

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.01
на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
по диссертации
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 19.11.2020 № _____

О присуждении Азовцеву Андрею Валерьевичу,
гражданину Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Микромагнитное моделирование спиновых явлений, вызванных упругими волнами и импульсами деформаций» о специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» принята к защите 17 сентября 2020, протокол № 2, диссертационным советом ФТИ 34.01.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д.26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75, прил. 1 от 12 июля 2019 г.

Соискатель Азовцев Андрей Валерьевич, 1990 г.р., в 2012 году окончил специалитет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» по специальности «Физика». В 2016 году Азовцев А. В. прикреплен в качестве соискателя для сдачи кандидатских экзаменов и выполнения диссертационной работы. Экзамены по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния» успешно сданы соискателем в 2016-2017 гг. в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе. В настоящее время работает в должности исполняющего обязанности младшего научного сотрудника и инженера-исследователя в лаборатории динамики материалов Федерального бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории динамики материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель – Перцев Николай Андреевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией динамики материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Аверкиев Никита Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий сектором теории оптических и электрических явлений в полупроводниках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, дал положительный отзыв на диссертацию. Отзыв содержит 4 замечания:

- Результатом расчетов в работе является плотность спинового тока в металле. Однако в диссертации не обсуждается, как ток рассчитывается. Также не понятно, почему на рис. 18, например, незаметна плотность тока на удвоенной частоте, хотя постоянный ток имеется. Т.е. роль нелинейных эффектов существенна. На рис. 21 нелинейные эффекты незаметны, хотя исходные уравнения для намагниченности нелинейные.
- На стр. 58 приведена оценка для коэффициента связи в спиновом эффекте Холла и длины спиновой диффузии в металлическом слое. Не ясно, согласованы ли эти оценки, оба параметра пропорциональны величине спин-орбитального взаимодействия.
- На стр. 88, Глава 5, использована оценка для величины деформации $1.5 \cdot 10^{-3}$, считается, что эта величина отвечает экспериментальной ситуации. Представляется, что это завышенная оценка, необходим комментарий.
- В диссертации используются выражения «детекция, фиттирование» - таких слов в научном литературном русском языке нет, по крайней мере, сейчас. Следует избегать.

2. Фетисов Леонид Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» дал положительный отзыв на диссертацию. Отзыв содержит 6 замечаний:

- В диссертации приводятся подробные описание метода микромагнитного моделирования и методик расчётов, использованных автором. В тоже время, в диссертации практически не приводятся обоснования выбора начальных условий расчетов, приведенных в главах 2, 3, 4 и 5. Также существенно улучшило бы работу более подробное и понятное описание геометрии моделирования для каждого рассмотренного в работе случая.
- Определенные сомнения вызывают значения различных параметров, использованных автором в работе для проведения расчётов. К примеру, автор взял для амплитуды деформации величину $\varepsilon_{\max} \approx 5 \times 10^{-3}$ (см. стр. 42). Это значение представляется чрезмерно завышенным.

- В работе автор рассматривает временные зависимости спинового тока, инжектируемого ферромагнитными плёнками в прилегающий нормальный металл. Из данных зависимостей видно, что величина тока накачки достигает максимума не мгновенно. Наблюдается рост до максимального значения в течение некоторого времени. Длительность этого процесса различна для различных материалов и геометрий. Автору стоит обратить на это внимание и рассмотреть более подробно данные процессы, так как время стабилизации тока накачки определяет, в том числе, и быстродействие перспективных устройств.
- В диссертации приведено большое количество графиков, демонстрирующих траектории намагниченности. Рисунки соответствуют проекциям конца единичного вектора \mathbf{m} (см. например стр. 43). Однако так как в диссертации рассматривается динамика намагниченности в тонких ферромагнитных плёнках, то для полноты картины нелишне было бы более детально изучить пространственное распределение магнитного состояния и построить соответствующие рисунки.
- Вопросы возбуждения высокочастотных магнитных мод в магнитоупругих плёнках с помощью коротких импульсов деформаций представляют большой интерес. Однако результаты работы в данном направлении, приведённые в Главе 5, показывают, что работа еще далека до завершения и требуются дальнейшие исследования.
- Одним из главных недостатков диссертационной работы является отсутствие экспериментальных данных, подтверждающих предсказания моделирования и расчётов, проведённых автором. В частности, интересно было бы получить экспериментальное подтверждение наличия вторичных упругих волн, возбуждение которых предсказано для плёнок $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$. Такие плёнки активно исследуются в различных научных лабораториях, и проведение соответствующего эксперимента не представляется чем-то чрезмерно сложным.

