

03,13

## Узкозонные гетероструктуры $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{InAsSbP}$ ( $y = 0.09-0.16$ ) для спектрального диапазона $4-6 \mu\text{m}$ , полученные методом МОГФЭ

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

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

Поступила в Редакцию 20 мая 2019 г.

В окончательной редакции 20 мая 2019 г.

Принята к публикации 23 июня 2019 г.

Методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений были получены асимметричные гетероструктуры  $n\text{-InAs}/\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y/p\text{-InAsSbP}$  с узкозонным активным слоем в интервале составов  $y = 0.09-0.16$ . Электролюминесценция при комнатной температуре наблюдалась вплоть до длины волны  $\lambda = 5.1 \mu\text{m}$  в максимуме спектра. Исследование спектров низкотемпературной электролюминесценции позволило установить существование двух каналов излучательной рекомбинации, обусловленных природой гетерограницы  $\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$ . Продемонстрировано влияние химии поверхности активного слоя на состав наращиваемого барьерного слоя и на формирование гетероперехода  $\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$  при увеличении концентрации сурьмы в твердом растворе  $\text{InAsSb}$ .

**Ключевые слова:** антимиониды, МОГФЭ, люминесценция,  $\text{InAs}$ , гетеропереходы.

DOI: 10.21883/FTT.2019.10.48244.483

### 1. Введение

Ширина запрещенной зоны тройного твердого раствора в системе  $\text{In-As-Sb}$  при комнатной температуре может изменяться в интервале энергий  $0.35-0.1 \text{ eV}$  в зависимости от концентрации сурьмы в твердой фазе [1]. Таким образом, эпитаксиальные слои на основе данных твердых растворов могут быть использованы для создания активных областей в светоизлучающих приборах, работающих в среднем инфракрасном диапазоне длин волн от  $3.5 \mu\text{m}$  до  $12 \mu\text{m}$  [2]. При этом ограничивающими барьерами, с помощью которых можно локализовать носители заряда в узкозонной активной области, как правило, выступают слои четверных твердых растворов  $\text{InAsSbP}$  [3,4]. Известно, что твердый раствор  $\text{InAsSb}$  формирует с бинарным соединением  $\text{InAs}$  ступенчатый гетеропереход II типа, в котором возможно создание хорошего ограничения для дырок за счет энергетического скачка на гетерогранице в валентной зоне [5]. Тогда наиболее простой конструкцией оптоэлектронного прибора с точки зрения технологического исполнения может выступать двойная гетероструктура  $\text{InAs}/\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$ , где слой четверного твердого раствора  $\text{InAsSbP}$  обеспечивает ограничение для электронов за счет разрыва в зоне проводимости на гетерогранице  $\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$  [6]. В результате формируется конструкция с асимметричным электронным ограничением носителей заряда в активной области, т.е. изначально в термодинамическом равновесии существуют потенциальные барьеры для электронов и дырок одновременно. Следует отметить, что увеличение концентрации атомов сурьмы в активном слое  $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$  помимо уменьшения ширины запре-

щенной зоны приводит к увеличению параметра кристаллической решетки наращиваемого тройного твердого раствора относительно соответствующего параметра подложки  $\text{InAs}$ . В настоящей работе были исследованы электролюминесцентные свойства асимметричной двойной гетероструктуры  $\text{InAs}/\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$ , а также рассмотрены условия формирования гетероинтерфейса  $\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$ , обусловленные влиянием поверхности эпитаксиального слоя  $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$  с параметром несогласования выше критического значения на состав наращиваемого четверного твердого раствора при увеличении концентрации атомов сурьмы свыше  $y = 0.14$ .

### 2. Методика эксперимента

Гетероструктуры  $n\text{-InAs}/\text{InAsSb}/p\text{-InAsSbP}$  были получены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) на подложках нелегированного арсенида индия с ориентацией рабочей поверхности в плоскости (001) и концентрацией носителей заряда  $n = 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Эпитаксиальное осаждение слоев твердых растворов  $\text{InAsSb}$  и  $\text{InAsSbP}$  проводилось в горизонтальном реакторе с резистивным типом нагрева при атмосферном давлении и температуре  $510^\circ\text{C}$ . Источниками компонент наращиваемых твердых растворов являлись металлоорганические соединения триметилиндий (TMIIn) и триметилстиббин (TMSb), а также гидридные газы арсин ( $\text{AsH}_3$ ) и фосфин ( $\text{PH}_3$ ). Перед процессом наращивания подложка отжигалась в атмосфере арсина при температуре  $610^\circ\text{C}$  в течение 30 минут. Толщина эпитаксиального слоя узкозонного соединения  $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$  составляла  $3 \mu\text{m}$ , а широко-

**Таблица 1.** Параметры детекторов излучения, использованных для регистрации спектральных характеристик гетероструктур  $\text{InAs}/\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$  в диапазоне длин волн  $2.5-6 \mu\text{m}$

Параметр	Фотодетектор	
	InSb	HgCdTe
Длинноволновая граница фоточувствительности, $\mu\text{m}$	5.3	10.5
Длина волны максимума спектральной чувствительности ( $\lambda_{\text{max}}$ ), $\mu\text{m}$	5.0	10.0
Диаметр чувствительной площадки, mm	4	1
Удельная обнаружительная способность на длине волны $\lambda_{\text{max}}$ , $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$	$2.1 \cdot 10^{11}$	$3.7 \cdot 10^{10}$
Вольт-ваттная чувствительность на длине волны $\lambda_{\text{max}}$ , $\text{V/W}$	$8.8 \cdot 10^5$	$7.2 \cdot 10^5$

