



«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор Московского
Государственного Университета
имени М.В. Ломоносова,

А. А. Федянин
 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – ~~Федерального государственного~~ государственного бюджетного образовательного учреждения ~~высшего~~ образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на диссертационную работу Огорокова Михаила Сергеевича «Спин-термические эффекты в гибридных наноструктурах металл (полупроводник)/ферромагнитный диэлектрик, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений

Актуальность темы диссертации. Поиск новых эффективных способов создания спиновых токов и управления ими является центральной задачей спинтроники. Открытие спинового эффекта Зеебека, а затем и других спиновых эффектов, возникающих под действием градиентов температуры, явилось основой нового направления в спинтронике, названного спин-калоритроникой. Эти эффекты открывают новые возможности генерации спинового тока, что имеет самостоятельное научное значение, также они важны и для построения разнообразных спинтронных и логических устройств. Надо сказать, что базовые принципы спин-калоритроники разработаны явно недостаточно, и более того, до появления работ Огорокова М.С. не существовало и универсальной теории, позволяющей с единых позиций описать возникающие спиновые эффекты в наиболее перспективных гибридных структурах металл/ферромагнитный диэлектрик. В этих структурах спиновый ток определяется динамикой магнонов, так что тематика работы Огорокова М.С. находится на пересечении магноники и спин-калоритроники, наиболее важных и актуальных ветвей спинтроники.

Общая характеристика диссертационной работы. В работе на базе квантового метода неравновесного статистического оператора развита общая линейная микроскопическая теория спин-термических эффектов в гибридных структурах, рассмотрен резонансный метод возбуждения спиноволнового тока за счет резонансного возбуждения электронов проводимости, предложена и развита модель “трех потоков” для объяснения особенностей эффектов магнон-фононного увлечения в гибридных структурах.

Введение носит обзорный характер. В нем рассмотрены основные эффекты спинтроники и вводятся основные понятия. Первая глава целиком посвящена описанию метода неравновесного статистического оператора. Во второй главе на основе этого метода, а точнее его линеаризованной формы, создана теория спиновых эффектов в системе металл/ферромагнитный диэлектрик, то есть для прототипа базовой структуры Pt/YIG. Рассматривается идеальный интерфейс между металлом и диэлектриком, через который и возбуждается спин-волновой ток за счет рассеяния спин-поляризованных электронов на магнонах. Важным моментом теории является введение двух температур (спиновой и кинетической) как для электронов, так и магнонов. Достоинством полученных систем уравнений является то, что они с единых позиций позволяют анализировать спин-пампинг, спин-торк, спиновую диффузию и спин-термические эффекты. Также в этой главе получены и общие выражения для всех характерных времен релаксации в этой гибридной системе. В третьей главе тот же метод неравновесного статистического оператора используется для анализа генерации спинового тока за счет резонансного воздействия на электроны проводимости гибридной структуры полупроводник/ферромагнитный диэлектрик. Идея данного метода генерации спинового тока основана на комбинированном резонансе Рашбы. Наконец, в четвертой главе проводится анализ спин-волнового тока в условиях спинового эффекта Зеебека, когда имеют место эффекты увлечения и формируются в магнонной системе два разных по энергиям типа магнонов.

В целом данная теоретическая работа производит хорошее впечатление. Привлечение метода неравновесного статистического оператора к спин-калоритронике можно считать важным методическим достижением. Изложение материала последовательно и достаточно полно.

Научная новизна. К наиболее интересным и важным результатам работы можно отнести следующие:

1. На основе метода неравновесного статистического оператора построена теория спин-волновых токов в гибридной наноструктуре металл/ферромагнитный диэлектрик при наличии температурных градиентов. Полученная система уравнений дает описание возможных эффектов и выявляет все основные факторы, определяющие величину и направление спиновых токов через интерфейс.

2. Получены общие выражения в виде корреляционных функций для частот релаксации в гибридной системе, обусловленные различными взаимодействиями между подсистемами (электроны, магноны, фононы).

