

06;07

Влияние отжига на оптические и фотоэлектрические свойства гетероэпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ для среднего инфракрасного диапазона

© А.И. Ижнин, И.И. Ижнин, К.Д. Мынбаев, В.И. Иванов-Омский,
Н.Л. Баженов, В.А. Смирнов, В.С. Варавин,
Н.Н. Михайлов, Г.Ю. Сидоров

НИИ материалов «НПП „Карат“», Львов, Украина
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,
Новосибирск, Россия
E-mail: mynkad@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 22 июля 2008 г.

Исследовано влияние различных видов постростовой обработки (отжиг в атмосфере гелия или парах ртути, а также облучение низкоэнергетическими ионами) на оптические и фотоэлектрические свойства гетероэпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, предназначенных для создания фото- и оптоэлектронных устройств среднего инфракрасного диапазона (3–5 μm). Показано, что оптимальным с точки зрения улучшения люминесцентных свойств является отжиг в парах ртути.

PACS: 61.72.Cc, 78.55.Et

При создании фото- и оптоэлектронных устройств на основе твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) важное место занимает постростовая термическая обработка материала (отжиг). Такая обработка позволяет как „залечивать“ дефекты, образовавшиеся в процессе роста, улучшая свойства материала, так и генерировать новые, — например, вакансии ртути, необходимые для получения материала p -типа проводимости с заданной концентрацией дырок без дополнительного легирования [1,2].

Влияние отжига на электрические свойства КРТ известно и может быть легко проконтролировано. Отдельный интерес представляет происходящее в результате отжига изменение оптических, и в том числе люминесцентных, свойств материала. Это связано с тем, что в последнее время КРТ рассматривается как материал для изготовления не только фотоприемников, но и излучателей, — главным образом среднего инфракрасного диапазона ($3\text{--}5\ \mu\text{m}$), актуального для мониторинга окружающей среды [3]. Кроме того, исследование люминесценции позволяет характеризовать дефектно-примесную структуру КРТ и изменения, происходящие в ней в результате обработки [4,5].

В настоящей работе влияние постростовой обработки на оптические и фотоэлектрические свойства КРТ исследовалось для гетероэпитаксиальных слоев, выращенных молекулярно-пучковой эпитаксией (МПЭ) на подложках GaAs/ZnTe/CdTe [6]. Структуры имели состав „активного“ слоя (толщиной от 3 до $9\ \mu\text{m}$) x , по данным эллипсометрии, в диапазоне от 0.3 до 0.4. Этот слой был ограничен варизонными широкозонными слоями с толщинами нижнего и верхнего слоев ~ 1.0 и $\sim 0.3\ \mu\text{m}$ соответственно. После роста структуры отжигались в атмосфере He (20 h при температуре $T = 270^\circ\text{C}$, такой отжиг используется для перевода МПЭ КРТ в p -тип проводимости [1]) или в парах Hg (15 h при $T = 250^\circ\text{C}$, так называемый „стехиометрический“ [2] отжиг), а также подвергались низкоэнергетической ионной обработке (НИО) при $T = 20^\circ\text{C}$.

Изучались спектры оптического пропускания структур, спектры фотопроводимости (ФП) и фотолюминесценции (ФЛ). На рис. 1 представлены нормированные спектры ФЛ и ФП образца 051115 ($x = 0.40$), записанные при $T = 84\ \text{K}$. ФЛ исследовалась при непрерывном возбуждении полупроводниковым лазером с длиной волны $0.81\ \mu\text{m}$ и регистрацией сигнала фоторезистором Ge: Au. Интенсивную полосу с энергией E_1 , согласно ее положению, можно сопоставить с переходами, обусловленными „оптической“ запрещенной зоной E_0 . Длинноволновая полоса E_2 отстояла от E_1 на $18\ \text{meV}$ и могла быть приписана переходам „зона проводимости–акцептор“ [7]. Присутствие широкой коротковолновой полосы E_3 было обусловлено наличием в структуре варизонных широкозонных слоев. В результате отжига в атмосфере He произошел коротковолновый сдвиг полос ФЛ (для $E_1 \sim 7\ \text{meV}$), при этом относительная интенсивность полосы E_2 существенно увеличилась (рис. 1, *b*). Изменился и вид спектра ФП: если до отжига

