

# Интерфейсная электролюминесценция в изотипном гетеропереходе II типа InAs/InAsSbP при комнатной температуре

© М.М. Григорьев, Э.В. Иванов, К.Д. Моисеев<sup>†</sup>

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

(Получена 11 апреля 2011 г. Принята к печати 18 апреля 2011 г.)

Впервые продемонстрирована интерфейсная люминесценция на одиночной гетерогранице II типа в системе соединений InAs/InAsSbP при комнатной температуре. Экспериментально подтверждено, что одиночная гетероструктура InAs/InAsSbP является ступенчатым гетеропереходом II типа. В гетероструктуре n-InAs/n-InAsSbP образование электронного канала на гетерогранице на стороне n-InAs не приводило к возникновению излучательной интерфейсной люминесценции, тогда как гетероструктура p-InAs/p-InAsSbP при обратном смещении демонстрировала интерфейсную люминесценцию, обусловленную излучательными переходами дырок с заполненных поверхностных состояний, локализованных на гетерогранице. Обнаружение интенсивной интерфейсной люминесценции, соизмеримой по интенсивности с объемной, открывает новые возможности в создании многоцветных светоизлучающих диодов и интегральных оптоэлектронных матриц для среднего ИК-диапазона 3–5 мкм.

## 1. Введение

Интерес к созданию и исследованию высокоэффективных длинноволновых светодиодов на основе соединений  $A^{III}B^V$  для среднего ИК спектрального диапазона  $\lambda = 3\text{--}4$  мкм остается неизменно высоким последние 30 лет. Эти приборы имеют много важных применений, таких как дистанционный анализ газообразного загрязнения атмосферы, контроль высоких технологий в промышленности при переработке углеродных энергоносителей, медицинская диагностика [1–4]. При этом для большинства применений важно, чтобы светодиодные линейки работали при комнатной температуре. Имеется ряд фундаментальных причин, лимитирующих работу длинноволновых излучательных приборов на основе III–V соединений при высоких температурах. Одним из факторов, оказывающих наиболее сильное влияние на излучательную рекомбинацию в объемных узкозонных полупроводниках типа InAs, GaSb и их твердых растворах с „резонансной“ структурой энергетических зон, в которых ширина запрещенной зоны  $E_g$  по энергии близка к величине спин-орбитального расщепления валентной зоны  $\Delta_{SO}$ , являются процессы оже-рекомбинации [5]. Важным фактором, который также следует учитывать, является утечка носителей из активной области светодиода на основе соединений, обогащенных арсенидом индия, вследствие недостаточной высоты потенциальных барьеров на гетерограницах с ограничительными слоями InAsSbP. Гетеропереходы II типа представляют большой интерес для исследования фундаментальных физических свойств полупроводников и перспективны для создания приборов оптоэлектроники, так как в гетероструктурах II типа оже-процессы могут быть существенно подавлены, а управление длиной волны излучения прибора возможно не только посредством изменения ширины запрещенной зоны, но и с помощью задания величины

разрывов зон на гетерогранице II типа [6–8]. В данной работе мы сообщаем об особенностях электролюминесцентных характеристик гетероструктур II типа p-InAs/p-InAsSbP.

## 2. Технология изготовления структур и методика экспериментов

Одиночные гетероструктуры InAs/InAsSbP были получены методом жидкофазной эпитаксии путем наращивания слоев четверного твердого раствора  $\text{InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}$  на подложке InAs, ориентированной вдоль кристаллографической оси (100). Эпитаксиальный рост производился при температуре  $600^\circ\text{C}$  в стандартном графитовом контейнере пенального типа, помещенном в горизонтальный кварцевый реактор, в атмосфере водорода. Скорость охлаждения системы была фиксированной для всех образцов и составляла 0.3 град/мин. Для приготовления растворов-расплавов были использованы индий и сурьма в элементарном виде с чистотой 99.999, монокристаллический нелегированный арсенид индия ( $n = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) как источник атомов мышьяка и монокристаллический нелегированный фосфид индия ( $n = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) как источник атомов фосфора. Эпитаксиальные слои InAsSbP демонстрировали гладкую зеркальную поверхность без присутствия видимых дефектов. Толщина слоя была равна 1.6 мкм. При изучении скола гетероструктуры InAs/InAsSbP вдоль направления роста эпитаксиального слоя наблюдалась резкая металлургическая граница раздела между двумя материалами. Относительное рассогласование постоянных кристаллических решеток между подложкой InAs и эпитаксиальным слоем  $\text{InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}$  не превышало величины  $(a_{\text{InAsSbP}} - a_{\text{InAs}}) / a_{\text{InAs}} < 10^{-4}$ .

