

УДК 621.315.592

Электронный транспорт в гетеропереходе II типа GaInAsSb/*p*-InAs с различным уровнем легирования твердого раствора

© Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, М.А. Сиповская, Ю.П. Яковлев

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

(Получена 27 сентября 1996 г. Принята к печати 25 октября 1996 г.)

Исследованы гальваномагнитные явления и фотопроводимость в разьединенных гетеропереходах II типа GaInAsSb/*p*-InAs с различным уровнем легирования твердого раствора донорной (Te) или акцепторной (Zn) примесью. Установлено, что на гетерогранице в таких структурах имеется электронный канал, который определяет гальваномагнитные эффекты в широком диапазоне уровней легирования. Обнаружено резкое уменьшение холловской подвижности в исследуемых гетероструктурах при высоком уровне легирования эпитаксиального слоя акцепторной примесью. Наблюдаемый эффект обусловлен истощением электронного канала за счет локализации носителей тока в ямах потенциального рельефа на гетерогранице.

Четырехкомпонентные твердые растворы в системе Ga–In–As–Sb представляют значительный интерес для создания оптоэлектронных приборов (лазеров [1–3] и фотодиодов [4,5]) для спектрального диапазона 2 ÷ 5 мкм, актуального для задач газового анализа и охраны окружающей среды [6]. Данная работа является продолжением цикла наших исследований электрических и фотоэлектрических свойств твердых растворов GaInAsSb и гетеропереходов на основе эпитаксиальных слоев, изопериодных с подложками GaSb и InAs [7,8].

В изотипных одиночных гетероструктурах *p*-Ga_{0.83}In_{0.17}As_{0.22}Sb_{0.78}/*p*-InAs с нелегированными слоями твердого раствора нами была обнаружена высокая подвижность носителей тока $\mu_H = 65000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 77 \text{ К}$ [9] и было установлено существование электронного канала на гетерогранице со стороны узкозонного материала [10]. Ранее в работе [11] нами была определена зонная диаграмма гетероструктуры *p*-Ga_{0.83}In_{0.17}As_{0.22}Sb_{0.78}/*p*-InAs и было показано, что такой гетеропереход является разьединенным гетеропереходом II типа.

Параметры самосогласованных квантовых ям, образованных на гетерогранице в разьединенных гетеропереходах II типа, и свойства электронного канала должны в значительной степени зависеть от уровня легирования составляющих его полупроводников. Поэтому нам представлялось важным изучить влияние легирования широкозонного твердого раствора Ga_{0.83}In_{0.17}As_{0.22}Sb_{0.78} ($E_g = 630 \text{ мэВ}$ при $T = 77 \text{ К}$) донорными (Te) и акцепторными (Zn) примесями на магнитотранспортные и оптические свойства одиночных гетероструктур GaInAsSb/*p*-InAs с твердым раствором как *p*-, так и *n*-типа.

Слои твердого раствора выращивались методом жидкофазной эпитаксии на полуизолирующих подложках *p*-InAs с ориентацией (100) ($p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\sigma = 0.1 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ при $T = 77 \text{ К}$). Для выращивания эпитаксиальных слоев раствор–расплав приготавливали из чистых компонентов In (99.99999%) и Sb (99.9999%), а

также из нелегированных навесок GaSb и InAs с концентрацией носителей $p = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $n = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Для легирования эпитаксиальных слоев акцепторными примесями в раствор–расплав добавляли цинк в количествах до 0.01 ат%, а в качестве донорной примеси использовали теллур в количествах до 0.001 ат% в виде соединения *n*-GaSb:Te с концентрацией электронов $n = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а свыше 0.001 ат% — в чистом виде.

