

Проректор по научной работе
Университета ИТМО

д.т.н. профессор
В.О. Никифоров

«30» октября 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» на диссертацию Азовцева Андрея Валерьевича «Микромагнитное моделирование спиновых явлений, вызванных упругими волнами и импульсами деформаций», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность работы

Актуальность диссертационной работы обусловлена активным развитием в настоящее время акустической спинтроники – области физики конденсированного состояния, связанной с вопросами изучения взаимного влияния деформаций в твёрдых телах на их спиновое состояние и наоборот, а также применения этих эффектов для создания новых устройств хранения, передачи и обработки информации. В представленной работе автором исследуются вопросы возбуждения спиновой динамики в ферромагнитных плёнках и гетероструктурах на их основе с помощью воздействий деформационной природы, распространения упругих волн и импульсов деформаций в магнитоупорядоченных средах, акустической спиновой накачки из динамически деформируемого ферромагнитного слоя в прилегающий нормальный металл, занимающие центральное место в современной акустической спинтронике. Выбранный автором метод микромагнитного моделирования и исследуемые материалы, такие как галфенол ($\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$) и феррит кобальта (CoFe_2O_4), также свидетельствуют об актуальности работы как в связи с уже существующим их широким применением в физике конденсированного состояния и акустической спинтронике, так и в связи с большим потенциалом использования в будущих исследованиях и приложениях.

Структура диссертации

Во **введении** приводится общая характеристика работы, отражающая её актуальность, цели и задачи, положения, выносимые на защиту, научную новизну, практическую значимость, степень достоверности, апробацию на конференциях и семинарах, личный вклад автора и публикации по теме работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней излагаются ключевые точки в истории исследования явлений, связанных со спиновым транспортом в

твёрдых телах, и магнитоупругих явлений. Производится анализ основных работ по теоретическому описанию магнитоупругих волн и иных способов деформационного управления спиновой системой ферромагнетиков, указываются характерные недостатки существующих подходов. Описывается метод микромагнитного моделирования, модернизированная версия которого с учётом упругого состояния материала и взаимного влияния деформаций на намагниченность легла в основу диссертационной работы, раскрывается мотивация выбора этого метода.

Во **второй** главе излагаются результаты моделирования воздействия стоячих упругих волн с волновым вектором, лежащим в плоскости плёнки, на тонкую плёнку галфенола ($\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$), расположенную между двумя упругими полупространствами. В начале главы излагаются детали подхода численного моделирования спиновых явлений под действием упругих возбуждений на основе модифицированного метода микромагнитного моделирования с использованием уравнения Ландау-Лифшица-Гилберта (ЛЛГ) и нюансы его применения к рассматриваемой тонкой плёнке $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$. Приводятся результаты моделирования воздействия продольных и поперечных стоячих акустических волн с частотами, покрывающими частоту ферромагнитного резонанса (ФМР), на данную плёнку. Исследуется влияние частоты и характера возбуждающей волны на поведение возбуждаемой стоячей спиновой волны. Рассматривается её амплитуда, форма, нелинейные эффекты, проявляющиеся в первую очередь в отклонении формы резонансных кривых от классического лоренциана. Описывается устойчивая двойная динамика намагниченности, в которой присутствуют колебания с переменной частотой, возникающая при возбуждении плёнки $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ продольными стоячими волнами с частотой много меньше частоты ФМР. Результаты моделирования спиновой динамики используются для вычисления тока спиновой накачки в прилегающий нормальный металл, в качестве которого выбрано золото. Приводятся временные зависимости компонент спинового тока и их характерные средние значения. Дается оценка величины электрических эффектов, возникающих в нормальном металле в силу обратного спинового эффекта Холла и позволяющих экспериментально регистрировать факт и величину спиновой накачки.