Преднамеренно нелегированные ( $n^0$ ) слои четверного твердого раствора InAsSbP демонстрировали электронный тип проводимости, тогда для получения слоя

<sup>†</sup> E-mail: mkd@iropt2.ioffe.rssi.ru

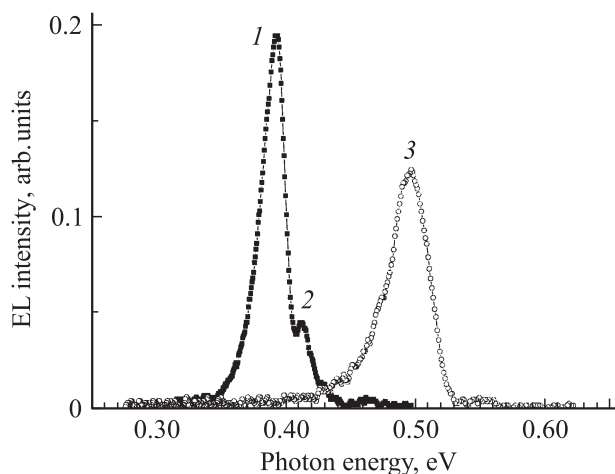
p-InAsSbP в качестве акцепторной примеси был использован цинк, который вводился в раствор-расплав в элементарном виде. Подложка p-InAs была также легирована примесью цинка до концентрации дырок  $p = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 300 \text{ К}$ . Для исследования были получены изотипные гетероструктуры: n-InAs/n-InAsSbP и p-InAs/p-InAsSbP.

Для изучения электрических и люминесцентных характеристик выращенных образцов были изготовлены меза-диодные структуры с помощью стандартного метода фотолитографического совмещения и с применением мокрого травления. Диаметр мезы составлял 500 мкм, размер точечного контакта 50 мкм. Исследуемые меза-диоды были смонтированы на держателях ТО-18.

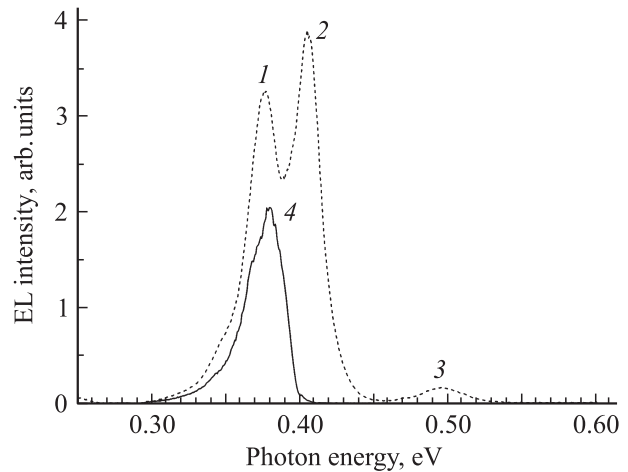
Возбуждение электролюминесценции (ЭЛ) осуществлялось прямоугольными импульсами тока с коэффициентом заполнения 50% и частотой повторения 610 Гц. Спектры ЭЛ регистрировались с помощью автоматизированной установки на основе монохроматора МДР-2 с дифракционной решеткой 150 штр/мм. В качестве детектора инфракрасного излучения использовался фотодиод на основе InSb, охлаждаемый до температуры жидкого азота. Электрический сигнал преобразовывался по схеме синхронного детектирования с помощью селективного усилителя SR-510.

