

Кудрин Алексей Владимирович

ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СЛОЕВ МАГНИТНЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ InMnAs, GaMnAs
И ПОЛУМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ MnAs, MnP

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико – математических наук

Нижний Новгород – 2009

Работа выполнена в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского

Научный руководитель: кандидат физико – математических наук,
старший научный сотрудник Данилов Юрий Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико – математических наук

Петухов Владимир Юрьевич

кандидат физико – математических наук

Дроздов Михаил Николаевич

Ведущая организация: Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Защита состоится 21 октября 2009 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д212.166.01 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д.23, корп. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан “ ” сентября 2009 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.166.01

доктор физико – математических наук, профессор

А.И. Машин

Введение

Актуальность темы

В последние годы активные исследования ведутся в области спиновой электроники (спинтроники) – одном из направлений современной электроники. Задачей данного направления является использование в приборах опто- и наноэлектроники одного из фундаментальных свойств носителя заряда – его спина. Основой спинтроники являются материалы, носители заряда в которых обладают преимущественной поляризацией по спину. К данным материалам относятся большинство металлических ферромагнетиков, использование которых позволило создать первые приборы спинтроники – магниторезистивные элементы, основанные на эффекте гигантского магнетосопротивления и получившие в настоящее время широкое распространение [1]. Большой интерес представляет исследование и использование спин – зависимых эффектов в полупроводниковых структурах. Для практической реализации ряда приборов полупроводниковой спинтроники необходимы материалы, которые, наряду с полупроводниковыми, обладали бы и ферромагнитными свойствами и содержали бы носители заряда, поляризованные по спину.

Наиболее активно исследуются полупроводники A^3B^5 , легированные атомами марганца, поскольку полупроводники данного типа нашли широкое практическое применение (в частности, GaAs), а введение атомов Mn, имеющих нескомпенсированный магнитный момент, приводит к появлению ферромагнитных свойств [2]. Эти ферромагнитные полупроводниковые материалы позволяют создавать структуры с уникальными оптическими и транспортными свойствами, такие как спиновый светоизлучающий диод и полупроводниковые магниторезистивные элементы на основе эффекта спин – зависимого транспорта носителей [2,3]. Также представляет большой интерес исследование полуметаллических ферромагнитных слоев (например, MnAs), технология получения которых может быть интегрирована в технологический

процесс получения полупроводниковых структур [4]. Такие ферромагнитные слои могут быть использованы в качестве инжектора спинов – поляризованных носителей в полупроводниковую структуру. Однако целый ряд проблем в области физики ферромагнитных полупроводников остается нерешенным. В частности, неясно как способ формирования слоев ферромагнитных полупроводников влияет на их свойства. Дело в том, что основная масса исследований в мировой практике выполнена на слоях, изготовленных молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ). Метод МЛЭ является малопродуктивным, а оборудование – очень дорогое. Поэтому разработка альтернативных методов нанесения (в первую очередь, совместимых с газофазной эпитаксией) и изучение полученных при этом ферромагнитных полупроводников – задача актуальная и важная с практической и физической точек зрения. Другая проблема заключается в том, что для многих ферромагнитных полупроводников типа $(A^3, Mn)B^5$ температуры Кюри - низкие, что существенно ограничивает возможность их практического использования. В связи с этим одной из главных задач групп, работающих в области полупроводниковой спинтроники, является получение ферромагнитных полупроводников с температурой Кюри, близкой к комнатной.

В данной работе исследовались свойства полупроводниковых слоев InAs и GaAs, полученных методом лазерного нанесения (ЛН) в газовой атмосфере и объемно легированных марганцем в процессе выращивания. Исследовались также структуры на основе GaAs, полученные комбинированным методом газофазной эпитаксии и лазерного нанесения и содержащие дельта<Mn>-легированный слой. Кроме этого, проведены исследования слоев полуметаллических соединений MnAs и MnP, полученных методом реактивного ЛН.

Цель и основные задачи работы

Основной целью данной работы являлось исследование гальваномагнитных свойств полупроводниковых структур, легированных

магнитной примесью (слоев InMnAs и GaMnAs, структур на основе GaAs с дельта <Mn>-легированным слоем), и полуметаллических ферромагнитных слоев (MnAs, MnP), нанесенных на полупроводник. Гальваномагнитные исследования структур позволяют провести диагностику как транспортных, так и магнитных свойств.

Использованные для получения образцов ростовые методы (метод лазерного нанесения в газовой атмосфере, комбинированный метод лазерного нанесения и МОС – гидридной эпитаксии) являются оригинальными и ранее не применялись для получения магнитных структур на основе полупроводников A^3B^5 и полуметаллов. Представляет интерес установление отличий в свойствах структур, полученных данными методами, от свойств аналогичных структур, выращенных традиционными методами: молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазной эпитаксии с использованием МОС.

Основными задачами работы являются:

1. Исследование гальваномагнитных свойств структур InMnAs/GaAs и GaMnAs/GaAs. Исследование влияния количества введенной примеси марганца на магнитные и транспортные свойства.
2. Исследование гальваномагнитных свойств структур GaAs, содержащих дельта <Mn>-легированный слой, при различном количестве марганца в дельта-слое.
3. Исследование гальваномагнитных свойств слоев MnAs и MnP, выращенных на подложке GaAs. Установление влияния ростовых параметров на магнитные и транспортные свойства структур MnAs/GaAs и MnP/GaAs.

Научная новизна работы

1. Впервые в слоях InMnAs при комнатной температуре обнаружен аномальный эффект Холла гистерезисного характера.
2. В слоях InMnAs обнаружено необычное уменьшение величин остаточной намагниченности (M_{RH}) и намагниченности насыщения (M_{SH}), определенных из исследований эффекта Холла, с понижением температуры от 100 К.

3. Впервые обнаружен ферромагнетизм в слоях GaAs, содержащих одиночный дельта<Mn>-легированный слой, проявляющийся в наличии аномального и планарного эффекта Холла при температурах ниже ≈ 40 К.
4. Впервые проведены исследования гальваномагнитных свойств слоев MnP, полученных на подложках GaAs.

