

Гетеропереходы II типа в системе InGaAsSb/GaSb: магнитотранспортные свойства

© Т.И. Воронина, Б.Е. Журтанов, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, А.Е. Розов, Ю.П. Яковлев

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

(Получена 26 июля 2000 г. Принята к печати 2 августа 2000 г.)

Исследован магнитотранспорт в узкозонных гетеропереходах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{GaSb}$, полученных методом жидкофазной эпитаксии с различным составом In в твердом растворе ($x = 0.85-0.95$, $E_g \leq 0.4$ эВ). Показано, что в зависимости от содержания In в этих гетероструктурах может быть реализован ступенчатый гетеропереход II типа (при $x = 0.85$) или разьединенный гетеропереход (при $x = 0.95$) с высокоподвижным электронным каналом на гетерогранице ($\mu \simeq 20\,000$ см²/В·с). При $x = 0.92$ в зависимости от температуры наблюдаются оба типа гетеропереходов. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с зонной энергетической диаграммой изучаемых гетероструктур II типа InGaAsSb/GaSb.

1. Введение

В последние годы большое внимание исследователей привлекают гетеропереходы II типа InAs/GaSb с перекрывающимися запрещенными зонами (*broken-gap alignment*). В таком гетеропереходе валентная зона широкозонного полупроводника расположена по энергии выше зоны проводимости узкозонного таким образом, что на границе имеется энергетический зазор $\Delta \simeq 150$ мэВ [1]. За счет перетекания электронов через гетерограницу на гетерогранице образуется электронный канал, свойства которого могут быть модулированы с помощью света, а также электрического или магнитного полей [1].

Аналогом гетеросистемы InAs/GaSb являются гетеропереходы II типа на основе четверных твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, изопериодные к подложкам как InAs, так и GaSb. Магнитотранспортные, фотоэлектрические и люминесцентные свойства гетеропереходов GaInAsSb/InAs были детально изучены в работах [2–6]. Было установлено, что на изотипной гетерогранице $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$ с широкозонным четверным слоем ($x < 0.22$) существует электронный канал с высокой подвижностью носителей, расположенный со стороны InAs. Свойства канала изменяются в зависимости от состава и уровня легирования твердого раствора. При совместном исследовании магнитотранспорта и электролюминесценции в этой системе при гелиевых температурах была установлена зонная энергетическая диаграмма гетероперехода и энергетический спектр двухмерных носителей на гетерогранице [6]. В то же время свойства узкозонных гетеропереходов II типа, выращенных на подложке GaSb [7], изучены недостаточно.

Данная работа является продолжением цикла исследований гетероструктур II типа на основе четверных твердых растворов и посвящена изучению магнитотранспортных свойств гетеропереходов в структурах с узкозонным твердым раствором InGaAsSb/GaSb. В работе исследуются электропроводность, эффект Холла и

подвижность при $T = 77-300$ К в гетероструктурах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{SbAs}/\text{GaSb}$ с различным составом твердого раствора ($x = 0.85, 0.92, 0.95$). При этом твердый раствор был как нелегированный, так и легированный акцепторными примесями. В качестве материала подложки использовался либо $n\text{-GaSb}$, либо $p\text{-GaSb}$.

Цель данной работы — определение характера таких гетеропереходов, выявление области существования разьединенного гетероперехода и условий образования полуметаллического канала на гетерогранице при комнатной температуре.

2. Энергетическая диаграмма гетероперехода InGaAsSb/GaSb

Для определения типа гетероперехода представляет интерес рассмотрение его энергетической диаграммы. Согласно правилу электронного сродства [8], разрыв в зоне проводимости на гетеропереходе равен разности значений электронного сродства двух полупроводников $\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2$. Для гетеропары InAs/GaSb ($\chi_{\text{InAs}} = 4.9$ эВ, $\chi_{\text{GaSb}} = 4.06$ эВ [9]) правило электронного сродства дает значение разрыва в зоне проводимости $\Delta E_c = 0.84$ эВ. Ширина запрещенной зоны в GaSb ($E_{g2} = 0.727$ эВ при $T = 300$ К [10]) меньше разрыва зон ΔE_c . Это приводит к тому, что в гетероструктурах InAs/GaSb возникает разьединенный гетеропереход с энергетическим зазором между валентной зоной GaSb и зоной проводимости InAs при $T = 300$ К:

$$\Delta = \chi_{\text{GaSb}} - \chi_{\text{InAs}} - E_{g\text{GaSb}} \simeq -0.150 \text{ эВ.} \quad (1)$$