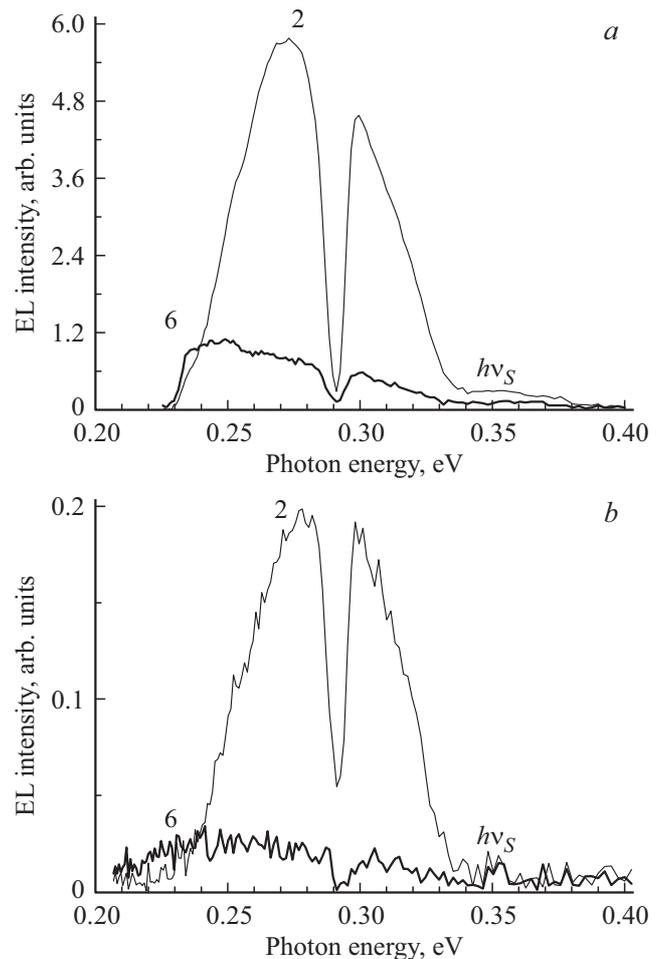
зонного  $\text{InAs}_{0.41}\text{Sb}_{0.18}\text{P}_{0.41}$  —  $1.2 \mu\text{m}$ . В серии гетероструктур, рассматриваемых в данной работе, менялся только состав газовой фазы при наращивании тройного твердого раствора  $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ , что соответственно приводило к изменению состава твердой фазы активного слоя гетероструктуры, тогда как состав газовой фазы для наращивания четверного твердого раствора  $\text{InAsSbP}$  был неизменен. Содержание TMSb в газовой фазе ( $x_{\text{TMSb}}^{\text{V}} = F_{\text{TMSb}}/(F_{\text{TMSb}} + F_{\text{AsH}_3})$ ) для тройного твердого раствора на входе в реактор варьировалось в интервале значений  $0.580-0.774$ . Отношение источников элементов третьей и пятой групп ( $k_{\text{III/V}}$ ) поддерживалась в диапазоне  $0.3-0.34$ . В качестве легирующей акцепторной примеси накрывающего слоя твердого раствора  $\text{InAsSbP}$  применялся диэтилцинк (DEZn). Легирование барьерного эпитаксиального слоя проводилось при одинаковых технологических режимах напуска металлоорганического источника в реактор для всех гетероструктур.

Исследования электролюминесцентных характеристик гетероструктур  $n\text{-InAs}/\text{InAsSb}/p\text{-InAsSbP}$  проводились при температурах 77 и 300 K в спектральном диапазоне  $2.5-6.0 \mu\text{m}$ . Электролюминесценция (ЭЛ) возбуждалась прямоугольными импульсами тока с коэффициентом заполнения 50% и частотой повторения 512 Hz. Амплитуда импульсов варьировалась в диапазоне от 20 до 200 mA. При этом отрицательный потенциал был приложен к подложке  $n\text{-InAs}$ , а положительный — к накрывающему слою  $p\text{-InAsSbP}$ . Спектральные характеристики гетероструктур были исследованы с помощью экспериментальной установки на основе монохроматора DK-480 с дифракционной решеткой 150 grooves/mm (CVI Laser Corp.), селективного усилителя SR-810 (Stanford Research Systems), а также двух сменных фотovoltaических детекторов, работавших при температуре жидкого азота: InSb (Judson Co) и HgCdTe (НПО „Орион“). Наиболее важные параметры использованных фотоприемников представлены в табл. 1. Основные измерения были проведены с помощью детектора InSb, который

обеспечивал гораздо более высокие значения отношения „сигнал/шум“, нежели фотоприемник на основе HgCdTe. По этой причине детектор HgCdTe применялся только для дополнительных исследований тех гетероструктур, спектры которых выходили за пределы длинноволновой границы фоточувствительности детектора InSb.

### 3. Электролюминесцентные свойства гетероструктур при комнатной температуре

На рис. 1, *a* представлены спектры ЭЛ для гетероструктур 2 и 6 (см. табл. 2), зарегистрированные при комнатной температуре и токе инжекции  $i = 150 \text{ mA}$  с использованием детектора InSb. Гетероструктуры 2 и 6 были специально выбраны как типичные представители двух серий образцов, которые характеризовались качественно различными электролюминесцентными свойствами. Глубокий „провал“, наблюдающийся в окрестности  $h\nu = 0.290 \text{ eV}$  ( $\lambda = 4.3 \mu\text{m}$ ) в спектрах ЭЛ для всех



**Рис. 1.** Спектры электролюминесценции гетероструктур 2 и 6 при температуре  $T = 300 \text{ K}$  и токе инжекции  $i = 150 \text{ mA}$ , зарегистрированные с помощью фотоприемника InSb (*a*) и HgCdTe (*b*).

