

07

Диодные структуры на основе магнитных гетеропереходов (In, Fe)Sb/GaAs

© М.В. Веды, М.В. Дорохин, В.П. Лесников, Д.А. Павлов, Ю.В. Усов, А.В. Кудрин, П.Б. Дёмина, А.В. Здоровейщев, Ю.А. Данилов

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия
E-mail: mikhail28ved@gmail.com

Поступило в Редакцию 29 марта 2019 г.

В окончательной редакции 5 апреля 2019 г.

Принято к публикации 5 апреля 2019 г.

Исследованы вольт-амперные характеристики светоизлучающих диодов на основе гетероструктур InGaAs/GaAs с инжектором из разбавленного магнитного полупроводника (In,Fe)Sb. Выполнен анализ вольт-амперных характеристик структур (In,Fe)Sb/*n*-GaAs и (In,Fe)Sb/*p*-GaAs. Построены зонные диаграммы гетеропереходов. Показано, что исследованные структуры по механизму токопереноса аналогичны структурам с барьером Шоттки.

Ключевые слова: разбавленные магнитные полупроводники, диодные структуры, гетеронаноструктуры A^3B^5 , спиновая инжекция.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.13.47955.17812

Разбавленные магнитные полупроводники — полупроводниковые ферромагнитные материалы, легированные атомами переходных элементов, — считаются перспективными для применения в качестве элементов приборов спинтроники, поскольку характеризуются высокой степенью спиновой поляризации носителей заряда (это является основной характеристикой приборов спинтроники) и относительно простой технологией встраивания в полупроводниковые структуры [1]. В настоящее время наиболее перспективными считаются разбавленные магнитные полупроводники $(A^3, Fe)B^5$, в частности (In,Fe)Sb. В отличие от подробно изученных материалов $(A^3, Mn)B^5$, обладающих ферромагнитными свойствами до 170 К [2], для (In,Fe)Sb температура Кюри превышает 300 К [3]. Это включает (In,Fe)Sb в число базовых материалов для построения приборов спинтроники, работающих при комнатной температуре. На текущем этапе развития технологии $(A^3, Fe)B^5$ важнейшей задачей является их эффективная интеграция в приборы на основе наиболее распространенного оптоэлектронного материала — GaAs. Основной целью настоящей работы является введение разбавленного магнитного полупроводника (In,Fe)Sb в качестве функционального слоя в приборные структуры, а именно в качестве ферромагнитного инжектора в спиновые светоизлучающие диоды. Для этого были сформированы гетероструктуры (In,Fe)Sb/GaAs/InGaAs и исследованы возможные механизмы токопереноса в них.

Исследуемые структуры были выращены на подложках n^+ -GaAs (образец № 1) и p^+ -GaAs (образец № 2) комбинированным методом, совмещающим газофазную эпитаксию из металлоорганических соединений (МОС-

гидридная эпитаксия, МОСГЭ) и импульсное лазерное осаждение. Для этой цели выбраны подложки GaAs с ориентацией (100). На первом этапе методом МОСГЭ при температуре 600°C в атмосфере водорода выращивались следующие слои: буферный слой *n*-GaAs (образец № 1) или *p*-GaAs (образец № 2), квантовая яма InGaAs толщиной 10 nm, слой нелегированного GaAs толщиной 20 nm. Уровень как донорного, так и акцепторного легирования буферного слоя составил $(6-8) \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Конструкция полупроводниковой части структуры соответствовала конструкции спинового светоизлучающего диода с контактом ферромагнетик/полупроводник. Использование именно такой конструкции необходимо как задел для последующей интеграции слоев с контактом (In,Fe)Sb в приборы со спиновой инжекцией. На втором этапе формирования структур методом импульсного лазерного осаждения в вакууме из составной мишени InSb/Fe при температуре 250°C был выращен инжектор (In,Fe)Sb толщиной ~ 40 nm, содержание Fe составило ~ 10 at.%. На рис. 1, *a* представлено изображение поперечного сечения гетероперехода (In,Fe)Sb/GaAs, исследованное с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) Jeol JEM-2100F [4].