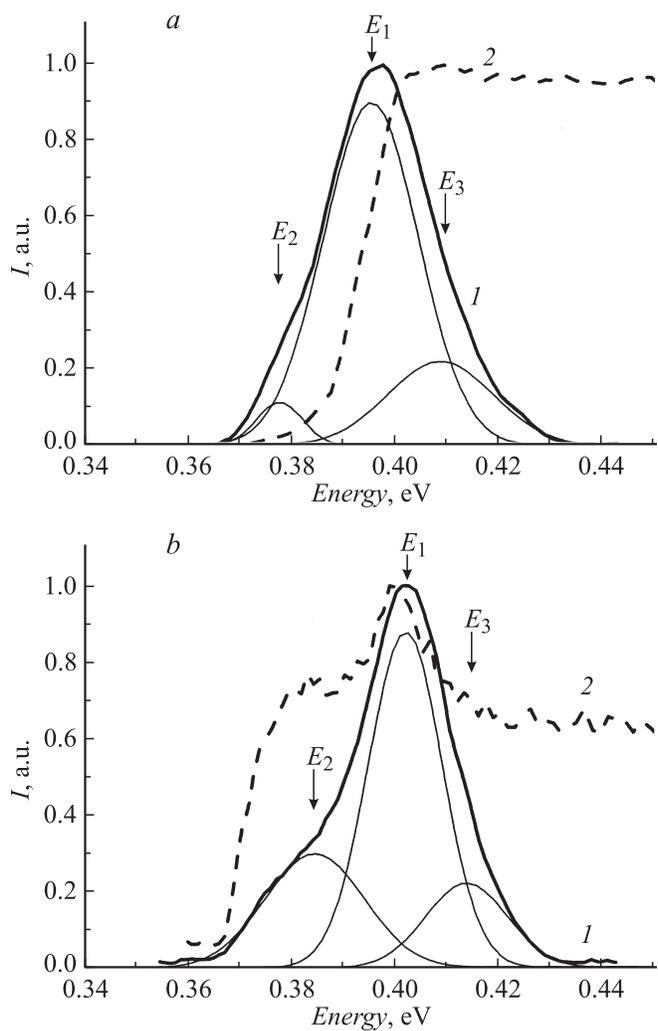


Рис. 1. Спектры ФЛ (1) и ФП (2) образца 051115 непосредственно после выращивания (а) и после отжига в атмосфере He (b). Полосы E_1 , E_2 и E_3 получены разложением спектра ФЛ по гауссовым контурам.

в длинноволновой области он имел резкий край с полуспадом, соответствовавшим E_0 , то после отжига на этом краю образовалось „крыло“, смещенное относительно максимума на 22 meV. Подобная форма спектра говорит о возникновении „примесной“ фотопроводимости, обусловленной поглощением „зона проводимости–акцептор“ [8]. Таким образом, характер изменений, наблюдавшихся в спектрах ФЛ и ФП, и величина $E_1 - E_2 \sim 20$ meV позволяют предположить, что наряду с увеличением E_0 в ходе отжига произошло существенное увеличение концентрации акцепторов — генерация вакансий ртути V_{Hg} . Этот вывод соответствует и концепции отжига в атмосфере He, и результатам измерений электрических свойств образцов. Так, по данным измерения коэффициента Холла при $T = 77$ К, после выращивания активные слои структур имели n -тип проводимости с концентрацией электронов $n_{77} \sim (1-5) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, а после отжига в атмосфере He — p -тип проводимости с концентрацией дырок $p_{77} \sim (5-7) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

