

03,05

Диодные гетероструктуры с ферромагнитными узкозонными полупроводниками A^3FeB^5 разного типа проводимости

© В.П. Лесников, М.В. Ведь, О.В. Вихрова[¶], Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, А.В. Здравейщев, И.Л. Калентьева, А.В. Кудрин, Р.Н. Крюков

Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия

[¶] E-mail: vikhrova@nifti.unn.ru

Поступила в Редакцию 28 февраля 2021 г.

В окончательной редакции 28 февраля 2021 г.

Принята к публикации 2 марта 2021 г.

Методом импульсного лазерного нанесения в вакууме изготовлены диодные структуры с ферромагнитными узкозонными полупроводниками A^3FeB^5 в качестве только *p*-области (*p*-GaFeSb/*n*-InGaAs), только *n*-области (*n*-InFeSb/*p*-InGaAs), *p*- и *n*-областей (*p*-GaFeSb/*n*-InFeSb, *p*-GaFeSb/*n*-InFeAs) *p*-*n*-перехода. Состав ферромагнитных полупроводниковых слоев и их толщины, определенные по результатам рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, в целом соответствуют технологическим данным для диодных структур. В частности толщина слоя GaFeSb составляет 25–30 nm, толщины слоев InFeAs и InFeSb — 35–40 nm. Содержание железа в InFeSb находится в пределах от 25 до 35 at.%. В слое GaFeSb содержится от 15 до 41 at.% железа, а в слое InFeAs регистрируется 35 at.% железа. При химическом анализе структур обнаружилось наличие химических связей Fe–As(Sb), In–Fe и Fe–Ga. Поэтому можно предположить, что в изготовленных структурах атомы Fe могут замещать элементы III и V групп одновременно.

Все структуры демонстрируют эффект отрицательного магнетосопротивления при достаточно низких напряжениях наблюдения эффекта (до 50 mV), в небольших магнитных полях (до 3600 Oe) и при высокой температуре измерений. Для диодов GaFeSb/InFeSb, GaFeSb/InFeAs отрицательное магнетосопротивление впервые наблюдалось при комнатной температуре. Гистерезисный вид зависимостей сопротивления от магнитного поля позволяет предполагать воздействие ферромагнитных свойств слоев узкозонных полупроводников на транспорт носителей в структурах.

Ключевые слова: импульсное лазерное нанесение, ферромагнитный полупроводник, диодные структуры, магнетосопротивление.

DOI: 10.21883/FTT.2021.07.51035.038

1. Введение

Технология изготовления железосодержащих магнитных полупроводников A^3B^5 начала активно развиваться с 2014–2015 г. [1–4]. В легированных железом (при концентрации менее 10 at.%) узкозонных полупроводниках A^3B^5 большинство атомов Fe находится преимущественно в положениях элементов III группы в нейтральном состоянии Fe^{3+} . Предполагается, что атомы железа обеспечивают только локальные магнитные моменты, в то время как свободные носители появляются благодаря наличию собственных дефектов или немагнитных легирующих примесей. Это позволяет изготавливать ферромагнитные полупроводники A^3B^5 как *n*-, так и *p*-типа проводимости с высокими температурами Кюри (T_C): *p*-GaFeSb, *n*-InFeSb и *n*-InFeAs [4–6]. Необходимо отметить, что полупроводник GaSb изначально имеет дырочную проводимость, а полупроводники InSb и InAs — электронную проводимость вследствие присутствия собственных точечных дефектов. Легирование железом приводит к значительному возрастанию концентрации дырок в GaSb и электронов в InSb и InAs.

В настоящее время активно исследуются электрические и магнитные свойства слоев указанных материалов, ведется поиск новых способов изготовления гетероструктур на их основе, появились первые работы по их приборному применению [7,8]. Авторы [7], используя туннельную спектроскопию при анализе диодной структуры Эсаки, состоящей из слоя ферромагнитного полупроводника (In,Fe)As *n*-типа проводимости и слоя *p*-типа InAs:V, выращенного на подложке *p*-InAs (001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), сообщили о большом спонтанном спиновом расщеплении (максимальная энергия расщепления $\Delta E \sim 50$ meV при 3.5 K) в зоне проводимости ферромагнитного полупроводника *n*-типа (In,Fe)As, сохраняющемся до относительно высоких температур (60 K). Результаты туннельной спектроскопии также показали, что уровень Ферми (In,Fe)As находится в зоне проводимости, и существует примесная зона, связанная с Fe и расположенная ниже дна зоны проводимости [7]. Исследование зависимости магнитопроводимости от напряжения смещения для такого спинового диода Эсаки обсуждалось в [8], где показано, что, изменяя величину напряжения прямо-

го смещения, можно переключать механизм переноса через p - n -переход (туннельный или диффузионный) и изменять участвующие в формировании тока зоны (зона проводимости, валентная зона или примесная зона). Анализировалась магнитополевая зависимость проводимости диода Эсаки при различных значениях подаваемого напряжения (U), измеренная в магнитном поле, направленном параллельно оси [110]. При $U < 450$ mV наблюдалось возрастание проводимости (на 0.5% при 1 Т). Когда напряжение прямого смещения увеличивалось выше 450 mV, проводимость, измеренная при температуре 3.5 К в магнитном поле $H = 1$ Т, уменьшается на 7.4% при $U \sim 650$ mV. Авторы [8] полагают, что наблюдаемая зависимость проводимости от напряжения смещения обусловлена не только сменой транспортного механизма (туннельный или диффузионный), но и участием электронов примесной зоны в транспорте при $U > 450$ mV в рассматриваемом спиновом диоде Эсаки.

