

Магнитотранспорт в полуметаллическом канале в гетероструктурах $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$ с различным составом твердого раствора

© Т.И. Воронина, 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 14 мая 1999 г. Принята к печати 14 июля 1999 г.)

Исследованы магнитотранспортные свойства электронного канала на гетерогранице в разьединенных гетеропереходах II типа $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, с различным составом твердого раствора ($x = 0.09-0.22$) в интервале температур 77–300 К. Показано, что электронный канал с высокой подвижностью ($\mu = 30\,000-50\,000\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$), образующийся на гетерогранице, сохраняется во всем интервале составов. Обсуждается зонная энергетическая диаграмма исследуемых гетероструктур и оценены параметры электронного канала. Установлено, что электронный канал с высокой подвижностью сохраняется вплоть до комнатной температуры. Такие гетероструктуры могут быть перспективны для создания холловских сенсоров нового типа с электронным каналом на гетерогранице.

1. Введение

Гетероструктуры на основе антимонида галлия и арсенида индия привлекают в последние годы интерес как перспективные материалы для создания новых оптоэлектронных приборов среднего инфракрасного диапазона излучения [1]. Гетеропереходы II типа $\text{GaInAsSb}/\text{InAs}$ и сверхрешетки $\text{GaInSb}/\text{InAs}/\text{GaAlSb}$ используются для конструирования диодных лазеров нового типа с полуметаллическим инжектором [2,3]. Это обусловлено уникальными свойствами гетеропереходов II типа, в которых электроны и дырки на одиночной гетерогранице пространственно разделены и локализованы в самосогласованных квантовых ямах по обе стороны гетерограницы [4,5].

Свойства полуметаллического канала на гетерогранице могут изменяться под воздействием света, электрического и магнитных полей, а также зависят от параметров полупроводниковых материалов гетероструктуры (состава твердого тела, уровня легирования). В таких гетеропереходах сильное перекрытие электронной и дырочной волновых функций и высокая плотность состояний полуметаллической электронно-дырочной системы, сформированной на разьединенной гетерогранице II типа, приводят к большой вероятности не прямой (туннельной) излучательной рекомбинации [6].

Ранее [7–9] мы сообщали об обнаружении электронного канала в одиночных гетероструктурах $p\text{-Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}_{0.22}\text{Sb}_{0.78}/p\text{-InAs}$. Было установлено, что электроны в канале обладают высокой подвижностью $\mu = (5-7) \cdot 10^4\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ в гетероструктурах с нелегированными слоями твердого раствора и сохраняют эти свойства от гелиевых температур до $T = 200\text{ К}$. При сильном легировании твердого раствора акцепторными примесями наблюдалось резкое уменьшение подвижности, обусловленное сужением и истощением электронного канала и дополнительным механизмом рассеяния носителей на шероховатостях гетерограницы [10].

Цель настоящего исследования — изучение модификации транспортных свойств электронного канала на гетерогранице в разьединенных гетеропереходах II типа $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$ с различным составом твердого раствора ($x = 0.09, 0.16, 0.22$), а также оценка возможностей получения системы с высокой подвижностью электронов на гетерогранице при температурах, близких к комнатной. Такие структуры перспективны для создания холловских сенсоров нового поколения [11].

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

2.1. Характеристика исследованных образцов

Эпитаксиальные слои твердых растворов $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ различного состава ($x = 0.09, 0.16, 0.22$) наращивались на подложки $p\text{-InAs}$ (100) методом жидкофазной эпитаксии. Для выращивания эпитаксиальных слоев раствор–расплав приготавливали из In чистотой 99.9999% и 99.999% и Sb — 99.999%, а также из нелегированных навесок GaSb и InAs с концентрацией носителей $p_{77} = 5 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ и $n_{77} = 2 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ соответственно. Толщина эпитаксиальных слоев составляла 1.5 мкм.

