

Переход от разъединенного гетероперехода II типа к ступенчатому в системе GaInAsSb/InAs(GaSb)

© М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев[¶], Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, Ю.П. Яковлев

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

(Получена 20 июля 2006 г. Принята к печати 28 июля 2006 г.)

Рассмотрены условия перехода от ступенчатого к разъединенному гетеропереходу II типа для одиночных гетероструктур $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{InAs}(\text{GaSb})$ в зависимости от состава четверного твердого раствора. Оценены зонные диаграммы таких гетеропереходов и определены величины энергетического разрыва зон Δ на гетерогранице. Экспериментально установлено, что для структуры $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$ разъединенный тип гетероперехода II типа наблюдается во всем интервале исследуемых составов, $0.03 < x < 0.23$, и становится ступенчатым в интервале составов с $0.3 < x < 1$. В гетероструктурах $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-GaSb}$ при содержании индия в твердой фазе $0.85 < x < 0.92$ наблюдается дырочный тип проводимости, что свидетельствует о ступенчатом характере гетероперехода. При значении $x > 0.92$ наблюдался вклад в проводимость электронов из полуметаллического канала на гетерогранице и переход от ступенчатого к разъединенному типу гетероперехода.

PACS: 73.40.-c, 73.40.Kp, 73.50.Dn

1. Введение

Твердые растворы $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, изопериодные с подложками GaSb и InAs, перекрывают спектральный диапазон от 1.8 до 4.8 мкм, актуальный для задач газового анализа, экологического мониторинга, медицинской диагностики [1–4]. Эти материалы перспективны для создания оптоэлектронных приборов среднего инфракрасного диапазона — лазеров [5,6], светодиодов [7,8], фотодиодов [9], а также для задач спинтроники [10].

Интерес к системе GaInAsSb/InAs(GaSb) обусловлен также и тем, что, варьируя состав твердого раствора, можно менять степень перекрытия энергетических зон на гетерогранице с GaSb и InAs и получать как ступенчатые, так и разъединенные гетеропереходы [11]. Типичные зонные диаграммы ступенчатых (staggered) и разъединенных (broken-gap) гетеропереходов II типа приведены на рис. 1. Ступенчатое расположение зон означает, что скачок потенциала на гетерогранице имеет одинаковый знак в зоне проводимости (E_C) и в валентной зоне (E_V). В разъединенном гетеропереходе GaSb–InAs из-за разницы между величинами электронного сродства контактирующих материалов, превышающей ширину запрещенной зоны GaSb, дно зоны проводимости более узкозонного полупроводника (InAs) лежит ниже потолка валентной зоны более широкозонного (GaSb), так что на гетерогранице имеется разрыв энергетических зон $\Delta = 150$ мэВ при температуре $T = 300$ К [12].

Отличительной особенностью гетеропереходов II типа от гетеропереходов I типа является пространственное разделение электронов и дырок на границе и их локализация в самосогласованных квантовых ямах по обе стороны гетерограницы. Излучение в гетероструктурах II типа возникает за счет не прямых (туннельных) рекомбинационных переходов электронов и ды-

рок через гетерограницу [13]. При изменении состава твердого раствора $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ меняется взаимное расположение энергетических зон на гетерогранице, что приводит к изменению перекрытия волновых функций носителей заряда вблизи интерфейса. Это обуславливает уникальные электрические, рекомбинационные, фотоэлектрические, люминесцентные и транспортные свойства гетероструктур на основе этого твердого раствора.

Благодаря малой величине эффективной массы электронов в узкозонном материале ($m_e = 0.024\text{--}0.038m_0$) условия для образования квантово-размерных потенциальных ям на границе раздела в одиночных гетероструктурах в системе твердых растворов GaSb–InAs меньше зависят от требований к резкости гетерограницы, чем, например, в гетеропереходах на основе GaAs/GaAlAs. Это позволяет создавать квантово-размерные структуры методом жидкофазной эпитаксии [2].

