

Инфракрасное фотоотражение эпитаксиальных пленок $\text{Cd}_{0.3}\text{Hg}_{0.7}\text{Te}$

© М.С. Ружеви́ч¹, К.Д. Мынбаев^{1,2}, Д.Д. Фирсов³, И.В. Чуманов³, О.С. Комков³,
В.С. Варавин⁴, М.В. Якушев⁴

¹ Университет ИТМО,

197101 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,

194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),

197376 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сбирского отделения Российской академии наук,

630090 Новосибирск, Россия

E-mail: max.ruzhevich@niuitmo.ru

Поступила в Редакцию 2 мая 2024 г.

В окончательной редакции 5 сентября 2024 г.

Принята к публикации 30 октября 2024 г.

Представлены результаты исследования фотоотражения пленок $\text{Cd}_{0.3}\text{Hg}_{0.7}\text{Te}$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Проведено сопоставление результатов измерения фотоотражения с данными исследования фотолуминесценции и оптического пропускания пленок после роста и после различных видов отжига. Для пленок после отжига обнаружено улучшение качества, выражающееся в уменьшении полуширины пика фотоотражения.

Ключевые слова: твердые растворы, CdHgTe , фотоотражение.

DOI: 10.61011/FTP.2024.10.59377.6488A

1. Введение

Твердые растворы теллурида кадмия-ртути ($\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, КРТ) состава $x \approx 0.3$ применяются для создания инфракрасных (ИК) фотоприемников, работающих в средневолновом ИК диапазоне (длины волн $\lambda = 3\text{--}5$ мкм [1]). Такие фотоприемники широко используются в промышленности, системах экологического контроля и медицине. Для выращивания эпитаксиальных пленок КРТ в настоящее время в основном применяется молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ).

Доминирующим методом исследования зонной структуры и структурного совершенства эпитаксиальных пленок КРТ является фотолуминесценция (ФЛ). Помимо ФЛ, в случае которой оптический сигнал собирается с большого объема образца, в качестве метода, более чувствительного к состоянию поверхности, может применяться ИК фотоотражение (ФО). Данным методом определяется энергия прямого межзонного перехода, и могут анализироваться осцилляции Фабри-Перо, как это было показано, например, для КРТ состава $x \approx 0.22$, легированного мышьяком [2], и для нелегированного КРТ с $x \approx 0.23$ и $x \approx 0.26$ [3]. На основе анализа осцилляций Франца-Келдыша в спектрах ИК ФО были оценены величины встроенных электрических полей в варизонных структурах с $x \approx 0.2$ [4]. В настоящей работе методом ИК ФО исследовалось влияние отжига на структурное совершенство эпитаксиальных пленок $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x \approx 0.3$, как нелегированных, так и легированных мышьяком.

2. Структуры и методика эксперимента

Структуры были выращены методом МЛЭ на подложке из (013)Si с буферными слоями ZnTe и CdTe в ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН. Толщина d и состав КРТ x контролировались в ходе роста методом оптической эллипсометрии *in situ* [5]. Выращивание структур завершалось созданием защитного варизонного слоя толщиной ~ 0.4 мкм с $x \approx 0.5$ на поверхности; для исключения влияния этого слоя он был химически стравлен, так что исследовались пленки с $d \approx 6$ мкм и постоянным составом $x = 0.29$.

Для исследования влияния отжига был использован отжиг для минимизации концентрации („заполнения“) вакансий ртути V_{Hg} ; он проходил при температуре $T_{\text{ann}} = 220^\circ\text{C}$ в течение 24 ч в парах Hg. Также применялся двухступенчатый („активационный“) в случае легированных мышьяком образцов отжиг, где первая часть — это высокотемпературный отжиг в парах Hg при $T_{\text{ann}} = 350^\circ\text{C}$ в течение 2 ч, вторая часть — низкотемпературный отжиг при $T_{\text{ann}} = 220^\circ\text{C}$ в течение 22 ч.

