

Взаимодействие носителей заряда с локализованными магнитными моментами марганца в гетероструктурах $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}:\text{Mn}$

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

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

(Получена 3 февраля 2003 г. Принята к печати 4 февраля 2003 г.)

Исследованы транспортные свойства гетероструктур $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}:\text{Mn}$ с нелегированными слоями твердых растворов, близких по составу к GaSb ($x \lesssim 0.22$) при концентрации марганца в подложке $(5-7) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, полученных методом жидкофазной эпитаксии. Установлено, что на гетерогранице со стороны арсенида индия существует электронный канал. Обнаружены аномальный эффект Холла и отрицательное магнитосопротивление при высоких температурах (77–200 К). Эти эффекты могут быть объяснены обменным $s-d$ -взаимодействием ионов марганца в подложке с s -электронами в двумерном канале. Оценен эффективный магнитный момент ионов марганца $\mu = 200 \mu_B$ при $T = 77 \text{ К}$.

1. Введение

В работах [1–3] было показано, что в одиночных гетероструктурах $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$ с нелегированными слоями твердых растворов, близких по составу к GaSb ($x \lesssim 0.22$), на гетерогранице существует электронный канал, обладающий полуметаллическими свойствами с высокой подвижностью электронов при 77 К $\mu_{77} = (3-7) \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. В этих работах были исследованы эффект Холла, подвижность и магнитосопротивление в зависимости от температуры и напряженности магнитного поля и показано, что наблюдаемые в электронном канале коэффициент Холла и электронная подвижность сохраняли постоянные значения от 77 до 200 К и не зависели от напряженности магнитного поля. Магнитосопротивление было положительным и определялось величиной подвижности. В качестве высокоомной подложки использовался сильно компенсированный $p\text{-InAs}:\text{Zn}$ или $p\text{-InAs}:\text{Mn}$ с концентрацией дырок $p_{300} \lesssim 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Однако при высокой степени компенсации в $p\text{-InAs}$ при $T > 200 \text{ К}$ начинается переход к собственной проводимости и подложка шунтирует все транспортные свойства в гетероструктуре $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$.

Настоящая работа посвящена исследованию транспортных свойств гетероструктур $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}:\text{Mn}$ при более высоком уровне легирования подложки марганцем ($p = (5-7) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Это актуально, так как марганец в качестве акцепторной примеси в арсениде индия используется при изготовлении различных опто-

электронных приборов. Известно, что марганец относится к переходным элементам Периодической системы, его атомы имеют незаполненную $3d$ -оболочку и заполненную $4s$ (электронные конфигурации $3d^5$ и s^2). Марганец хорошо растворяется в InAs, занимая узлы в индиевой подрешетке. Когда концентрация марганца в арсениде индия становится достаточно большой, он проявляет специфические свойства: при низких температурах он оказывается в зарядовом состоянии Mn^{3+} (электронная конфигурация $3d^4$) и обеспечивает электронный тип проводимости. С повышением температуры атомы марганца способны захватить по одному электрону из валентной зоны, изменить зарядовое состояние на Mn^{2+} (электронная конфигурация $3d^5$), в результате проявляется дырочный тип проводимости.

Цель работы состояла в исследовании поведения примеси марганца в гетеропереходах $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}:\text{Mn}$ ($x = 0.04, 0.09, 0.22$) и в подложке $p\text{-InAs}:\text{Mn}$, когда концентрация дырок в InAs составляла $p = (5-7) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Изучалось влияние обменного взаимодействия носителей тока с магнитными моментами марганца на транспортные свойства исследуемых гетероструктур.

2. Экспериментальные результаты

Методом жидкофазной эпитаксии на подложках $p\text{-InAs}:\text{Mn}$ толщиной 350 мкм с концентрацией дырок $p = (5-7) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ выращивались эпитаксиальные

Характеристики гетероструктур $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}:\text{Mn}$ при $T = 77 \text{ К}$

№ образца	Содержание In, x	Концентрация дырок p , см^{-3}	R_H , $\text{см}^2/\text{Кл}$		μ_H , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$		$\Delta\rho/\rho, \%$	
			$H = 2 \text{ кЭ}$	$H = 20 \text{ кЭ}$	$H = 2 \text{ кЭ}$	$H = 20 \text{ кЭ}$	$H = 2 \text{ кЭ}$	$H = 20 \text{ кЭ}$
1	0.04	10^{17}	$-7 \cdot 10^5$	$-7 \cdot 10^5$	-44000	-40000	+4	+140
2	0.09	10^{17}	$-9 \cdot 10^5$	$-9 \cdot 10^5$	-48000	-46000	+2	+110
3	0.22	10^{17}	$-6 \cdot 10^5$	$-6 \cdot 10^5$	-30000	-30000	+5	+170
4	0.04	$5 \cdot 10^{18}$	-220	+5.4	-440	+14	-1.3	-9.2
5	0.09	$6 \cdot 10^{18}$	-1170	-12	-2800	-20	-4	-30
6	0.22	$7 \cdot 10^{18}$	-390	+4	-1200	+13	-1.5	-10.3