Практическая ценность работы

1. Установлено, что слои InMnAs, сформированные методом лазерного распыления в газовой атмосфере, обладают при комнатной температуре транспортными свойствами, характерными для ферромагнитных материалов. Это позволяет использовать слои InMnAs в качестве источников и детекторов спин – поляризованных носителей в приборах спинтроники, работающих при комнатной температуре.
2. Наблюдаемый в структурах, представляющих собой эпитаксиальный слой *p*-InMnAs на подложке *n*-InAs, эффект гигантского положительного магнетосопротивления при комнатной температуре (16 % в магнитном поле 3500 Э), может быть использован для построения магниточувствительных элементов.
3. Слои MnAs и MnP, сформированные методом лазерного распыления в газовой атмосфере, обладают достаточно высокой температурой Кюри (≥ 295 К) и могут быть интегрированы в полупроводниковые гетероструктуры. Это создает перспективы для их использования в приборах спинтроники и в магнитооптических элементах приборов оптоэлектроники.

На защиту выносятся следующие основные положения

1. Слои InMnAs и GaMnAs, нанесенные лазерным распылением соответствующей полупроводниковой и металлической Mn мишеней в газовой атмосфере, обнаруживают свойства ферромагнитного полупроводника. При этом температура Кюри зависит от состава (типа компонента A³ и

концентрации марганца) и достигает значений 310 и 50 К для InMnAs и GaMnAs, соответственно.

2. Структуры, включающие одиночный дельта<Mn>-слой, встроенный в эпитаксиальный слой нелегированного GaAs, при содержании марганца 0.2 – 0.3 монослоя являются ферромагнитными с температурой Кюри ≈ 30 К. Это противоречит принятому в литературе мнению, что для осуществления обменного взаимодействия в структуре вблизи дельта<Mn>-слоя должна находиться квантовая яма с двумерным дырочным газом.

3. Слои полуметаллов MnAs и MnP, нанесенные реактивным лазерным распылением мишени Mn в потоке гидрида элемента пятой группы, являются ферромагнитными материалами с дырочным типом проводимости.

Личный вклад автора

Автором проведены исследования гальваномагнитных свойств (эффекта Холла и магнетосопротивления) слоев InMnAs, GaMnAs, MnAs, MnP. Исследования гальваномагнитных свойств дельта<Mn>-легированных слоев GaAs проводились совместно со с.н.с. НИФТИ ННГУ к.ф.-м.н. О.В. Вихровой. Анализ результатов и обсуждение проводились автором совместно с научным руководителем работы Ю.А. Даниловым при участии вед.н.с. к.ф.-м.н. Б.Н. Звонкова и О.В. Вихровой. Электронографические исследования проводились совместно с к.ф.-м.н. Е.А. Питиримовой. Все исследованные структуры выращены Б.Н. Звонковым.

Апробация работы

Результаты, полученные в данной работе, докладывались автором на XI и XII международных симпозиумах «Нанопизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2007 и 2008 гг.); 15-м международном симпозиуме «Nanostructures: Physics and Technology» (Новосибирск, 2007 г.); XIII конференции «Высококачественные вещества и материалы. Получение, анализ, применение» (Нижний Новгород, 2007 г.); 3-й международной конференции «Физика

электронных материалов» (Калуга, 2008 г.); 10-й Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (С.-Петербург, 2008 г.); IX молодежной школе–семинаре по проблемам конденсированного состояния вещества (Екатеринбург, 2008 г.); XII и XIII Нижегородских сессиях молодых ученых (Нижний Новгород, 2007 и 2008 гг.).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 28 научных работ, включая 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, и 23 публикации в материалах конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 152 страницы, включая 76 рисунков и 10 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 120 наименований, список работ автора по теме диссертации содержит 28 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, обозначена цель работы и приведены ее задачи, показана научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературных данных по магнитным полупроводникам $(A^3, Mn)B^5$ и полуметаллам MnAs, MnP. В частности рассмотрены способы выращивания (молекулярно-лучевая и газофазная эпитаксия), магнитные и магнитотранспортные свойства эпитаксиальных слоев InMnAs, GaMnAs, объемно легированных магнитной примесью, и структур на основе GaAs, содержащих примесь марганца в виде дельта-слоя. Рассмотрены полуметаллы MnAs, MnP, способы получения слоев этих материалов на подложках GaAs и их свойства. В первой главе также обсуждаются гальваномагнитные явления, характерные для магнитных материалов, такие как аномальный и планарный эффект Холла, эффекты отрицательного и анизотропного магнетосопротивления.

Известно, что в магнитных материалах может наблюдаться аномальный эффект Холла [5]. В случае тонких слоев этих материалов сопротивление Холла описывается выражением:

$$R_H(H) = R_0 \cdot H / d + R_S \cdot M(H) / d \quad (1)$$

где d – толщина слоя, H – напряженность магнитного поля, $M(H)$ – намагниченность материала; R_0 – коэффициент нормального эффекта Холла; R_S – коэффициент аномального эффекта Холла.

При достижении максимального значения намагниченности структуры M (намагниченности насыщения M_S), ход зависимости $R_H(H)$ в этом случае определяется слагаемым нормального эффекта Холла ($R_0 H / d$), следовательно, возможно определение коэффициента R_0 , что позволяет установить тип и вычислить концентрацию носителей. Также возможно определение магнитолевой зависимости слагаемого аномального эффекта Холла ($R_S M(H) / d$) вычитанием из зависимости $R_H(H)$ слагаемого нормального эффекта Холла. Следовательно, исследование эффекта Холла в ферромагнетиках

позволяет изучать как электрические характеристики материала (тип носителей и их концентрацию), так и магнитные характеристики ($M(H)$).

