

### Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Азовцева А.В. «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»

Спиновая физика в последние двадцать лет испытывает новый подъем, вызванный стремлением исследователей найти возможности применить спиновые степени свободы для информатики. Эффекты, обусловленные упругими волнами в кристаллах, изучаются с начала возникновения физики конденсированного состояния. Рецензируемая работа объединяет эти две основные тенденции. Фундаментальное значение работы состоит в том, что в ней теоретически изучено влияние упругих деформаций на магнитное состояние среды вне рамок теории возмущений, что важно, поскольку магнитные явления описываются нелинейными уравнениями. С инженерной точки зрения почти очевидно, что научиться управлять механическими, относительно слабыми воздействиями, магнитными моментами системы весьма заманчиво. Это позволит решать задачи акустической спинтроники и управлять токами, зависящими от магнитного состояния системы, механическим способом. Все это указывает на актуальность работы и ее практическую значимость. Новизна работы подтверждается постановочной частью, оригинальными разработанными автором методами физического моделирования, использованием для такого моделирования реальных параметров гетероструктур.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Во введении приведены формальные сведения о диссертационной работе — цели, задачи, актуальность, новизна и практическая значимость. В первой главе дан краткий обзор исследований в области акустомагнитных явлений, изложена хронология открытий в области спиновых явлений в ферромагнетиках и гетероструктурах на их основе и основных физических процессов, связанных с динамикой намагниченности и спин-поляризованным транспортом в контексте фундаментальной физики и приложений. Обращено внимание на использование магнитоупругой связи в задачах спинтроники для возбуждения и передачи спинового сигнала, рассматривают различные способы реализации такого контроля. Наиболее существенная часть этой главы посвящена изложению метода микромагнитного моделирования, модернизированная версия которого является основным методом исследования в данной работе. Описываются детали его устройства и обсуждается существующее на момент постановки задач данной работы программное обеспечение, реализующее такой метод.

Вторая глава посвящена исследованию воздействия стоячих упругих волн с волновым вектором в плоскости плёнки на тонкую, нанометровую плёнку

$\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ , помещённую между двумя упругими полупространствами. Автор усовершенствовал метод микромагнитного моделирования для учета влияния деформаций на намагниченность. Для этого в свободную энергию  $F$  ферромагнетика, содержащую вклады, соответствующие воздействию внешнего магнитного поля, обменному взаимодействию, диполь-дипольному взаимодействию и магнитокристаллической анизотропии, добавлено слагаемое, определяющее взаимодействие между намагниченностью и упругими деформациями, после чего вычисляется эффективное магнитное поле  $H_{\text{eff}}$ , входящее в уравнение Ландау-Лифшица. Моделирование осуществлялось путём численного интегрирования этого уравнения с помощью проективного метода Эйлера. Показано, что стоячие упругие волны возбуждают в плёнке  $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$  стоячие спиновые волны с длиной волны и частотой, в стационарном режиме преимущественно равной частоте возбуждения. При частоте  $\nu = 50$  ГГц, много большей частоты ферромагнитного резонанса, прецессия намагниченности имеет относительно небольшую амплитуду и простой вынужденный характер, строго следуя за возбуждающей волной. При понижении частоты упругой волны до частоты резонанса амплитуда возбуждаемой прецессии сильно возрастает и возникают нелинейные эффекты. При возбуждении продольной акустической волной с частотой  $\nu = 1.25$  ГГц, много меньшей частоты ферромагнитного резонанса, обнаружена двойная динамика намагниченности и стоячие спиновые волны имеют сложную пространственно-временную структуру, в которой на прецессию с частотой возбуждающей волны накладываются колебания с частотой ФМР. Полученные для стоячих спиновых волн результаты были применены для вычисления спинового тока, накачиваемого динамически деформируемой плёнкой в прилегающий нормальный металл, в качестве которого было выбрано золото. Для оценки эффективности предсказанной спиновой накачки была также рассчитана постоянная составляющая поперечного электрического тока, возникающего в золоте вследствие обратного спинового эффекта Холла. Вычисления показали, что эта составляющая имеет значительную величину, которая может быть измерена экспериментально.

В третьей главе исследуется связанная магнитная и упругая динамика, индуцированная в гетероструктуре  $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}/\text{Au}$  сдвиговой упругой волной, создаваемой присоединенным пьезоэлектрическим преобразователем. Для решения этой задачи процедура моделирования была усовершенствована путем добавления к уравнению Ландау-Лифшица уравнения Навье-Коши. Моделирование осуществлялось путем численного решения системы связанных дифференциальных уравнений для ферромагнитных слоев толщиной сотни нанометров и уравнения Навье-Коши для прилегающего слоя Au. Воздействие пьезоэлектрического преобразователя моделировалось путем введения периодического смещения на границе ферромагнитного слоя.

