

# Изопериодные структуры GaInPAsSb/InAs для приборов инфракрасной оптоэлектроники

© М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев\*, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин, В.В. Шустов, В.В. Кузнецов\*, Е.А. Когновицкая\*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

\* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, 197376 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 23 января 2002 г. Принята к печати 29 января 2002 г.)

Сообщается о получении пятикомпонентного твердого раствора  $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{P}_{0.05}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.87}$  с шириной запрещенной зоны 695 мэВ (77 К) и 640 мэВ (300 К) изопериодного с InAs. Показано, что в структуре InAs/ $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{P}_{0.05}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.87}$  реализуется гетеропереход II рода. Полученный твердый раствор был использован для создания прототипов светодиода и фотодиода с максимумом интенсивности излучения и фоточувствительности в области 1.9 мкм.

## 1. Введение

Многокомпонентные тройные (InAsSb, InGaAs) и четверные (InGaAsSb, InAsSbP) твердые растворы (ТР) широко используются для создания оптоэлектронных приборов в спектральной области 2–5 мкм. Существенно меньше внимания уделено исследованию пятикомпонентных ТР (например, GaInPAsSb [1–9]), хотя их бесспорным преимуществом является возможность независимого изменения трех параметров. Управление шириной запрещенной зоны, периодом решетки и коэффициентом термического расширения позволяет создавать гетероструктуры, у которых отсутствует рассогласование постоянных решеток при температуре выращивания и при температуре работы прибора, что приводит к уменьшению вероятности образования дефектов и, соответственно, улучшению люминесцентных характеристик и возрастанию времени работы прибора. Управление шириной запрещенной зоны, периодом решетки и показателем преломления, возможно, окажется ключевым моментом при создании лазеров, работающих при повышенных температурах.

Цель данной работы состояла в получении пятикомпонентного ТР GaInPAsSb с шириной запрещенной зоны 600–700 мэВ на подложке InAs и создании прототипов свето- и фотодиода с максимумом интенсивности излучения и фототовета вблизи 1.9 мкм при 300 К.

## 2. Методы прогнозирования, получения и исследования

Эффективное проектирование современных полупроводниковых гетероструктур на основе многокомпонентных твердых растворов является методологически сложным процессом. Продуктивность расчетов определяется корректностью применяемых моделей и адекватностью используемых параметров. В настоящей работе для про-

гнозирования технологического процесса использовали следующую методологию. Состав требуемого пятикомпонентного твердого раствора  $\text{Ga}_x\text{In}_y\text{AsSb}_z$  определяли методом линейной интерполяции периодов решеток бинарных компонентов с использованием данных [2].

Ширину запрещенной зоны пятикомпонентного твердого раствора GaInPAsSb интерполировали по ширине запрещенной зоны двух четырехкомпонентных систем GaPAsSb и InPAsSb с замещением компонентов по узлам металлической подрешетки с учетом нелинейного вклада от эффектов смешения [2].

Определение технологических параметров жидкостного гетероэпитаксиального процесса получения твердого раствора GaInPAsSb 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 [2–6]. Обоснование выбора недостоверных мольных избыточных энергий смешения (параметров взаимодействия) проводили следующим образом. Параметры взаимодействия между металлическими и металлоидными компонентами получены из анализа фазовых диаграмм соответствующих бинарных систем в соответствующем диапазоне температур и обоснованно считаются самосогласованными на основании общности применяемой термодинамической модели [3]. В то же время параметры взаимодействия в жидкой фазе между элементами отдельно для 3-й и отдельно для 5-й группы, таких как P–As, P–Sb, As–Sb, и частично компонентами твердой — GaP–GaSb и InP–InSb достоверно не определены. Кроме того, в системах, содержащих фосфор и сурьму, наблюдается значительное положительное отклонение от закона Рауля, что сказывается в первую очередь на величинах соответствующих избыточных мольных энергий смешения, а значит, и результатах расчета [3,6]. Ситуация усугубляется еще и тем, что в системах  $\text{A}^{\text{III}}\text{Sb}$  наблюдается весьма значительная ассоциация компонентов в жидкой фазе, что ограничивает применимость модели.