Таблица 2. Основные характеристики гетероструктур при  $k_{III/V} = 0.3-0.34$ .

Номер структуры	Название структуры	Содержание триметилстибина в газовой фазе ( $x_{TMSb}^V$ )	Содержание сурьмы ( $y$ ) в твердом растворе $InAs_{1-y}Sb_y$	Положение максимума основной полосы ЭЛ при $T = 300$ К, eV
1	SP-310	0.58	0.09	0.286
2	SP-312	0.63	0.1	0.283
3	SP-313	0.66	0.11	0.277
4	SP-314	0.73	0.125	0.267
5	SP-317	0.74	0.155	0.247
6	SP-315	0.8	0.16	0.243

исследуемых гетероструктур, обусловлен поглощением выходящего излучения молекулами углекислого газа ( $CO_2$ ), присутствующего в лабораторной атмосфере [7]. Другая общая особенность данных спектров ЭЛ, проявляющаяся вблизи  $h\nu = 0.255$  eV ( $\lambda = 4.85 \mu m$ ), связана с аномалией спектральной эффективности дифракционной решетки монохроматора DK-480 на данной длине волны. Отметим, что рассматриваемые спектры ЭЛ содержали две ярко выраженные полосы излучения: первая — малоинтенсивная вблизи  $h\nu_S = 0.35$  eV и вторая, доминирующая по интенсивности, в области энергий фотона 0.2–0.34 eV. Положение максимума первой полосы излучения соответствовало рекомбинационным переходам в объеме матрицы InAs при  $T = 300$  К, тогда как вторая полоса может быть приписана межзонным переходам в объеме тройного твердого раствора  $InAs_{1-y}Sb_y$ . Спектральное положение максимума доминирующей полосы излучения зависело от содержания сурьмы в активном слое, которое в свою очередь определялось концентрацией реагентов в газовой фазе (см. табл. 2). При этом ширина данной полосы на полувысоте интенсивности (FWHM) имела следующие значения: 68 meV и 90 meV для гетероструктур 2 и 6, соответственно. Как видно из рис. 1, а, низкоэнергетические края спектров ЭЛ для гетероструктур 2 и 6 были „обрезаны“ ниже значений энергий фотона  $h\nu_L = 0.235$  eV, что соответствовало „красной“ границе фоточувствительности детектора InSb  $\lambda_{InSb} = 5.3 \mu m$  (см. табл. 1). Для устранения искажений, вносимых детектором InSb в распределение спектральной интенсивности, в качестве приемника излучения был дополнительно использован детектор HgCdTe с длинноволновой границей фоточувствительности  $\lambda_{HgCdTe} = 10.5 \mu m$ . Соответствующие спектры ЭЛ, зарегистрированные при том же значении тока инжекции  $i = 150$  mA (рис. 1, б), демонстрировали симметричную форму для полос излучения в интервале энергий фотона 0.2–0.34 eV при  $T = 300$  К. Следует отметить, что для всех исследуемых гетероструктур при комнатной температуре форма спектров ЭЛ, положения максимумов и значения полуширин основных полос излучения практически не изменялись при увеличении тока инжекции от 20 до 200 mA.

Для определения состава активного слоя исследуемых гетероструктур нами был выполнен расчет согласно мо-

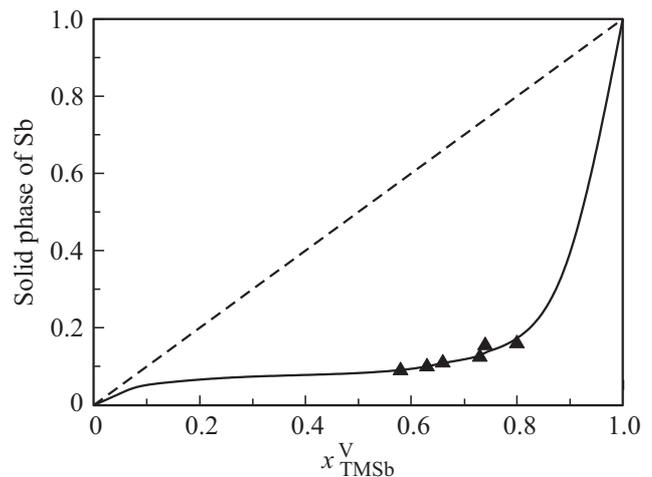
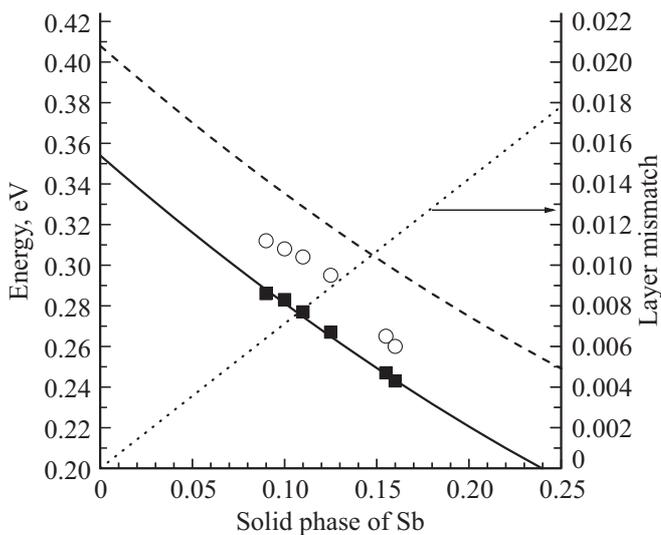


Рис. 2. Зависимость концентрации сурьмы в твердом растворе  $InAsSb$  от содержания триметилстибина (TMSb) в газовой фазе, рассчитанная в работе [6] при  $k_{III/V} = 1$  (штриховая линия) и  $k_{III/V} = 0.31$  (сплошная линия). Заполненные треугольники — экспериментальные результаты данной работы.