Толщины эпитаксиальных слоев были в интервале 1.8 ÷ 2.3 мкм. Рассогласование с подложкой составляло $\Delta a/a < +4 \cdot 10^{-4}$ при $T = 300 \text{ К}$. Образцы для исследования гальваномагнитных эффектов вырезались из эпитаксиальных структур в форме прямоугольника. Шесть индиевых контактов (2 токовых и 4 потенциальных) наносились на поверхность эпитаксиальных слоев GaInAsSb. К слоям твердого раствора *n*-типа контакты наносились из сплава In:Te, а к слоям *p*-типа — In:Zn. Компенсационным зондовым методом измерялось падение напряжения на потенциальных зондах V_σ и эдс Холла V_H в интервале температур $T = 77 \div 200 \text{ К}$ в магнитных полях напряженностью до 16 кЭ при токе через образец $I < 100 \text{ мкА}$ (в области выполнения закона Ома). Из этих данных рассчитывались электропроводность σ_\square , коэффициент Холла R_H , рассчитанные на единицу площади, и холловская подвижность $\mu_H = R_H \sigma_\square$. На спектрометре ИКС-12 с использованием призм NaCl и LiF и системы синхронного детектирования проводились исследования фотопроводимости. Постоянное электрическое поле напряжением не более 510 В/см, прикладывалось вдоль гетерограницы. При этом регистрировался сигнал, полученный на модулированном световом потоке от глобара.

Основные параметры исследуемых образцов приведены в таблице. Знак эдс Холла для всех исследуемых образцов всегда указывал на электронный характер проводимости независимо от типа и количества легирующей примеси, вводимой в расплав при концентрациях Te до 0.01 ат% и Zn до 0.008 ат%. В то же время знак

№ образца	Введенная примесь		Знак носителей тока		$R_H, 10^6 \text{ см}^2/\text{Кл}$		$\mu_H, 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	
	Вид примеси	Концентр., ат%	По термоэдс в твердом растворе	По эдс Холла в структуре	$H = 2 \text{ кЭ}$	$H = 10 \text{ кЭ}$	$H = 2 \text{ кЭ}$	$H = 10 \text{ кЭ}$
1	—	—	<i>p</i>	<i>n</i>	4.5	4.3	65.0	64.0
2	Te	$1 \cdot 10^{-4}$	<i>p</i>	<i>n</i>	4.45	3.85	57.4	55.0
3	Te	$2 \cdot 10^{-4}$	<i>p</i>	<i>n</i>	4.0	3.35	52.8	44.8
4	Te	$4 \cdot 10^{-4}$	<i>p</i>	<i>n</i>	4.1	3.0	46.6	34.5
5	Te	$1 \cdot 10^{-3}$	<i>p</i>	<i>n</i>	3.25	1.6	45.0	18.6
6	Te	$5.8 \cdot 10^{-3}$	<i>n</i>	<i>n</i>	0.19	0.1	11.4	6.2
7	Te	$1.2 \cdot 10^{-2}$	<i>n</i>	<i>n</i>	0.1	0.05	11.8	5.6
8	Zn	$3 \cdot 10^{-3}$	<i>p</i>	<i>n</i>	4.9	3.35	49.0	33.3
9	Zn	$4 \cdot 10^{-3}$	<i>p</i>	<i>n</i>	2.7	2.4	24.4	19.8
10	Zn	$8 \cdot 10^{-3}$	<i>p</i>	<i>n</i>	0.27	0.03	2.1	0.21

носителей тока по термоэдс, измеренной с помощью термозонда со стороны поверхности твердого раствора, указывал на дырочный характер проводимости во всех образцах, за исключением сильно легированных теллуrom (образцы 6 и 7). Этот результат свидетельствует о том, что проводимость гетероструктур GaInAsSb/*p*-InAs с разным уровнем легирования твердого раствора донорными и акцепторными примесями так же, как и гетероструктур с нелегированным твердым раствором определяется главным образом проводимостью электронного канала на гетерогранице [10]. Величина холловской подвижности, наблюдаемая в гетероструктурах при слабом легировании слоев твердого раствора как донорной (Te < 0.001 ат%), так и акцепторной (Zn < 0.004 ат%) примесями (образцы 2–5, 8, 9 в таблице), оставалась такой же высокой, как и в гетероструктурах с нелегированными слоями твердых растворов (образец 1). При более сильном легировании твердого раствора примесями Te и Zn наблюдалось уменьшение подвижности. Схематически энергетические структуры систем GaInAsSb/*p*-InAs для слабо легированных и сильно легированных теллуrom и цинком твердых растворов представлены на рис. 1.

