

03,09,12

Формирование гетероперехода II типа в полупроводниковой структуре InAsSb/InAsSbP

© В.В. Романов, Э.В. Иванов, К.Д. Моисеев[†]Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия[†] E-mail: mkd@iropt2.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 26 июня 2020 г.

В окончательной редакции 26 июня 2020 г.

Принята к публикации 30 июня 2020 г.

Представлены результаты исследования электролюминесцентных и вольт-амперных характеристик гетероструктуры n -InAs/ n -InAsSb/ p -InAsSbP, выращенной методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. В спектральном диапазоне 0.23–0.29 eV обнаружена интенсивная электролюминесценция при температуре $T = 77$ К. Положение максимума основной полосы излучения ($h\nu \approx 0.24$ eV) демонстрировало заметный „голубой“ сдвиг при увеличении приложенного прямого смещения. На основании проведенных исследований был сделан вывод о существовании на гетерогранице InAs_{0.84}Sb_{0.16}/InAs_{0.32}Sb_{0.28}P_{0.40} ступенчатого гетероперехода II типа, что подтверждается результатами расчета зонной энергетической диаграммы.

Ключевые слова: гетеропереходы, МОГФЭ, электролюминесценция, вольт-амперные характеристики, антимоноиды, InAs.

DOI: 10.21883/FTT.2020.11.50055.139

1. Введение

В работе [1] было показано, что одиночная гетероструктура InAs/InAs_{1-x-y}Sb_yP_x на основе четырехкомпонентных соединений, изоморфных с InAs, образует ступенчатый гетеропереход II типа. При этом энергетические разрывы на гетерогранице InAs/InAs_{0.61}Sb_{0.13}P_{0.26} имели одинаковый знак и составляли $\Delta E_V = 0.05$ eV в валентной зоне и $\Delta E_C = 0.135$ eV в зоне проводимости. Согласно работам [2,3], гетероструктуры InAs/InAs_{1-y}Sb_y на основе ненапряженных слоев тройного твердого раствора в интервале составов $y < 0.2$ формировали гетеропереходы близкие к I типу с разрывами разного знака на гетерогранице: в валентной зоне до $\Delta E_V = 0.09$ eV и в зоне проводимости до $\Delta E_C = -0.05$ eV. Таким образом, ненапряженная гетероструктура InAs_{1-y}Sb_y/InAs_{1-x-y}Sb_yP_x гипотетически может образовывать гетеропереход I типа. Однако, исходя из особенностей осаждения методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) многокомпонентных твердых растворов, рассогласованных между собой по параметру кристаллической решетки, существует предположение о формировании гетероперехода II типа на гетерогранице InAs_{1-y}Sb_y/InAs_{1-x-y}Sb_yP_x для составов тройного твердого раствора $y > 0.14$ [4,5]. Настоящая работа посвящена определению типа данного гетероперехода и установлению его зонной энергетической диаграммы.

2. Методика создания и исследования гетероструктур

Гетероструктуры n -InAs/ n -InAsSb/ p -InAsSbP были выращены методом МОГФЭ на подложках

InAs (001) с собственной концентрацией электронов $n = 3 \cdot 10^{16}$ cm⁻³. Эпитаксиальное осаждение проводилось при атмосферном давлении в горизонтальном реакторе с резистивным типом нагрева подложкодержателя. Перед процессом эпитаксии подложка отжигалась в атмосфере арсина при температуре 610°C в течение 30 min. Источниками компонент наращиваемых эпитаксиальных слоев на основе твердых растворов в системе In–As–Sb–P являлись металлоорганические соединения (триметилиндий (TMIn) и триметилстибин (TMSb)), а также гидридные газы (арсин (AsH₃) и фосфин (PH₃)). Эпитаксия твердых растворов InAs_{1-y}Sb_y и InAs_{1-x-y}Sb_yP_x производилась при температуре 510°C. В процессе осаждения тройного твердого раствора содержание TMSb в газовой фазе было равно $x_{TMSb}^V = F_{TMSb}/(F_{TMSb} + F_{AsH_3}) = 0.8$, что соответствовало концентрации сурьмы в твердой фазе $y = 0.16$ [4]. Время наращивания эпитаксиального слоя InAs_{0.84}Sb_{0.16} толщиной 3 μm составляло 180 min. Затем на полученный слой был наращен барьерный слой InAs_{1-x-y}Sb_yP_x толщиной 1.2 μm. Предварительная оценка состава четверного твердого раствора, выращенного непосредственно на подложке InAs, указывала на содержание в твердой фазе сурьмы $y = 0.22$ и фосфора $x = 0.47$.

