

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Андрианова Тимофея Андреевича «Спиновый транспорт в магнитных многослойных наноструктурах сложной конфигурации», представляемую к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

**Актуальность темы.** Исследование спинового транспорта в многослойных структурах обусловлено, прежде всего, теми преимуществами, которые дает использование спиновых степеней свободы в устройствах микроэлектроники. В частности, к таким преимуществам относятся быстроедействие, большая емкость элементов памяти, возможность объединения с полупроводниковыми устройствами. В диссертационной работе Т. А. Андрианова представлено модельное исследование спинового транспорта в структурах сложной геометрии, в том числе, в T-образных структурах и структурах с проводящими наноканалами. Использование структур сложной геометрии повышает функциональность устройств, в частности, дает возможность управления спиновыми степенями свободы. Таким образом, исследования, представленные в диссертационной работе Т.А. Андрианова, несомненно, **являются актуальными.**

### **Достоверность и обоснованность результатов исследования.**

Для анализа спинового транспорта в многослойных структурах автор использовал общепринятые спин-диффузионные теории зарядового и спинового токов. Значительная часть расчетов выполнена аналитически, что облегчает качественный анализ полученных результатов. Достоверность и обоснованность результатов расчетов не вызывают сомнений. Также, несомненно, являются достоверными рекомендации, касающиеся возможных использований структур, рассмотренных в диссертации, в том числе,

касающиеся создания считывающей головки жесткого диска и датчика магнитного поля, основанных на рассмотренных в диссертации структурах.

### **Оценка содержания диссертации.**

Диссертационная работа Т.А. Андрианова состоит из Литературного обзора (Гл. 1), последующих четырёх глав, основных результатов и выводов, списка работ автора, списка обозначений, списка литературы и двух приложений, посвященных деталям аналитических расчетов, использовавшихся для анализа спинового транспорта и напряжения в рассмотренных латеральных структурах.

**В первой главе** представлен литературный обзор работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям зарядового и спинового транспорта в многослойных структурах. Также в первой главе кратко рассмотрены основные механизмы спинового эффекта Холла. Показан ряд применений латеральных структур сложной геометрии в устройствах, предназначенных для детектирования спиновой аккумуляции.

**Вторая глава** диссертации посвящена аналитическому исследованию характеристик спинового транспорта в Т-образной спин-вентильной структуре. Рассчитаны распределение спиновой аккумуляции в системе и падение напряжения. Показано, что падение напряжения существенно зависит от ширины спинового канала. При этом разность падений напряжения для параллельной и антипараллельной ориентаций намагниченности электродов становится более заметной с уменьшением ширины спинового канала. В этой главе автор представил аналитическое решение сложной двумерной задачи, полученные результаты позволили предложить принципиальную схему сенсора магнитного поля, основанного на измерении падения электрического напряжения в системе для разной взаимной ориентации магнитных электродов многослойной Т-образной структуры с узким спиновым каналом.

**Третья глава** посвящена исследованию спинового транспорта в такой же Т-образной структуре, которая исследовалась в предыдущей главе, но с

учетом спинового эффекта Холла. Использование численных расчетов позволило проанализировать реалистическую трехмерную систему. В этой главе рассчитаны угловая зависимость холловского напряжения от направления намагниченности ферромагнетика-анализатора.

**В четвертой главе** проведен численный расчет спинового вращающего момента, наведённого спиновым эффектом Холла в двухслойной структуре CuPt/Fe, помещенной между немагнитными электродами. Слой CuPt является источником сильного спинового эффекта Холла. Спиновый ток в данной структуре возникает за счет одновременного действия двух механизмов – спинового эффекта Холла в слое CuPt, и за счет спиновой поляризации, создаваемой ферромагнитным слоем. Используемая автором модель учитывает оба механизма. Обоснованная линеаризация основных уравнений модели позволила численно рассчитать спиновый вращающий момент, наводящийся в ферромагнетике при прохождении тока. Выполненный анализ позволил сделать вывод о том, что наведенный спиновый вращающий момент может привести к перемагничиванию ферромагнитного слоя, что согласуется с проведенными ранее экспериментальными работами.

**Пятая глава** посвящена исследованию спинового транспорта в спин-вентильной системе с проводящими наноканалами.

Все полученные результаты являются **новыми** и имеют несомненное прикладное значение. Особо хотелось бы отметить следующие результаты.

1) Выполненное в четвертой главе исследование позволило описать важный механизм перемагничивания ферромагнитного слоя в трехслойной композитной системе. В решении задачи о прохождении тока через такую систему было учтено наличие двух одновременно действующих механизмов спинового вращающего момента. Решенная задача представляется сложной с математической точки зрения.

- 2) Также хотелось бы отметить выполненное в пятой главе сравнение моделей Леви-Ферта и Вайнталя, использованных для расчета спинового транспорта в спин-вентильной структуре, имеющей проводящие наноканалы в диэлектрическом разделительном слое.

Несмотря на достаточно большой объем информации, включенной в диссертацию, хорошо проработанный текст с большим количеством иллюстраций, имеется ряд замечаний.

1) В литературном обзоре (Гл. 1) автор немало места уделяет зарядовому транспорту в многослойных системах, что является несомненным достоинством работы, так как теоретическое исследование зарядового транспорта предшествовало исследованию спинового транспорта. Последнее использовало ряд приемов, найденных при исследовании зарядового транспорта. В связи с этим в список литературы могли бы быть включены основные обзоры, посвященные зарядовому транспорту, а также упомянуты работы, в которых исследовался зарядовый транспорт в T-образных структурах.

2) Во второй главе, так же, как и в Приложении не приводятся формулы, связывающие спин-диффузионную длину с параметрами системы уравнений, которую решает автор. Между тем, спин-диффузионная длина входит в решение уравнений, представленное автором.

3) В работе имеются опечатки и неточности стилистического характера.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений» (пп. 1 и 3 паспорта специальности), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в

Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Андрианов Тимофей Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры проблем конвергенции естественных и гуманитарных наук факультета свободных искусств и наук федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Журавлев Михаил Евгеньевич

Контактные данные:

тел.: 7 (812)-320-07-29, e-mail: m.zhuravlev@spbu.ru

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

Адрес места работы:

199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная 7-9,

Санкт-Петербургский государственный университет,

Факультет свободных искусств и наук, кафедра проблем конвергенции естественных и гуманитарных наук

Подпись сотрудника

Санкт-Петербургского государственного университета

М.Е. Журавлева удостоверяю: