

## ОТЗЫВ

научного руководителя главного научного сотрудника Шальгиной Елены Евгеньевны на диссертационную работу Макарова Андрея Владимировича «Исследование структурных, магнитных и магнитооптических свойств трёхслойных тонкоплёночных систем Fe/полидифениленфталид/Fe, Co/Gd/Co и Co/Cu/Co», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – физика магнитных явлений

В последние годы большое внимание уделяется магнитным тонкоплёночным системам, что обусловлено их уникальными магнитными свойствами. В частности, при исследовании магнитных и магнитооптических характеристик указанных выше систем были обнаружены такие явления, как осциллирующее обменное взаимодействие, квантовые размерные эффекты и гигантское магнитосопротивление. Эти эффекты предопределили их применение как для научных исследований, так и для решения важных практических проблем. Например, на основе этих структур были разработаны новые материалы и устройства для микроэлектроники, в частности, сенсоры магнитного поля и устройства магнитной памяти.

Ранее на кафедре магнетизма физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова были изучены трехслойные системы на основе кобальта и железа с промежуточными слоями из диамагнитных (Ag, Au, Bi), парамагнитных (Ta, Mo, Pt, Pd) и диамагнитных полупроводниковых (Si) материалов. Проведённые исследования позволили установить зависимость магнитных характеристик образцов от их толщины при комнатной температуре, рассчитать периоды осцилляций обменного взаимодействия, а также определить толщину прослоек, при которых наблюдается антиферромагнитное взаимодействие между магнитными слоями. Вместе с тем ряд проблем оставался нерешённым. В частности, одна из таких проблем заключается в определении влияния температуры на магнитополевое поведение и магнитные свойства трёхслойных тонкоплёночных магнитных систем.

Макаров Андрей Владимирович работает на кафедре магнетизма физического факультета МГУ с 2014 года. В 2018 году он получил высшее образование на физическом факультете МГУ имени М. В. Ломоносова по специальности «Физика» специализация «Физика магнитных явлений». После этого он поступил в аспирантуру на кафедре магнетизма физического факультета МГУ и окончил её в 2022 году.

Диссертационная работа А. В. Макарова посвящена исследованию структурных, магнитных и магнитооптических свойств тонкоплёночных трёхслойных Fe/полидифениленфталид/Fe, Co/Gd/Co и Co/Cu/Co систем, изучение которых определяет возможность создания и разработки новых магнитных материалов, перспективных для практических применений. Магнитные свойства систем Co/Cu/Co и Co/Gd/Co при комнатной температуре исследовались ранее в лаборатории, поэтому основное внимание в диссертации было уделено изучению влияния температуры на магнитные свойства и магнитополевое

поведение данных систем. Интерес к системе с полимерной прослойкой Fe/полидифениленфталид/Fe был обусловлен необычными свойствами полимерных плёнок, которые значительно изменяют свою проводимость под влиянием небольших воздействий – давления, температуры или магнитного поля. В работе было исследовано их магнитное поведение при комнатной температуре. Кроме того, для образцов Fe/ПДФ/Fe и Co/Gd/Co также были проведены измерения спектральных зависимостей экваториального эффекта Керра и определено влияние толщины немагнитной прослойки на величину экваториального эффекта Керра.

Таким образом, из приведённых выше данных следует, что актуальность исследований Макарова А. В. обусловлена их новизной и фундаментальностью решаемых практических задач.

Полученные в диссертации Макарова А. В. результаты имеют важное практическое значение. В исследовании было обнаружено, что для образцов Fe/ПДФ/Fe значение поля насыщения и коэрцитивной силы при одинаковой толщине магнитных слоёв уменьшается с увеличением толщины промежуточного ПДФ слоя. Также было найдено, что магнитное поведение трехслойных образцов обусловлено магнитоэлектронным взаимодействием между магнитными слоями. Для трёхслойных систем Co/Gd/Co было установлено, что образец с толщиной слоя гадолиния, равной 9.0 нм, имеет точку компенсации, равную 150 К. Это свидетельствовало о том, что при указанной выше температуре происходит фазовый переход. Этот результат показывает, что магнитные свойства изучаемых образцов чувствительны к температуре и толщине слоя гадолиния. Не менее интересные результаты были получены при исследовании влияния температуры на магнитные свойства образцов Co/Cu/Co. Было найдено, что их поле насыщения увеличивается при уменьшении температуры, а двухступенчатая петля для образца с толщиной меди, равной 3.2 нм, становится более выраженной, в частности, увеличивается размер ступеньки. При интерпретации наблюдаемых особенностей была учтена зависимость от температуры косвенного обменного взаимодействия между слоями кобальта через прослойку меди и анизотропии кобальта.

Исследования были выполнены на современном научном оборудовании. Это способствовало получению достоверных результатов и доказывало практическую значимость этих исследований.

За время работы в лаборатории и, в частности, работы над диссертацией, Макаров А. В. изучил основные разделы физики магнитных явлений, освоил экспериментальные методы исследования магнитных материалов, приобрёл навыки работы с современным экспериментальным оборудованием, выполнил большой объём экспериментальной работы и получил ряд интересных и оригинальных результатов.

А. В. Макаров является соавтором 10 статей в журналах, 10 тезисов в трудах конференций, в том числе по теме диссертации – 7 статей в реферируемых журналах и 8 тезисов докладов в трудах конференций. Он докладывал свои результаты на различных международных и российских конференциях на устных и стендовых докладах. В своих

научных трудах соискатель опубликовал ценные для науки результаты, которые могут быть полезны для создания новых материалов, а также устройств микро- и наноэлектроники.

Подготовленная диссертация хорошо оформлена, автореферат полностью отражает её содержание. Текст диссертации соответствует установленным правилам научного цитирования, библиографические ссылки оформлены корректно.

Считаю, что диссертационная работа А. В. Макарова «Исследование структурных, магнитных и магнитооптических свойств трёхслойных тонкоплёночных систем Fe/ПДФ/Fe Co/Gd/Co и Co/Cu/Co» удовлетворяет требованиям к кандидатским диссертациям, изложенным в разделе 2 «Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете» от 18 января 2019 года, а её автор Макаров Андрей Владимирович достоин присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – физика магнитных явлений.

Научный руководитель  
доктор физико-математических наук, профессор  
главный научный сотрудник кафедры магнетизма

Е.Е. Шалыгина

Подпись Е.Е. Шалыгиной удостоверяю

Ученый секретарь Ученого Совета  
физического факультета МГУ, профессор

В.А.Каравеев