На рис. 2, *a, b* (сплошные линии) представлена зависимость холловской подвижности от количества вводимой в расплав примеси для гетероструктур GaInAsSb/*p*-InAs. Для гетероструктур со слабо легированными слоями твердого раствора (Te < 0.001 ат%, Zn < 0.004 ат%) подвижность практически не изменяется. При значительном уровне легирования твердого раствора теллуrom (Te > 0.001 ат%) абсолютное значение холловской подвижности уменьшается в 4–5 раз до значений $\mu_H = 10000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $H = 2 \text{ кЭ}$. При сильном легировании цинком (Zn > 0.004 ат%) наблюдается резкое падение холловской подвижности: величина ее падает более чем на порядок (до $2000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $H = 2 \text{ кЭ}$) по сравнению с ее значениями в гетероструктурах с нелегированными слоями твердого раствора. На этом же рисунке (штриховые линии) для сравнения приведены зависимости подвижности от концентрации примеси для твердых растворов такого же состава, но

выращенных на подложках GaSb. В таких структурах наблюдается ступенчатый переход II типа, на границе которого нет электронного канала [12]. Измеряемая подвижность для таких гетероструктур характеризует свойства самого эпитаксиального слоя твердого раствора GaInAsSb. Исходные нелегированные образцы твердого

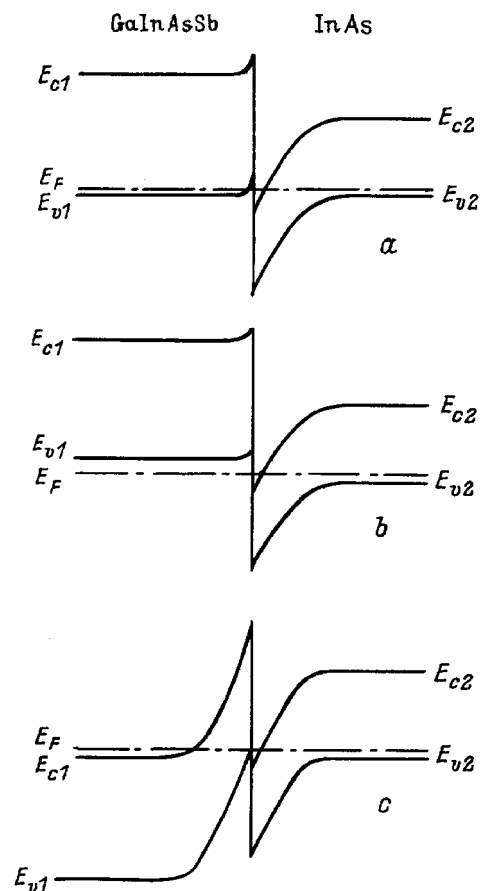


Рис. 1. Энергетические схемы структуры $\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}_{0.22}\text{Sb}_{0.78}/p\text{-InAs}$ для твердых растворов: *a* — нелегированного, *b* — сильно легированного цинком, *c* — сильно легированного теллуrom.