\* E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru

Состав жидкой фазы				Состав осажденного слоя (1 — расчет, 2 — эксперимент)			
$x_{\text{Ga}}^l \cdot 10^3$ , ат.доли	$x_{\text{P}}^l \cdot 10^3$ , ат.доли	$x_{\text{As}}^l \cdot 10^2$ , ат.доли	$x_{\text{Sb}}^l \cdot 10$ , ат.доли		$x$ , мол.доли	$y$ , мол.доли	$z$ , мол.доли
3.03	1.63	3.24	3.77	1	0.06	0.12	0.77
				2	0.08	0.08	0.81
				2	0.072	0.09	0.78
2.73	0.122	0.245	1.28	1	0.89	0.021	0.153
				2	0.92	0.012	0.165
				2	0.91	0.011	0.160

С целью адаптации используемой модели корректировку указанных параметров проводили по контрольным экспериментам для состава твердой фазы  $\text{Ga}_{0.06}\text{In}_{0.12}\text{P}_{0.12}\text{As}_{0.8}\text{Sb}_{0.1}$  (см. таблицу). Использование обоснованных значений избыточных мольных энергий смешения позволило рассчитать температуры и составы ликвидуса и солидуса в температурном диапазоне эпитаксиального процесса вдоль изопериода InAs по обе стороны бинального пространства. В таблице приведены используемые результаты расчетов в сопоставлении с последующими экспериментами.

Эпитаксию проводили по следующей методике. Подложки InAs ориентации  $\langle 111 \rangle$  толщиной 400 мкм перед проведением процесса подвергали химическому травлению в HCl в течение 1–2 с, затем промывали в дистиллированной воде и сушили в термостате при температуре 60°C.

При формировании жидкой фазы использовались: сурьма марки СУ-000, индий марки ИН-000, галлий ГЛ-000, арсенид индия ИМЭ-1 и нелегированный фосфид индия. Индий с целью удаления оксидной пленки травился в смеси  $\text{HNO}_3 : \text{HF}$  в соотношении 8 : 1 при комнатной температуре в течение 1–2 мин. Все материалы, кроме галлия, после промывки в дистиллированной воде сушились в термостате при температуре 60–70°C.

Компоненты шихты и подложки помещались в подвижную графитовую кассету. После продувки водородом кассета нагревалась до температуры 993 К и выдерживалась в течение 90 мин для гомогенизации расплава, после чего температура снижалась до 925–920 К, и жидкая фаза приводилась в контакт с подложкой на время 1–3 мин. Толщина полученных слоев изменялась от 2 до 10 мкм.

Составы исходной шихты выбирались таким образом, чтобы жидкая фаза при температуре эпитаксии была переохлажденной относительно температуры ликвидуса на 5–9 К.

С целью получения  $p$ – $n$ -гетероперехода твердый раствор легировался цинком (акцептор) или теллуrom (донор). Теллур в составе навески сплава Te–In помещали непосредственно в расплав перед проведением эпитаксии. Легирование Zn осуществляли из газовой фазы путем помещения сплава In–Zn в зону реактора

с заданной температурой. Концентрация Zn в расплаве определялась парциальным давлением паров Zn, которое задавали температурой зоны-источника. Концентрации носителей заряда в полученных слоях составляли  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

В таблице (2 — эксперимент) приведены составы твердых растворов, измеренные на рентгеновском микроанализаторе CAMEBAX, а также составы растворов-расплавов, из которых они были получены. Там же (1 — расчет) представлены концентрации компонентов в жидких фазах, равновесных данным твердым растворам, рассчитанные по уравнениям фазовой диаграммы.