слои твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ с содержанием индия $x = 0.04, 0.09, 0.22$. Толщина эпитаксиальных слоев составляла 1–2 мкм. С помощью измерений просветляющей электронной микроскопии была показана резкость гетерограницы $\text{InAs}/\text{GaInAsSb}$ с шириной переходного слоя 3–4 монослоя. Эпитаксиальные слои преднамеренно не легировались, имели p -тип проводимости с концентрацией дырок $p \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $\mu_H \approx 2000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $T = 77 \text{ К}$. Для исследования параметров гетероструктур $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}:\text{Mn}$ шесть индиевых контактов наносились на образец со стороны эпитаксиального слоя, на которых измерялись коэффициент Холла R_H , электропроводность σ , холловская подвижность μ_H и поперечное магнитосопротивление $\Delta\rho/\rho$ в магнитных полях 0–20 кЭ при температурах 77–300 К. Аналогичные измерения делались и со стороны подложки. В таблице приведены основные параметры при $T = 77 \text{ К}$ для гетероструктур $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}:\text{Mn}$, измеренных со стороны эпитаксиального слоя.

На рис. 1, *a, b* представлены результаты измерения коэффициента Холла R_H и холловской подвижности μ_H в зависимости от напряженности магнитного поля H при $T = 77 \text{ К}$ в гетероструктурах $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}:\text{Mn}$, измеренных со стороны эпитаксиального слоя, при концентрации дырок в подложке $p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (образцы 1–3) и $p \gtrsim 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (образцы 4–6). Как видно из рис. 1, *a, b*, при концентрации дырок в подложке $p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (образцы 1–3) наблюдаются высокие значения коэффициента Холла R_H и электронной подвижности μ_H , которые практически не зависят от напряженности магнитного поля до 20 кЭ. В гетероструктурах $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}:\text{Mn}$ при концентрации дырок в подложке $p \gtrsim 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, измеренных со стороны эпитаксиального слоя, при всех составах твердого раствора ($x = 0.04, 0.09, 0.22$, образцы 4, 5, 6) зависимости коэффициента Холла и подвижности принципиально отличаются от аналогичных зависимостей в образцах 1–3: коэффициент Холла R_H и электронная подвижность μ_H становятся на 2 порядка ниже, слегка уменьшаются с ростом напряженности магнитного поля до 5 кЭ, при более высоких полях наблюдается резкое уменьшение R_H и μ_H , а при $H \gtrsim 18 \text{ кЭ}$ тип проводимости изменяется с электронного на дырочный.

В отличие от измерений со стороны эпитаксиального слоя, при измерениях образцов 4–6 со стороны подложки при всех напряженностях магнитного поля при $T = 77 \text{ К}$ наблюдается дырочный тип проводимости, коэффициент Холла R_H и дырочная подвижность μ_H возрастают с ростом напряженности магнитного поля. Поскольку измеренные со стороны подложки зависимости в образцах 4–6 были практически одинаковыми, на рис. 1, *a, b* они приведены пунктиром для одного из образцов (образца 6) с концентрацией дырок $p = 7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 2, *a* и *b* представлены зависимости коэффициента Холла R_H и подвижности μ_H от температуры

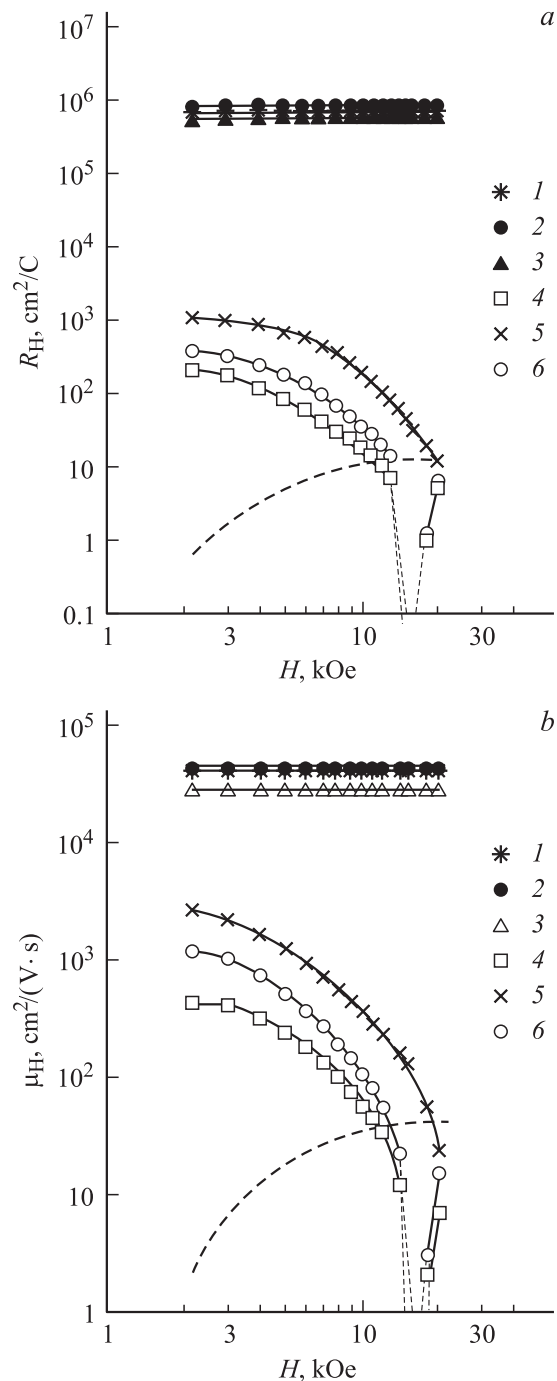


Рис. 1. Зависимости коэффициента Холла R_H (*a*) и холловской подвижности μ_H (*b*) от напряженности магнитного поля H при $T = 77 \text{ К}$. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице. Штриховые линии — R_H и μ_H в образце 6 со стороны подложки.