В [9,10] показана возможность электрического управления ферромагнитными свойствами n -(In, Fe)Sb и двухслойной системы, состоящей из квантовой ямы InAs и ферромагнитного полупроводника (Ga, Fe)Sb. Исследован эффект электрического поля в n -(In_{0.89}, Fe_{0.11})Sb тонкопленочном канале с помощью структуры двухслойного транзистора, изготовленного на i -GaAs (001) подложке методом низкотемпературной МЛЭ с использованием буферного слоя AlSb [9]. Двухслойные структуры (немагнитный/магнитный материал), состоящие из проводящего канала в виде квантовой ямы InAs и ферромагнитного слоя (Ga, Fe)Sb, демонстрируют гигантское отрицательное магнетосопротивление ($\sim 80\%$ при 14 Т и температуре 2 К) [10]. Величина магнетосопротивления может контролироваться напряжением затвора. Эти результаты объясняются проникновением волновой функции двумерного электронного газа InAs в (Ga, Fe)Sb.

Согласно представленным литературным данным, определенные конструкции гетероструктур, содержащих p - n -переходы с ферромагнитными полупроводниковыми слоями или позволяющих реализовать структуру полевого транзистора, демонстрируют влияние магнитных свойств на электрические характеристики приборов и управление магнитными свойствами с использованием электрического поля.

Ранее нами были опубликованы предварительные результаты по изучению гальваномагнитных свойств p - i - n -структур, содержащих слои разбавленных магнитных полупроводников p -GaFeSb и n -InFeSb, разделенные спейсером GaAs [11]. Для изготовления структур использовался метод импульсного лазерного нанесения (содержание железа в слоях составляло 10 at.%). Обнаружено уменьшение сопротивления такого p - i - n -диода на 0.15–0.2% во внешнем магнитном поле (± 3600 Oe) при температурах от 10 до 70 К [11].

В данной работе представлены результаты исследований нескольких типов диодных гетероструктур с

ферромагнитными узкозонными слоями разного типа проводимости с большим содержанием атомов железа (p -GaFeSb, n -InFeSb и n -InFeAs), также изготовленных методом импульсного лазерного нанесения.

2. Методика эксперимента

Методом импульсного лазерного нанесения (ИЛН) в вакууме были выращены диодные гетероструктуры со слоями A^3FeB^5 в качестве только p -области (GaFeSb/ n -InGaAs) и только n -области (InFeSb/ p -InGaAs). Слои GaFeSb формировались при температуре 200°C поверх слаболегированного ($n \sim 7.8 \cdot 10^{16}$ cm⁻³) кремнием буферного слоя In_xGa_{1-x}As (содержание индия $x \sim 0.1$) толщиной около 1–1.1 μ m, изготовленного МОС-гидридной эпитаксией на подложке n^+ -GaAs(100). В конце ростового процесса на поверхность слоя GaFeSb наносился тонкий покровный слой GaSb (5–6 nm) для предотвращения окисления. Толщина слоев GaFeSb составляла около 30–50 nm. Слои InFeSb формировались при температуре 200°C поверх слаболегированного углеродом ($p \sim 6 \cdot 10^{16}$ cm⁻³) буферного слоя In_xGa_{1-x}As (содержание индия $x \sim 0.1$) толщиной ~ 1.5 μ m, изготовленного МОС-гидридной эпитаксией на подложке p^+ -GaAs(100). В конце ростового процесса на поверхность слоя InFeSb наносился тонкий покровный слой InSb (5–6 nm). Толщина слоев InFeSb составляла около 30–50 nm. Подобным образом на подложках n^+ -GaAs (100) были изготовлены гетероструктуры, содержащие слои A^3FeB^5 в качестве p - и n -областей (GaFeSb/InFeSb, GaFeSb/InFeAs) p - n перехода. По измерениям эффекта Холла ранее было показано, что изготовленные в таких условиях методом ИЛН слои GaFeSb, InFeSb и InFeAs обладают ферромагнитными свойствами вплоть до комнатной температуры [12,5,6].

Изготовленные структуры исследовались методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Измерения выполнены на сверхвысоковакуумном комплексе Omicron Multiprobe RM. Для возбуждения фотоэмиссии использовалось Al $K\alpha$ -излучение с энергией 1486.7 eV. Диаметр области анализа составлял 3 mm. Получение профилей распределения концентраций химических элементов по глубине в образцах осуществлялось путем травления поверхности ионами Ar⁺. Пучок последних характеризуется однородным распределением в сечении (диаметр 20 mm), энергия пучка составляла 1 keV, угол падения = 45°. Атомная концентрация элементов в слоях определялась методом факторов относительной чувствительности [13]. Анализировались фотоэлектронные (ФЭ) линии Fe 2p (~ 710 eV), Sb 3d (~ 530 eV), Ga 3d (~ 20 eV), As 3d (~ 40 eV), In 3d_{5/2} (~ 440 eV), O 1s (~ 530 eV) и C 1s (285 eV). Определение химических связей определялось путем разложения ФЭ-линий на спектральные компоненты [14].