### 3. Особенности низкотемпературной электролюминесценции в изотипном гетеропереходе InAs/InAsSbP

На рис. 1 приведены спектры ЭЛ для двух гетероструктур, образованных соединениями с электронным типом проводимости:  $n^0\text{-InAs}/n^0\text{-InAsSbP}$  и  $n^+\text{-InAs}/n^0\text{-InAsSbP}$ . Эпитаксиальные слои нелегирован-



**Рис. 1.** Спектры электролюминесценции для гетероструктуры  $n^0\text{-InAs}/n^0\text{-InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}$ , полученные при прямом смещении (■), и для гетероструктуры  $n^+\text{-InAs}/n^0\text{-InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}$ , полученные при обратном смещении (○) при температуре 77 К.



**Рис. 2.** Спектры электролюминесценции p-InAs/p-InAs<sub>0.66</sub>Sb<sub>0.11</sub>P<sub>0.23</sub> гетероструктуры для случая прямого (пунктирная линия) и обратного (сплошная линия) смещения при температуре 77 К.

ного твердого раствора InAsSbP были выращены на нелегированной подложке  $n^0\text{-InAs}$  и подложке  $n^+\text{-InAs}$ , сильнолегированной серой, с концентрацией электронов порядка  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Как видно из рисунка, для „нелегированной“ гетероструктуры  $n^0\text{-InAs}/n^0\text{-InAsSbP}$  наблюдались две полосы излучения, которые соответствовали излучательным переходам зона-зона ( $h\nu_2^{77} = 0.41 \text{ эВ}$ ) и валентная зона-акцепторное состояние природного структурного дефекта ( $h\nu_1^{77} = 0.39 \text{ эВ}$ ) в n-InAs [9]. Использование сильнолегированной подложки в гетероструктуре  $n^+\text{-InAs}/n^0\text{-InAsSbP}$  позволило подавить люминесценцию в InAs, а все излучательные рекомбинационные переходы происходили в четверном твердом растворе InAsSbP (полоса излучения с энергией фотона в максимуме  $h\nu_3^{77} = 0.496 \text{ эВ}$ ). Поскольку слой четверного твердого раствора псевдоморфен к подложке и рассогласование постоянных кристаллических решеток между подложкой и эпитаксиальным слоем не превышало 0.01%, тогда наблюдаемая в эксперименте полоса излучения  $h\nu_3^{77}$  может быть приписана ширине запрещенной зоны твердого раствора InAs<sub>0.66</sub>Sb<sub>0.11</sub>P<sub>0.23</sub> [10]. Следует отметить, что для n-n-типа гетероструктуры форма спектра не изменялась при смене полярности приложенного внешнего смещения.

Спектры люминесценции для изотипной гетероструктуры p-InAs/p-InAs<sub>0.16</sub>Sb<sub>0.13</sub>P<sub>0.23</sub>, образованной соединениями с дырочным типом проводимости, демонстрировали отличия по сравнению со структурой n-InAs/n-InAs<sub>0.16</sub>Sb<sub>0.13</sub>P<sub>0.23</sub>. Отличия, обнаруженные при измерении ЭЛ при прямом смещении, были сравнительно небольшие, тогда как при обратном смещении они ярко выражены (рис. 2). Для p-p-гетероструктуры термин „прямое смещение“ означает, что „+“ потенциал приложен к подложке p-InAs, а „-“ потенциал — к эпитаксиальному слою p-InAsSbP. Соответственно под

„обратным смещением“ понимается противоположная ситуация: „–“ потенциал подан на подложку p-InAs, а „+“ потенциал — приложен к слою p-InAsSbP. При прямом смещении (штриховая кривая, рис. 2) спектр ЭЛ содержит три полосы излучения, максимумам которых соответствуют следующие значения энергии фотонов:  $h\nu_1^{77} = 0.379$  эВ,  $h\nu_2^{77} = 0.408$  эВ и  $h\nu_3^{77} = 0.496$  эВ. Пики  $h\nu_1^{77}$  и  $h\nu_2^{77}$  обусловлены излучательными переходами в p-InAs, при этом можно оценить энергию активации акцепторной примеси цинка в арсениде индия (разница в положениях максимумов данных полос составляет  $(h\nu_2^{77} - h\nu_1^{77}) = 29$  мэВ). Эта величина хорошо согласуется со значениями, полученными другими авторами [11]. Следует отметить перераспределение в интенсивности между полосами по сравнению со спектром для n–p-гетероструктуры: полоса  $h\nu_2^{77}$ , отвечающая межзонным переходам, была более интенсивна, чем примесная полоса  $h\nu_1^{77}$ . Появление третьей полосы в спектре ЭЛ для p–p-гетероструктуры связано с излучательными межзонными переходами в четверном твердом растворе.

