

07

Гетероструктуры AlInPSbAs/InAs для термофотоэлектрических преобразователей

© Л.С. Лунин, М.Л. Лунина, А.С. Пащенко, Д.Л. Алфимова,
Э.М. Данилина

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН,
Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: lunin_ls@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 июля 2018 г.

Методом зонной перекристаллизации градиентом температуры получены изопараметрические гетероструктуры AlInPSbAs/InAs для термофотопреобразователей, работающих в интервале длин волн 500–3200 нм. Использование пятикомпонентных твердых растворов AlInPSbAs в качестве активной области термофотопреобразователей позволяет повысить величину внешнего квантового выхода до 0.9 в спектральном диапазоне 520–2800 нм.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.23.47002.17480

В термофотоэлектрических (ТФЭ) генераторах с пониженной температурой эмиттера ~ 1273 К применяются фотоэлементы на основе узкозонных соединений A^3B^5 [1–4]. Эффективность работы данных фотоэлементов зависит от использования твердого раствора с высокой фоточувствительностью в длинноволновой области, широкозонных слоев тыльного потенциального барьера и широкозонного окна, а также от использования в качестве активной области ТФЭ-преобразователя твердых растворов, изопериодных подложке. Таковыми являются пятикомпонентные твердые растворы соединений A^3B^5 , совпадающие по

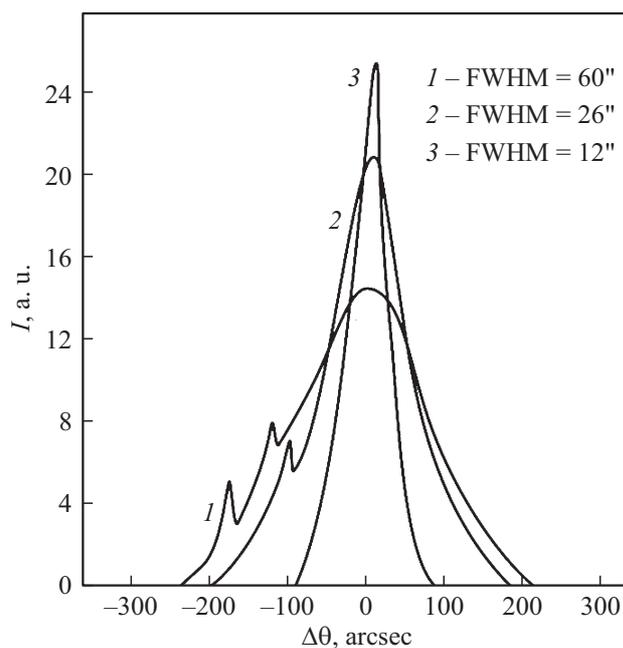


Рис. 1. Кривые дифракционного отражения гетероструктур. 1 — InSbAs/InAs, 2 — InPSbAs/InAs, 3 — AlInPSbAs/InAs.

параметрам решетки и коэффициенту термического расширения (КТР) с подложками [5]. Перспективными материалами для термофотоэлектрических преобразователей служат многокомпонентные твердые растворы на основе InAs [6–8].

Цель настоящей работы состоит в получении и исследовании твердых растворов AlInPSbAs, изопараметрических арсениду индия, для ТФЭ-преобразователей.

Гетероструктуры AlInPSbAs/InAs были получены методом зонной перекристаллизации градиентом температуры (ЗПГТ). Характерной особенностью этого метода является наличие температурного градиента, поле которого должно быть достаточно однородным [9]. Принципиальным отличием метода ЗПГТ от метода жидкофазной эпитаксии является механизм фазового перехода, заключающийся в „движении“

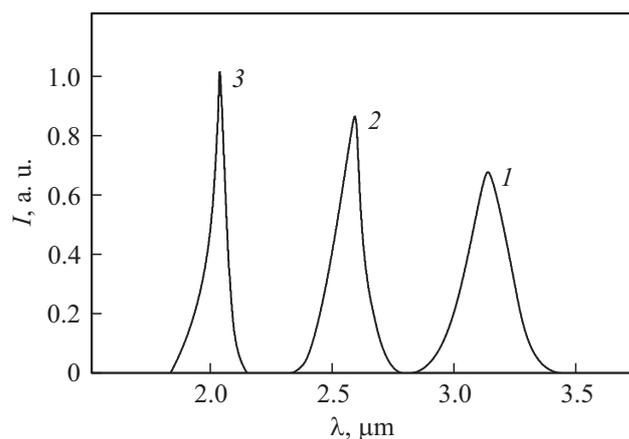


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции гетероструктур. 1 — $\text{InSbAs}/\text{InAs}$, 2 — $\text{InPSbAs}/\text{InAs}$, 3 — $\text{AlInPSbAs}/\text{InAs}$.