На основе полученных структур были изготовлены меза-структуры диодов (диаметром 500 μ m). Процесс

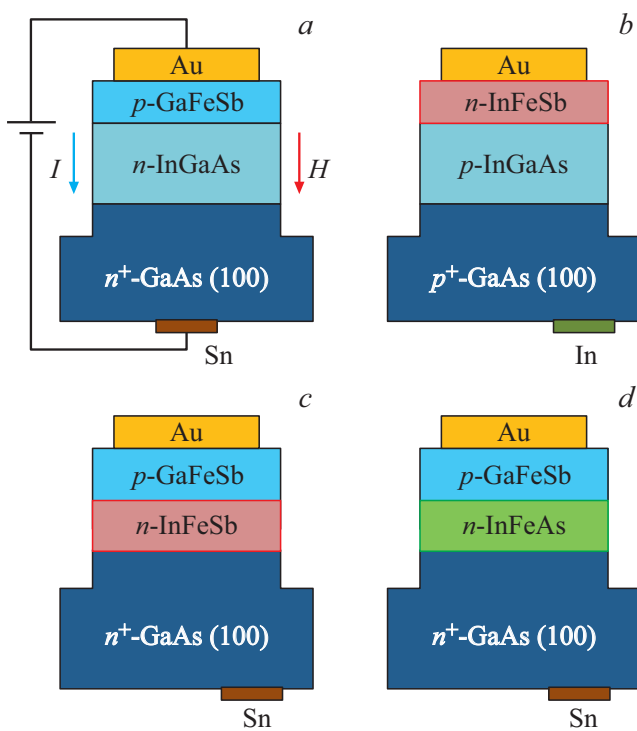


Рис. 1. Схематическое изображение изготовленных мезоструктур диодов: (a) GaFeSb/n-InGaAs, (b) InFeSb/p-InGaAs, (c) GaFeSb/InFeSb и (d) GaFeSb/InFeAs. На фрагменте (a) показано подключение диода при исследовании, направление электрического тока и внешнего магнитного поля.

изготовления включал в себя формирование омических металлических контактов методом электронно-лучевого испарения в вакууме, фотолитографию и химическое травление. Контакт со стороны подложки формировался электроискровым вжиганием оловянной или индиевой фольги. Схематическое изображение изготовленных мезоструктур диодов приведено на рис. 1. Там же показано подключение диода при исследовании гальваномагнитных свойств, направление электрического тока и внешнего магнитного поля (фрагмент (a)).

С использованием криостата замкнутого цикла изучались вольт-амперные характеристики (ВАХ) и магнитопольные зависимости сопротивления изготовленных диодов при температурах от 10 до 300 К. Магнитное поле, варьируемое с помощью электромагнита в диапазоне $H = \pm 3600$ Ое, прикладывалось перпендикулярно поверхности структур, параллельно протекающему току. Магнетосопротивление определялось по формуле $MR = [(R(H) - R(0)) / R(0)] \cdot 100\%$, где $R(H)$ и $R(0)$ — значения сопротивления диода в магнитном поле и без магнитного поля. В качестве $R(0)$ и $R(H)$ брались статические значения сопротивления, т.е. отношение напряжения на диоде к току через диод $R(0, H) = U/I(0, H)$, причем напряжение на диоде не изменялось, следовательно, изменение сопротивления связано с изменением тока, протекающего через диод.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Исследование структур методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии

Состав ферромагнитных полупроводниковых слоев и их толщины, определенные по результатам рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, в целом соответствуют технологическим данным для диодных структур. В частности толщина слоя GaFeSb в структурах составляет 25–30 нм по данным РФЭС, толщины слоев InFeAs и InFeSb находятся в пределах 35–40 нм. Содержание железа в InFeSb для гетероструктур InFeSb/p-InGaAs достигает 25 at.%. В случае диодных структур GaFeSb/n-InGaAs в слое GaFeSb содержится около 15 at.% железа. Концентрационные профили распределения элементов Ga, In, Sb, As, Fe по глубине структур GaFeSb/InFeSb и GaFeSb/InFeAs приводятся на рис. 2. Там же показаны концентрации атомов, находящихся в химической связи. Из представленных данных видно, что слои GaFeSb и InFeSb или InFeAs достаточно хорошо разграничены. Вместе с тем профили распределения Ga, In, As и Sb выглядят затянутыми вблизи гетерограниц, что обусловлено диффузионными процессами при выращивании слоев методом импульсного лазерного нанесения и наличием артефактов, связанных с процедурой ионного профилирования. На поверхности структур было зарегистрировано небольшое количество атомов кислорода и углерода (не приводится на рисунке). Содержание железа в слое GaFeSb составляет 37.5 и 41 at.% для структур GaFeSb/InFeAs и GaFeSb/InFeSb, соответственно. В слоях InFeAs и InFeSb регистрируется по 35 и 25 at.% железа. При химическом анализе структур было определено присутствие в слоях разбавленных магнитных полупроводников трех железосодержащих соединений. Обнаружилось наличие химических связей Fe–As(Sb), In–Fe и Fe–Ga. Эти результаты позволяют предположить, что при концентрации более 10 at.% в кристаллической решетке атомы Fe могут замещать элементы III и V групп одновременно. Связи Fe–Fe (предел обнаружения < 1 at.%) не были обнаружены, вероятно, потому, что выбранные условия получения ферромагнитных полупроводников не способствуют образованию кластеров железа.