При приложении обратного смещения (рис. 2, сплошная кривая) в спектре ЭЛ наблюдалась только одна полоса излучения с энергией фотона в максимуме  $h\nu_4^{77} = 0.38$  эВ. Отметим специфическую форму спектра (полоса излучения асимметрична, с резким высокоэнергетическим краем) и спектральное положение максимума полосы (он располагается достаточно близко к положению максимума для примесной полосы при прямом смещении).

#### 4. Интерфейсная люминесценция в изотипном гетеропереходе p-InAs/p-InAs<sub>0.66</sub>Sb<sub>0.11</sub>P<sub>0.23</sub> при комнатной температуре

При повышении температуры эксперимента до комнатной и выше в одиночных изотипных гетероструктурах n-InAs/n-InAsSbP с электронным типом проводимости электролюминесценция не наблюдалась ни при прямом, ни при обратном смещении, тогда как гетероструктура p-InAs/p-InAsSbP с дырочным типом проводимости продемонстрировала переключение между каналами излучательной рекомбинации в зависимости от полярности приложенного внешнего смещения (рис. 3). При прямом смещении спектр ЭЛ для гетероструктуры p-InAs/p-InAs<sub>0.16</sub>Sb<sub>0.13</sub>P<sub>0.23</sub> содержал одну ярко выраженную полосу излучения, максимум которой находился в окрестности энергий фотона  $h\nu_2^{300} = 0.355$  эВ. Данная полоса соответствует межзонным излучательным переходам в объеме арсенида индия. Для случая обратного внешнего смещения спектр ЭЛ уже содержит две полосы излучения: более интенсивную с энергией фотона в максимуме  $h\nu_1^{300} = 0.318$  эВ, что существенно меньше, чем ширина запрещенной зоны арсенида индия, и достаточно слабо выраженную  $h\nu_2^{300} = 0.355$  эВ. Разница в энергии между полосами составляет 37 мэВ, что превышает значение

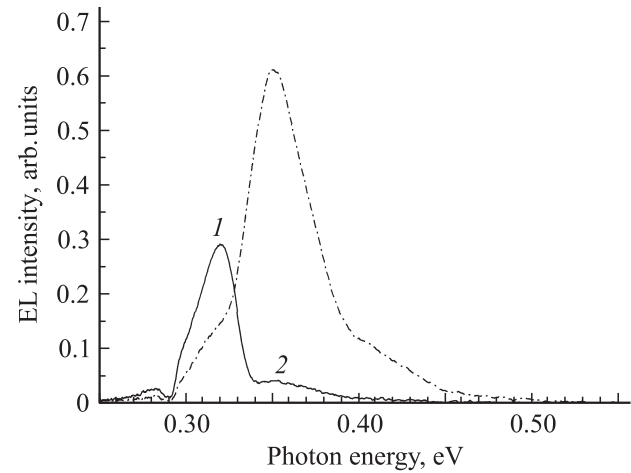


Рис. 3. Спектры электролюминесценции p-InAs/p-InAs<sub>0.66</sub>Sb<sub>0.11</sub>P<sub>0.23</sub> гетероструктуры для случая прямого (пунктирная линия) и обратного (сплошная линия) смещения при температуре 300 К.

энергии активации для примесных уровней, создаваемых цинком в арсениде индия. Кроме того, ширина полосы ЭЛ на полувысоте интенсивности при прямом смещении равна 44 мэВ, тогда как в случае обратного смещения она составляет всего 26 мэВ, что указывает на излучательные рекомбинационные переходы с локализованных состояний. Мы полагаем, что локализация носителей может происходить вблизи гетерограницы в исследуемой гетероструктуре [12,13].