Во второй главе приводятся методики получения и исследования изучаемых в работе магнитных структур. Структуры получены оригинальными, не применявшимися ранее для получения магнитных полупроводников методами лазерного нанесения в газовой атмосфере или комбинацией методов МОС – гидридной эпитаксии (МОСГЭ) и лазерного нанесения. Получение слоев InMnAs и GaMnAs (толщиной $\sim 100 - 300$ нм) на подложках полуизолирующего GaAs осуществлялось поочередным распылением лазером металлической мишени Mn и полупроводниковой мишени InAs (GaAs) в потоке водорода и арсина. Количество марганца, вводимого в InAs (GaAs), характеризовалось параметром $Y_{Mn} = t_{Mn}/(t_{InAs(GaAs)} + t_{Mn})$, где t_{Mn} и $t_{InAs(GaAs)}$ – времена распыления мишени Mn и InAs (GaAs), соответственно. Слои InMnAs и GaMnAs защищались пассивирующим слоем InAs или GaAs (толщиной $\sim 5 - 10$ нм), соответственно. Для получения структур на основе эпитаксиальных слоев GaAs, содержащих одиночный дельта <Mn>-легированный слой, на буферном слое, полученным МОСГЭ (температура выращивания (T_g) 650°C), методом лазерного нанесения наносился слой Mn ($T_g = 400^\circ\text{C}$) толщиной $0.1 - 0.35$ монослоя (МС), закрывавшийся покровным слоем GaAs (ЛН, $T_g = 400^\circ\text{C}$). Слои MnAs и MnP (толщиной ~ 100 нм) на подложки полуизолирующего GaAs наносились путем распыления мишени Mn в потоке арсина или фосфина, соответственно. Эти слои покрывались пассивирующим слоем GaAs толщиной ~ 5 нм.

Для практического применения в приборах спинтроники необходимы материалы, в которых носители обладают преимущественной спиновой поляризацией (ферромагнитные полупроводники и полуметаллические соединения). Для диагностики наличия спин-поляризованных носителей проводились исследования гальваномагнитных свойств изучаемых структур, в частности, аномального эффекта Холла. На образцах фотолитографическим методом были сформированы меза-структуры типа «холловский мостик».

Измерения проводились в диапазоне температур 10 – 300 К. Для этого использовался гелиевый криостат замкнутого цикла Janis CCS-300S/202. Диапазон магнитного поля, прикладываемого к структурам, составлял ± 3700 Э.

Кристаллическое совершенство полученных слоев и структур исследовалось методом дифракции быстрых электронов на отражение.

В третьей главе рассматриваются свойства слоев InMnAs. Количество примеси марганца, характеризующееся параметром Y_{Mn} , изменялось в диапазоне от 0 до 0.26. Слой InAs, не содержащий Mn, имел *n*-тип проводимости. Все слои с марганцем демонстрировали дырочный тип проводимости. Электронографические исследования показали, что полученные слои InMnAs имеют структуру мозаичного монокристалла.

В слоях с содержанием марганца $Y_{Mn} \geq 0.09$ наблюдался аномальный эффект Холла при температурах от 10 К до комнатной. На рис. 1 представлен типичный вид магнитополевой зависимости сопротивления Холла. Зависимость $R_H(H)$ является нелинейной с петлей гистерезиса вследствие гистерезисного характера магнитополевой зависимости намагниченности M (уравнение (1)).

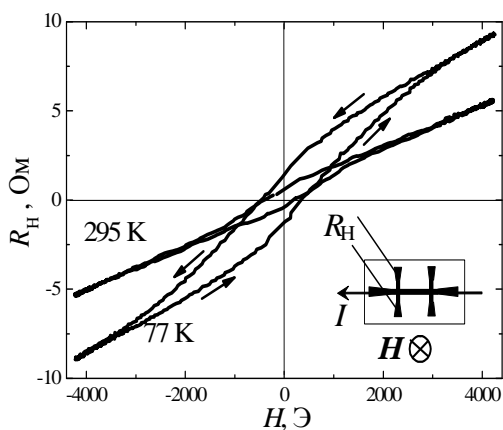


Рис. 1. Магнитополевая зависимость сопротивления Холла при 295 К и 77 К для слоя InMnAs с $Y_{Mn} = 0.2$. Стрелками указано направление обхода. На вставке представлена схема измерения сопротивления Холла.

электрические параметры (концентрацию и подвижность носителей), так и магнитные параметры слоев (величины остаточной намагниченности и

Такой характер зависимости сопротивления Холла от магнитного поля позволяет заключить, что данные слои являются ферромагнитными вплоть до комнатной температуры. Следует отметить, что аномальный эффект Холла при комнатной температуре в InMnAs наблюдается впервые.

Исследование эффекта Холла позволяет определить как

намагниченности насыщения, коэрцитивное поле). Температурные зависимости сопротивления слоев InMnAs имеют полупроводниковый характер: с понижением температуры увеличивается сопротивление слоев, что связано с вымораживанием носителей. Об этом также свидетельствуют температурные зависимости концентрации носителей: с понижением температуры происходит уменьшение концентраций носителей. Наблюдаются невысокие значения подвижности ($\approx 30 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$), что характерно для магнитных полупроводников, в частности для InMnAs, полученных НТ-МЛЭ. Это связано с большим количеством рассеивающих центров в подобных материалах.