На изображении видно, что слой (In,Fe)Sb имеет довольно высокое кристаллическое совершенство, а его кристаллографическая ориентация задается подложкой GaAs (100). Область гетерограницы (In,Fe)Sb/GaAs на ПЭМ-изображении сравнительно резкая и включает несколько атомных слоев. Проведенные ранее исследования показали, что слой (In,Fe)Sb обладает электронным типом проводимости [3].

На рис. 1, *b* представлена общая схема исследуемых гетероструктур. На последнем этапе формирова-

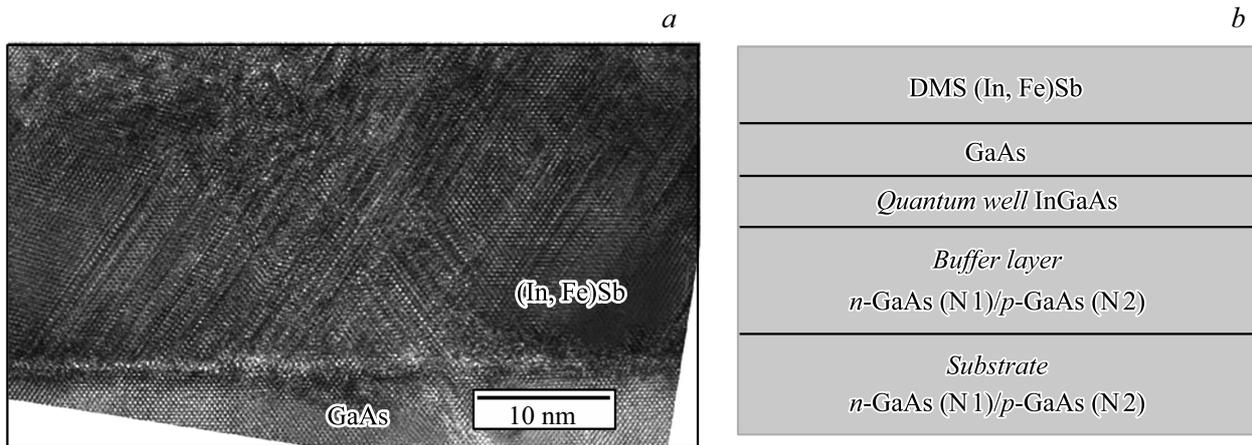


Рис. 1. *a* — ПЭМ-изображение поперечного сечения гетероперехода (In,Fe)Sb/GaAs; *b* — общая схема исследуемых структур.

