

06.2:07

Многокомпонентные твердые растворы на основе InAs для термофотоэлектрических преобразователей

© В.П. Хвостиков, Л.С. Лунин, В.В. Кузнецов, В.И. Ратушный,
Э.В. Олива, О.А. Хвостикова, М.З. Шварц

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: vlkhv@scell.ioffe.rssi.ru

Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт), Новочеркасск
С.-Петербургский государственный электротехнический университет

Поступило в Редакцию 12 мая 2003 г.

С помощью метода жидкостной эпитаксии получены фотопреобразователи на основе твердых растворов InAsSpP и GaInAsSbP, которые являются перспективными для использования в термофотоэлектрических генераторах с пониженной температурой эмиттера ($\sim 1000^\circ\text{C}$).

В настоящее время для применения в термофотоэлектрических (ТФЭ) генераторах с пониженной температурой эмиттера ($1000\text{--}1200^\circ\text{C}$) разработаны фотоэлектрические преобразователи на основе узкозонных твердых растворов GaInAsSb ($0.5\text{--}0.6\text{ eV}$) с эпитаксиальными слоями GaSb и AlGaAsSb ($\sim 1\text{ eV}$), которые используются в качестве широкозонного окна [1,2]. Эффективность работы данных элементов может быть повышена путем использования твердого раствора иного состава, фоточувствительного более длинноволновой части спектра [3]. Это трудно осуществить в системе GaInAsSb по причине существования протяженной области несмешиваемости, не позволяющей получать слои с E_g меньше 0.5 eV . Перспективными для использования в качестве материала активной области фотоэлементов, работающих при температурах эмиттера $\sim 1000^\circ\text{C}$ или меньше, представляются твердые растворы InAsSbP и GaInAsSbP, совпадающие по параметру решетки с InAs [4,5].

В четверном твердом растворе $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_y\text{P}_x$ ширина запрещенной зоны и энергия спин-орбитального расщепления имеют близкие значения в широком диапазоне составов [6]. Эта особенность, как известно, усиливает действие механизмов безызлучательной рекомбинации по механизму Оже. Введение Ga в четверной твердый раствор изменяет величину спин-орбитального расщепления и, следовательно, снижает вероятность Оже-рекомбинационных процессов, являющихся одним из основных механизмов, ограничивающих характеристики фотопреобразователей [7]. Кроме того, расчеты показывают, что в области малого содержания галлия ($< 10 \text{ at.}\%$) в твердом растворе GaInAsSbP достигается согласование параметров решетки и коэффициентов температурного расширения (КТР) на гетерогранице, что уменьшает образование дислокаций, ухудшающих рабочие характеристики фотэлементов.

Целью настоящей работы являлось получение и исследование твердых растворов InAsSbP и GaInAsSbP, изопериодных арсениду индия для ТФЭ преобразователей. Для создания фотопреобразователей, которые могли бы эффективно работать в диапазоне длин волн $> 2.2 \mu\text{m}$, необходимо иметь слои твердого раствора InAsSbP с шириной запрещенной зоны $0.45\text{--}0.48 \text{ eV}$, что соответствует содержанию фосфора в твердом растворе $0.25\text{--}0.3 \text{ mol.p}$.

Определение технологических параметров жидкостного гетероэпитаксиального процесса получения твердых растворов InAsSbP и GaInAsSbP в диапазоне составов изопериодных InAs проводили на основе анализа фазовых равновесий „жидкость–твердое“ в рамках модели простых растворов. Методика анализа и основные данные для расчетов приведены в [8]. Использование обоснованных значений избыточных модельных энергий смещения позволило рассчитать температуры и составы ликвидуса и солидуса в температурном диапазоне ($T = 853 \text{ K}$) эпитаксиального процесса вдоль изопериода InAs по обе стороны бинадального пространства.

Эпитаксиальное наращивание проводили в изотермических условиях методом ступенчатого охлаждения при температуре $T = 843 \text{ K}$. Составы исходной шихты выбирали таким образом, чтобы жидкая фаза при температуре эпитаксии оказалась переохлажденной относительно температуры ликвидуса на $11\text{--}17 \text{ K}$.

Слои пятикомпонентных твердых растворов (ПТР) $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_{1-x-y}\text{P}_y\text{Sb}_z$, совпадающие по параметру решетки с InAs, были получены в диапазоне составов $y = 0.22\text{--}0.29$ и $x = 0.03\text{--}0.08$.

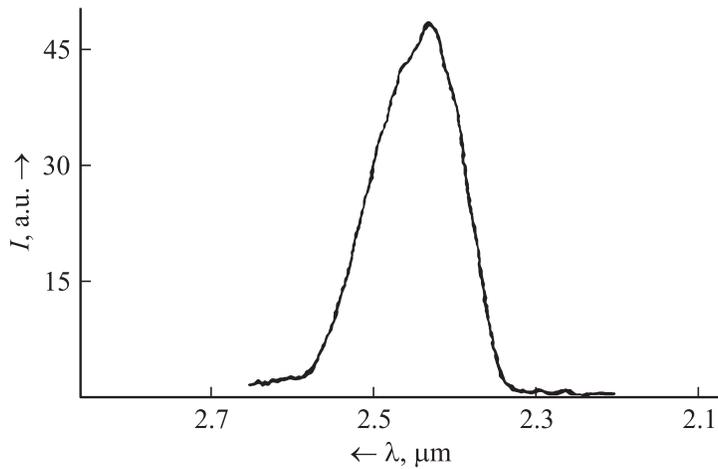


Рис. 1. Спектр ФЛ ПТР $\text{Ga}_{0.08}\text{In}_{0.92}\text{As}_{0.58}\text{Sb}_{0.16}\text{P}_{0.26}/\text{InAs}(100)$ при $T = 77$ К.