Преднамеренное легирование слоя n -InAsSb не проводилось. В качестве легирующей акцепторной примеси барьерного слоя p -InAsSbP применялся диэтилцинк (DeZn). Время напуска реагентов для осаждения эпитаксиального слоя четырехкомпонентного твердого раствора суммарно составляло 110 min. За 20 min до завершения эпитаксиального наращивания слоя InAsSbP в газовую фазу дополнительно производился напуск DeZn, что позволило сформировать в приповерхностной части полученной гетероструктуры область сильного

легирования ($p \sim 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Профиль легирования в остальной части эпитаксиального слоя определялся экспоненциальным спадом концентрации примеси от заявленного значения до $p \sim 4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ за счет диффузии цинка в глубь структуры [6].

Вольт-амперные (ВАХ) и электролюминесцентные (ЭЛ) характеристики гетероструктуры $n\text{-InAs}/n\text{-InAsSb}/p\text{-InAsSbP}$ были исследованы при температурах $T = 300 \text{ K}$ и $T = 77 \text{ K}$. Спектры ЭЛ регистрировались с помощью автоматизированной установки, которая включала в себя монохроматор DK-480 с дифракционной решеткой 150 mm^{-1} (CVI Laser Corp.), селективный усилитель SR-810 (Stanford Research Systems) и фотovoltaический приемник излучения InSb, охлаждаемый жидким азотом (Judson Co). Для возбуждения ЭЛ использовался генератор прямоугольных импульсов тока с частотой повторения $f = 512 \text{ Hz}$ и длительностью $\tau = 1 \text{ ms}$. Амплитуда импульсов изменялась в диапазоне 20–200 мА. При этом отрицательный потенциал прикладывался к подложке $n\text{-InAs}$, а положительный — к верхнему слою $p\text{-InAsSbP}$ (прямое смещение). Исследование ВАХ также проводилось в импульсном режиме с частотой повторения $f = 512 \text{ Hz}$ и длительностью импульса $\tau = 1 \text{ ms}$.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Спектральные характеристики гетероструктуры $n\text{-InAs}/n\text{-InAsSb}/p\text{-InAsSbP}$ при приложении прямого внешнего смещения представлены на рис. 1. Резкий низкоэнергетический край спектров ЭЛ в районе энергии фотона 0.235 eV определялся „красной“ границей фоточувствительности приемника InSb. Характерный „провал“, наблюдаемый в спектрах ЭЛ в окрестности 0.29 eV, обусловлен поглощением оптического излучения молекулами атмосферного CO_2 [4,5]. В спектрах ЭЛ

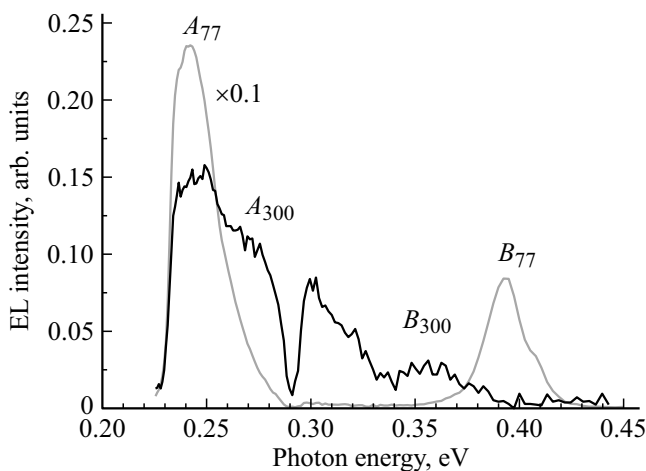


Рис. 1. Спектры электролюминесценции гетероструктуры $n\text{-InAs}/n\text{-InAsSb}/p\text{-InAsSbP}$ при температуре $T = 300 \text{ K}$ (черная линия) и $T = 77 \text{ K}$ (серая линия). Ток накачки равен 50 мА.