В качестве материала подложки использовались высокоомные пластины арсенида индия, легированного цинком, с концентрацией дырок $p_{300} = 10^{16}\text{ см}^{-3}$ и $p_{300} = 10^{17}\text{ см}^{-3}$. Подложка с концентрацией $p_{300} = 10^{16}\text{ см}^{-3}$ использовалась нами ранее [7–10], однако ранний переход к смешанной проводимости из-за сильной компенсации арсенида индия ограничивает исследования транспортных свойств данных гетероструктур в температурном диапазоне $T = 77-200\text{ К}$. Использование подложки с меньшей степенью компенсации с концентрацией дырок $p_{300} = 10^{17}\text{ см}^{-3}$ позволяет отодвинуть переход к смешанной проводимости в область более высоких температур, при этом появляется возможность для исследования электронного канала вплоть до комнатных температур.

Основные характеристики исследованных гетероструктур $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$ при $T = 77\text{ K}$

№ образца	p , см^{-3}	x	σ_0 , Ом^{-1}	μ_0 , $10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	d_1 , Å	N_{ss} , 10^{11} см^{-2}	B_r	α
1	10^{16}	0.09	0.013	-4.7	390	1	0.07	0.15
2	10^{16}	0.16	0.017	-4.4	370	1.15	0.03	0.11
3	10^{16}	0.22	0.026	-3.2	320	1.5	0.26	0.02
4	10^{17}	0.09	0.049	-4.4	370	1.15	0.02	0.12
5	10^{17}	0.16	0.045	-3.0	310	1.6	0.03	0.05
6	10^{17}	0.22	0.050	-3.0	310	1.6	0.18	0.03

Примечание. p — концентрация дырок в подложке.

Образцы для исследования гальваномагнитных эффектов вырезались в форме прямоугольника. Со стороны поверхности эпитаксиальных слоев GaInAsSb наносилось шесть индиевых контактов, на которых измерялись электропроводность σ_0 , коэффициент Холла R_H , холловская подвижность $\mu_0 = R_H\sigma$ и поперечное магнитосопротивление $(\Delta\rho/\rho)_\perp$ в интервале температур $T = 77\text{--}300\text{ K}$ в магнитных полях $H = 0.5\text{--}20\text{ кЭ}$.

Основные характеристики исследованных образцов приведены в таблице, где σ — электропроводность, рассчитанная на единицу площади, а знак подвижности отражает тип проводимости. Видно, что при $T = 77\text{ K}$ знак эдс Холла был n -типа и высокое значение холловской подвижности, характерное для подвижности электронов в канале на гетерогранице, наблюдается для всех исследуемых составов твердого раствора. Следует отметить, что подвижность уменьшалась с увеличением содержания индия в твердом растворе.

2.2. Подвижность носителей тока

На рис. 1 представлены типичные зависимости подвижности μ_0 от напряженности магнитного поля при различных температурах для двух гетероструктур на основе одного и того же состава твердого раствора ($x = 0.16$), но выращенных на различных подложках (образцы 2 и 4).

В структурах, полученных на подложках с концентрацией $p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (рис. 1, *a*), наблюдается сильная зависимость величины подвижности от температуры и напряженности магнитного поля, она резко падает с ростом температуры при $T > 200\text{ K}$ и при увеличении магнитного поля. При $T = 300\text{ K}$ в магнитных полях $H > 10\text{ кЭ}$ холловская подвижность изменяет знак с электронного типа проводимости на дырочный. Такая резкая зависимость подвижности от напряженности магнитного поля связана с шунтированием проводимости гетероструктур материалом подложки, в которой уже при $T > 200\text{ K}$ может проявляться собственная проводимость (см. штриховую кривую на рис. 1, *a*).

Совершенно иной характер зависимостей подвижности от температуры и напряженности магнитного поля мы видим в случае, когда концентрация дырок в подложке $p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (рис. 1, *b*). Для таких образцов

величина холловской подвижности оставалась постоянной при всех исследованных магнитных полях в интервале температур $77\text{--}200\text{ K}$, и только при более высоких температурах ($T > 200\text{ K}$) начинала уменьшаться, сохраняя при этом электронный характер проводимости. Это связано с тем, что шунтирующее влияние подложки с концентрацией $p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ на проводимость гетероструктур значительно меньше, так как собственная проводимость у данной подложки сдвинута в область более высоких температур и холловская подвижность при $T = 300\text{ K}$ определяется в основном дырками (см. штриховую кривую на рис. 1, *b*).

