

Фотолюминесценция эпитаксиальных слоев $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$ и $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$

© М.С. Ружеви́ч¹, К.Д. Мынбаев^{1,2}, Н.Л. Баженов², В.С. Варавин³, В.Г. Ремесник³,
Н.Н. Михайлов³, М.В. Якушев³

¹ Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

E-mail: max.ruzhevich@niuitmo.ru

Поступила в Редакцию 11 мая 2023 г.

В окончательной редакции 17 июля 2023 г.

Принята к публикации 30 октября 2023 г.

Представлены результаты исследования фотолюминесценции слоев твердых растворов $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$ и $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Сопоставление данных фотолюминесценции с результатами измерения оптического пропускания, структурных и микроскопических исследований показало, что по степени разупорядочения твердого раствора исследованные слои $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ не уступают по качеству материалу, синтезированному другими методами. Для слоев $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$ данные фотолюминесценции выявили существенные флуктуации состава и присутствие акцепторных состояний, что свидетельствует о необходимости оптимизации технологии.

Ключевые слова: твердые растворы, HgCdTe , фотолюминесценция, дефекты.

DOI: 10.61011/FTP.2023.08.56960.5051C

1. Введение

Твердые растворы (ТР) $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (КРТ) широко применяются для разработки приборов инфракрасной фотоэлектроники. В фотоприемных устройствах на основе КРТ в настоящее время используются как традиционные материалы малого состава $x \approx 0.2-0.3$ [1,2], так и более широкозонные составы $x \approx 0.5-0.7$ [3,4]; последние также востребованы при изготовлении волноводных слоев лазерных структур [5]. В силу большой степени ионности химической связи ТР КРТ обладают значимым разупорядочением, которое проявляется в том числе во флуктуациях химического состава и появлении соответствующих хвостов плотности состояний. Фактический масштаб разупорядочения в образцах КРТ разного состава остается предметом дискуссий [6,7]. Методом фотолюминесценции (ФЛ) нами проведено сравнительное исследование свойств слоев ТР $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$ и $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$; эти данные были дополнены результатами измерений оптического пропускания, а также микроскопических и структурных исследований.

2. Методика эксперимента

Слои были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках $\text{GaAs}(013)$ ($x \approx 0.3$ и $x \approx 0.7$) и $\text{Si}(013)$ ($x \approx 0.3$) в ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН [8]. Величина x контролировалась с помощью *in situ* эллипсометрии и *ex situ* измерений оптическо-

го пропускания (ОП) при температуре $T = 300$ К с использованием спектрометра InfraLUM-801. Спектры ФЛ были получены при $T = 4.2-300$ К с применением монохроматора МДР-23. Сигнал ФЛ возбуждался полупроводниковым лазером с длиной волны 1.03 мкм и регистрировался фотоприемниками на основе InSb или HgCdTe (для слоев с $x \approx 0.3$) или Ge (для слоев с $x \approx 0.7$). Микроскопические исследования проводились на электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 с приставкой Ultim[®] Max 100 для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС). Структурные исследования включали снятие рентгеновских дифрактограмм на установке ДРОН-8 в щелевой конфигурации с острофокусной трубкой БСВ-29 с медным анодом и сцинтилляционным детектором $\text{NaI}(\text{Tl})$.

3. Результаты и обсуждение

По данным рентгеновской дифракции (РД), для исследованных слоев была характерна кристаллическая структура. Так, на дифрактограмме образца 0720 с $x = 0.32$ (подложка Si) доминировал пик при $2\theta \approx 97.8^\circ$ с полушириной $1038''$. Для образца 0417 с $x = 0.74$ (подложка GaAs) основным дифракционным пиком от слоя КРТ был пик при $2\theta = 102.3^\circ$ с полушириной $358''$.

На рис. 1 представлены спектры ОП для ряда образцов составов $x \approx 0.3$ (рис. 1, *a*) и $x \approx 0.7$ (рис. 1, *b*). Для большинства исследованных образцов (в частности, всех образцов с $x \approx 0.3$ (рис. 1, *a*)) был характерен резкий

край ОП. Спектр ОП образца 1003 оказался подобен спектру многослойной структуры [9], что указывало на неоднородность слоя по составу (рис. 1, *b*). Для всех образцов в области малых энергий в спектрах наблюдалась интерференционная картина, свидетельствующая о хорошей планарности эпитаксиальных структур. Данные ЭДРС по химическому составу материала подтвердили результаты определения состава по данным эллипсометрии и ОП, что позволило достоверно определить состав ТР для интерпретации результатов исследования ФЛ.

Спектры ФЛ всех исследованных слоев с $x \approx 0.3$ при $T = 4.2$ К содержали одну линию с полушириной от 6 до 9 мэВ. При $T = 95$ К полуширины спектров составляли от 14 до 19 мэВ, при $T = 300$ К — от 40 до 55 мэВ.

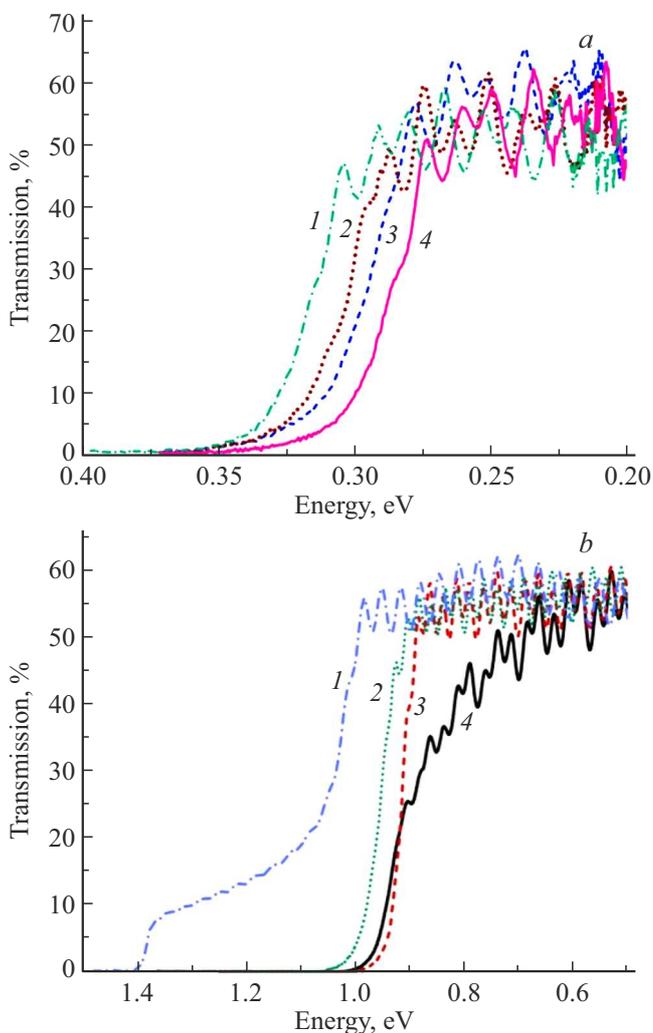


Рис. 1. Спектры оптического пропускания слоев КРТ состава $x \approx 0.3$ (подложка Si): 0303 ($x = 0.31$) — 1, 0124 ($x = 0.30$) — 2, 0423 ($x = 0.30$) — 3 и 0219 ($x = 0.29$) — 4 (*a*), и $x \approx 0.7$: 1003 ($x = 0.69$) — 1, 1227 ($x = 0.71$) — 2, 1224 ($x = 0.72$) — 3, 1222 ($x = 0.73$) — 4 (*b*) при $T = 300$ К. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

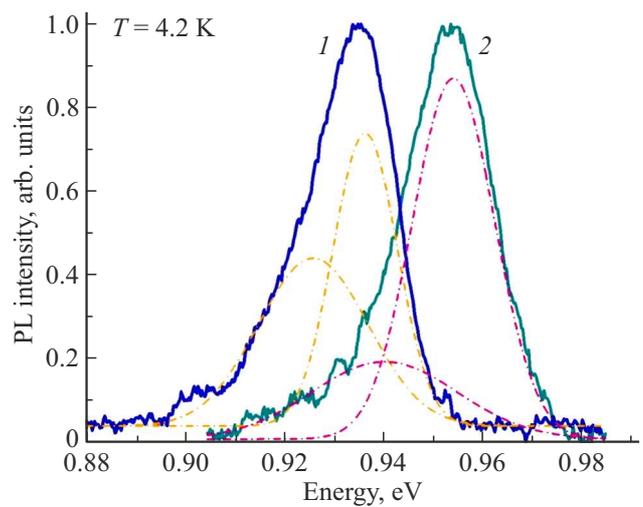


Рис. 2. Нормализованные спектры ФЛ эпитаксиальных слоев КРТ с $x \approx 0.7$ при $T = 4.2$ К: 1 — образец 1223 ($x = 0.71$), 2 — образец 1222 ($x = 0.73$). Штрихпунктирными линиями показано разложение спектров.