Используя вместо арсенида индия близкие к нему по составу четверные твердые растворы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, можно, варьируя состав твердого раствора, изменять степень перекрытия зон на гетерогранице и получать как ступенчатые, так и разьединенные гетеропереходы [11]. Разрыв зон проводимости в этом случае будет определяться разностью электронного сродства χ_1 для твердого раствора InGaSbAs и χ_2 для материала

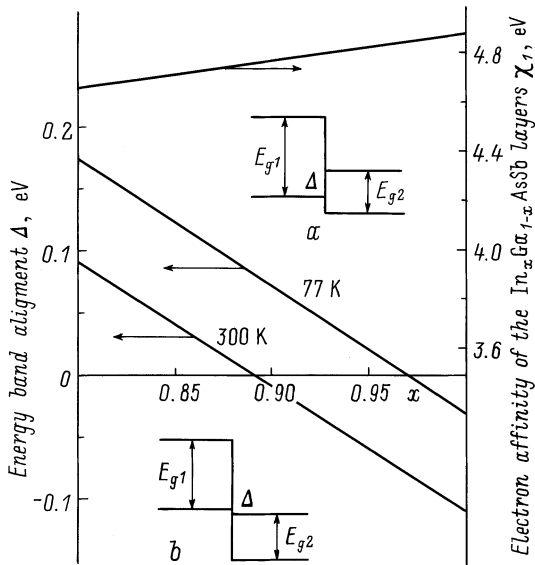


Рис. 1. Электронное сродство χ_1 для твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ (а) и величина энергетического зазора Δ в гетероструктурах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{GaSb}$ (б) в зависимости от состава твердого раствора.

подложки GaSb. Если этот разрыв меньше ширины запрещенной зоны GaSb, то образуется ступенчатый гетеропереход II типа, если больше ширины запрещенной зоны — разьединенный. В многокомпонентных твердых растворах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ электронное сродство χ_1 при различных x можно определить, исходя из учета электронного сродства для каждого из бинарных соединений по эмпирической формуле [12]:

$$\chi_{\text{InGaSbAs}}(x, y) = \chi_{\text{InSb}}x(1 - y) + \chi_{\text{InAs}}xy + \chi_{\text{GaSb}}(1 - x)(1 - y) + \chi_{\text{GaAs}}(1 - x)y. \quad (2)$$

На рис. 1 представлены значения электронного сродства χ_1 для твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}$ ($x \geq 0.80$), рассчитанные по формуле (2) в зависимости от x (значения электронного сродства для бинарных соединений взяты нами из работы [9]). Отметим, что при $x = 1$ расчет дает значение электронного сродства $\chi_1 = 4.87$ эВ, что находится в хорошем согласии с экспериментальными данными для трехкомпонентных твердых растворов $n\text{-InAs}_{0.91}\text{Sb}_{0.08}$, полученных в работе [13].

Исходя из этих данных (ширина запрещенной зоны в GaSb $E_{g2} = 0.727$ эВ при $T = 300$ К, $E_{g2} = 0.805$ эВ при $T = 77$ К [10]) можно по формуле (1) определить энергетический зазор Δ между валентной зоной GaSb и зоной проводимости твердого раствора. Зависимость от состава твердого раствора представлена на рис. 1. Отсюда можно заключить, что в гетероструктурах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}/\text{GaSb}$ в области составов $x \lesssim 0.85$ должен реализоваться ступенчатый гетеропереход во всем интервале температур от 77 до 300 К, а при $x \gtrsim 0.95$ может быть получен разьединенный гетеропереход. Интересно отметить, что

при $x = 0.92$, благодаря температурной зависимости E_g в GaSb, тип гетероперехода $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{SbAs}/\text{GaSb}$ изменяется в зависимости от температуры: с ростом температуры можно ожидать перехода от ступенчатого гетероперехода к разьединенному.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1. Характеристика исследованных образцов