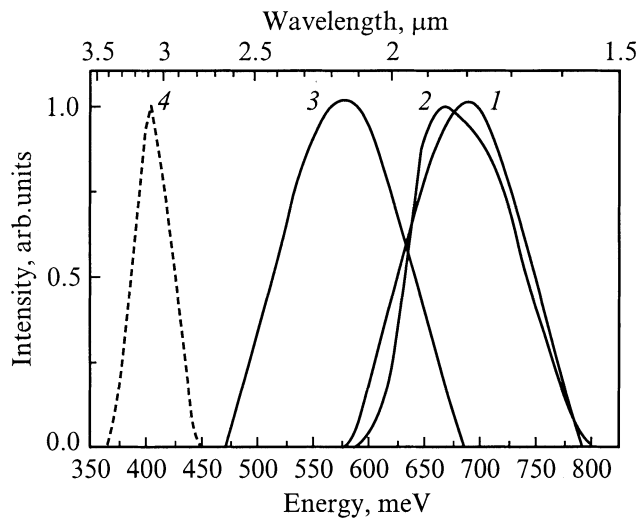
Методами исследования эпитаксиальных структур служили фото-, электролюминесценция (ФЛ и ЭЛ) и спектральные измерения фоточувствительности (ФЧ). Измерения проводились при температурах 77 (ФЛ и ЭЛ) и 296 К (ЭЛ, ФЧ). ЭЛ и ФЧ измерялись на чипах размером  $0.5 \times 0.5 \text{ мм}^2$  с точечным контактом к эпитаксиальному слою и сплошным — к подложке InAs.

### 3. Результаты и их обсуждение

#### 3.1. Фотолюминесценция твердого раствора $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{P}_{0.05}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.87}$

На рис. 1 представлены спектры ФЛ структуры InAs/GaInPAsSb, в которой TP преднамеренно не легировался (кривая 1), легировался цинком (кривая 2) и теллуrom (кривая 3). Спектр содержит линию ФЛ TP с энергией максимума  $h\nu = 580\text{--}690 \text{ мэВ}$  и линию ФЛ подложки  $n$ -InAs с  $h\nu = 400 \text{ мэВ}$  (кривая 4).

TP  $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{P}_{0.05}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.87}$  по составу и ширине запрещенной зоны близок к бинарному GaSb и четырехкомпонентному TP  $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}_{0.22}\text{Sb}_{0.78}$  [11,12]. Последние обладают  $p$ -типом проводимости благодаря структурным природным дефектам типа  $V_{\text{Ga}}$  или  $V_{\text{Ga}}\text{Ga}_{\text{Sb}}$ , которые создают в запрещенной зоне двухзарядные акцепторные уровни с энергией ионизации 30 и 90 мэВ. В нелегированных GaSb и  $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}_{0.22}\text{Sb}_{0.78}$  рекомбинация происходит именно через эти акцепторные уровни, поскольку все мелкие уровни, как донорные, так и акцепторные, ионизованы уже при 77 К [13]. Мы полагаем, что и в пятикомпонентном преднамеренно



**Рис. 1.** Спектры ФЛ ТР, преднамеренно не легированного (1), легированного цинком (2) и легированного теллурием (3) при 77 К; спектр ФЛ подложки  $n$ -InAs (4).

нелегированном ТР ФЛ ( $h\nu = 690$  мэВ) обусловлена переходами „зона проводимости–двойной акцептор“, что подтверждается значительной полушириной спектра ( $\Delta h\nu = 100$  мэВ).

Легирование ТР акцепторной примесью Zn приводит к рекомбинации на более глубокий акцепторный уровень и смещению спектральной полосы в сторону меньших энергий на  $\sim 20$  мэВ при той же полуширине спектра.

Легирование ТР донорной примесью Te приводит к компенсации  $p$ -типа проводимости и появлению слабо выраженной электронной проводимости. Электроны с донорных уровней заполняют уровни мелких акцепторов, что приводит к рекомбинации через более глубокие акцепторные состояния (например, излучательный переход зона проводимости–глубокий акцепторный уровень с энергией активации  $\sim 122$  мэВ, связанный с комплексами  $V_{Ga}Te$ , наблюдался в четверном твердом растворе  $Ga_{0.8}In_{0.2}As_{0.2}Sb_{0.8}$  [12], близком по ширине запрещенной зоны к исследуемому материалу) [12]. В нашем случае максимум ФЛ ТР легированного Te сдвигается в сторону меньших энергий ( $h\nu = 580$  мэВ) по сравнению с преднамеренно не легированным ТР на 110 мэВ, что весьма близко к энергии ионизации комплекса  $V_{Ga}Te$   $Ga_{0.8}In_{0.2}As_{0.22}Sb_{0.78}$ . Ширина запрещенной зоны ТР  $Ga_{0.92}In_{0.08}P_{0.05}As_{0.08}Sb_{0.87}$  может быть оценена как 695 мэВ (77 К).

