

Термический отжиг эпитаксиальных пленок $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$, легированных индием

© К.Д. Мынбаев¹, Н.Л. Баженов¹, М.В. Дорогов², В.С. Балашов²,
В.С. Варавин³, В.Г. Ремесник³, Н.Н. Михайлов³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Университет ИТМО,
197198 Санкт-Петербург, Россия

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

E-mail: mynkad@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.

В окончательной редакции 22 июня 2026 г.

Принята к публикации 22 июня 2026 г.

Исследованы оптические свойства (оптическое отражение и пропускание, а также фотолюминесценция) и элементный состав (по данным рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии) эпитаксиальных пленок $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$, легированных индием и прошедших термический отжиг. Полученные результаты показали стабилизирующее влияние индия на свойства материала при 300 К. Определено, что в результате отжига легированного $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$ в его дефектной структуре происходят изменения, приводящие к модификации оптических свойств при низких температурах, обратные наблюдаемым в нелегированном материале.

Ключевые слова: CdHgTe , легирование, отжиг, дефекты, фотолюминесценция.

DOI: 10.61011/FTP.2026.05.63869.9658

Твердые растворы (ТР) $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) с содержанием CdTe (составом) $x \approx 0.7$ ($\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$) востребованы при разработке фотодиодов ближнего инфракрасного диапазона для астрономических наблюдений [1] и при создании спейсерных и барьерных слоев в лазерных гетероструктурах (ГС) [2] и в $n\text{Вn}$ фотоприемниках [3]. Для получения КРТ с заданным уровнем донорного легирования обычно используется введение индия, успешное легирование индием было проведено и для $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$ [4]. Актуальным остается знание об изменении свойств легированного КРТ при термическом отжиге как однородных по составу эпитаксиальных пленок (ЭП), так и многослойных ГС. Такой отжиг *de facto* происходит уже *in situ* в ходе последовательного наращивания различных слоев ГС; отжиг используется и при их пост-ростовой обработке. В настоящей работе сообщается о данных исследований изменения свойств легированных индием ЭП $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$ и ГС $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}/\text{HgTe}$, произошедшего в результате термического отжига.

Особенности выращивания и легирования структур были представлены в работе [4]. Слой $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$ в ГС имел толщину ~ 3 мкм, слой HgTe — 200 нм. Удаление слоя HgTe с поверхности ГС для исследования ЭП проводили в 0.05 % растворе Br_2 в $(\text{CH}_3)_2\text{NC}(\text{O})$. Значения концентрации индия C_{In} , задававшиеся при росте, а также концентрации n_{77} электронов в as-grown ЭП, определенные при исследовании эффекта Холла при температуре $T = 77$ К, представлены в табл. 1; структуры А и А' индием не легировались. Отжиг этих структур ($T = 410^\circ\text{C}$, 7 мин) проводился при дефиците

паров Hg , остальные отжики ($T = 225^\circ\text{C}$, 24 ч) — в ее насыщенных парах.

Исследование оптических свойств структур проводили методами оптического отражения (ОО), оптического пропускания (ОП) и фотолюминесценции (ФЛ). Спектры ОО и ОП записывались при $T = 293$ К с использованием фурье-спектрометра InfraLUM-801 с коротковолновой приставкой или решеточного спектрометра PerkinElmer Lambda 1050. Спектры ФЛ записывались при $T = 4.2$ и 293 К с применением монохроматора МДР-23 при возбуждении полупроводниковым лазером (длина волны $\lambda = 1.03$ мкм) и регистрацией сигнала германиевым фотодиодом с использованием схемы синхронного детектирования. Элементный состав ГС и ЭП и его распределение по сколу структур исследовали методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) с использованием электронного микроскопа TESCAN MIRA3. Исследования проводили при ускоряющем напряжении 20 кВ с использованием эталонов GaP (для Ga — аналитическая линия $K\alpha_1$), InAs (для As — $L\alpha_1$), Cd (для Cd — $L\alpha_1$) и HgTe (для Hg — $M\alpha_1$ и Te — $L\alpha_1$).