Гетероструктуры $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{GaSb}$ с различным содержанием In ($x = 0.85, 0.92, 0.95$) были получены методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на подложках GaSb(100) при $T = 600^\circ\text{C}$. Рассогласование решеток слоя и подложки, по данным рентгеноструктурных исследований, составляло $\Delta a/a \leq 1.2 \cdot 10^{-3}$. В качестве подложки использовались как бинарные монокристаллы $n\text{-GaSb:Te}$, полученные методом Чохральского ($n \simeq 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$), так и нелегированный высокоомный эпитаксиальный слой $p\text{-GaSb}$ ($p \simeq 10^{15} \text{ см}^{-3}$), выращенный методом ЖФЭ из раствора-расплава в присутствии свинца в качестве нейтрального растворителя [14]. В первом случае на границе InGaAsSb -подложка существовал высокий потенциальный барьер, а во втором случае эпитаксиальный слой $p\text{-GaSb}$ выступал в качестве полупроводника.

Нелегированные эпитаксиальные слои InGaAsSb имели n -тип проводимости. Для получения слоев p -типа проводимости использовались акцепторные примеси Mn и Zn. Толщина эпитаксиальных слоев составляла 3–5 мкм. На образцах прямоугольной формы со стороны эпитаксиального слоя наносились омические контакты, на которых измерялись электропроводность σ , коэффициент Холла R_H и подвижность μ в интервале температур 77–300 К в магнитных полях 1–20 кЭ. Характеристики исследованных образцов даны в таблице (электропроводность σ , коэффициент Холла R_H рассчитаны на толщину эпитаксиальной пленки твердого раствора). Поскольку твердый раствор и подложка были n - и p -типа, имела возможность исследовать как изотипные ($n\text{-}N$, $p\text{-}P$), так и анизотипные ($p\text{-}N$, $n\text{-}P$) гетеропереходы. (Здесь и далее прописные буквы относятся к GaSb, строчные — к узкозонному материалу).

3.2. Гетероструктуры $\text{InGaAsSb}/\text{GaSb}$ с нелегированными слоями твердого раствора ($n\text{-}N$, $n\text{-}P$, образцы 1–6 в таблице)

Для всех гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaSb}$ с нелегированными слоями InGaAsSb в интервале составов ($0.85 < x < 0.95$) при $T = 77$ и 300 К характерна проводимость n -типа (см. таблицу). Однако значения наблюдаемой холловской подвижности различны — по-

Характеристики исследованных гетероструктур In_xGa_{1-x}AsSb/GaAs

№ образца	Содержание In, x	Тип структуры	$T = 77 \text{ K}$				$T = 300 \text{ K}$			
			Знак эдс Холла	σ , Ом ⁻¹ · см ⁻¹	n , 10 ¹⁷ см ⁻³	μ_H , см ² /В · с	Знак эдс Холла	σ , Ом ⁻¹ · см ⁻¹	n , 10 ¹⁷ см ⁻³	μ_H , см ² /В · с
Нелегированный твердый раствор InGaAsSb										
1	0.85	$n-N$	n	330	11	3700	n	1200	1.6	1900
2	0.92	$n-N$	n	1300	3.5	4500	n	5300	0.95	5000
3	0.95	$n-N$	n	1600	8.7	14000	n	2600	3.8	10000
4	0.85	$n-P$	n	54	115	6300	n	130	30	4000
5	0.92	$n-P$	n	1900	4.2	8000	n	4700	2.1	10000
6	0.95	$n-P$	n	550	25.5	14000	n	5200	22	11500
Легированный акцепторами (Mn, Zn) твердый раствор InGaAsSb										
7	0.85	$p-N$	p	12	4.9	59	p	17	2.1	36
8	0.92	$p-P$	p	26	8.3	220	n	47	21.5	1000
9	0.95	$p-P$	n	135	22	3000	n	200	14	2800

Примечание. При расчете проводимости σ и постоянной Холла R_H в гетероструктурах в качестве толщины использовалась толщина эпитаксиального слоя InGaAsSb.

движность возрастает с ростом содержания индия в твердом растворе от $3 \cdot 10^3$ см²/В · с до $1.4 \cdot 10^4$ см²/В · с для образцов с $x = 0.85$ и 0.95 соответственно.