3. Предложен метод резонансного возбуждения спин-волнового тока в гибридной наноструктуре за счет комбинированного резонанса Рашбы. Выполненный теоретический анализ показал, что возникающий при таком воздействии спиновый ток также имеет резонансный характер, то есть,

линейно зависит от поглощенной мощности. При этом резонансное возбуждение спинового тока возможно не только электромагнитным излучением, но и звуковыми волнами.

4. Применительно к задаче о влиянии магнон-фононного увлечения на спиновый эффект Зеемана построена модель трех потоков, существенным моментом которой является предположение о наличии двух типов магнонов – быстрых и медленных. В частности, показано, что дополнительный поток быстрых магнонов может как увеличивать, так и уменьшать время жизни спинового тока в зависимости от отношения параметров модели.

Достоверность полученных результатов. Достоверность результатов обеспечивается использованием хорошо апробированных современных методов статистической физики, детально описанным выводом всех полученных выражений, их детальным анализом

Практическая значимость результатов исследований, изложенных в диссертации, заключается, прежде всего, в возможности их использовании для объяснения экспериментальных данных относительно спин-термических эффектов. Практическую значимость для магноники имеет и предложенный метод резонансного возбуждения спин-волнового тока. Методические достижения соискателя и созданная модель трех потоков могут быть включены в спецкурсы по спинтронике

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Результаты работы могут быть также перспективны для использования при конструировании устройств спинтроники, основанных на генерации спиновых токов, а также для разработки магнитных логических устройств. Поэтому результаты работы можно рекомендовать для ознакомления и использования в МГУ им. М.В.Ломоносова (г. Москва), Санкт-Петербургском, Уральском, Новосибирском и Тверском университетах, Воронежском техническом университете, МИРЭА, Институте физики твердого тела РАН РФ (п. Черноголовка Московская обл.), ФТИ РАН РФ им. Иоффе (г. С-Петербург), Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН (г. Красноярск) и др.

По диссертации имеются следующие замечания.

1. Диссертация не содержит обзора по именно теории спин-калоритроники, не приводятся экспериментальные данные по спиновому эффекту Зеебека и другим спин-термическим эффектам. Не обсуждаются и недостатки альтернативных подходов к описанию термического воздействия в статистической физике, предложенные еще более 50 лет назад (Кубо, Латтингер), что не позволяет судить и о преимуществах метода неравновесного статистического оператора, кроме его универсальности.
2. На протяжении всей диссертации не делается никаких количественных оценок, а автор ограничивается только общими выражениями. Без таких оценок, хотя бы для характерных времен релаксации, трудно сопоставить

выводы теории с экспериментом. Также следовало бы оценить эффективность предложенного метода генерации спин-волнового тока по сравнению с другими способами.

3. В модели трех потоков принципиальным является наличие двух подсистем магнонов. О существовании магнонов с разной энергией известно давно ([108] – в диссертации, 1983 г). Но две различные подсистемы, да еще с энергетической щелью, имеет смысл вводить только на характерных временах, меньших времен релаксации между этими подсистемами. В то же время, этот вопрос не обсуждается и параметр релаксации между быстрыми и медленными магнонами не вводится.

4. В оформлении диссертации допущено много погрешностей. Литературный обзор написан на 13 страницах введения и не содержит, фактически, анализа достоинств и недостатков опубликованных работ. Положения диссертации сформулированы в виде результатов, выносимых на защиту. Используются неверные термины, как например, «косое рассеяние» для механизма аномального эффекта Холла, вместо «асимметричного рассеяния», или жаргон, как, например, “спиновое напряжение”. Нет ссылок на источники рисунков во введении, и, более того, они черно-белые, хотя в тексте говорится о цвете линий (рис.3). Ряд ссылок перепутаны, так, ссылки [142] и [117] тождественны, но даны на разных языках, в работе Смита [65] ни слова не говорится о механизме бокового смещения (стр.8), а ссылка на уравнение Ландау-Лифшица дается, почему-то, на книгу Маекавы [1]. Не выдерживает критики качество оригинального рисунка 4.5 (Рисунок 3 в автореферате).