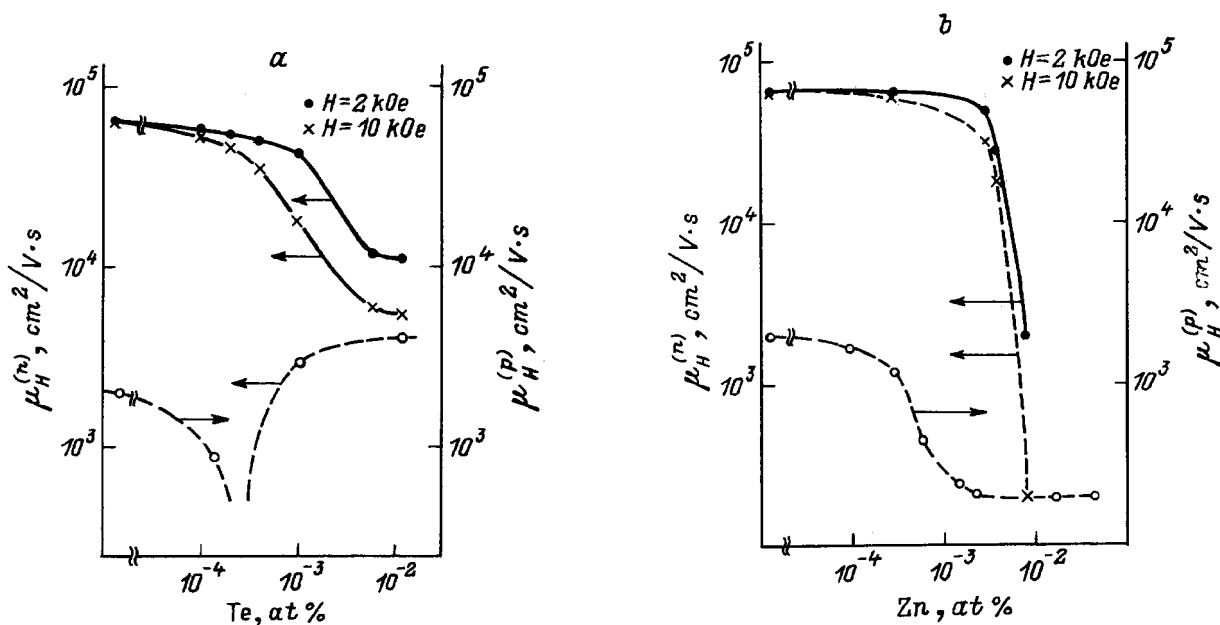


Рис. 2. Зависимость холловской подвижности электронов $\mu_H^{(n)}$ и дырок $\mu_H^{(p)}$ от уровня легирования твердого раствора: *a* — теллуром, *b* — цинком, $T = 77$ К. Сплошные линии — GaInAsSb/p-InAs, штриховые — GaInAsSb.