Таблица 1. Параметры исследованных структур

Структура	Состав x	$C_{\text{In}}, \text{см}^{-3}$	$n_{77}, \text{см}^{-3}$
A	0.72	0	$1.0 \cdot 10^{14}$
A'	0.70	0	$3.0 \cdot 10^{14}$
B	0.71	$1.1 \cdot 10^{16}$	$1.9 \cdot 10^{16}$
C	0.71	$5.4 \cdot 10^{17}$	$3.7 \cdot 10^{17}$
D	0.72	$4.3 \cdot 10^{18}$	$1.5 \cdot 10^{18}$

На рис. 1, *a* приведены спектры ОП структуры *B*. Спектр 1 исходной ГС характеризовался малым пропусканием и размытым его краем, обусловленными присутствием слоя HgTe. После удаления этого слоя пропускание существенно возросло, край ОП стал резким (спектр 2). Отжиг ГС привел к небольшому сдвигу края ОП в низкоэнергетическую (НЭ) сторону (спектр 3); после отжига ЭП положение края ОП изменилось незначительно (спектр 4). Для нелегированных ЭП отжиг привел к высокоэнергетическому (ВЭ) сдвигу края ОП; данные для пленки *A'* представлены на рис. 1, *a* спектрами 5 и 6, соответствующими as-grown и отожженному образцу. Такой же результат был получен в работе [4] для структуры *A*. Для структуры *D* отжига привели к НЭ сдвигу края ОП и для ГС, и для ЭП.

На рис. 1, *b* приведены спектры ОО структуры *B*. Все спектры содержали характерный дублет пиков E_1 и $E_1 + \Delta$, обусловленный оптическими переходами в точках $L_{4,5} \rightarrow L_6$ и $L_6 \rightarrow L_6$ соответственно [5]. Положение этих пиков в спектре ГС *B* (спектр 1) соответствовало таковому для HgTe, чей спектр 5 приведен для сравнения. После удаления слоя HgTe энергии пиков в спектре ЭП 2 были близки к таковым для ЭП *A'* (спектр 4) и соответствовали заданному составу ТР. После отжига ГС произошел небольшой сдвиг пиков ОО в НЭ сторону (спектр 3). Падение интенсивности ОП и ОО в результате обработки (травления, отжига) было вызвано ухудшением качества поверхности.

Анализ спектров ФЛ показал, что ширина на половине высоты полос (FWHM) в спектрах ФЛ для всех as-grown структур при $T = 4.2$ К составляет ~ 18 мэВ. В спектрах ЭП *C* и *D* также имелись линии, обусловленные переходами с уровня индия [4]. Для структуры *A* отжига и ГС, и ЭП привели к ВЭ сдвигу пиков ФЛ $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$ на ~ 30 мэВ при сохранении FWHM, для ЭП *A'* отжиг привел к уменьшению FWHM с ~ 26 мэВ до ~ 17 мэВ и ВЭ сдвигу пика ФЛ на ~ 41 мэВ. Подобные эффекты типичны для нелегированных ЭП КРТ, в том числе, с $x \geq 0.5$ [6]. Отжиг ЭП *B* также привел к сдвигу пика ФЛ в ВЭ сторону, а отжиг ГС *B* привел к сужению спектра ФЛ до FWHM ~ 13 мэВ, но пик сдвинулся на ~ 30 мэВ уже в НЭ сторону. Похожий эффект наблюдался для структур *C* и *D*. Спектры ФЛ этих структур приведены на рис. 2. Следует отметить, что их форма искажена полосой поглощения воды „ ρ “ ($\lambda \approx 1.38$ мкм).

И для ЭП, и для ГС *C* отжиг привел к сдвигу пиков ФЛ в НЭ сторону на ~ 16 мэВ с изменением формы спектров (рис. 2, *a*). Для структуры *D* отжиг привел к сдвигу пиков ФЛ в НЭ сторону на ~ 25 мэВ для ЭП и ~ 45 мэВ для ГС с изменением формы (рис. 2, *b*).