Указанные замечания не носят принципиальный характер и не снижают общей высокой оценки работы.

Автореферат полно и точно отражает содержание диссертации, новые научные результаты, выносимые на защиту, и выводы.

Результаты работы опубликованы в высокорейтинговых журналах и неоднократно докладывались на престижных конференциях.

Подводя итог, можно заключить, что диссертация М.С. Огорокова является законченной научно-квалификационной работой, результаты которой имеют существенное значение для развития отечественной и мировой науки. По объему выполненных исследований, их актуальности и научному уровню диссертационная работа отвечает всем требованиям (п. II. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.) к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а Огороков Михаил Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 - Физика магнитных явлений.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на заседании кафедры магнетизма Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (протокол № 16 от 15 октября 2018 года).

Зав. кафедрой магнетизма,
профессор



Перов Николай Сергеевич

Профессор



Грановский Александр Борисович

119991, г. Москва, ГСП-1 Ленинские горы, МГУ, д.1, стр.2,
физический факультет, кафедра магнетизма
тел.: (495)939-18,487
E-mail: kaf-magn@physics.msu.ru
web:<http://magn.ru>

С отзывом ознакомлен 19.11.2018
Високов М.С.

Сведения о ведущей организации по диссертации Окорочова 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.

Организация:

Полное название: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Сокращённое название: Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Контактные данные:

Юридический адрес: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

Телефон: (495) 939-10-00 Факс: (495) 939-01-26

Адрес официального сайта в сети Интернет: <http://www.msu.ru>

Адрес электронной почты: info@rector.msu.ru

Ректор:

академик Виктор Антонович Садовничий

Список научных трудов работников организации по специальности диссертации за 2014-2018 годы:

[1] T. Andrianov, A. Vedyayev, and B. Dieny, “Magnetic modulation of inverse spin hall effect in lateral spin-valves,” *Journal of Physics D*, vol. 51, no. 20, p. 205003, 2018.

[2] T. Andrianov and A. Vedyayev, “Numerical simulation of spin transport in systems with complex geometry,” *EPJ Web of Conferences*, vol. 185, no. 01021, 2018.

[3] A. Vedyayev, N. Ryzhanova, N. Strelkov, M. Titova, M. Chshiev, B. Rodmacq, S. Auffret, L. Cuchet, L. Nistor, Dieny, and B., “Influence of spin-orbit interaction within the insulating barrier on the electron transport in magnetic tunnel junctions,” *Physical Review B*, vol. 95, pp. 064420–1–064420–6, 2017.

[4] M. Y. Zhuravlev, A. V. Vedyayev, M. S. Titova, N. V. Ryzhanova, and D. Gusakova, “Surface current at non-magnetic metal/ferromagnetic insulator interface due to rashba spin-orbit interaction,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 441, pp. 572–577, 2017.

[5] Т. А. Андрианов and А. В. Ведяев, “Спиновый транспорт в латеральной спин-вентильной наноструктуре с учетом спинового эффекта Холла. Нанопизика и наноэлектроника,” in *Материалы XX Международного симпозиума. 14-18 марта 2016г. Нижний Новгород*, pp. 151–152, издательство Нижегородского госуниверситета им.Н.И.Лобачевского Нижний Новгород, 2016.

[6] M. Chshiev, A. Manchon, A. Kalitsov, N. Ryzhanova, A. Vedyayev, N. Strelkov, W. H. Butler, and B. Dieny, “Analytical description of ballistic spin currents and torques in magnetic tunnel junctions,” *Physical Review B*, vol. 92, no. 10, p. 104422, 2015.

[7] V. Anatoly, Z. Mikhail, T. Maria, G. Daria, and R. Natalia, “Hall effect induced by spin-wave excitation in metal/ferromagnetic insulator bilayer,” *Solid State Phenomena*, vol. 233, pp. 395–398, 2015.

[8] I. D. Rodionov, I. S. Dubenko, V. N. Prudnikov, A. B. Granovsky, I. S. Titov, and A. M. Saletsky, “Double magnetocaloric peak feature observed in quaternary ni-mn-in based heusler alloys,” *EPJ Web of Conferences*, vol. 185, p. 05003, 2018.

