

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

После открытия эффекта гигантского магнитосопротивления в многослойных структурах, указавшего на возможное успешное применение таких систем для практических целей, важнейшее значение приобрели методы получения информации о параметрах и механизмах гигантского магнитосопротивления. Потребовалось совершенствование имеющихся методов и поиск новых методов исследования. Обнаружение магниторефрактивного эффекта в таких системах стимулировало магнитооптические исследования. Необходимо было собственно изучить магнитооптические явления в таких системах, оценить возможности магнитооптических эффектов для получения информации о физических параметрах взаимодействий, определяющих необычные свойства многослойных структур и сверхрешеток, а также выявить возможности использования магнитооптики для разработки новых практических методов определения ряда параметров. Этим и определяется **актуальность** исследований, которым посвящена диссертация.

К началу исследований сведения о магнитооптических эффектах в рассматриваемых системах имелись в весьма ограниченном количестве, а по многим вопросам и вообще отсутствовали. Институт физики металлов оказался наиболее готовым сразу включиться в эту сложнейшую новую область исследований. Здесь, прежде всего трудами Г.А. Болотина и В.М. Маевского, были выполнены первые теоретические рассуждения магнитооптических эффектов в многослойных системах и именно здесь имелись специалисты по оптике металлов. Включился в это чрезвычайно актуальное направление исследований и автор рассматриваемой диссертации.

Цель работы четко сформулирована как исследование магнитооптических эффектов в сверхрешетках и слоистых наногетероструктурах с целью понимания особенностей самих этих эффектов и изучения возможностей использования их как новых бесконтактных методов исследования таких структур. Исходя из этого автором были сформулированы конкретные задачи исследования и путем целенаправленной сложной и длительной (более 20 лет) работы получены важные научные результаты, изложенные в диссертации.

Наиболее важные конкретные результаты диссертации хорошо сформулированы автором в разделах диссертации «Цели диссертационной работы» и «Задачи исследования». Они включают три широких обобщенных пункта, действительно отражающих главные результаты диссертации, но в них, на мой взгляд, содержатся по крайней мере семь отдельных важных результатов диссертации.

Первая глава диссертации является вводной. В ней приведены сведения о магнитооптических эффектах и, в частности, об экваториальном эффекте Керра, в том числе и для слоистых структур, описаны используемые для исследований образцы и методики измерения магнитооптических свойств (а также кратко описаны методики магнитных и магнитотранспортных измерений).

Конкретные новые результаты работы изложены во второй, третьей и четвертой главах диссертации.

Вторая глава посвящена результатам исследования магнитооптических свойств сверхрешеток на основе Fe и Co с прослойками из Cu, Al, Cr. Здесь получено много конкретных новых результатов, фактически открывших новую область исследований - магнитооптику подобных структур:

- наблюдение магнитооптическими методами квантовых размерных эффектов в металлических сверхрешетках и определение границы исчезновения квантовых размерных эффектов при росте толщины прослойки;
- наблюдение теоретически предсказанных осцилляций поглощения, определяемых обменным расщеплением 3d-зон ферромагнитного металла;
- наблюдение образования магнитных кластеров из железного ядра и оболочки из сплава FeCr.

Отдельным результатом здесь является исследование магнитооптических свойств пленок хрома и указание на необходимость учета этих свойств при исследовании многослойных структур с хромом.

Третья глава диссертации посвящена результатам магнитооптических эффектов (прежде всего, экваториального эффекта Керра) для получения информации о характере магнитного упорядочения магнитных многослойных структур.

При этом первая часть этой главы фактически является продолжением второй главы. В ней приведены результаты исследования магнитной структуры сверхрешеток Fe/Cr. Прежде всего, здесь продемонстрирована возможность определения характера магнитного упорядочения из магнитооптических измерений экваториального эффекта Керра.