3.2. Гальваномагнитные свойства диодных структур с одним слоем ферромагнитного полупроводника

Вольт-амперная характеристика диодной гетероструктуры GaFeSb/n-InGaAs при температуре 10 К в отсутствие внешнего магнитного поля содержит обратную ветку с максимальным током 1 μ A при напряжении 2 В (рис. 3). Прямая ветка ВАХ демонстрирует резкое возрастание тока через диод, при напряжении прямого

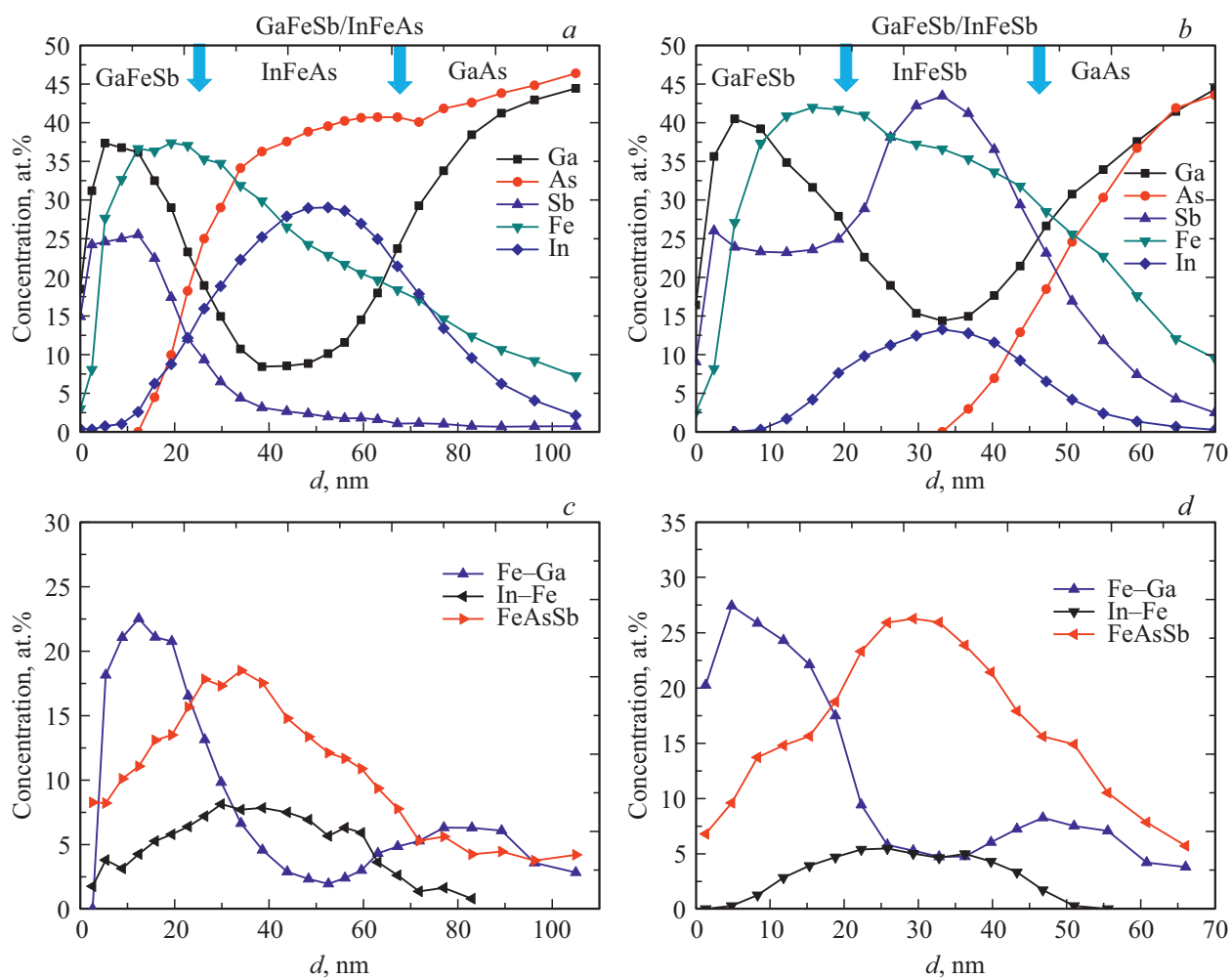


Рис. 2. Концентрационные профили распределения химических элементов по глубине структур GaFeSb/InFeSb и GaFeSb/InFeAs и профили концентраций химических связей по глубине.

смещения около 0.65 V ток достигает 100 mA. Исследования показали наличие отрицательного магнетосопротивления (ОМС), которое регистрировалось в диапазоне напряжений прямого смещения от 0.4 до 0.7 V (область отмечена линиями на рис. 3). Отрицательное магнетосопротивление достигает 1.4% в магнитном поле 3600 Oe при напряжении смещения 0.4 V и уменьшается до 0.3% при 0.6 V. Эффект ОМС сохраняется при температурах от 10 до 70 K.

