



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ**
«Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр
Сибирского отделения
Российской академии наук»
(КНЦ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН)

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИЦ КНЦ СО РАН

д.ф.-м.н. 

Академгородок, 50,
г. Красноярск, 660036, Россия
тел.: +7 (391)243-45-12, факс: +7 (391)290-53-78
e-mail: fic@ksc.krasn.ru, <http://ksc.krasn.ru>
ОКПО 05239177, ОГРН 1022402133698
ИНН/КПП 2463002263/246301001

№ 356 –

ОТЗЫВ

Ведущей организации Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН) на диссертационную работу Лобова Ивана Дмитриевича «Магнитооптика многослойных обменно-связанных наноструктур с гигантскими аномалиями магнитотранспортных свойств», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений

Актуальной задачей физики магнитных явлений является поиск и изучение новых структурированных материалов с необычными и практически важными свойствами. Особое внимание привлекают пленочные структуры, в которых реализуется обменное взаимодействие между ферромагнитными слоями через немагнитные слои. Начиная с работ Грюнберга и Ферта конца тысяча девятьсот восьмидесятых годов, открывших антиферромагнитную связь между магнитными слоями, разделенными немагнитными прослойками, а также гигантское магнетосопротивление (ГМС) в сверхрешетках Fe/Cr, эта тематика неизменно находится в центре внимания исследователей и разработчиков новой техники. Первоначально это были слои Fe и Cr. Затем подобные эффекты были обнаружены в сверхрешетках других металлов, а также в гетеро-структурах металл-полупроводник. Несмотря на то, что материалы с эффектом ГМС не только интенсивно

изучаются многими научными коллективами, но и находят уже применения в технике, исследование природы и особенностей этого эффекта на микроскопическом уровне еще далеки от завершения. В частности, слабо проработаны особенности магнитооптических эффектов, их связь с магнитной структурой и транспортными свойствами сверхрешеток. Решение подобных задач на модельных образцах создает основу использования высокоинформативных магнитооптических методов для более глубокого изучения реальных объектов с ГМС. Поэтому цель диссертационной работы, сформулированная как «Установление влияния квантовых размерных эффектов на оптические и магнитооптические свойства сверхрешеток, а также установление взаимосвязи магнитооптических свойств и межслоевого обменного взаимодействия в сверхрешетках и слоистых наногетероструктурах; создание магнитооптического метода определения параметров рассеяния электронов проводимости на интерфейсе (ФМ металл/немагнитный металл), а также магнитооптического метода изучения магнитного упорядочения сверхрешеток с межслоевым обменным взаимодействием» несомненно является актуальной. Решенная в диссертации научная проблема имеет также большое практическое значение для развития микро-, нано-электроники, спинтроники и других перспективных научно-технологических и промышленных отраслей, важных для развития страны.

Диссертация содержит огромный фактический материал, который сочетается с глубоким анализом представленных результатов. Материал диссертации изложен во введении, четырех главах и заключении, занимающих 248 страниц, включая 122 рисунка и 10 таблиц. Библиографический список содержит 222 источника. При этом, распределение материала по главам диссертации несколько отличается от общепринятой схемы. В ней отсутствует отдельная глава, в которой обычно приводится обзор публикаций по теме диссертации, высвечиваются

нерешенные задачи в рассматриваемой области исследования и формулируются цель и задачи защищаемой работы. Вместо этого, весьма сжатый обзор представлен во введении и в начале каждой из глав, содержащих оригинальные результаты. Это, конечно, право автора выбрать удобную с его точки зрения схему представления своих идей и результатов. **Однако такой подход приводит к некоторым повторениям и появлению вопросов по выбору объектов исследования.**

Перейдем непосредственно к содержанию диссертации.

Во введении, как уже было сказано, приведен краткий обзор публикаций по основным проблемам, затронутым в диссертации, показана актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, приведены защищаемые положения, показана новизна, практическая ценность и достоверность полученных результатов, отражено соответствие темы диссертации паспорту специальности, обозначен личный вклад автора. Приводятся сведения о публикациях. По теме диссертации автор имеет 20 печатных работ, опубликованных в научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ и индексируемых системой цитирования Web of Science. Приведены сведения об апробации результатов исследования – результаты были доложены на большом количестве международных и всероссийских конференций.