Вторая часть главы посвящена исследованию с помощью магнитооптических эффектов обменных взаимодействий в наногетероструктурах (ферромагнитный металл/полупроводник/ферромагнитный металл), а именно структур Fe/GaAs и Fe/ZnTe. По различию экваториального эффекта Керра в поле насыщения ферромагнитного слоя и поле насыщения образца, а также по температурной зависимости этого различия сделан вывод об антиферромагнитном взаимодействии в образце определенной толщины.

Для структур Fe/ZnTe магнитооптические измерения фактически доказали наличие межслоевого обменного взаимодействия антиферромагнитного типа, что было

впоследствии подтверждено зондированием межслоевого обмена измерениями динамической магнитной восприимчивости.

Четвертая глава диссертации посвящена применению магнитооптических методов к исследованию параметров рассеяния электронов проводимости на интерфейсах сверхрешеток Fe/Cr и Co/Cu. Здесь показано, что магнитооптические исследования могут служить новым независимым методом исследования параметров рассеяния электронов на интерфейсах сверхрешетки таких как время релаксации электронов и вероятности рассеяния, а также коэффициента спиновой асимметрии рассеяния. Важной особенностью этого метода является его бесконтактный характер. С помощью этого метода определены параметры рассеяния для сверхрешетки Fe/Co/Cu/Cr. Показано, что в сверхрешетках Fe/Cr и Co/Cu рассеяние электронов на интерфейсе происходит в основном в токовом канале с одним направлением спина, а в кластерных структурах рассеяние идет в обоих спиновых каналах.

Отмеченные выше и другие **результаты** диссертации И.Д. Лобова являются **новыми** и представляют **большой научный интерес**. Подтверждением этого является публикация результатов в высокорейтинговых научных журналах (20 статей) и активное обсуждение результатов на многочисленных научных конференциях (33 конференции).

Разработанные методики измерения различных характеристик имеют **практическую ценность** и безусловно будут использоваться как новые инструменты исследования. Более того, некоторые разработки уже позволили автору предложить удобные новые бесконтактные способы определения ряда характеристик и получить с их помощью новые данные для исследуемых систем.

Достоверность полученных результатов определяется использованием хорошо аттестованных образцов, выбором апробированных методик измерения, использованием современного научного оборудования, тщательным анализом и аттестацией новых разработанных методик, а также согласованностью с уже имеющимися экспериментальными данными и результатами других исследователей.

Все магнитооптические исследования, начиная с постановки целей и задач, создания конкретных экспериментальных методик, проведения магнитооптических измерений, анализ результатов, сравнение с другими экспериментальными и теоретическими моделями **выполнены автором диссертации**.

Безусловно при проведении исследований магнитооптических свойств требовались данные по структурным, оптическим магнитным, магнитотранспортным свойствам, что требовало привлечения различных специалистов не только для обсуждения результатов, но и для выполнения конкретных участков работы. Положительным моментом диссертации является то, что обсуждение этих вопросов включено в диссертацию кратко, по минимуму, необходимому для описания магнитооптических результатов. Другим

положительным моментом является то, что в диссертации и в автореферате тщательно отражено, кем и в каких организациях выполнялись эти необходимые участки работы.

Диссертация И.Д. Лобова **соответствует Паспорту специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений** (пункт 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 пункт 3 «Исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств»).

Я не имею принципиальных возражений по диссертации И.Д. Лобова. Некоторые же замечания по диссертации сводятся к следующему:

- Анализ экспериментальных результатов проводится, исходя из представлений о многослойных системах как структурах из изотропных сред, без обсуждения возможного искажения структур вблизи границ.

- Рассматриваются тонкие слои и большие длины свободного пробега без обсуждения того, что электроны движутся в неоднородном поле.

- При рассмотрении рассеяния электронов рассматривается только рассеяние в своем спиновом канале и не обсуждается роль процессов с переворотом спина.

- Не обсуждаются возможности проявления в рассматриваемых явлениях межзонных переходов.

- Изложение некоторых экспериментов привязывается к теоретическим моделям. Один пример: «...изучения магнитооптическим методом характера магнитного упорядочения магнитных структур с межслоевым обменным взаимодействием в рамках модели биквадратичного обмена». Ну какой эксперимент «в модели» - эксперимент как есть, так и есть.