На рис. 2 приведены зависимости холловской подвижности от температуры при разных значениях H для гетероструктуры $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$ на подложке с концентрацией дырок $p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (образец 6). Здесь

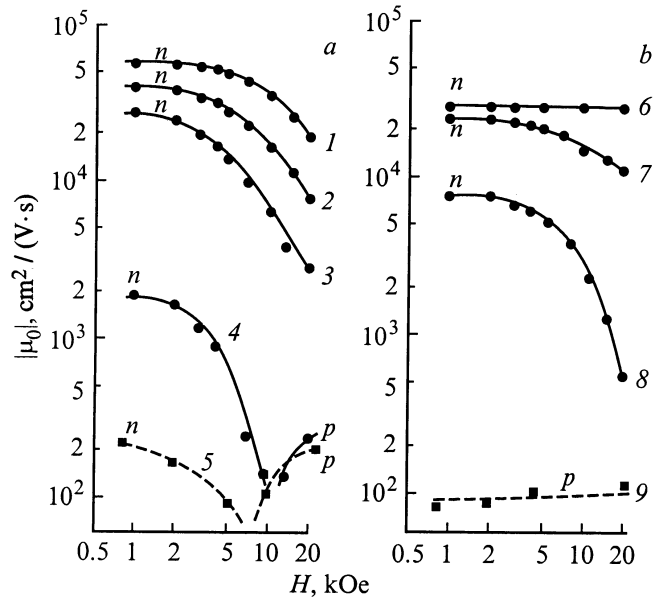


Рис. 1. Зависимости холловской подвижности μ_0 от напряженности магнитного поля H для образцов 2 и 4 (см. номера образцов в табл. 1) и соответствующих подложек: *a* — образец 2 и InAs ($p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$), *b* — образец 4 и InAs ($p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Зависимости $\mu_0(H)$ для подложек InAs указаны штриховыми линиями. Температура измерения зависимостей T , K: 1 — 77; 2 — 150; 3 — 200; 4, 5, 8, 9 — 300; 6 — 77–200; 7 — 250. Символами n и p обозначен тип проводимости.

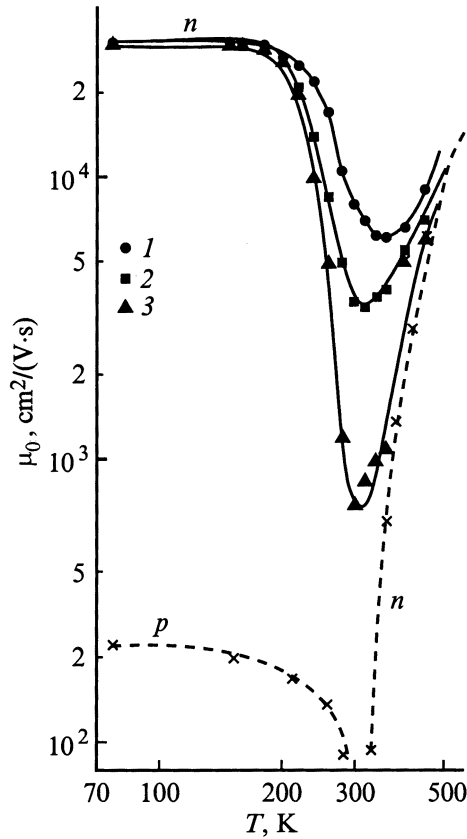


Рис. 2. Зависимости холловской подвижности μ_0 от температуры для образца 6 при напряженностях магнитного поля H , кЭ: 1 — 1, 2 — 10, 3 — 20. Символами n и p обозначен тип проводимости. Штриховая линия — температурная зависимость μ_0 для подложки InAs ($p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$).

же пунктиром дана зависимость подвижности для такой подложки p -InAs, на которой проводилось наращивание эпитаксиального слоя твердого раствора. Сопоставляя холловскую подвижность всей гетероструктуры с холловской подвижностью подложки для данного образца, можно утверждать, что при низких температурах вплоть до $T = 200$ К подвижность определяется электронами в канале на гетерогранице, при $T > 300$ К — электронами в подложке, а в интервале температур $200 < T < 300$ К подвижность определяется одновременным участием в проводимости электронов в канале и дырок в подложке. Параметры электронного канала в этом интервале температур можно оценить используя представление трехслойной модели [12].