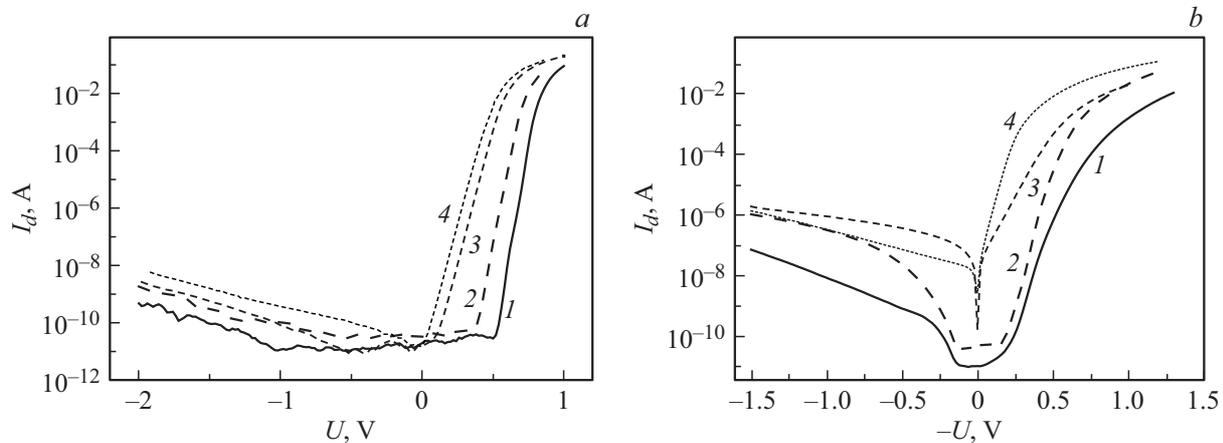


Рис. 2. *a* — ВАХ исследуемого образца № 1 с инжектором (In,Fe)Sb (2,4) и контрольной структуры с контактом Au/GaAs/InGaAs/n-GaAs (1,3). *b* — ВАХ исследуемого образца № 2 с инжектором (In,Fe)Sb (2,4) и контрольной структуры с контактом Al/GaAs/InGaAs/p-GaAs (1,3). Температура измерений 77 (1,2) и 300 К (3,4).

ния диода на поверхность (In,Fe)Sb были нанесены омические контакты методом электронно-лучевого испарения в вакууме, изготовлены меза-структуры диаметром $500\ \mu\text{m}$ методами фотолитографии и химического травления, сформирован базовый омический контакт к подложке. В результате были созданы образцы диодных структур с барьером, формируемым гетеропереходом (In,Fe)Sb/GaAs. Аналогично были сформированы контрольные образцы диодов Шоттки на основе той же конструкции полупроводниковой структуры, но не содержащие слоя (In,Fe)Sb. Для контрольных структур на основе полупроводника *n*-типа формировался контакт Шоттки Au/GaAs, для *p*-типа использован контакт Шоттки Al/GaAs. На сформированных диодах были измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) (рис. 2). Измерения проводились в диапазоне температур 77–300 К в гелиевом криостате замкнутого цикла Janis CCS-300S/202.

Из рис. 2 видно, что ВАХ исследуемых образцов имеют выпрямляющий характер. Прямому смещению для диодов на основе *n*-GaAs соответствует положитель-

ный потенциал на верхнем контакте относительно базы (рис. 2, *a*) как для структуры с инжектором (In,Fe)Sb, так и для контрольной структуры с Au. Для диодов на основе *p*-GaAs прямому смещению соответствует отрицательный потенциал на верхнем электроде относительно базы (рис. 2, *b*).

Качественно ВАХ исследуемых образцов № 1, 2 и контрольных образцов подобны. Во всех случаях зарегистрирован экспоненциальный рост тока диода при полярности напряжения, соответствующего прямому смещению. В случае обратного смещения ток диода мал и незначительно изменяется с ростом обратного напряжения. Различие между ВАХ контрольных и исследованных структур заключается лишь в параметрах кривых: величинах напряжения отсечки (U_c) и обратного тока (I_r). Так, I_r для образца № 1 и контрольного образца *n*-типа ниже примерно на два порядка, чем для образца № 2 и контрольного образца *p*-типа. Напряжения U_c для образца № 1 и контрольного образца *n*-типа совпадают и составляют при температуре 300 К $\sim 0.6\ \text{V}$,