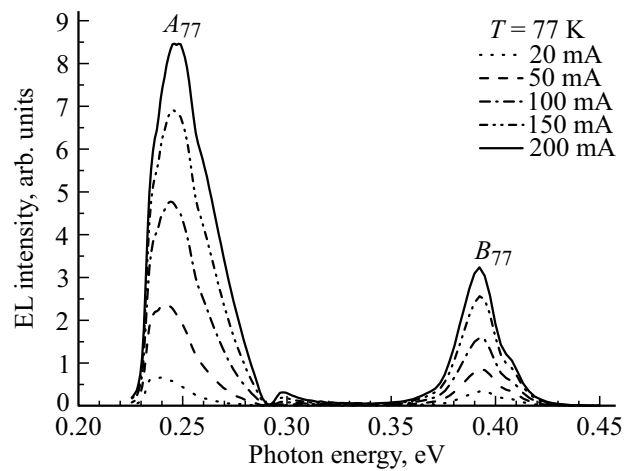


Рис. 2. Спектры ЭЛ гетероструктуры $n\text{-InAs}/n\text{-InAsSb}/p\text{-InAsSbP}$ при $T = 77 \text{ K}$ в зависимости от тока накачки.

исследуемой гетероструктуры при $T = 300 \text{ K}$ наблюдались две полосы излучения: первая, интенсивная, с энергией фотона в максимуме $h\nu_{300}^A \approx 0.25 \text{ eV}$ и вторая $h\nu_{300}^B = 0.36 \text{ eV}$ в виде локального максимума на высокоэнергетическом плече спектра. Полоса A_{300} может быть приписана межзонным рекомбинационным переходам в объеме тройного твердого раствора InAsSb [4], тогда как полоса B_{300} отвечает межзонной излучательной рекомбинации в арсениде индия [7]. Следует отметить, что форма спектров ЭЛ и спектральные положения максимумов обеих полос излучения при комнатной температуре оставались неизменными в диапазоне токов накачки от 20 до 200 мА.

При $T = 77 \text{ K}$ спектры ЭЛ также содержали две ярко выраженные полосы излучения: низкоэнергетическую $h\nu_{77}^A \approx 0.24 \text{ eV}$ и высокоэнергетическую в виде дублета $h\nu_{77}^{B1} = 0.393 \text{ eV}$ и $h\nu_{77}^{B2} = 0.408 \text{ eV}$. Энергия фотона полосы $h\nu_{77}^{B2}$ близка к значению ширины запрещенной зоны арсенида индия при $T = 77 \text{ K}$, тогда как пик $h\nu_{77}^{B1}$ можно приписать излучательным рекомбинационным переходам с участием донорно-акцепторных состояний в объеме нелегированного InAs [8]. При изменении тока накачки от 20 до 200 мА спектральное положение максимума и форма полосы B_{77} оставались неизменными, также как в случае полос A_{300} и B_{300} при комнатной температуре. Низкоэнергетическая полоса A_{77} , напротив, заметно сдвигалась в сторону больших энергий фотона по мере увеличения тока накачки (см. рис. 2).

На рис. 3 представлены значения энергии фотона в максимуме полосы А, полученные из экспериментальных спектров ЭЛ, а также расчетные величины энергии фотона для межзонных излучательных переходов в объеме тройного твердого раствора $\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}$ при температурах $T = 300 \text{ K}$ и $T = 77 \text{ K}$ [4]. Как видно из рисунка, результаты расчета хорошо описываются температурной зависимостью Варшны $E_g = E_{g0} - \alpha \cdot T^2 / (T + \beta)$ с параметрами $\alpha = 2.76 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$ и $\beta = 105 \text{ K}$, которые