дели приращения параметра кристаллической решетки для энтальпии смешения, предложенной в работе [8], в рамках теории регулярных растворов. Пунктирная линия, показанная на рис. 2, отвечает условию соотношения для III и V групп реагентов в газовой фазе  $k_{III/V} = 1$ . В твердых растворах  $InAs_{1-y}Sb_y$  смешивание происходит в подрешетке V группы, поэтому ожидалось изменение данного соотношения в меньшую сторону ( $k_{III/V} = 0.31$ ). Расчет был выполнен, основываясь на том, что пиролиз происходит достаточно быстро, то есть химические соединения полностью разлагаются до достижения ими поверхности растущего слоя и термодинамические процессы при осаждении определяют коэффициенты распределения элементов в твердой фазе и задают состав тройного твердого раствора  $InAs_{1-y}Sb_y$ . Экспериментальные данные (заполненные треугольники) хорошо описываются термодинамическим расчетом (сплошная кривая), выполненным в предположении, что на границе раздела двух фаз формируется равновесие.

На рис. 3 приведена расчетная кривая (сплошная линия) зависимости ширины запрещенной зоны тройного твердого раствора  $InAs_{1-y}Sb_y$  от содержания сурьмы в



**Рис. 3.** Расчетная зависимость ширины запрещенной зоны твердого раствора  $\text{InAsSb}$  от содержания сурьмы при  $T = 300\text{ K}$  (сплошная линия) и при  $T = 77\text{ K}$  (пунктирная линия). Экспериментальные данные при  $T = 300\text{ K}$  (заполненные квадраты) и при  $T = 77\text{ K}$  (открытые кружки). Точечная линия — расчетная зависимость параметра несоответствия кристаллической решетки твердого раствора  $\text{InAsSb}$  по отношению к подложке  $\text{InAs}$  от состава твердой фазы.

твердой фазе ( $y$ ) при комнатной температуре. Расчет ширины запрещенной зоны ( $E_{SS}$ ) твердого раствора выполнялся по следующей формуле:

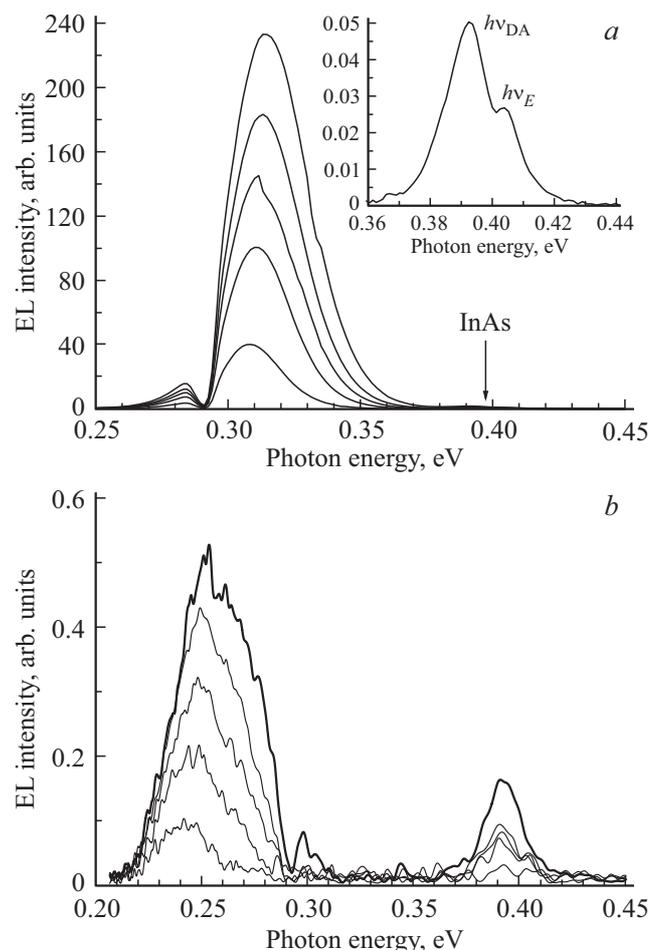
$$E_{SS} = E_{\text{InAs}}(1 - y) + E_{\text{InSb}}y - C_{\text{InAsSb}}y(1 - y), \quad (1)$$

где  $E_{\text{InAs}} = 0.354\text{ eV}$ ,  $E_{\text{InSb}} = 0.175\text{ eV}$  и  $C_{\text{InAsSb}} = 0.61\text{ eV}$  при  $T = 300\text{ K}$  [9]. На данном рисунке также представлены экспериментальные данные (заполненные квадраты), которые отражают спектральное положение максимума интенсивности основной полосы ЭЛ при комнатной температуре (см. табл. 2) для соответствующего состава активного слоя, определенного с помощью рис. 2. Как видно из рис. 3, экспериментальные данные демонстрируют хорошо согласие с расчетной кривой. Следовательно, мы можем принять их в качестве значений ширины запрещенной зоны при  $T = 300\text{ K}$  для каждого определенного состава тройного твердого раствора  $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ .

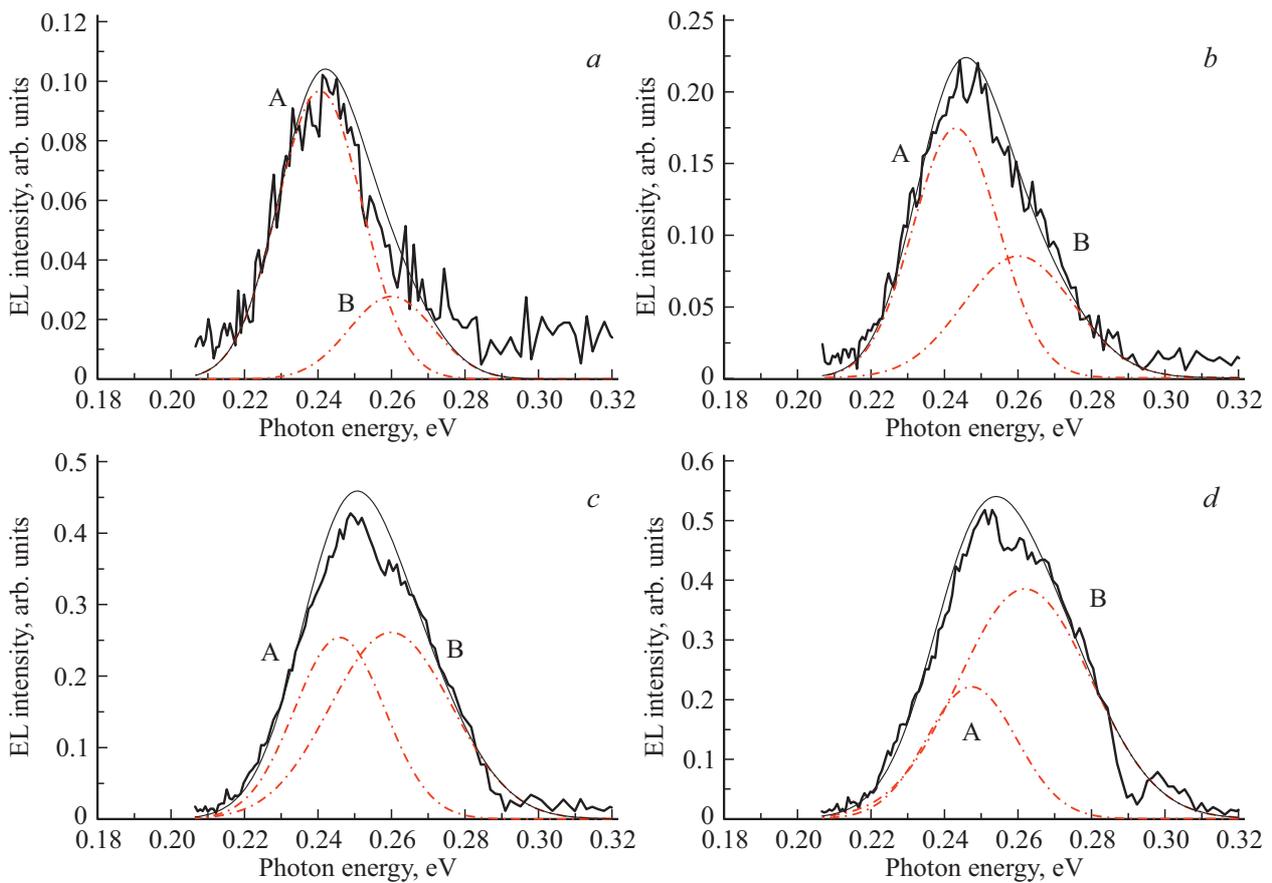
#### 4. Трансформация гетероперехода $\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$

На рис. 4 представлены спектры ЭЛ для гетероструктур 2 и 6, измеренные при различных значениях тока инжекции при температуре  $T = 77\text{ K}$ . Поскольку для гетероструктуры 6 длинноволновый край основной полосы излучения мог быть „обрезан“ вследствие особенностей спектральной характеристики фоточувствительности детектора  $\text{InSb}$ , то в процессе регистрации спектров ЭЛ были использованы два фотоприемника: детектор  $\text{InSb}$

для гетероструктуры 2 (рис. 4, *a*) и детектор  $\text{HgCdTe}$  для гетероструктуры 6 (рис. 4, *b*). Следует подчеркнуть, что полученные спектры демонстрировали те же самые характерные особенности в окрестностях энергии фотона  $0.255\text{ eV}$  и  $0.290\text{ eV}$ , о которых упоминалось выше при анализе электролюминесцентных характеристик при комнатной температуре. Для каждой из гетероструктур 2 и 6 в спектрах ЭЛ присутствовали две полосы излучения: сравнительно слабый и узкий пик в области энергий фотона  $0.4\text{ eV}$ , а также более интенсивная и широкая полоса в диапазоне  $0.2-0.36\text{ eV}$ . Отметим, что для гетероструктуры 2 высокоэнергетическая полоса излучения в спектрах ЭЛ (показана стрелкой „ $\text{InAs}$ “ на рис. 4, *a*) была почти не различима на фоне более интенсивной полосы с максимумом в районе  $0.31\text{ eV}$ . Полоса в окрестности  $0.4\text{ eV}$  состояла из двух близко расположенных пиков и имела суммарную полуширину  $\sim 20\text{ meV}$  (см. вставку на рис. 4, *a*). Максимум первого из этих пиков располагался вблизи энергии фотона