Спектр ФЛ исследованного для сравнения образца объемного кристалла, выращенного методом вертикально направленной кристаллизации с подпиткой из твердой фазы, при $T = 4.2$ К также содержал одну линию с полушириной 6 мэВ. При $T = 85$ К полуширина этой линии составила 15.7 мэВ, при $T = 300$ К — ~ 49 мэВ. Аналогичные значения наблюдались для слоев с $x \approx 0.3$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), и для ряда слоев, выращенных методом МЛЭ и изученных ранее [10]. Таким образом, по своим оптическим свойствам слои с $x \approx 0.3$, выращенные МЛЭ, были близки к материалу, выращенному другими методами. Отметим также, что в спектрах исследованных слоев, выращенных на подложках из Si, не содержалось линий, связанных с акцепторными состояниями, типичных для материала с $x > 0.35$, выращенного по данной технологии. Этот результат свидетельствует о хорошо отработанной технологии МЛЭ пленок малого состава для подложек и GaAs, и Si.

На рис. 2 представлены примеры низкотемпературных спектров ФЛ слоев с $x \approx 0.7$. Спектры имели выраженную асимметричную форму и хорошо аппроксимировались двумя гауссианами с расстоянием между ними 12–18 мэВ. Полуширины высокоэнергетических (ВЭ) линий при $T = 4.2$ К составляли от 15 до 19 мэВ, низкоэнергетических — от 30 до 45 мэВ. Последние прослеживались в спектрах до температуры ~ 50 –60 К; их можно приписать переходам на акцепторные состояния в запрещенной зоне. Полуширины ВЭ линий ФЛ при $T = 4.2$ К в исследованных слоях оказались на $\sim 50\%$ больше, чем в слоях близких составов, выращенных методом ЖФЭ (9–13 мэВ, [11]).

На рис. 3 приведены температурные зависимости положения ВЭ пиков ФЛ для слоев с $x \approx 0.3$ (рис. 3, *a*)