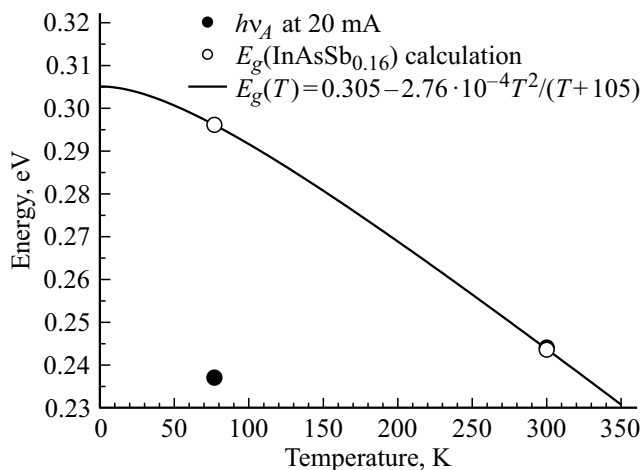


Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}$ от температуры, рассчитанная с помощью формулы Варши (сплошная линия), и значения энергии фотона в максимуме ЭЛ для полос A_{300} и A_{77} , зарегистрированные в эксперименте при токе накачки 20 мА (заполненные круги). Открытые круги — результаты расчета из работы [4].

близки к соответствующим значениям для арсенида индия [9]. При комнатной температуре энергия фотона в максимуме полосы излучения A_{300} совпадает со значением ширины запрещенной зоны тройного твердого раствора $\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}$. При понижении температуры до $T = 77$ К существует значительная разница (порядка 60 meV) между расчетным значением ширины запрещенной зоны тройного твердого раствора $\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}$ и энергией фотона в максимуме излучения полосы A_{77} . Наблюдаемые в эксперименте излучательные переходы A_{77} с энергией фотона меньше ширины запрещенной зоны каждого из полупроводников, составляющих данную гетероструктуру, а также „голубое“ смещение указанной полосы ЭЛ с ростом тока накачки могут указывать на существование канала интерфейсной излучательной рекомбинации на гетерогранице II типа [10]. Для определения данного интерфейса были исследованы ВАХ гетероструктуры и проведены расчеты ее зонной энергетической диаграммы.

На рис. 4 представлены ВАХ, полученные при температурах $T = 300$ К и $T = 77$ К. Обе кривые демонстрировали диодные зависимости тока от приложенного напряжения. В прямой ветви ВАХ величина напряжения отсечки составляла $U_C \approx 0.13$ В при температуре $T = 300$ К и $U_C \approx 0.37$ В при $T = 77$ К. При комнатной температуре наблюдался значительный вклад токов утечек, обусловленных специфической особенностью узкозонных соединений A^3B^5 , составляющих исследуемую гетероструктуру. Качественное изменение формы ВАХ и существенное увеличение величины напряжения отсечки в прямой ветви при понижении температуры говорят о том, что основная часть области пространственного заряда для данной гетероструктуры расположена в объеме

наиболее широкозонного соединения, а именно в барьерном слое InAsSbP . Ранее было показано, что увеличение степени рассогласования между эпитаксиальным слоем InAsSb и подложкой InAs приводило к возрастанию плотности дислокационных дефектов в тройном твердом растворе [4]. Такие дефекты могут препятствовать диффузии примесных атомов цинка из барьерного слоя InAsSbP в глубь узкозонной области светодиода при отсутствии дополнительного термического воздействия на эпитаксиальную гетероструктуру [5,11]. Учитывая особенности ВАХ при $T = 77$ К, можно утверждать, что $n-p$ -переход в исследуемой гетероструктуре располагается вблизи гетерограницы $\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$.