Третья глава посвящена исследованию магнитной и упругой динамики в гетероструктуре $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}/\text{Au}$, возбуждаемой бегущими сдвиговыми акустическими волнами с волновым вектором, направленным поперёк плоскости плёнки. В данной главе описывается модернизация метода моделирования с учётом решения уравнения теории упругости (Навье-Коши) и обратного влияния намагниченности на деформации материала, а также детали его применения к моделированию воздействия бегущих акустических волн, создаваемых с помощью присоединённого пьезоэлектрического преобразователя, на тонкие ферромагнитные плёнки. В начале главы исследуется распространение сдвиговой волны в гетероструктуре, её отражение от интерфейса между ферромагнитным слоем и слоем нормального металла и проникновение в нормальный металл. Показывается возбуждение спиновых

волн в ферромагнитном слое, исследуется зависимость их характера от толщины этого слоя. Выявляется, что для плёнок, сравнимых или больших по толщине с длиной возбуждающей упругой волны, частота прецессии намагниченности в плёнке совпадает с частотой возбуждающей волны при возбуждении вблизи частоты ФМР, при этом одинаковыми являются также длины упругой и возбуждаемой ею спиновой волн, что говорит о вынужденном характере последней и роли упругой волны в качестве носителя спиновой. Затем обсуждается генерация неоднородной прецессией намагниченности в плёнке $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ двух вторичных упругих волн (продольной и второй сдвиговой), ранее отсутствовавших в системе, амплитуда которых примерно на два порядка меньше амплитуды возбуждающей упругой волны. Показывается, что после короткого (~ 1 нс) переходного процесса в гетероструктуре устанавливается стационарный режим прецессии намагниченности. Данные по прецессии намагниченности на интерфейсе между $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ и Au используются для расчёта спиновой накачки в Au с учётом спинового противотока; исследуется зависимость амплитуды прецессии на интерфейсе и порождаемого ей спинового тока от толщины ферромагнитного слоя. Вычисляется также величина поперечного электрического тока, возникающего в Au в силу обратного спинового эффекта Холла, позволяющая судить о возможности экспериментальной регистрации акустической спиновой накачки под действием бегущих сдвиговых волн.

Четвёртая глава продолжает тему исследования бегущих акустических волн. В данной главе рассматриваются продольные акустические волны, распространяющиеся в плёнках кристаллического и аморфного феррита кобальта CoFe_2O_4 . Геометрия распространения совпадает с предыдущей главой, где волновой вектор инжектируемых упругих волн направлен поперёк плоскости плёнки. Результаты предварительных расчётов частоты ФМР недеформированной плёнки, представленные в начале главы, свидетельствуют о том, что значительное магнитное затухание, присущее CoFe_2O_4 , существенно снижает его резонансную частоту по сравнению с модельным случаем нулевого затухания. Затем изложение переходит к вопросам распространения продольных упругих волн в плёнках CoFe_2O_4 , толщина которых превышает несколько длин упругих волн. Показывается, что такие волны возбуждают в CoFe_2O_4 неоднородную прецессию намагниченности в виде спиновых волн с той же частотой, длиной волны и скоростью распространения, что и у возбуждающей упругой волны. При этом упругие волны выступают носителями спиновых волн, позволяя последним распространяться на большие расстояния несмотря на сильное магнитное затухание в CoFe_2O_4 . Обратное влияние намагниченности на деформационную подсистему проявляется в затухании возбуждающей упругой волны и образовании двух вторичных сдвиговых волн с существенно меньшими амплитудами по сравнению с возбуждающей волной. Также исследуется частотная зависимость амплитуды спиновой волны; показывается, что максимум амплитуды, как и в случае однородной прецессии, достигается на частоте ФМР. Затем автор переходит к моделированию двойных слоёв $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Pt}$ с толщиной ферромагнитного слоя, сравнимой с одной длиной

возбуждающей упругой волны. Частота возбуждения при этом выбирается равной частоте ФМР на основе данных моделирования распространения продольных упругих волн в толстых плёнках CoFe_2O_4 и показывается, что наибольшая амплитуда прецессии намагниченности на интерфейсе между слоями возникает при толщине ферромагнитного слоя, равной одной длине возбуждающей упругой волны. Далее производится расчёт спиновой накачки в слой Pt, вычисляются распределения электрических токов в нём и оценивается поперечное напряжение между боковыми стенками этого слоя, позволяющее судить об эффективности спиновой накачки из динамически деформируемого кристаллического и аморфного CoFe_2O_4 .

