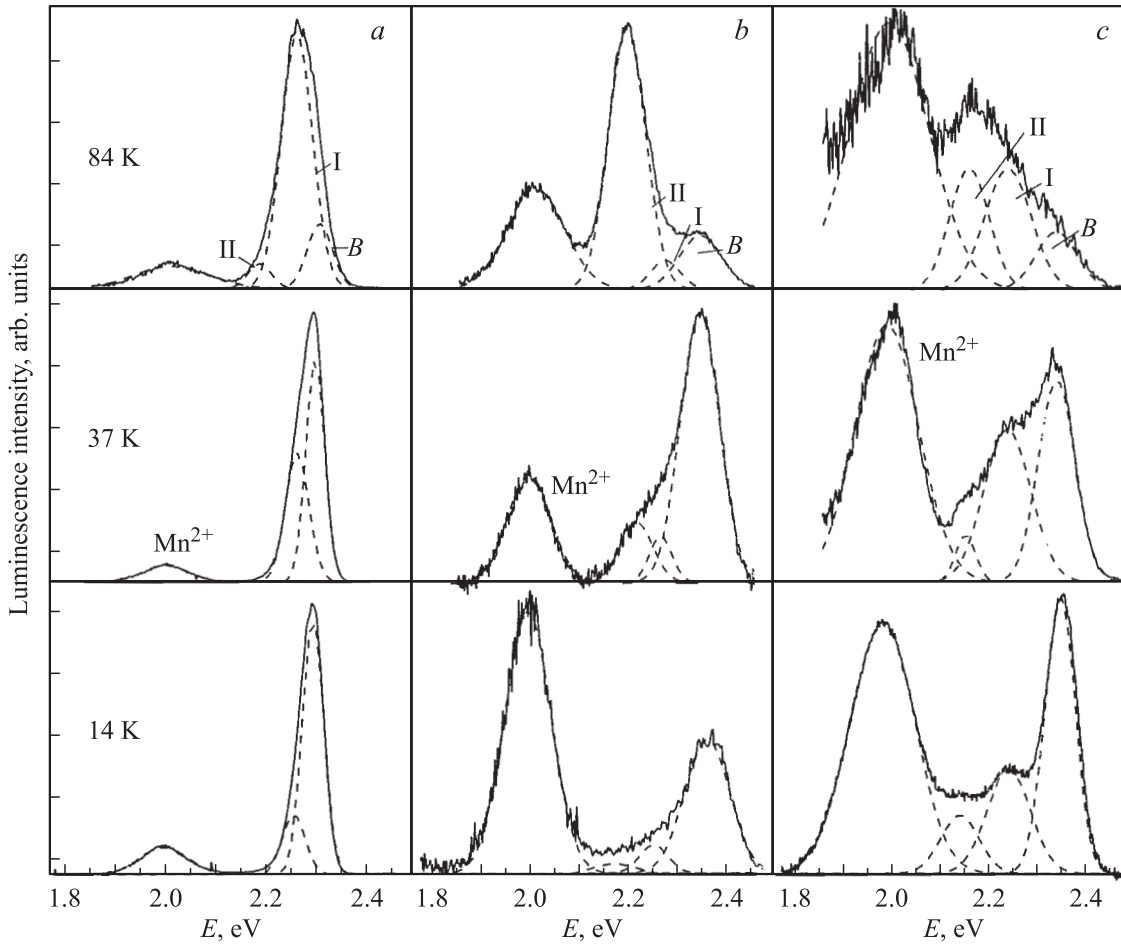
**Образец № 1** (рис. 2, a). Интегральная интенсивность люминесценции при  $80\text{ K}$  на порядок больше, чем в образцах № 2 и 3. При низких температурах эффективность переноса возбуждения на нанослой  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$  мала, и излучательная рекомбинация идет в основном через экситоны локализованные в матрице  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ . Люминесценцию слоев  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$  при  $14\text{ K}$  выделить трудно вследствие ее сравнительно малой интенсивности и близости по энергии к яркому излучению

$\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ . При  $T > 80\text{ K}$  люминесценция барьеров относительно ослабляется и доминирует экситонное излучение полосы I  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$ .