Кроме того, рост содержания индия в твердом растворе приводит к резкому изменению вида температурных зависимостей эффекта Холла и холловской подвижности в гетероструктурах. В гетероструктурах In_{0.85}Ga_{0.15}SbAs/GaSb (образцы 1 и 4) наблюдается активационная зависимость коэффициента Холла от обратной температуры с тремя наклонами, соответствующими энергиям активации $E_A = 0.002, 0.02$ и 0.09 эВ (см. рис. 2). Такие значения энергии активации ранее наблюдались в эпитаксиальных слоях твердых растворов, обогащенных арсенидом индия, и приписывались наличию мелких неконтролируемых примесей и структурных дефектов [15]. Величина и температурная зависимость холловской подвижности в образцах 1 и 4 (рис. 3) также типична для твердых растворов InGaSbAs и обусловлена рассеянием носителей на дефектах и колебаниях решетки.

Совершенно иное поведение эффекта Холла и холловской подвижности с температурой демонстрируют гетероструктуры с большим содержанием индия в твердом растворе (образцы 2, 3 и 5, 6). Коэффициент Холла в них практически не изменяется в интервале температур 77–250 К (рис. 2). Только при $T > 250$ К в образцах 2 и 3, выращенных на подложке n -GaSb:Te, проявляется наклон, соответствующий энергии активации $E_A = 0.09$ эВ, которая так же, как и в образцах 1 и 4, может быть отнесена к структурным дефектам твердого раствора. Холловская подвижность в гетероструктурах In_xGa_{1-x}AsSb/GaSb с содержанием In в твердом растворе $x = 0.95$ (образцы 3 и 6) при $T = 77$ К составляет $14\,000$ см²/В · с и с ростом температуры незначительно падает, сохраняя высокие значения и при комнатной температуре ($\mu_H = 10\,000$ см²/В · с), что в несколько раз выше, чем в гетероструктурах с $x = 0.85$. В гете-

роструктурах In_xGa_{1-x}AsSb/GaSb с $x = 0.92$ (образцы 2 и 5) с повышением температуры наблюдается небольшой рост подвижности.

Полученные результаты показывают, что в гетероструктурах n -In_{0.85}Ga_{0.15}AsSb/GaSb магнитотранспортные свойства определяются свойствами только твердого раствора, что находится в соответствии с энергетической диаграммой гетероперехода (рис. 1), согласно которой при таком составе твердого раствора должен наблюдаться ступенчатый гетеропереход во всем интервале температур от 77 до 300 К.

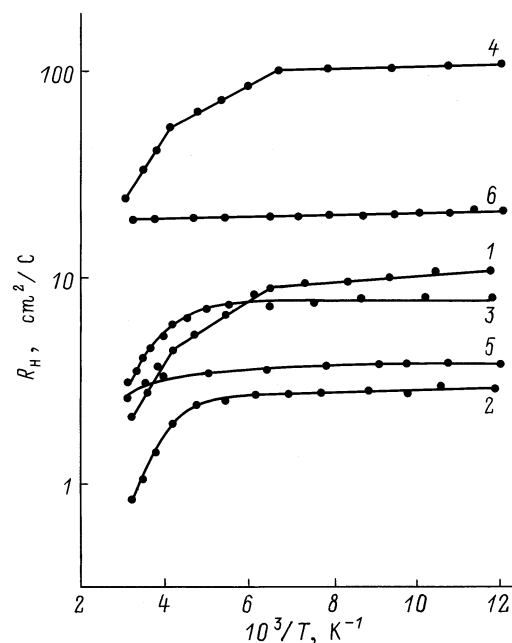


Рис. 2. Зависимости коэффициента Холла от обратной температуры для образцов 1–6 с нелегированными слоями твердого раствора. Номера кривых 1–6 соответствуют номерам образцов в таблице.

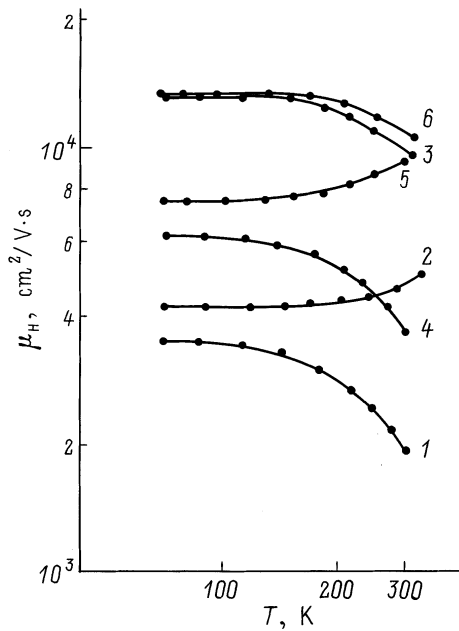


Рис. 3. Холловская подвижность в зависимости от температуры для образцов 1–6 с нелегированными слоями твердого раствора. Номера кривых 1–6 соответствуют номерам образцов в таблице.