При соблюдении условия изопериодического замещения увеличение содержания галлия в твердой фазе приводило к снижению концентрации фосфора. При этом ширина запрещенной зоны ПТР практически не изменялась. Указанный диапазон изменения состава твердого раствора определяет ширину запрещенной зоны, необходимую для эффективного ТФЭ преобразования.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) твердых растворов InAsSbP и GaInAsSbP были измерены в жидком азоте при $T = 77$ К. На рис. 1 представлен спектр фотолюминесценции изопериодного с InAs эпитаксиального слоя пятерного твердого раствора. Длина волны ФЛ ПТР находилась в пределах $2.4\text{--}2.7\ \mu\text{m}$. Важно отметить, что интенсивность излучения ПТР, по сравнению с эпитаксиальными слоями InAsSbP , имеющими близкие значения ширины запрещенной зоны, повышалась в несколько раз.

Результаты, полученные в ходе экспериментов по выращиванию и исследованию гетероструктур $\text{InAsSbP}/\text{InAs}(100)$, позволили приступить к созданию высокоэффективных термофотоэлектрических преобразователей, работающих в среднем инфракрасном диапазоне длин волн. Формирование области p -типа проводимости осуществляли путем диф-

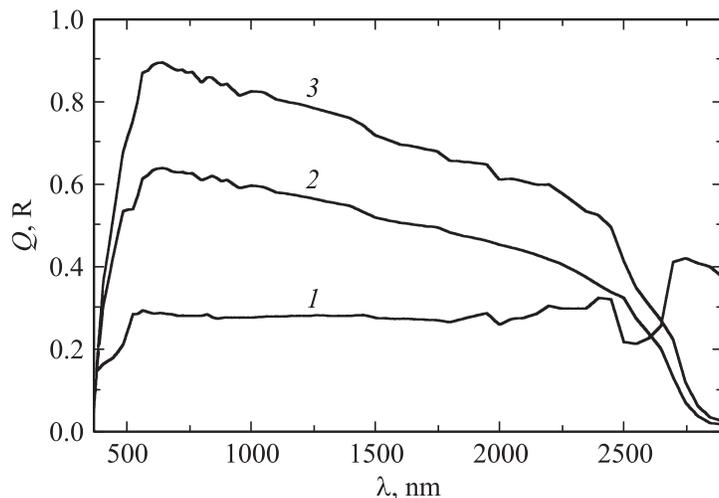


Рис. 2. Квантовый выход (2 — внешний квантовый выход, 3 — внутренний квантовый выход) и 1 — отражение элемента на основе InAsSbP/InAs.

фузии цинка из газовой фазы в квазизамкнутом объеме. Реализованное с помощью метода диффузии из газовой фазы встроенное электрическое поле вблизи поверхности InAsSbP, оттягивающее фотогенерированные носители в глубь полупроводника, обуславливает высокий квантовый выход в областях коротких длин волн.

Спектральная характеристика гетероструктуры p -InAsSbP/ n -InAsSbP/ n -InAs представлена на рис. 2. Внутренний квантовый выход с учетом потерь на отражение (кривая 1) составляет 50–90% в интервале длин волн 550–2500 nm. Измеренные значения спектральной чувствительности указывают на высокое кристаллографическое совершенство материала активной области.

Фоточувствительность гетероструктуры в длинноволновой области может быть повышена путем оптимизации глубины диффузии цинка, толщины слоя твердого раствора InAsSbP, а также повышением качества гетерограницы.

Кроме того, для повышения длинноволновой фоточувствительности гетероструктуры перспективным является выращивание широкозонных слоев тыльного потенциального барьера и широкозонного окна (напри-

мер, AlGaAsSb), а также использование в качестве активной области ТФЭ преобразователя ПТР GaInAsSbP, изопериодного InAs.

В результате проделанной работы впервые получены ПТР $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_{1-x-y}\text{P}_y\text{Sb}_z$ ($y = 0.22-0.29$ и $x = 0.03-0.08$), изопериодные InAs, в области малого содержания галлия ($< 10\%$) в твердом растворе. Показана перспективность их использования в оптоэлектронных приборах ИК-диапазона.

Исследованы спектральные характеристики гетероструктуры InAsSbP/InAs, с красной границей фоточувствительности $2.7\ \mu\text{m}$ и внутренним квантовым выходом 50–90% в интервале длин волн 550–2500 nm.

Список литературы

- [1] *Andreev V.M., Khvostikov V.P., Larionov V.R.* et al. // Conference Record 26th IEEE PVSC. Anaheim, 1997. P. 935–939.
- [2] *Hitchcock C.W., Gutmann R.J., Ehsani H.* et al. // J. of Crystal Growth. 1998. V. 195. P. 363–372.
- [3] *Mauk M.G., Shellenbarger Z.A., Cox J.A.* et al. // J. of Crystal Growth. 2000. V. 211. P. 189–193.
- [4] *Ворогина Т.И., Лагунова Т.С., Моисеев К.Д., Розов А.Е.* и др. // ФТП. 1999. Т. 33. В. 7. С. 781–788.
- [5] *Чарыков Н.А., Литвак А.М., Михайлова М.П., Яковлев Ю.П.* // ФТП. 1997. Т. 31. № 4. С. 410–415.
- [6] *Mani H., Tournie E., Lazzari J.L.* et al. // J. of Crystal Growth. 1992. V. 121. P. 463–472.
- [7] *Fonash S.J.* Solar Cell Device Physics. New York: Academic Press, 1981. P. 53.
- [8] *Кузнецов В.В., Москвин П.П., Сорокин В.С.* Неравновесные явления при жидкостной гетероэпитаксии полупроводниковых твердых растворов. М.: Металлургия, 1991. 175 с.