

ОТЗЫВ

официального оппонента 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.

Диссертационная работа Лобова Ивана Дмитриевича посвящена исследованию оптическими и магнитооптическими методами магнитных металлических сверхрешеток и многослойных гетероструктур металл/полупроводник. Основное внимание уделяется выявлению особенностей магнитооптических свойств изучаемых наноструктур, связанных с проявлением квантовых размерных эффектов и эффектов межслоевого обменного взаимодействия.

Актуальность темы диссертации.

Развитие вакуумных технологий изготовления металлических тонких пленок в последней четверти XX века привело к появлению нового класса материалов – многослойных структур, обладающих принципиально новыми свойствами, обусловленными наноразмерными толщинами слоев. Исследование этих и подобных им низкоразмерных магнитных систем представляется важным с точки зрения фундаментального магнетизма, и одновременно актуальным для прикладного применения в магнитной микро- и наноэлектронике. Изучение электронных свойств и магнитных характеристик металлических многослойных пленок, состоящих из чередующихся слоев ферромагнитного и “немагнитного” металлов, и обладающих гигантским магнитосопротивлением, имеет большую практическую значимость. В настоящей работе диссертант исследует влияние квантовых размерных эффектов на оптические и магнитооптические свойства сверхрешеток, а также проясняет взаимосвязь магнитооптических свойств и межслоевого обменного взаимодействия в сверхрешетках и слоистых наногетероструктурах.

Поэтому избранная тема диссертации, безусловно, является **актуальной**.

Структура и основное содержание работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка обозначений, списка использованной литературы, содержит 248 страниц машинного текста, в том числе 122 рисунка и 10 таблиц. Список литературы включает 222 наименования. Оформление текста соответствует требованиям ВАК. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Основной текст диссертации состоит из четырех разделов. По каждому разделу и по работе в целом сделаны обоснованные и четко сформулированные выводы. Суммарный объем научного материала, включенного в работу, весьма значителен.

Во введении приведен краткий обзор результатов исследований, дается обоснование актуальности выбранной темы, формулируются цель и задачи работы и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведены сведения из теории экваториального эффекта Керра для слоистых структур, теории экваториального эффекта Керра для гранулированных сплавов и теории магниторефрактивного эффекта в приближении эффективной среды. Описаны исследованные системы образцов и методы их получения и аттестации. Кратко описаны методики измерений магнитооптических, оптических, магнитных и магнитотранспортных свойств.

Именно комплексный подход и измерение для широкого класса наноструктур, как оптических и магнитооптических, так и магнитных и магнитотранспортных свойств позволил автору получить целый ряд новых экспериментальных результатов и во многих случаях провести моделирование МО эффектов в сверхрешетках на основе существующих теоретических моделей.

Во **второй главе** приведены результаты исследований магнитооптических, оптических и магнитных свойств сверхрешеток и многослойных периодических структур на основе ферромагнитных слоев кобальта и железа и неферромагнитных прослоек из меди, алюминия и хрома.

Исследования эволюции спектральных и полевых зависимостей магнитооптических эффектов от толщины магнитных и немагнитных слоев для широкого класса сверхрешеток, изготовленных разными методами, позволили автору выделить особенности, связанные с квантовыми размерными эффектами в области толщин слоев до 2.5 нм, а также показать, что формирование широких интерфейсов в сверхрешетках Fe/Al препятствует проявлению квантовых размерных эффектов.

К наиболее интересным результатам этой главы можно отнести наблюдение осцилляционной особенности на зависимостях мнимой части недиагональной компоненты тензора оптической проводимости сверхрешеток Co/Cu в УФ области спектра ($E=5-6.2$ эВ), обусловленной обменным расщеплением $3d$ -зоны ГЦК-Co, при толщинах слоя кобальта от 3 до 15 Å, доказывающий уменьшение обменного расщепления в сверхтонких слоях.

Свидетельства о модификации электронной структуры слоистой системы Fe/Cr в области толщин слоев железа от 14 до 26 Å и хрома (12-15 Å) получены автором при исследовании спектров диагональной σ_{xx} и недиагональной σ_{xy} компонент тензора эффективной оптической проводимости.