В связи с этим представляется интересным исследовать переход от ступенчатого гетероперехода II типа к разъединенному в зависимости от состава твердого

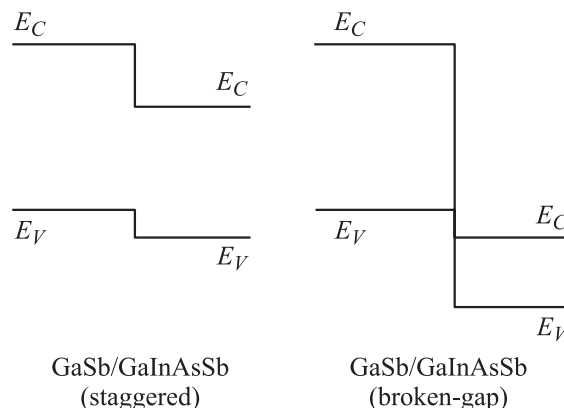


Рис. 1. Гетеропереходы II типа в системе твердых растворов GaInAsSb.

[¶] E-mail: mkd@iropt2.ioffe.rssi.ru

раствора и, следовательно, от зонных параметров гетероструктур GaInAsSb/InAs(GaSb). Такие исследования важны и с практической точки зрения для конструирования оптоэлектронных приборов.

В настоящей работе рассмотрены условия перекрытия энергетических зон на границе раздела в одиночных гетероструктурах II типа $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{InAs}(\text{GaSb})$ в зависимости от состава твердого раствора и температуры и установлены границы перехода от ступенчатого гетероперехода II типа к разьединенному.

2. Разьединенные гетеропереходы II типа $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{InAs}$ в области существования составов с $0.03 < x < 0.23$

Изопериодные одиночные гетероструктуры $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{InAs}$ были получены методом жидкофазной эпитаксии на подложке InAs (100). Высокое качество границы раздела и планарность эпитаксиального наращивания слоев в исследуемых гетероструктурах были подтверждены в ходе комплексного исследования при помощи методов просвечивающей микроскопии и рентгеновской дифрактометрии [14]. Ранее мы сообщали об обнаружении электронного канала на разьединенной гетерогранице в одиночных гетероструктурах II типа $p\text{-GaIn}_{0.16}\text{As}_{0.22}\text{Sb}/p\text{-InAs}$ [15].

Электронный канал на одиночной разьединенной гетерогранице II типа существует благодаря пространственному разделению носителей, локализованных в самосогласованных потенциальных ямах по разные стороны границы раздела (рис. 2). Было установлено, что электроны в канале обладают высокой подвижностью, $\mu_n = (5-7) \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 77 \text{ К}$, в гетероструктурах с нелегированными слоями твердого раствора

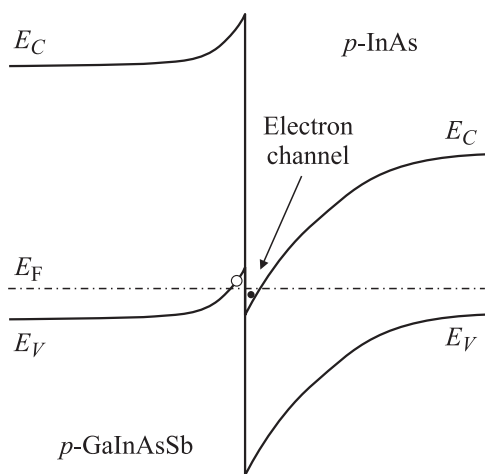


Рис. 2. Разьединенный гетеропереход II типа $p\text{-GaIn}_{0.16}\text{As}_{0.22}\text{Sb}/p\text{-InAs}$ в термодинамическом равновесии. Стрелкой отмечен электронный канал, расположенный на гетерогранице II типа со стороны $p\text{-InAs}$. E_F — уровень Ферми.

GaInAsSb. При этом величина холловской подвижности μ_H слабо меняется при понижении температуры от $T = 200 \text{ К}$ вплоть до гелиевых температур, $T = 2 \text{ К}$. При сильном легировании твердого раствора акцепторными примесями наблюдалось разное уменьшение подвижности, обусловленное сужением и истощением электронного канала и дополнительным механизмом рассеяния носителей на шероховатостях гетерограницы [16]. Увеличение уровня легирования твердого раствора акцепторной примесью приводило к уменьшению эффективного энергетического зазора на разьединенной гетерогранице II типа $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$ и к исчезновению электронного канала.