На рис. 3 приведены профили распределения компонентов в ГС и ЭП *D* до и после отжига, полученные по данным ЭДРС. Вертикальные штриховые линии условно показывают гетерограницы. Симуляция распространения первичных электронов, проведенная с помощью программного пакета CASINO [7] для нормально падающих $N_e = 6000$ частиц с радиусом пучка $r_b = 10$ нм, позволила оценить масштаб сканирования как ~ 600 нм; в этих

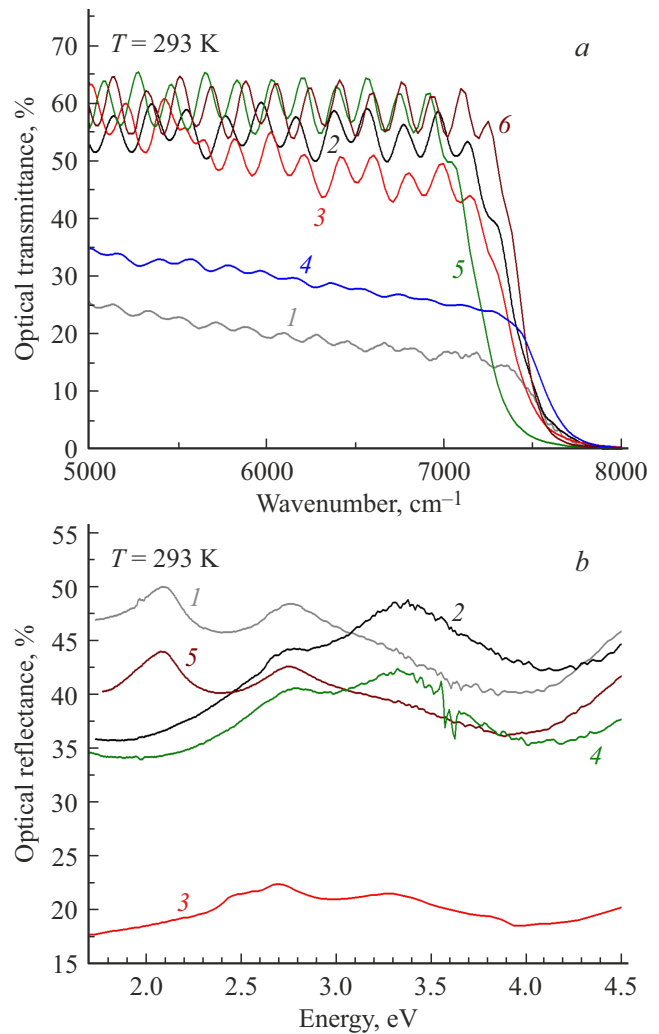


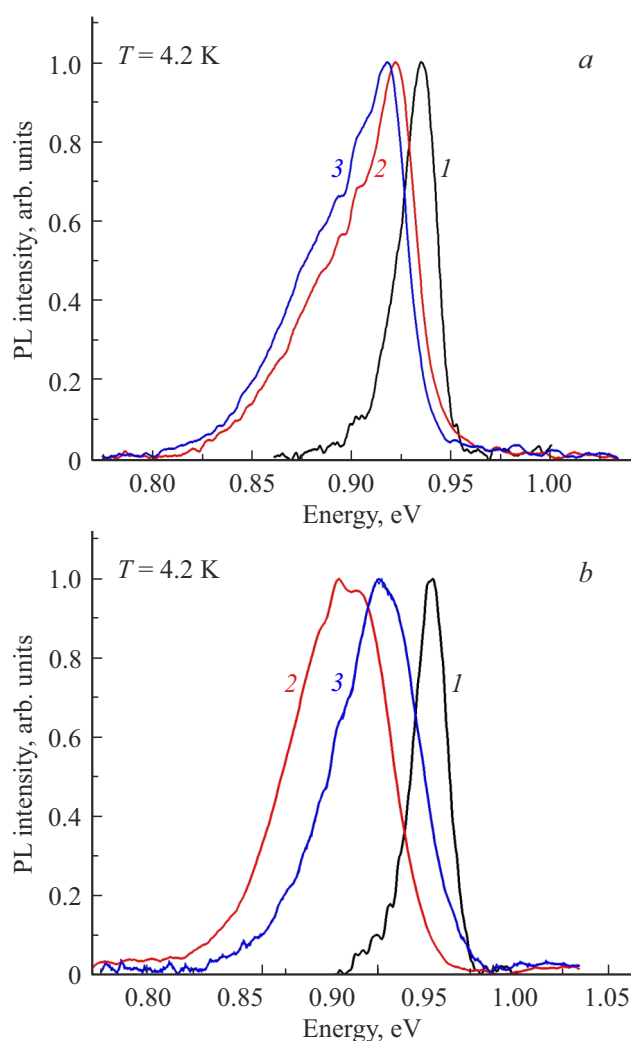
Рис. 1. Спектры оптического пропускания (*a*) и отражения (*b*) структуры *B*: 1 — as-grown ГС, 2 — as-grown ЭП и 3 — отожженной ГС. На панели *a* также показаны спектры ОП отожженной ЭП *B* (4) и as-grown (5) и отожженной ЭП *A'* (6). На панели *b* показаны спектры ОО as-grown ЭП *A'* (4) и референсного образца HgTe (5).