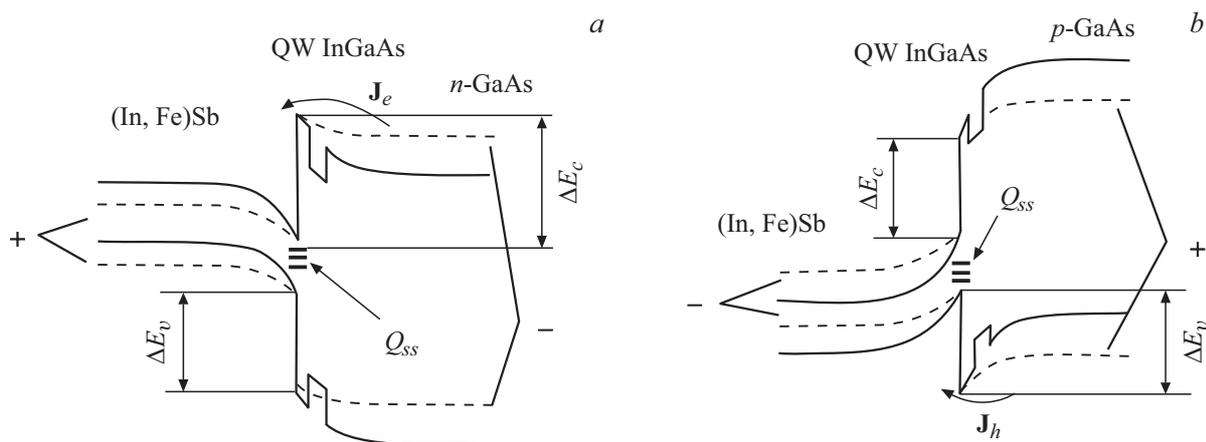


Рис. 3. Схематическое изображение зонных диаграмм контакта (In,Fe)Sb/GaAs/InGaAs/*n*-GaAs без смещения (*a*) и контакта (In,Fe)Sb/GaAs/InGaAs/*p*-GaAs без смещения (*b*). Штриховой линией обозначено изменение изгиба зон при прямом смещении.

а при температуре 77 К — ~ 0.9 В. Величины U_c для образца № 2 и контрольного образца *p*-типа при температуре 300 К составляют 0.4 и 0.7 В соответственно, а при температуре 77 К — 0.75 и 0.9 В соответственно.

Подобие ВАХ контрольных и исследуемых структур позволяет сделать вывод о подобии механизмов токопереноса, т.е. протекание тока в структурах с гетеропереходом (In,Fe)Sb/GaAs происходит по механизму, аналогичному протеканию тока в контрольных структурах с барьером Шоттки, и определяется зонной структурой гетеропереходов. Ранее в работах [5,6] были построены зонные диаграммы гетеропереходов InSb/GaAs, наиболее близких к исследуемым нами системам. В работе [3] было показано, что слои (In,Fe)Sb, сформированные на GaAs, имеют особенности зонной структуры, характерные для объемного материала InSb. На основании данных [3,5,6] нами были построены схематические изображения зонных диаграмм гетеропереходов (In,Fe)Sb/GaAs/InGaAs/*n*-GaAs и (In,Fe)Sb/GaAs/InGaAs/*p*-GaAs, исследуемых в настоящей работе (рис. 3). Отметим, что при построении принималось во внимание то, что слой (In,Fe)Sb является вырожденным полупроводником *n*-типа [3]. Кроме того, для упрощения рисунка нелегированные области на зонной диаграмме заменены на легированные с типом проводимости буферного слоя. Такой прием допустим в силу того, что общая толщина нелегированных областей (~ 30 нм) значительно меньше толщины области пространственного заряда в *n*-GaAs или *p*-GaAs с заданным уровнем легирования (~ 150 нм), поэтому они не оказывают существенного влияния на вид зонной диаграммы.

Слой (In,Fe)Sb, являющийся вырожденным полупроводником *n*-типа, аналогичен металлу с высокой концентрацией свободных электронов, уровень Ферми в котором лежит по энергии ниже дна зоны проводимости GaAs, но выше потолка валентной зоны GaAs, что вполне соответствует контакту Шоттки. Следовательно, свойства контакта (In,Fe)Sb/GaAs до опреде-