На рис. 2 представлены спектры ФЛ ($T = 84$ К) образца 061003 ($x = 0.38$). Видно, что и здесь в результате отжига произошел сдвиг максимума полосы ФЛ, соответствовавшей E_0 , — на 2 meV для образца, прошедшего отжиг в парах Hg, и на 11 meV для образца, отожженного в атмосфере He. Одновременно произошло сужение полосы ФЛ, особенно для образца, отожженного в Hg, где спектр приобрел вид одиночной линии с полушириной ~ 20 meV. Интенсивность ФЛ в этом образце существенно увеличилась. В спектре образца, отожженного в атмосфере He, как и для образца 051115, кроме основной полосы присутствовала и выраженная длинноволновая. Аналогичные изменения формы и положения максимума спектра ФЛ в результате отжигов наблюдались и для других образцов с $x = 0.34-0.40$.

Увеличение E_0 в результате отжига было подтверждено и результатами измерения оптического пропускания. Спектры пропускания записывались при 300 К на спектрометре SPECORD. Для всех исследованных образцов после отжига наблюдался коротковолновый сдвиг края пропускания, но для образцов, отожженных в парах Hg, он составлял 2–3 meV, а для отожженных в атмосфере He — от 8 до 12 meV.

Существенный коротковолновый сдвиг максимума полосы ФЛ в результате отжига в атмосфере He, связанный с изменением x вследствие диффузии компонентов твердого раствора в гетероструктуре, а также экзодиффузии ртути, наблюдался нами ранее в образцах МПЭ КРТ с $x > 0.6$ [9]. Особенности зависимости энергетического

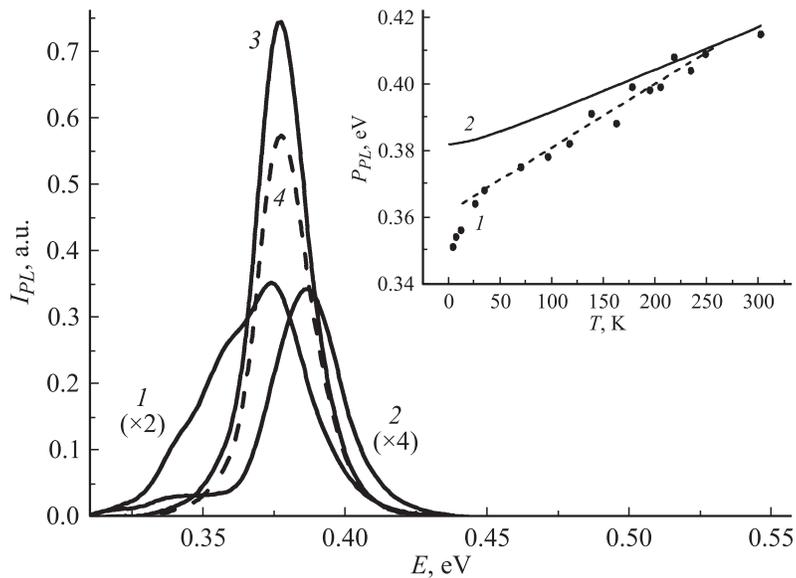


Рис. 2. Спектры ФЛ образца 061003 непосредственно после выращивания (1), после отжига в атмосфере He (2), парах Hg (3) и дополнительной обработки ионами Ag с флюенсом $1.5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ (4). На вставке — температурная зависимость E_0 образца, отожженного в парах Hg (1), и расчетная зависимость $E_g(T)$ для КРТ с $x = 0.38$ (2).

положения пиков ФЛ и их интенсивности от температуры при $T < 70 \text{ K}$ свидетельствовали о формировании в этих образцах экситона. Такие экситоны в твердых растворах, в том числе КРТ, могут локализоваться в хвостах плотности состояний, обусловленных микроскопическими флуктуациями состава [10,11].