Исследования ФО, ФЛ и оптического пропускания (ОП) проводились на установке на базе фурье-спектрометра Vertex 80 с пошаговым сканированием, описанной в работе [4]. Источником модулирующего излучения при исследовании ФО служил диодный лазер с $\lambda = 809$ нм. Для исключения влияния фонового теплового излучения запись спектров ФО осуществлялась с синхронным усилением сигнала при механической модуляции излучения лазера. Измерения проводились в температурном интервале $T = 11\text{--}294$ К в гелиевом криостате замкнутого

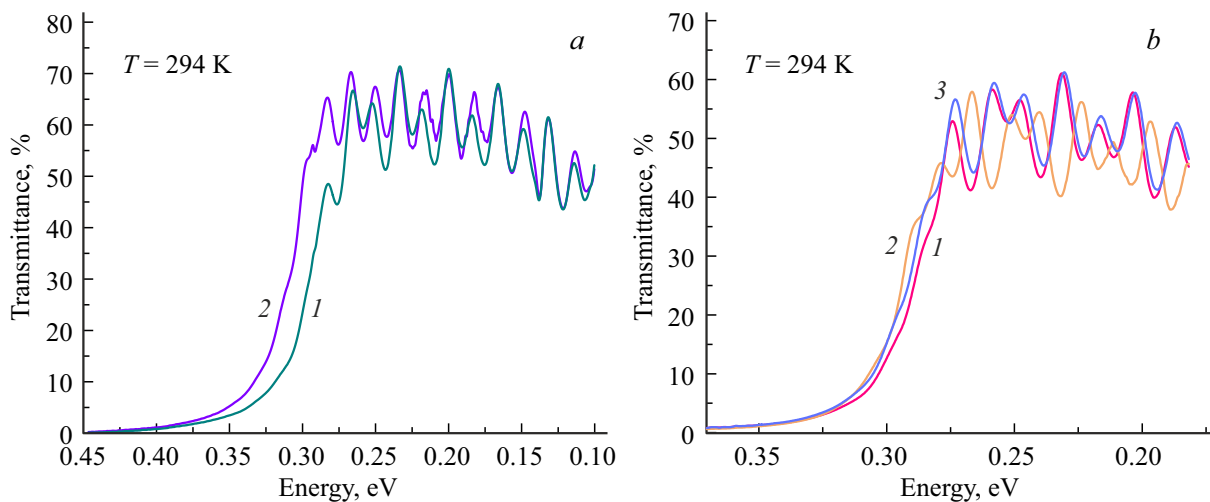


Рис. 1. *a* — спектры ОП легированного образца А после роста (1) и после активационного отжига (2) и *b* — нелегированного образца С после роста (1), после отжига для заполнения вакансий (2) и после активационного отжига (3). (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

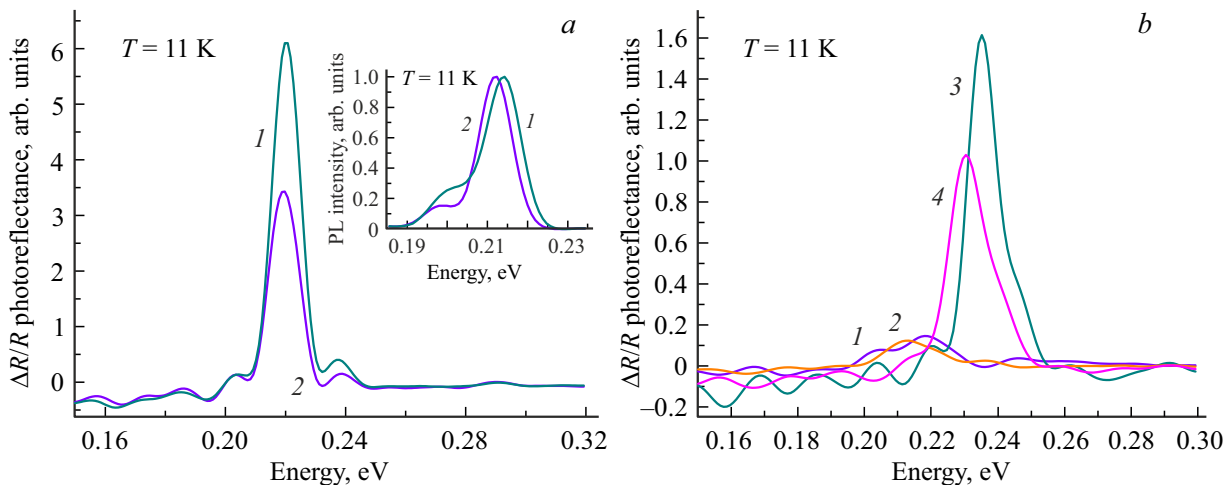


Рис. 2. *a* — спектры ФО и ФЛ (на вставке) образца С после отжига для заполнения вакансий (1) и после активационного отжига (2) и *b* — спектры ФО легированных образцов после роста (А — (1), В — (2)) и после активационного отжига (А — (3), В — (4)).

цикла Janis CCS-150. Сигнал регистрировался охлаждаемым фоторезистивным детектором на основе КРТ.