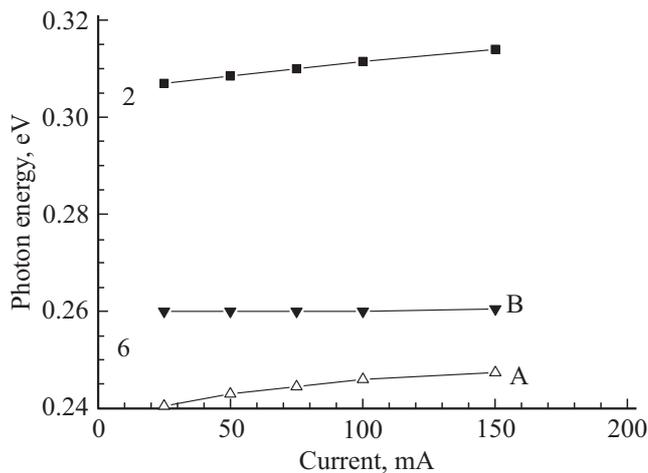
**Рис. 4.** Спектры электролюминесценции при температуре  $77\text{ K}$  и различных токах инжекции (снизу вверх —  $25\text{ mA}$ ,  $50\text{ mA}$ ,  $75\text{ mA}$ ,  $100\text{ mA}$ ,  $150\text{ mA}$ ): *a* — гетероструктура 2, фотоприемник  $\text{InSb}$  (на вставке — высокоэнергетический участок спектра при токе  $25\text{ mA}$ ); *b* — гетероструктура 6, фотоприемник  $\text{HgCdTe}$ .



**Рис. 5.** Эволюция основной (низкоэнергетической) полосы излучения в спектре ЭЛ для гетероструктуры 6 при  $T = 77$  К (жирные линии) в зависимости от тока инжекции: *a* — 25 мА, *b* — 50 мА, *c* — 100 мА, *d* — 150 мА. Штрихпунктирные линии — аппроксимирующие кривые на основе распределений Гаусса (компоненты А и В); тонкие линии — результирующие кривые, каждая из которых является суммой соответствующих Гауссианов.

$h\nu_E = 0.404$  eV, что по величине близко к значению ширины запрещенной зоны арсенида индия при  $T = 77$  К. Для второго пика положение максимума соответствовало величине  $h\nu_{DA} = 0.392$  eV, что можно приписать излучательным рекомбинационным переходам с участием донорно-акцепторных состояний в объеме нелегированного InAs [10]. Следует отметить, что образцы, обсуждаемые в данной работе, представляли собой диодные  $n$ -InAs/InAsSb/ $p$ -InAsSbP гетероструктуры, причем положение  $n$ - $p$  перехода зависело от степени диффузии примеси цинка из барьерного слоя вглубь образца. При этом наиболее вероятно, что  $n$ - $p$  переход находился в активном слое InAsSb, поскольку в случае его расположения в подложке InAs в спектрах ЭЛ отсутствовала бы полоса излучения с энергией фотона больше 0.39 eV при  $T = 77$  К. Форма, полуширина и спектральное положение высокоэнергетической полосы в спектрах ЭЛ, представленных на рис. 4, не зависели от состава активной области исследуемой гетероструктуры и оставались неизменными в диапазоне токов инжекции 25–150 мА, тогда как низкоэнергетические полосы излучения для гетероструктур 2 и 6 демонстрировали специфическое поведение при увеличении тока инжекции.

Максимум низкоэнергетической полосы в спектре ЭЛ для гетероструктуры 2 при токе инжекции 25 мА располагался вблизи энергии фотона 0.308 eV и по мере увеличения тока до 150 мА смещался в сторону больших энергий фотона и достигал значения 0.314 eV (сдвиг 6 meV), причем форма данной полосы излучения оставалась симметричной (с учетом полосы поглощения  $\text{CO}_2$ ). Одновременно с этим полуширина указанного пика возрастала на 9 meV (от 25 до 34 meV). В спектрах ЭЛ для гетероструктуры 6 основная полоса излучения с максимумом интенсивности вблизи энергий фотона  $\sim 0.24$  eV при токе  $i = 25$  мА смещалась почти на 16 meV до значения 0.256 eV при токе инжекции 150 мА, что почти в 3 раза больше, чем в случае гетероструктуры 2. Такой существенный сдвиг рассматриваемой полосы ЭЛ в „голубую“ сторону сопровождался незначительным увеличением ее полуширины на 8 meV (от 34 до 42 meV). При этом отличительная особенность спектров ЭЛ для гетероструктуры 6 заключалась в асимметричной форме основной полосы излучения, что выражалось в наличии резкого низкоэнергетического края и существовании высокоэнергетического „плеча“ при малых токах инжекции (рис. 5). По мере увеличения



**Рис. 6.** Зависимость энергии фотона в максимуме для Гауссианов, аппроксимирующих низкоэнергетическую полосу спектра ЭЛ, от тока инжекции для гетероструктур 2 и 6 при температуре 77 К.

тока форма изучаемой полосы трансформировалась, и при больших значениях тока инжекции спектр ЭЛ становился более симметричным. Как видно из рис. 5, данная полоса излучения хорошо описывается суперпозицией двух Гауссовых зависимостей, которые можно связать с соответствующими излучательными переходами носителей заряда в активном слое  $\text{InAsSb}$ . При этом сначала наблюдалось доминирование составляющей А, затем возрастание и доминирование компоненты В. Кроме того, указанные компоненты демонстрировали различную токовую зависимость спектрального положения максимумов (см. рис. 6, кривые 6). При увеличении тока инжекции максимум компоненты В почти не сдвигался в сторону больших энергий (заполненные треугольники), тогда как для составляющей А был характерен „голубой“ сдвиг с последующим выходом на насыщение при достижении определенного значения энергии фотона (открытые треугольники). Ранее подобное поведение наблюдалось в спектрах ЭЛ для одиночных гетеропереходов II типа  $\text{InAs}/\text{InGaAsSb}$  [11]. „Голубой“ сдвиг одной из полос был вызван заполнением состояний в самосогласованной потенциальной яме на гетерогранице II типа при увеличении внешнего смещения и при полном изгибе зон на гетерогранице достигал насыщения по энергии фотона и интенсивности. При этом существовала другая полоса излучения, которая отвечала межзонной излучательной рекомбинации, а ее интенсивность продолжала расти с увеличением тока инжекции.