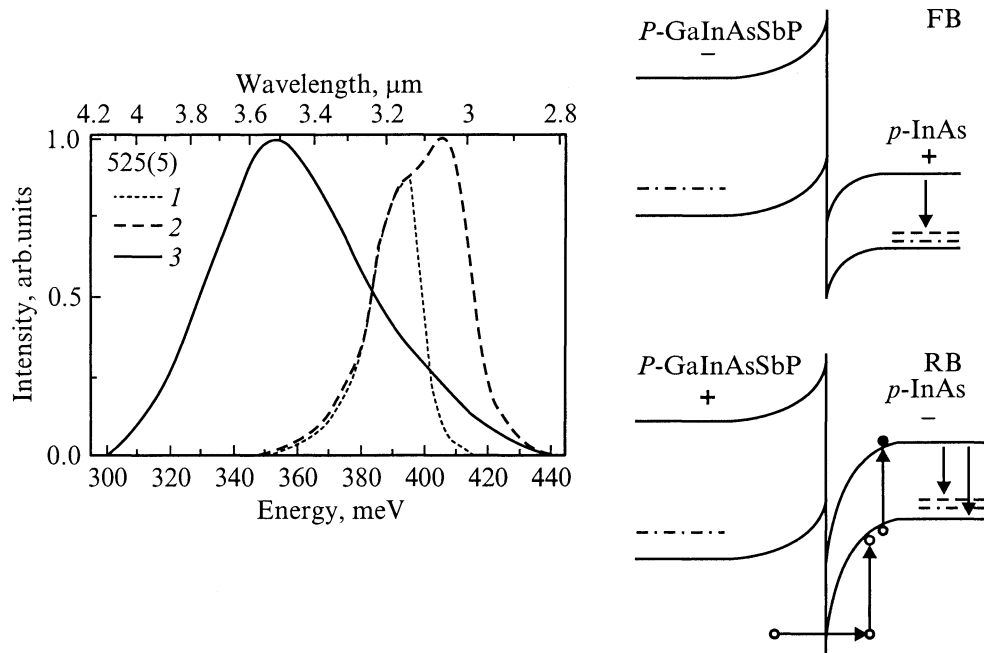
### 3.2. Электролюминесценция гетероструктур InAs/GaInPAsSb

Для интерпретации экспериментальных данных нами был принят за основу механизм люминесценции в разьединенной гетероструктуре II рода. Исследуемый ТР близок по составу и ширине запрещенной зоны к бинарному соединению GaSb, которое образует с InAs

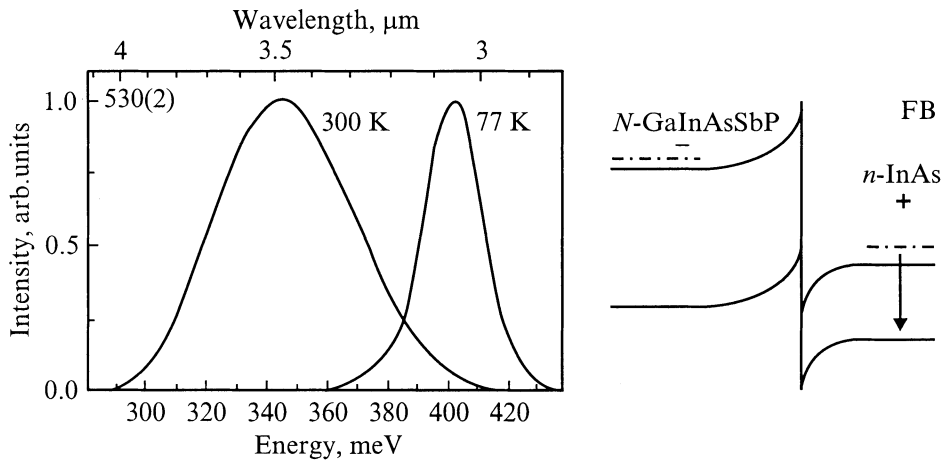
разьединенный гетеропереход II рода. В этом случае потолок валентной зоны широкозонного полупроводника оказывается выше дна зоны проводимости узкозонного. По обе стороны гетерограницы образуются глубокие квантовые колодцы для электронов и дырок, и их волновые функции сильно перекрыты [13]. Прикладывая к гетерогранице внешнее электрическое поле, мы можем изменять относительное положение энергетических зон вблизи гетерограницы и заселение носителями квантовых колодцев. При определенных условиях это может привести к высокой вероятности непрямой излучательной рекомбинации за счет туннельных переходов через гетерограницу. Благодаря малой эффективной массе носителей заряда в исследуемой системе по сравнению, например, с GaAs/GaAlAs требования к резкости гетерограницы для образования квантовых ям менее жесткие, и интерфейсная излучательная рекомбинация наблюдается в структурах с рассогласованием периодов решеток  $\Delta a/a \leq 10^{-3}$ .