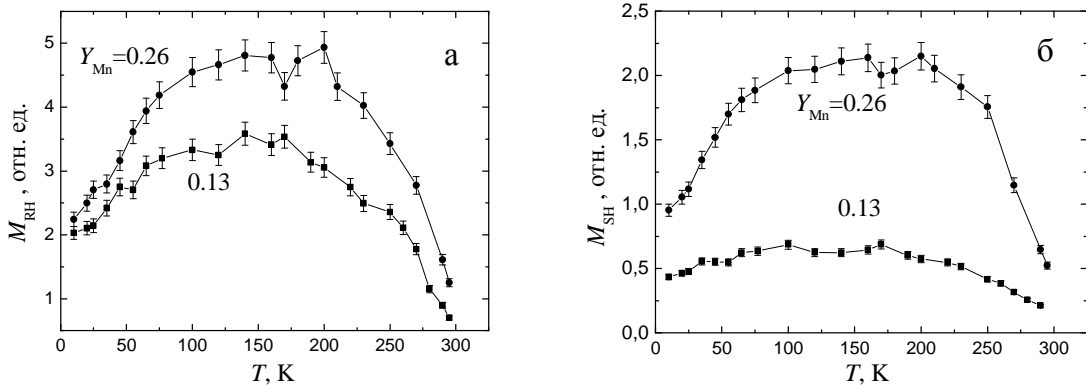


Рис. 2. Температурные зависимости остаточной намагниченности M_{RH} (а) и намагниченности насыщения M_{SH} (б), определенные по эффекту Холла, для слоев InMnAs с различным содержанием Mn.

На рис. 2 представлены температурные зависимости величин остаточной намагниченности M_{RH} и намагниченности насыщения M_{SH} для двух структур с различным содержанием марганца. С понижением температуры от 295 К до 100 К наблюдается возрастание и выход на насыщение данных величин, что связано с уменьшением влияния тепловых колебаний решетки на магнитное упорядочение. Подобное температурное поведение характерно для ферромагнитных материалов, в частности, для ферромагнитных полупроводников [6]. Однако с уменьшением температуры ниже 100 К наблюдается не типичное и не наблюдавшееся ранее понижение значений намагниченности (рис. 2). Слои InMnAs, как показали рентгеноструктурные

исследования, содержат включения фазы MnAs, данная фаза является ферромагнитной с температурой Кюри 315 К.

Это позволяет предположить, что ферромагнитные свойства данных структур выявленные по исследованиям эффекта Холла, связаны с взаимодействием носителей с магнитными моментами включений MnAs. При понижении температуры ниже 100 К величина взаимодействия носителей с магнитными моментами включений уменьшается в связи с понижением концентрации носителей, что может приводить и к уменьшению величин намагниченности, определенных из транспортных свойств.

В главе 3 также рассматриваются структуры на основе слоев InMnAs, нанесенных на подложку InAs *n*-типа. На этих образцах фотолитографическим методом были выполнены меза-структуры для исследования поперечного транспорта носителей (рис. 3).

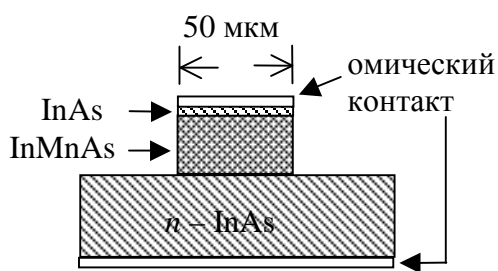


Рис. 3. Схематическое изображение *p-n* структур InMnAs/InAs.

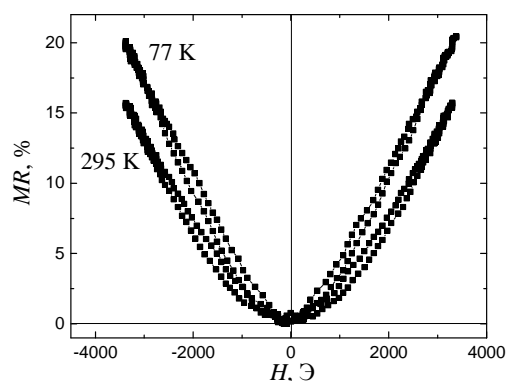


Рис. 4. Магнетосопротивление структуры InMnAs/*n*-InAs при 295 К и 77 К.

В этих структурах наблюдался эффект гигантского положительного магнетосопротивления (рис. 4). При комнатной температуре увеличение сопротивления структур составляло до 16 % в магнитном поле 3400 Э. Большое магнетосопротивление может быть связано с особенностью рассеяния носителей в результате изменения их спиновой поляризации при переходе из области высокой степени спиновой поляризации (область InMnAs) в область с низкой степенью спиновой поляризации (область *n*-InAs).

В четвертой главе рассматриваются слои GaAs, как объемно легированные марганцем (GaMnAs), так содержащие только одиночный дельта<Mn>-легированный слой. Слои GaMnAs были получены при различной температуре выращивания ($T_g = 300 - 370^\circ\text{C}$) и содержали различное количество марганца ($Y_{\text{Mn}} = 0.13 - 0.23$). Температурные зависимости сопротивления, как и для слоев InMnAs, демонстрируют полупроводниковый характер: для GaMnAs наблюдается понижение концентрации носителей с уменьшением температуры. Слои GaMnAs, как и слои InMnAs, содержат включения фазы MnAs, о чем свидетельствуют исследования магнитооптического эффекта Керра при 295 К [7], которые обнаруживают наличие петли гистерезиса на зависимости угла поворота плоскости поляризации от магнитного поля. Однако в отличие от слоев InMnAs с примерно равным количеством введенного марганца в слоях GaMnAs аномальный эффект Холла наблюдался лишь при температурах ниже 60 К, следовательно, температура Кюри этих слоев меньше 60 К. В слоях GaMnAs наблюдается эффект отрицательного магнетосопротивления, т.е., происходит понижение сопротивления слоев в магнитном поле, что, как и аномальный эффект Холла, характерно для магнитных полупроводников.

Подобные низкие значения температуры Кюри характерны для слоев GaMnAs, магнитные свойства которых обусловлены взаимодействием носителей с магнитными моментами атомов марганца [8]. Следовательно в отличие от рассмотренных выше слоев InMnAs, ферромагнитные свойства слоев GaMnAs, определенные из исследований гальваномагнитных свойств, не связаны со взаимодействием носителей с магнитными моментами включений MnAs.

На рис. 5 представлено схематическое изображение структур, содержащих только одиночный дельта<Mn>-легированный слой. В структурах с содержанием марганца в дельта слое 0.2 – 0.35 МС при температурах ниже 40 К наблюдается аномальный эффект Холла (рис. 6).