Представленные в данной работе одиночные гетероструктуры являются гетеропереходами II типа (рис. 4, а). При построении зонной энергетической диаграммы гетероперехода InAs/InAs<sub>0.66</sub>Sb<sub>0.11</sub>P<sub>0.23</sub> были сделаны предварительные оценки величин разрывов энергетических зон на гетерогранице. Поскольку четверной твердый раствор InAsSbP может быть представлен как комбинация трех бинарных соединений [14], для оценки значения электронного сродства ( $\chi$ ) воспользуемся линейным приближением:

$$\chi_{\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_y\text{P}_x} = \chi_{\text{InAs}} \times (1 - x - y) + \chi_{\text{InSb}} \times y + \chi_{\text{InP}} \times x, \quad (1)$$

где  $\chi_{ij}$  — значения электронного сродства для соответствующих бинарных соединений. Будем также считать, что каждый из параметров  $\chi_{ij}$  соответствует энергетическому положению дна зоны проводимости

Значения ширины запрещенной зоны ( $E_g$ ) и электронного сродства ( $\chi$ ) для бинарных соединений [11]

Бинарное соединение	$E_g$ , eV (77 K)	$E_g$ , eV (300 K)	$\chi$ , eV
InAs	0.408	0.355	–4.9
InSb	0.215	0.18	–4.59
InP	1.414	1.34	–4.38

сти соответствующего бинарного соединения, например, для арсенида индия  $\chi_{\text{InAs}} = E_{C \text{ InAs}} = -4.9$  эВ. Значения электронного сродства для бинарных соединений при комнатной температуре также приведены в таблице. В результате с помощью выражения (1) находим, что  $\chi_{\text{InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}} = -4.765$  эВ.

Ширина запрещенной зоны твердого раствора  $\text{InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}$  может быть рассчитана с помощью следующей формулы [15]:

$$E_{g \text{ InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_y\text{P}_x} = E_{g \text{ InAs}}(1-x-y) + E_{g \text{ InSb}}y + E_{g \text{ InP}}x - xy C_{\text{InSbP}} - x(1-x-y)C_{\text{InAsP}} - y(1-x-y)C_{\text{InAsSb}}, \quad (2)$$

где  $E_{g(ij)}$  — значения ширины запрещенной зоны для соответствующих бинарных соединений (см. таблицу), а  $C_{ijk}$  — параметры прогиба для тройных соединений:  $C_{\text{InAsSb}} = -0.61$  эВ,  $C_{\text{InPAs}} = -0.101$  эВ,  $C_{\text{InPSb}} = -2.02$  эВ [10]. Используя указанные параметры, а также значения состава твердого раствора ( $x$  и  $y$ ), получаем  $E_{g(\text{InAsSbP})}^{77} = 0.496$  эВ и  $E_{g(\text{InAsSbP})}^{300} = 0.438$  эВ. Мы наблюдаем хорошее согласие между расчетной величиной и экспериментальными данными для  $T = 77$  К.

Далее были рассчитаны следующие основные параметры гетероперехода  $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}$  при комнатной температуре: разрыв в зоне проводимости на гетерогранице

$$\Delta E_C = \chi_{\text{InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}} - \chi_{\text{InAs}} = 0.135 \text{ эВ}, \quad (3)$$