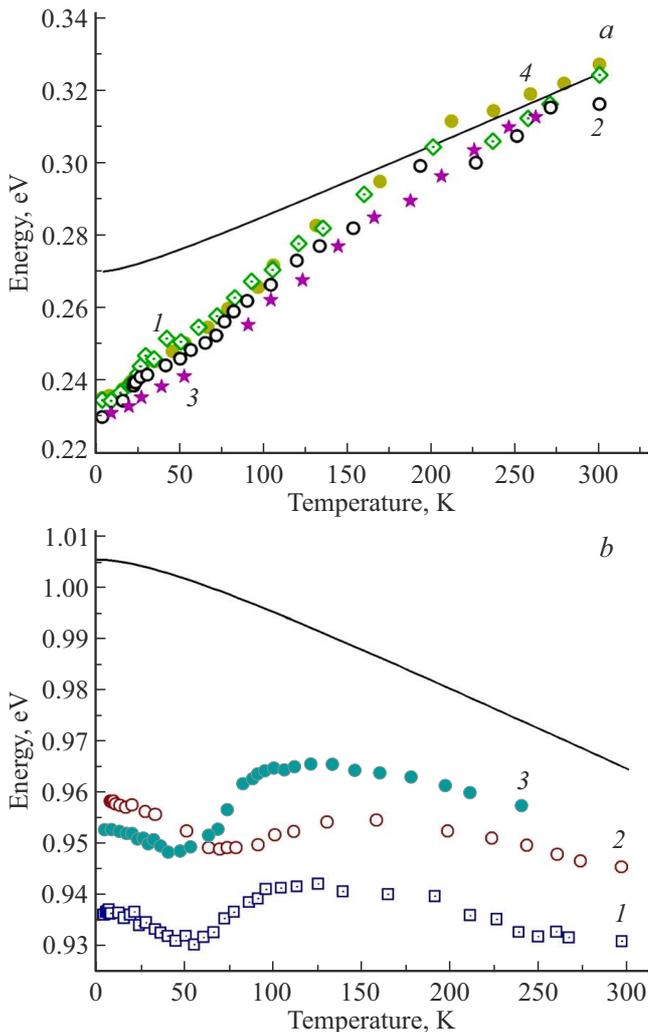


Рис. 3. Температурные зависимости положения пика ФЛ для эпитаксиальных слоев: 1 — 0303 ($x = 0.30$), 2 — 0219 ($x = 0.31$), 3 — 1202 ($x = 0.30$) и 4 — образца кристалла КРТ с $x = 0.31$ (a), и 1 — 1223 ($x = 0.71$), 2 — 1227 ($x = 0.71$) и 3 — 1222 ($x = 0.73$) (b). Сплошные кривые — зависимости $E_g(T)$, рассчитанные согласно данным [12] для КРТ с $x = 0.31$ (a) и $x = 0.70$ (b).

и $x \approx 0.7$ (рис. 3, b). Общей особенностью, независимо от состава ТР, здесь является существенное отличие энергий пиков E_{PL} от рассчитанных согласно работе [12] температурных зависимостей ширины запрещенной зоны $E_g(T)$. При $T < 100$ К $E_{PL} \ll E_g$; это объясняется тем, что оптические переходы в КРТ при низких температурах определяются рекомбинацией экситонов, локализованных на флуктуациях состава [12–14]. Для слоев с $x \approx 0.3$ разница между E_{PL} и E_g при $T = 4.2$ К составила ~ 40 мэВ; наклоны зависимости $E_{PL}(T)$ были близки и не отличались от такового для образца объемного кристалла (рис. 3, a) и ранее изученных образцов данного состава, выращенных по данной технологии МЛЭ [10]. Это еще раз подтверждает факт хорошо отработанной технологии МЛЭ пленок малого состава,

позволяющей выращивать материал высокого качества, где разупорядочение обусловлено лишь спецификой формирования ТР КРТ.

На рис. 3, b видно, что для образцов 1223 и 1227 с номинально одинаковым $x = 0.71$ энергии E_{PL} отличаются на ~ 15 мэВ во всем диапазоне температур. Также для исследованных слоев с $x \approx 0.7$ зависимость $E_{PL}(T)$ в целом практически отсутствует, т.е. $E_{PL}(4.2 \text{ К}) \approx E_{PL}(300 \text{ К})$, хотя зависимости $E_g(T)$ не должно наблюдаться для КРТ с $x = 0.5$ [12]. При $T \approx 50$ – 60 К на кривых $E_{PL}(T)$ наблюдается локальный минимум, являющийся признаком локализации экситонов. При $T > 100$ К наклон кривой $E_{PL}(T)$ начинает приближаться к таковому для $E_g(T)$. Переход от „красного“ к „синему“ сдвигу пика ФЛ с дальнейшим выходом на наклон $E_g(T)$ при возрастании температуры ранее наблюдался как в слоях с $x \approx 0.7$, выращенных ЖФЭ [11,13], так и в объемных кристаллах КРТ близких составов [14]. В случаях [11,13,14], однако, минимум на кривой $E_{PL}(T)$ соответствовал $T \sim 25$ К. Увеличение температуры начала делокализации экситонов в слоях, исследованных в настоящей работе, может являться признаком более масштабных флуктуаций состава. Вкупе с появлением описанных выше акцепторных состояний, нетипичных для структур, выращенных данной технологией МЛЭ на подложках GaAs [11], это может быть свидетельством необходимости оптимизации технологии синтеза КРТ больших составов. Поскольку оптимальные режимы МЛЭ КРТ с большим и малым x существенно отличаются [15], совершенствование синтеза слоев с $x \approx 0.7$ для фотоприемных и лазерных (где имеются слои с малым x) структур, очевидно, должно проходить независимо.