в гетероструктурах, измеренные со стороны эпитаксиального слоя, при напряженности магнитного поля $H = 3 \text{ кЭ}$. В образцах 1–3, выращенных на подложках с концентрацией марганца $p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, коэффициент Холла и подвижность сохраняют постоянные значения до 200 К, выше 200 К значения R_H и μ_H резко падают

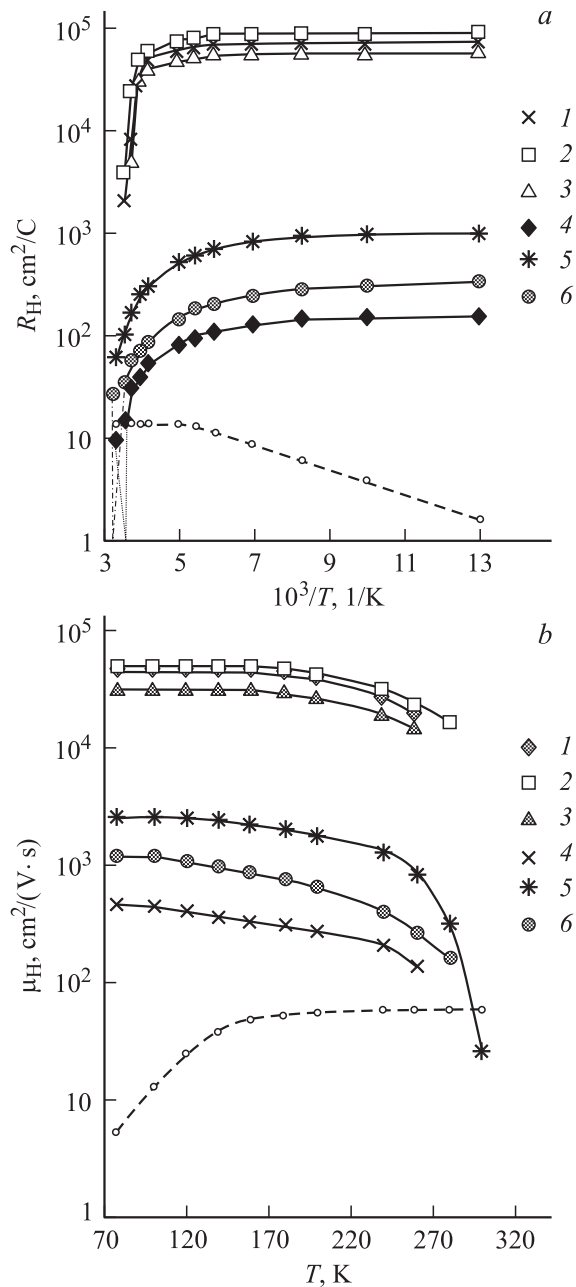


Рис. 2. Зависимости коэффициента Холла R_H (a) и подвижности μ_H (b) от температуры при напряженности магнитного поля $H = 3$ кЭ. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице. Штриховые кривые — R_H и μ_H в образце 6 со стороны подложки.

из-за проявления собственной проводимости в подложке. В образцах 4–6, выращенных на подложках с концентрацией марганца $p = (5-7) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, R_H и μ_H в интервале температур $T = 77-200$ К плавно уменьшаются (приблизительно в 2 раза), выше 200 К так же, как в образцах 1–3, наблюдается резкое уменьшение коэффициента Холла R_H и подвижности μ_H .

Измерения на образцах 4–6 при $H = 3$ кЭ со стороны подложки (штриховые линии на рис. 2, a и 2, b) при

всех температурах указывают на дырочный тип проводимости. Коэффициент Холла и подвижность растут с ростом температуры до 200 К, выше 200 К стремятся к насыщению.

На рис. 3 представлен коэффициент Холла R , рассчитанный на единицу объема, в зависимости от температуры для подложки $p\text{-InAs:Mn}$ с концентрацией марганца $p = 7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (образец 6) при напряженности магнитного поля $H = 3$ и 10 кЭ. Видно, что при $H = 3$ кЭ коэффициент Холла с понижением температуры уменьшается гораздо сильнее, чем при $H = 10$ кЭ. При $T = 77$ К значения коэффициента Холла при $H = 3$ кЭ становятся на порядок ниже, чем при $H = 10$ кЭ. На этом же рисунке (штриховой линией) приведена зависимость коэффициента Холла от температуры при $H = 10$ кЭ для InAs:Mn приблизительно с такой же концентрацией дырок, взятая из работы [4]. Резкое уменьшение R_H при $H = 10$ кЭ наступало при $T < 77$ К и при $T \approx 50$ К наблюдалась смена знака коэффициента Холла.