В Главе 1 рассмотрены методические аспекты изучения многослойных структур с особым вниманием к экваториальному эффекту Керра (ЭЭК) – основному экспериментальному инструменту, использованному во второй и третьей главах. В четвертой главе использовался магнито-рефрактивный эффект. В первой главе описаны также образцы, методы их изготовления и результаты характеристики, подтверждающие их достаточно высокое качество и воспроизводимость свойств. Образцы были получены как непосредственно в ИФМ Уро РАН, так и в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН. Что касается ЭЭК, автор полностью подготовил

методическое обеспечение и создал, как это понятно из текста диссертации, экспериментальные установки для различных оптических диапазонов. Кроме того, в этой главе кратко приведены методики структурных, магнитных, транспортных и оптических свойств, которые привлекались автором для интерпретации полученных результатов. В целом, представленные описания использованных методик позволяют сделать **вывод о достоверности полученных с их помощью результатов.**

Глава 2 посвящена исследованию сверх решёток Co/Cu, Fe/Cu, Fe/Al Fe/Cr, а также магнитооптических свойств антиферромагнитного Cr. Наиболее важными нам представляются следующие результаты.

В спектрах мнимой части оптической проводимости сверх решеток с очень тонкими слоями кобальта впервые экспериментально обнаружена предсказанная теоретически полоса осцилляционного типа в ультрафиолетовой области спектра, обусловленная обменным расщеплением 3d-зоны ГЦК Co.

Установлены типы структур, формирующихся в Co/Cu в зависимости от толщины слоев Co при постоянной толщине слоев меди, включая переход от сверх решеток со сплошными ферромагнитными слоями к кластерно-слоистым наноструктурам с ферромагнитными и суперпарамагнитными частицами кобальта, а также с парамагнитными включениями Co, доля которых постепенно возрастает, что приводит к появлению аномальной температурной зависимости электросопротивления, которая подавляется наложением внешнего магнитного поля H, подобно тому, как это происходит в сплавах, обладающих эффектом Кондо.

Показано, что в многослойной периодической системе Fe/Cu с постоянным отношением толщин составляющих слоев изменение периода модуляции T приводит к изменению недиагональной компоненты тензора диэлектрической проницаемости слоистой системы, которое связывается как с наличием в образцах с $T < 25 \text{ \AA}$ фракции железа в ГЦК-фазе, так и с

общей перестройкой электронной структуры системы, а именно с образованием квазидискретных состояний в электронном спектре ультратонких металлических слоёв и связанных с ними осцилляций магнитного момента.

В структурах Fe/Cr обнаружены квантовые осцилляции оптической проводимости, период которых соответствует величине экстремального волнового вектора k дырочного листа поверхности Ферми вокруг точки H зоны Бриллюэна в спиновой подсистеме Fe ($\downarrow$).

Определена предельная толщина слоя железа (7.2 Å, примерно 5 монослоев) в сверхрешетках Fe/Cr (10 Å), выше которой спектры ЭЭК соответствуют спектрам массивного железа, что свидетельствует о неизменной величине обменного расщепления спиновых подзон в ферромагнитных слоях железа вплоть до пяти монослоев. Показано, что кардинальное изменение электронных, оптических и магнитооптических свойств сверх решеток при толщинах железа, меньших 5 моно-слоёв связано с формированием сложных магнитных кластеров в «Fe-ядре» и «оболочкой» из ферромагнитного сплава FeCr (с пониженной по сравнению с Fe температурой Кюри).

Впервые в антиферромагнитном Cr обнаружены и изучены экваториальный и полярный эффекты Керра, а также квадратичный магнитооптический эффект в отраженном свете.

Глава 3 посвящена исследованию с помощью эффекта Керра магнитного упорядочения в многослойных структурах при наличии межслоевого обменного взаимодействия. Прежде всего, необходимо отметить предложенную автором методику определения характера магнитного упорядочения в металлических сверхрешетках, основанную на измерении и анализе полевых зависимостей ЭЭК, позволивших определять углы θ между векторами намагниченности в соседних магнитных слоях, и, таким образом, получать отношение констант билинейного и

биквадратичного обменов, определять характер межслоевого обменного взаимодействия в зависимости от толщины немагнитного слоя. Проведенные с помощью такой методики исследования показали, что образцы сверхрешеток Fe/Cr с толщиной слоев железа, превышающей 5 Å, имеют неколлинеарную магнитную структуру, и зависимость угла между направлениями магнитных моментов в соседних от толщины слоев хрома имеет осциллирующий характер.