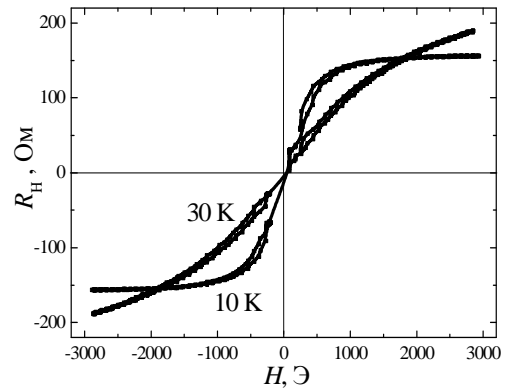
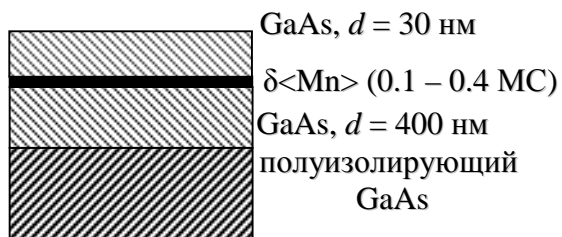


Рис. 5. Схематическое изображение структур с одиночным $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -легированным слоем.

Рис. 6. Магнитопольные зависимости сопротивления Холла при 10 К и 30 К для структуры с $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -легированным слоем (0.2 МС марганца).

При этих температурах в структурах также наблюдается эффект отрицательного магнетосопротивления. Это позволяет заключить, что при температурах ниже 40 К такие структуры являются ферромагнитными. Ферромагнетизм в структурах, содержащих одиночный дельта-слой марганца, наблюдался впервые. Для структур с $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -легированным слоем подвижность носителей выше, чем у слоев GaMnAs, на порядок величины при комнатной температуре и на два порядка - при 77 К. Для структуры с дельта-слоем, содержащим 0.2 МС марганца, при температурах ниже ≈ 80 К наблюдается переход к проводимости по примесной зоне. Образование примесной зоны может быть связано с наличием области с высоким содержанием электрически активной примеси (область дельта-слоя). Для этой структуры при температурах ниже 20 К также наблюдался планарный эффект Холла (рис. 7), т.е., возникновение ЭДС Холла при ориентации внешнего магнитного поля в плоскости структуры.

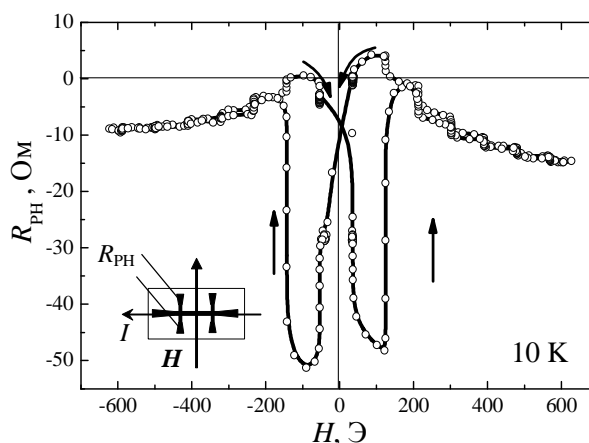


Рис. 7. Магнитополевая зависимость сопротивления Холла при 10 К для структуры с дельта<Mn>-легированным слоем (0.2 МС). На вставке представлена схема измерения сопротивления Холла.

Для ферромагнитных материалов холловское сопротивление в случае планарного эффекта Холла (R_{PH}) пропорционально квадрату плоскостной компоненты намагниченности [9]. Следовательно, планарный эффект Холла в структуре с одиночным дельта <Mn>-легированным слоем также является следствием ее ферромагнитных свойств.

В пятой главе рассматриваются свойства слоев MnAs и MnP, полученных на подложке GaAs методом лазерного распыления мишени марганца в потоке арсина или фосфина. Слои MnAs были получены при различных температурах (300 или 400°C) роста и различном потоке подаваемого в реактор арсина.

Для слоев MnAs при 295 К магнитополевые зависимости сопротивления Холла (магнитное поле приложено перпендикулярно плоскости) имеют гистерезисный характер (рис. 8), что свидетельствует о проявлении ферромагнетизма в транспортных свойствах. Следует отметить влияние температуры роста слоя на магнитные параметры, такие как величину коэрцитивной силы и величину намагниченности насыщения. При 77 К зависимости имеют линейный вид. Это может быть связано с тем, что доступной величины магнитного поля недостаточно для намагничивания слоев

до насыщения и наблюдения перехода к преобладанию нормального эффекта Холла.

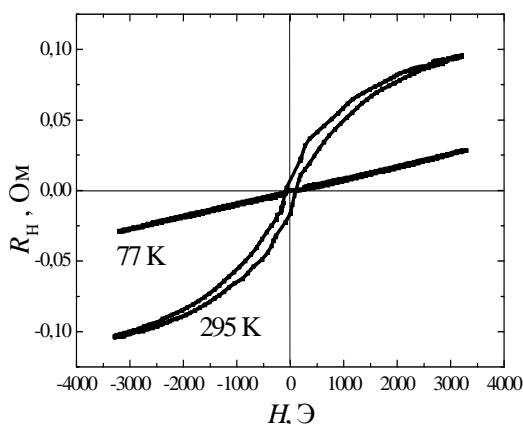


Рис. 8. Магнитополевые зависимости сопротивления Холла при 295 К и 77 К для слоя MnAs.