Проведенные расчеты показали, что введенное смещение порождает сдвиговую упругую волну, распространяющуюся поперек слоя  $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ . При наличии магнитного поля, отклоняющего намагниченность от исходного направления в плоскости ферромагнитного слоя, в последнем возникает прецессия намагниченности, обусловленная деформациями. В зависимости от соотношения между толщиной слоя  $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$  и длиной упругой волны прецессия либо является практически однородной, либо имеет форму спиновой волны при толщине слоя, сравнимой или превосходящей длину упругой волны. Моделирование также выявило возникновение в гетероструктуре двух дополнительных упругих волн, одна из которых является поперечной, а другая – продольной. Амплитуды деформаций в этих волнах на два порядка меньше, чем максимальная деформация в возбуждающей волне, и вторичные волны исчезают в отсутствие магнитоупругих слагаемых в уравнении Навье-Коши.

В четвертой главе описывается исследование спиновой динамики, возникающей при распространении продольных упругих волн в толстых плёнках феррита кобальта  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  и в гетероструктурах  $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Pt}$ . Рассмотрены кристаллические и аморфные плёнки. Расчеты показали, что в  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  возникает продольная упругая волна, амплитуда которой постепенно уменьшается с пройденным расстоянием и эта волна вызывает неоднородную прецессию намагниченности в виде спиновой волны с той же длиной волны, частотой и скоростью распространения, что и у возбуждающей упругой волны. Таким образом, упругая волна служит носителем спиновой волны, которая сама по себе быстро исчезла бы в ферромагнитном слое из-за быстрого затухания. Показано, что феррит кобальта представляется перспективным материалом для акустической спинтроники, несмотря на сильное магнитное затухание, характерное для этого ферримагнетика. Моделирование спиновой динамики, индуцированной продольными упругими волнами, выполнено также и для двойных слоев  $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Pt}$ .

Пятая глава посвящена исследованию динамики намагниченности, возбуждаемой в тонких ферромагнитных плёнках импульсами деформаций, проникающими из немагнитной подложки. В качестве объекта моделирования были выбраны нанопленки  $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ , выращенные на  $\text{GaAs}$ . Свободной поверхности подложки придавалось специальное смещение, обеспечивающее возникновение в ней деформационного импульса заданной формы. Рассматривались пикосекундные биполярные импульсы в виде гауссиана и наносекундные прямоугольные импульсы. Было установлено, что после прохождения через  $\text{GaAs}$  деформационный импульс почти полностью проникает в  $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ , вызывая в нем затухающую прецессию намагниченности. Вычисленные частотные спектры магнитных возбуждений выявили наличие до семи хорошо выраженных пиков в плёнках со свободными магнитными граничными условиями и до шести таких пиков в

случае закрепления намагниченности на границах плёнки. Наиболее важным результатом моделирования является предсказание возможности генерации магновов с частотой, превышающей 1 ТГц. Такие магновы возникают под действием биполярных деформационных импульсов длительностью 4 пс, которые можно создать с помощью фемтосекундных лазерных импульсов, и наносекундных прямоугольных импульсов, индуцируемых пьезоэлектрическим преобразователем. Такие параметры импульсов деформации достижимы в экспериментальных условиях.

В заключении приведены основные результаты работы. Основным достижением соискателя является результат под пунктом 1: разработано оригинальное программное обеспечение, позволяющее проводить моделирование магнитоупругих явлений путём численного решения связанной системы уравнений Ландау-Лифшица-Гилберта и Навье-Коши, учитывающей не только влияние деформаций на направление намагниченности в ферромагнетике, но обратноевоздействие её переориентаций на деформационное состояние материала.

В целом диссертационная работа представляет законченное научное исследование, новизна, актуальность и достоверность не вызывают сомнений. Автореферат и публикации правильно отражают диссертацию и личный вклад соискателя. При чтении диссертационной работы возникли следующие вопросы.

1. Результатом расчетов в работе является плотность спинового тока в металле. Однако в диссертации не обсуждается, как ток рассчитывается. Также непонятно, 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.
  2. На стр. 58 приведена оценка для для коэффициента связи в спиновом эффекте Холла и длине спиновой диффузии в металлическом слое. Не ясно, согласованы ли эти оценки, оба параметра пропорциональны величине спин-орбитального взаимодействия.
  3. 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.
  4. В диссертации используются выражения «детекция, фиттирование»-таких слов в научном литературном русском языке нет, по крайней мере сейчас. Следует избегать.
- Замечания не принципиальные и не влияют на оценку работы в целом.

Считаю, что диссертационная работа «Микромагнитное моделирование спиновых явлений, вызванных упругими волнами и импульсами деформаций» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», а ее автор Азовцев Андрей Валерьевич заслуживает присуждение ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:

Аверкиев Никита Сергеевич,  
доктор физ.мат наук, профессор,  
заведующий сектором «Теории оптических  
и электрических явлений в полупроводниках»,  
ФТИ им.А.Ф.Иоффе, С.Петербург,  
194021 Политехническая улица, дом 26,  
Тел.+78122927155,  
averkiev@les.ioffe.ru



Н.С.Аверкиев

Ученый секретарь ФТИ им.А.Ф.Иоффе,  
кандидат физ.-мат.наук



М.И.Патров