В гетероструктурах $\text{In}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{SbAs}/\text{GaSb}$ высокие значения подвижности электронов можно объяснить, как и предсказывает энергетическая диаграмма (рис. 1), существованием электронного канала на гетерогранице в разьединенном гетеропереходе. В гетероструктурах $\text{In}_{0.92}\text{Ga}_{0.08}\text{SbAs}/\text{GaSb}$ рост холловской подвижности с повышением температуры можно объяснить изменением характера гетероперехода: от ступенчатого при $T = 77$ К к разьединенному при $T = 300$ К за счет изменения ширины запрещенной зоны GaSb (рис. 1).

Необходимо заметить, что существенное различие магнитотранспортных свойств гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}/\text{GaSb}$ с $x = 0.85$ и $x \geq 0.92$ наблюдается и в зависимостях коэффициента Холла от напряженности магнитного поля. Если для образцов с $x = 0.85$ коэффициент Холла не изменяется с ростом напряженности магнитного поля, что характерно для проводимости с участием одного сорта носителей тока (электронов в твердом растворе), то при $x \geq 0.92$ наблюдается небольшое уменьшение коэффициента Холла с ростом напряженности магнитного поля, что указывает на участие в магнитотранспорте двух сортов носителей тока (электронов в твердом растворе и в электронном канале на гетерогранице).

Таким образом, измеренные значения σ , R_H и μ_H в гетероструктурах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}/\text{GaSb}$ при $x = 0.85$ определяются свойствами самого твердого раствора, а при $x \geq 0.92$ проявляются одновременно свойства твердого раствора и электронного канала.

Используя известные формулы для двуслойной модели [16], можно оценить подвижность в электронном канале:

$$\mu_1 = \mu_H(1 - \sigma_2/\sigma) - \mu_2/(1 - \sigma/\sigma_2), \quad (3)$$

где индекс "1" относится к электронному каналу, индекс "2" — к эпитаксиальному слою твердого раствора, а σ и μ_H — измеренные значения для всей гетероструктуры.

Если в качестве подвижности электронов в твердом растворе принять данные для образца 1, тогда подвижность в электронном канале, рассчитанная по формуле (3), в образце 3 будет равна $\mu_1 = 16\,600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 77$ К и $\mu_1 = 16\,700 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 300$ К.

3.3. Гетероструктуры с легированными слоями твердых растворов (переходы p - N , p - P , образцы 7–9)

Для перекомпенсации твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_{1-y}$ и получения p -типа проводимости в качестве легирующей акцепторной примеси использовались марганец и цинк. Обе примеси в арсениде индия и твердых растворах, обогащенных арсенидом индия, создают акцепторные уровни с энергией активации $E_A = 0.02$ – 0.03 эВ [17]. В таблице представлены значения проводимости, коэффициента Холла и подвижности в гетероструктурах p - $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{SbAs}/\text{GaSb}$ с различным составом твердого раствора, но с одинаковым уровнем

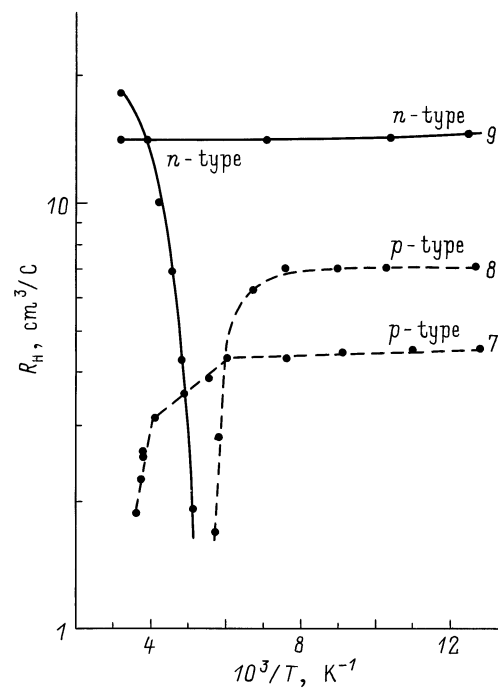


Рис. 4. Зависимости коэффициента Холла от обратной температуры для образцов 7–9 с легированными слоями твердого раствора. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

