

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.

Актуальность темы диссертации. Диссертация И. Ю. Пашенькина посвящена исследованию обменных и спин-орбитальных эффектов в немагнитных прослойках ферромагнитных наноструктур. Эффекты обменного и спин-орбитального взаимодействия, наблюдающиеся в многослойных магнитных наноструктурах, лежат в основе функционирования большинства устройств спиновой электроники, среди которых можно выделить датчики магнитного поля, магниторезистивную память, генераторы излучения с частотами от сотен мегагерц до единиц терагерц. Одним из направлений проведенных исследований касается вопросов создания туннельных контактов с высокими значениями туннельного магнетосопротивления и изучения возможности изменения межслоевого обменного взаимодействия с помощью электрического напряжения, приложенного к барьеру туннельного контакта. Перспективной целью таких исследований является разработка подходов, позволяющих переключать магнитное состояние туннельных контактов электрическим полем, что способствует повышению эффективности магниторезистивной памяти с произвольным доступом. В таких исследованиях перспективным является подход, учитывающий особенности спин-орбитального взаимодействия в наноструктурах на основе слоев ферромагнетиков с немагнитными материалами. С помощью инжекции электронов проводимости из слоя тяжелого металла, обладающего большой константой спин-орбитального взаимодействия, в слой магнитного материала можно изменить его магнитное состояние, что также дает возможность управления резистивными характеристиками наноструктуры. Данным вопросам уделено значительное внимание в диссертационной работе. Эффект обменной магнитной близости, возникающий при контакте ферромагнетика с парамагнетиком или ферромагнетиком с относительно низкой температурой Кюри может приводить к наведению в парамагнитном слое намагниченности. Это может быть использовано для усиления магнитокалорического эффекта в многослойных системах, что представляет интерес для разработки холодильных устройств на основе

магнитокалорического эффекта. Экспериментальное исследование возможности обменного усиления магнитокалорической эффективности в слоистых наноструктурах также является одним из направлений проведенных исследований.

Каждое из направлений исследований в диссертационной работе имеет составляющую, связанную с важными для практических задач вопросами. В настоящее время таким вопросам уделяется большое внимание, что подчеркивает **актуальность** проведенных в рамках диссертационной работы исследований.

Структура и содержание работы. 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.

В первой главе освещаются технологические аспекты изготовления многослойных наноструктур, исследованных в диссертации. Приводятся теоретические основы туннельного магнетосопротивления, а также, так называемого, гигантского туннельного магнетосопротивления в эпитаксиальных структурах $\text{Fe}(001)/\text{MgO}(001)/\text{Fe}(001)$. Описана отработанная технология изготовления туннельных магнитных контактов $\text{CoFeV}/\text{MgO}/\text{CoFeV}$ с магнетосопротивлением до 200 % при комнатной температуре. Показано, что в зависимости от геометрии контакта и материала свободного слоя в нем реализуются различные распределения намагниченности. Вторая глава посвящена изучению нового магнитоэлектрического эффекта в туннельных магнитных контактах $\text{CoFeV}/\text{MgO}/\text{CoFeV}$. Эффект заключается в сдвиге кривой намагничивания свободного слоя по магнитному полю при приложении к диэлектрической прослойке электрического напряжения. В работе приводится необходимая аргументация обоснованности предложенного механизма наблюдаемого эффекта. Продемонстрировано переключение резистивного состояния туннельного магнитного контакта короткими (100 нс) импульсами электрического напряжения величиной 2 В. При этом было обнаружено значительное изменение сопротивления контакта при использовании относительно малой плотности тока, которая на 2 – 3 порядка меньше величины, необходимой для переключения за счет эффекта передачи спинового момента. Обсуждается вариант ячейки магнитной памяти на основе двухбарьерного туннельного магнитного контакта с биполярным переключением состояния за счет эффекта электрического управления межслоевым обменным взаимодействием. В главе 3 анализируются вопросы, связанные с особенностями спинового эффекта Холла в системах «тяжелый

металл – ферромагнитный металл». Обсуждаются результаты исследования нового поперечного транспортного эффекта, обнаруженного в туннельных контактах $\text{CoFeB/MgO/(Pt, Ta)}$. Эффект заключается в квадратичной зависимости холловской разности потенциалов на немагнитном электроде от напряжения, приложенного к диэлектрической прослойке туннельного контакта, и обусловлен спин-орбитальным взаимодействием туннелирующих электронов с внешним электрическим полем, приложенным к барьеру. Квадратичная по амплитуде холловская разность потенциалов также обнаружена при приложении к туннельному контакту переменного напряжения с частотой 10 кГц. Глава 4 посвящена экспериментальному исследованию обменного усиления магнитокалорического эффекта в тонких слоях «слабого» ферромагнетика, помещенных между слоями «сильных» ферромагнетиков, в многослойных наноструктурах типа FM/PM/FM. Изучение магнитокалорических свойств рассматриваемых в работе систем проводилось по магнитометрическим измерениям при различных температурах с использованием соотношения Максвелла. Показана возможность многократного увеличения магнитокалорической эффективности прослоек в составе многослойных наноструктур в сравнении с эффективностью для отдельных слоев подобных материалов.

Научная новизна полученных результатов. В работе получены следующие наиболее важные экспериментальные результаты, обладающие научной новизной.

1. Отработана технология изготовления туннельных магнитных контактов CoFeB/MgO/CoFeB микронного и субмикронного размера с эффектом туннельного магнетосопротивления 200 % при комнатной температуре.