Показано, что при уменьшении толщины слоя железа до 7 Å включительно спектры ЭЭК сохраняют «железоподобную» форму. В области толщин слоев железа менее 7 Å происходит кардинальное изменение магнитооптических свойств сверхрешеток Fe/Cr, что связано с нарушением сплошности слоев Fe, и образованием магнитных кластеров, состоящих из микрообластей ОЦК-Fe и сплавов FeCr.

Для исключения влияния матрицы антиферромагнитного хрома на магнитооптический отклик слоистой системы впервые были выполнены магнитооптические исследования хрома. В образцах хрома были измерены экваториальный и полярный эффект Керра и квадратичный δ_q эффект в отраженном свете, характеризующий влияние магнитного поля на диагональную компоненту тензора диэлектрической проницаемости. Показано, что обнаруженные в хrome магнитооптические эффекты необходимо учитывать при анализе магнитооптических свойств кластерно-слоистых наноструктур, содержащих хром в качестве прослойки, либо матрицы.

В **третьей главе** приведены результаты исследования влияния межслоевого обменного взаимодействия на магнитооптические свойства изучаемых объектов и поиска обменного взаимодействия в гетероструктурах металл/полупроводник.

Автором разработан метод определения характера магнитного упорядочения в металлических сверхрешетках, основанный на измерении ЭЭК и определении углов θ_0 между векторами намагниченностей в соседних магнитных слоях. Метод позволяет получать отношение констант биквадратичного обмена J_1/J_2 , и определять период и положение максимумов межслоевого обменного взаимодействия. Проведенные исследования показали, что сверхрешетки Fe/Cr с $t_{Fe} > 5$ Å имеют неколлинеарную магнитную структуру.

В результате исследования магнитооптических, магнитных и оптических свойств слоистых наногетероструктур Fe/GaAs были обнаружены аномалии осцилляционного типа в зависимостях диэлектрической проницаемости слоистых пленок от длины волны и от толщины слоя арсенида галлия. На основе магнитных и магнитооптических данных был сделан вывод о наличии межслоевого обменного взаимодействия антиферромагнитного типа в системе Fe/GaAs при толщине $t_{GaAs} \sim 20$ Å, и проведена оценка величины энергии

обменного взаимодействия. Показано, что энергия обменного взаимодействия соответствует величине $J_1 \sim 10^{-2}$ эрг/см².

Наличие слабого межслоевого обменного взаимодействия антиферромагнитного типа было выделено автором и при исследовании трехслойной структуры Fe/ZnTe(t_x)/Fe из анализа совокупности экспериментальных данных, полученных при измерении линейного ЭОК и квадратичного МРЭ эффектов и температурной зависимости αc -магнитной восприимчивости.

Четвертая глава посвящена изучению применения магниторефрактивного эффекта к исследованию металлических интерфейсов слоистых наноструктур.

Диссертанту впервые удалось показать, что с помощью измерения спектров магниторефрактивного эффекта можно независимым методом получить параметры рассеяния электронов проводимости на металлических интерфейсах, и определить параметры рассеяния электронов для двух «классических» систем сверхрешеток Fe/Cr и Co/Cu с гигантским магнитосопротивлением.

Публикации. Основные результаты диссертации полностью освещены в научной печати. В автореферате указаны 20 статей по теме диссертации, включённых ВАК в Перечень ведущих рецензируемых журналов. Существенная часть из этих статей опубликована в престижных международных (Physical Review B, Journal of Magnetism and Magnetic Materials) и российских (ЖЭТФ, ФТТ, ФММ) журналах.

Полученные диссертантом результаты были доложены на более чем 30 российских и международных конференциях, и должная апробация этих результатов несомненна.

Научная новизна результатов диссертационной работы.

