

05.2;06.2

## МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ GaInSbAs/*p*-InAs С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ ТВЕРДОГО РАСТВОРА ДОНОРНОЙ ПРИМЕСЬЮ

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

Ранее [1] нами было установлено, что в структурах, образованных эпитаксиальными слоями твердых растворов  $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}_{1-y}\text{As}_y$  ( $x \approx 0.17$ ;  $y \approx 0.22$ ), выращенных на подложках *p*-InAs, существует “разъединенный” гетеропереход II типа. При этом на гетерогранице со стороны InAs возникает высокопроводящий электронный канал, определяющий свойства всей гетероструктуры. Была обнаружена высокая подвижность электронов в нем, при  $T = 77$  К она составляет  $50\,000\text{--}60\,000$   $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{с}$  [2], а толщина этого канала и концентрация двумерных носителей в нем были оценены из измерений эффекта Шубникова-де-Гааза и составляли соответственно:  $d \sim 400$  Å и  $n_s = 10^{11}$   $\text{cm}^{-2}$  [3]. Как было установлено ранее [4], при легировании твердого раствора GaInAsSb, выращенного на подложке GaSb, донорной примесью (теллуrom) происходит перекомпенсация акцепторной примеси и тип проводимости в слое из дырочного меняется на электронный. Поэтому можно ожидать, что свойства гетероперехода GaInAsSb/InAs могут существенно измениться в зависимости от уровня легирования твердого раствора, что должно проявиться при исследовании гальваномагнитных свойств.

В данной работе было исследовано магнитосопротивление, которое, как известно, очень чувствительно к различным механизмам рассеяния, к наличию различных сортов носителей тока и к размерным эффектам [5,6]. Исследовались гетероструктуры GaInAsSb/InAs с различным уровнем легирования донорной примесью (теллуrom).

Эпитаксиальные слои GaInAsSb были получены методом жидкофазной эпитаксии на высокоомной подложке *p*-InAs (100). Легирование теллуrom до 0.001 ат.% производилось с использованием навесок лигатуры *n*-GaSb:Te, свыше 0.001 ат.% использовался теллуr в элементарном виде. Толщина эпитаксиальных слоев была  $\approx 2$  мкм. Вырезались образцы прямоугольной формы без удаления подложки. На

эпитаксиальный слой сверху наносились 6 индиевых контактов. Магнитосопротивление, а также термоэдс, эдс Холла и холловская подвижность измерялись в интервале температур 77–200 К и значений напряженности магнитного поля 0–12 кЭ при различной ориентации образца в магнитном поле.

Основные характеристики исследованных образцов даны в таблице. По данным термоэдс, измеренной непосредственно на поверхности слоя твердого раствора с помощью тонкого термозонда, слаболегированные теллуrom твердые растворы, как и нелегированные, сохраняли *p*-тип проводимости. Только при сильном легировании теллуrom ( $\text{Te} > 0.005$  ат.%) твердый раствор становится *n*-типа. Знак эдс Холла и высокая холловская подвижность во всех образцах указывали на электронный тип проводимости, что может быть связано с проводимостью электронного канала на гетерогранице, так же как и в исследованных ранее структурах с нелегированными слоями твердых растворов [2].

Рассмотрим, как проявляется электронный канал на гетерогранице в зависимостях магнитосопротивления от напряженности магнитного поля при разных ориентациях образца в магнитном поле. На рис. 1,а представлена зависимость поперечного магнитосопротивления  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  от напряженности магнитного поля при  $T = 77$  К, когда вектор напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$  перпендикулярен вектору тока  $\mathbf{I}$  и перпендикулярен плоскости образца ( $\mathbf{H} \perp \mathbf{I}$ ,  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{n}$ , где  $\mathbf{n}$  — нормаль к поверхности). Во всех образцах, независимо от уровня легирования теллуrom, в магнитных полях до  $H \approx (2-3)$  кЭ  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  изменяется пропорционально  $H^2$ , а при более высоких полях наблюдается отклонение от квадратичной зависимости.