- [9] K. Yury, P. Sudip, Q. Abdiel, A. Anil, D. Igor, C. Jacek, D. Elvina, G. Alexander, L. Erkki, S. Shane, and A. Naushad, "Kinetic effects in the magnetic and magnetocaloric properties of metamagnetic $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{35}\text{In}_{14.25}\text{B}_{0.75}$," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 459, pp. 98–101, 2018.
- [10] V. V. Ryl'kov, S. N. Nikolaev, V. A. Demin, A. V. Emel'yanov, A. V. Sitnikov, K. E. Nikirui, V. A. Levanov, M. Y. Presnyakov, A. N. Taldenkov, A. L. Vasil'ev, K. Y. Chernoglazov, A. S. Vedeneev, Y. E. Kalinin, A. B. Granovskii, V. V. Tugushev, and A. S. Bugaev, "Transport, magnetic, and memristive properties of a nanogranular $(\text{CoFeB})_x(\text{Linbo})_{100-x}$ composite material," *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, vol. 126, pp. 353–368, 2018.
- [11] В. В. Рыльков, С. Н. Николаев, В. А. Демин, А. В. Емельянов, А. В. Ситников, К. Э. Никируй, В. А. Леванов, М. Ю. Пресняков, А. Н. Талденков, А. Л. Васильев, К. Ю. Черноглазов, А. С. Веденеев, Ю. Е. Калинин, А. Б. Грановский, В. В. Тугушев, and А. С. Бугаев, "Транспортные, магнитные и мемристивные свойства наногранулированного композита $(\text{CoFeB})_x(\text{Linbo})_{100-x}$," *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, vol. 153, no. 3, pp. 424–441, 2018.
- [12] P. Sudip, Q. Abdiel, A. Anil, A. U. Saleheen, R. Igor, B. Mikhail, P. Mariya, D. Igor, P. Valerii, M. Dipanjan, G. Alexander, S. Shane, and A. Naushad, "Effects of the partial substitution of Ni by Cr on the transport, magnetic, and magnetocaloric properties of $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{37}\text{In}_{13}$," *AIP advances*, vol. 7, p. 056433, 2017.
- [13] P. Supid, Q. Abdiel, A. Anil, I. S. Dubenko, B. Mikhail, R. Igor, P. Valerii, M. Dipanjan, A. B. Granovsky, S. Shane, and A. Naushad, "Giant field-induced adiabatic temperature changes in In-based off-stoichiometric Heusler alloys," *Journal of Applied Physics*, vol. 121, no. 133901, p. 133901, 2017.
- [14] K. Naoki, G. Taichi, S. Koji, A. B. Granovsky, C. A. Ross, T. Hiroyuki, N. Yuichi, U. Hironaga, and I. Mitsuteru, "The role of Snell's law for a magnonic majority gate," *Scientific reports*, vol. 7, p. 7898, 2017.
- [15] С. Н. Николаев, К. Ю. Черноглазов, В. А. Демин, Н. К. Чумаков, В. А. Леванов, А. А. Магомедова, А. В. Ситников, Ю. Е. Кинин, А. Б. Грановский, and В. В. Рыльков, "Проводимость и аномальный эффект Холла пленочных магнитных нанокompозитов на основе нестехиометрических оксидов," *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, no. 5, pp. 76–81, 2017.
- [16] H. S. Al'Azzavi, A. B. Granovskii, Y. E. Kalinin, V. A. Makagonov, A. V. Sitnikov, and O. S. Tarasova, "Influence of oxidized interlayers on magnetic properties of multilayer films based on amorphous, ferromagnet-dielectric nanocomposites," *Physics of the Solid State*, vol. 58, no. 5, pp. 9–12, 2016.

Проректор
 Московского государственного
 университета имени М.В.Ломоносова
 профессор

Зав.кафедрой магнетизма
 д.ф.-м.н. профессор

 Н.С.Перов