Последняя, **пятая** глава посвящена исследованию воздействия коротких акустических импульсов на тонкие ферромагнитные плёнки, находящиеся на немагнитной упругой подложке. В качестве модельной системы выбрана двухслойная структура $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}/\text{GaAs}$. Рассматриваются импульсы продольных деформаций сжатия-растяжения длительностью несколько пикосекунд (биполярные импульсы) и порядка одной наносекунды (прямоугольный импульс). В результате моделирования показывается, что импульс деформаций, распространяющийся в немагнитной подложке, проникает в ферромагнитную плёнку, отражается от её свободной поверхности и выходит из плёнки, возбуждая в ней затухающую прецессию намагниченности. Исследуется зависимость времени жизни такой прецессии от формы и длительности импульса, а также от магнитных граничных условий, наложенных на поверхности плёнки. Показывается, что пространственная форма прецессии имеет вид сложной стоячей спиновой волны, являющейся суперпозицией нескольких магнонных мод. Детально исследуется спектральный состав этих волн для различных возбуждающих импульсов, проводится сравнение частот пиков отдельных мод с частотами, полученными из аналитического дисперсионного соотношения. Уделяется внимание амплитудам мод, особенно, мод с частотой свыше 1 ТГц. Приводятся условия, в которых возбуждение терагерцовых мод наиболее эффективно.

В заключении приводятся основные результаты работы.

Автореферат диссертации полностью отражает её содержание.

Научная новизна

В работе впервые представлено детальное микромагнитное моделирование упругих воздействий на ферромагнитные плёнки с учётом всех физически значимых факторов. Подробно описаны явления, возникающие в плёнках $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ и CoFe_2O_4 под действием продольных и сдвиговых акустических волн и импульсов деформаций: нелинейные эффекты, связанные с большеугловой прецессией намагниченности в $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$, возбуждение в $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ двойной динамики намагниченности с переменной частотой, образование вторичных упругих волн при инжектировании в ферромагнитные плёнки бегущих акустических волн, генерация терагерцовых мод в тонких плёнках $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ в слабых магнитных полях. Обсуждаются практически значимые аспекты изученных явлений: выявляются условия максимизации прецессии

намагниченности в указанных материалах на их границе со слоем нормального металла, предсказывается распространение на большие расстояния связанных магнитоупругих волн, в том числе в CoFe_2O_4 , обладающем большим магнитным затуханием, предлагается метод создания сверхкоротких импульсов деформаций на основе прямоугольных импульсов большой длительности, даётся оценка эффективности акустической спиновой накачки из $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ и CoFe_2O_4 в прилежащий нормальный металл.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов обеспечивается проверкой разработанного программного обеспечения, используемого для моделирования, на ряде стандартных задач микромагнетики и теории упругости, имеющих заранее известные решения. Помимо этого, полученные результаты укладываются в общую картину уже существующих физических знаний и согласуются с результатами, полученными другими авторами.

Научная и практическая ценность работы

Результаты работы представляют ценность как с точки зрения физики магнитоупругих явлений, так и с точки зрения прикладных задач акустической спинтроники. К первой категории относятся представленные в главе 2 результаты, связанные с нелинейной динамикой намагниченности под действием стоячих акустических волн и возбуждение двойной динамики с переменной частотой прецессии при частоте возбуждающей упругой волны ниже частоты ФМР; описанные в главах 3 и 4 вторичные упругие волны, порождаемые неоднородной прецессией намагниченности под действием возбуждающей упругой волны; исследование затухания упругих волн из-за их взаимодействия с магнитной системой, обсуждаемое в главе 4; детальное исследование в главе 5 влияния магнитных граничных условий, формы и длительности акустических импульсов на время жизни и спектральный состав возбуждаемой прецессии намагниченности в тонких ферромагнитных плёнках. К более прикладным результатам, несомненно, можно отнести приведённые в главах 2-4 оценки эффективности спиновой накачки под действием упругих волн, что имеет потенциал применения при разработке спиновых инжекторов с низким энергопотреблением, предсказанное в главе 4 распространение связанных спиновых и упругих волн на большие расстояния даже в материалах с большим магнитным затуханием, а также результаты главы 5, связанные с импульсным возбуждением высокочастотных мод в тонких ферромагнитных плёнках, способствующие созданию быстродействующих магнитных устройств.

Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты диссертации могут быть использованы в фундаментальных исследованиях магнитоупругих явлений, таких как большеугловая прецессия намагниченности под действием стоячих упругих волн, распространение связанных магнитоупругих волн в ферромагнитных средах, генерация стоячих

спиновых волн в ферромагнитных плёнках под действием акустических импульсов, а также при разработке устройств акустической спинтроники, таких как спиновые инжекторы с низким энергопотреблением, источники магнанных мод высокочастотного диапазона и линии передачи спинового сигнала на большие расстояния.

В ходе обсуждения доклада Азовцева А. В. были заданы **следующие вопросы:**

- 1) Длина распространения спиновой волны одинакова и для аморфного CoFe_2O_4 и для кристаллического, с чем это связано?
- 2) Какого рода кристаллы рассматривались в работе? Если моделирование выполнялось только для кристаллов с кубической решеткой, можно ли рассматривать кристаллы с другой структурой, например, с гексагональной?
- 3) Какова практическая значимость и актуальность полученных результатов? В ходе доклада это было показано недостаточно ясно.
- 4) Что было сделано до данной конкретной работы, в чем уникальность полученных результатов по сравнению с предыдущими работами?
- 5) Какие планируются экспериментальные исследования для подтверждения полученных результатов?

Общее впечатление о работе положительное. Получены уникальные и перспективные результаты, хорошо согласующиеся с представленными в диссертации работами других авторов.

Между тем, при изучении материалов диссертационной работы возникает **ряд замечаний:**

- 1) В работе не указано, исследовалась ли предлагаемая система уравнений, описывающая магнитоупругую динамику под действием упругих волн и импульсов деформаций в ферромагнитных плёнках и гетероструктурах ($\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$, CoFe_2O_4) на устойчивость/сходимость.
- 2) В работе не указано, было ли проведено сравнение полученных результатов моделирования воздействия упругих волн и импульсов деформаций на свойства ферромагнитных материалов с экспериментальными данными.
- 3) 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.

Отметим, что сделанные замечания никоим образом не снижают качества и научной значимости представленной диссертационной работы.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на международных конференциях Spin Waves 2015 (Санкт-Петербург, Россия, 2015), Condensed Matter Division 26 (CMD 26) (Гронинген, Нидерланды, 2016), Novel Trends in Physics of Ferroids (Санкт-Петербург, Россия, 2017), Spin Waves 2018 (Санкт-Петербург, Россия, 2018), Frontiers of 21st Century Physics and Ioffe Institute (Санкт-Петербург,

Россия, 2018), а также на научных семинарах лаборатории динамики материалов и лаборатории физики ферроиков ФТИ им. Иоффе.

Заключение

По актуальности поставленных задач, научной новизне, теоретической и практической значимости, достоверности полученных результатов, степени обоснованности выводов и рекомендаций, объему выполненных исследований, уровню апробации и публикаций основных положений в открытой печати, диссертация Азовцева Андрея Валерьевича «Микромагнитное моделирование спиновых явлений, вызванных упругими волнами и импульсами деформаций» представляет собой завершённую научную квалификационную работу. Автореферат полностью отражает основные положения диссертации.

Диссертационная работа А. В. Азовцева «Микромагнитное моделирование спиновых явлений, вызванных упругими волнами и импульсами деформаций» соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор, несомненно, заслуживает присуждения ему искомой учёной степени по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Отзыв рассмотрен и принят на заседании факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники. На заседании факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники присутствовало - 15 чел. Результаты голосования: «за» - 15 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 5 от «28» октября 2020 г.

Отзыв ведущей организации подготовил:

д.ф.-м.н., профессор факультета
лазерной фотоники
и оптоэлектроники

Гуткин
Михаил Юрьевич

Председатель заседания:

д.ф.-м.н., проф.,
декан факультета лазерной
фотоники и оптоэлектроники,
профессор

Романов
Алексей Евгеньевич

Адрес: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, литер А.

Тел: +7 (812) 232-97-04

od@itmo.ru