В нелегированных и слаболегированных образцах (обр. 1–4), пока твердый раствор имеет еще *p*-тип проводимости (*P-p* структура), отклонение от квадратичной зависимости наблюдается при значениях  $H$ , соответствующих критерию классически сильного поля ( $uH/c \geq 1$ ) и высокой подвижности в канале ( $u_H = 45\,000-50\,000$  см<sup>2</sup>/В·с).

В области квадратичной зависимости магнитосопротивление определяется формулой:

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)^\perp = B_r \left(\frac{uH}{c}\right)^2,$$

где коэффициент  $B_r$  для однородных полупроводников с одним сортом носителей тока определяется механизмом рассеяния носителей тока и степенью вырождения электронного газа, и, согласно теории [7], максимальная величина

Основные характеристики исследованных образцов при  $T = 77$  К

№ образца	Примесь Te, ат. %	Тип проводимости твердых растворов по термоэдс	Знак ЭДС Холла	$u_H, \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$		$B_T$	$\alpha = \frac{(\Delta\rho/\rho)_{\varphi=90^\circ}^\perp}{(\Delta\rho/\rho)_{\varphi=0^\circ}^\perp}$
				$H = 2 \text{ кЭ}$	$H = 10 \text{ кЭ}$		
1	-	p	n	65000	64000	0.1	25
2	$10^{-4}$	p	n	57000	45000	0.1	15
3	$2 \cdot 10^{-4}$	p	n	52900	43000	0.15	15
4	$4 \cdot 10^{-4}$	p	n	46600	34500	0.22	60
5	$10^{-3}$	p	n	45000	18600	0.25	70
6	$5.8 \cdot 10^{-3}$	n	n	11400	6100	1.66	100
7	$1.2 \cdot 10^{-12}$	n	n	11000	5500	2.5	200

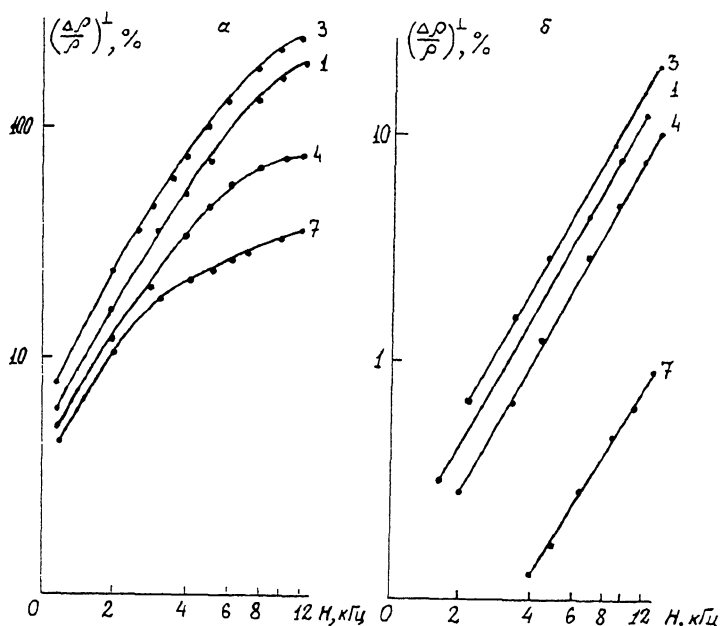


Рис. 1. Зависимость поперечного магнитосопротивления  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  от напряженности магнитного поля  $H$ ,  $T = 77$  К,  $H \perp I$ , а)  $H \parallel n$ , б)  $H \perp n$ . Номера образцов соответствуют нумерации в таблице.

$V_r$  для рассеяния на ионах примеси в невырожденных полупроводниках составляет 0.56. В случае двух сортов носителей тока или при наличии различных структурных дефектов и неоднородности коэффициент магнитосопротивления  $V_r$  становится гораздо больше [8]. В исследованных нами образцах с нелегированным и слаболегированным Те эпитаксиальным слоем твердого раствора  $V_r = 0.1-0.25$  (см. таблицу). Малая величина коэффициента  $V_r$ , как и высокая подвижность электронов в канале, свидетельствует о том, что магнитосопротивление, как и подвижность, определяется одним сортом носителей тока, а именно электронами в канале, а также о высоком качестве гетерограницы между узкозонным (InAs) и широкозонным (GaInSbAs) полупроводником (малом числе ионизованных примесей и структурных дефектов).