4. Заключение

Таким образом, нами было проведено исследование оптических и структурных свойств слоев $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$ и $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ с акцентом на исследование ФЛ. Исследования слоев методами ОП, РД и ЭДРС показали хорошее качество материала. С использованием ФЛ было установлено, что по степени разупорядочения слои $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$, выращенные методом МЛЭ, не уступают по качеству материалу, синтезированному другими методами. Для слоев $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$ данные ФЛ выявили существенные флуктуации состава и присутствие акцепторных состояний, что свидетельствует о необходимости оптимизации технологии.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Kopytko, A. Rogalski. *Sensors Actuators: A. Phys.*, **339**, 113511 (2022). DOI: 10.1016/j.sna.2022.113511
- [2] J. Chen, J. Wang, X. Li, J. Chen, F. Yu, J. He, J. Wang, Z. Zhao, G. Li, X. Chen, W. Lu. *Sensors*, **22** (2), 677 (2022). DOI: 10.3390/s22020677
- [3] A. Drago, E. Pace, S. Bini, M. Cestelli Guidi, F. Cioeta, A. Marcelli, V. Bocci. *J. Instrument.*, **18** (2), C02012 (2023). DOI: 10.1088/1748-0221/18/02/C02012
- [4] D. Yang, J. Lin, C. Lin, X. Wang, S. Zhou, H. Guo, R. Ding, L. He. *Solid-State Electron.*, **205**, 108665 (2023). DOI: 10.1016/j.sse.2023.108665
- [5] В.В. Уточкин, А.А. Дубинов, М.А. Фадеев, В.В. Румянцев, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, В.И. Гавриленко, С.В. Морозов. *ФТП*, **55** (10), 922 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2021.10.51445.49
- [6] N. Mokdad, F.Z. Mami, N. Boukli-Hacène, K. Zitouni, A. Kadri. *J. Appl. Phys.*, **132** (17), 175702 (2022). DOI: 10.1063/5.0101924
- [7] V.V. Romyantsev, A.A. Razova, M.A. Fadeev, V.V. Utochkin, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, V.I. Gavrilenko, S.V. Morozov. *Opt. Eng.*, **60** (8), 082007 (2021). DOI: 10.1117/1.OE.60.8.082007
- [8] М.В. Якушев, В.С. Варавин, В.Г. Ремесник, Д.В. Марин. *ФТП*, **48** (6), 788 (2014).
- [9] М.С. Ружевич, К.Д. Мынбаев, Н.Л. Баженов, М.В. Дорогов, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, В.Г. Ремесник, И.Н. Ужаков. *ФТТ*, **65** (3), 411 (2023). DOI: 10.21883/FTT.2023.03.54738.552
- [10] Д.А. Андриющенко, М.С. Ружевич, А.М. Смирнов, Н.Л. Баженов, К.Д. Мынбаев, В.Г. Ремесник. *ФТП*, **55** (11), 1040 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2021.11.51558.9689
- [11] К.Д. Мынбаев, Н.Л. Баженов, А.М. Смирнов, Н.Н. Михайлов, В.Г. Ремесник, М.В. Якушев. *ФТП*, **54** (12), 1302 (2020). DOI: 10.21883/FTP.2020.12.50229.9497
- [12] C.R. Becker, V. Latussek, A. Pfeuffer-Jeschke, G. Landwehr, L.W. Molenkamp. *Phys. Rev. B*, **62** (15), 10353 (2000). DOI: 10.1103/PhysRevB.62.10353
- [13] A. Lusson, F. Fuchs, Y. Marfaing. *J. Crys. Growth*, **101** (1–4), 673 (1990). DOI: 10.1016/0022-0248(90)91056-V
- [14] P. Gille, K.H. Herrmann, N. Puhmann, M. Schenk, J.W. Tomm, L. Werner. *J. Cryst. Growth*, **86** (1–4), 593 (1988). DOI: 10.1016/0022-0248(90)90781-F
- [15] C.R. Becker, T.N. Casselman, C.H. Grein, S. Sivananthan. *Molecular Beam Epitaxy of HgCdTe Materials and Detectors*, Chap. 6.04 in: *Comprehensive Semiconductor Science and Technology*, ed. by P. Bhattacharya, R. Fornari and H. Kamimura (Elsevier, Amsterdam, 2011) v. 6, p. 128. DOI: 10.1016/B978-0-44-453153-7.00015-8

Редактор Г.А. Оганесян

Photoluminescence of $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$ and $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ epitaxial films

M.S. Ruzhevich¹, K.D. Mynbaev^{1,2}, N.L. Bazhenov², V.S. Varavin³, V.G. Remesnik³, N.N. Mikhailov³, M.V. Yakushev³

¹ ITMO University,
197101 St. Petersburg, Russia

² Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

³ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract The results of a study of photoluminescence (PL) of epitaxial films of $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$ and $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ solid solutions grown by molecular beam epitaxy are presented. A comparison of PL data with the results of optical transmission measurements and structural and microscopic studies showed that in terms of the degree of disorder of the solid solution, the studied $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ films are not inferior in quality to the material synthesized by other methods. For $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$ films, PL data revealed significant composition fluctuations and the presence of acceptor states, which indicates the need to optimize the technology.