Научная новизна результатов диссертационной работы обусловлена тем, что диссертант успешно применил магнитооптические методы для исследования широкого класса многослойных систем, что позволило получить ряд новых, интересных результатов. В частности, получены отсутствовавшие ранее сведения по магнитооптическим свойствам сверхрешеток Co/Cu, Fe/Cu, Fe/Al, Fe/Cr, а также наногетероструктур Fe/GaAs и Fe/ZnTe. На примере сверхрешеток Co/Cu получено экспериментальное подтверждение предсказанной теоретически полосы осцилляционного типа в ультрафиолетовой области спектра для магнитооптической функции $\omega \text{Im}\sigma_{xy}(\omega)$, обусловленной обменным расщеплением $3d$ -зон ферромагнитного металла. Представлены экспериментальные доказательства существования косвенного межслоевого обменного взаимодействия в наногетероструктурах Fe/GaAs и Fe/ZnTe. Диссертанту удалось применить магниторефрактивный эффект для экспериментального определения интерфейсных параметров рассеяния электронов проводимости в металлических магнитных сверхрешетках. На сегодняшний день это второй независимый метод определения параметров рассеяния электронов проводимости на интерфейсах слоистых металлических материалов.

Достоверность результатов и обоснованность выводов.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается использованием аттестованных образцов и методик исследования, изучением различных свойств на одних и тех же образцах, согласием и непротиворечивостью результатов с данными, опубликованными в литературе другими авторами. ...

Практическая значимость полученных результатов

Практическая значимость выполненной работы видится в новом независимом методе определения параметров спин-зависящего рассеяния электронов проводимости на интерфейсах металлических слоистых структур, что, несомненно, будет востребовано при решении прикладных задач, связанных с разработкой новых материалов спинтроники.

Интересно также предложение использовать регистрацию в ультрафиолетовой области спектра полосы осцилляционного типа для магнитооптической функции $\omega/m\sigma_{xy}(\omega)$, наблюдавшейся соискателем в сверхрешетках Co/Cu, для проверки спектрометров на присутствие рассеянного света в оптическом тракте прибора, хотя это предложение и представляется в некотором смысле экзотикой.

Замечания

.....1. Осталось непонятным, что автор понимает под слоевым ферромагнетизмом, после того, как слой становится кластерным.

стр 150 « Можно предположить, что при $t_{Fe} < 10 \text{ \AA}$ возникает кластерная структура Fe, и магнитооптические свойства пленки формируются наложением слоевого ферромагнетизма и кластерного суперпарамагнетизма», что здесь подразумевается под слоевым ферромагнетизмом неясно. В моем понимании и ферромагнитный вклад и супермагнитный вклад обеспечивается кластерами разных размеров.

2. стр155 *Осцилляции ЭЭК наногетероструктур Fe/ZnTe с изменением толщины слоя ZnTe* автор связывает с изменением граничных условий для электронов в металле, возникающим вследствие размерного эффекта в полупроводниковой пленке, но при этом для двух подобных серий наногетероструктур получает разные результаты. Для серии 1 в области толщин *ZnTe* - 6-30 $\text{\AA}$ наблюдаются гигантские осцилляции с периодом $\sim 6 \text{ \AA}$, а в серии 2 в области толщин *ZnTe* - 8-24 $\text{\AA}$ такие осцилляции отсутствуют, но кроме слов, что пленки качественно различны, автор не высказывает никакого предположения, с чем это различие связано.

3 В работе встречаются выражения некорректные с точки зрения стиля изложения, например:

- полная теория ЭЭК для МПС содержится в работе (стр20) ;
- теория тензора $\hat{\epsilon}_r$ (1.36) в приближении эффективной среды развита в работе (стр22);
- значительное усиление магнитооптического поглощения можно объяснить только проявлением квантового размерного эффекта (т.е. формированием состояний квантовых ям) стр101;
- в данном разделе в антиферромагнитном хrome были измерены экваториальный и полярный эффекты Керра, а также квадратичный магнитооптический эффект в отраженном свете, (стр. 107);
- в условиях спин-орбитального (SO) взаимодействия электронов (стр177);

4. Экспериментальные методы исследования оптических и МО измерений описаны автором в 1 главе и, наверно, нет смысла повторять эти описания при обсуждении результатов различных серий

Например :

На стр 38 « Измерения эффективных показателей преломления n^{eff} и поглощения k^{eff} выполнены эллипсометрическим методом Битти в области длин волн $\lambda=0.2-14 \text{ мкм}$ » и на стр 174 -измерение эффективных показателей преломления n^{eff} и поглощения k^{eff} было выполнено эллипсометрическим методом Битти [220] при длинах волн $\lambda=0.3-13 \text{ мкм}$ для образцов , и уж если ссылаться на Битти, то в первом случае, а не в последнем.