В нано-гетеро- структурах Fe/GaAs обнаружены аномалии осцилляционного типа в зависимостях диэлектрической проницаемости от длины волны и от толщины слоя арсенида галлия. На основе магнитных и магнитооптических данных сделан вывод о наличии межслоевого обменного взаимодействия антиферромагнитного типа в системе Fe/GaAs при толщине слоев полупроводника ~20 Å. Показано, что энергия обменного взаимодействия соответствует величине $J_1 \sim 10^{-2}$ эрг/см².

В трехслойной структуре Fe/ZnTe(tx)/Fe с аморфизированной прослойкой теллурида цинка обнаружен магниторефрактивный эффект (МРЭ). Максимальные значения МРЭ приходятся на толщины ZnTe 8–12 Å и 20–23 Å. Показано, что при этих толщинах в системе Fe/ZnTe наблюдаются изломы на кривых намагничивания и с ростом температуры от 10 К до 300 К происходит резкое уменьшение мнимой компоненты высокочастотной магнитной восприимчивости. Совокупность экспериментальных данных позволила сделать вывод о существовании в сэндвичах Fe/ZnTe/Fe при указанных толщинах ZnTe слабого межслоевого обменного взаимодействия антиферромагнитного типа с величиной $J_1 \sim 10^{-2}$ эрг см⁻².

В **Главе 4** представлены результаты исследования рассеяния электронов проводимости на интерфейсах слоистых металлических структур Fe/Cr и Co/Cu с помощью магниторефрактивного эффекта (МРЭ) в инфракрасной области спектра.

Для сверхрешёток Fe/Cr спектры МРЭ получены впервые. Выделен вклад свободных носителей заряда в оптическую проводимость в инфракрасной области спектра. Получена корреляция между максимальными значениями МРЭ в этой области спектра и величиной магнитосопротивления.

Обнаружена спиновая асимметрия рассеяния электронов проводимости на интерфейсах, степень которой зависит от типа обмена между ферромагнитными слоями, который, в свою очередь, определяется толщиной слоев Cr. Установлено, что в случае антиферромагнитного обмена асимметрия максимальна и резко уменьшается для ферромагнитного типа обмена.

Определена минимальная толщина слоя Fe, необходимая для возникновения МРЭ, и показано, что в структурах с наиболее тонкими слоями Fe МРЭ обусловлен асимметрией рассеяния электронов проводимости на интерфейсах. **По-видимому, здесь уже нельзя говорить об интерфейсе между слоями металлов. По сути, при таких малых количествах Fe получают различные типы кластерных структур в зависимости от толщины слоев Cr и их надо обсуждать отдельно.**

Для сверхрешеток Co/Cu выявлена высокая степень спиновой асимметрии рассеяния электронов проводимости на интерфейсах и обнаружено его осциллирующее поведение при изменении толщины слоя меди. При этом основные изменения параметров рассеяния происходят в токовом канале со спином вверх. Достигнута почти предельная величина наблюдаемого эффекта: электроны со спином вниз в своем движении ограничены областью одного периода сверхрешетки, в то время, как электроны со спином вверх свободно перемещаются по слоям сверхрешетки, реализуя своего рода «одно-спиновый» транспорт в направлении, перпендикулярном плоскости образца.

Даже краткий обзор основных результатов диссертации занял более трех страниц, что говорит об огромной работе, проделанной автором. При этом основной массив данных получен с помощью магнитооптических методик, в которые автор внес ряд новинок. Необходимо отметить также, что все экспериментальные данные проанализированы на основе современных теоретических подходов с глубоким пониманием сути наблюдаемых явлений.

Научная новизна диссертации обусловлена новыми методическими разработками, новыми результатами для структур, исследованных ранее, а так же впервые полученными данными для гетероструктур магнитный металл-полупроводник, ранее не исследованных.

Достоверность результатов уже была отмечена выше. Следует добавить, что она обеспечивается также использованием аттестованных образцов, хорошей воспроизводимостью результатов, непротиворечивостью полученных результатов и результатов, полученных другими авторами, представленными в литературе.

Практическая значимость результатов

Представленные в диссертации новые возможности использования эффекта Керра и магниторефрактивного эффекта будут востребованы в ведущих организациях, использующих магнитооптическую спектроскопию для изучения сложных структур. Обнаруженные особенности сверхрешеток найдут применение при создании новых элементов спинтроники и нано-электроники. Результаты работы можно рекомендовать для использования в организациях, в которых ведутся научные исследования по сходной тематике: Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики твердого тела Российской академии наук, Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», Национальном исследовательском технологическом университете "Московский институт стали и сплавов", Институте физики металлов имени М.Н. Михеева

Уральского отделения Российской академии наук, Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» и других научно-исследовательских организациях.