В работе [12] было показано, что при эпитаксиальном наращивании методом МОГФЭ матричная поверхность, на которую идет осаждение, существенно влияет на структурные характеристики наращиваемого соединения. В эпитаксиальном слое $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ в анионной части кристаллической решетки твердого раствора происходит замещение атомов As атомами Sb. В результате, барьерный слой InAsSbP наращивается на матричную поверхность, изначально обогащенную антимонидом. Следовательно, при сохранении технологических условий эпитаксии, отработанных при осаждении данного твердого раствора на подложку InAs , существует вероятность изменения параметра кристаллической решетки покрываемого слоя в сторону больших значений. Таким образом, содержание сурьмы в начальном участке барьерного слоя $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_y\text{P}_x$, наращиваемого на слой твердого раствора $\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}$, возрастало относительно первоначально предполагаемого значения $y = 0.22$ до величины $y = 0.28$. При этом концентрация фосфора падала с $x = 0.47$ до $x = 0.4$ соответственно.

Для построения зонной энергетической диаграммы гетероструктуры $n\text{-InAs}/n\text{-InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/p\text{-InAs}_{0.32}\text{Sb}_{0.28}\text{P}_{0.40}$ (см. рис. 5, а) были рассчитаны значения электронного сродства и ширины запрещенной

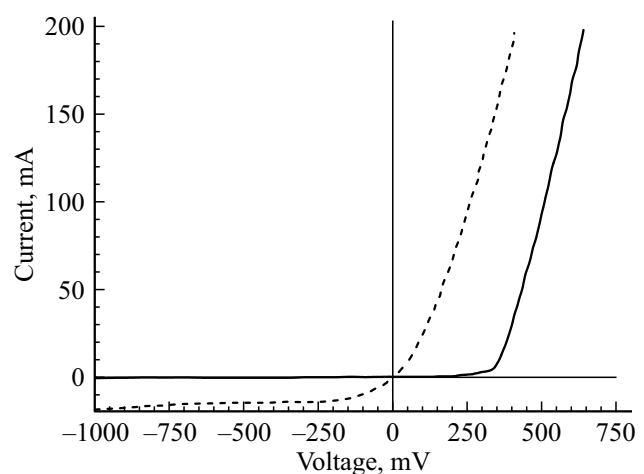


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики гетероструктуры $n\text{-InAs}/n\text{-InAsSb}/p\text{-InAsSbP}$, измеренные при температуре $T = 300$ К (пунктирная линия) и $T = 77$ К (сплошная линия).

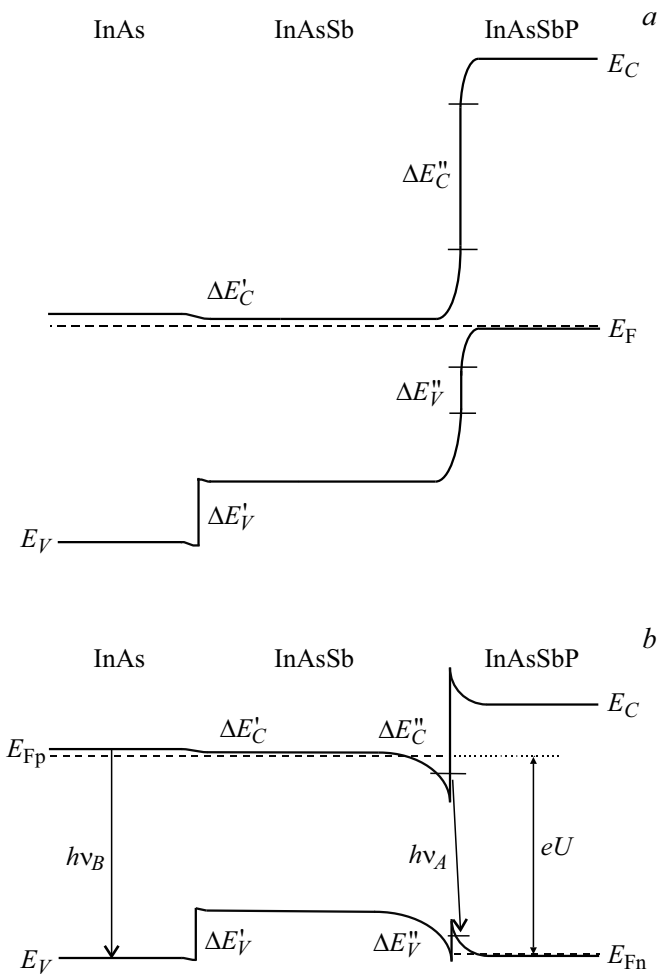


Рис. 5. Схематическая зонная энергетическая диаграмма гетероструктуры II типа $n\text{-InAs}/n\text{-InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/p\text{-InAs}_{0.32}\text{Sb}_{0.28}\text{P}_{0.40}$ в термодинамическом равновесии (а) и при приложении прямого внешнего смещения (б).