Измеренные значения электропроводности σ_0 , холловских концентрации электронов n_0 и подвижности μ_0 при $T = 200$ – 300 К определяются из формул

$$\begin{aligned} \sigma_0 d_0 &= \sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2 + \sigma_3 d_3, \\ \mu_0^2 n_0 d_0 &= \mu_1^2 n_1 d_1 - \mu_2^2 p_2 d_2 - \mu_3^2 p_3 d_3, \end{aligned} \quad (1)$$

где d_i — толщины, индексы 0, 1, 2, 3 относятся соответственно ко всей структуре, электронному каналу,

подложке и эпитаксиальному слою твердого раствора. Вкладом эпитаксиального слоя можно пренебречь, поскольку подвижности и концентрации дырок в твердом растворе и в подложке приблизительно одинаковы ($p_2 \approx p_3 \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\mu_2 \approx \mu_3 \approx 100 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$), а толщина слоя в 200 раз меньше, чем подложки. Исходя из формул двухслойной модели, в области слабых магнитных полей ($H = 0.5$ – 3 кЭ), где подвижность μ_0 постоянна, можно, считая $d_0 \approx d_2$, $\mu_2 \ll \mu_0$, оценить подвижность в электронном канале по формуле

$$\mu_1 = \mu_0 / (1 - \sigma_2 / \sigma_0). \quad (2)$$

Проведенные оценки транспортных свойств в электронном канале при комнатной температуре показали, что подвижность в нем мало изменяется в зависимости от состава твердого раствора и составляет $(2$ – $2.5) \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

В отличие от случая комнатной температуры при температуре жидкого азота магнитотранспорт гетероструктур p -GaInAsSb/ p -InAs определяется только свойствами электронного канала (см. таблицу). Значения подвижности при этой температуре позволили нам оценить параметры электронного канала. В работе [10] нами была установлена зависимость подвижности в электронном канале от его ширины d_1 на уровне Ферми ($\mu_1 \sim d_1^2$). Было получено, что при величине подвижности в электронном канале $\mu_1 = 5 \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ширина канала составляла $d_1 = 400 \text{ \AA}$. Исходя из этого мы оценили ширину канала d_1 в исследуемых нами образцах при $T = 77$ К (см. таблицу). Как видно из таблицы, ширина электронного канала слегка уменьшается с ростом содержания индия в твердом растворе и составляет 300 – 400 \AA .

Используя представления двумерной модели [13], согласно которой ширина канала на уровне Ферми $d_1 = \pi/k_F$, где волновой вектор $k_F = (2\pi N_s)^{1/2}$, можно приблизительно оценить двумерную концентрацию носителей в электронном канале N_s при $T = 77$ К (см. таблицу). Для образцов с содержанием индия $x = 0.09$ и $x = 0.16$ оценки дают $N_s = 10^{11} \text{ см}^{-2}$, а при $x = 0.22$ $N_s = 1.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

2.3. Магнитосопротивление

Дополнительные сведения о гальваномагнитных свойствах гетероструктур можно получить из измерений поперечного магнитосопротивления $(\Delta\rho/\rho)^\perp$ (вектор тока перпендикулярен вектору магнитного поля), поскольку оно очень чувствительно к наличию двух сортов носителей тока и к размерным эффектам.

На рис. 3 даны зависимости поперечного магнитосопротивления $(\Delta\rho/\rho)^\perp$ от напряженности магнитного поля H при $T = 77$ К для гетероструктур p -GaInAsSb/ p -InAs с различным содержанием индия в твердом растворе, выращенных на подложках с концентрацией $p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (образцы 1–3). Измерения проводились при двух ориентациях образца в магнитном поле:

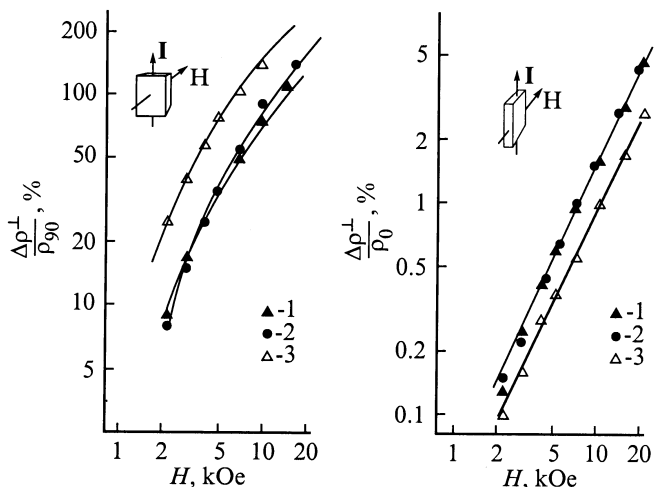


Рис. 3. Зависимости поперечного магнитосопротивления при различной ориентации образца в магнитном поле, $T = 77$ К. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

вектор \mathbf{H} параллелен нормали к поверхности образца $(\Delta\rho/\rho)_{90}^{\perp}$ (стандартная холловская ориентация, рис. 3, *a*) и вектор \mathbf{H} перпендикулярен нормали к поверхности образца $(\Delta\rho/\rho)_0^{\perp}$ (рис. 3, *b*). Зависимости поперечного магнитосопротивления от напряженности магнитного поля при $T = 77$ К в образцах 4–6 были аналогичны.

Как видно на рис. 3, *a*, во всех образцах магнитосопротивление $(\Delta\rho/\rho)_{90}^{\perp}$ возрастало пропорционально H^2 в слабых магнитных полях ($H < 3$ кЭ). Конец квадратичной зависимости определяется условием $\mu H/c = 1$, что согласуется с высокими значениями подвижности в электронном канале $\mu_1 = (3-5) \cdot 10^4$ см²/(В·с).

Когда магнитное поле направлено перпендикулярно нормали к поверхности образца (рис. 3, *b*), величина магнитосопротивления $(\Delta\rho/\rho)_0^{\perp}$ на порядок меньше значений $(\Delta\rho/\rho)_{90}^{\perp}$ и в зависимости от напряженности магнитного поля насыщение не наблюдалось. Подобная анизотропия магнитосопротивления характерна для размерных эффектов [14].

Наблюдаемая нами анизотропия магнитосопротивления определяется свойствами двумерного канала и подтверждает тот факт, что основной вклад в проводимость вносит двумерный электронный газ в полуметаллическом канале на гетерогранице. Анизотропия магнитосопротивления возрастает с ростом содержания индия в твердом растворе ($\alpha = (\Delta\rho/\rho)_0^{\perp}/(\Delta\rho/\rho)_{90}^{\perp}$ уменьшается, см. таблицу), что указывает на некоторое сужение электронного канала с ростом содержания индия в твердом растворе.

Значения коэффициента магнитосопротивления $B_r = (\Delta\rho/\rho)_{90}^{\perp}/\mu_1^2 H^2$, вычисленные из квадратичной зависимости магнитосопротивления (рис. 3, *a*), во всех образцах при $T = 77$ К меньше 0.26 (см. таблицу). Низкие значения B_r указывают на то, что проводимость определяется одним сортом носителей тока (электронами в полуметаллическом канале). Небольшое

увеличение B_r в образцах с $x = 0.22$, так же, как увеличение анизотропии магнитосопротивления, связано, по нашему мнению, с некоторым уменьшением ширины электронного канала d_1 с ростом содержания индия в твердом растворе (см. таблицу).

Таким образом, результаты, полученные из измерений подвижности и магнитосопротивления, показывают, что полуметаллические свойства в электронном канале на гетерогранице в структурах $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$ сохраняются при всех составах твердого раствора.

3. Сопоставление экспериментальных результатов с зонной диаграммой гетероперехода $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$

Как известно, в гетероструктуре GaSb/InAs величина энергетического зазора между зоной проводимости InAs и валентной зоной GaSb при $T = 300$ К составляет 150 мэВ [15]. Это значение в гетероструктурах $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$ должно изменяться в зависимости от состава твердого раствора, уровня легирования и условий на гетерогранице.