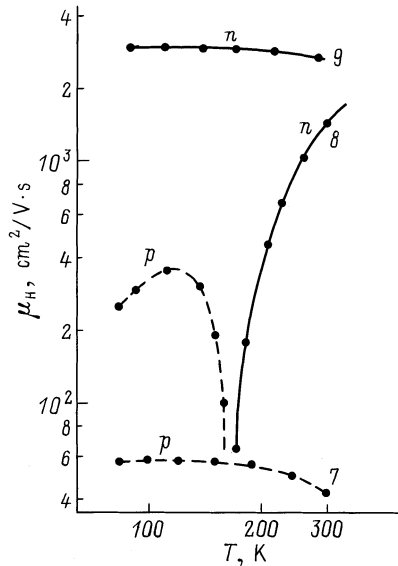


Рис. 5. Холловская подвижность в зависимости от температуры для образцов 7–9 с легированными слоями твердого раствора. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

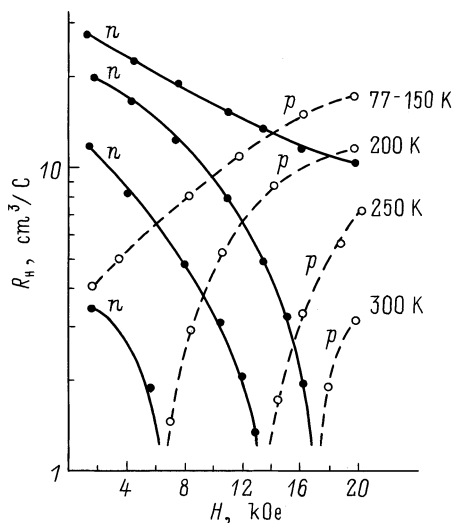


Рис. 6. Коэффициент Холла в зависимости от напряженности магнитного поля для образца 8. Температура измерений указана около кривых.

легирования акцепторными примесями, составляющим $9 \cdot 10^{-4}$ ат% (образцы 7–9). На рис. 4–6 даны зависимости коэффициента Холла и подвижности от температуры и напряженности магнитного поля для этих образцов.

Было установлено, что гетероструктуры $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}/\text{GaSb}$ с $x = 0.85$ во всем интервале температур от 77 до 300 К обладают дырочной проводимостью (см. таблицу, образец 7). На зависимости коэффициента Холла от обратной температуры (рис. 4, образец 7) проявляются два наклона: один с энергией активации 0.02 эВ, характерный для акцепторных уровней

легированного твердого раствора InGaSbAs, другой с энергией активации 0.09 эВ, связанный, вероятно, со структурными дефектами. Холловская подвижность μ_H очень низкая из-за сильной компенсации и слегка падает с ростом температуры (рис. 5, образец 7). Таким образом, можно заключить, что магнитотранспорт в гетероструктурах $p\text{-In}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{SbAs}/\text{GaSb}$, как и в образцах с нелегированным эпитаксиальным слоем такого же состава, определяется свойствами твердого раствора, что может свидетельствовать о ступенчатом гетеропереходе (см. рис. 1).

В то же время в гетероструктурах $p\text{-InGaAsSb}/\text{GaSb}$ с большим содержанием индия в твердом растворе ($x = 0.95$) при аналогичном уровне легирования цинком во всем интервале температур от 77 до 300 К наблюдается проводимость электронного типа (см. таблицу, образец 9). Коэффициент Холла не зависит от температуры (рис. 4, образец 9) и напряженности магнитного поля. Холловская подвижность в этих образцах сохраняет значение $3000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{c}$ вплоть до комнатной температуры (рис. 5, образец 9). Эти магнитотранспортные свойства указывают на преобладание только одного типа носителей заряда (электронов в электронном канале на гетерогранице) и существование разьединенного гетероперехода (см. рис. 1).