ленного предела аналогичны свойствам контакта металл/полупроводник. В частности, в режиме прямого смещения для образца на основе *n*-GaAs (образец № 1, положительный потенциал на (In,Fe)Sb по отношению к подложке) осуществляется инжекция электронов из GaAs *n*-типа в слой (In,Fe)Sb (ток J_e на рис. 3, *a*). Инжекция неосновных носителей (дырок) из (In,Fe)Sb в *n*-GaAs затруднена из-за потенциального барьера гетероперехода (рис. 3, *a*). Таким образом, процесс протекания тока при прямом смещении системы (In,Fe)Sb/GaAs/InGaAs/*n*-GaAs аналогичен протеканию тока при прямом смещении диода Шоттки [7]. Рассуждения о протекании тока для образца № 1 также можно применить и к образцу № 2 на основе *p*-GaAs, в котором при подаче прямого смещения (отрицательный потенциал на (In,Fe)Sb по отношению к подложке) происходит инжекция дырок из *p*-GaAs в валентную зону (In,Fe)Sb (рис. 3, *b*) и исходя из вольт-амперных характеристик и зонной диаграммы контакта (In,Fe)Sb/GaAs/InGaAs/*p*-GaAs также соответствует барьеру Шоттки.

Основные различия между исследованными и контрольными структурами заключаются в увеличенном размере областей обеднения или обогащения (в зависимости от полярности приложенного напряжения) в слое (In,Fe)Sb по сравнению с металлическими контактами. Так, в режиме обратного смещения для диодов как на *n*-GaAs, так и на *p*-GaAs формируются области, обогащенные носителями заряда, в которых электроны (для *n*-GaAs) или дырки (для *p*-GaAs) локализованы в потенциальной яме на границе слоев. Наличие обогащенного слоя на гетерогранице приводит к некоторому изменению механизмов токопереноса, особенно в режиме обратного смещения диодов. В частности, существенный вклад может вносить механизм проводимости с участием состояний на границе раздела Q_{ss} . Подобный механизм токопереноса позволяет объяснить повышение обратного тока для диода (In,Fe)Sb/*p*-GaAs по сравне-

нию с таковым для других исследованных структур. В силу того что значения обратного тока для диода на подложке *p*-GaAs выше, чем для диода на подложке *n*-GaAs, можно предположить, что для гетеросистемы на основе *p*-GaAs характерны более высокие токи утечки с участием состояний на гетерогранице (In,Fe)Sb/GaAs. Для более полного анализа следует учитывать различия в формировании разрывов зон и потенциальных барьеров для случая барьера Шоттки и гетероперехода вида InSb/GaAs, дефектообразование на гетерогранице при нанесении слоев. Все указанные факторы обуславливают качественное различие в зарегистрированных ВАХ исследованных и контрольных структур.

Таким образом, слой (In,Fe)Sb может быть использован в спиновых светоизлучающих диодах в качестве функционального контактного слоя при нанесении на GaAs *n*- и *p*-типа проводимости. Механизмы инжекции в таких структурах будут близки к таковым в диодах с барьером Шоттки. Отметим, что подобный вывод для системы InSb/GaAs был предложен в работе [6].

Благодарности

Авторы выражают благодарность Б.Н. Звонкову за выращивание структур для исследования.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проекты № 8.1751.2017/ПЧ и СП-2450.2018.5) — электротранспортные измерения, а также Российского научного фонда (проект № 18-79-10088) — выращивание образцов и проведение микроскопических исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Holub M., Bhattacharya P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. R179–R203.
- [2] Jungwirth T., Sinova J., Masek J., Kucera J., MacDonald A.H. // Rev. Mod. Phys. 2006. V. 78. P. 809–864.
- [3] Kudrin A.V., Danilov Yu.A., Lesnikov V.P., Dorokhin M.V., Vikhrova O.V., Pavlov D.A., Usov Yu.V., Antonov I.N., Kriukov R.N., Alaferdov A.V., Sobolev N.A. // J. Appl. Phys. 2017. V. 122. P. 183901.
- [4] arXiv:1810.13271
- [5] Hinkley E.D., Rediker R.H. // Solid-State Electron. 1967. V. 10. P. 671–687.
- [6] Chyi J.-I., Mui D., Chen J., Morkoc H. // Solid-State Electron. 1991. V. 34. P. 747–750.
- [7] Зу С. Физика полупроводниковых приборов. Пер. с англ. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Мир, 1984. Т. 1. 456 с.