жидкой зоны — последовательной перекристаллизации исходной матрицы, диффузии компонентов в расплаве к подложке и их кристаллизации на ней. В качестве жидкой зоны использовался раствор-расплав чистых In, Al, P, Sb, As толщиной $10\text{--}100\ \mu\text{m}$. В качестве перекристаллизуемого источника применялись пластины InAs и InP для варизонных гетероструктур или поликристалл InAlPAs для гетероструктур постоянного состава. Методика таких композиций описана нами ранее [10]. Полученные „сэндвичи“ InAs —жидкая зона— $(\text{In}\text{--}\text{Al}\text{--}\text{P}\text{--}\text{Sb}\text{--}\text{As})$ — $(\text{InP}$, InAs или поликристалл InAlPAs) подвергались перекристаллизации в поле температурного градиента в интервале температур $773\text{--}873\ \text{K}$. Выбор был сделан в результате исследований температур ликвидуса для каждого отдельного состава с помощью установки визуальнотермического анализа [11].

Исходя из предварительного анализа диаграмм фазовых равновесий системы $\text{AlInPSbAs}\text{--}\text{InAs}$ определялся состав жидкой фазы, необходимый для получения эпитаксиальных слоев твердых растворов заданного состава. Эпитаксиальные слои твердых растворов $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{Sb}_z\text{As}_{1-x-y}$ с тем же периодом решетки и КТР, что и у подложки InAs (изопараметрические гетероструктуры), были получены в области составов

$0.1 \leq x \leq 0.3$ и $0.2 \leq y \leq 0.3$. Определение несоответствия периодов решеток подложки и слоя, а также оценка кристаллического совершенства гетероструктур осуществлялись методом регистрации рентгеновской дифракции. Исследования показали, что дефектность пленок многокомпонентных твердых растворов уменьшалась по мере увеличения числа компонентов. Трехкомпонентные твердые растворы InSbAs не имеют ни одного состава, изопериодического InAs. Измерения, проведенные на косых шлифах однородных пленок InSbAs, показали, что полуширина кривых качания (FWHM) одинакова во всех точках слоя, кроме участков вблизи гетерограницы, и составляет $\sim 60''$ (рис. 1, кривая 1). Для снижения дефектности в твердый раствор вводился четвертый компонент. Сравнение кривых 1 и 2 (рис. 1) показало, что введение фосфора в InSbAs уменьшает дефектность гетерограницы за счет увеличения решеточного согласования пленки и подложки. Однако дефектность гетерограницы даже для изопериодных составов твердых растворов InPSbAs сохраняется довольно значительной из-за различия КТР сопрягающихся слоя и подложки (FWHM = $26''$). При введении пятого компонента (Al) в InPSbAs дефектность гетерограницы значительно уменьшается (FWHM = $12''$) (рис. 1, кривая 3).

Спектры фотолюминесценции однородных по составу гетероструктур InSbAs/InAs, InPSbAs/InAs, AlInPSbAs/InAs, полученные при 300 К (рис. 2), имеют один пик. Люминесценция при 300 К в основном обусловлена испусканием, связанным с краем зоны. Исследования показали, что добавление P в InSbAs и Al в InPSbAs приводит к увеличению интенсивности и уменьшению ширины полосы излучения на половине высоты пиков. Интенсивность и ширина полосы излучения определяются в основном кристаллическим совершенством пленок.

Спектральная характеристика гетероструктуры *p*-AlInPSbAs/*n*-AlInPSbAs/*n*-InAs приведена на рис. 3 (кривая 1). Для сравнения здесь же (кривая 2) представлена спектральная характеристика гетероструктуры *p*-InPSbAs/*n*-InPSbAs/*n*-InAs, полученная нами ранее [6].

Видно, что использование в качестве активной области ТФЭ-преобразователя пятикомпонентного твердого раствора AlInPSbAs, изопараметрического InAs, позволяет значительно повысить внешний квантовый выход.