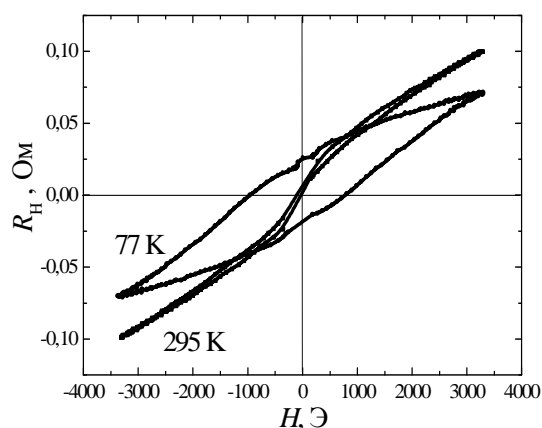


Рис. 9. Магнитополевые зависимости сопротивления Холла при 295 К и 77 К для слоя MnP.

Слои MnP были получены при различных температурах выращивания ($T_g = 300 - 450^\circ\text{C}$). При температуре 295 К аномальный эффект Холла (рис. 9) и отрицательное магнетосопротивление наблюдается в слоях, полученных при более высоких T_g , следовательно, такие слои являются ферромагнитными при комнатной температуре. При температурах измерения ниже комнатной во всех слоях наблюдается гистерезисный характер магнитополевой зависимости сопротивления Холла вплоть до 10 К. Также следует отметить влияние температуры выращивания слоев на их магнитные параметры, в частности, величину коэрцитивного поля. Гальваномагнитные свойства слоев MnP, нанесенных на GaAs, были исследованы впервые.

В диапазоне температур 10 – 295 К проводимость слоев MnAs и MnP является дырочной. Температурная зависимость удельного сопротивления слоев MnAs и MnP имеет металлический характер.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Проведены исследования гальваномагнитных свойств слоев InMnAs, полученных на подложках GaAs оригинальным методом лазерного нанесения в газовой атмосфере.

2. Показано, что сформированные слои InMnAs имеют монокристаллическую структуру, обладают полупроводниковыми свойствами и одновременно являются ферромагнитными до температуры ≈ 310 К.
3. Впервые в слоях InMnAs при комнатной температуре обнаружен аномальный эффект Холла с петлей гистерезиса. Это явление качественно объяснено взаимодействием спин – поляризованных носителей с магнитными моментами содержащихся в полупроводниковой матрице ферромагнитных включений MnAs.
4. Обнаружено необычное уменьшение с понижением температуры ниже 100 К величин остаточной намагниченности (M_{RH}) и намагниченности насыщения (M_{SH}), определенных из исследований эффекта Холла. Это может быть связано с уменьшением взаимодействия носителей с магнитными моментами кластеров MnAs вследствие понижения концентрации носителей.
5. В диодных меза-структурах p -InMnAs/ n -InAs обнаружен эффект положительного гигантского магнетосопротивления, достигающий 16 % при комнатной температуре в поле 3500 Э.
6. Слои GaMnAs обладают полупроводниковыми свойствами, что показали температурные исследования удельного сопротивления и эффекта Холла. В слоях GaMnAs наблюдается аномальный эффект Холла при температурах ниже 60 К. Это позволяет заключить, что ферромагнитные свойства структур, связанные со спиновой поляризацией носителей, могут быть качественно объяснены в рамках теории ферромагнетизма в магнитных полупроводниках, вызванного обменным взаимодействием между носителями и магнитными моментами атомов марганца.
7. В отличие от слоев InMnAs присутствие ферромагнитных включений MnAs не приводит к возникновению аномального эффекта Холла в GaMnAs при высоких температурах, что позволяет сделать заключение об отсутствии взаимодействия носителей с магнитными моментами включений MnAs.

8. Проведены исследования гальваномагнитных свойств GaAs структур, содержащих одиночный дельта<Mn>-слой, полученных комбинированным методом МОС – гидридной эпитаксии и лазерного нанесения.
9. Впервые обнаружен ферромагнетизм в GaAs структурах, содержащих одиночный дельта<Mn>-слой, проявляющийся в наличие аномального эффекта Холла при температурах ниже ≈ 40 К и планарного эффекта Холла при температурах ниже ≈ 20 К.
10. Как и для слоев GaMnAs, ферромагнетизм в GaAs структурах с одиночным дельта<Mn>-слоем может быть связан с наличием обменного взаимодействия между носителями и магнитными моментами ионов марганца.
11. Проведены исследования гальваномагнитных свойств слоев MnAs и MnP, полученных на подложках GaAs методом лазерного распыления в газовой атмосфере. Исследования гальваномагнитных свойств MnP на подложках GaAs были проведены впервые.
12. Установлено наличие при комнатной температуре аномального эффекта Холла и, следовательно, транспорта спин – поляризованных носителей в слоях MnAs.
13. Установлено наличие в слоях MnP аномального эффекта Холла в диапазоне температур 10 – 295 К.
14. В слоях MnAs и MnP наблюдается эффект отрицательного магнетосопротивления гистерезисного характера и эффект анизотропного магнетосопротивления.
15. Выявлено влияние параметров роста на гальваномагнитные свойства и магнитные параметры (величина коэрцитивного поля, намагниченности насыщения) слоев MnAs и MnP, В частности, увеличение температуры выращивания слоев MnP от 300 до 450°C приводит к увеличению значения коэрцитивного поля H_{CH} от 135 до 1050 Э.