Для исследования ЭЛ были использованы как гетеропереходы подложка–эпитаксиальный слой, так и структуры с гомо- $p$ - $n$ -переходами в толще самого твердого раствора:  $n$ -InAs/ $P$ -GaInPAsSb/ $N$ -GaInPAsSb. Вольт-амперные характеристики структур  $p$ - $P$ ,  $n$ - $N$  и  $n$ - $P$  слабо изменялись в интервале температур 77–300 К, что свидетельствует о туннельном протекании тока. Изотипные структуры  $p$ - $P$  и  $n$ - $N$  имели выпрямляющие характеристики и обнаруживали ЭЛ в интервале 77–300 К, в то время как структура  $n$ - $P$  характеризовалась отсутствием выпрямления и сигнала ЭЛ. Это свидетельствует о том, что в структуре InAs/GaInPAsSb реализуется разьединенный гетеропереход II рода [10].

**3.2.1. ЭЛ изотипного  $P$ - $p$ -гетероперехода.** На рис. 2 представлены спектры ЭЛ при прямом („+“ на  $p$ -InAs) и обратном („-“ на  $p$ -InAs) смещениях при 77 и 300 К. Вид спектров при обеих полярностях приложенного смещения подобен, положения полос практически совпадают. При прямом смещении наблюдается одна полоса с максимумом 395 мэВ (77 К) (пунктирная линия), при обратном — две близкие полосы 405 и 395 мэВ (штрихпунктирная линия). При 300 К наблюдается одна широкая ( $\Delta h\nu = 48$  мэВ) полоса с максимумом 352 мэВ (простая линия). Совпадение спектров при разных полярностях свидетельствует о том, что рекомбинация носителей происходит в одной и той же области гетероструктуры. Появление неравновесных электронов в  $p$ - $P$ -переходе можно объяснить следующей моделью [14]: при нулевом смещении в квантовом колодце со стороны InAs вблизи гетерограницы имеется двумерный электронный газ благодаря переходу электронов из валентной зоны широкозонного материала в зону проводимости InAs. При приложении отрицательного смещения энергетические зоны на гетерогранице сдвигаются так, что энергетические зоны InAs поднимаются вверх, а твердого раствора — вниз.



**Рис. 2.** Спектры ЭЛ изотипного *p-p*-гетероперехода при прямом (FB: „плюс“ на *p*-InAs, кривая 1) и обратном (RB: „минус“ на *p*-InAs, кривая 2) смещении при 77 и 300 К (RB, кривая 3). На вставке — энергетические диаграммы гетероперехода при прямом и обратном смещениях.



**Рис. 3.** Спектры ЭЛ *N-n*-структуры, смещенной в прямом направлении (FB: „плюс“ на *n*-InAs) при 77 и 300 К. На вставке — энергетическая диаграмма гетероперехода.

