

06.2;06.3;07

## Свойства электронного канала в одиночных гетероструктурах GaInAsSb/*p*-InAs

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 11 ноября 1996 г.

В работе исследованы свойства электронного канала в разьединенной изо-типной гетероструктуре II типа GaInAsSb/*p*-InAs в зависимости от уровня легирования четверного твердого раствора донорной (Te) или акцепторной (Zn) примесью. Обнаружено уменьшение холловской подвижности (более чем на два порядка) с увеличением концентрации акцепторной примеси. Исследованы осцилляции Шубникова–де Гааза при низких температурах ( $T = 1.5\text{--}20\text{ K}$ ) и определены эффективная масса электронов ( $m_n = 0.026m_0$ ) и некоторые параметры гетероперехода.

В последнее время гетероструктуры на основе твердых растворов GaInAsSb на изопериодных подложках GaSb и InAs интенсивно исследуются как перспективные материалы для инфракрасных источников света и фотодетекторов спектрального диапазона 2–5 мкм [1–6].

Ранее было установлено, что система *p*-GaIn<sub>*x*</sub>AsSb<sub>*y*</sub>/*p*-GaSb ( $x, y < 0.2$ ) представляет собой ступенчатый гетеропереход II типа, а система *p*-GaIn<sub>*x*</sub>AsSb<sub>*y*</sub>/*p*-InAs ( $x, y < 0, 2$ ) — разьединенный гетеропереход II типа с разрывом между зоной проводимости и валентной зоной четверного твердого раствора около 60–100 мэВ [7]. В результате перетекания электронов из валентной зоны широкозонного твердого

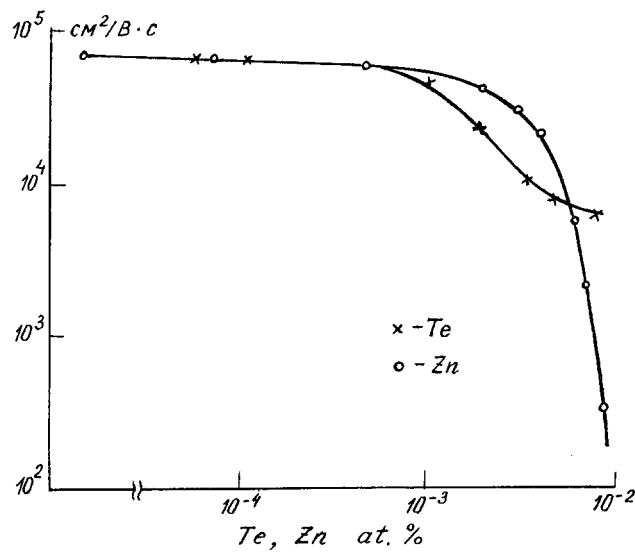
раствора в зону проводимости InAs на гетерогранице такой структуры образуются электронные и дырочные каналы. Их наличие в значительной степени определяет транспортные свойства таких гетероструктур.

В работе [8] нами впервые в изотипных гетероструктурах  $p\text{-GaIn}_x\text{AsSb}_y/p\text{-InAs}$  ( $x \sim 0.17$ ,  $y \sim 0.22$ ) с нелегированными слоями твердого раствора была обнаружена высокая холловская подвижность электронов ( $u_H = 50\,000\text{--}70\,000\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ), которая была объяснена существованием канала с электронным типом проводимости на гетерогранице. При этом нелегированные твердые растворы такого состава всегда имели  $p$ -тип проводимости с концентрацией дырок  $p_{77} = 2 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$  и подвижностью  $u_H = 2000\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ .

В настоящей работе описываются результаты исследования свойств электронного канала в зависимости от уровня легирования твердого раствора теллуром и цинком, которые вводились в раствор-расплав в количествах  $10^{-4}\text{--}10^{-2}$  ат.%. Четверные твердые растворы в гетероструктурах  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$  ( $x = 0.17$ ,  $y = 0.22$ ) выращивались методом жидкофазной эпитаксии толщиной 2 мкм на высокоомных подложках  $p\text{-InAs}(100)$  с концентрацией дырок  $p_{77} = 2 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$  и проводимостью  $\sigma = 0.1\text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . Изменялись коэффициент Холла  $R$ , электропроводность  $\sigma$ , холловская подвижность  $u_H$ . Было исследовано также продольное и поперечное магнитосопротивление (эффект Шубникова-де-Гааза) при низких температурах ( $T = 1.5\text{--}20\text{ К}$ ) в умеренных магнитных полях до 50 кЭ. Прямоугольные образцы для исследования вырезались из эпитаксиальных структур  $\text{GaInAsSb}/p\text{-InAs}$  и на поверхность твердого раствора вплавлялось 6 индиевых контактов.