3. Обсуждение результатов

На рис. 1 представлены спектры ОП пленок, записанные при $T = 294$ К. Спектры были схожими; состав пленок по ним был подтвержден как $x \approx 0.29$. Для образцов после роста, выращенных в идентичных условиях, как легированных А (до концентрации $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, кривая 1 на рис. 1, *a*) и В (до концентрации $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, не показан), так и нелегированного С (кривая 1 на рис. 1, *b*), спектры были идентичны. Для отожженных

легированных пленок наблюдалось смещение края ОП в сторону высоких энергий (ВЭ) на ~ 12 мэВ. Для пленки С смещение края ОП после отжига было незначительно, ~ 3 мэВ. В области низких энергий (НЭ) в спектрах ОП всех образцов наблюдались выраженные интерференционные полосы с периодом ~ 18 мэВ, подтверждавшие хорошую планарность пленок.

На рис. 2, *a* приведены спектры ФО при $T = 11$ К для образца С с двумя видами отжига. Полуширины пиков ФО составили ~ 11 мэВ после обоих видов отжига, но интенсивность пика ФО была больше после отжига для заполнения вакансий. Можно предположить, что этот низкотемпературный отжиг благоприятно влияет на качество образца, в то время как активационный

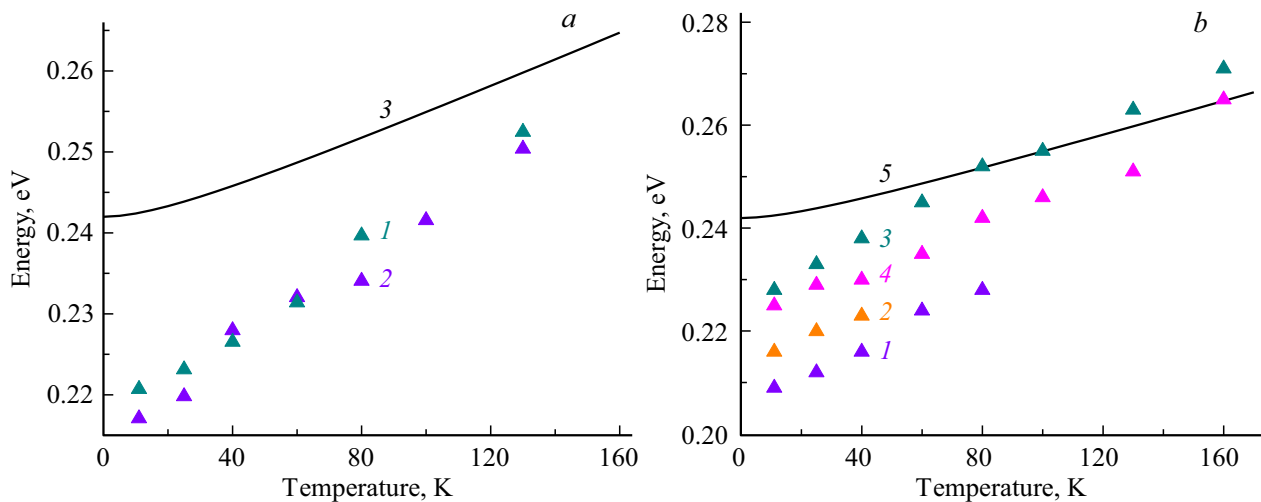


Рис. 3. *a* — температурные зависимости энергий пиков ФО нелегированного образца С после отжига для заполнения вакансий (1) и после активационного отжига (2), зависимость $E_g(T)$ для $x = 0.30$ (3), *b* — аналогичные зависимости для легированных образцов после роста (А — (1), В — (2)) и после активационного отжига (А — (3), В — (4)), зависимость $E_g(T)$ для $x = 0.30$ (5).

отжиг, а именно его высокотемпературная часть, его снижает. Спектры низкотемпературной ФЛ, приведенные на рис. 2, *a* на вставке, содержали ВЭ пик большой интенсивности и низкоинтенсивное НЭ плечо, расположенное на ~ 14 мэВ ниже ВЭ пиков. Смещение ВЭ пика ФЛ для образца после отжига для заполнения вакансий относительно ВЭ пика образца после роста (не показан) было практически аналогичным таковому для образца после активационного отжига.

На рис. 2, *b* приведены спектры ФО легированных пленок при $T = 11$ К. Положение основного пика ФО для образцов после активационного отжига смещено в сторону ВЭ относительно образцов после роста на ~ 17 мэВ для образца А и на ~ 18 мэВ для образца В. При этом полуширины в результате отжига меняются с ~ 16 до ~ 11 мэВ для образца А и с ~ 15 до ~ 13 мэВ для образца В. Для всех исследованных образцов в спектрах ФО аналогично спектрам ОП наблюдаются интерференционные полосы Фабри-Перо в области малых энергий с периодом ~ 18 мэВ.