Объемный заряд в основном локализуется в области узкозонного материала, приводя к сильному изгибу зон вблизи гетерограницы и отсутствию свободных дырок вблизи интерфейса, которые могли бы рекомбинировать с локализованными электронами в квантовом колодце. Приложение отрицательного смещения приводит к эффективному туннелированию дырок из валентной зоны твердого раствора в валентную зону InAs. Протуннелировавшая дырка теряет энергию за счет оже-процесса, который сопровождается возбуждением неравновесного электрона из валентной зоны InAs в зону проводимости и переходом дырки к потолку валентной зоны. Электрон

в зоне проводимости излучательно рекомбинирует в области плоских зон InAs с дырками на акцепторном уровне (395 мэВ) или в валентной зоне (405 мэВ). При 300 К наблюдается широкий пик при 352 мэВ, соответствующий переходу зона-зона, причем температурное изменение энергии максимума хорошо соответствует коэффициенту температурного изменения ширины запрещенной зоны InAs ( $3 \cdot 10^{-4}$  эВ/К).

При приложении прямого смещения, превышающего контактную разность потенциалов, может происходить туннелирование электронов из валентной зоны твердого раствора в зону проводимости InAs и их рекомбинация

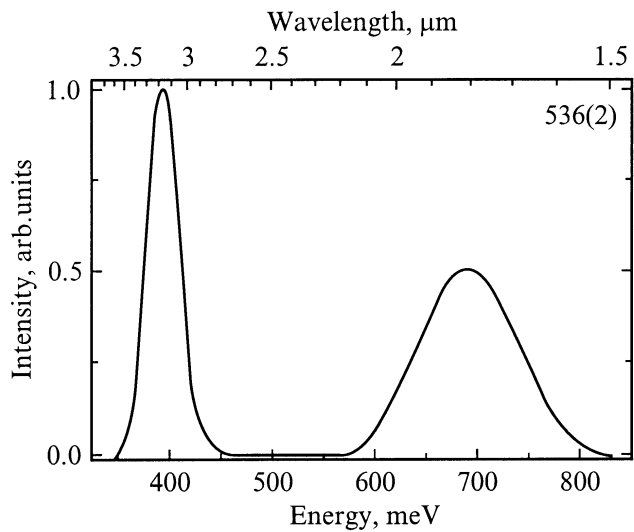


Рис. 4. Спектры ЭЛ структуры  $n-N-P$  (77 К).

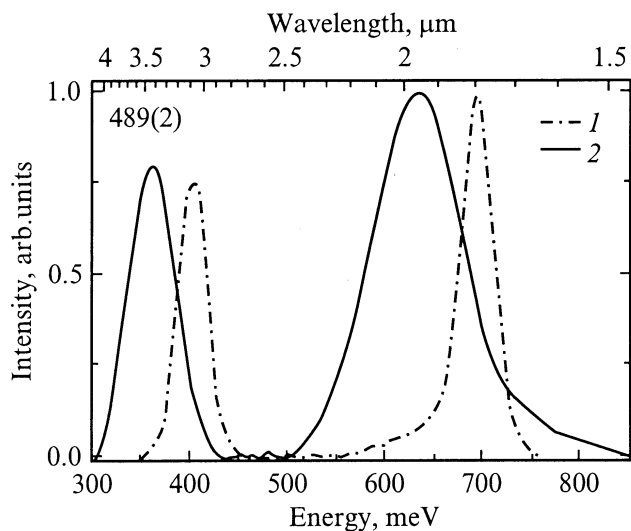


Рис. 5. Спектры ЭЛ структуры  $n-P-N$  (1 — 77 К, 2 — 300 К).

на акцепторный уровень в объеме (395 мэВ). Энергетические диаграммы переходов представлены на вставке к рис. 2.

**3.2.2. ЭЛ изотипного  $N-n$ -гетероперехода.** Рассмотрим изотипную структуру  $N-n$ , которая в случае разьединенного перехода также демонстрирует выпрямляющие свойства. Спектры ЭЛ такой структуры, смещенной в прямом направлении при 77 и 300 К, представлены на рис. 3. Наблюдается одна узкая полоса ( $\Delta h\nu = 20$  мэВ) с максимумом спектра при 402 мэВ (77 К) и 344 мэВ (300 К), соответствующая межзонным переходам в  $n$ -InAs.