Ведущая организация Национальный исследовательский университет ИТМО в своем положительном заключении, подписанном профессором факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники доктором физико-математических наук Гуткиным Михаилом Юрьевичем и деканом факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники доктором физико-математических наук Романовым Алексеем Евгеньевичем и утвержденном проректором по научной работе доктором технических наук Никифоровым В. О., указала, что содержание диссертации Азовцева А. В. соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.07–«Физика конденсированного состояния», а диссертант Азовцев А. В. заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук. В заключении ведущей организации высказаны 3 замечания:

- В работе не указано, исследовалась ли предлагаемая система уравнений, описывающая магнитоупругую динамику под действием упругих волн и импульсов деформаций в ферромагнитных пленках и гетероструктурах ($\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$, CoFe_2O_4), на устойчивость/сходимость.
- В работе не указано, было ли проведено сравнение полученных результатов моделирования воздействия упругих волн и импульсов деформаций на свойства ферромагнитных материалов с экспериментальными данными.
- В работе не указаны средства разработки полученного программного обеспечения, в частности язык программирования. Из диссертации также не совсем понятно, почему нельзя было использовать коммерческие математические пакеты для моделирования, например, MATLAB или Wolfram Mathematica.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что один из них имеет ученую степень доктора наук, а другой степень кандидата наук, они работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что Национальный исследовательский университет ИТМО ведет активные исследования в области физики конденсированного состояния, деформационных явлений, спинтроники, взаимодействия оптического излучения с веществом. В частности, д.ф.-м.н. проф. Романов Алексей Евгеньевич является признанным специалистом в области физики твердого тела, он использует методы теории упругости для расчета деформаций и напряжений в кристаллах с дефектами, занимается мезоскопическим моделированием пластической деформации и разрушения, описанием физико-механических свойств аморфных, наноструктурных и нанокомпозитных материалов. Д.ф.-м.н. Гуткин Михаил Юрьевич является специалистом по микромеханике пластической деформации и разрушения наноструктурных материалов, занимается вопросами градиентной и поверхностной теории упругости. Кроме того, в Национальном исследовательском университете ИТМО имеется диссертационный совет Д 999.069.02 по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Основное содержание диссертации представлено в 5 научных статьях, индексируемых в международной системе цитирования Web of Science:

1. Azovtsev, A. V. Magnetization dynamics and spin pumping induced by standing elastic waves / A. V. Azovtsev, N. A. Pertsev // Phys. Rev. B. — 2016. — Vol. 94, issue 18. — P. 184401.
2. Azovtsev, A. V. Coupled magnetic and elastic dynamics generated by a shear wave propagating in ferromagnetic heterostructure / A. V. Azovtsev, N. A. Pertsev // Appl. Phys. Lett. — 2017. — Vol. 111, no. 22. — P. 222403.
3. Azovtsev, A. V. Electrical Tuning of Ferromagnetic Resonance in Thin Film Nanomagnets Coupled to Piezoelectrically Active Substrates / A. V. Azovtsev, N. A. Pertsev // Phys. Rev. Applied. — 2018. — Vol. 10, issue 4. — P. 044041.
4. Azovtsev, A. V. Dynamical spin phenomena generated by longitudinal elastic waves traversing CoFe₂O₄ films and heterostructures / A. V. Azovtsev, N. A. Pertsev // Phys. Rev. B. — 2019. — Vol. 100, issue 22. — P. 224405.
5. Azovtsev, A. V. Excitation of high-frequency magnon modes in magnetoelastic films by short strain pulses / A. V. Azovtsev, N. A. Pertsev // Phys. Rev. Materials. — 2020. — Vol. 4, issue 6. — P. 064418.

На автореферат поступило 3 отзыва.

1. Отзыв исполняющего обязанности ректора Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета им. Ж. И. Алферова РАН д.ф.м.н. доцента Филимонова Алексея Владимировича положительный, содержит 2 замечания:

- К недостаткам работы можно отнести отсутствие информации об использованных для моделирования языках программирования/средах;
- Недостаточное обсуждение полученных результатов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными.