Также в диссертации несколько раз приводится описание метода измерения магнитосопротивления (стр. 91, 174, 204) и *магнитооптического спектрометра* (стр35, 174).

Заключение.

Приведенные выше замечания не могут повлиять на общую высокую оценку уровня и значимости диссертационного исследования. Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. По актуальности, научной новизне, уровню решения задач, практической значимости, объему полученных данных, целостности и завершенности диссертационная работа «*Магнитооптика многослойных обменно-связанных наноструктур с гигантскими аномалиями магнитотранспортных свойств*» соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Иван Дмитриевич Лобов, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник кафедры магнетизма,
Физического факультета Федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего образования
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

/ Ганьшина Е.А./

23.11.2018г.

119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2

e-mail: eagan@magn.ru

тел.:8(495)939-40-43

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.11 – «Физика магнитных явлений»

Подпись доктора физ.-мат. наук, профессора Ганьшиной Елены Александровны удостоверяю.

ДЕКАН

Физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Профессор

Н.Н. Сысоев

с отзвком ознакомлен
26.11.2018г. / Лобов И.Д. /

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Ганьшина Елена Александровна

Ученая степень, звание: доктор физико-математических наук, специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений, профессор

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Должность: ведущий научный сотрудник кафедры магнетизма

Почтовый адрес: 119991, г. Москва, Ленинские горы, МГУ, Физический факультет

Тел.: : (495) 939-40-43

E-mail: eagan@magn.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.04.11 – «Физика магнитных явлений»

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. **2018** Magneto-Optical Response Amplification In Multi-Layer Nanocomposite-Semiconductor Structures Victoria Buravtsova, **Elena Gan'shina**, Yuri Kalinin, Alexander Sitnikov в журнале *EPJ Web of Conferences*, том 185, № 03013, с. 1-4
2. **2018** MAGNETO-OPTICAL AND MAGNETIC RESONANCE PROPERTIES OF NANO-SCALED GRANULAR FILMS (CoFeB)_x(SiO₂)_{100-x} and (CoFeB)_xC_{100-x} Vyzulin Sergey, **Gan'shina Elena**, Garshin Vladimir, Perova Natalia, Syr'ev Nikolaj в журнале *EPJ Web of Conferences*, том 185, с. 04002
3. **2018** Фазовое разделение в слоях GaMnAs, сформированных импульсным лазерным осаждением Кунькова З.Э., **Ганьшина Е.А.**, Голик Л.Л., Данилов Ю.А., Кудрин А.В., Ковалев В.И., Зыков Г.С., Маркин Ю.В., О В.Вихрова З, Звонков Б.Н. в журнале *Физика твердого тела*, издательство *Наука. С.-Петербург. отд-ние (СПб.)*, том 60, № 5, с. 939-945
4. **2017** ДИНАМИЧЕСКАЯ МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГЕТЕРОГЕННЫХ НАНОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТОВ (Co₄₁Fe₃₉B₂₀)_x(SiO₂)_{100-x} ЖЭТФ 2017, том 152, вып. 2 (8), стр. 363–371 Грановский А.Б., Калинин Ю.Е., Каширин М.А., Колмаков Д.В., Рыльков В.В., Ситников А.В., Вызулин С.А., **Ганьшина Е.А.**, Галденков А.Н в журнале *ЖЭТФ/JETP*, том 152, № 2, с. 363-371
5. **2016** Influence of Bi on the magnetic and magneto-optical properties of Co/Bi/Co and Bi/Co thin-film systems Shalygina E., Svalov A., Kharlamova A., **Ganshina E.**, Doronin D., Kurl'yanskaya G. в журнале *Japanese Journal of Applied Physics*, издательство *Institute of Pure and Applied Physics (Japan)*, том 55, с. 07MF01-1-07MF01-6

Ученый секретарь
диссертационного
Совета
004.003.0

А.Б. Грановский