На рис. 4 представлены зависимости поперечного магнитосопротивления от напряженности магнитного поля в гетероструктурах $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs:Mn}$ при $T = 77$ К. Как видно на рис. 4, при всех составах твердого раствора, выращенных на подложках с концентрацией марганца $p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (образцы 1–3), наблюдается обычное лоренцовское положительное магнитосопротивление (ПМС). ПМС возрастает

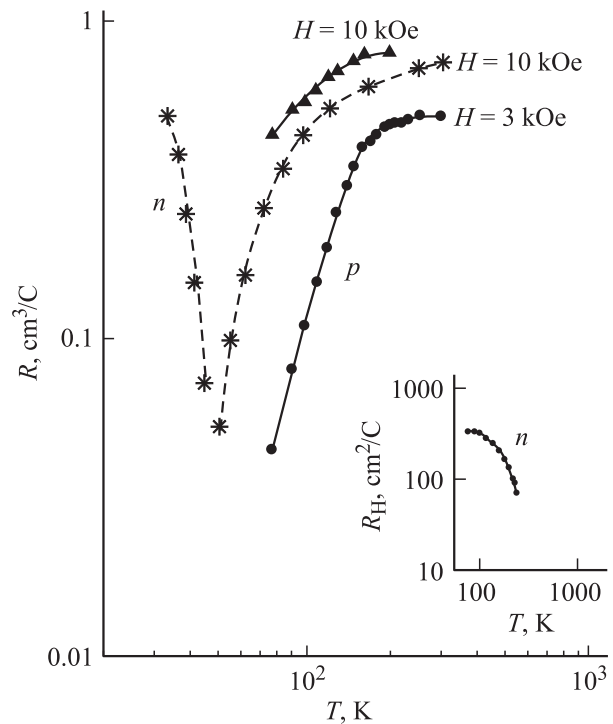


Рис. 3. Зависимости коэффициента Холла R от температуры для подложки образца 6 при $H = 10$ и 3 кЭ (сплошные линии) и для образца InAs:Mn с $p = 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при $H = 10$ кЭ [4] (штриховая). На вставке — зависимость R_H от температуры для гетероструктуры образца 6, $H = 3$ кЭ.

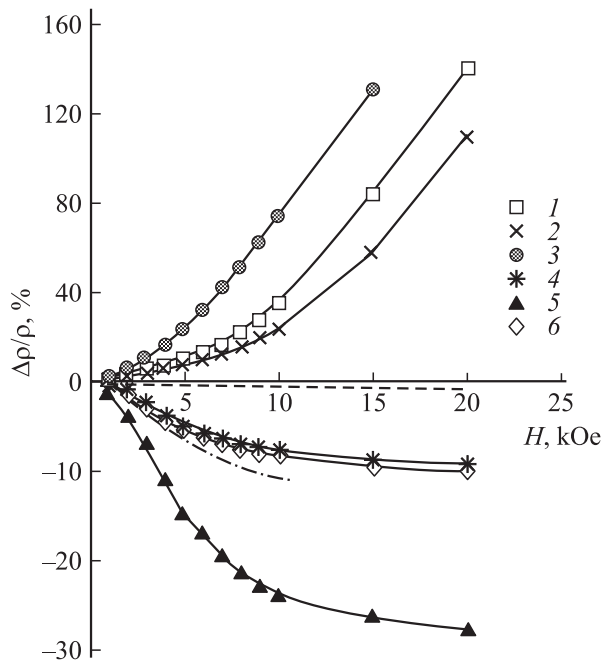


Рис. 4. Зависимости поперечного магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho$ от напряженности магнитного поля H при $T = 77$ К. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице. Штриховая линия — $\Delta\rho/\rho$ при измерении со стороны подложки образца 6. Штрихпунктирная — результаты работы [4], $p = 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $T = 4.2$ К.

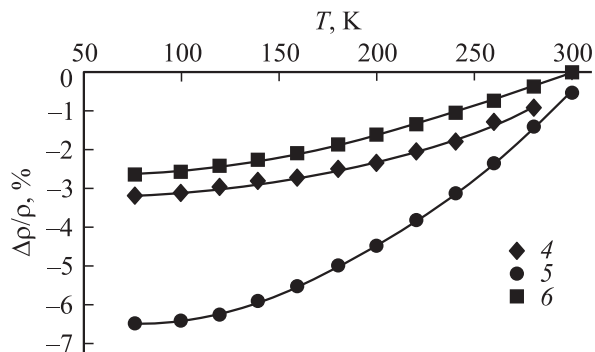


Рис. 5. Зависимости магнитосопротивления от температуры при $H = 3$ кЭ. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

ет с ростом напряженности магнитного поля пропорционально H^2 . Малый коэффициент магнитосопротивления $B_r = (\Delta\rho/\rho)(c/\mu^2 H^2) = 0.1-0.2$ обусловлен рассеянием на ионах примеси, которое является доминирующим, что подтверждает высокое качество гетерограницы (отсутствие шероховатостей, петель дислокаций и других дефектов).

В гетероструктурах $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs:Mn}$ при всех составах твердого раствора, выращенных на подложках с концентрацией дырок $p = (5-7) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (образцы 4-6), в отличие от образцов 1-3, наблюдается отрицательное магнитосопротивление (ОМС), которое возрастает пропорционально H^2 до 5 кЭ, а при более высоких полях ($H > 10$ кЭ) стремится к насыщению. При измерении образцов 4-6 со стороны подложки (штриховая кривая на рис. 4) также наблюдается ОМС, но величина его значительно меньше (менее 1%).