В гетероструктурах $p\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{SbAs}/\text{GaSb}$ с $x = 0.92$, как и в гетероструктурах с нелегированными слоями твердого раствора такого же состава, наблюдается переход от ступенчатого гетероперехода при $T = 77$ К к разьединенному при $T = 300$ К. Однако в изотипных $p\text{-}P$ -гетероструктурах такая модификация гетероперехода имеет более яркое экспериментальное проявление. При $T = 77$ К в гетероструктуре наблюдается p -тип проводимости, с характерным для твердого раствора $p\text{-InGaSbAs}$ значением подвижности $\mu_H = 220 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{c}$, а с ростом температуры проводимость в гетероструктурах изменяет знак с дырочной на электронный (см. таблицу, образец 8). Такую смену знака, а также рост электронной подвижности с температурой (рис. 5 и 6, образец 8) можно связать с проявлением на гетерогранице электронного канала со стороны твердого раствора.

Характерной особенностью гетероструктур $p\text{-InGaSbAs}/p\text{-GaSb}$ с $x = 0.92$ является сильная зависимость коэффициента Холла от напряженности магнитного поля (рис. 6). Видно, что при температурах 77–150 К имеет место дырочная проводимость, т.е. основную роль играют дырки в твердом растворе, а влияние электронного канала (параллельная проводимость с участием электронов в канале и дырок в твердом растворе) проявляется в уменьшении коэффициента Холла с уменьшением напряженности магнитного поля. При температурах выше 150 К в слабых полях проявляется только электронный канал, вклад которого растет с ростом температуры. Эти результаты согласуются с энергетической диаграммой (рис. 1) и указывают на увеличение энергетического зазора Δ с ростом температуры и переход от ступенчатого гетероперехода к разьединенному.

При этом увеличивается глубина потенциальных ям на гетерогранице и вклад носителей, локализованных на гетерогранице, становится доминирующим.

Сопоставляя полученные экспериментальные результаты в гетероструктурах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{GaSb}$ ($x > 0.92$, $E_g < 0.4$ эВ) с исследованными нами ранее гетероструктурами $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$ ($x < 0.22$, $E_g > 0.56$ эВ [2]), мы видим, что подвижность в электронном канале в гетероструктурах $\text{InGaAsSb}/\text{GaSb}$ на порядок ниже, чем в гетероструктурах $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$. Такое различие по величине подвижности носителей в электронном канале для структур на основе узкозонных твердых растворов InGaAsSb , выращенных на подложках GaSb , по сравнению со структурами на основе широкозонных твердых растворов GaInAsSb , выращенных на InAs , можно объяснить изменением качества границы раздела и увеличением рассеяния на шероховатостях гетерограницы, а также за счет различной природы формирования типов связи на гетерогранице. В случае выращивания узкозонного твердого раствора на широкозонной подложке на гетерогранице реализуется связь типа Ga-As , а в случае широкозонного твердого раствора на узкозонной подложке — связь типа In-Sb . В последнем случае создается резкая планарная граница раздела с переходным слоем толщиной ~ 12 Å, и достигаются высокие подвижности в электронном канале [18,19].

4. Заключение

Исследован магнитотранспорт в узкозонных гетеропереходах II типа $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{GaSb}$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, с различным составом твердого раствора ($x = 0.85, 0.92$ и 0.95). Показано, что в согласии с энергетической диаграммой (рис. 1) при $T = 77\text{--}300$ К в гетероструктурах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}/\text{GaSb}$ с $x = 0.85$ реализуется ступенчатый гетеропереход II типа, а при $x = 0.95$ — разьединенный гетеропереход II типа. При $x = 0.92$ на гетерогранице $\text{InGaAsSb}/\text{GaSb}$ в зависимости от температуры могут реализовываться как ступенчатые, так и разьединенные гетеропереходы II типа.

Максимальная подвижность электронов в электронном канале (около $20\,000$ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$) наблюдается в гетероструктурах с нелегированными слоями твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}$ ($x = 0.95$). Предполагается, что более низкие значения электронной подвижности в канале в $\text{InGaAsSb}/\text{GaSb}$ по сравнению с гетероструктурами на основе широкозонных твердых растворов $\text{GaInAsSb}/\text{InAs}$, где наблюдались значения свыше $50\,000$ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$, связаны с изменением типа связи на гетерогранице (с In-Sb на Ga-As) и с особенностями эпитаксиального роста твердых растворов на широкозонной и узкозонной подложке.