Аналогичный эффект может быть достигнут также при изменении состава твердого раствора GaInAsSb. Основные параметры гетероструктур $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}:\text{Mn}$ с различным содержанием индия ($x = 0.04, 0.09, 0.16, 0.22$) для $T = 77 \text{ К}$, полученные при исследовании магнитооттока в слабых магнитных полях, представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, при всех составах твердого раствора знак эдс Холла в гетероструктурах указывает на электронный тип проводимости. Значения подвижности составляли $(3-5.4) \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, и, следовательно, основной вклад в холловскую подвижность вносят электроны из электронного канала на гетерогранице. Величина подвижности для фиксированного значения магнитного поля убывала с увеличением содержания индия в твердом растворе.

Значения ширины электронного канала (d) на границе раздела GaInAsSb/InAs, рассчитанные из величины подвижности для всех исследованных образцов, указывают на то, что ширина электронного канала на уровне Ферми уменьшается с ростом содержания индия в твердом растворе; для состава с $x = 0.22$ ширина канала составляет $d \approx 150 \text{ \AA}$ (см. табл. 1). В этом случае можно говорить об истощении электронного канала и возможности перехода от полуметаллической к полупроводниковой проводимости на гетерогранице. Причина наблюдаемого явления заключается в изменении взаимного расположения энергетических зон твердого раствора GaInAsSb и подложки InAs на гетерогранице.

Рассмотрим, как меняются энергетические диаграммы гетероструктур $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$ в зависимости от содержания индия в твердом растворе. Для оценки взаимного расположения зон и величины энергетического зазора Δ между потолком валентной зоны твердого раствора GaInAsSb и дном зоны проводимости InAs в исследуемых гетероструктурах использовалось правило электронного сродства [17]. Согласно этому правилу, энергетический зазор на гетерогранице определяется как

$$\Delta = \Delta E_C - \Delta E_{g1} = \chi_1 - \chi_2 - E_{g1}, \quad (1)$$

где ΔE_C — разрыв в зоне проводимости на гетерогранице, E_{g1} — ширина запрещенной зоны твердого раствора, χ_1 и χ_2 — величины электронного сродства

Таблица 1. Основные характеристики одиночных разьединенных гетероструктур II типа $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$ на основе нелегированных твердых растворов разного состава при $T = 77\text{ K}$

№ образца	x	σ , $\text{см}^{-1} \cdot \text{Ом}^{-1}$	R_H , $\text{см}^2/\text{Кл}$	μ_H , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	d , Å	N_s , 10^{11}см^{-2}
1	0.04	0.044	$-1.2 \cdot 10^6$	54000	370	6
2	0.09	0.064	$-8.9 \cdot 10^5$	65000	400	10
3	0.16	0.045	$-6.7 \cdot 10^5$	30000	310	6
4	0.22	0.05	$-6 \cdot 10^5$	22000	150	0.8

Примечание. σ — проводимость, N_s — концентрация электронов в канале, R_H — коэффициент Холла.

для твердого раствора и InAs. Расчет величины электронного сродства для твердого раствора был выполнен по модели линейной комбинации вкладов от бинарных соединений, входящих в состав взаимной квазитройной системы твердых растворов GaInAsSb (см. табл. 2):

$$\chi(\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}) = \chi_{\text{GaSb}}(1-x)(1-y) + \chi_{\text{InAs}}xy + \chi_{\text{GaAs}}(1-x-y) + \chi_{\text{InSb}}x(1-y), \quad (2)$$

где используются значения электронного сродства бинарных соединений $\chi_{\text{InAs}} = -4.9\text{ эВ}$, $\chi_{\text{InSb}} = -4.59\text{ эВ}$, $\chi_{\text{GaAs}} = -4.07\text{ эВ}$ и $\chi_{\text{GaSb}} = -4.06\text{ эВ}$ [18]. С учетом полученных величин электронного сродства χ для четверного твердого раствора была оценена величина энергетического зазора Δ на гетерогранице при $T = 77\text{ K}$ в гетероструктурах GaInAsSb/InAs на основе эпитаксиальных слоев различного состава.