зоны твердых растворов InAsSb и InAsSbP. Поскольку твердые растворы в системе In–As–Sb–P имеют общую катионную группу (In) и образуются исключительно замещением атомов V группы в кристаллической решетке, следовательно, их можно представить в виде комбинаций бинарных соединений InAs, InSb и InP [13]. Тогда для оценки параметров зонной структуры в первом приближении (так называемом приближении виртуального кристалла) можно воспользоваться следующим выражением:

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

где A_{ij} — значения ширины запрещенной зоны и электронного сродства бинарных соединений (табл. 1), C_{ijk} — параметры прогиба для тройных соединений,

учитывающие нелинейную зависимость данного параметра от состава (табл. 2) [7].

При расчете величин электронного сродства для тройного и четверного твердых растворов были учтены параметры прогиба b_C . Для тройного твердого раствора InAsSb было использовано соотношение $b_C/b_V = 1.5/1$, найденное ранее для аналогичных систем III(As, Sb) [14,15]. При этом потолок валентной зоны определялся с учетом выражения $b_G = b_C + b_V$. Выполняя расчет по формуле (1), находим $E_g(\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}) = 0.298 \text{ eV}$ и $E_g(\text{InAs}_{0.32}\text{Sb}_{0.28}\text{P}_{0.40}) = 0.487 \text{ eV}$ при $T = 77 \text{ K}$. Для данных составов твердых растворов зонная энергетическая диаграмма гетероструктуры имеет энергетические разрывы в зоне проводимости $\Delta E'_C = -0.002 \text{ eV}$ и $\Delta E'_V = 0.108 \text{ eV}$ в валентной зоне на гетерогранице InAs/InAs_{0.84}Sb_{0.16}, а также $\Delta E''_C = 0.262 \text{ eV}$ и $\Delta E''_V = 0.073 \text{ eV}$ на гетерогранице InAs_{0.84}Sb_{0.16}/InAs_{0.32}Sb_{0.28}P_{0.40}, соответственно (см. рис. 5, а). Таким образом, на второй гетерогранице образуется ступенчатый гетеропереход II типа, где энергетический зазор составляет $\Delta E'' = E_C(\text{InAsSb}) - E_V(\text{InAsSbP}) = 0.225 \text{ eV}$.

При приложении прямого внешнего смещения к исследуемой гетероструктуре при $T = 77 \text{ K}$ в результате изгибов зон на гетерогранице $n\text{-InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/p\text{-InAs}_{0.32}\text{Sb}_{0.28}\text{P}_{0.40}$ формируются потенциальные ямы для электронов и дырок в зоне проводимости и валентной зоне, соответственно (рис. 5, б). Под воздействием внешнего электрического поля происходит аккумуляция носителей заряда в потенциальных ямах, что приводит к образованию уровней локализации. При достижении определенной концентрации локализованных электронов и дырок создаются условия для непрямых

Таблица 1. Значения ширины запрещенной зоны (E_g) и электронного сродства (χ) для бинарных соединений

Бинарное соединение	$E_g, \text{eV} (77 \text{ K})$	χ, eV
InAs	0.408	-4.9
InSb	0.23	-4.59
InP	1.41	-4.38

Таблица 2. Значения параметров прогиба для тройных соединений при расчете ширины запрещенной зоны (b_G) и энергетических положений дна зоны проводимости (b_C) и потолка валентной зоны (b_V) многокомпонентных твердых растворов

Тройное соединение	b_G, eV	b_C, eV	b_V, eV
InAsP	0.101	—	0.101
InSbP	1.83	—	1.83
InAsSb	0.61	0.37	0.24