ОМС в зависимости от температуры при $H = 3$ кЭ для образцов 4-6, измеренных со стороны эпитаксиального слоя, представлено на рис. 5. Видно, что наблюдается слабая зависимость от температуры до 200 К, а выше 200 К ОМС резко падает, но даже при $T = 300$ К наблюдается вклад отрицательного магнитосопротивления (порядка 1%). Измерения температурной зависимости ОМС со стороны подложки были затруднительны из-за малости эффекта.

Таким образом, из экспериментальных данных, представленных на рис. 1-3, следует, что транспортные свойства гетероструктур $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs:Mn}$, выращенных на подложках с концентрацией $p = (5-7) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (образцы 4-6), принципиально отличаются от аналогичных гетероструктур, выращенных на слабо легированных подложках с концентрацией $p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (образцы 1-3), и это может быть связано только с различными свойствами подложки.

Таким образом, из экспериментальных данных, представленных на рис. 1-3, следует, что транспортные свойства гетероструктур $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs:Mn}$, выращенных на подложках с концентрацией $p = (5-7) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (образцы 4-6), принципиально отличаются от аналогичных гетероструктур, выращенных на слабо легированных подложках с концентрацией $p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (образцы 1-3), и это может быть связано только с различными свойствами подложки.

3. Обсуждение экспериментальных результатов

Рассмотрим вначале транспортные свойства в подложке $p\text{-InAs:Mn}$ с концентрацией $p = (5-7) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а затем в электронном канале в структуре $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs:Mn}$ с концентрацией марганца $(5-7) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

3.1. Свойства подложки $p\text{-InAs:Mn}$ с концентрацией $p = 7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

Свойства подложки, представленные на рис. 1-4, рассмотрим на примере подложки образца 6. Из значений коэффициента Холла при $T = 300$ К и $H = 20$ кЭ (рис. 3) следует, что концентрация дырок в подложке образца 6 равна $p = 7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. При концентрации дырок $p = 7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ должно наблюдаться постоянство коэффициента Холла независимо от напряженности магнитного поля в интервале температур $T = 77-300$ К вследствие вырождения электронно-дырочного газа, как это наблюдалось в $p\text{-InAs:Zn}$ с аналогичной концентрацией дырок [5]. Уменьшение коэффициента Холла с понижением температуры и напряженности магнитного поля указывает на аномальный характер зависимости коэффициента Холла (АЭХ), свойственный полупроводникам с магнитными примесями. Подобный аномальный эффект Холла в арсениде индия наблюдался ранее в работе [4] в монокристаллических образцах InAs:Mn , когда концентрация марганца в образце составляла $(5-8) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Измеренный коэффициент Холла резко убывал с понижением температуры и в области температур 45-90 К изменял знак с дырочного

на электронный (см. штриховую линию на рис. 3). В работе [4] показано, что когда концентрация Mn в арсениде индия становится больше 10^{18} см^{-3} , он способен с понижением температуры изменять свой заряд с 3 на 2, при этом изменяется соотношение между конфигурациями $3d^4$ и $3d^5$, что приводит к уменьшению концентрации дырок в валентной зоне и появлению ионов Mn с конфигурацией $3d^5$. Такое явление в $A^{III}B^V$ происходит только в InSb [6] и в InAs [7,8], в которых Mn, как акцепторная примесь, имеет энергию активации $E_A \lesssim 0.03 \text{ эВ}$, что близко к водородоподобной модели, в отличие от GaAs и InP, где Mn представляет собой многозарядный глубокий акцепторный уровень с $E_A \approx 0.1 \text{ эВ}$ [8]. В $p\text{-InAs:Mn}$ марганец создает мелкий примесный уровень с энергией, согласно водородоподобной модели $E_A = (0.028 - aN^{1/3}) \text{ эВ}$, где $a = 1.31 \cdot 10^{-8} \text{ эВ} \cdot \text{см}$. При $p = 4 \cdot 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ происходит перекрытие электронных оболочек соседних атомов и сближение примесных уровней с валентной зоной.

Наблюдаемый аномальный эффект Холла объясняется специфическим обменным взаимодействием носителей заряда с магнитными примесями марганца. Экспериментально измеренный коэффициент Холла R_{exp} с понижением температуры определяется алгебраической суммой нормального коэффициента Холла R , вызванного действием силы Лоренца на носители тока, и аномального коэффициента Холла $R_I \chi_{\text{Mn}}$, связанного с намагниченностью образца и спин-орбитальным взаимодействием [9]:

$$R_{\text{exp}} = R + R_I \chi_{\text{Mn}}, \quad (1)$$

где χ_{Mn} — магнитная восприимчивость, $R_I \chi_{\text{Mn}}$ — коэффициент Холла, определяемый магнетизмом марганца.

На рис. 6 представлена зависимость $R_I \chi_{\text{Mn}}$ от обратной температуры для образца, приведенного в работе [4] (рис. 6, кривая 3), и для подложки образца 6 (кривая 1) при $H = 10 \text{ кЭ}$ и (кривая 2) при $H = 3 \text{ кЭ}$. Видно, что при $H = 10 \text{ кЭ}$ эти зависимости линейны в интервале температур 77–200 К. В области низких температур ($T \lesssim 77 \text{ К}$), с появлением ионов марганца в зарядовом состоянии $\text{Mn}^{3+} (d^4)$ в больших количествах, наблюдается отклонение от линейной зависимости (см. кривую 3).