2. Отзыв главного научного сотрудника, заведующего лабораторией полупроводниковых приборов Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН д.ф.м.н. Ползиковой Натальи Ивановны положительный, содержит 3 замечания:

- При описании содержания второй главы не указывается направление магнитного поля относительно плоскости пленки, направления волнового вектора упругой волны и ее поляризации. В этой главе рассматриваются два упругих полупространства, разделенных тонкой ферромагнитной пленкой. Неясно, почему в такой среде образуется стоячая упругая волна, причем с волновым вектором, лежащим в плоскости ничем не ограниченной пленки.
- На стр. 14 делается вывод, что «упругая волна служит носителем спиновой волны, которая сама по себе быстро исчезла бы в CoFe₂O₄ из-за большого затухания Гильберта». Действительно, магнитное затухание значительно превосходит упругие потери даже для такого материала, как ЖИГ. Однако при равенстве частот и длин упругих и спиновых волн образуются

связанные магнитоупругие волны с затуханием равным среднему арифметическому от магнитного и акустического вкладов в затухание (см., например, книгу А. Г. Гуревича и Г. А. Мелкова). Т. е. затухание магнитной прецессии может уменьшиться не более чем в 2 раза. В то же время упругие деформации будут испытывать намного большее затухание по сравнению с чисто упругими волнами. Т. о. полученное из численного расчета увеличение характерной длины распространения более чем на 3 порядка (70 мкм по сравнению с 10 нм для чисто спиновой волны) требует, на наш взгляд, дополнительного пояснения.

- Имеется ряд замечаний к стилю изложения. Например, автор неоднократно применяет словосочетание «большееугловая прецессия намагниченности». Это может означать как прецессию с большой угловой скоростью, так и большой угол конуса прецессии намагниченности. Иногда утверждения диссертанта носят слишком категоричный характер, как, например, суждение относительно ограниченности аналитического подхода по сравнению с методом микромагнитного моделирования (конец раздела Актуальность темы).

3. Отзыв заместителя научного директора Международного центра квантовой оптики и квантовых технологий, научного руководителя группы «Магнитоплазмоника и сверхбыстрый магнетизм» д.ф.м.н. профессора РАН Белотелова Владимира Игоревича положительный, содержит 1 замечание:

- Учитывая сугубо теоретический характер работы, стоило уделить больше внимания самому методу математического моделирования, привести более подробную информацию о выборе параметров расчетной сетки и метода решения системы дифференциальных уравнений, проанализировать устойчивость сетки.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем исследований получен ряд результатов, важных для развития спинтроники, а именно:

1. Разработано программное обеспечение для моделирования магнитоупругих явлений путём численного решения связанной системы уравнений Ландау-Лифшица-Гилберта и Навье-Коши, учитывающей влияние деформаций на направление намагниченности в ферромагнетике и обратное воздействие её переориентаций на деформационное состояние материала. При расчёте спиновой динамики также учитываются обменное и диполь-дипольные взаимодействия, магнитокристаллическая анизотропия, влияние внешнего магнитного поля и затухание Гильберта.
2. Численное моделирование с использованием вышеуказанного ПО показало, что под воздействием периодических упругих волн в ферромагнитных плёнках $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ и CoFe_2O_4 при рассматриваемых