Отметим, что для гетероструктур 1–4 ( $y < 0.13$ ) достаточно хорошая аппроксимация основной полосы ЭЛ при  $T = 77$  К достигалась при использовании только одной кривой распределения Гаусса, тогда как для гетероструктур 5 и 6 приходилось применять двухкомпонентную аппроксимацию. При этом для гетероструктуры 2

токовая зависимость спектрального положения максимума ЭЛ была близка к линейной (см. рис. 6, кривая 2), что являлось проявлением эффекта Мосса–Бурштейна и указывало на доминирующий вклад межзонного канала излучательной рекомбинации. Разделение спектра ЭЛ для гетероструктуры 6 на составляющие А и В и аналогия с электролюминесцентными свойствами гетероперехода II типа указывают на существование двух каналов излучательной рекомбинации: первый, с энергией фотона 0.24 eV при токе инжекции  $i = 25$  mA, отвечающий интерфейсным излучательным переходам через гетерограницу II типа  $\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$  и второй, с энергией фотона 0.26 eV при той же величине тока, обусловленный межзонными переходами в объеме активного слоя  $\text{InAsSb}$ . Таким образом, можно сделать вывод о том, что увеличение содержания сурьмы свыше значения  $y = 0.14$  в слое  $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ , на который производится последующее осаждение барьерного слоя  $\text{InAsSbP}$ , приводит к формированию гетероперехода II типа на гетерогранице  $\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$ .

На рис. 3 приведены значения спектрального положения максимума низкоэнергетической полосы излучения при  $T = 77$  К и токе инжекции  $i = 150$  mA (открытые кружки), отвечающей за межзонную рекомбинацию, при этом в случаях гетероструктур 5 и 6 были использованы данные для гауссовой компоненты В. Как видно из рисунка, экспериментальные значения располагались ниже соответствующей расчетной кривой для ширины запрещенной зоны тройного твердого раствора, полученной на основании формулы (1), где  $E_{\text{InAs}} = 0.408$  eV,  $E_{\text{InSb}} = 0.235$  eV и  $C_{\text{InAsSb}} = 0.61$  eV [9]. Разница по энергии между расчетными и экспериментальными значениями для каждого состава активного слоя составила 25–28 meV для серии гетероструктур 1–4 и  $\sim 36$  meV для гетероструктур 5 и 6. Это говорит о том, что основной вклад в межзонную рекомбинацию дают излучательные переходы электронов из состояний в зоне проводимости на примесные дырочные состояния в запрещенной зоне твердого раствора  $\text{InAsSb}$ . Это также согласуется с нашим предположением о том, что в исследуемых гетероструктурах  $p-n$  переход расположен в узкозонном активном слое.

Кроме того из рис. 3 видно, что при некоторых значениях состава рассогласование твердого раствора относительно подложки  $\text{InAs}$  превышает 0.01 (точечная линия). Данная область соответствует содержанию сурьмы  $y > 0.14$ . Поскольку тройной твердый раствор  $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$  можно представить в виде комбинации двух квазибинарных соединений  $(\text{InAs})_{1-y}-(\text{InSb})_y$  с общим катионом, то свойства ростовой поверхности эпитаксиального слоя будут определяться, в основном, концентрацией свободных связей атомов сурьмы. Тогда следует ожидать изменения химии поверхности активного слоя, на которую будет наращиваться накрывающий барьерный слой. Ранее нами было показано, что изменение химии поверхности матрицы влияет на скорость сегрегации определенных атомов четверного твердого раствора

при эпитаксиальном наращивании методом МОФГЭ, что в свою очередь приводит к изменению скорости диффузионных потоков этих элементов, вызывая колебание состава твердой фазы наращиваемого слоя [12]. Указанный эффект оказывается еще значительнее, когда диффузионные потоки только начинают формироваться, а времена диффузии элементов еще соизмеримы с временами поверхностных реакций над растущим слоем. Известно, что количество определенного элемента пятой группы в твердой фазе лимитируется самым медленным из процессов, которые протекают при наращивании твердого раствора (поверхностные реакции, диффузия адатомов по поверхности, диффузия радикалов через приповерхностный слой и др.) [13]. В начальный момент осаждения, заданный состав газовой фазы над поверхностью подложки определялся поверхностными реакциями. Свободные связи на поверхности матрицы, обогащенной сурьмой, способствовали тому, чтобы рост четырехкомпонентного твердого раствора начинался с формирования соединения, обогащенного антимонидом индия. Следует также учитывать некоторую особенность в самоорганизации четверного твердого раствора в процессе наращивания за счет пропорционального встраивания атомов Sb и P в кристаллическую решетку эпитаксиального слоя, что обусловлено выбираемой величиной соотношения  $TMSb/PH_3$  в газовой фазе.