Таким образом, впервые получены пятикомпонентные изопараметрические гетероструктуры $Al_x In_{1-x} P_y Sb_z As_{1-x-y} / InAs$ ($0.1 \leq x \leq 0.3$ и $0.2 \leq y \leq 0.3$). Проанализированы возможности снижения дефектности

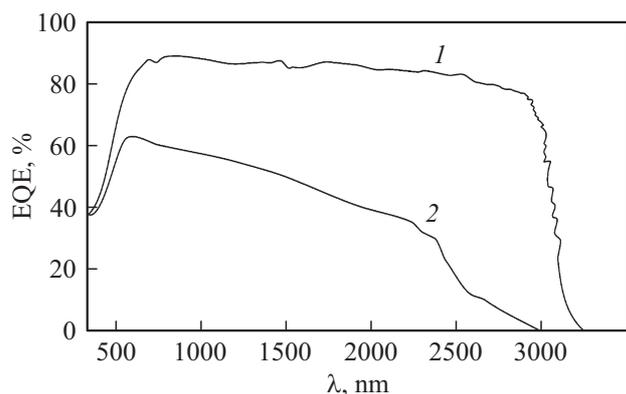


Рис. 3. Внешний квантовый выход гетероструктур. 1 — $p\text{-AlInPSbAs}/n\text{-AlInPSbAs}/n\text{-InAs}$, 2 — $p\text{-InPSbAs}/n\text{-InPSbAs}/n\text{-InAs}$.

гетерограниц и повышения люминесцентных свойств гетероструктур $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{Sb}_z\text{As}_{1-x-y}/\text{InAs}$.

Исследованы спектральные характеристики гетероструктуры AlInPSbAs/InAs в интервале длин волн 500–3200 nm. Показана перспективность их использования для ТФЭ-преобразователей в ИК-диапазоне.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-01676).

Список литературы

- [1] Andreev V.M., Khvostikov V.P., Larionov V.R., Rummyantsev V.D., Sorokina S.V., Shvarts M.Z., Vasil'ev V.I., Vlasov A.S. // Conf. Record 26th IEEE PVSC. Anaheim, 1997. P. 935–939.
- [2] Ferrari C., Melino S., Pinelli M., Spina P.R., Venturini M. // Energy Procedia. 2014. V. 45. P. 160–169. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.01.018
- [3] Krishtopenko S.S., Ruffenach S., Gonzalez-Posada F., Boissier G., Marcinkiewicz M., Fadeev M.A., Kadykov A.M., Rummyantsev V.V., Morozov S.V., Gavrilenko V.I., Consejo C., Desrat W., Jouault B., Knap W., Tournié E., Teppe F. // Phys. Rev. B. 2018. V. 97. N 24. P. 245419. DOI: 10.1103/PhysRevB.97.245419

- [4] Jain N., Hudait M.K. // Energy Harvest. Syst. 2014. V. 1. N 3-4. P. 121–145. DOI: 10.1515/ehs-2014-0012
- [5] Кузнецов В.В., Лунин Л.С., Ратушный В.И. Гетероструктуры на основе четверных и пятерных твердых растворов соединений $A^{III}B^V$. Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2003. 376 с.
- [6] Хвостиков В.П., Лунин Л.С., Кузнецов В.В., Ратушный В.И., Олива Э.В., Хвостикова О.А., Шварц М.З. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 20. С. 33–37.
- [7] Krier A., Yin M., Marshall A.R.J., Krier S.E. // J. Electron. Mater. 2016. V. 45. N 6. P. 2826–2830. DOI: 10.1007/s11664-016-4373-0
- [8] Wang P., Chen Q., Wu X., Cao C., Wang S., Gong Q. // Nanoscale Res. Lett. 2016. V. 11. P. 119. DOI: 10.1186/s11671-016-1339-3
- [9] Лозовский В.Н., Лунин Л.С., Попов В.П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1987. 232 с.
- [10] Алфимова Д.Л., Лунин Л.С., Лунина М.Л., Арустамян Д.А., Казакова А.Е., Чеботарев С.Н. // ФТП. 2017. Т. 51. В. 10. С. 1426–1433. DOI: 10.21883/FTP.2017.10.45025.8511
- [11] Алфимова Д.Л., Лунина М.Л., Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Лунин Л.С., Казакова А.Е. // Неорг. материалы. 2017. Т. 53. В. 12. С. 1245–1256. DOI: 10.7868/S0002337X17120016