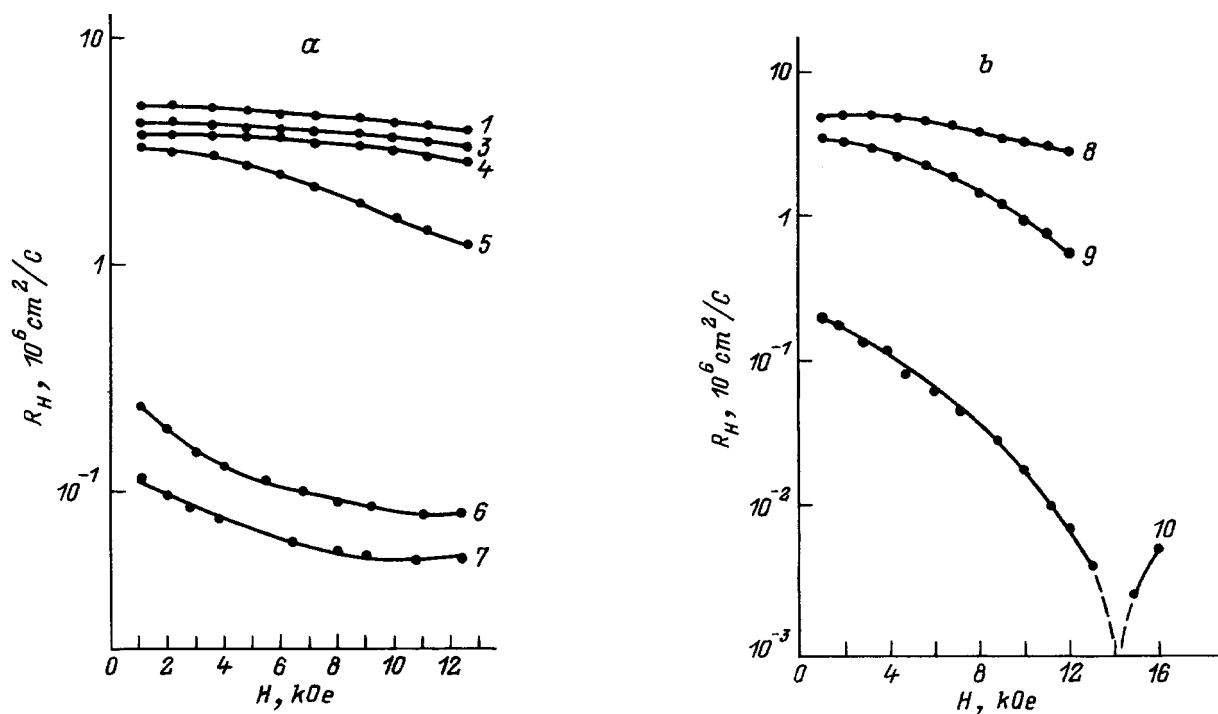


Рис. 3. Коэффициент Холла R_H в зависимости от напряженности магнитного поля H для образцов, легированных: *a* — теллуром, *b* — цинком. Номера у кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

раствора GaInAsSb имели *p*-тип проводимости с концентрацией дырок $p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и с подвижностью $\mu_H = 2000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. При легировании твердого раствора теллуром происходила перекомпенсация акцепторов и при концентрации $\text{Te} > 0.001 \text{ ат}\%$ материал становился *n*-типа с подвижностью $\mu_H = 4000 \div 5000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

При легировании твердого раствора цинком концентрация акцепторов увеличивалась, подвижность падала из-за роста рассеяния на ионах примеси, а при высоких концентрациях цинка ($\text{Zn} > 0.004 \text{ ат}\%$) подвижность сохраняла постоянное значение ($\mu_H = 200 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$), что указывает на вырождение дырочного газа [13].

Как видно на рис. 2, подвижность в гетероструктурах GaInAsSb/*p*-InAs начинает уменьшаться именно там, где в твердом растворе при легировании Te наблюдается переход к *n*-типу проводимости (уровень Ферми находится в зоне проводимости), а при легировании Zn — там, где наступает вырождение дырочного газа (уровень Ферми — в валентной зоне).

В гетероструктурах GaInAsSb/*p*-InAs с высоким уровнем легирования твердого раствора наблюдается сильная зависимость подвижности и коэффициента Холла от напряженности магнитного поля, причем различная для образцов, легированных Te и Zn (см. таблицу). На рис. 3 представлены значения коэффициента Холла R_H в зависимости от напряженности магнитного поля H в структурах GaInAsSb/*p*-InAs с различным уровнем легирования твердого раствора. В образцах с нелегированными и слабо легированными Te и Zn слоями твердого раствора (образцы 1–3, 8) коэффициент Холла практически не меняется с ростом напряженности магнитного поля. При сильном легировании Te (образцы 6, 7) коэффициент Холла при малых H падает с ростом магнитного поля, а при $H > 5$ кЭ перестает зависеть от напряженности магнитного поля. При этом значения подвижности $\mu_H \approx 5000$ см²/В·с становятся сравнимыми с подвижностью эпитаксиального слоя твердого раствора (см. рис. 3, а). Это свидетельствует о том, что в образцах с сильно легированным Te эпитаксиальным слоем проводимость осуществляется двумя сортами носителей тока — высокоподвижными электронами в канале ($\mu_H^{(n)} > 10000$ см²/В·с), который проявляется при слабых магнитных полях, и электронами с более низкой подвижностью ($\mu_H^{(n)} \approx 5000$ см²/В·с) в эпитаксиальном слое твердого раствора.

В случае сильного легирования твердого раствора GaInAsSb цинком (концентрация Zn > 0.005 ат%, образец 10) падение R_H настолько сильное, что при определенных значениях магнитного поля ($H \approx 15$ кЭ) наблюдалась смена знака коэффициента Холла. Такой ход зависимости R_H от поля во всем интервале легирования слоев твердого раствора также характерен для одновременного участия в проводимости гетероструктуры двух сортов носителей заряда, но отличающихся не только величиной подвижности, но и знаком. Дырочный тип проводимости связан, по нашему мнению, не с сильным ростом проводимости эпитаксиального слоя, в котором подвижность очень низка (200 см²/В·с), а с уменьшением подвижности в электронном канале. По-видимому, спад подвижности в случае сильного легирования цинком может быть связан с истощением электронного канала за счет локализации подвижных носителей в ямах потенциального рельефа на гетерогранице [14].