На рис. 1 представлена холловская подвижность, измеренная на таких образцах в зависимости от количества вводимой в твердый раствор примеси. При слабом легировании твердого раствора ( $Te < 10^{-3}$  ат.%,  $Zn < 4 \cdot 10^{-3}$  ат.%) холловская подвижность, как и в слоях с нелегированными твердыми растворами, сохраняла высокие значения ( $u_H = 40\,000\text{--}50\,000\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ). При более высоком уровне легирования теллуром ( $Te > 10^{-3}$  ат.%) подвижность плавно уменьшалась до значений  $u_H = 10\,000\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , а при сильном легировании цинком ( $Zn > 4 \cdot 10^{-3}$  ат.%) наблюдалось очень резкое, более чем на порядок, падение подвижности.

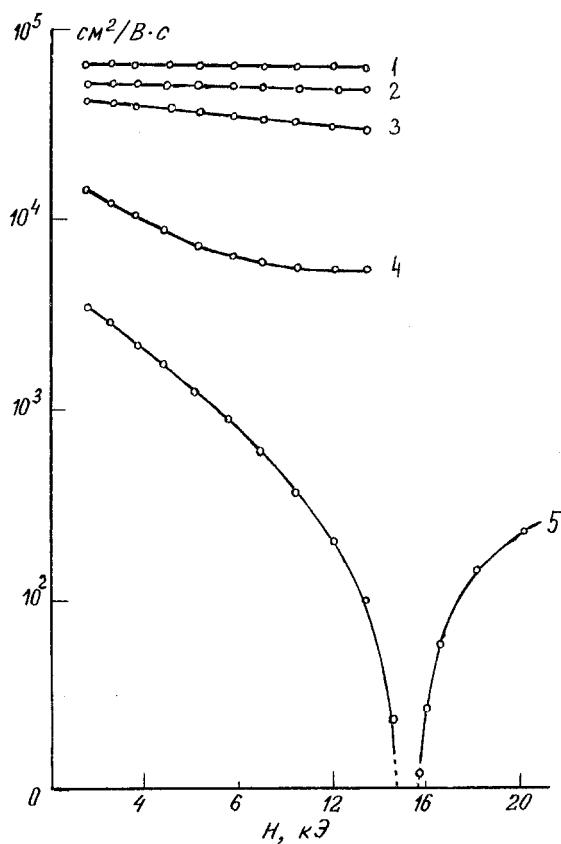
Интересно, что в сильно легированных как теллуром, так и цинком образцах появлялась зависимость холловской подвижности ( $u_H = R\sigma$ ) от магнитного поля (рис. 2). В образцах с большой концентрацией теллура подвижность падала при низких полях ( $H < 5\text{ кЭ}$ ), а



**Рис. 1.** Холловская подвижность в структурах GaInAsSb/*p*-InAs в зависимости от концентрации примесей (теллура и цинка) в твердом растворе.

при  $H > 5$  кЭ подвижность стремилась к постоянному значению  $\mu_H \approx 5000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , сравнимому со значением подвижности в эпитаксиальных слоях твердого раствора близкого состава и легированного теллуrom [9]. Зависимость подвижности от напряженности магнитного поля, как правило, говорит об участии в проводимости двух сортов носителей заряда [10]. В случае сильного легирования теллуrom это, вероятно, высокоподвижные электроны в канале и носители тока (также электроны) с более низкой подвижностью в эпитаксиальном слое, который в результате перекомпенсации донорами становится материалом электронного типа проводимости с подвижностью  $\mu_H \sim 5000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ .

При сильном легировании твердого раствора акцепторной примесью (цинком,  $\text{Zn} > 4 \cdot 10^{-3}$  ат.%) падение подвижности с ростом поля связано с резким уменьшением коэффициента Холла, вплоть до инверсии его знака (рис. 2, образец 5). Такая зависимость может указывать на одновременное участие в проводимости двух сортов носителей заряда, отличающихся не только величиной подвижности, но и знаком [9]. Мы



**Рис. 2.** Зависимость холловской подвижности в структурах GaInAsSb/p-InAs от напряженности магнитного поля: 1 — нелегированный твердый раствор; 2, 4 — твердый раствор легирован цинком; 3, 5 — твердый раствор легирован теллуром.