Можно полагать, что линейный характер зависимости $R_I \chi_{\text{Mn}}$ от обратной температуры в области высоких температур определяется в основном магнитной восприимчивостью χ_{Mn} , которая также линейно зависит от обратной температуры. Закон Кюри, характеризующий магнитную восприимчивость двухзарядных ионов марганца $\text{Mn}^{2+} (d^5)$, определяется формулой [4].

$$\chi_{\text{Mn}} = N \mu_B g^2 S(S+1) / 3kT, \quad (2)$$

где N — концентрация ионов марганца, $S = 5/2$ — спиновый момент, $g = 2$ — фактор Ланде, μ_B — магнетон Бора.

В области низких температур, с появлением ионов марганца в зарядовом состоянии $\text{Mn}^{3+} (d^4)$ в больших

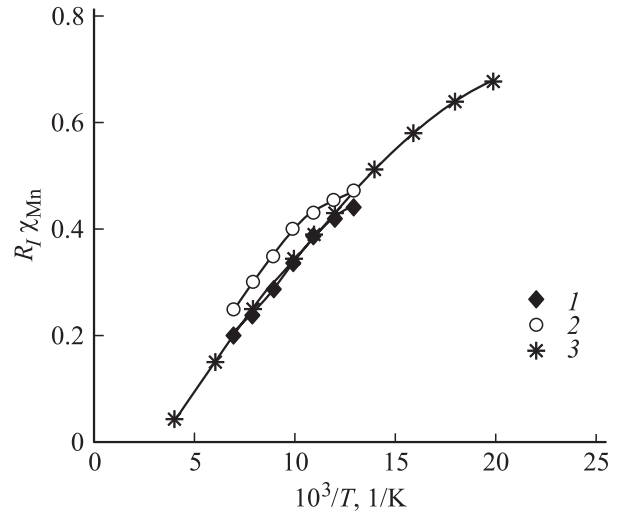


Рис. 6. Зависимость $R_I \chi_{\text{Mn}}$ от обратной температуры: 1 — для подложки образца 6, $H = 10 \text{ кЭ}$; 2 — для нее же при $H = 3 \text{ кЭ}$; 3 — для InAs:Mn с $p = 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при $H = 10 \text{ кЭ}$ из работы [4].

количествах, наблюдается отклонение от закона Кюри. На энергетическую схему ионов марганца с конфигурацией $3d^4$ существенное влияние оказывает расщепление энергетических уровней кристаллическим полем и спин-орбитальным взаимодействием. В этой области температур средняя величина магнитного момента иона марганца зависит от заселенности различных уровней его мультиплета и, следовательно, от температуры. Линейная зависимость магнитной восприимчивости в области низких температур определяется формулой [7]

$$\chi = n g^2 \mu_B^2 S_Z^2 / kT, \quad (3)$$

где ориентированный спиновый момент $S_Z = \pm 2$, $g = 2$. Исследования в работе [7] показали слабую зависимость χ от ориентации, и для формулы (3) получили значения произведения $g S_Z = 2.3$, при этом $n = N$ — полная концентрация ионов марганца.

Сопоставляя наши данные для $R_I \chi_{\text{Mn}}$ при $H = 10$ и 3 кЭ для подложки образца 6 (рис. 6, кривые 1 и 2), можно видеть, что с понижением напряженности магнитного поля отклонение от линейной зависимости, характеризующей закон Кюри, наблюдается при более высоких температурах вследствие увеличения концентрации марганца в состоянии $\text{Mn}^{3+} (d^4)$. Можно предполагать, что эффект спин-орбитального взаимодействия при $H = 3 \text{ кЭ}$ начинает проявляться при более высоких температурах.

О спиновом взаимодействии носителей заряда с магнитными ионами марганца свидетельствует и существование ОМС. В подложке образца 6 оно составляет при $T = 77 \text{ К}$ менее 1% (рис. 4, штриховая линия). Большое ОМС наблюдалось в работе [4] только при гелиевых температурах (рис. 4, штрихпунктирная кривая).

3.2. Свойства электронного канала на гетеропереходе $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs:Mn}$

Из экспериментальных данных, представленных на рис. 1–4, следует, что транспортные свойства гетероструктур $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs:Mn}$, выращенных на подложках с концентрацией $p \gtrsim 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (образцы 4–6), принципиально отличаются от аналогичных свойств гетероструктур, выращенных на слабо легированных подложках с концентрацией $p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (образцы 1–3), и это нельзя объяснить простым шунтированием подложкой, как в случае легирования немагнитными примесями, например цинком [5].

Проанализируем полученные результаты для образцов 4–6, измеренных со стороны эпитаксиального слоя, в рамках трехслойной модели по формуле

$$\mu_{\text{H}} n h = \mu_1^2 p_1 h_1 + \mu_2^2 p_2 h_2 - \mu_3^2 n_3 h_3, \quad (4)$$

где h — общая толщина образца, n , p и μ_{H} — экспериментально измеренные концентрация и подвижность носителей заряда, индексы 1, 2, 3 относятся соответственно к эпитаксиальному слою твердого раствора, подложке и электронному каналу. Мы установили, что в образцах 4–6, измеренных со стороны эпитаксиального слоя, при $H \lesssim 5 \text{ кЭ}$ в интервале температур $T = 77\text{--}200 \text{ К}$ преобладает электронный тип проводимости, а вклад эпитаксиального слоя твердого раствора p -типа и подложки p -типа в общий измеряемый эффект начинает заметно сказываться только при более высоких температурах и напряженностях магнитного поля.