На вставке рис. 2 представлена температурная зависимость E_0 отожженного в парах Hg образца 061003. Спектры ФЛ в данном случае записывались с импульсным возбуждением на длине волны $0.84 \mu\text{m}$ и регистрацией сигнала фоторезистором InSb. Видно, что ход зависимости $E_0(T)$ совпадает с температурным ходом ширины запрещенной зоны E_g для КРТ с $x = 0.38$ (по данным [12]) только при $240 < T < 300 \text{ K}$. В диапазоне температур $40 < T < 240 \text{ K}$ зависимость $E_0(T)$ остается линейной, но ее наклон (показан пунктирной линией) несколько

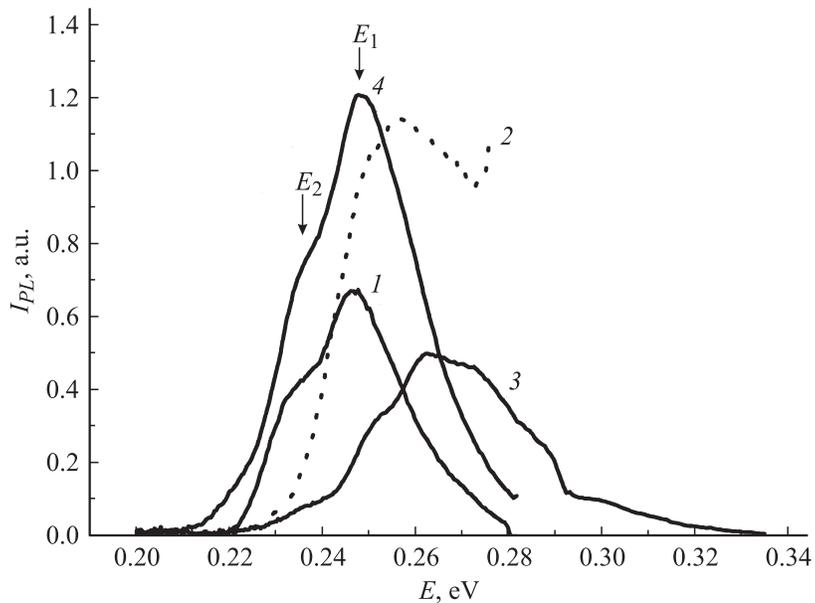


Рис. 3. Спектры образца 071115: ФЛ (1) и ФП (2) после выращивания, ФЛ непосредственно после НИО с флюенсом $7.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ (3) и после релаксации, длившейся 120 000 min (4).

больше, чем у $E_g(T)$. Ниже 70 K наблюдается дальнейшее увеличение наклона $E_0(T)$. Такой ход $E_0(T)$ может быть объяснен влиянием на формирование спектра ФЛ как микроскопических (статистических), так и макроскопических (обусловленных технологией [9]) флуктуаций состава. Подобный эффект был описан ранее для твердых растворов $A^{III}B^V$ [13]; его влияние на длину волны ФЛ в МПЭ КРТ должно, очевидно, учитываться при разработке излучателей, работающих при температурах ниже комнатной.

Образец 061003 после отжига в парах Hg был дополнительно подвергнут НИО. Обработка проводилась ионами Ar с энергией 500 eV. Как видно на рис. 2, кривая 4, НИО практически не изменила ни форму, ни положение полосы ФЛ. Таким образом, полная аннигиляция V_{Hg} с атомами межузельной ртuti Hg_i , являющаяся основным следствием НИО КРТ [14], в структуре, где концентрация вакансий была уже