Список цитированной литературы

1. Lenz, J. Magnetic Sensors and Their Applications / J. Lenz, A. S. Edelstein // IEEE Sensor J. – 2006. – V.6, n.3. – P. 631-649.
2. Ferromagnetic semiconductor GaMnAs / S. Lee, J.-H. Chung, X. Liu, J. K. Furdyna, B. J. Kirby // Materials Today. – 2009. – V.12, n.4. – P. 14 – 21.
3. Dietl, T. Engineering magnetism in semiconductors / T. Dietl, H. Ohno // Materials Today. – 2006. – V.9, n.11. – P. 18-26.
4. Mavropoulos, P. A review of the electronic and magnetic properties of tetrahedrally bonded half-metallic ferromagnets / P. Mavropoulos, I. Galanakis // J. Phys.: Cond. Mat. – 2007. – V.19. – P. 315221 – 1–21.
5. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров. – М. : Большая Российская энциклопедия, 1998. – Т. 5. – С. 414.
6. Magnetotransport properties of p-type (In,Mn)As as diluted magnetic III-V semiconductors / H. Ohno, H. Munekata, T. Penney, S. von Molnar, L.L. Chang // Phys. Rev. Lett. – 1992. – V.68, n.17. – P. 2664-2667.
7. Лазерное распыление в атмосфере водорода как новый метод формирования полупроводниковых наногетероструктур / Б.Н Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, П.Б. Демина, А.В. Кудрин, В.П. Лесников, В.В. Подольский // Нанотехника. – 2008. – В.1. – С.32-43.
8. Zener model description of ferromagnetism in zinc-blende magnetic semiconductors / T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, D. Ferrand // Science. – 2000. – V.287. – P. 1019-1022.
9. Planar Hall effect and uniaxial in-plane magnetic anisotropy in Mn δ -doped GaAs/p-AlGaAs heterostructures / A. M. Nazmul, H. T. Lin, S. N. Tran, S. Ohya, M. Tanaka // Phys. Rev. B. – 2008. – V.77. – P. 155203–1 – 8.

Публикации по теме диссертации

- A1. Ферромагнетизм при комнатной температуре в слоях InMnAs / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, А.В. Кудрин, В.В. Подольский, Ю.Н. Дроздов, М.В. Сапожников, С. Mouga, M.I. Vasilevskiy, M.П. Темиряева // Физика твердого тела. – 2008. – Т.50, в.1. – С.50-53.
- A2. Лазерное распыление в атмосфере водорода как новый метод формирования полупроводниковых наногетероструктур / Б.Н Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, П.Б. Демина, А.В. Кудрин, В.П. Лесников, В.В. Подольский // Нанотехника. – 2008. – В.1. – С.32-43.
- A3. Магнитосопротивление структур, содержащих слои MnAs и сильнолегированных марганцем полупроводников A^3B^5 / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Ю.Н. Дроздов, Б.Н. Звонков, А.В. Кудрин, В.В. Подольский, М.В. Сапожников // Известия РАН. Сер. Физическая. – 2009. – Т.73, в.1. – С.29-31.
- A4. Ferromagnetic semiconductor InMnAs layers grown by pulsed laser deposition on GaAs / Yu.A. Danilov, A.V. Kudrin, O.V. Vikhrova, B.N. Zvonkov, Yu.N. Drozdov, M.V. Sapozhnikov, S. Nicolodi, E.R. Zhiteytsev, N.M. Santos, M.C. Carmo, N.A. Sobolev // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2009. – V.42. – P. 035006–1–5.
- A5. Ферромагнетизм в GaAs структурах с дельта-легированным Mn слоем / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, И.Л. Калентьева, А.В. Кудрин / Письма в ЖТФ. – 2009. – Т.35, в.14. – С.8-17.
- A6. Получение слоев магнитных полупроводников типа $(A^3,Mn)B^5$ для приборов спинтроники / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, А.В. Кудрин // Тезисы докладов конференции «Нанотехнологии – производству – 2006», 29 – 30 ноября 2006 г. – Фрязино, 2006. – С.57-58.

- A7. Photoluminescence of InAs/GaAs quantum dot heterostructures containing Mn and carbon δ -doped layers / Yu.A. Danilov, N.V Baidus, M.I. Vasilevskiy, O.V. Vikhrova, B.N. Zvonkov, A.V. Kudrin, A. Chahboun // International School on Structural Characterization of Nanostructures, Aveiro, Portugal, 25-27 January, 2007. – Aveiro, 2007. – P.43.
- A8. Кудрин, А.В. Исследование фотоэлектрических свойств квантово-размерных структур, содержащих δ -слой магнитной примеси / А.В. Кудрин // XII нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки. Тезисы докладов, Нижний Новгород, 26 февраля – 2 марта 2007 г. – Нижний Новгород, 2007. – С.100-101.
- A9. Ферромагнетизм при комнатной температуре в слоях InMnAs / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, А.В. Кудрин, Б.Н. Звонков, В.В. Подольский, Ю.Н. Дроздов, М.В. Сапожников, С. Moura, M.I. Vasilevskiy, M.П. Темиряева // Нанопизика и наноэлектроника. XI Международный Симпозиум, Нижний Новгород, 10 – 14 марта 2007 г. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2007. – Т.1. - С.216-217.
- A10. Особенности температурных зависимостей фотолюминесценции легированных марганцем структур с квантовыми точками InAs/GaAs / Ю.А. Данилов, Н.В. Байдусь, М.И. Василевский, О.В. Вихрова, Б.Н. Звонков, А.В. Кудрин, А. Chahboun // Нанопизика и наноэлектроника. XI Международный Симпозиум, Нижний Новгород, 10 – 14 марта 2007 г. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2007. – Т.2. – С.400-401.
- A11. Свойства эпитаксиальных пленок InAs, сильно легированных Mn / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, А.В. Кудрин, Б.Н. Звонков, В.В. Подольский, Ю.Н. Дроздов, М.В. Сапожников // XII Нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины. Нижний Новгород, 16 – 21 апреля 2007 г. – Нижний Новгород, 2007. – С.59-60.
- A12. Получение эпитаксиальных слоев магнитного полупроводника InMnAs методом лазерного нанесения / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, А.В. Кудрин, Б.Н. Звонков, В.В. Подольский, Ю.Н. Дроздов, М.В. Сапожников // XIII конференция «Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение». Нижний Новгород, 28 – 31 мая 2007 г. Тезисы докладов. – Нижний Новгород, 2007. – С.252-254.
- A13. Room-temperature ferromagnetism in InMnAs layers / O.V. Vikhrova, Yu.A. Danilov, A.V. Kudrin, B.N. Zvonkov, V.V. Podolskii, Yu.N. Drozdov, M.V. Sapozhnikov // «Nanostructures: Physics and Technology». 15th International Symposium, Novosibirsk, Russia, June 25 – 29, 2007. Proceedings. – St. Petersburg: Ioffe Institute, 2007. – P.157-158.
- A14. Ferromagnetism in InMnAs layers, deposited by laser ablation method / Yu.A. Danilov, E.S. Demidov, Yu.N. Drozdov, A.V. Kudrin, V.V. Podolskii, M.V. Sapozhnikov, O.V. Vikhrova, B.N. Zvonkov // Euro – Asian Symposium «Magnetism on a nanoscale». Abstract book. Kazan, 23–26 August 2007. – Kazan: Kazan State University, 2007. – P.125.
- A15. Формирование и свойства слоев ферромагнитного полупроводника InMnAs / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Е.С. Демидов, Ю.Н. Дроздов, Д.М. Дружнов, Б.Н. Звонков, А.В. Кудрин, В.В. Подольский, М.В. Сапожников // VIII Российская конференция по физике полупроводников. Тезисы докладов, Екатеринбург, 30.09–05.10.2007. – Екатеринбург, 2007. – С.335.
- A16. Магнетосопротивление структур, содержащих сильнолегированные марганцем слои полупроводников A^3B^5 и MnAs / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Ю.Н. Дроздов, Б.Н. Звонков, А.В. Кудрин, В.В. Подольский, М.В. Сапожников // Симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника». Материалы симпозиума, Нижний Новгород, 10 – 14 марта 2008 г. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2008. – С.271-272.
- A17. Кудрин, А.В. Магнетосопротивление структур, содержащих сильнолегированные марганцем слои полупроводников A^3B^5 и MnAs / А.В. Кудрин, Ю.А. Данилов // XIII Нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины. Нижний Новгород, 20 – 25 апреля 2008. – Нижний Новгород, 2008. – С.58-59.
- A18. Room-temperature ferromagnetism in InMnAs layers, deposited by pulse laser ablation / Yu.A. Danilov, A.V. Kudrin, O.V. Vikhrova, B.N. Zvonkov, Yu.N. Drozdov, M.V.