и разрыв в валентной зоне на гетерогранице

$$\Delta E_V = \Delta E_C - \Delta E_g = 0.05 \text{ эВ}. \quad (4)$$

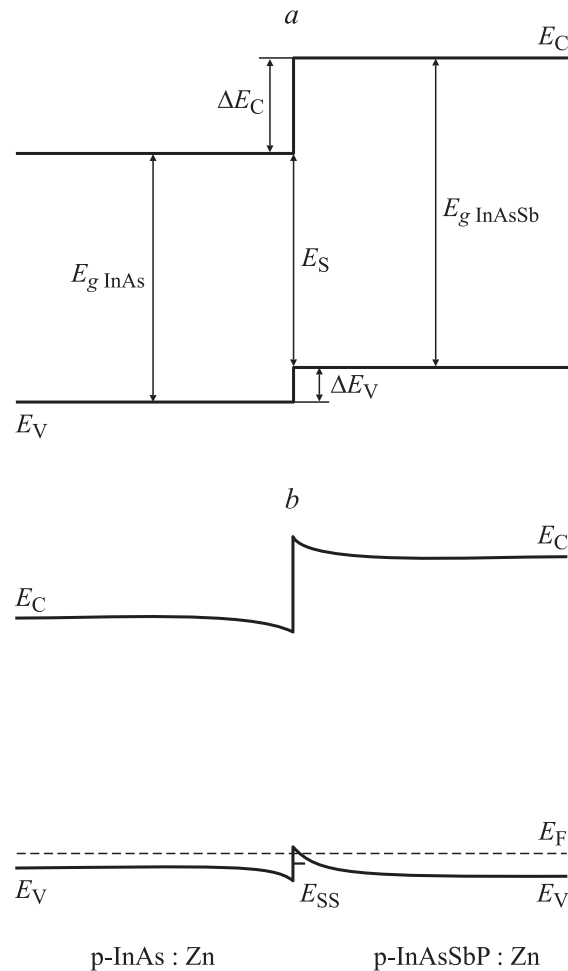
Поскольку значения параметров  $\Delta E_C$  и  $\Delta E_V$  имеют одинаковый знак, исследуемый гетеропереход  $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}$  является гетеропереходом II типа. При этом данный гетеропереход — ступенчатый, так как эффективная ширина перекрытия зон на гетерогранице гетероперехода ( $E_S$ ) положительна:

$$E_S = E_{g1} - \Delta E_V = E_{g2} - \Delta E_C = 0.265 \text{ эВ}. \quad (5)$$

Следует отметить, что случай, когда  $E_S < 0$ , был рассмотрен на примере разьединенного гетероперехода II типа  $\text{InAs}/\text{GaInAsSb}$  [13].

## 5. Обсуждение результатов и выводы

На рис. 4, *b* приведена схематическая зонная диаграмма гетероперехода II типа  $\text{p-InAs}/\text{p-InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}$  в условиях термодинамического равновесия с учетом степени легирования акцепторными примесями соединений, образующих данный гетеропереход. Как видно из рисунка, за счет изгибов зон на гетерогранице II типа происходит формирование потенциальных ям для электронов и дырок по разные стороны границы раздела. Если легирование четверного твердого раствора



**Рис. 4.** *a* — схематическая зонная энергетическая диаграмма гетероперехода II типа  $\text{InAs}/\text{InAsSbP}$  и *b* — зонная диаграмма  $\text{p-InAs}/\text{p-InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}$  гетероструктуры в термодинамическом равновесии.  $E_{SS}$  — положение интерфейсного уровня на гетерогранице.

$\text{p-InAsSbP}$  превышает уровень легирования  $\text{p-InAs}$ , следовательно, внутреннее электрическое поле гетероперехода в основном распределено вблизи гетерограницы на стороне арсенида индия, и уровень химпотенциала гетероструктуры может располагаться внутри перекрытия зон на гетерогранице. Задавая тип и повышая уровень легирования материалов, образующих гетеропереход, можно управлять положением уровня химпотенциала и заполнять потенциальные ямы на интерфейсе либо электронами (в гетероструктуре  $\text{p-n}$ ), либо дырками (в гетероструктуре  $\text{p-p}$ ), создавая при этом электронные или дырочные каналы соответственно. При этом уровень химпотенциала располагается в интервале разрывов зон ( $\Delta E_C$  или  $\Delta E_V$ ) на гетерогранице.