- Почти повсеместно упоминается измерение вещественной и мнимой частей тензора проводимости или некоторой величины, являющейся произведением частоты на мнимую часть проводимости. Но в экспериментах всегда измеряются величины, имеющие понятный физический смысл. Конечно, некоторые из них связаны с введенными исключительно для удобства теоретического описания комплексными функциями и, соответственно, с их мнимыми и вещественными частями. Однако при обсуждении физических явлений, тем более при экспериментальных исследованиях, естественно говорить о самих физических величинах.

Отмеченные моменты не снижают ценности полученных диссертантом результатов и сделанных выводов, а относятся скорее к их обсуждению.

В целом диссертация И.Д. Лобова является целостной научно-исследовательской работой по разработке большой новой перспективной области исследований – Магнитооптике многослойных обменно-связанных наноструктур с гигантскими магнитотранспортными свойствами. В ней получены новые, отсутствовавшие ранее сведения по магнитооптическим свойствам сверхрешеток и наногетероструктур, сделаны важные физические выводы, показано, что магнитооптические исследования позволяют определять параметры интерфейсного рассеяния электронов проводимости, предложены и опробованы на практике конкретные методы определения параметров спин-зависящего интерфейсного рассеяния.

Автореферат диссертации полно и ясно отражает содержание диссертации.

По актуальности темы исследования, научной новизне, практической значимости и достоверности полученных результатов, обоснованности сделанных выводов диссертационная работа **«Магнитооптика многослойных обменно-связанных наноструктур с гигантскими аномалиями магнитотранспортных свойств»** полностью удовлетворяет требованиям п.9 Положения ВАК «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук по физико-математическим наукам.

Лобов Иван Дмитриевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент

Е.А. Памятных

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры теоретической
и математической физики
Института естественных наук и математики
ФГАОУВО Уральский федеральный университет им.
первого Президента России Б.Н. Ельцина

+7 922 294 63 57
Evgeny.Pamyatnykh@urfu.ru

03.12.2018

620083, Екатеринбург, пр. Ленина, 51.
ФГАОУВО Уральский федеральный университет им.
первого Президента России Б.Н. Ельцина

Подпись ~~профессора Памятных~~ Евгения Алексеевича удостоверяю.

Директор
Института естественных
и математики УрФУ

7

— А.В. Германенко

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Памятных Евгений Алексеевич

Ученая степень, звание: Доктор физико-математических наук (специальность 01.04.07 – Физика твердого тела), профессор.

Полное наименование организации:

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Должность: профессор кафедры теоретической и математической физики Института естественных наук и математики ФГАО ВО Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Почтовый адрес: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Тел.: +7 (343) 375-44-44, +7(343) 2694431; +7 922 294 63 57.

e-mail: epamyatn@mail.ru; Evgeny.Pamyatnykh@urfu.ru

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. V.I. Okulov, E.A. Pamyatnykh, and A.T. Lonchakov Thermodynamic anomalous Hall effect: The quantum regime. Low Temperature Physics **40**, 1032 (2014); doi: 10.1063/1.4901991.
2. V.I. Okulov, E.A. Pamyatnykh Thermodynamic aspects of describing the contribution of spontaneous magnetism of electrons to the Hall resistance. – EPJ Web of Conferences **185**, 01017 (2018) <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818501017>.
3. A.T. Lonchakov, V.I. Okulov, E.A. Pamyatnykh, T.E. Govorkova, M.A. Andriichuk, L.D. Paranchich, S.B. Bobin, and V.V. Deryushkin Anomalous Galvanomagnetic Effects Due to Spontaneous Spin Polarization of Electrons in Crystal with Low Concentration of 3d-Transition Element Impurities. Solid State Phenomena, Volumes 233-234, pp. 456-462 (2015). doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.233-234.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

Д 004.003.01

Т.Б. Чарикова