

Отзыв официального оппонента о диссертационной работе

ОКОРОКОВА МИХАИЛА СЕРГЕЕВИЧА :

Спин-термические эффекты

в гибридных наноструктурах

металл (полупроводник)/ ферромагнитный диэлектрик ,

представленной на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности - 01.04.11 - физика магнитных явлений

Диссертационная работа М.С.Огорокова посвящена теоретическим исследованиям спиновых токов в гибридных наноструктурах, представляющих собой нормальный металл и ферромагнитный диэлектрик, находящихся в контакте между собой через интерфейс. Исследования таких спиновых токов, протекающих без переноса массы и заряда, в настоящее время является основной задачей спинтроники - нового направления в электронике, которое на сегодняшний день позволяет рассчитывать на получение базовых элементов электроники с быстродействием на временах порядка пико- и фемтосекунд. Поэтому всякое продвижение в понимании физических процессов, сопровождающих возникновение спиновых токов в наноструктурах, является очень ценным, что позволяет считать диссертацию М.С.Огорокова полностью удовлетворяющей требованиям актуальности.

По своей структуре диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы.

Введение содержит краткий обзор современного уровня экспериментальных и теоретических исследований по спиновым токам в наноструктурах, включая спиновые эффекты Холла и Зеебека, а также описание методов спиновой накачки, опирающихся на использование спин-орбитальных взаимодействий электронов проводимости. Это позволяет диссертанту сформулировать задачу построения корректного описания слабонеравновесного отклика системы на электромагнитные и термические возмущения и предложить в ка-

честве способа решения этой проблемы метод неравновесного статистического оператора (НСО) Зубарева и Калашникова.

Следующая за этим первая глава излагает уже известные результаты теоретических разработок метода НСО и его линейного приближения. Во второй главе этот методв прилагается к задаче описания спиновых токов в гибридной наноструктуре нормальный металл-ферромагнитный диэлектрик, в результате чего получены общие уравнения для спинового тока электронов проводимости в нормальном металле и спинового тока в газе спин-волновых возбуждений ферромагнитного диэлектрика. Это позволяет составить перечень физических факторов, влияющих на изучаемые токи, но в то же время само по себе наличие этого перечня не дает ответа на конкретный вопрос, а как именно эти факторы влияют на спиновые токи - увеличивают или уменьшают их - и по каким законам эти факторы зависят от таких внешних параметров эксперимента, как температура или электромагнитные поля. В третьей главе обсуждается генерация спин-волновых токов в ферромагнитном изоляторе путем воздействия электромагнитными полями или ультразвуком на металлическую часть гибридной наноструктуры. Наконец, четвертая глава, самая интересная по физическим результатам, посвящена изучению влияния градиента температуры на магноны и фононы в ферромагнитном изоляторе, что приводит к их отклонению от состояния равновесия, к явлениям увлечения и соответствующей модификации спинового тока.

Принципиально новыми являются следующие результаты.

Во-первых, впервые (в главе 2 )методом НСО выведено кинетическое уравнение для средних значений спиновых токов гибридной наноструктуры "нормальный металл-ферромагнитный диэлектрик" с дополнительным учетом магнон-фононного взаимодействия в ферромагнитной части гибридной конструкции.

Во-вторых, в главе 3 предложена новая возможность генерации спинового тока в ферромагнитном диэлектрике за счет резонансного возбуждения электронов проводимости в металлической части гибридной наноструктуры и последующей инжекции спинов через интерфейс в диэлектрическую часть.

В-третьих, в четвертой главе получены кинетические уравнения для средних плотностей импульсов тепловых магнонов и высокоэнергетических когерентных магнонов, вза-

взаимодействующих между собой и с фононами ( модель трех взаимодействующих потоков возбуждений ), что позволило описать эффект магнон-фононного увлечения и немонотонную температурную зависимость спинового эффекта Зеебека.

В целом совокупности этих новых физических результатов вполне достаточно для квалификационной работы уровня кандидатской диссертации.

Если говорить о научной ценности представленных к защите исследований, то они интересны прежде всего тем, что показывают практические возможности метода НСО для получения уравнений неравновесной кинетики даже в таких сложных конструкциях как гибридные наноструктуры спинтроники.

Достоверность диссертационных результатов гарантируется использованием общепризнанных теоретических подходов к расчету кинетических явлений и тем, что в предельных упрощающих случаях диссертационные результаты переходят в ранее полученные результаты других независимых исследователей (например, в главе 3 при рассмотрении однородного в пространстве случая ).

Теперь приведем критические замечания по диссертации.