Легирование твердого раствора акцепторными примесями приводит к снижению максимальной подвижно-

сти носителей в электронном канале до 3000 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$. Низкие значения подвижности в электронном канале в этом случае объясняются сильной компенсацией твердого раствора и, как следствие, увеличением амплитуды флуктуаций потенциала на гетерогранице.

Показано, что в гетероструктурах $\text{InGaAsSb}/\text{GaSb}$ с разьединенным гетеропереходом II типа электронный канал определяет магнитотранспортные свойства гетероструктуры вплоть до комнатной температуры, так как широкозонная подложка GaSb в этом случае полностью исключает шунтирование электронного канала.

Работа частично поддержана грантом Министерства науки "Физика твердотельных наноструктур", проект 97-1035; грантом РФФИ № 99-02-18330, а также грантом Чешской академии наук № A1010807/1988.

Список литературы

- [1] G.A. Sai-Halasz, L. Esaki, W.A. Harrison. *Phys. Rev. B*, **18** (6), 2812 (1978).
- [2] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **30**, 985 (1996).
- [3] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, М.А. Сиповская, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **31**, 897 (1997).
- [4] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, А.Е. Розов, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **32**, 215 (1998).
- [5] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, А.Е. Розов, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **34**, 194 (2000).
- [6] M.P. Mikhailova, N.L. Bazhenov, V.A. Berezovets, A.V. Chernyaev, V.I. Ivanov-Omskii. K.D. Moiseev, R.V. Parfeniev, V.A. Smirnov, Yu.P. Yakovlev. *Proc. of Int. Symp. Nanostructures: Physic and Technology* (St. Petersburg, Russia, June 23–27, 1997) p. 152.
- [7] М.А. Афраимов, А.Н. Баранов, А.П. Дмитриев, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев, И.Н. Ясевич. *ФТП*, **24**, 1397 (1990).
- [8] Ф. Милнс, Т.Д. Фойхт. *Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник* (М., Мир 1979).
- [9] M. Nako, S. Yoshida, S. Ganda. *Sol. St. Sommun*, **49**, 663 (1984).
- [10] M.P. Mikhailova, A.N. Titkov. *Semicond. Sci. Technol.*, **9**, 1279 (1994).
- [11] О. Маделунг. *Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп* (М., Мир 1967).
- [12] J.C. Dewinter, M.A. Pollack, A.K. Srivastava, J.L. Zyskind. *J. Electron. Mater.*, **4**, 727 (1985).
- [13] M. Mebarki, A. Kadri. *Soc. St. Sommun.*, **72**, 795 (1989).
- [14] А.Н. Баранов, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. *Письма ЖТФ*, **8**, 1103 (1987).
- [15] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, К.Д. Моисеев, А.Е. Розов, М.А. Сиповская, М.В. Степанов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **33**, 781 (1999).
- [16] К. Субашиев, С.А. Плотников. *ФТП*, **2**, 1169 (1960).
- [17] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, М.А. Сиповская, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **25**, 276 (1991).
- [18] M.S. Daly, D.M. Simons, M. Lakrimi, R.L. Nicolas, N.J. Mason, P.J. Walker. *Semicond. Sci. Technol.*, **11**, 823 (1996).

- [19] Ю.Б. Васильев, С.Д. Сучалкин, С.В. Иванов, Б.Я. Мельцер, А.Ф. Цацульников, П.В. Неклюдов, П.С. Копьев. ФТП, **31**, 1246 (1997).

Редактор Т.А. Полянская

Type II heterojunctions in a InGaAsSb/GaSb system: magnetotransport

T.I. Voronina, B.E. Zhurtanov, T.S. Lagunova,
M.P. Mikhailova, K.D. Moiseev, A.E. Rosov,
Yu.P. Yakovlev

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

Abstract Magnetotransport properties of the type II narrow-gap $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{GaSb}$ heterostructures with various In content in a quaternary layer ($x = 0.85-0.95$, $E_g \leq 0.4$ eV) have been studied at 77–300 K. It is shown that depending on In content in these heterostructures type II staggered heterojunction ($x = 0.85$) or broken-gap one ($x = 0.95$) with a high mobility electron channel at the interface ($\sim 20\,000$ cm²/V·s) can be realized. At $x = 0.92$ both types of heterojunctions were observed as a function of temperature. Obtained results are in good agreement with the band energy diagrams of type II InGaAsSb/GaSb heterostructures under study.