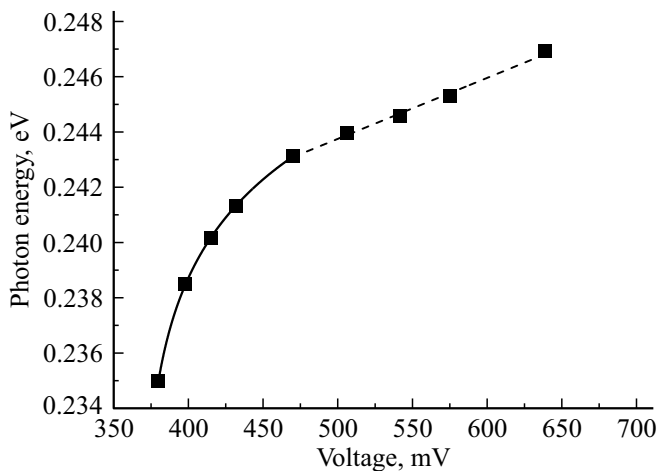


Рис. 6. Зависимость энергии фотона в максимуме полосы излучения A_{77} от внешнего смещения.

излучательных переходов через гетерограницу II типа $\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/\text{InAs}_{0.32}\text{Sb}_{0.28}\text{P}_{0.40}$. Появление полосы A_{77} в спектре ЭЛ было зарегистрировано при смещении $U = 0.38$ V (рис. 2, ток накачки = 20 mA). Последующее увеличение приложенного напряжения приводит к возрастанию концентрации носителей заряда, локализованных в потенциальных ямах по обе стороны гетерограницы, и, соответственно, энергетическое расстояние между уровнями локализации электронов и дырок также увеличивается. В результате максимум полосы A_{77} в спектре ЭЛ сдвигается в сторону больших энергий фотона по мере увеличения внешнего смещения (см. рис. 6). Изменение значения энергии фотона в максимуме полосы A_{77} демонстрирует сублинейную зависимость от величины приложенного смещения в интервале напряжений 0.38 – 0.47 V. Регистрируемый при этом „голубой“ сдвиг составляет порядка 8 meV. Дальнейший рост внешнего смещения приводит к изменению характера зависимости $h\nu_{77}^A(U)$: при $U = 0.47$ V сублинейный участок переходит в линейный. Можно предположить, что на гетерогранице II типа $n\text{-InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/p\text{-InAs}_{0.32}\text{Sb}_{0.28}\text{P}_{0.40}$ потенциальный барьер для одного типа носителей заряда (дырок) становится туннельно-прозрачным и дальнейший „голубой“ сдвиг максимума полосы A_{77} будет определяться заполнением только потенциальной ямы для электронов. В результате интерфейсная рекомбинация происходит между состояниями электронов на квазиуровне Ферми (E_{Fn}) и локализованными дырочными состояниями в потенциальной яме на гетерогранице.

Следует отметить, что спектры ЭЛ не содержали полосы излучения с энергией фотона более 0.45 eV, которые могли бы быть приписаны рекомбинации в барьерном слое $p\text{-InAs}_{0.32}\text{Sb}_{0.28}\text{P}_{0.40}$ Оже-электронов из потенциальной ямы на стороне тройного твердого раствора $n\text{-InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}$, преодолевших потенциальный барьер на гетерогранице $\Delta E_C''$ [15]. При этом отсутствие излучательной рекомбинации в объеме тройного твердого

раствора $\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}$ при низких температурах требует отдельного объяснения, поскольку при комнатной температуре мы наблюдали люминесценцию как из подложки InAs , так и из твердого раствора (см. рис. 1). Мы полагаем, что рассогласование узкозонного слоя $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ относительно подложки более 1% ($y > 0.14$) приводит к формированию в запрещенной зоне твердого раствора глубоких примесных уровней с энергией активации порядка 60 meV [16], вызванных большой концентрацией структурных дефектов. При $T = 77$ K они могут служить центрами безызлучательной рекомбинации за счет захвата инжектированных дырок, преодолевших потенциальный барьер на гетерогранице $\Delta E_V''$. При повышении температуры до $T = 300$ K ($k_B T = 26$ meV) глубокие уровни структурных дефектов могут быть термолизованы и поэтому не будут препятствовать реализации межзонных излучательных переходов в слое тройного твердого раствора. В то же время неоднородности и шероховатости гетерограницы II типа не критичны для непрямых излучательных переходов пространственно разделенных носителей заряда [17].