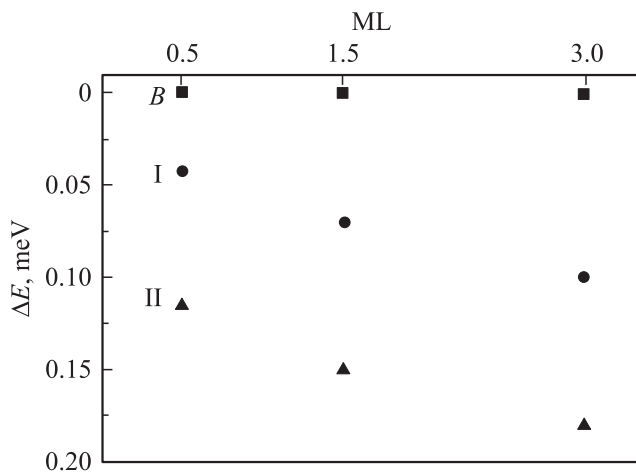
**Образец № 2** (рис. 2, b). В температурном интервале  $10\text{--}40\text{ K}$  полосы излучения  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  (B) и  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$  (I) близки по интенсивности, выше  $40\text{ K}$  резко усиливается полоса II, при  $T = 84\text{ K}$  она на порядок интенсивнее излучения  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ .

**Образец № 3** (рис. 2, c). Несмотря на значительную номинальную толщину  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$ , при низких температурах также преобладает излучение матрицы  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ . При  $T = 84\text{ K}$  полосы I и II близки по интенсивности и значительно сильнее излучения  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ .

На рис. 3 представлены энергии локализации экситонов  $E_I$  и  $E_{II}$  на узкозонной компоненте  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$ , отсчитанные от полосы B излучения экситона барьера и соответствующие максимумам полос I и II. Замещение магния марганцем является „мягким“ в том смысле, что в твердых растворах  $\text{Cd}_{1-y-x}\text{Mn}_x\text{Mg}_y\text{Te}$  ширина запрещенной зоны почти одинаково зависит от  $x$  и  $y$ :  $E_g(x, y) = E_g(\text{GdTe}) + 1.55x + 1.80y$  при  $T = 77\text{ K}$  [6]. Таким образом, влияние элементарного состава на величину локализуемого потенциала определяется в основном разностью значений  $x$  в нанослоях и  $y$  матрице. Энергии локализации  $E_I$  и  $E_{II}$  возрастают с увеличением номинальной толщины  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$ . Ширины гауссовских контуров полос I и II на половине их высоты составляет около  $0.1\text{ eV}$ ; они определяются как обычным неоднородным уширением, свойственным твердому раствору, так и флуктуациями толщины  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$ . Экситонный радиус в  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  составляет несколько нанометров, так что экситон взаимодействует с негладким интерфейсом. С ростом температуры ослабляется локализация экситонов в барьере  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  и относительно усиливается излучение экситонов, локализованных на  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$ . Несмотря на большое различие номинальных толщин  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$ , в спектрах всех образцов присутствуют две полосы I и II, что отражает реальную структуру узкозонных нанослоев (два типа локализуемых потенциалов). Вид спектра зависит не только от количества потенциальных ям того или иного типа, но и от подвижности локализованных экситонов (или носителей) в плоскости нанослоя  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$  (отметим, что в образце № 1 включения  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$  являются островковыми). При низких температурах между экситонами, соответствующими полосам B, I и II, не устанавливается термодинамического равновесия, но по мере нагревания образцов полоса II относительно усиливается. Энергии  $E_I$  и  $E_{II}$  настолько сильно отличаются друг от друга (рис. 3), что их нельзя отнести, например, для образца № 3 к экситонам, локализованным на участках  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$  толщиной в 2 и 3 (или 3 и 4) МС. Поэтому следует принять, что  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$  в образцах № 2 и 3 является двумерным слоем, содержащим значительные утолщения с малыми латеральными размерами типа квантовых точек. Вследствие малой концентрации этих утолщений и ограниченной подвижности



**Рис. 2.** Люминесценция  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  (образцы № 1 (a), 2 (b) и 3 (c)) при различных температурах. B — излучение матрицы  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$ , I и II — излучение слоев  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  — внутрицентровое излучение марганца. Спектры нормированы по максимальной интенсивности.



**Рис. 3.** Энергии локализации  $E_I$  и  $E_{II}$  экситонов в образцах  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$  с номинальными толщинами  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$  0.5 (№ 1), 1.5 (№ 2) и 3.0 (№ 3) МС, отсчитанные от максимума B экситонной люминесценции  $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ .  $T = 84 \text{ K}$ .