Во-первых, диссертация М.С.Окорокова обнажает некую общую проблему метода НСО - огромный замах, с претензией на всеобъемлемость, при выводе кинетических уравнений и относительно скромные физические результаты по сравнению с масштабом этого за-маха. В диссертации М.С.Окорокова это обстоятельство довольно хорошо проявляется в главе 4. Составлены мощные кинетические уравнения для трех потоков возбуждений ( тепловых магнонов, высокоэнергетических когерентных магнонов и фононов ) в гибридной наноструктуре "металл-ферромагнитный диэлектрик", однако эти уравнения решаются фактически не для гибридной наноструктуры с контактом через интерфейс, а сначала приводятся к уравнениям для изолированного ферромагнитного диэлектрика ( поскольку гамильтониан  $H_{me}$ , отражающий связь между диэлектрической и металлической частью гибридной наноструктуры, при таком переходе полностью отбрасывается - см. стр. 84 текста диссертации) и только потом эти упрощенные уравнения решаются. Кстати говоря, этот момент перехода в автореферате как-то опускается.

Во-вторых, удручает, что, хотя автор диссертации знаком с русскоязычной физической терминологией и знает такие физические понятия как накачка и крутящий момент, изредка упоминая их, тем не менее он усердно накачивает текст своей диссертации такими кальками с английского языка как пампинг и торк. Отчасти такое поведение было бы понятно, если бы диссертант был аборигеном одной из отсталых стран Британского Содружества наций и после обучения в одном из колледжей Оксбриджа вез назад в колонию языковую терминологию метрополии. Но зачем молодому российскому ученому выступать в роли малограмотного туземца? Мог бы, для примера, посмотреть великолепную монографию А.Г.Гуревича и Г.А.Мелкова "Магнитные колебания и волны", М., Физматлит, 1994, в значительной части которой описываются разные виды накачки спиновых волн без какого-либо использования термина "пампинг".

В-третьих, в тексте диссертации порой встречаются совершенно невразумительные изречения. Например, в описании модели на стр. 37, 5-ая строка сверху, возникает такой изумительный пассаж : "... и включающей локализованные магнитные моменты (магноны), равные постоянной Планка ...". Во-первых, локализованные магнитные моменты, измеряемые в магнетонах Бора, и магноны - кванты спиновых волн, измеряемые в энергетических единицах, не одно и то же. Во-вторых, каким это образом локализованный магнитный момент, имеющий размерность [эрг/гаусс], может равняться постоянной Планка, имеющей размерность [эрг.с] ?

И в общем, если первое из сделанных замечаний относится скорее к проблемам избранного метода исследований, чем к диссертанту, то языковая неряшливость при написании текста - это уже сугубо персональная вина.

Тем не менее, если оценивать диссертацию по полученным физическим результатам, следует признать, что с этой точки зрения она полностью отвечает квалификационным требованиям к диссертационным исследованиям кандидатского уровня. В ходе исследований продемонстрирована полезность и мощь метода неравновесного статистического оператора при выводе кинетических уравнений даже для сложных гетероструктур и получены новые красивые результаты по влиянию фононного увлечения на спиновый ток в ферромагнитном диэлектрике в модели трех потоков возбуждений. Исходные задачи исследования в основном выполнены.

Работа имеет хорошую апробацию - ее результаты были доложены на 7 всероссийских и международных конференциях и напечатаны в 7 ведущих рецензируемых научных журналах.

Диссертация М.С.Огорокова полностью отвечает паспорту специальности ВАК 01.04.11 "Физика магнитных явлений" в согласии с формулой специальности: "... область науки, занимающаяся изучением взаимодействий веществ и их структурных элементов (атомов, их ядер, молекул, ионов, электронов), обладающих магнитным моментом, между собой или с внешними магнитными полями; явлений, обусловленных этими взаимодействиями, а также разработкой материалов с заданными магнитными свойствами, приборов и устройств, базирующихся на использовании магнитных материалов и явлений" и формулировкой области исследований в пунктах: "1. Разработка теоретических моделей, объясняющих взаимосвязь магнитных свойств веществ с их электронной и атомной структурой, природу их магнитного состояния, характер атомной и доменной магнитных структур, изменений магнитного состояния магнитных свойств под влиянием различных внешних воздействий" и "4. Исследование явлений, связанных с взаимодействием различного рода электромагнитных излучений и потоков элементарных частиц с магнитными моментами вещества и его структурных составляющих: атомов, атомных ядер, электронов ( парамагнитный, ферромагнитный, ядерный магнитный, ядерный гамма резонансы и др.)