Материал диссертации, в целом, изложен четко и ясно, работа хорошо структурирована и оформлена. Однако, имеется ряд замечаний, обусловленных, главным образом, большим объемом работы.

1. В работе отсутствует анализ точности измерений.
2. Не проанализировано, почему в исследованных сверхрешетках магнитосопротивление (МС) заметно меньше, чем в некоторых аналогичных сверхрешетках, представленных в литературе. В частности, для Co/Cu здесь максимальное МС составляет 18% в то время, как в работе ФММ 2015 – 30%.
3. В оригинальных главах повторяются некоторые описания методик, уже приведенные в первой главе.
4. Представляется слишком смелым утверждение на стр. 46, что полевые зависимости эффекта Керра свидетельствуют об антиферромагнитном межслоевом обмене. Кроме того, было бы правильным сравнить полевые зависимости ЭК и статическо намагниченности.
5. В разных местах в диссертации упоминаются результаты электронной микроскопии и рентгеновской дифракции, но нигде не приведены соответствующие иллюстрации. Остается верить автору на слово.
6. На рис.3.1 приведены полевые зависимости ЭЭК для ряда слоистых структур. Из контекста совершенно непонятно, взяты ли эти зависимости из цитируемой статьи или получены автором.
7. Имеются неточности в описаниях рисунков.

Приведенные замечания не носят принципиального характера и не снижают

ценности диссертационной работы и ее результатов и не влияют на высокую оценку работы.

Заключение

Считаем, что диссертационная работа «Магнитооптика многослойных обменно-связанных наноструктур с гигантскими аномалиями магнитотранспортных свойств» имеет как научную, так и практическую ценность. Автореферат диссертации и публикации в рецензируемых научных изданиях отражают содержание диссертационной работы. Выводы по диссертации являются полными, логичными и обоснованными.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений, а именно, пункту 2 «Экспериментальные исследования магнитных свойств и состояний веществ различными методами, установление взаимосвязи этих свойств и состояний с химическим составом и структурным состоянием, выявление закономерностей их изменения под влиянием различных внешних воздействий» и пункту 3 «Исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств».

Диссертация И.Д. Лобова представляет собой научно-квалификационную работу, которая по своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и практической значимости полученных результатов удовлетворяет критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а её автор Лобов Иван Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Доклад И.Д. Лобова по материалам диссертационной работы заслушан

и обсужден на семинаре отдела физики магнитных явлений **Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (ИФ СО РАН)** 16 октября 2018 г. (Протокол № 1).

Отзыв на диссертационную работу И.Д. Лобова одобрен Ученым советом ИФ СО РАН протокол № 8 от 19 октября 2018 г.

Отзыв составил:

главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных явлений ИФ СО РАН, доктор физико-математических наук Эдельман Ирина Самсоновна.

Директор ИФ СО РАН

д.ф.-м.н.

Председатель семинара, д.ф.-м.н.,

профессор

Ученый секретарь ИФ СО РАН

к.ф.-м.н.


— Д.А. Балаев


— С.Г. Овчинников


— А.О. Злотников

*с отзовом из накопленного
03.12.2018г. /Лобов И.Д./*

Сведения о ведущей организации по диссертационной работе Лобова Ивана Дмитриевича «Магнитооптика многослойных обменно-связанных наноструктур с гигантскими аномалиями магнитотранспортных свойств», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук» (КНЦ СО РАН, ФИЦ
КНЦ СО РАН)

Адрес:

660036 Россия, г. Красноярск, Академгородок 50.