При сильном легировании теллуrom, когда твердый раствор становится  $n$ -типа (обр. 6 и 7), отклонение  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  от  $H^2$  наблюдается раньше, чем наступает условие сильного

поля (при  $uH/c \leq 0.5$ ), а величина  $B_T$ , вычисленная в области квадратичной зависимости  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$ , оказывается больше единицы (см. таблицу). Оба этих факта могут указывать на то, что в изучаемых образцах проводимость осуществляется двумя сортами электронов: более подвижными в электронном канале и менее подвижными в электронном слое твердого раствора. Исходя из конца квадратичной зависимости  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  от  $H$  и критерия сильного поля ( $uH/c \geq 1$ ) можно ожидать, что подвижность электронов в электронном канале остается высокой ( $u_H \approx 50\,000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ). В сильном же магнитном поле ( $H \geq 10 \text{ кЭ}$ ) низкие значения подвижности ( $u_H = 5000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ) близки к полученным ранее для твердых растворов  $\text{GaInSbAs}$ , выращенных на подложках  $\text{GaSb}$ , с таким же уровнем легирования твердого раствора теллуrom [4], что может указывать на то, что в этих полях подвижность и магнитосопротивление отражают доминирующий вклад в общую проводимость самого эпитаксиального слоя.

При различной ориентации образца в магнитном поле, когда изменялся угол  $\varphi$  между плоскостью образца и вектором напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$ , наблюдалась резкая анизотропия магнитосопротивления, которая не свойственна объемным образцам. На рис. 2 представлена зависимость  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  от угла  $\varphi$ , нормированная на значение  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  при  $\varphi = 90^\circ$  при  $H = 2 \text{ кЭ}$ ,  $T = 77 \text{ К}$ . Видно, что  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  максимально, когда магнитное поле перпендикулярно поверхности образца ( $\mathbf{H} \parallel \mathbf{n}$ ,  $\varphi = 90^\circ$ ); с изменением угла  $\varphi$  поперечное магнитосопротивление резко уменьшается. При  $\varphi = 0^\circ$   $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  становится на 1.5–2 порядка меньше, чем при  $\varphi = 90^\circ$ , и изменяется пропорционально  $H^2$  вплоть до 12 кЭ (рис. 1, б). Это указывает на то, что при такой ориентации образца магнитосопротивление не связано с подвижностью и механизмом рассеяния, а обусловлено размерным эффектом [6]. Размерный эффект проявляется в тонких слоях, когда длина свободного пробега электрона становится сравнимой с размерами исследуемого образца.

Длину свободного пробега  $\mathcal{L}_e$  можно оценить из величины подвижности:  $u = \frac{e\mathcal{L}_e}{V m^*}$  ( $V$  — тепловая скорость электрона,  $m^*$  — эффективная масса). Если считать, что электронный канал расположен на гетеропереходе со стороны  $\text{InAs}$  ( $m_n^* = 0.025m_0$ ), то в образцах с подвижностью  $u_H = 50\,000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при  $T = 77 \text{ К}$  длина свободного пробега  $\mathcal{L}_e = 600 \text{ \AA}$ . Следовательно, можно утверждать, что наблюдаемый эффект анизотропии магнитосопротивления связан с существованием на границе раздела квазидвумер-