Таблица 2. Значения энергетического зазора Δ на гетерогранице в структурах $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$ в зависимости от содержания In в твердом растворе

№ образца	x	χ_1 , эВ	χ_2 , эВ	E_{g1} , эВ ($T = 77\text{ K}$)	Δ , эВ ($T = 77\text{ K}$)
1	0.04	-4.095	-4.9	0.735	-0.07
2	0.09	-4.136	-4.9	0.675	-0.088
3	0.16	-4.2	-4.9	0.635	-0.065
4	0.22	-4.246	-4.9	0.61	-0.042

Ширина запрещенной зоны твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ в диапазоне составов с $0.03 < x < 0.23$ и $y = 0.06 + x$, определенная из спектров фотолюминесценции, находится в энергетическом интервале $0.5\text{--}0.8\text{ эВ}$ (рис. 3). Точками показаны экспериментальные данные, полученные из наших работ [19–21] по спектрам фотолюминесценции и фототока фотодиодной структуры, а также данные работ [3,22]. Как видно из рис. 3, ширина запрещенной зоны четверного твердого раствора достаточно сильно зависит от состава твердой фазы для широкозонных эпитаксиальных слоев в интервале содержания индия $x < 0.28$, тогда как в области составов с $x > 0.70$ наблюдается слабая зависимость. Линиями показаны расчетные аппроксимирующие зависимости ширины запрещенной зоны при $T = 80\text{ K}$ от состава четверных

твердых растворов GaInAsSb, изопериодных с подложками InAs (сплошная) и GaSb (штриховая). Кривые построены по экспериментальным точкам с использованием метода наименьших квадратов.

Из табл. 2 видно, что с увеличением содержания индия в четверном твердом растворе величина энергетического зазора монотонно изменяется от -0.07 до -0.04 эВ , достигая максимального значения $\Delta = -0.09$ при $x = 0.09$. Такой гетеропереход для составов твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ с содержанием индия в интервале $0.03 < x < 0.23$ все еще остается разьединенным гетеропереходом II типа (рис. 4). Таким образом, электронный канал существует во всем указанном интервале составов твердого раствора.

Как известно, в интервале $0.3 < x < 0.7$ имеется обширная область несмешиваемости для твердых растворов GaInAsSb, выращиваемых на подложках GaSb и InAs [23]. Следовательно, согласно нашим расчетам

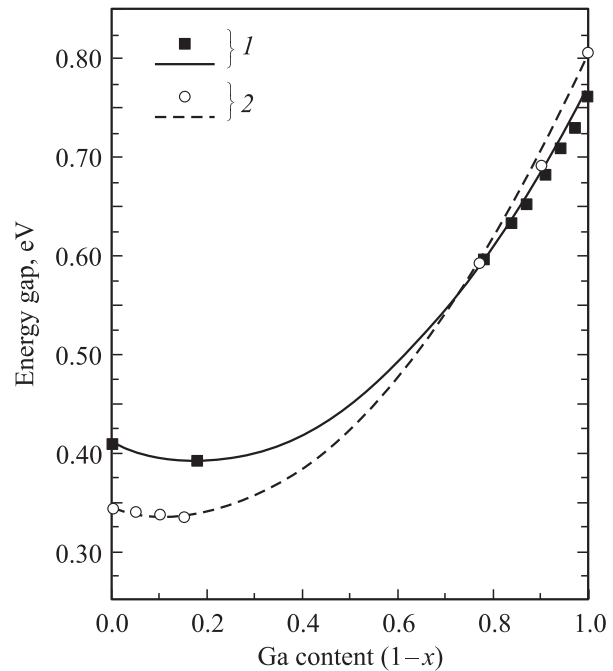


Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны четверного твердого раствора $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ от состава при $T = 77\text{ K}$. 1 — твердые растворы, изопериодные с InAs; 2 — твердые растворы, изопериодные с GaSb. Точки — эксперимент, линии — аппроксимационный расчет.