условиях слой HgTe в as-grown ГС визуализировался как увеличение содержания ртути на поверхности (рис. 3, *a*). После удаления слоя HgTe избыточной ртути на поверхности не наблюдалось, а распределение компонентов ТР оставалось прежним (рис. 3, *b*).

В табл. 2 приведены результаты определения x по данным ЭДРС, усредненным по трем точкам на каждом образце, и ФЛ при $T = 293$ К (по одной точке, с использованием формулы для зависимости ширины запрещенной зоны $E_g(x, T)$ из работы [8]). Для нелегированного КРТ изменения свойств в результате отжига, в том числе, сдвиг пика ФЛ и края ОП в ВЭ сторону, обычно объясняются двумя причинами: 1) диффузией Cd из более широкозонных, относительно рабочего слоя, слоев ГС с „размытием“ профиля состава: последнее подтверждается результатами измерений ОП и ОО при

Таблица 2. Состав исследованных ЭП до и после отжига по данным ЭДРС и ФЛ

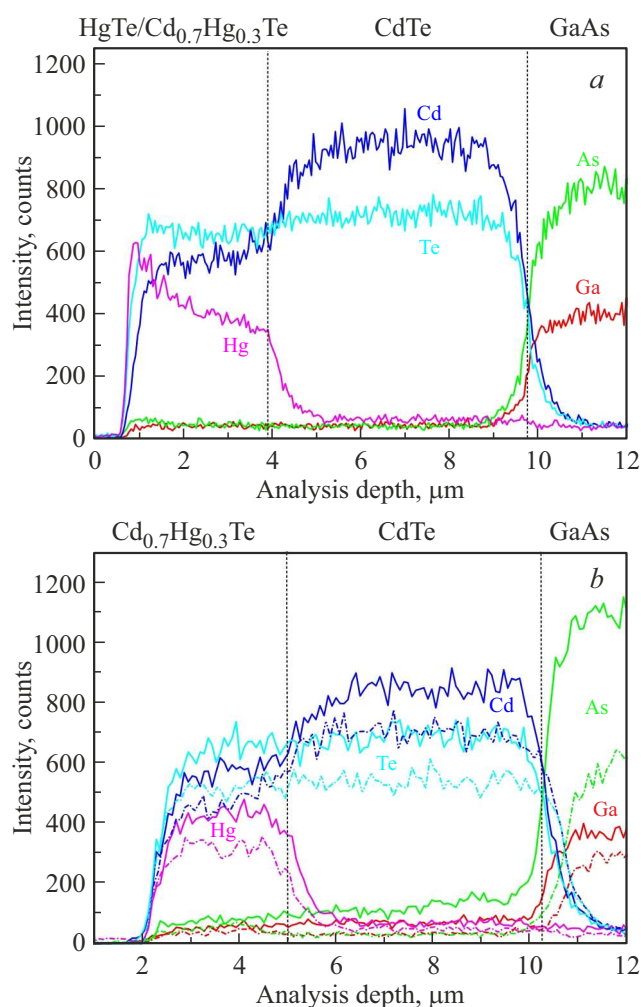
Образец/ методика	As-grown		Отжиг ГС		Отжиг ЭП	
	ЭДРС	ФЛ	ЭДРС	ФЛ	ЭДРС	ФЛ
<i>A</i>	0.729 ± 0.001	0.730	0.736 ± 0.003	0.735	0.734 ± 0.001	0.742
<i>A'</i>	0.692 ± 0.002	0.696	—	—	0.714 ± 0.004	0.712
<i>B</i>	0.707 ± 0.001	0.712	0.709 ± 0.004	0.713	0.713 ± 0.004	0.713
<i>C</i>	0.718 ± 0.004	0.719	0.719 ± 0.003	0.719	0.717 ± 0.005	0.717
<i>D</i>	0.722 ± 0.001	0.721	0.716 ± 0.004	0.721	0.727 ± 0.004	0.726

