

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Азовцева Андрея Валерьевича «Микромагнитное моделирование спиновых явлений, вызванных упругими волнами и импульсами деформаций», представленную к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Возможности управления спиновыми явлениями с помощью упругих волн и импульсов деформаций интенсивно изучаются в последние десятилетия в связи с активным развитием таких направлений как спинтроника и стрейнтроника. Исследования различных эффектов в данных областях представляют особый интерес в связи с их возможными применениями для создания новых технологий обработки, хранения и передачи данных.

Важнейшими направлениями акустической спинтроники являются такие вопросы, как распространение упругих возбуждений в магнитных пленочных структурах, изготовленных на основе различных магнитных материалов, а также методы управления намагниченностью этих материалов с помощью создаваемых деформаций. Управление намагниченностью с помощью деформаций требует меньших затрат энергии, чем традиционные методы управления с помощью магнитных полей.

В результате проведенных в России и за рубежом теоретических и экспериментальных исследований в области акустически-индуцированных спиновых явлений было изучено возбуждение и распространение магнитоупругих акустических волн в безграничных магнитных средах, параметрическое возбуждение магнитоупругих волн, акустическое возбуждение ферромагнитного резонанса (ФМР), переключение намагниченности с помощью поверхностных акустических волн и воздействие пикосекундных акустических импульсов на ферромагнитные плёнки.

Однако, в данных работах не учитывали такие факторы как: магнитное затухание и/или пространственная неоднородность распределения намагниченности в ферромагнитных плёнках, неоднородность распределения деформации, обратное влияние прецессии намагниченности на деформации. Кроме того, исследователи чаще всего ограничивались рассмотрением случая, когда амплитуда прецессии намагниченности мала. Таким образом, необходимо совершенствовать методики расчета и моделирования указанных процессов с учетом физически релевантных факторов, перечисленных выше, что и определяет **актуальность и своевременность** представленной диссертационной работы.

Диссертация состоит из: введения, где приведен обзор состояния исследований по теме на момент начала работы и сформулированы основные задачи работы; основной части из пяти глав, содержащих описание методик моделирования, использованных теоретических подходов и полученных результатов; заключения, в котором сформулированы основные выводы. Объем

диссертационной работы составляет 117 страниц, включая 34 рисунка, 1 таблицу и список цитированной литературы из 207 наименований.

Наиболее *важные новые научные результаты* работы следующие:

- При возбуждении наноплёнки $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ стоячими упругими волнами с волновым вектором в плоскости плёнки и амплитудой деформаций $\sim 5 \times 10^{-3}$ обнаружены нелинейные эффекты, проявляющиеся в изменении формы резонансной кривой по сравнению с кривой классической лоренцевой формы. При этом «окно» эффективной генерации прецессии намагниченности имеет значительную ширину - около 1 ГГц. При возбуждении пленки 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.

- Описаны акустические явления, порождаемые прецессией намагниченности в плёнках $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ и CoFe_2O_4 вследствие обратной магнитоупругой связи. Установлено, что при инжектировании в эти плёнки бегущих упругих волн с волновым вектором, перпендикулярным их поверхностям, возникают вторичные упругие волны с другими компонентами тензора деформаций. В плёнках CoFe_2O_4 , обладающих большим параметром затухания Гилберта, прецессия намагниченности также вызывает заметное затухание возбуждающей продольной волны. Тем не менее, характерная длина распространения такой волны с частотой близкой частоте ФМР составляет около 70 мкм, что обеспечивает передачу переносимого ей спинового сигнала на соответствующие расстояния.

- Моделирование гетероструктур $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}/\text{Au}$ и $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Pt}$ показало, что наибольший угол прецессии 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.

Практическая значимость результатов диссертации состоит в разработке программного обеспечения, позволяющего проводить численное моделирование взаимосвязанной магнитной и упругой динамики в конечных, а также одномерно- и двумерно бесконечных структурах, и его применении к задачам акустического возбуждения спиновой динамики. Полученные результаты могут быть полезны для разработки некоторых типов спиновых устройств, таких как акустические спиновые инжекторы с низким энергопотреблением и новые типы источников магнитных мод терагерцового диапазона. Кроме того, результаты работы могут способствовать разработке способов передачи спиновых сигналов на большие расстояния.

Обоснованность и достоверность выводов и заключений работы следует из использования автором известных и хорошо себя зарекомендовавших математических методов и подходов, а также испытания вновь разработанных методов на ряде задач, имеющих известные решения.

Полученные результаты находятся в согласии с уже имеющимися результатами, независимо полученными другими авторами.

В качестве *замечаний* по диссертационной работе следует отметить:

- В диссертации приводятся подробные описание метода микромагнитного моделирования и методик расчётов, использованных автором. В тоже время, в диссертации практически не приводится 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 случае.

- 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 представляет 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.

Отмеченные недостатки и замечания в целом никоим образом не снижают высокого уровня, достоверности выводов и рекомендаций работы.

Основные результаты работы полностью опубликованы в ведущих научно-технических журналах (5 статей), прошли апробацию на научно-технических конференциях в России и за рубежом. Автореферат достаточно подробно отражает научную новизну, содержание и основные результаты диссертации.

Учитывая изложенное, считаю, что диссертационная работа А. В. Азовцева «Микромагнитное моделирование спиновых явлений, вызванных упругими волнами и импульсами деформаций» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне и **соответствует** требованиям «Положения о присуждении учёных степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук», утверждённого директором ФТИ им. А. Ф. Иоффе 19.08.2019, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор Азовцев Андрей Валерьевич **заслуживает** присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

Фетисов Леонид Юрьевич

кандидат физико-математических наук,

доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

119454 г. Москва, проспект Вернадского, д. 78.

телефон: +7-916-128-73-83

электронная почта: fetisovl@yandex.ru