предполагаем, что в гетеропереходе наряду с электронным каналом начинает проявляться и дырочный канал, при этом роль электронного канала в проводимости падает. Это можно объяснить уменьшением плотности электронов в канале за счет локализации носителей тока в ямах потенциального рельефа на гетерогранице. Падение подвижности может быть обусловлено также и взаимным компенсирующим влиянием электронов и дырок на гетерогранице.

В нелегированных и слабелегированных образцах, в которых наблюдалась высокая подвижность электронов при  $T = 77$  К, эти значения подвижности сохранялись вплоть до гелиевых температур. Такое поведение подвижности характерно для структур, в которых механизм рассеяния носителей тока определяется лишь степенью совершенства квантовой ямы (рассеянием на неоднородностях гетерограницы).

На таких структурах при  $T = 1.5-20$  К в магнитных полях до 50 кЭ наблюдались осцилляции магнитосопротивления (эффект Шубникова–де Гааза). Из температурной зависимости амплитуды осцилляций нами была определена эффективная масса носителей заряда ( $m^* = 0.026m_0$ ), которая оказалась равной эффективной массе электронов в  $n\text{-InAs}$  ( $m^* = 0.026m_0$ ); этот результат подтвердил, что электронный канал расположен на стороне  $p\text{-InAs}$ . Малая величина эффективной массы может быть объяснена большой шириной квантовой ямы на стороне InAs (более 150 Å), что приводит к более низкой энергии локализации электронов и более низкой электронной массе [11].

Из периода осцилляций определена также двумерная концентрация электронов в канале  $N_s \sim 10^{11}$  см<sup>-2</sup> и ширина ямы  $\sim 400$  Å. Температура Дингла оказалась равной  $T = 7-10$  К при  $T = 4.2$  К, что соответствует уширению квантовых уровней в пределах 2–3 мэВ.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты позволяют утверждать, что в разьединенных гетероструктурах II типа GaInAsSb/ $p\text{-InAs}$  на границе со стороны InAs образуется электронный канал с высокой подвижностью, который сохраняется при слабом легировании эпитаксиального слоя как донорными (теллуrom), так и акцепторными (цинком) примесями. При сильном легировании акцепторными примесями твердого раствора наблюдается резкое падение подвижности в структуре, обусловленное как истощением электронного канала за счет локализации носителей в ямах потенциального рельефа, так и в результате взаимной компенсации электронов и дырок на самой гетерогранице.

Данная работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований. Проект N 96-02-1784/a.

## Список литературы

- [1] Баранов А.Н., Джуртанов Б.Е., Именков А.Н., Рогачев А.А., Шерняков Ю.М., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1986. Т. 20. С. 2217.
- [2] Choi H.K., Turner G.W., Eglash S.L. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. P. 2474.
- [3] Yakovlev Yu.P., Baranov A.N., Imenkov A.N., Mikhailova M.P. // SPIE. 1991. V. 1510. P. 120.
- [4] Моисеев К.Д., Михайлова М.П., Ершов О.Г., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1995. Т. 30. С. 339.
- [5] Gong X., Kan H., Yamaguchi T., Suzuki I., Aogata M., Kumagawa M., Rowell N.L., Wang A., Rinfret R. // Jpn. J. Appl. Phys. 1994. V. 33. P. 1740.
- [6] Mikhailova M.P., Titkov A.N. // Semicond. Sci. Tech. 1994. V. 9. P. 1279.
- [7] Михайлова М.П., Андреев И.А., Воронина Т.И., Лагунова Т.С., Моисеев К.Д., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1995. Т. 29. С. 678.
- [8] Воронина Т.И., Лагунова Т.С., Михайлова М.П., Моисеев К.Д., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1996. Т. 30. С. 523.
- [9] Воронина Т.И., Джуртанов Б.Е., Лагунова Т.С., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1991. Т. 25. С. 293.
- [10] Хилсум К., Роуз-Инс. // Полупроводники типа  $A^3B^5$ . М., 1963.
- [11] Von Bardeleben H.J., Jia J.G., Manasren M.G., Stuz C.E. // Appl. Phys. Lett. 1993. Т. 62. С. 90.