$P-n$ -структура демонстрирует „металлическое“ поведение в широком интервале температур и токов. Таким образом, ВАХ и ЭЛ свойства структуры InAs/GaInPAsSb свидетельствуют от том, что это разьединенный гетеропереход II рода.

**3.2.3. ЭЛ гомо- $P-N$ -перехода в толще ТР.** Рассмотрим ЭЛ гомо- $P-N$ -перехода в толще эпитаксиального слоя ТР.  $P-N$ -переход создавался введением примеси Те в преднамеренно не легированный слой  $p$ -типа ТР. На рис. 4 и 5 представлены спектры ЭЛ структур  $n-N-P$  (77 К) и  $n-P-N$  (77, 300 К) соответственно. В обоих случаях спектры состоят из двух полос: коротковолновой (685–695 мэВ,  $\Delta h\nu = 40$  мэВ, 77 К), обусловленной излучательной рекомбинацией в ТР, и длинноволновой (400 мэВ,  $\Delta h\nu = 35$  мэВ, 77 К), обусловленной излучательной рекомбинацией в подложке. При 300 К максимумы излучения находятся на 640 и 360 мэВ. Температурный сдвиг максимумов соответствует температурному изменению ширины запрещенной зоны InAs:  $3 \cdot 10^{-4}$  эВ/К, что свидетельствует о высоком кристаллическом совершенстве эпитаксиального слоя. Предполагается, что излучательной областью в гомо- $p-n$ -переходе ТР, как и в InAs, является  $p$ -область, так как диффузионная длина электронов много больше диффузионной длины дырок. Подтверждением этого является совпадение спектров ФЛ  $p$ -материала ТР и спектров ЭЛ  $P-N$ -перехода.

На основе гомо- $p-n$ -перехода в ТР были изготовлены СД с длиной волны в максимуме излучения 1.9 мкм и полушириной 0.3 мкм.

**3.2.4. Фотоответ гомо- $P-N$ -перехода в толще ТР.** На рис. 6 представлены спектры фоточувствительности (ФЧ) гомо- $P-N$ -перехода в толще ТР при 300 К. Максимум ФЧ совпадает с максимумом ЭЛ (300 К) и соответствует  $\lambda = 1.94$  мкм. Форма спектральной кривой зависит от глубины залегания  $P-N$ -перехода

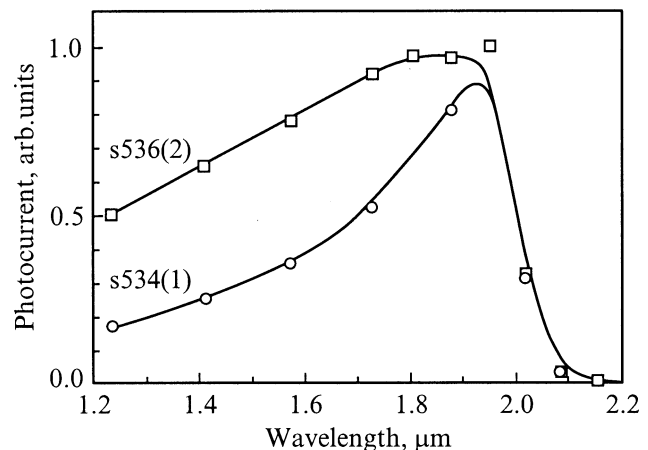


Рис. 6. Спектры фототока структуры  $n-P-N$  (300 К).

по отношению к освещаемой поверхности и становится более пологой в коротковолновой области по мере приближения  $P-N$ -перехода к поверхности (структура  $s536(2)$ ).

#### 4. Заключение

Впервые получен пятикомпонентный твердый раствор  $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{P}_{0.05}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.87}$  с шириной запрещенной зоны 695 мэВ (77 К) и 640 мэВ (300 К), изопериодный с InAs. Показано, что в структуре InAs/ $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{P}_{0.05}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.87}$  реализуется гетеропереход II рода. Полученный ТР был использован для создания прототипов светодиода и фотодиода с максимумом интенсивности излучения и фоточувствительности в области 1.9 мкм.