Таким образом, можно сделать вывод, что в магнитных полях $H \lesssim 5 \text{ кЭ}$ и при $T \lesssim 200 \text{ К}$ при измерениях со стороны твердого раствора мы изучаем электронный канал на гетеропереходе $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs:Mn}$ при всех составах твердого раствора.

В гетероструктурах $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs:Mn}$ при концентрации марганца в подложке $p = (5\text{--}7) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ коэффициент Холла R_{H} и подвижность μ_{H} в электронном канале (образцы 4–6) на порядок ниже, чем в аналогичных структурах, но выращенных на подложках с концентрацией марганца $p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (образцы 1–3). Это может быть связано с изменением энергетической структуры гетероперехода из-за расщепления уровней марганца кристаллическим полем и спин-орбитальным взаимодействием. Исходя из полученных ранее оценок энергетического канала и зависимости ширины электронного канала от подвижности [2], подвижность $500\text{--}3000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ соответствует эффективной ширине канала $100\text{--}200 \text{ \AA}$.

Зависимость R_{H} от обратной температуры в образце 6 (рис. 6) в электронном канале при $T = 77\text{--}200 \text{ К}$ имеет такой же характер, как и при измерениях коэффициента Холла в объемном образце InAs:Mn с концентрацией дырок $p = 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при более низких температурах ($T < 50 \text{ К}$), когда преобладает марганец в зарядовом состоянии $\text{Mn}^{3+} (d^4)$, что, как говорилось выше, объясняется проявлением спин-орбитального взаимодействия. Исходя из этого можно предположить, что АЭХ

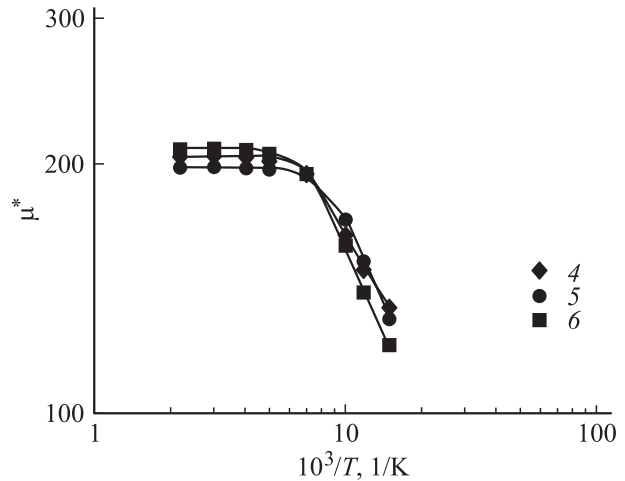


Рис. 7. Зависимости эффективного магнитного момента ионов Mn $\mu^* = \mu/\mu_{\text{B}}$ от магнитного поля H . Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

в структурах с электронным каналом, наблюдаемый при $H = 3 \text{ кЭ}$ при температурах $T = 77\text{--}200 \text{ К}$, может быть обусловлен магнитными свойствами подложки и взаимодействием ионов марганца $\text{Mn}^{3+} (d^4)$ с электронами на гетерогранице.

Как мы видели ранее (рис. 4, 5), в гетероструктурах $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs:Mn}$ при сильном легировании подложки марганцем (образцы 4–6) наблюдается отрицательное магнитосопротивление в отличие от аналогичных гетероструктур, изготовленных на слабо легированных марганцем подложках (образцы 1–3), где наблюдалось положительное магнитосопротивление. Появление ОМС в гетероструктурах с электронным каналом так же, как в сильно легированных марганцем подложках, наблюдается одновременно с проявлением АХЭ. Однако величина ОМС в таких структурах достигает 30% при 77 К , в то время как в объемном образце арсенида индия, сильно легированного марганцем, такой эффект достигается только при $T = 4.2 \text{ К}$ (рис. 4, штрихпунктир).

На рис. 4 можно видеть, что при $T = 77 \text{ К}$ зависимость ОМС от напряженности магнитного поля имеет классический характер: оно пропорционально H^2 в слабом магнитном поле ($H \lesssim 5 \text{ кЭ}$) и насыщается при $H > 10 \text{ кЭ}$. При этом даже при дырочной проводимости при $H \gtrsim 18 \text{ кЭ}$ не появляется иных эффектов, кроме ОМС. Появление ОМС на гетерогранице может быть связано только со взаимодействием носителей заряда с магнитными моментами ионов марганца в InAs:Mn . Полученные экспериментальные результаты при всех составах твердого раствора хорошо описываются формулой, данной в работе [10]:

$$\Delta\rho/\rho_{\text{exp}} = \Delta\rho/\rho_{\text{sat}} \text{th}^2(\mu H/kT), \quad (5)$$

где μ — магнитный момент ионов марганца.

Зная зависимость $\Delta\rho/\rho$ от напряженности магнитного поля, можно вычислить магнитный момент μ . На рис. 7

видно, что при всех составах твердого раствора при $T = 77$ К в магнитных полях $H \lesssim 5$ кЭ, когда ОМС квадратично зависит от магнитного поля, магнитный момент $\mu = 200\mu_B$. Большая величина магнитного момента создает большую магнитную энергию μH , которая при $H = 5$ кЭ становится сравнимой с тепловой энергией kT вплоть до 200 К. Появление такого большого ОМС при $T = 77$ К наблюдается только на гетероструктурах в электронном канале. В объемном p -InAs:Mn при аналогичном уровне легирования марганцем такая величина ОМС наблюдалась только при $T = 4.2$ К [4].