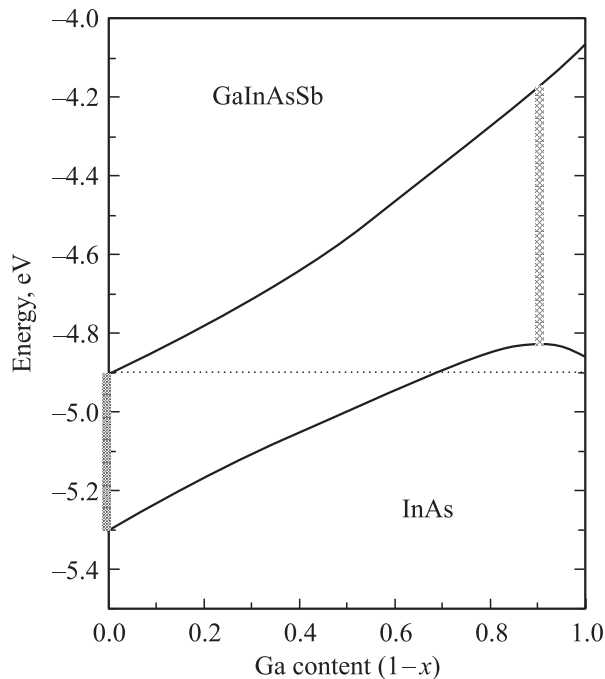


Рис. 4. Зависимости энергетического положения дна зоны проводимости и потолка валентной зоны в гетеропереходе II типа GaInAsSb/InAs от состава твердого раствора. Ширина запрещенной зоны твердого раствора GaIn_{0.1}As_{0.16}Sb и подложки InAs показана в виде вертикальных отрезков, ограниченных кривыми.

можно ожидать, что проводимость в гетеропереходе II типа Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/InAs меняется от полуметаллической к полупроводниковой вблизи состава твердого раствора с $x \approx 0.3$ и может наблюдаться переход от разьединенного гетероперехода к ступенчатому. Графически это можно представить как точку пересечения кривой, отвечающей изменению энергетического положения потолка валентной зоны четверного твердого раствора, и пунктирной линии, отвечающей энергии дна зоны проводимости InAs (см. рис. 4).

3. Переход от ступенчатого гетероперехода II типа к разьединенному в гетероструктурах GaInAsSb/GaSb

Четверные твердые растворы Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}, изопериодные с подложкой GaSb, были выращены методом жидкофазной эпитаксии в двух диапазонах составов: широкозонные с $0.53 < E_{g1} < 0.72$ ($x < 0.28$) и узкозонные с $0.26 < E_{g1} < 0.36$ эВ ($x > 0.70$). На рис. 3 представлена зависимость ширины запрещенной зоны E_{g1} от состава при выполнении условия $y = 0.9x$. Минимальное значение ширины запрещенной зоны твердого раствора Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y} для $0.80 < x < 0.95$ составляло $E_{g1} = 0.26$ эВ при $T = 300$ К [11].

При исследовании гетероструктур с эпитаксиальными слоями, выращенными на подложке GaSb и легированными акцепторными примесями Zn и Mn (концентрация легирующих примесей $\sim 10^{-3}$ ат%), было установлено, что для гетероструктур p -Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/ p -GaSb с $x < 0.92$ характерен дырочный тип проводимости при температуре $T = 77$ К. Величина холловской подвижности носителей заряда менялась в пределах $\mu_H \approx 200-500$ см²/В·с, что свидетельствует о ступенчатом типе гетероперехода.

При содержании индия в твердом растворе $x = 0.92$ наблюдались смена знака коэффициента Холла и небольшой рост величины подвижности с повышением температуры от $T = 77$ до 300 К (от 200 до 1000 см²/В·с). Это свидетельствует о появлении электронов на гетерогранице вследствие изменения зонной диаграммы гетероструктуры Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/GaSb при переходе от ступенчатого гетероперехода II типа к разьединенному с повышением температуры за счет уменьшения ширины запрещенной зоны GaSb.

В гетероструктурах Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/GaSb для составов с $x = 0.85$ и 0.92 наблюдается существенное различие магнитотранспортных свойств — в поведении коэффициента Холла от напряженности магнитного поля. Для образца с $x = 0.85$ коэффициент Холла не менялся с ростом напряженности магнитного поля, что характерно для проводимости с участием носителей одного типа (электронов в твердом растворе), в то же время при $x > 0.92$ наблюдается двукратное уменьшение коэффициента Холла, что указывает на участие в магнитотранспорте двух сортов носителей тока (электронов в твердом растворе и в электронном канале на гетерогранице).

В гетероструктурах II типа p -Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/ p -GaSb при $x = 0.95$ и аналогичном уровне легирования Zn во всем интервале температур проявляется вклад в проводимость гетероперехода электронов из полуметаллического канала на гетерогранице и величина холловской подвижности возрастает до $\mu_H = 3000$ см²/В·с, что свидетельствует об образовании разьединенного гетероперехода II типа. Следует отметить, что коэффициент Холла в этом случае не зависит от температуры и напряженности магнитного поля.