- Sapozhnikov, N.S. Perov, A.S. Semisalova, S. Nicolodi, E.R. Zhiteytshev, M.C. Carmo, N.A. Sobolev // Moscow International Symposium on Magnetism. Book of abstracts. Moscow, June 20–25, 2008. – Moscow, 2008. – P.597-598.
- A.19. Magnetoresistance of the structures with layers of MnAs and heavily doped manganese III-V semiconductors / A.V. Kudrin, O.V. Vikhrova, Yu.A. Danilov, Yu.N. Drozdov, B.N. Zvonkov, V.V. Podol'skii, M.V. Sapozhnikov // Physics of electronic materials. 3rd International Conference Proceedings. Kaluga, Russia, October 1–4, 2008. – Kaluga: KSPU Press, 2008. – V.2. – P.191-194.
- A.20. Гальваномагнитные свойства структур GaAs с дельта – легированными Mn слоями / И.Л. Калентьева, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, А.В. Кудрин // IX молодежная школа – семинар по проблемам конденсированного состояния вещества. 17-23 ноября 2008 г. Тезисы докладов. – Екатеринбург, 2008. – С.158-159.
- A.21. Аномальный эффект Холла в слоях InMnAs /А.В. Кудрин, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков // IX молодежная школа – семинар по проблемам конденсированного состояния вещества. 17-23 ноября 2008 г. Тезисы докладов. – Екатеринбург, 2008. – С.160-161.
- A.22. Температурные зависимости аномального эффекта Холла в слоях InMnAs / А.В. Кудрин, О.В. Вихрова, Б.Н. Звонков, Ю.А. Данилов // Десятая Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Тезисы докладов. Санкт - Петербург, 1-5 декабря 2008 г. – Санкт – Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2008. – С.7.
- A.23. Влияние ориентации подложек *i*-GaAs на гальваномагнитные свойства структур GaAs с дельта-легированными Mn слоями / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Ю.Н. Дроздов, Б.Н. Звонков, И.Л. Калентьева, А.В. Кудрин // XXVII Научные чтения имени академика Николая Васильевича Белова. Тезисы докладов конференции. 16-17 декабря 2008 г. Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2008. - С.113-116.
- A.24. Исследование морфологии, магнитных и гальваномагнитных свойств слоев InMnAs, выращенных эпитаксиально на GaAs(100) / А.В. Алафердов, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, А.В. Кудрин // XXVII Научные чтения имени академика Николая Васильевича Белова. Тезисы докладов конференции. 16-17 декабря 2008 г. Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2008. - С.116-119.
- A.25. Формирование слоев полуметаллов MnAs и MnP для структур спинтроники / Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Кудрин, С.А. Левчук, Е.А. Питиримова, М.В. Сапожников // «Нанозифика и наноэлектроника». XIII Международный Симпозиум. Нижний Новгород, 16 – 20 марта 2009 г. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2009. – Т.2. - С.476-477.
- A.26. Формирование слоев MnAs и MnP методом реактивного лазерного распыления / Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Кудрин, С.А. Левчук, Е.А. Питиримова, М.В. Сапожников // Сборник трудов XXI Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах». 28 июня – 4 июля 2009 г. – Москва – С. 80-82.
- A.27. The combined method of MOC-hydride epitaxy and laser deposition for formation of structures with ferromagnetic semiconductor layers / B.N. Zvonkov, Y.A. Danilov, M.V. Dorokhin, Y.N. Drozdov, A.V. Kudrin, M.V. Sapozhnikov, O.V. Vikhrova // 5th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology. Program and Abstracts. Krakow. – 2009. – P.128.
- A.28. Room-temperature ferromagnetic behaviour of InMnAs films grown by laser ablation technique / Yu. Danilov, Yu. Drozdov, A. Kudrin, O. Vikhrova, B. Zvonkov, M. Sapozhnikov, L. Fetisov, A. Semisalova, N. Perov // International Conference on Magnetism. ICM 2009. Program and Abstracts. Karlsruhe. – 2009. – P.359.