2. Созданы туннельные контакты, позволяющие исследовать влияние электрического напряжения, подаваемого на диэлектрическую прослойку, на их магниторезистивные характеристики. При приложении к прослойке постоянного электрического напряжения величиной 1 В обнаружен сдвиг по магнитному полю кривой намагничивания свободного слоя на 6–10 Э. При подаче коротких импульсов длительностью 100 нс и амплитудой 2 В обнаружено значительное изменение сопротивления контакта на десятки процентов относительно значения, измеренного в том же магнитном поле 10 Э, но без подачи импульсов напряжения.

3. Обнаружена квадратичная зависимость холловской разности потенциалов на немагнитном электроде от постоянного и переменного (10 кГц) напряжения, приложенного к диэлектрической прослойке туннельного

контакта CoFeB/MgO/(Ta, Pt). Показано, что величина холловского сигнала не зависит от материала немагнитного слоя.

4. Экспериментально обнаружено усиление магнитокалорического эффекта в прослойках «слабых» ферромагнетиков NiCu и Gd, помещенных между ферромагнитными слоями в многослойных наноструктурах типа FM/PM/FM. По оценкам, проведенным на основе данных магнитных измерений с использованием соотношения Максвелла, магнитокалорическая эффективность прослоек в составе исследованных вариантов наноструктур увеличивается в 5–7 раз по отношению к эффективности отдельных пленок NiCu и Gd аналогичной толщины.

Достоверность результатов, полученных И. Ю. Пашенькиным, определяется использованием современного научного оборудования, а также грамотным подходом к решению научных задач. Положения диссертационной работы всесторонне обоснованы и не противоречат экспериментальным результатам и теоретическим моделям других научных групп. Научные результаты диссертации опубликованы в 11 реферируемых зарубежных и отечественных журналах и доложены на 11 международных конференциях.

Результаты, полученные И. Ю. Пашенькиным, имеют существенную **практическую значимость**. В частности, отработанная технология изготовления туннельных магнитных контактов CoFeB/MgO/CoFeB с магнетосопротивлением до 200 % может послужить основой для разработки высокочувствительных датчиков магнитного поля. Обнаруженный эффект зависимости межслоевого обменного взаимодействия от электрического напряжения, приложенного к барьеру туннельного магнитного контакта, может быть использован для повышения энергоэффективности магниторезистивной памяти с произвольным доступом. Новый поперечный транспортный эффект в туннельных контактах, обусловленный спин-орбитальным рассеянием туннелирующих электронов на внешнем электрическом поле, интересен как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Эффект обменного усиления магнитокалорической эффективности может быть полезен при разработке систем магнитного охлаждения.

К замечаниям по диссертационной работе можно отнести следующее.

1. Для получения высокого туннельного магнетосопротивления цепочки туннельных магнитных контактов использовался их отжиг при температуре 330 °С в течение 2 часов, после которого наблюдалось уменьшение обменного сдвига закрепленного слоя (стр. 48). Указано, что уменьшение обменного сдвига может быть обусловлено нарушением

качества границы CoFeB/IrMn из-за диффузии атомов Mn из антиферромагнитного слоя IrMn. Используемая температура отжига превышает температуру блокировки для антиферромагнетика IrMn. Если отжиг проводился без приложения внешнего магнитного поля, то уменьшение обменного сдвига может быть также обусловлено изменением магнитного порядка на границе. Об отжиге туннельных контактов без информации о приложении магнитного поля также указано на стр. 74. Является ли использованная температура отжига оптимальной?

2. Отсутствие в структурах Ni₈₀Fe₂₀(10)/Gd(5)/Co₉₀Fe₁₀(7)/Ir₂₀Mn₈₀(15) существенного усиления магнитокалорической эффективности на стр. 99 связывается с возможным слабым обменным взаимодействием между прослойкой Gd и ферромагнитными берегами, в частности с NiFe. Далее указано на необходимость использования «сильных» ферромагнетиков. Какую роль в данных эффектах играет толщина ферромагнитных слоев?

3. Несмотря на хороший стиль изложения материала, есть ряд замечаний, касающихся оформления текста диссертации:

- отсутствует информация о соответствии диссертации паспорту специальности;

- ссылки в тексте на стр. 51 на рисунок 1.20 являются ошибочными (рис. 2 в, рис. 2 г).

Отмеченные замечания не снижают высокий уровень научной и практической значимости работы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Профиль диссертации соответствует специальности 1.3.8 (физика конденсированного состояния) в п. 6: «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами».

В целом диссертационная работа Пашенькина И. Ю. на тему «Эффекты обменного и спин-орбитального взаимодействия в немагнитных прослойках ферромагнитных наноструктур» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата физико-математических наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 (с последующими изменениями) «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

главный научный сотрудник, заведующий лабораторией
квантовой наноспинтроники, ФГБУН Институт физики
металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения
Российской академии наук (ИФМ УрО РАН),
доктор физико-математических наук

Адрес: 620108, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18

Тел.: +7 (343) 378-38-81

E-mail: milyaev@imp.uran.ru

« 10 » февраля 2025 года


(подпись)

Миляев Михаил Анатольевич

Согласен на обработку персональных данных.

« 10 » февраля 2025 года


(подпись)

Миляев Михаил Анатольевич

Подпись М. А. Миляева заверяю

Ученый секретарь ИФМ УрО РАН



И. Ю. Арапова

« 10 » февраля 2025 года