Поскольку величина энергетического разрыва зон Δ на гетерогранице определяется разностью электронного сродства χ_1 для твердого раствора GaInAsSb и χ_2 для подложки GaSb, в случае, если эта разность по абсолютному значению больше ширины запрещенной зоны твердого раствора, образуется ступенчатый гетеропереход II типа, если меньше, то образуется разьединенный гетеропереход. На рис. 5 представлена зависимость величины разрыва зон Δ на гетерогранице для гетеропереходов GaInAsSb/GaSb в зависимости от состава твердого раствора с содержанием индия $x > 0.80$, рассчитанная согласно выражениям (1), (2). На вставках схематически показаны зонные диаграммы ступенчатого гетероперехода II типа (вверху) и разьединенного (внизу).

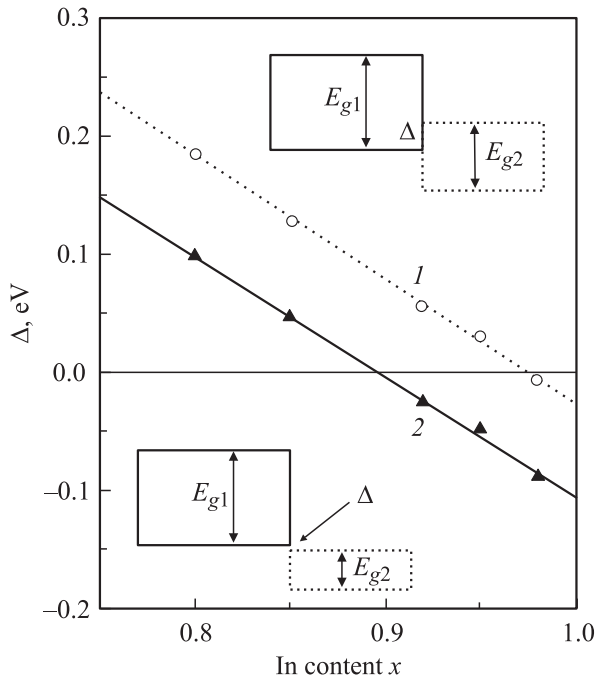


Рис. 5. Переход от ступенчатого расположения энергетических зон к разьединенному в гетеропереходе II типа GaInAsSb/GaSb для различных температур: 1 — 77 К, 2 — 300 К. На вставках — зонные диаграммы ступенчатого (вверху) и разьединенного (внизу) гетероперехода II типа. E_{g1} и E_{g2} — ширина запрещенной зоны твердого раствора и GaSb соответственно.

Как видно из рис. 5, в гетеропереходах $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{GaSb}$ в области составов с $x < 0.85$ реализуется ступенчатый гетеропереход во всем интервале температур от $T = 77$ до 300 К, а при $x > 0.95$ гетеропереход становится разьединенным. Интересно отметить, что при $x \approx 0.92$ из-за температурной зависимости ширины запрещенной зоны для GaSb тип гетероперехода изменяется с температурой: с ростом температуры можно ожидать перехода от ступенчатого гетероперехода к разьединенному. Это подтверждается экспериментально измерением подвижности носителей. Подвижность электронов в разьединенных гетеропереходах II типа GaInAsSb/GaSb ($\mu_n \approx 1000\text{--}3000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) существенно выше, чем в ступенчатых, что свидетельствует о наличии электронного канала в таких гетеропереходах.

Недавно в теоретической работе [24] методом псевдопотенциала был проведен расчет эволюции ширины запрещенной зоны и энергий краев зон E_V и E_C для изопериодных гетероструктур II типа GaInAsSb/GaSb и GaInAsSb/InAs как функции состава четверных слоев с учетом параметров прогиба. Расчет положения краев зон E_C и E_V для широкозонных твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{GaSb}$ ($0.11 < x < 0.18$) находится в хорошем согласии с экспериментальными данными по разрывам зон между четверным раствором и GaSb ($\Delta E_C = 160, 205, 250 \text{ мэВ}$ для составов с

$x = 0.11, 0.14$ и 0.18 соответственно и $\Delta E_V = 50 \text{ мэВ}$ для $x = 0.18$ [11]). Соответствующие расчетные значения $\Delta E_C = 118 \text{ мэВ}$ и $\Delta E_V = 15 \text{ мэВ}$ для $x = 0.1825$, полученные в работе [24], находятся в разумном согласии с экспериментом. В работе [24] также приведены расчетные значения параметров твердого раствора для перехода от ступенчатого гетероперехода II типа к разьединенному в структуре GaInAsSb/GaSb. Полученные значения для содержания компонент твердого раствора $x = 0.92$ и $y = 0.81$ находятся в хорошем согласии с нашими данными (см. рис. 5).