- условиях возникают спиновые волны с той же длиной волны и частотой, что и у возбуждающей волны. Бегущие упругие волны также задают скорость распространения переносимых ими спиновых волн.
3. В случае возбуждения плёнки $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ нанометровой толщины стоячими упругими волнами с волновым вектором в плоскости плёнки и амплитудой деформаций $\sim 5 \times 10^{-3}$ обнаружены существенные нелинейные эффекты, проявляющиеся в изменении формы резонансной кривой по сравнению с классическим лоренцианом. При этом “окно” эффективной генерации прецессии намагниченности имеет ширину около 1 ГГц. При возбуждении продольными волнами с частотой существенно ниже частоты ФМР в плёнке $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ возникают спиновые волны с переменной частотой, намного превышающей частоту акустической волны.
 4. Установлено, что при инжектировании в эти ферромагнитные плёнки $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ и CoFe_2O_4 бегущих упругих волн с волновым вектором, перпендикулярным их поверхностям, вследствие обратной магнитоупругой связи возникают вторичные упругие волны, связанные с другими компонентами тензора деформаций. В плёнках CoFe_2O_4 , обладающих большим параметром затухания Гильберта, прецессия намагниченности вызывает заметное затухание возбуждающей продольной волны. Тем не менее, характерная длина распространения такой волны с частотой ФМР составляет около 70 мкм, что обеспечивает передачу переносимого ей спинового сигнала на соответствующие расстояния.
 5. Моделирование гетероструктур $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}/\text{Au}$ и $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Pt}$ показало, что наибольшая прецессия намагниченности на границе с нормальным металлом наблюдается тогда, когда частота возбуждающей упругой волны совпадает с частотой ФМР, а толщина ферромагнитного слоя равна длине упругой волны. На основе данных о прецессии намагниченности на границе динамически деформируемого ферромагнитного слоя произведён расчёт спиновой накачки в прилегающий нормальный металл и вычислены спиновые токи и сопутствующие электрические сигналы, возникающие в Au и Pt в силу обратного спинового эффекта Холла. Расчёты предсказывают, что при резонансном возбуждении и амплитуде деформаций в упругой волне $\sim 10^{-4}$ постоянные составляющие зарядового тока в Au (~ 10 нА) и поперечного электрического напряжения в Pt (~ 1 нВ) становятся достаточными для экспериментального обнаружения спиновой накачки в нормальный металл.
 6. Показано, что при воздействии пикосекундных биполярных и наносекундных прямоугольных акустических импульсов на плёнки $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ толщиной 8 и 16 нм, выращенные на подложке GaAs, в ферромагнитной плёнке возбуждаются затухающие спиновые волны. Их время жизни составляет от 0.1 до 1 нс в зависимости от формы импульса, его длительности и типа магнитных граничных условий (свободные или

“закреплённые”). Спектр этих стоячих волн содержит до 7 выделенных магнонных мод, самые высокочастотные из которых могут иметь частоту свыше 1 ТГц. Возбуждение терагерцовых мод оказывается более эффективным в пленках толщиной 8 нм и не требует приложения сильного магнитного поля. Это указывает на возможность создания источника спиновых сигналов терагерцового диапазона, возбуждаемого импульсами деформаций.

Научная новизна и практическая значимость обусловлена тем, что полученные в работе результаты и разработанное программное обеспечение представляют интерес как с точки зрения фундаментального изучения магнитоупругих явлений, так и с точки зрения приложений к задачам акустической спинтроники. В частности, они вносят вклад в понимание нелинейной магнитной динамики при прецессии намагниченности большой амплитуды, неоднородной динамики намагниченности в условиях “медленного” возбуждения (с частотой ниже частоты ФМР недеформированной плёнки) и распространения акустических волн в магнитных материалах с большим затуханием Гильберта. Полученные результаты представляют интерес при решении задач спинтроники, связанных с разработкой акустических спиновых инжекторов с низким энергопотреблением, передачей спиновых сигналов на большие расстояния и созданием источников магнонных мод терагерцового диапазона, необходимых для разработки быстродействующих магнонных устройств.

Достоверность представленных в диссертации результатов подтверждена путем проверки разработанного программного обеспечения на ряде стандартных задач для микромагнитных расчетов, а также тем, что полученные результаты находятся в согласии с уже имеющейся совокупностью физических знаний и с результатами, полученными другими авторами.

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. Личный вклад автора состоял в проведении моделирования и получении всех представленных в работе результатов, а также в разработке и отладке программного обеспечения. Постановка задач и анализ полученных результатов осуществлялись автором совместно с научным руководителем.

Диссертация Азовцева А. В. является законченным научным исследованием, вносящим существенный вклад в развитие такого актуального направления современной физики конденсированного состояния, как спинтроника.

На заседании 19 ноября 2020 года диссертационный совет принял решение присудить Азовцеву А. В. ученую степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния».

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 16 докторов по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, проголосовали за – 17, против – 0, воздержались – 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

Соколов Игорь Александрович

Ученый секретарь
диссертационного совета
PhD

Калашникова Александра Михайловна

19 ноября 2020 г.