Наличие электронного канала на гетерогранице раздельного гетероперехода и двух сортов электронов с разной подвижностью в структурах GaInAsSb/*p*-InAs должно проявляться также и в фотоэлектрических свойствах. На рис. 4 представлены спектральные зависимости

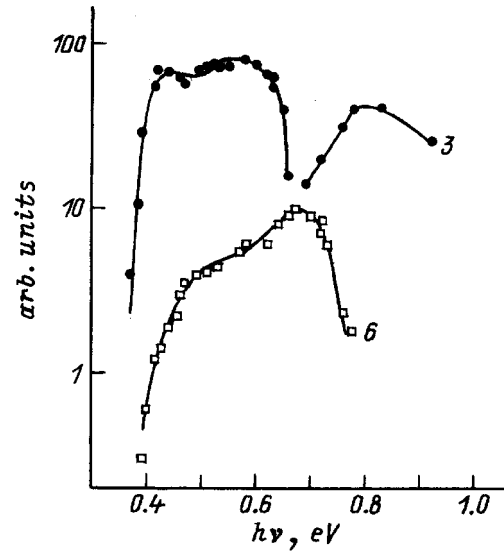


Рис. 4. Спектральные зависимости фотопроводимости в структурах GaInAsSb/*p*-InAs с различным уровнем легирования твердого раствора теллуром. Номера у кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

фотопроводимости $\Delta\sigma = f(h\nu)$ при $T = 77$ К для двух образцов, которые отличались уровнем легирования твердого раствора теллуром. Картина фотоответа, как видно из рис. 4, существенно меняется в зависимости от уровня легирования. При слабом легировании теллуром эпитаксиального слоя GaInAsSb (образец 3) мы наблюдаем наряду с положительным значением фотопроводимости появление и отрицательной фотопроводимости при $h\nu > 0.66$ эВ. С увеличением уровня легирования теллуром до 0.005 ат% (образец 6) наблюдалась только положительная фотопроводимость. При этом спад длинноволнового края во всех случаях соответствовал энергии фотона, равной ширине запрещенной зоны InAs при $T = 77$ К ($h\nu_{(1/2)\max} = 0.40 \div 0.41$ эВ). Полученные спектральные зависимости фотопроводимости отражают вклад в суммарный сигнал высокопроводящего электронного канала на гетерогранице. При поглощении кристаллом света с энергией кванта $h\nu > E_c - E_F$, где E_c — положение дна зоны проводимости твердого раствора GaInAsSb, а E_F — уровень Ферми, электроны возбуждаются из электронного канала и переходят в широкозонный слой, в котором их подвижность существенно ниже. В результате переноса электронов в слой широкозонного полупроводника GaInAsSb его проводимость увеличивается и общая фотопроводимость определяется следующим выражением:

$$\Delta\sigma = -e\mu_f n_f + e\mu_{2d}(\Delta n_f + \Delta n_{2d}),$$

где μ_{2d} и μ_f — подвижности электронов в канале и в слое GaInAsSb, Δn_{2d} — изменение концентрации электронов в канале при освещении, Δn_f — изменение концентрации электронов в широкозонном слое твердого раствора при энергии фотона $h\nu$, соответствующей

межзонным переходам в широкозонном слое GaInAsSb. В зависимости от соотношения вкладов от обоих членов в данном выражении можно наблюдать либо возростание, либо спад сигнала фотопроводимости вплоть до появления отрицательной фотопроводимости (ОФП). Поскольку в образце 3 ОФП наблюдается во всем исследуемом спектральном интервале $h\nu > 0.66$ эВ, можно считать, что определяющий вклад в фотопроводимость данного образца вносят рекомбинационные процессы в электронном канале. Отметим, что ОФП, обусловленная наличием двух сортов электронов с разной подвижностью, наблюдалась ранее на гетеропереходах GaAlAs/GaAs [15]. Полученные результаты по исследованию фотоэлектрических свойств разьединенных гетеропереходов GaInAsSb/InAs дополняют данные гальваномагнитных исследований и согласуются с нашими представлениями о существенном влиянии электронного канала с высокой подвижностью на свойства исследуемых гетероструктур.