В работе [25] были исследованы узкозонные гетеропереходы в системе $p\text{-GaSb}/n\text{-InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 < x < 0.18$), выращенные методом эпитаксии из металлорганических соединений на подложках GaSb. Из исследований спектров фотолюминесценции и вольт-амперных характеристик было установлено, что гетеропереход $p\text{-GaSb}/n\text{-InAs}_{0.82}\text{Sb}_{0.18}$ является разьединенным гетеропереходом II типа, что также согласуется с расчетами работы [24].

4. Заключение

В работе изучены условия перехода от ступенчатой (staggered) гетероструктуры II типа к разьединенной (broken-gap) в системе твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, выращенных на подложках InAs и GaSb. Рассмотрены зонные диаграммы гетеропереходов II типа и условия перекрытия зон на гетерогранице в зависимости от состава твердого раствора, полученные при исследовании электрических, оптических и магнитотранспортных свойств гетеропереходов в системе GaInAsSb/InAs(GaSb). Показано, что в гетеропереходе $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$ существование электронного канала с высокой подвижностью, $\mu_n = (5\text{--}7) \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, во всем интервале исследуемых составов ($0.03 < x < 0.22$) свидетельствует о наличии разьединенного гетероперехода II типа. Ступенчатые гетеропереходы могут быть получены в интервале $0.3 < x < 1$.

Детально исследован переход от ступенчатого к разьединенному гетеропереходу для структур $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{GaSb}$, выращенных в двух диапазонах составов: широкозонных ($x < 0.28$) и узкозонных ($x > 0.70$). Минимальное значение ширины запрещенной зоны $E_{g1} = 0.26 \text{ эВ}$ при $T = 300 \text{ К}$ было получено для содержания индия в твердой фазе в интервале $0.80 < x < 0.95$. Установлено, что гетероструктуры GaInAsSb/GaSb на основе твердых растворов в интервале составов с $x < 0.28$ являются ступенчатыми гетеропереходами II типа. Гетероструктуры GaInAsSb/ $p\text{-GaSb}$ на основе узкозонных твердых растворов при $x < 0.92$ также демонстрируют дырочный тип проводимости с подвижностью носителей заряда $\mu_n = 200\text{--}500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, что свидетельствует о ступенчатом характере гетероперехода. При содержании индия $x = 0.92$ наблюдалась смена знака коэффициента

Холла и появление электронной подвижности $\mu_n = 1000\text{--}3000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ за счет вклада в проводимость электронов из полуметаллического канала и образования разьединенного гетероперехода.

Эти результаты хорошо согласуются с данными эволюции ширины запрещенной зоны и энергии положения краев зон E_V и E_C , полученными с помощью теоретических расчетов методом псевдопотенциала для изопериодных гетероструктур II типа GaInAsSb/InAs и GaInAsSb/GaSb как функции состава четверных слоев.

Работа поддержана грантами РФФИ № 06-02-16470, президиума РАН, Отделения физических наук РАН и НШ-5180.2006.2.