**Рис. 2.** Нормированные спектры фотолюминесценции ГС *C* (а) и *D* (б) до (1) и после отжига (2); спектры 3 соответствуют отожженным ЭП.

послойном стравливании; 2) перераспределением атомов в решетке, приводящим к уменьшению масштаба флуктуаций химического состава ТР. Оба эффекта приводят к „увеличению“ среднего состава, что и наблюдалось для структур *A* и *A'*.

Как следует из табл. 2, для легированных структур с $C_{\text{In}} \geq 10^{17} \text{ см}^{-3}$ отжиг не привел к заметному

изменению x . Для низкотемпературных спектров ФЛ таких структур, однако, после отжига наблюдалось как изменение формы, так и выраженный сдвиг пика в НЭ сторону (рис. 2). Спектры ФЛ структур *C* и *D*, прошедших отжиг, были проанализированы в предположении о присутствии в них узкой „краевой“ линии (не шире исходной линии с FWHM $\sim 18 \text{ мэВ}$) и дополнительных НЭ линий. Результаты анализа позволили предположить

**Рис. 3.** Профили распределения элементов в структуре *D* для as-grown ГС (а) и после отжига (б): ГС с последующим удалением слоя HgTe (сплошные линии) и ЭП (штрихпунктирные линии).

для обеих структур наличие примесных акцепторных уровней с энергией ионизации $E_A \sim 30$ мэВ. Они могут соответствовать примеси мышьяка, непреднамеренное легирование которым ($\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$) уже наблюдалось в ЭП, выращенных по рассматриваемой технологии [9]. E_A для этой примеси, согласно подходу, развитому в работе [10], оценивается для $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$ как 32–37 мэВ.

Что касается слабого изменения состава при выраженном сдвиге низкотемпературных спектров ФЛ в НЭ сторону после отжига структур B , C и D , то следует отметить, что индий замещает в КРТ места как в подрешетке HgTe , так и в подрешетке CdTe [11]. Можно предположить, что экзодиффузия индия из $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$ в буферный слой CdTe и в слой HgTe (отжиг ГС) либо паровую фазу (отжиг ЭП), происходящая при отжиге, освобождает места в подрешетке металла, которые в первую очередь занимают наиболее быстро диффундирующие атомы ртути. В результате происходит обогащение материала ртутью, которое в случае сильного легирования выражается в уменьшении среднего x (см. табл. 2 и спектры ОП в работе [4]). Важно отметить, что этот эффект может проявляться в оптических свойствах КРТ не только при $T = 4.2 \text{ K}$, как установлено в настоящей работе, но и при температурах $\sim 100 \text{ K}$ [4], т.е. при рабочих температурах многих приборов на основе этого материала. Это подчеркивает актуальность существующей тенденции к разработке высокотемпературных устройств на основе КРТ [12]. В таких устройствах влияние флуктуаций химического состава как фундаментального свойства ТР на оптические и фотоэлектрические свойства приборов минимизировано.