Таким образом, при исследовании электронного транспорта в гетероструктурах GaInAsSb/p-InAs было установлено, что при выращивании широкозонных твердых растворов GaInAsSb на подложках p-InAs на гетерогранице образуется электронный канал, который сохраняется в широком диапазоне уровней легирования эпитаксиального слоя как донорной (Te), так и акцепторной (Zn) примесями. Показано, что в одиночной гетероструктуре Ga_{0.83}In_{0.17}As_{0.22}Sb_{0.78}/p-InAs при высоком уровне легирования твердого раствора донорной примесью гальваномагнитные эффекты обусловлены суммарным вкладом электронного канала на гетерогранице и эпитаксиального слоя. Резкое падение подвижности, наблюдаемое при сильном легировании четверного твердого раствора акцепторной примесью, обусловлено как истощением электронного канала на гетерогранице за счет локализации носителей в ямах потенциального рельефа на гетерогранице, так и взаимным компенсирующим влиянием электронов и дырок в самом гетеропереходе.

Авторы благодарят А.М. Монахова за полезные обсуждения и ценные замечания.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант N 96-02 17841а.

Список литературы

- [1] А.Н. Баранов, Б.Е. Джуртанов, А.Н. Именков, А.А. Рогачев, Ю.М. Шерняков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **20**, 2217 (1986).
- [2] H.K. Choi, S.L. Eglash, G.W. Turner. Appl. Phys. Lett., **64**, 2474 (1994).
- [3] М.П. Михайлова, Г.Г. Зегря, К.Д. Моисеев, О.Г. Ергаков, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **21**, 83 (1995).
- [4] Yu.P. Yakovlev, A.N. Baranov, A.N. Imenkov, M.P. Mikhailova. SPIE, **1510**, 120 (1991).
- [5] И.А. Андреев, А.Н. Баранов, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, А.В. Пенцов, Ю.П. Сморгочкова, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **18**, 50 (1992).
- [6] A.M. Prokhorov, A.I. Nadezinskiy. SPIE, **1724**, 2 (1992).
- [7] M.P. Mikhailova, A.N. Titkov. Semicond. Sci. Technol., **9**, 1279 (1994).
- [8] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, М.А. Сиповская, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **25**, 276 (1991).
- [9] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **30**, 985 (1996).
- [10] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, С.А. Обухов, А.В. Аникундинов, А.Н. Титков, Ю.П. Яковлев. Тез. докл. 2-Рос. конф. по физике полупроводников (СПб., 1996), т. 2. С. 158.
- [11] М.П. Михайлова, И.А. Андреев, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **29**, 678 (1995).
- [12] A.N. Baranov, A.N. Imenkov, M.P. Mikhailova, A.A. Rogachev, Yu.P. Yakovlev. Superlat. Microstruct., **8**, 375 (1990).
- [13] Т.И. Воронина, Б.Е. Джуртанов, Т.С. Лагунова, Ю.П. Яковлев. ФТП, **25**, 283 (1991).
- [14] C.A. Hoffman, J.R. Meyer, E.R. Youngdall, F.J. Bartoli, R.H. Miles, L.R. Ram Mohan. Sol. St. Electron., **37**, 1203 (1994).
- [15] И.М. Гродненский, К.В. Старостин, Д.В. Галченков. Письма ЖЭТФ, **43**, 54 (1986).

Редактор Т.А. Полянская

Electron transport in type II GaInAsSb/p-InAs heterojunction with various doping level of quaternary layer

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

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

Abstract Magneto-transport phenomena and photoconductivity have been studied as a function of various doping levels of layer by the donor (Te) or acceptor (Zn) impurities. An existence of an electron channel at the interface in the structures under study was established, that dominates magneto-transport phenomena in a wide range of doping level. Drastic drop of Hall mobility was found in GaInAsSb/p-InAs heterostructures under heavy acceptor doping of quaternary layer. The effect under study takes place due to electron channel depletion by mobile carrier localization by random potential at the heterointerface.