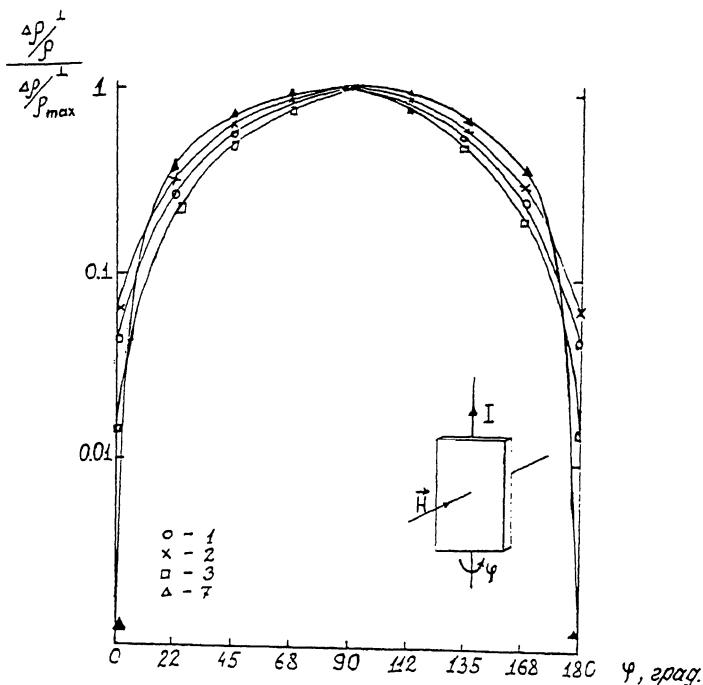


Рис. 2. Поперечное магнитосопротивление  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$ , нормированное на значение  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  в зависимости от угла поворота образца  $\varphi$  в магнитном поле,  $T = 77$  К,  $H \perp I$ . Номера образцов соответствуют нумерации в таблице.

ного слоя толщиной  $d \leq 600 \text{ \AA}$  с высокой подвижностью электронов на гетерогранице. В таблице приведен коэффициент анизотропии  $\alpha = \frac{(\Delta\rho/\rho)^\perp_{\varphi=90^\circ}}{(\Delta\rho/\rho)^\perp_{\varphi=0^\circ}}$ . Возрастание коэффициента анизотропии  $\alpha$  с увеличением уровня легирования твердого раствора теллуром (рис. 2) может указывать на сужение электронного канала.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты по исследованию магнитосопротивления позволяют сделать некоторые заключения о свойствах гетероперехода GaInSbAs/*p*-InAs.

1) В гетероструктурах GaInSbAs/*p*-InAs электронный канал с высокой подвижностью носителей, который возникает на гетерогранице, сохраняется при легировании четверного твердого раствора донорной примесью (теллуром).

2) Высокая подвижность электронов и низкие значения коэффициента магнитосопротивления  $B_T$  в нелегированных и слаболегированных образцах свидетельствуют о высоком

качестве гетерограницы и о малом числе дефектов в твердом растворе, выращенном на подложке InAs.

3) Наблюдаемый эффект анизотропии магнитосопротивления в магнитных полях свидетельствует о наличии тонкого ( $d < 600 \text{ \AA}$ ) электронного канала на гетерогранице в GaInSbAs/InAs структурах.

4) Тенденция к росту анизотропии поперечного магнитосопротивления с повышением уровня легирования твердого раствора теллуром, возможно, указывает на сужение электронного канала.

### Список литературы

- [1] Михайлова М.П., Андреев И.А., Моисеев К.Д., Воронина Т.И., Лагунова Т.С., Яковлева Ю.П. // ФТП. 1995. Т. 29. В. 4. С. 678–686.
- [2] Воронина Т.И., Лагунова Т.С., Михайлова М.П., Моисеев К.Д., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1996. Т. 30. В. 4.
- [3] Mikhailova M.P., Voronina T.I., Lagunova T.S., Moiseev K.D., Obukhov S.A. // Abstr. of Int. Symp. Nanostructures; Physics and Technology, St.Petersburg. 1995. 26–30 June. P. 49.
- [4] Воронина Т.И., Джуртанов Б.Е., Лагунова Т.С., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 2. С. 283–286.
- [5] Грибников Э.С., Мельников В.И. // ЖЭТФ. 1996. Т. 51. С. 1909–1913.
- [6] Климовская А.И., Снитко О.В., Кириллова С.И. // ФТП. 1971. Т. 5. В. 7. С. 1281–1286.
- [7] Аскеров Б.М. Кинетические эффекты в полупроводниках. Л.: Наука, 1970.
- [8] Herring // J. Appl. Phys. V. 31. P. 1939–1945.

Поступило в редакцию  
11 июля 1996 г.