Список литературы

- [1] A.I. Nadezhdinsky, A.M. Prokhorov. SPIE, **1724**, 2 (1992).
- [2] А.Н. Баранов, Б.Е. Джуртанов, А.Н. Именков, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **12**, 664 (1986).
- [3] J.C. DeWinter, M.A. Pollak, A.K. Srivastava, J.L. Zyskind. J. Electron. Mater., **14**, 729 (1995).
- [4] T.S. Hasenberg, R.H. Miles, A.R. Kost, L. West. IEEE J. Quant. Electron., **33**, 1403 (1997).
- [5] A.N. Baranov, N. Bertu, J. Cuminal, G. Boissier, C. Alibert, A. Joullie. Appl. Phys. Lett., **71**, 735 (1997).
- [6] К.Д. Моисеев, О.Г. Ершов, М.П. Михайлова, Г.Г. Зегря, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **23**, 151 (1997).
- [7] А.А. Андаспаева, А.Н. Баранов, А.А. Гусейнов, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, Е.А. Сидоренкова, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **15**, 71 (1989).
- [8] Н.Д. Стоянов, Б.Е. Журтанов, А.П. Астахова, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **37**, 996 (2003).
- [9] Н.Д. Стоянов, М.П. Михайлова, О.В. Андрейчук, К.Д. Моисеев, И.А. Андреев, М.А. Афрайлов, Ю.П. Яковлев. ФТП, **35**, 467 (2003).
- [10] V.I. Pereł, S.A. Tarasenko, I.N. Yassievich, S.D. Ganichev, V.V. Bel'kov, W. Prettl. Phys. Rev. B, **67**, 201 304 (2003).
- [11] M.P. Mikhailova, A.N. Titkov. Semicond. Sci. Technol., **9**, 1279 (1994).
- [12] S.A. Sai-Halasz, L. Esaki, W. Harrison. Phys. Rev. B, **18**, 2812 (1978).
- [13] H. Kroemer, G. Griffiths. Electron. Dev. Lett., **4**, 20 (1983).
- [14] К.Д. Моисеев, А.А. Ситникова, Н.Н. Фалеев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **34**, 1438 (2000).
- [15] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **30**, 985 (1996).
- [16] M.P. Mikhailova, K.D. Moiseev, T.I. Voronina, T.S. Lagunova, A.F. Lipaev, Yu.P. Yakovlev. Proc. 14th Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“ (St. Petersburg, Russia, 2006) p. 180.
- [17] C.G. Van der Walle. Phys. Rev. B, **39**, 1871 (1987).
- [18] *Handbook of Electronic Materials*, ed. by M. Neuberger (IFI/plemun, N.Y., 1971) v. II, p. 258.
- [19] К.Д. Моисеев, А.А. Торопов, Я.В. Терентьев, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. ФТП, **34**, 1432 (2000).
- [20] K.D. Moiseev, A. Krier, Yu.P. Yakovlev. J. Electron. Mater., **33**, 867 (2004).
- [21] М.А. Афрайлов, А.Н. Баранов, А.П. Дмитриев, М.П. Михайлова, В.В. Шерстнев, И.Н. Ясиевич, Ю.П. Яковлев. ФТП, **24**, 1397 (1990).
- [22] F. Karouta, H. Mani, J. Bhan, J. Hua, A. Joullie. Rev. Phys. Appl., **22**, 145 (1987).
- [23] А.Н. Баранов, А.М. Литвак, К.Д. Моисеев, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ЖПХ, **67**, 1951 (1994).
- [24] R. Magri, A. Zunger, H. Kroemer. J. Appl. Phys., **98**, 043 701 (2005).
- [25] С.С. Кижжаев, С.С. Молчанов, Н.В. Зотова, Е.А. Гребенщикова, Ю.П. Яковлев, Э. Гулициус, Т. Шимичек, К. Мелихар, И. Панграц. Письма ЖТФ, **27**, 966 (2001).

Редактор Л.В. Шаронова

Transition from a staggered type II heterojunction to the broken-gap in a GaInAsSb/InAs(GaSb) system

M.P. Mikhailova, K.D. Moiseev, T.I. Voronina, T.S. Lagunova, Yu.P. Yakovlev

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

Abstract Conditions for the transition from the staggered type II heterojunction to a broken-gap one were considered for $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{InAs}$ (GaSb) single heterostructures as function of the content of the quaternary solid solution. Energy band diagrams of these heterojunctions were estimated and values of the energy gap at the heterointerface Δ were defined. It was experimentally established that $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$ heterostructure forms the type II broken-gap heterojunction at the content range $0.03 < x < 0.23$ and becomes the staggered one at the range $0.3 < x < 1$. The $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-GaSb}$ heterostructures exhibit a hole type of the conductivity at the induim content range $0.85 < x < 0.92$, that corresponds to the staggered heterojunction. At $x > 0.92$ the contribution of electrons of semimetal channel at the interface into the total conductivity was observed and it was determined the transition from a staggered to a broken-gap type II heterojunction.