На рис. 3 показаны температурные зависимости энергии пиков ФО образцов. Сплошной линией показана расчетная зависимость ширины запрещенной зоны $E_g(T)$ для КРТ состава $x = 0.30$, построенная согласно [6]. В показанном диапазоне температур положения максимумов ФО находятся ниже расчетного значения $E_g(T)$, как для нелегированных эпитаксиальных пленок (рис. 3, *a*), так и для легированных (рис. 3, *b*). Подобный результат неоднократно наблюдался для ФЛ КРТ [7] и свидетельствовал о разупорядочении твердого раствора. Возможно, подобную температурную зависимость в случае ФО допустимо интерпретировать таким же образом. Тогда при низких температурах положение основного пика ФО может быть связано с экситонами, локализованными на флуктуациях состава. При $T = 11$ К энергия

пика ФО находится ниже E_g на величину ~ 24 мэВ. Улучшение структурного совершенства пленок после отжига подтверждается тем, что сигнал ФО регистрировался вплоть до комнатной температуры, в отличие от пленок после роста, где сигнала не было уже после ~ 80 К.

4. Заключение

Таким образом, в работе были проведены исследования эпитаксиальных пленок $\text{Cd}_{0.3}\text{Hg}_{0.7}\text{Te}$ методом ФО. Данный метод позволил оценить качество эпитаксиальных пленок после роста и после отжига. Для легированных образцов данные ФО хорошо коррелируют с результатами предыдущих оптических исследований [7], а именно подтверждают улучшение структурного совершенства после отжига. Для нелегированных пленок выявлено, что высокотемпературный отжиг несколько ухудшает качество образца, при этом низкотемпературный отжиг оказывает положительное воздействие. Положение сигнала в спектре низкотемпературного ФО, как и в случае ФЛ, может соответствовать по энергии переходам с участием экситонов, локализованных на флуктуациях состава в КРТ. Результаты работы могут быть использованы при дальнейших исследованиях зонной структуры твердых растворов КРТ и при разработке оптоэлектронных устройств на их основе.

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: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113511>
- [2] J. Shao, L. Chen, W. Lu, X. Lü, L. Zhu, S. Guo, L. He, J. Chu. *Appl. Phys. Lett.*, **96** (12), 121915 (2010). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3373595>
- [3] M. Motyka, G. Sęk, F. Janiak, J. Misiewicz, K. Kłos, J. Piotrowsk. *Meas. Sci. Technol.*, **22** (12), 125601 (2011). DOI: 10.1088/0957-0233/22/12/125601
- [4] О.С. Комков, М.В. Якушев. *ФТП*, **57** (6), 426 (2023). DOI: 10.61011/FTP.2023.06.56469.33k
- [5] В.А. Швец, Д.В. Марин, В.Г. Ремесник, И.А. Азаров, М.В. Якушев, С.В. Рыхлицкий. *Опт. и спектр.*, **128** (12), 1815 (2019). DOI: 10.21883/OS.2020.12.50315.349-20
- [6] C.R. Becker, V. Latussek, A. Pfeuffer-Jeschke, G. Landwehr, L.W. Molenkamp. *Phys. Rev. B*, **62** (15), 10353 (2000). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.10353>
- [7] М.С. Ружевич, Д.Д. Фирсов, О.С. Комков, К.Д. Мынбаев, В.С. Варавин, М.В. Якушев. *ФТП*, **57** (6), 491 (2023). DOI: 10.61011/FTP.2023.06.56479.5375

Редактор Г.А. Оганесян

Infrared photoreflectance of $\text{Cd}_{0.3}\text{Hg}_{0.7}\text{Te}$ epitaxial films

M.S. Ruzhevich¹, K.D. Mynbaev^{1,2}, D.D. Firsov³,
I.V. Chumanov³, O.S. Komkov³,
V.S. Varavin⁴, M.V. Yakushev⁴

¹ ITMO University,
197101 St. Petersburg, Russia

² Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

³ ETU „LETI”,
197376 St. Petersburg, Russia

⁴ Rzhhanov Institute of Semiconductor Physics,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract The results of a study of photoreflectance of $\text{Cd}_{0.3}\text{Hg}_{0.7}\text{Te}$ films grown by molecular beam epitaxy are presented. The results of photoreflectance measurements were compared with data from studies of photoluminescence and optical transmission of films after growth and after various types of annealing. For films after annealing, an improvement in quality was found, expressed in a decrease in the half-width of the photoreflectance peak.