Поскольку подложка InAs является основным матричным материалом для получения эпитаксиальным способом гетероструктур для систем твердых растворов  $In-As-Sb$  и  $In-As-Sb-P$ , то увеличение концентрации атомов сурьмы в твердом растворе  $InAs_{1-y}Sb_y$  приводило к увеличению параметра кристаллической решетки наращиваемого эпитаксиального слоя относительно соответствующего параметра матрицы InAs. При малых величинах несоответствия эпитаксиальные слои  $InAs_{1-y}Sb_y$  растут на подложках InAs псевдоморфно, испытывая упругую деформацию. При достижении некоторой критической величины рассогласования происходит пластическая деформация с образованием сетки дислокаций несоответствия на границе раздела подложка–эпитаксиальный слой [14]. Последующее возрастание рассогласования между параметрами решеток составных частей гетероструктуры вызовет появление внутреннего напряжения (деформации сжатия) в активном слое, помещенном между подложкой и накрывающим барьерным слоем. В работе [15] было показано, что в области значений рассогласования решеток  $0.6\% < D < 1\%$  несоответствие параметров решетки обусловлено упругой деформацией. При дальнейшем возрастании величины  $D = 1\%$  искажение решетки уменьшается за счет генерации дислокаций межфазного несоответствия, то есть появления протяженных дефектов. Таким образом, в исследуемых гетероструктурах накрывающие слои четверного твердого раствора InAsSbP, наращиваемые на сильно рассогласованные слои  $InAs_{1-y}Sb_y$ , когда несоответствие решеток активного и накрывающего слоев превышает значение

$D > 1\%$ , будут рассматривать поверхность активного слоя как матричную. Тогда существует вероятность смещения параметра кристаллической решетки барьерного слоя  $InAs_{1-x-y}Sb_yP_x$  в сторону величин, соответствующих псевдоморфному росту на слое твердого раствора  $InAs_{1-y}Sb_y$ , заданного состава. Как следствие этого мы ожидали изменений в соотношениях концентраций элементов пятой группы в подрешетке четверного твердого раствора при увеличении содержания сурьмы в активном слое. Известно, что увеличение концентрации сурьмы влияет в основном на положение края валентной зоны на границе раздела InAsSb/InAsSbP и сдвигает его в сторону больших значений энергий фотона [5], что в свою очередь может привести к изменению типа гетерограницы с I на II.

## 5. Заключение

Методом МОФЭ были получены асимметричные гетероструктуры  $n-InAs/InAs_{1-y}Sb_y/p-InAs_{0.41}Sb_{0.18}P_{0.41}$  в интервале составов  $y = 0.09-0.16$ . Электролюминесцентные свойства указанных гетероструктур были исследованы при температурах 300 К и 77 К. Обнаружено существование двух каналов излучательной рекомбинации, один из которых обусловлен интерфейсными переходами через гетерограницу II типа InAsSb/InAsSbP, а второй — межзонными переходами в объеме активного слоя InAsSb. Полученные результаты необходимо учитывать при проектировании светоизлучающих приборов на основе узкозонных твердых растворов для спектрального диапазона свыше  $4.7 \mu m$ . В случае оптоэлектронного прибора, работающего на межзонных излучательных переходах, изменение типа гетероперехода и появление дополнительного канала рекомбинации носителей заряда может привести к возрастанию энергетических потерь при увеличении тока инжекции. В то же время применение интерфейсных излучательных переходов на основе гетеропереходов II типа открывает путь к появлению нового источника ИК-излучения, востребованного для решения задач оптоэлектроники.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] M. Fang, K.Y. Ma, D.H. Law, R.M. Cohen, G.B. Stringfellow. J. Appl. Phys. **67**, 7034 (1990).
- [2] S.S. Kizhayev, N.V. Zotova, S.S. Molchanov, B.V. Pushnyi, Yu.P. Yakovlev. J. Cryst. Growth **248**, 296 (2003).
- [3] A.N. Baranov, A.N. Imenkov, V.V. Sherstnev, Yu.P. Yakovlev. Appl. Phys. Lett. **64**, 2480 (1994).
- [4] M. Yin, A. Krier, R. Jones, S. Krier, D. Campbell. Proc. SPIE **6397**, 639707 (2006).
- [5] S.-H. Wei, A. Zunger. Phys. Rev. B **52**, 12039 (1995).

- [6] М.М. Григорьев, Э.В. Иванов, К.Д. Моисеев. ФТП **45**, 1386 (2011).
- [7] Р. Хадсон. Инфракрасные системы. Мир, М. (1972). 536 с.
- [8] G.B. Stringfellow. J. Cryst. Growth **62**, 225 (1983).
- [9] Landolt-Börnstein. Handbook. Numerical Data. Ser. III. Springer, Berlin, Heidelberg. **17a** / Ed. O. Madelung, (1982) 264 p.; **22a** / Ed. K.-H. Hellwege, (1987) 305 p.
- [10] Y. Lacroix, C.A. Tran, S.P. Watkins, M.L.W. Thewalt. J. Appl. Phys. **80**, 6416 (1996).
- [11] М.Р. Mikhailova, К.Д. Moiseev, Yu.P. Yakovlev. Semicond. Sci. Technol. **19**, R109 (2004).
- [12] К.Д. Моисеев, В.В. Романов, Ю.А. Кудрявцев. ФТТ **58**, 2203 (2016).
- [13] G.B. Stringfellow. Organometallic Vapor-Phase Epitaxy: Theory and Practice. 2nd ed. Academic Press, San Diego, USA. (1999) 599 p.
- [14] J.H. van der Merwe. Phys. Rev. B **37**, 2892 (1988).
- [15] T. Fukui, Y. Horikoshi. Jpn. J. Appl. Phys. **19**, L53 (1980).

Редактор К.В. Емцев