Величина $\Delta\rho/\rho_{\text{sat}}$ определяет концентрацию магнитных центров N_m [9]. Из наших экспериментов видно, что чем выше подвижность электронов на гетерогранице, тем больше концентрация магнитных центров.

Можно сделать вывод, что ОМС определяется обменным спин-орбитальным взаимодействием ионов марганца с s -электронами в канале. Спин-орбитальное взаимодействие эквивалентно действию мощного квазимагнитного молекулярного поля [11] на спины внешних s -электронов в канале. Сильное „квазимагнитное“ поле со стороны ионов марганца ориентирует спины электронов и при наложении внешнего магнитного поля наблюдается большое ОМС, пока преобладает проводимость в электронном канале.

Полученная величина магнитного момента $\mu = 200\mu_B$ позволяет по формуле (4) оценить магнитную восприимчивость χ на гетерогранице, $\chi = 10^{-2}$ ед. CGSE/cm⁻³, на 3 порядка выше, чем в подложке.

4. Заключение

Экспериментальные исследования транспортных свойств гетероструктур p -GaInAsSb/ p -InAs:Mn с высоким содержанием марганца в подложке позволяют сделать следующие выводы.

1. В гетероструктурах p -Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/ p -InAs:Mn с нелегированными слоями твердых растворов, близких по составу к GaSb ($x \leq 0.22$), при концентрации дырок в подложке $p = (5-7) \cdot 10^{18}$ см⁻³ на гетерогранице со стороны арсенида индия существует электронный канал, в котором подвижность электронов $\mu_n = 500-3000$ см²/(В · с).

2. В структурах с электронным каналом наблюдается аномальный эффект Холла (АЭХ) и отрицательное магнитосопротивление (ОМС) и определяются они обменным s - d -взаимодействием ионов марганца в подложке с s -электронами в канале на гетерогранице.

3. АЭХ и ОМС в гетероструктурах наблюдаются при более высоких температурах, чем в подложке InAs:Mn. В частности, АЭХ наблюдается в гетероструктурах с электронным каналом при $T = 77$ К, а в объемных образцах — только при $T < 30$ К; ОМС наблюдается в структурах с электронным каналом при 77 К, а в объемных образцах такой же эффект можно увидеть только при $T = 4.2$ К.

4. Большая величина эффективного магнитного момента ($\mu = 200\mu_B$), определенного из ОМС, свидетельствует о высокой степени намагниченности гетерограницы, что связано со специфическими особенностями взаимодействия электронов в электронном канале с магнитными примесями марганца в подложке.

Работа частично поддержана грантом РФФИ, проект № 02-02-17633.

Список литературы

- [1] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **30**, 985 (1996).
- [2] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, А.Е. Розов, Ю.П. Яковлев. ФТП, **32**, 215 (1998).
- [3] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, А.Е. Розов, Ю.П. Яковлев. ФТП, **34**, 194 (2000).
- [4] Д.Г. Андрианов, В.В. Каратаев, Г.В. Лазарева, Ю.Б. Муравлев, А.С. Савельев. ФТП, **11**, 1252 (1977).
- [5] Ф.П. Кесаманлы, Т.С. Лагунова, Д.Н. Наследов, Л.Д. Николаева, М.Н. Пивоваров. ФТП, **2**, 56 (1968).
- [6] Д.Г. Андрианов, Г.В. Лазарева, А.С. Савельев, В.И. Фикуль. ФТП, **10**, 568 (1976).
- [7] Д.Г. Андрианов, А.С. Савельев. ФТП, **14**, 539 (1980).
- [8] Э.М. Омеляновский, В.И. Фикуль. *Примеси переходных металлов в полупроводниках* (М., Металлургия, 1983).
- [9] С.В. Вонсовский. *Современное учение о магнетизме* (М., 1953).
- [10] Э.И. Заварицкая, И.Д. Воронова, Н.В. Рождественская. ФТП, **6**, 1945 (1972).
- [11] H. Ohno. Phys. Rev. Lett., **68**, 2664 (1992).

Редактор Т.А. Полянская

Interaction of charge carriers with localized magnet moments of manganese in p -GaInAsSb/ p -InAs:Mn heterostructures

T.S. Lagunova, T.I. Voronina, M.P. Mikhailova, K.D. Moiseev, E. Samokhin, Yu. P. Yakovlev

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

Abstract Magnetotransport properties of p -Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/ p -InAs:Mn heterostructures grown by liquid phase epitaxy with undoped quaternary layers of solid solutions ($x \lesssim 0.22$) have been studied at Mn content in InAs substrate being $p = (5-7) \cdot 10^{18}$ cm⁻³. It has been found that there is an electron channel at the interface of these heterostructures. Anomalous Hall effect and negative magnetoresistance have been observed in the 77–200 K temperature range. These effects can be related to s - d exchange interaction of Mn ions with two dimensional electrons in the channel at the interface. Effective magnet moment of Mn ions was evaluated as $\mu = 200\mu_B$.