Для оценки взаимного расположения зон и величины энергетического зазора Δ между валентной зоной твердого раствора и зоной проводимости InAs используется правило электронного сродства, согласно которому

$$\Delta = \chi_2 - \chi_1 - E_{g1}, \quad (3)$$

где $\chi_2 = 4.9$ эВ — электронное сродство в InAs, χ_1 и E_{g1} — электронное сродство и ширина запрещенной зоны в твердом растворе соответственно.

Нами был выполнен расчет ширины запрещенной зоны и величины электронного сродства твердого раствора по модели линейной комбинации вкладов бинарных соединений, входящих в состав твердого раствора GaInAsSb, с учетом параметров прогиба в зависимости $E_{g1}(x)$ для тройных соединений. Согласно расчету, при $T = 77$ К были получены следующие значения для ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$: $E_{g1} = 0.7, 0.63$ и 0.6 эВ и значения электронного сродства: $\chi_1 = 4.128, 4.213$ и 4.26 эВ при $x = 0.09, 0.16$ и 0.22 соответственно.

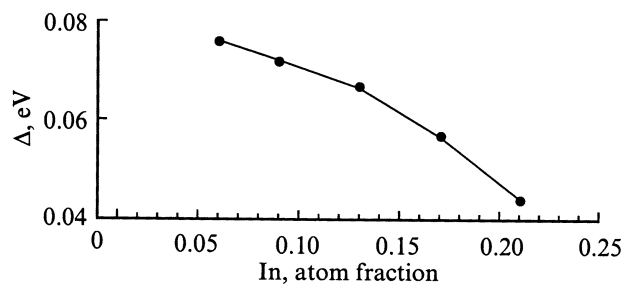


Рис. 4. Величина энергетического зазора Δ на гетерогранице в структурах $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$ в зависимости от атомной доли In.

С учетом этих данных при $T = 77$ К была оценена величина энергетического зазора Δ . Как видно из рис. 4, с ростом содержания индия в твердом растворе энергетический зазор Δ сохраняется и можно ожидать, что электронный канал существует при всех составах твердого раствора. Наибольшая величина энергетического зазора наблюдается для наименьших значений индия в твердой фазе. Следовательно, глубина электронного канала на гетерогранице, отсчитанная от уровня Ферми E_F , должна быть больше для содержания индия в твердом растворе $x = 0.09$ и меньше — для $x = 0.22$. При $T = 300$ К ширина запрещенной зоны в твердом растворе E_{g1} уменьшается (коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны твердого раствора GaInSbAs составляет $3.2 \cdot 10^{-4}$ эВ/К [16]), в результате энергетический зазор Δ , согласно (3), должен увеличиться.

Сопоставляя экспериментальные результаты с представленной выше зонной диаграммой, можно заключить, что при $T = 77$ К высокая подвижность электронов в канале наблюдается для всех изученных составов твердого раствора ($x \leq 0.22$). Небольшое уменьшение подвижности в гетероструктурах с содержанием индия при $x = 0.22$ может быть связано как с уменьшением величины энергетического зазора на гетерогранице Δ , так, вероятно, и с понижением уровня Ферми E_F в твердом растворе из-за увеличения содержания дырок [17].

При $T = 300$ К электронный канал сохраняется при всех составах твердого раствора. Однако подвижность электронов в канале во всех случаях уменьшается и причем тем сильнее, чем выше была подвижность электронов при $T = 77$ К. Наблюдаемое в эксперименте уменьшение подвижности с ростом температуры может быть связано с сужением электронного канала, а также возможным уширением квантовых уровней электронов в яме со стороны InAs за счет тепловой энергии kT , что приводит к увеличению рассеяния на решетке [18]. Все это ограничивает подвижность электронов при $T = 300$ К величиной порядка $2 \cdot 10^4$ см²/(В · с).

4. Заключение

В работе исследованы транспортные свойства гетероструктур в системе $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$. Показано, что при составах твердого раствора в диапазоне $x = 0.09\text{--}0.22$ на гетерогранице реализуется разьединенный гетеропереход II типа, в котором существует электронный канал с высокой подвижностью электронов.