Авторы благодарят Р.Н. Кютта за проведение рентгенодифракционных измерений представленных в работе образцов.

Работа поддержана корпорацией Schlumberger Oilfield Services и программой „Оптика наноструктур“. Работа выполнена при административной поддержке Фонда гражданских исследований и развития США для стран СНГ (CRDF).

#### Список литературы

- [1] Н.А. Чарыков, А.М. Литвак, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **31**, 410 (1997).
- [2] В.В. Кузнецов, Э.Р. Рубцов, В.С. Сорокин. ЖФХ, **71**, 415 (1997).
- [3] В.В. Кузнецов, П.П. Москвин, В.С. Сорокин. *Неравновесные явления при жидкостной гетероэпитаксии полупроводниковых твердых растворов* (М., Металлургия, 1991).
- [4] В.В. Кузнецов, Э.Р. Рубцов. Изв. вузов. Матер. электрон. техн., **2**, 48 (1998).
- [5] В.В. Кузнецов, Э.Р. Рубцов, О.А. Лебедев. Неорг. матер., **34** (5), 525 (1998).
- [6] В.В. Кузнецов, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин, Э.Р. Рубцов. Кристаллография, **37**, 998 (1992).
- [7] V.L. Vasil'ev, M.V. Baidakova, E.A. Kognovitskaya, V.I. Kuchinskii, L.P. Nikitina, V.M. Smirnov. *Abstracts 3rd Int. Conf. Mid-IR Optoelect. Materials and Devices, Sept., 1999* (Aachen, Germany, 1999) p. 9.
- [8] V.L. Vasil'ev, S.N. Losev, V.M. Smirnov, V.V. Kuznetsov, E.A. Kognovitskaya, E.R. Rubtsov. *Proc. 5th Conf. on Intermolecular Interaction in Matter* (Lublin, Poland, 1999) p. 96.
- [9] V.L. Vasil'ev, D. Akhmedov, G.S. Gaxis, V.I. Kuchinskii, V.M. Smirnov, D.N. Tretyakov. *Abstracts 4th Int. Conf. on Mid-IR Optoelect. Materials and Devices, April 1-4* (Montpellier, France, 2001) p. 97.
- [10] М.П. Михайлова, Г.Г. Зегря, К.Д. Моисеев, Н.И. Тимченко, Ю.П. Яковлев. ФТП, **29**, 687 (1995).
- [11] M.P. Mikhailova, K.D. Moiseev, Y.A. Berezovets, R.V. Parfeniev, N.L. Bazhenov, V.A. Smirnov, Yu.P. Yakovlev. IEEE Proc. Optoelectron., **145**, 269 (1998).

- [12] К.Д. Моисеев, А.А. Торопов, Я.В. Терентьев, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. ФТП, **34**, 1432 (2000).
- [13] M.P. Mikhailova, A.N. Titkov. *Semicond.Sci. Technol.*, **9**, 1279 (1994).
- [14] Н.Л. Баженов, Г.Г. Зегря, В.И. Иванов-Омский, М.П. Михайлова, М.Ю. Михайлов, К.Д. Моисеев, В.А. Смирнов, Ю.П. Яковлев. ФТП, **31**, 1216 (1997).

Редактор Л.В. Беляков

#### GaInPAsSb/InAs isoperiodic structures for infrared optoelectronic devices

M. Aydaraliev, N.V. Zotova, S.A. Karandashov, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', G.N. Talalakin, V.V. Kuznetsov\*, E.A. Kognovitskaya\*

Ioffe Physico-Technical Institute  
Russian Academy of Sciences

194021 St.Petersburg, Russia

\* St.Petersburg State Electrotechnical University,  
197376 St.Petersburg, Russia

**Abstract** We report on a quinary solid solution  $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{P}_{0.05}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.87}$  with band gap energy of 695 meV at 77 K (640 meV, 296 K) that is isoperiodic to InAs. It has been shown that in InAs/ $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{P}_{0.05}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.87}$  structure II type heterojunction is realized. The solid solution has been used for creation of the LED and photodiode prototypes with a maximum of the radiation intensity and photosensitivity of 1.9  $\mu\text{m}$ .