Тел. +7(391) 243-45-12

Факс +7(391) 290-53-78 E-mail: fic@ksc.krasn.ru

Web: <http://ksc.krasn.ru>

**Публикации сотрудников ведущей организации в области исследований,
которым посвящена диссертация**

1. Patrin, G. S.; Shiyan, Ya. G.; Patrin, K. G.; Furdyk, V. P., Magnetic Resonance in [(CoP)(soft)/NiP/(CoP)(hard)/NiP] (n) Multilayer Magnetic Springs, JETP Lett. 107 (2018) 544-548
2. Volkov, NV; Rautskii, MV; Tarasov, AS; Yakovlev, IA; Bondarev, IA; Lukyanenko, AV; Varnakov, SN; Ovchinnikov SG, Magnetic field-driven lateral photovoltaic effect in the Fe/SiO₂/p-Si hybrid structure with the Schottky barrier, Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures, 101 (2018) 201-207.
3. Edelman I., Esters M., Johnson D.C., Yurkin G., Tarasov A., Rautsky M., Volochaev M., Lyashchenko S., Ivantsov R., Petrov D., Solovyov L.A., The competition between magnetocrystalline and shape anisotropy on the magnetic and magneto-transport properties of crystallographically aligned CuCr₂Se₄ thin films// Journal of Magnetism and Magnetic Materials – 2017. – V. 443. p.107–115.
4. Gavrichkov V.A., Polukeev S.I. and Ovchinnikov S.G. Contribution from optically excited many-electron states to the superexchange interaction in Mott-Hubbard insulators//, Physical Review B. – 2017. – V, 95, 144424.
5. Ivantsov R., Evsevskaya N., Saikova S., Linok E., Yurkin G., Edelman I. Synthesis and characterization of Dy₃Fe₅O₁₂ nanoparticles fabricated with the anion resin exchange precipitation method//Materials Science& Engineering B.– 2017. V.226. – Pp. 171–176.

6. Maximova O.A., Kosyrev N.N., Varnakov S.N., Lyaschenko S.A., Yakovlev I.A., Tarasov I.A., Shevtsov D.V., Maximova O.M., Ovchinnikov S.G. In situ magneto-optical ellipsometry data analysis for films growth control// Journal of Magnetism and Magnetic Materials –2017.–Vol.440.– Pages 196-198.
7. Maximova O.A., Kosyrev N.N., Yakovlev I.A., Shevtsov D.V., Lyaschenko S.A., Varnakov S.N., Ovchinnikov S.G. Magneto-ellipsometry as a powerful technique for investigating magneto-optical structures properties//Journal of Magnetism and Magnetic Materials –2017.– Vol.440. – Pages 153-156.
8. Platunov M.S., Kazak N.V., Knyazev Yu.V., Bezmaternykh L.N., Moshkina E.M., Trigub A.L., Veligzhanin A.A., Zubavichus Y.V., Solovyov L.A., Velikanov D.A., Ovchinnikov S.G. Effect of Fe- substitution on the structure and magnetism of single crystals $Mn_{2-x}Fe_xBO_4$ //Journal of Crystal Growth. 2017 – Vol.475, – Pp.239-246.
9. Samoshkina Yu.E., Edelman I.S., Stepanova E.A., Neznakhin D.S., Ollefs K., Andreev N.V., Chichkov V.I., Magnetic and XMCD studies of $Pr_{1-x}Sr_xMnO_3$ manganite films. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017 – Vol.428, – pp. 43–49.
10. Tarasov A.S., Lukyanenko A.V., Tarasov I.A., Bondarev I.A., Smolyarova T.E., Kosyrev N.N., Komarov V.A., Yakovlev I.A., Volochaev M.N., Solovyov L.A., Shemukhin A.A., Varnakov S.N., Ovchinnikov S.G., Patrino G.S., Volkov N.V. Approach to form planar structures based on epitaxial $Fe_{1-x}Six$ films grown on Si(111) // Thin Solid Films, 2017 – Vol. 642, –Pp 20-24.
11. Tarasov I.A., Visotin M. A., Aleksandrovsy, A. S. et al. Si/Fe flux ratio influence on growth and physical properties of polycrystalline beta- $FeSi_2$ thin films on Si(100) surface// Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. – Том.440. – Стр.144-152.
12. Volkov N.V., Tarasov A.S., Smolyakov D.A., Gustaitsev A.O., Rautskii M.V., Lukyanenko A.V., Volochaev M.N., Varnakov S.N., Yakovlev I.A., Ovchinnikov S.G. Extremely high magnetic-field sensitivity of charge transport in the $Mn/SiO_2/p$ -Si hybrid structure //AIP Advances: American Institute of Physics, 2017. – Vol.7. – issue 1 – 015206.
13. Volkov N.V., Tarasov A.S., Rautskii M.V., Lukyanenko A.V., Varnakov S.N., Ovchinnikov S.G. Magnetic-field-driven electron transport in ferromagnetic/ insulator/ semiconductor hybrid structures// Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Конференция: EURO-Asian Symposium on Trends in Magnetism (EASTMAG). 2017. – Vol.440. – pp.140-143.
14. Yakovlev I.A., Tarasov I.A., Lyashchenko S.A. High uniaxial magnetic anisotropy of the $Fe_{1-x}Six$ films synthesized by MBE// Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. T.440.– С.161-163.

Ученый секретарь ФИЦ

К.Ф.-М.Н.

П.Г. Шкуряев