Приложение внешнего смещения к гетеропереходу также приводит к заполнению каналов за счет инжекции носителей. Например, когда к гетеропереходу II типа  $\text{p-InAs}/\text{p-InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}$  прикладывается обратное смещение, тогда со стороны  $\text{p-InAsSbP}$  об-

разуется дырочный канал, а со стороны p-InAs — потенциальная яма для электронов. Поскольку электроны и дырки пространственно разделены на гетерогранице II типа, энергия излучательного интерфейсного перехода ограничена по нижнему пределу эффективной шириной перекрытия зон на гетерогранице  $E_S$ . Наблюдаемая на рис. 3 низкоэнергетическая полоса излучения  $h\nu_1^{300}$  возникает за счет интерфейсных излучательных переходов дырок, локализованных на гетерогранице p-InAs/p-InAs<sub>0.66</sub>Sb<sub>0.11</sub>P<sub>0.23</sub>. В арсениде индия, легированном акцепторной примесью, дырки могут локализоваться на поверхностных состояниях, которые выступают эффективными центрами излучательной рекомбинации в гетеропереходах II типа [16]. Важными условиями для реализации таких излучательных переходов являются: 1) разрыв в валентной зоне на гетерогранице должен превышать энергию поверхностного акцепторного уровня и 2) уровень химпотенциала гетероструктуры должен располагаться вблизи или ниже данного поверхностного уровня. В нашем случае заданные условия выполнимы при комнатной температуре  $\Delta E_V^{300} > h\nu_2^{300} - h\nu_1^{300}$  и степень легирования твердого раствора меньше, чем в арсениде индия.

При прямом же смещении образование потенциальных ям для электронов и дырок на гетерогранице p-InAs/p-InAs<sub>0.66</sub>Sb<sub>0.11</sub>P<sub>0.23</sub> становится невозможным, поскольку энергетические зоны разгибаются внешним электрическим полем. Более того, интерфейсная люминесценция при обратном смещении также не наблюдается в p-p-гетероструктуре при низких температурах. При температуре жидкого азота происходит вымораживание дырок на дефектах и примесных центрах в контактирующих материалах, что приводит к дефициту подвижных носителей и уровень химпотенциала гетероструктуры может располагаться внутри перекрытия зон, а проводимость полупроводников, формирующих данный гетеропереход, становится близкой к собственной. Тогда даже при значительном увеличении внешнего смещения заполнение потенциальных ям на гетерогранице недостаточно для возникновения интерфейсных излучательных рекомбинационных переходов. Так, наблюдаемая полоса излучения в спектрах ЭЛ при  $T = 77$  К при обратном смещении для гетероструктуры p-InAs/p-InAs<sub>0.66</sub>Sb<sub>0.11</sub>P<sub>0.23</sub> есть проявление специфических свойств сильнокомпенсированного p-InAs (см. рис. 2, кривая 4). Мы полагаем, что все излучательные переходы с энергией фотона больше ширины запрещенной зоны арсенида индия поглощаются, и электронно-дырочные пары, рожденные при переизлучении в объеме InAs, увлекаются внешним электрическим полем в противоположные стороны. На этот факт указывает характер низкоэнергетического края наблюдаемой полосы. Существование полосы излучения вблизи примесной можно объяснить большим временем жизни носителей, „замороженных“ на акцепторных центрах.

Таким образом, нами была впервые продемонстрирована интерфейсная люминесценция на одиночной гетерогранице II типа в системе соединений InAs/InAsSbP при комнатной температуре. Эмпирически установлено и экспериментально подтверждено, что одиночная гетероструктура InAs/InAsSbP является ступенчатым гетеропереходом II типа. Более того, расчет величины электронного сродства для InAsSbP достаточно хорошо описывается линейной комбинацией значений бинарных соединений, пропорциональной составу четверного твердого раствора. В случае с гетероструктурой n-InAs/p-InAsSbP образование электронного канала на гетерогранице на стороне n-InAs не приводило к возникновению излучательной интерфейсной люминесценции, тогда как гетероструктура p-InAs/p-InAsSbP продемонстрировала интенсивную интерфейсную люминесценцию при обратном смещении, обусловленную излучательными переходами дырок с заполненных поверхностных состояний, локализованных на гетерогранице. Обнаружение интенсивной интерфейсной люминесценции, соизмеримой по интенсивности с объемной, открывает новые возможности и подходы к созданию многоцветных светоизлучающих диодов и комплексных интегральных оптоэлектронных матриц.