Таким образом, в работе были проведены исследования изменений оптических свойств и химического состава подвергнутых термическому отжигу гетероструктур $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}/\text{HgTe}$ и пленок $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$, легированных индием. Полученные результаты показали стабилизирующее влияние индия на свойства материала при 300 K, но выявили в результате отжига изменения в дефектной структуре материала, способные оказать влияние на его оптические свойства при температурах, близких к рабочим температурам некоторых приборов на основе CdHgTe .

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Drago. *Instruments*, **9**, 12 (2025). DOI: 10.3390/instruments9020012
- [2] M.A. Fadeev, A.A. Yantser, K.E. Kudryavtsev, A.A. Razova, V.V. Utochkin, V.V. Rumyantsev, A.A. Dubinov, V.Ya. Aleshkin, V.I. Gavrilenko, N.N. Mikhailov, S.V. Morozov. *Appl. Optics*, **65**, 177 (2026). DOI: 10.1364/AO.578783
- [3] A.V. Voitsekhovskii, S.M. Dzyadukh, D.I. Gorn, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, G.Y. Sidorov, M.V. Yakushev. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **58** (3), 305101 (2025). DOI: 10.1088/1361-6463/adee2c
- [4] М.С. Ружевиц, К.Д. Мынбаев, Н.Л. Баженов, М.В. Дорогов, В.С. Варавин, В.Г. Ремесник, И.Н. Ужаков, Н.Н. Михайлов. *ФТТ*, **67** (5), 805 (2025). DOI: 10.61011/FTT.2025.05.60742.131-25
- [5] P. Koppel. *J. Appl. Phys.*, **57** (5), 1705 (1985). DOI: 10.1063/1.3344411983
- [6] М.С. Ружевиц, К.Д. Мынбаев, Н.Л. Баженов, М.В. Дорогов, А.М. Смирнов, В.В. Бельков, М.В. Томкович, В.С. Варавин, В.Г. Ремесник, И.Н. Ужаков, Н.Н. Михайлов. *ФТТ*, **67** (1), 22 (2025). DOI: 10.61011/FTT.2025.01.59763.4-25
- [7] D. Drouin, A.R. Couture, D. Joly, X. Tastet, V. Aimez, R. Gauvin. *Scanning*, **29** (3), 92 (2007). DOI: 10.1002/sca.20000
- [8] G.L. Hansen, J.L. Schmit, T.N. Casselman. *J. Appl. Phys.*, **53** (10), 7099 (1982). DOI: 10.1063/1.3300181705
- [9] I.I. Izhnin, A.V. Voitsekhovskiy, A.G. Korotaev, O.I. Fitsych, A.Yu. Bonchuk, H.V. Savitskiy, K.D. Mynbaev, V.S. Varavin, S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov, M.V. Yakushev, R. Jakiela. *Infr. Phys. Technol.*, **81**, 52 (2017). DOI: 10.1016/j.infrared.2016.12.006
- [10] K. Majkowycz, K. Murawski, M. Kopytko. *Infr. Phys. Technol.*, **137**, 105126 (2024). DOI: 10.1016/j.infrared.2024.105126
- [11] К.Д. Мынбаев, В.И. Иванов—Омский. *ФТП*, **40** (1), 3 (2006).
- [12] A. Rogalski, M. Kopytko, F. Dai, R. Jiang, F. Wang, W. Hu, P. Martyniuk. *Measurement*, **230**, 114495 (2024). DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114495

Редактор А.Н. Смирнов

Thermal annealing of indium-doped $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$ epitaxial films

K.D. Mynbaev¹, N.L. Bazhenov¹, M.V. Dorogov², V.S. Balashov², V.S. Varavin³, V.G. Remesnik³, N.N. Mikhailov³

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² ITMO University,
197198 St. Petersburg, Russia

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

Abstract The optical properties (optical reflection and transmission, as well as photoluminescence) and elemental composition (determined by X-ray energy-dispersive spectroscopy) of indium-doped, thermally annealed epitaxial $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$ films have been investigated. The results demonstrate a stabilizing effect of indium on the material's properties at 300 K. Annealing of doped $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$ appeared to be associated with changes in its defect structure that modify its optical properties at low temperatures inversely to those observed in the un-doped material.