Наибольшая подвижность электронов в электронном канале при $T = 77$ К достигается при составах $x = 0.09$ и 0.16 ($\mu_1 = 5 \cdot 10^4$ см²/(В · с)). Оценена ширина электронного канала $d_1 = (300\text{--}400)$ Å и концентрация электронов в канале $N_s = (1\text{--}1.5) \cdot 10^{11}$ см⁻² при $T = 77$ К.

Результаты исследования магнитосопротивления дополняют исследования подвижности и позволяют сделать заключение о двумерной природе электронов в канале.

При комнатной температуре подвижность носителей тока в электронном канале падает. Вероятно, это связано с рассеянием электронов на колебаниях решетки, что ограничивает величину подвижности электронов на уровне порядка $2 \cdot 10^4$ см²/(В · с).

Показано, что транспортные свойства гетероструктур $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$ при высоких температурах зависят от уровня легирования подложки $p\text{-InAs}$. Для использования уникальных свойств данных гетероструктур при $T = 300$ К необходимо устранить влияние подложки.

Авторы благодарят Т.А. Полянскую за полезную дискуссию и ценные замечания.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 99-02-18330.

Список литературы

- [1] T.C. Hasenberg, R.H. Miles, A.R. Kost, L. West. *IEEE Quant. Electron.*, **33**, 1403 (1997).
- [2] A.N. Baranov, N. Bertru, Y. Cumminal, G. Boissier, C. Alibert, A. Ioullie. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 735 (1997).
- [3] J.R. Meyer, C.A. Hoffman, F.J. Bartoli. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 757 (1995).
- [4] М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, О.Г. Ершов, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **30**, 399 (1996).
- [5] М.П. Михайлова, А.Н. Титков. *Semicond. Sci. Technol.*, **9**, 1279 (1994).
- [6] Н.Л. Баженов, Г.Г. Зегря, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, В.А. Смирнов, О.Ю. Соловьева, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **31**, 658 (1997).
- [7] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **30**, 985 (1996).
- [8] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, М.А. Сиповская, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **31**, 897 (1997).
- [9] И.А. Андреев, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **29**, 678 (1995).
- [10] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, А.Е. Розов, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **32**, 215 (1998).
- [11] N. Kuze, I. Shibasaki. *III-V Review* (1997) v. 10, p. 28.
- [12] В.К. Субашиев, С.А. Плотников. *ФТП*, **2**, 1169 (1960).
- [13] Т. Андо, А. Фаулер, Ф. Стерн. *Электронные свойства двумерных систем* (М., Мир, 1995).
- [14] А.И. Климовская, О.В. Снитко, С.И. Кириллова. *Письма ЖЭТФ*, **11**, 1191 (1970).
- [15] G.H. Dohler. *Surf. Sci.*, **98**, 108 (1980).
- [16] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, М.А. Сиповская, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **25**, 276 (1991).
- [17] А.Н. Баранов, А.Н. Дахно, Б.Е. Джуртанов, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.С. Сиповская, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **24**, 98 (1990).
- [18] А.И. Ансельм. *Введение в теорию полупроводников* (М., Наука, 1970).

Редактор Т.А. Полянская

Magnetotransport in a semimetal channel in $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$ heterostructures with various composition of the solid solution

T.I. Voronina, 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 an electron channel at the interface of the type II broken-gap $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{AsSb}/p\text{-InAs}$ heterostructures grown by liquid-phase epitaxy ($x = 0.09\text{--}0.22$) have been studied in the temperature interval 77–300 K. It is shown that an electron channel with high mobility ($\mu = (3\text{--}5) \cdot 10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$) exists throughout the whole range of the composition at $T = 77\text{--}200$ K. A modification of the band energy diagram of the type II broken-gap $\text{GaInAsSb}/p\text{-InAs}$ heterostructures under study is discussed and some parameters of 2-d electron channel are evaluated. It is found that the electron channel with high mobility ($2 \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$) keeps on up to room temperature. Type II $\text{GaInAsSb}/\text{InAs}$ heterostructures may find applications in a new type Hall sensor design having an electron channel at the interface.