

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Пашенькина Игоря Юрьевича «Эффекты обменного и спин-орбитального взаимодействия в немагнитных прослойках ферромагнитных наноструктур», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Диссертация И. Ю. Пашенькина посвящена исследованию обменных и спин-орбитальных эффектов в слоистых структурах типа ферромагнетик/диэлектрик/ферромагнетик и ферромагнетик/парамагнетик/ферромагнетик. Интерес к первым обусловлен потенциальной возможностью управления величиной межслоевого обменного взаимодействия с помощью электрического поля, ко вторым – наличием обменного взаимодействия на границах ферромагнитного и парамагнитного слоев. Вышеуказанные обстоятельства определяют **актуальность диссертационной работы И. Ю. Пашенькина**

В работе получено большое количество новых результатов. Из числа результатов, **определяющих научную новизну работы**, хотелось бы выделить следующие:

- предложен новый метод управления магнитным состоянием туннельного магнитного контакта путем приложения электрического поля, позволяющий изменять сопротивление на 50% при относительно малой для спинтроники плотности тока  $10^4$  А/см<sup>2</sup>;
- исследования нового эффекта, заключающегося в возникновении холловской разности потенциалов при протекании спин-поляризованного электрического тока через туннельный контакт;
- в диссертации приведены оригинальные результаты исследования магнитных и магнитокалорических свойств многослойных систем типа FM/PM/FM.

Результаты исследований, проведенных И. Ю. Пашенькиным, представляют несомненный **практический интерес** в контексте развития энергосберегающей спиновой электроники четвертого поколения, в которой управление магниторезистивными свойствами осуществляется воздействием электрического поля, путем приложения напряжения к затвору, как в полевых транзисторах. Результаты работы могут быть использованы в организациях, в которых проводятся теоретические и экспериментальные исследования магнитных и транспортных свойств многослойных магнитных наноструктур.

Диссертация состоит из Введения, четырех Глав и Заключения. Общий объем диссертации составляет 125 страниц, включая 51 рисунок и 1 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 140 наименований.

Структура диссертации отличается от традиционной: в первой главе, в которой содержится весьма информативный обзор литературы, приведены сведения об оригинальной методике создания туннельных магнитных контактов с аморфным барьером  $Al_2O_3$  и текстурированным барьером  $MgO$  (001), разработанной с участием автора диссертации. В последующих же главах содержатся элементы литературного обзора, что, впрочем, не умаляет их оригинальности: во второй главе вводится новый магнитоэлектрический эффект, в третьей – новый поперечный транспортный эффект, в четвертой – приоритетные результаты по обменному усилению магнитокалорического эффекта.

Достоверность полученных И.Ю. Пашенькиным результатов не вызывает сомнений и определяется адекватным выбором используемых подходов, а также применением современного научного оборудования, подтверждается результатами других научных групп.

Научные результаты, составляющие основу диссертации, опубликованы в авторитетных российских и международных научных журналах, среди которых ЖЭТФ, PhysRevB, J. Appl, Phys и многократно докладывались на международных научных конференциях.

Вместе с тем, при общей высокой оценке диссертационной работы следует отметить ряд замечаний:

1. Замечание по структуре: для лучшего восприятия содержания было бы полезно привести список аббревиатур и обозначений.
2. Терминологические неточности: с. 6 термин «слабый ферромагнетик» используется в отношении вещества, температура Кюри которого оказывается в области температуры измерений, в то время как под слабым ферромагнетиком обычно имеется в виду неколлинеарный антиферромагнетик; с.70 обратный спиновый эффект Холла интерпретируется как прямой спиновый эффект Холла, только при протекании поляризованного по спине тока (рис. 3.1 б), что не вполне соответствует общепринятому определению как поперечной разности потенциалов, возникающей в среде с неоднородной спиновой плотностью (БРЭ), т.е. зарядовый транспорт не является необходимым условием возникновения обратного спинового эффекта Холла.
3. На рис.2.4 следовало бы в явном виде пояснить, что значат черные и серые контуры в графиках для плотностей состояний. О том, что они соответствуют подзонам с одинаковым направлением спина, можно догадаться только по косвенным указаниям в тексте, а это может привести к путанице при анализе двух случаев туннелирования: без переворота и с переворотом спина.
4. с. 62 Приведенная величина температурного коэффициента (меньше  $100 \text{ К мкм}^2/(\text{мВт})$ ) нуждается в пояснении, поскольку при наличии тепловыделения с квадратного сантиметра порядка  $1 \text{ кВт}$  (как, например, в центральном процессорном устройстве) при таком температурном коэффициенте нагрев будет меньше  $1 \text{ К}$ , во что трудно поверить.
5. Работа не свободна от опечаток, впрочем, немногочисленных: с. 46 «завит от» вместо «зависит от»; с. 60 «ссопротивлением», с.63 «импульса напряжение» вместо «импульса напряжения».

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и выводов. Автореферат и опубликованные работы отражают содержание диссертации. В целом диссертация И. Ю. Пашенькина удовлетворяет всем критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней, а сам автор безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — Физика конденсированного состояния.

### Официальный оппонент

профессор кафедры физики колебаний физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова,  
доктор физ.-мат. наук

Адрес: 119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д.1, стр.2

Тел.: +7-495-939-41-38

E-mail: pyatakov@physics.msu.ru

«7» февраля 2025 года



Александр Павлович Пятаков

(подпись)

Согласен на обработку персональных данных.

«7» февраля 2025 года



Александр Павлович Пятаков

(подпись)

Подпись А.П. Пятакова заверяю

«7» февраля 2025 года

уч. секретарь физ. факт-та МГУ

Стремоухов Сергей Юрьевич