С помощью программы 1D Poisson/Schrödinger [15], позволяющей решать уравнения Шредингера и Пуассона в одномерном приближении, был произведен расчет зонных диаграмм для модельных структур, содержащих слой легированного железом полупроводника GaSb *p*-типа проводимости (при 77 K). Предполагалось, что концентрация дырок в слое GaFeSb составляла $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Концентрация электронов в слаболегированном Si буферном слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (содержание индия $x \sim 0.1$) принималась равной $n \sim 7.8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Рассчитанные таким образом энергетические диаграммы валентной зоны (E_V) и зоны проводимости (E_C)

показаны на рис. 4. Пунктирной линией отмечено положение уровня Ферми (E_F). При расчетах полагалось, что весь разрыв зон GaFeSb/InGaAs (как и для случая GaSb/GaAs) расположен в валентной зоне [16]. Это приводит к сильной локализации дырок в слое GaFeSb.

В отсутствие приложенного напряжения смещения большая часть обедненной области *p-n*-перехода лежит в слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. При приложении прямого смещения высота барьера в области *p-n*-перехода понижается, размер обедненной области в слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ уменьшается, и начинается инжекция спин-поляризованных носителей (дырок) из слоя GaFeSb. Уменьшение сопротивления диода в магнитном поле наблюдается при прямом смещении от 0.4 до 0.7 V, т. е., когда барьер снижается значительным образом, и спин-поляризованные дырки активно инжектируются в слой InGaAs (область с высоким уровнем инжекции на соответствующей ВАХ). Для этой области напряжений характерно, что более значительный вклад в сопротивление диода начинают давать слои с *p*- и *n*-проводимостью (*p*-GaFeSb и *n*-InGaAs в нашем случае) по сравнению с сопротивлением об-

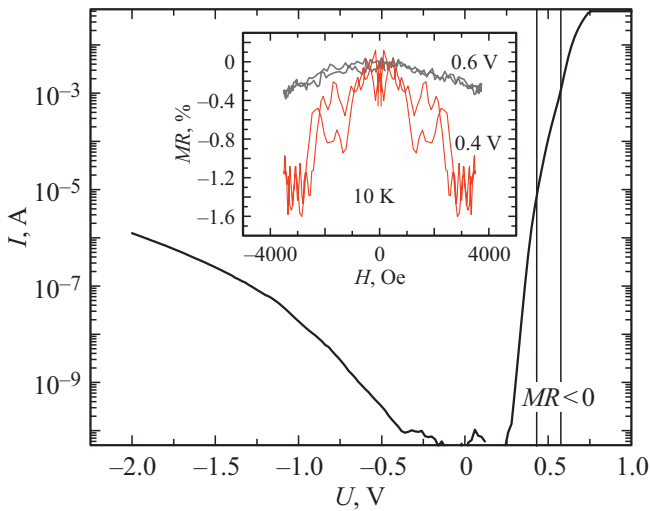


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика диода GaFeSb/*n*-InGaAs при температуре 10 К. На вставке приведены магнитопольные зависимости магнетосопротивления для различных напряжений прямого смещения, подаваемого на диод.

ласти объемного заряда *p*–*n*-перехода. В присутствии магнитного поля сопротивление слоя GaFeSb уменьшается (эффект отрицательного магнетосопротивления), и регистрируется уменьшение сопротивления диода. Отрицательное магнетосопротивление для разбавленных магнитных полупроводников связано с уменьшением рассеяния при переносе спин-поляризованных носителей через магнитоупорядоченный материал [17,18].

Анализ гальваномагнитных свойств диодных гетероструктур InFeSb/*p*-InGaAs показал значительное уменьшение сопротивления *n*–*p*-перехода в магнитном поле в диапазоне напряжений от –2 до 2 В, т. е., при прямом и обратном смещении (рис. 5, *a*). Представленные ВАХ и зависимости $MR(U)$ позволяют предположить, что наибольший эффект ОМС регистрируется при протекании туннельных токов через *n*–*p*-переход InFeSb/*p*-InGaAs. Повышенное содержание атомов железа приводит к увеличению количества дефектов донорного типа в узкозонном полупроводнике InSb, значительному возрастанию концентрации электронов в InFeSb и способствует созданию условий для туннелирования носителей заряда. Величина ОМС достигает 3%, а его зависимость от магнитного поля имеет гистерезисный вид (рис. 5, *b*), что обусловлено ферромагнитными свойствами полупроводника InFeSb. С увеличением напряжения смещения происходит уменьшение ширины гистерезиса (коэрцитивного поля), а при напряжении положительного смещения 2 В и выше гистерезис практически не проявляется на магнитопольной зависимости MR .

Для модельных структур InSb(InFeSb)/*p*-InGaAs также с помощью программы 1D Poisson/Schrödinger был произведен расчет зонных диаграмм для температуры 77 К. Модельная структура со слоем *n*-InSb была использована для демонстрации влияния возрастания

концентрации электронов на изгиб зон в области *n*–*p*-перехода. Предполагалось, что концентрация электронов в слое InSb составляла $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, а в слое InFeSb — $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Концентрация дырок в слаболегированном углеродом буферном слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (содержание индия $x \sim 0.1$) принималась равной $p \sim 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Рассчитанные таким образом энергетические диаграммы валентной зоны (E_V) и зоны проводимости (E_C) показаны на рис. 4, *b*. В данном случае разрыв зон InSb(InFeSb)/*p*-InGaAs присутствует и в зоне проводимости, и в валентной зоне. Положение уровня Ферми в InSb значительно выше дна зоны проводимости и, следовательно, материал InSb можно считать вырожденным полупроводником. Электроны и дырки здесь локализованы в слое InSb. Благодаря значительному преобладанию дефектов донорного типа вследствие легирования железом полупроводника InSb (возрастанию

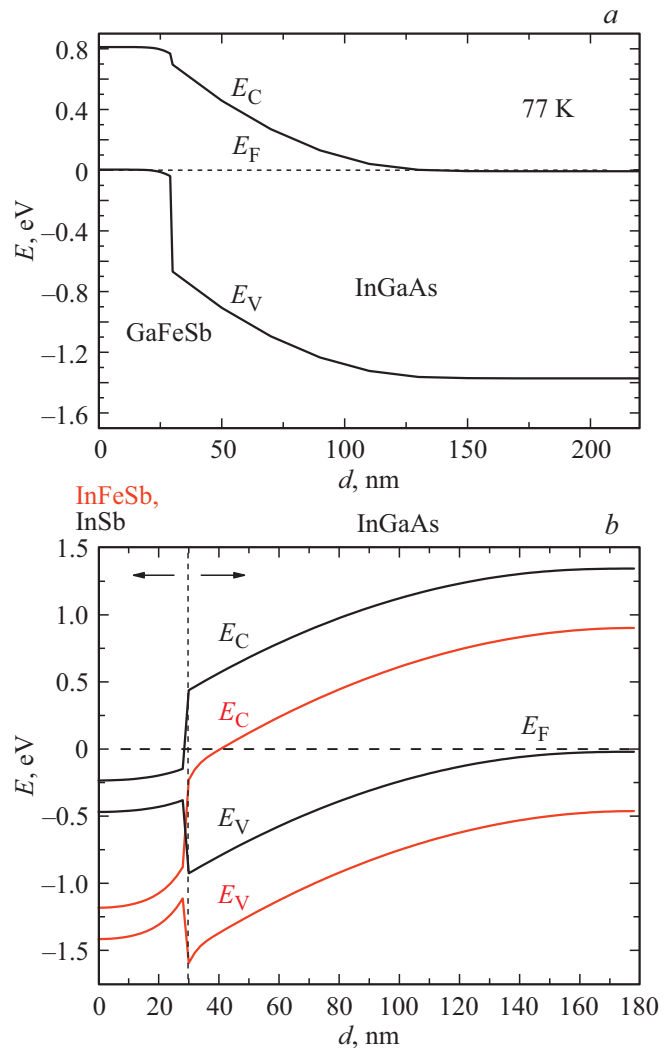


Рис. 4. Рассчитанные с помощью программы 1D Poisson/Schrödinger энергетические диаграммы валентной зоны (E_V) и зоны проводимости (E_C) модельных структур (*a*) GaFeSb/*n*-InGaAs и (*b*) InFeSb/*p*-InGaAs при температуре 77 К. Пунктирной линией отмечено положение уровня Ферми (E_F).

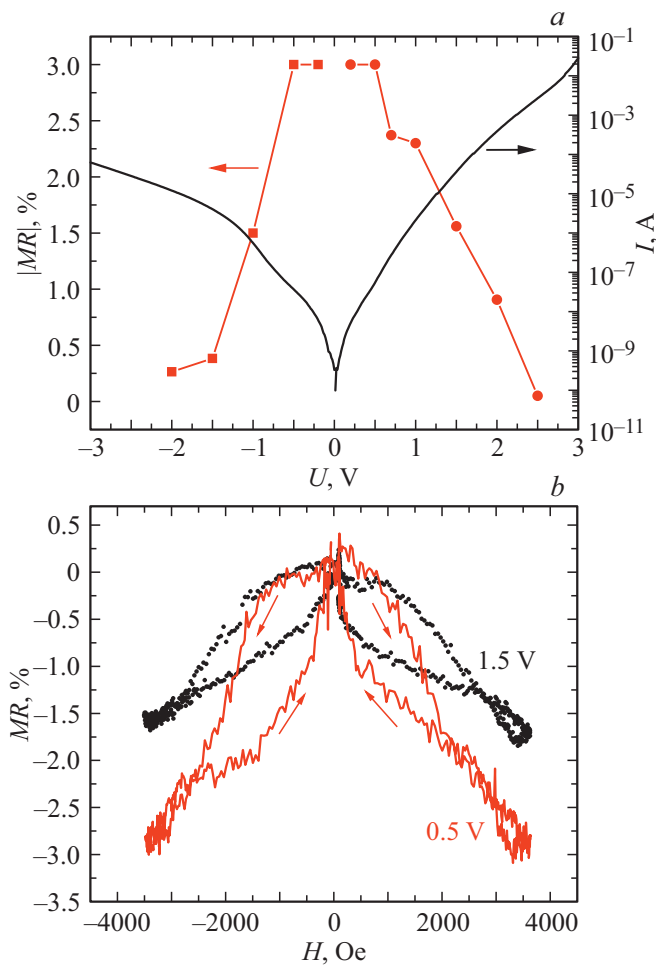


Рис. 5. (а) Вольт-амперная характеристика при температуре 10 К и зависимость модуля MR диода $InFeSb/p-InGaAs$ от подаваемого напряжения при 10 К. Величина приложенного магнитного поля составляет 3600 Ое. (б) Магнитополевые зависимости магнетосопротивления для различных напряжений прямого смещения для диода $InFeSb/p-InGaAs$ при 10 К.