экситонов, локализованных двумерным слоем, возбуждение не успевает за время жизни релаксировать из состояний I в состояния II. При высокой температуре в люминесценции образцов № 2 и 3 хорошо проявляются состояния II благодаря большей энергии локализации электронного возбуждения и температурной устойчивости излучательной рекомбинации нульмерных систем. В образце № 1 слои  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$  настолько тонки, что состояния типа II проявляются слабо при всех температурах.

#### 4. Внутрицентровая люминесценция ионов $\text{Mn}^{2+}$

В спектрах всех образцов наблюдается полоса люминесценции 3d-оболочки ионов  $\text{Mn}^{2+}$  (переход  ${}^1T_4 - {}^6A_1$ ) с максимумом около 2.0 eV. Из строения образцов № 2 и 3 следует, что число ионов  $\text{Mn}^{2+}$  в них одинаково, однако 3d-люминесценция в образце № 2 намного интенсивнее. Ослабление 3d-люминесценции в образце № 3 можно объяснить тем, что при увеличении толщины слоя

Cd<sub>0.75</sub>Mn<sub>0.25</sub>Te усиливается миграция 3*d*-возбуждения по ионам марганца и возбуждение достигает тушащих центров. Максимум 3*d*-люминесценции в образце № 3 смещен в сторону низких энергий по сравнению с образцами № 1 и 2. Это согласуется с направлением сдвига полосы 3*d*-люминесценции, наблюдавшимся в объемных кристаллах Cd<sub>1-x-y</sub>Mn<sub>x</sub>Mg<sub>y</sub>Te при изменении отношения *x*/*y* (влияние величины кристаллического поля на энергию излучающего уровня <sup>4</sup>T<sub>1</sub>) [8]. Однако основной причиной смещения максимума является миграция возбуждения по ионам марганца, которая сопровождается понижением энергии уровня <sup>4</sup>T<sub>1</sub> в пределах его неоднородного уширения. В образце № 1 число ионов марганца вдвое меньше; кроме того, слабый захват экситонов включениями Cd<sub>0.75</sub>Mn<sub>0.25</sub>Te препятствует передаче возбуждения от зонных состояний в пространственно сильно ограниченную 3*d*-оболочку марганца.

Таким образом, в люминесценции матриц Cd<sub>1-y</sub>Mg<sub>y</sub>Te, содержащих узкозонные нанослои Cd<sub>0.75</sub>Mn<sub>0.25</sub>Te с номинальными толщинами 0.5, 1.5 и 3.0 нм, присутствуют две полосы экситонов, локализованных на этих слоях, что соответствует их реальному строению. Соотношение интенсивностей излучения матрицы Cd<sub>1-y</sub>Mg<sub>y</sub>Te и узкозонных нанослоев резко зависит от температуры выше 40 К вследствие делокализации экситонов в Cd<sub>1-y</sub>Mg<sub>y</sub>Te. Свойства 3*d*-люминесценции свидетельствуют о существенной миграции внутрицентрального возбуждения ионов Mn<sup>2+</sup> в слое Cd<sub>0.75</sub>Mn<sub>0.25</sub>Te толщиной 3 нм.

## Список литературы

- [1] V.S. Bagaev, V.V. Zaytsev, V.V. Kalinin, S.R. Oktyabrskii, A.F. Plotnikov. *Solid State Commun.* **88**, 777 (1993).
- [2] A. Klochikhin, A. Reznitsky, B. Dal Don, H. Priller, H. Kalt, C. Klingshirn, S. Permogorov, S. Ivanov. *Phys. Rev. B* **69**, 085 308 (2004).
- [3] A.M. Kapitonov, U. Woggon, D. Kayser, D. Hommel, T. Iroh. *J. Lumin.* **112**, 177 (2005).
- [4] J.S. Kim, H.M. Kim, H.L. Park, J.C. Choi. *Solid State Commun.* **137**, 15 (2006).
- [5] А.А. Вайполин. *ФТТ* **35**, 789 (1993).
- [6] V.F. Aguekian, L.K. Gridneva, A.Yu. Serov. *Solid State Commun.* **87**, 635 (1993).
- [7] Sang Ho Sohn, Y. Hamakawa. *J. Phys. Soc. Jap.* **61**, 2129 (1992).
- [8] В.Ф. Агекян, Н.Н. Васильев, А.Ю. Серов, Н.Г. Философов. *ФТТ* **42**, 816 (2000).