минимизирована отжигом, не улучшила люминесцентных свойств. Не изменила НИО и свойств образцов с $x \sim 0.30$, не проходивших постростовой отжиг и имевших n -тип проводимости с $n_{77} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. На рис. 3 представлены спектры ФЛ и ФП образца 071115. Непосредственно после НИО в этом образце был зарегистрирован существенный ($\sim 17 \text{ meV}$) сдвиг спектра ФЛ. Аналогичное явление наблюдалось в работе [5] и было объяснено влиянием эффекта Бурштейна–Мосса. Действительно, известно, что в условиях НИО атомы Hg_i в КРТ способны образовывать комплексы с заряженными [14,15], и даже нейтральными [16] дефектами, так что непосредственно после обработки в образцах может наблюдаться большая концентрация донорных центров. После прекращения НИО эти центры разрушаются даже при комнатной температуре; радиационные дефекты, внесенные НИО, также релаксируют [15]. В результате электрически активные центры, рожденные НИО, либо полностью распадаются, либо переходят в нейтральную форму, и концентрация носителей существенно падает (для данного образца за 36 000 min после НИО n_{77} снизилась с $7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ до $6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$). Как следует из рис. 3, это сказывается и на спектре ФЛ. В образце 061003 эффект Бурштейна–Мосса не проявился после НИО, очевидно, из-за большей величины E_g . Отметим, тот факт, что НИО не привело в образце 071115 к исчезновению полосы E_2 , говорит о том, что в образцах, кроме вакансий, имеются и другие акцепторы; это подтверждает и сложная форма длинноволнового крыла спектров 1 и 2 на рис. 2.

Таким образом, из представленных результатов можно сделать вывод, что оптимальным для улучшения люминесцентных свойств (состав спектра, интенсивность и полуширина полосы) видом постростовой обработки структур на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ для среднего инфракрасного диапазона является отжиг в парах Hg.

Работа была частично поддержана Министерством образования и науки Украины (Договор № М/182-2007), грантом РФФИ 07-02-00400 и Интеграционным проектом СО РАН № 3.20.

Список литературы

- [1] Бахтин П.А., Дворецкий С.А., Варавин В.С., Коробкин А.П., Михайлов Н.Н., Сабина И.В., Сидоров Ю.Г. // ФТП. 2004. Т. 38. С. 1207–1210.
- [2] Мынбаев К.Д., Иванов-Омский В.И. // ФТП. 2006. Т. 40. С. 3–22.

- [3] Ноздрин Ю.Н., Окомельков А.В., Котков А.П., Моисеев А.Н., Гришинова Н.Д. // ФТП. 2004. Т. 38. С. 1419–1422.
- [4] Yue F., Chu J., Wu Z., Hu Z., Li Y., Yang P. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. Art. 121916.
- [5] Zha F.X., Shao J., Jiang J., Yang W.Y. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. Art. 201112.
- [6] Сидоров Ю.Г., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Якушев М.В., Сабинаина И.В. // ФТП. 2001. Т. 35. С. 1092–1101.
- [7] Hunter A.T., Mc Gill T.C. // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. P. 5779–5785.
- [8] Баженов Н.Л., Огородников В.К., Тотиева Т.Ц. // ФТП. 1980. Т. 14. С. 2056–2057.
- [9] Иванов-Омский В.И., Баженов Н.Л., Мынбаев К.Д., Смирнов В.А., Варавин В.С., Бабенко А.А., Икусов Д.Г., Сидоров Г.Ю. // Письма ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 11. С. 45–51.
- [10] Gille P., Herrmann K.H., Puhmann N., Schenk M., Tomm J.W., Werner L. // J. Cryst. Growth. 1988. V. 86. P. 593–598.
- [11] Lusson A., Fuchs F., Marfaing Y. // J. Cryst. Growth. 1990. V. 101. P. 673–677.
- [12] Laurenti J.P., Camassel J., Bouhemadou A., Toulouse B., Legros R., Lusson A. // J. Appl. Phys. 1990. V. 67. P. 6454–6460.
- [13] Schubert E.F., Göbel E.O., Horikoshi Y., Ploog K., Queisser H.J. // Phys. Rev. B. 1984. V. 30. P. 813–820.
- [14] Мынбаев К.Д., Иванов-Омский В.И. // ФТП. 2003. Т. 37. С. 1153–1172.
- [15] Izhnin I.I., Bogoboyashchyu V.V., Sizov F.F. // Proceed. SPIE. 2005. V. 5881. Art. 5881OU.
- [16] Ижнин И.И., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Сидоров Ю.Г., Варавин В.С., Поцяк М., Мынбаев К.Д. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 22. С. 64–71.