Работа частично поддержана в рамках проекта РФФИ (11-02-00234) и программ президиума РАН и отделения физических наук РАН.

Авторы выражают искреннюю благодарность М.В. Байдаковой за проведение рентгено-дифракционных исследований.

Авторы выражают искреннюю благодарность М.В. Байдаковой за проведение рентгено-дифракционных исследований.

## Список литературы

- [1] Т.Н. Данилова, А.Н. Именков, К.Д. Моисеев, И.Н. Тимченко, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **20**, 20 (1994).
- [2] А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, П. Кубат, К.Д. Моисеев, С. Цивиш, Ю.П. Яковлев. ФТП, **35**, 375 (2001).
- [3] В.В. Романов, Э.В. Иванов, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, К.Д. Моисеев, Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев, Письма ЖТФ, **27**, 80 (2001).
- [4] А.П. Астахова, А.С. Головин, Н.Д. Ильинская, К.В. Калинина, С.С. Кижаев, О.Ю. Серебренникова, Н.Д. Стоянов, Zs.J. Horvath, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **4**, 278 (2010).
- [5] М.П. Михайлова, А.А. Рогачев, И.Н. Яссиевич. ФТП, **10**, 8 (1976).
- [6] H. Kroemer, G. Griffiths. IEEE Electr. Dev. Lett., **4**, 20 (1983).
- [7] B. Wilson. IEEE J. Quant. Electron., **24**, 1763 (1988).
- [8] Г.Г. Зегря, М.П. Михайлова, Т.И. Данилова, А.Н. Именков, К.Д. Моисеев, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **33**, 351 (1999).
- [9] L. Lacroix, C.A. Tran, S.P. Watkins, L.W. Thewalt. J. Appl. Phys., **80**, 6416 (1996).
- [10] К.Д. Моисеев. Автореферат диссертации к.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе (СПб., 1994).
- [11] Landolt-Börnstein. Handbook. Numerical Data, Ser. III, Springer, Berlin, Heidelberg, 1982, v. **17a**. (O. Madelung, ed.) p. 264; 1987, v. **22a** (K.-H. Hellwege, ed.) p. 305.
- [12] M.P. Mikhailova, A.N. Titkov. Semicond. Sci. Technol, **9**, 1279 (1994).

- [13] M.P. Mikhailova, K.D. Moiseev, Yu.P. Yakovlev. *Semicond. Sci. Technol.*, **19**, R109 (2004).
- [14] А.М. Литвак, К.Д. Моисеев, М.В. Степанов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. *ЖПХ*, **67**, 1957 (1994).
- [15] E.R. Gertner, D.T. Cheung, A.M. Andrews, J.T. Longo. *J. Electron. Mat.*, **6**, 163 (1977).
- [16] K.D. Moiseev, E. Ivanov, V. Romanov, M. Mikhailova, Yu. Yakovlev, E. Hulicius, A. Hospodková, J. Pangrác, T. Šimeček. *Physics Procedia*, **3**, 1189 (2010).

*Редактор Л.В. Беляков*

## **Interface electroluminescence in type II InAs/InAsSbP heterojunction at room temperature**

*M.M. Grigoryev, E.V. Ivanov, K.D. Moiseev*

loffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Interface luminescence on a single type II heterointerface in InAs/InAsSbP solid solution system has been demonstrated for the first time at room temperature. It was established in experiment that the single InAs/InAsSbP heterostructure is a type II staggered heterojunction. Formation of an electron inversion layer on the n-InAs side at the n-InAs/p-InAsSbP heterointerface did not result in interface radiative recombination; whereas the reverse biased p-InAs/p-InAsSbP heterostructure exhibited interface electroluminescence due to radiative transitions of holes from filled surface states localized on the heterointerface. Observation of intense interface luminescence comparable in magnitude with bulk-related luminescence can lead to new possibilities in manufacturing of multicolor light-emitting diodes and integral optoelectronics arrays operating in mid-infrared spectral range 3–5  $\mu\text{m}$ .