4. Заключение

На основании результатов исследования электролюминесцентных и вольт-амперных характеристик гетероструктуры $n\text{-InAs}/n\text{-InAsSb}/p\text{-InAsSbP}$ было показано, что на гетерогранице $\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/\text{InAs}_{0.32}\text{Sb}_{0.28}\text{P}_{0.40}$ формируется ступенчатый гетеропереход II типа. При приложении прямого смещения к исследуемой гетероструктуре в спектрах ЭЛ при низких температурах наблюдалась интерфейсная рекомбинация между локализованными состояниями электронов и дырок, пространственно разделенных на гетерогранице II типа. Спектральное положение интерфейсной полосы ЭЛ в начальный момент регистрации определялось энергетическим зазором гетероперехода $\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/\text{InAs}_{0.32}\text{Sb}_{0.28}\text{P}_{0.40}$, что подтверждается результатами расчета зонной энергетической диаграммы гетероструктуры.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М.М. Григорьев, Э.В. Иванов, К.Д. Моисеев. ФТП **45**, 10, 1386 (2011).
- [2] S.-H. Wei, A. Zunger. Phys. Rev. B **52**, 12039 (1995).
- [3] P.T. Webster, N.A. Riordan, S. Liu, E.H. Steenberg, R.A. Synowicki, Y.-H. Zhang, S.R. Johnson. J. Appl. Phys. **118**, 245706 (2015).
- [4] В.В. Романов, Э.В. Иванов, К.Д. Моисеев. ФТТ **61**, 10, 1746 (2019).
- [5] В.В. Романов, И.А. Бельх, Э.В. Иванов, П.А. Алексеев, Н.Д. Ильинская, Ю.П. Яковлев. ФТП **53**, 6, 832 (2019).

- [6] И.А. Андреев, М.А. Афраилов, А.Н. Баранов, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, В.В. Шерстнев, В.Е. Уманский, Ю.П. Яковлев. Письма в ЖТФ **16**, 4, 27 (1990).
- [7] 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.
- [8] Y. Lacroix, C.A. Tran, S.P. Watkins, M.L.W. Thewalt. J. Appl. Phys. **80**, 6416 (1996).
- [9] X. Gong, H. Kan, T. Yamaguchi, I. Suzuki, M. Aoyama, M. Kumagawa, N.L. Rowell, A. Wang, R. Rinfret. Jpn. J. Appl. Phys. **33**, 1740 (1994).
- [10] М.Р. Михайлова, К.Д. Моисеев, Ю.Р. Яковлев. Semicond. Sci. Technol. **19**, R109 (2004).
- [11] В.В. Романов, Э.В. Иванов, К.Д. Моисеев, А.А. Пивоварова, Ю.П. Яковлев. ФТП **54**, 2, 202 (2020).
- [12] В.В. Романов, П.А. Дементьев, К.Д. Моисеев. ФТП **50**, 7, 927 (2016).
- [13] Н.А. Чарыков, А.М. Литвак, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. ФТП **31**, 4, 410 (1997).
- [14] K.D. Moiseev, V.V. Romanov, T.I. Voronina, T.S. Lagunova, M.P. Mikhailova, Yu.P. Yakovlev. J. Cryst. Growth **310**, 4846 (2008).
- [15] М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, Г.Г. Зегря, И.Н. Тимченко, Ю.П. Яковлев. ФТП **29**, 4, 687 (1995).
- [16] V. Vankova, P. Gladkov, J.R. Botha. J. Cryst. Growth **275**, e1109 (2005).
- [17] М.Р. Михайлова, К.Д. Моисеев, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, Ю.Р. Яковлев. J. Appl. Phys. **102**, 113710 (2007).

Редактор Д.В. Жуманов