концентрации электронов) уровень Ферми располагается еще выше в зоне проводимости, зонная диаграмма области гетероперехода $InFeSb/p-InGaAs$ значительным образом модифицируется, и создаются условия для туннелирования носителей заряда из слоя $InFeSb$ в область пространственного заряда $p-InGaAs$.

3.3. Гальваномагнитные свойства диодных структур с двумя слоями ферромагнитных полупроводников

Исследования вольт-амперных характеристик диодов с p - и n -областями ферромагнитных полупроводников обнаружили их схожее поведение для случая $GaFeSb/InFeAs$ и $GaFeSb/InFeSb$ переходов во всем диапазоне температур измерений (от 10 до 300 К). Вольт-амперная характеристика диода $GaFeSb/InFeAs$ при температуре 10 К представлена на рис. 6. Токи обратной

ветки достигают $100 \mu A$ при напряжении $-1.5 V$, ток прямой ветки составляет $100 mA$ при $U = 1.5 V$. На вставке к рисунку приведены магнитополевые зависимости магнетосопротивления для напряжения прямого смещения $0.4 V$ и температуры 10 К. Сопротивление диода $GaFeSb/InFeAs$ в магнитном поле 3600 Ое уменьшается на 1%. Подобным образом выглядела зависимость $MR(H)$ для диода $GaFeSb/InFeSb$.

Важной особенностью диодов, содержащих ферромагнитные области обоих типов проводимости ($GaFeSb/InFeSb$, $GaFeSb/InFeAs$), являлось изменение диапазона напряжений прямого смещения, при котором эффект отрицательного магнетосопротивления проявлялся сильнее, с увеличением температуры измерений

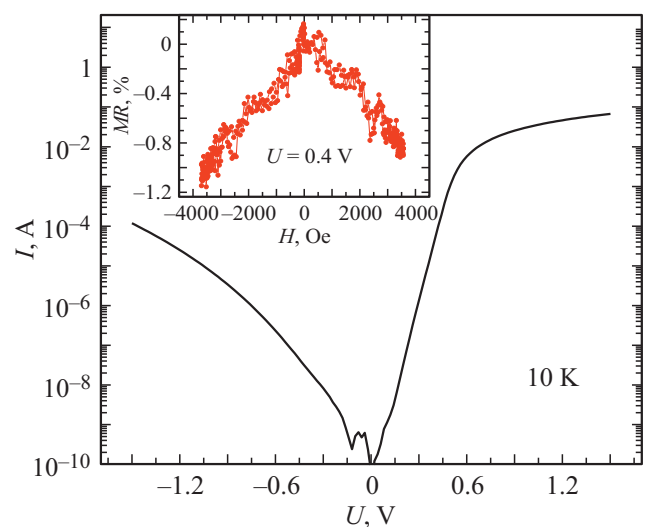


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика диода $GaFeSb/InFeAs$ при температуре 10 К. На вставке приведены магнитополевые зависимости магнетосопротивления для напряжения прямого смещения $0.4 V$ и температуры 10 К.

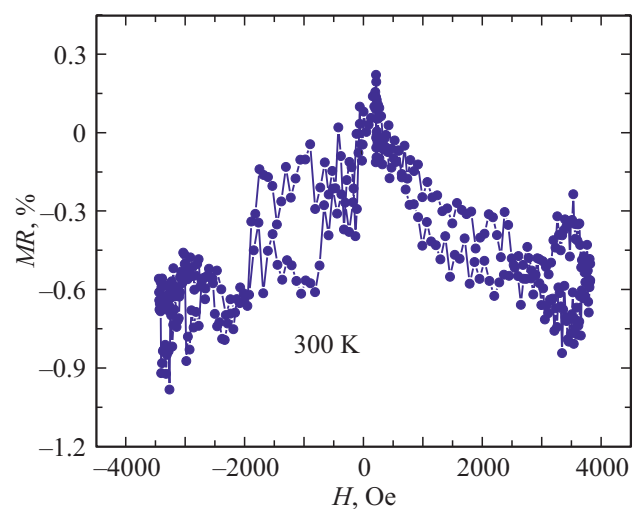


Рис. 7. Магнитополевые зависимости магнетосопротивления для диода $GaFeSb/InFeSb$ при $U = 0.05 V$ и комнатной температуре измерений.

от 10 до 300 К. С возрастанием температуры происходило существенное уменьшение соответствующих величин прямого смещения. Например, для диода GaFeSb/InFeSb при температуре 10 К в магнитном поле ± 3600 Ое величина $MR = 0.6-0.8\%$ регистрируется при напряжении прямого смещения 0.3–0.4 В, при комнатной температуре измерений такие же значения MR получены для напряжения 0.05 В (рис. 7).

Если сопоставить полученные результаты с опубликованными нами ранее данными по $p-i-n$ структуре, содержащей слои разбавленных магнитных полупроводников p -GaFeSb и n -InFeSb (с концентрацией Fe около 10 at.%), разделенные спейсером GaAs [11], то можно полагать, что более значительное легирование железом соединений GaFeSb, InFeAs и InFeSb способствует повышению температурного диапазона сохранения эффекта ОМС. Сам факт наблюдения влияния ферромагнитных свойств слоев на транспорт носителей в диоде свидетельствует о том, что граница раздела высоколегированных железом p - и n -областей остается достаточно совершенной.