Результаты его диссертации будут безусловно полезны для таких признанных российских центров научного исследования спинтроники как Институт физики металлов имени М.Н.Михеева УрО РАН и Институт естественных наук и математики Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина (г. Екатеринбург), Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе РАН (г.Санкт-Петербург), Институт физики имени Л.В.Киренского СО РАН (г. Красноярск)

Сама диссертация построена вполне логично, и автореферат диссертации адекватно отражает ее содержание, причем написан более аккуратным языком, чем сама диссертация. Диссертант четко оговорил свой личный вклад в представленных к защите совместных научных публикациях.

Представленная диссертационная работа полностью соответствует требованиям, сформулированным в пункте 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г,

предъявляемым к кандидатским диссертациям, и поэтому ее автор О कोरोков Михаил Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 - физика магнитных явлений.

Я, Медведев Михаил Владимирович, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации О कोरोкова Михаила Сергеевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,

главный научный сотрудник лаб. теоретической физики

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института электрофизики Уральского отделения Российской Академии Наук,

доктор физико-математических наук

МЕДВЕДЕВ МИХАИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ

*М. В. Медведев*

620016, г.Екатеринбург, ул.Амундсена 106, ИЭФ УрО РАН, тел. (343)267-88-23,  
факс(343) 267-87-94 e-mail: medvedev@ier.uran.ru

16 ноября 2018 года

Подпись М.В.Медведева заверяю:

Ученый секретарь ФГБУН ИЭФ УрО РАН

к.ф.-м.н.



Е.Е.КОКОРИНА

*С отрывком отмашиной 20.11.2018*  
*М.В. Медведев*

## Сведения об официальном оппоненте

*ФИО:* Медведев Михаил Владимирович

*Ученая степень, звание:* доктор физ.-мат. наук, специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

*Полное наименование организации:* Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

*Занимаемая должность:* главный научный сотрудник лаборатории теоретической физики

*Почтовый адрес:* 620016 г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106, ИЭФ УрО РАН

*Телефон:* (343) 267-88-23

*E-mail:* medvedev@ier.uran.ru

### **Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация:**

1. П.А.Игошев, Е.Е.Кокорина, М.В.Медведев, И.А.Некрасов. Понижение температуры Кюри под давлением в  $Gd_2Fe_{17}$ : расчеты методом LSDA+U // ЖЭТФ.-2018-Т.154, №2(8).- С.398-406.
2. Kokorina E.E., Medvedev M.V. Inverse magnetocaloric effect in the uniaxial paramagnet with non-Kramers ions // Physics of Metals and Metallography. – 2017. – V. 118, № 3. – P. 217-226.
3. Kassin-Ogly F.A., Kokorina E.E., Medvedev M.V. Anisotropy of magnetocaloric effects in easy-axis antiferromagnets // The Physics of Metals and Metallography. – 2016. – V. 117, № 5. – P. 435-450.
4. Zarubin A.V., Kassin-Ogly F.A., Medvedev M.V., Proshkin A.I. Magnetocaloric effect and frustrations in one-dimensional magnets // Solid State Phenomena. – 2015. – V. 233-234 – P. 212-215.
5. Медведев М.В., Некрасов И.А. О влиянии величины обменного взаимодействия в “гантельной” позиции на температуру кюри в ромбоэдрической фазе  $Gd_2Fe_{17}$  // Физика металлов и металловедение. – 2015. – Т. 116. – С. 462.
6. Кассан-Оглы Ф.А., Кокорина Е.Е., Медведев М.В. Особенности магнитокалорического эффекта в изотропном антиферромагнетике // Физика металлов и металловедение. – 2014. – Т. 115. – С. 343.
7. Kassin-Ogly F.A., Kokorina E.E., Medvedev M.V. Peculiarities of the magnetocaloric effect in an isotropic antiferromagnet // Solid State Phenomena. – 2014. – V. 215. – P. 66-70.

8. Kokorina E.E., Medvedev M.V. Magnetization and magnetic entropy change of a three-dimensional isotropic ferromagnet near the Curie temperature in the random phase approximation // Physica B: Condensed Matter. – 2013. – V. 416. – P. 29-32.

9. Кассан-Оглы Ф.А., Медведев М.В., Прошкин А.И., Зарубин А.В. Магнитокалорический эффект в одномерных магнетиках. Известия РАН. Сер. физ. – 2013. – Т. 77. – С. 1449–1451.

Ученый секретарь  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института электрофизики УрО РАН,  
кандидат физ.-мат.наук

КОКОРИНА Е.Е. .

« 16 » ноября 2018 г.