4. Заключение

В работе представлены результаты исследований диодных гетероструктур со слоями ферромагнитных узкозонных полупроводников A^3FeB^5 разного типа проводимости, изготовленными импульсным лазерным нанесением в вакууме. Изучались диоды двух типов со слоями p -GaFeSb, n -InFeSb и n -InFeAs с большим содержанием атомов железа (свыше 10 at.%):

— диоды с одним слоем (p - или n -область) ферромагнитного полупроводника (GaFeSb/ n -InGaAs, InFeSb/ p -InGaAs);

— диоды с двумя слоями (p - и n -область) ферромагнитных полупроводников (GaFeSb/InFeSb, GaFeSb/InFeAs).

Результаты исследований изготовленных гетероструктур методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии позволили определить толщины железосодержащих слоев и концентрацию железа в них, хорошо соответствующие технологическим данным.

Все указанные структуры демонстрируют эффект отрицательного магнетосопротивления. Следует отметить такие важные особенности наблюдения уменьшения сопротивления диодов в магнитном поле: достаточно низкие напряжения присутствия эффекта, небольшие магнитные поля (не выше 3600 Ое) и высокие температуры (впервые для диодов GaFeSb/InFeSb, GaFeSb/InFeAs отрицательное магнетосопротивление наблюдалось при 300 К).

Гистерезисный вид зависимостей сопротивления от магнитного поля позволяет предполагать воздействие ферромагнитных свойств слоев узкозонных полупроводников на транспорт носителей в структурах, а сохранение эффекта отрицательного магнетосопротивле-

ния до комнатной температуры делает исследованные структуры перспективными для разработки приборов на спин-зависимых эффектах.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 19-19-00545, изготовление и исследование структур с одним слоем магнитного полупроводника, и грант № 18-79-10088, изготовление и исследование структур с двумя слоями магнитных полупроводников).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N.T. Tu, P.N. Hai, L.D. Anh, M. Tanaka. Phys. Rev. B **92**, 144403 (2015).
- [2] D. Sasaki, L.D. Anh, P.N. Hai, M. Tanaka. Appl. Phys. Lett. **104**, 142406 (2014).
- [3] L.D. Anh, D. Kaneko, P.N. Hai, M. Tanaka. Appl. Phys. Lett. **107**, 232405 (2015).
- [4] N.T. Tu, P.N. Hai, L.D. Anh, M. Tanaka. Appl. Phys. Lett. **108**, 192401 (2016).
- [5] A.V. Kudrin, Yu.A. Danilov, V.P. Lesnikov, M.V. Dorokhin, O.V. Vikhrova, D.A. Pavlov, Yu.V. Usov, I.N. Antonov, R.N. Kriukov, A.V. Alaferdov, N.A. Sobolev. J. Appl. Phys. **122**, 183901 (2017).
- [6] А.В. Кудрин, Ю.А. Данилов, В.П. Лесников, Е.А. Пителимова. Письма в ЖТФ **42**, 2, 63 (2016).
- [7] L.D. Anh, P.N. Hai, M. Tanaka. Nature Commun. **7**, 13810 (2016).
- [8] L.D. Anh, P.N. Hai, M. Tanaka. Appl. Phys. Lett. **112**, 102402 (2018).
- [9] N.T. Tu, P.N. Hai, L.D. Anh, M. Tanaka. Appl. Phys. Lett. **112**, 122409 (2018).
- [10] K. Takiguchi, L.D. Anh, T. Chiba, T. Koyama, D. Chiba, M. Tanaka. Nature Phys. **15**, 1134 (2019).
- [11] A.V. Kudrin, V.P. Lesnikov, D.A. Pavlov, Yu.V. Usov, Yu.A. Danilov, M.V. Dorokhin, O.V. Vikhrova, V.E. Milin, R.N. Kriukov, Yu.M. Kuznetsov, V.N. Trushin, N.A. Sobolev. J. Magn. Magn. Mater. **487**, 165321 (2019).
- [12] Ю.А. Данилов, А.В. Кудрин, В.П. Лесников, О.В. Вихрова, Р.Н. Крюков, И.Н. Антонов, Д.С. Толкачев, А.В. Алафердов, З.Э. Кунькова, М.П. Темиряева, А.Г. Темиряев. ФТТ **60**, 2137 (2018).
- [13] D. Briggs, M.P. Seah. Practical surface analysis by auger and X-ray photoelectron spectroscopy. 3rd ed. John Wiley and Sons: N. Y. (1985).
- [14] A.V. Boryakov, S.I. Surodin, R.N. Kryukov, D.E. Nikolichev, S.Yu. Zubkov. J. Electron. Spectr. Rel. Phenomena **229**, 132 (2018).
- [15] Интернет ресурс: <http://www.nd.edu/gsnider>.

- [16] F. Hatami, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, J. Bohrer, F. Heinrichsdorff, M. Beer, D. Bimberg, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Gosele, J. Heydenreich, U. Richter, S.V. Ivanov, B.Ya. Meltser, P.S. Kor'ev, Zh.I. Alferov. Appl. Phys. Lett. **67**, 656 (1995).
- [17] F. Matsukura, H. Ohno, T. Dietl. In: Handbook of Magnetic Materials / Ed. K.H.J. Buschow. Elsevier, Amsterdam. 1 (2002). V. 14.
- [18] H. Ohno. J. Magn. Magn. Materials **200**, 110 (1999).

Редактор Т.Н. Василевская