

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
**Тарасенко Артема Сергеевича** «Поверхностная спин-волновая электродинамика антиферромагнитных сред с центром антисимметрии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Диссертационная работа Тарасенко Артема Сергеевича посвящена теоретическому исследованию магнитооптических явлений при падении плоской электромагнитной волны ТМ- или ТЕ-типа на антиферромагнетик (АФМ), помещенный в скрещенные постоянные электрическое и магнитное поле, или обладающий антисимметричным магнитоэлектрическим эффектом.

Тема работы **актуальна** по целому ряду причин, имеющих как фундаментальное, так и прикладное значение. Во-первых, в последние несколько лет стало понятно, что антиферромагнетики смогут быть успешно использованы в спинтронике, так как с одной стороны у них значительно подавлены или полностью отсутствуют эффекты, связанные с размагничиванием, а во-вторых, они обладают наименьшей магнитной релаксацией и наибольшим значениями частот магнитных резонансов из всех известных магнитных материалов. Это привело к развитию нового направления – антиферромагнитная спинтроника, и к необходимости исследования всех аспектов поведения АФМ в широком диапазоне частот. Во-вторых, АФМ с антисимметричным магнитоэлектрическим эффектом, как и мультиферроики, могут обладать, и действительно обладают, уникальными электромагнитными свойствами, так как спиновые волны в них могут резонансно возбуждаться как переменным электрическим, так и переменным магнитным полем электромагнитной волны. Это означает, что они характеризуются отрицательными значениями магнитной и диэлектрической проницаемости в одном диапазоне частот, то есть они обладают свойствами “левых” сред и метаматериалов, что перспективно для создания нового класса электромагнитных метаматериалов им метаповерхностей. В-третьих, взаимодействие электромагнитных волн с АФМ в общем случае, когда нарушена и пространственная, и временная инверсия, практически не изучено, а именно в таких сложных ситуациях и возможны новые эффекты. Отсюда следует, что появление работ Тарасенко А. С., на которых основана его диссертация, было весьма важным и своевременным.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 125 источников и 9 приложений с рисунками. Основной текст диссертации занимает 138 страниц.

В работе рассматривается падение плоской электромагнитной волны на магнитно компенсированный или магнитно некомпенсированный прозрачный АФМ, обладающий

антисимметричным магнитоэлектрическим взаимодействием. Базовая модель – двухподрешеточный коллинеарный АФМ, что вполне оправдано. Рассматриваются эффекты рефракции при падении ТЕ и ТМ-мод, усиление эванесцентных мод, эффект Гуса-Хенхена, особенности поверхностных волн. Используемая в диссертации схема расчета представляет собой многократно апробированный в магнитооптике метод решения краевых задач, основанных на решении уравнений Ландау-Лифшица и Максвелла. Данный метод расчета требует высокой квалификации и выполнения огромного объема нетривиальных и трудоемких вычислений, тем более в таких сложных случаях, которые рассмотрены в работе.

**В первой главе** диссертации изложены полученные в рамках такого подхода результаты теоретического изучения основных рефракционных эффектов, возникающих при частичном прохождении плоской волны ТМ или ТЕ типа, падающей извне на поверхность полуограниченного как магнито скомпенсированного, так и магнито нескомпенсированного легкого АФМ с центром антисимметрии для тех магнитооптических конфигураций, которые допускают независимое распространение в АФМ среде волн ТМ- и ТЕ- типа. Указана связь этих эффектов с параметрами спиновой подсистемы АФМ, с величиной и направлением приложенных постоянных внешних магнитного и электрического полей, а также трансформация этих эффектов в окрестности характерных частот собственных колебаний спин-системы АФМ среды.

**Во второй главе** обсуждены особенности локализации неоднородной ЭМ волны в полуограниченной АФМ среде в случае, когда она удовлетворяет условию полного внутреннего отражения. Автору удалось показать, что с помощью постоянного внешнего электрического поля можно существенно влиять на свойства формирующейся вблизи границы раздела АФМ и немагнитной сред распространяющейся эванесцентной волны как ТМ, так и ТЕ типа (в том числе на глубину локализации, невзаимность распространения волны, величину и знак потока, переносимого такой неоднородной электромагнитной волной вдоль плоской поверхности АФМ). Здесь же автором впервые исследуются свойства, названной им особой поверхностной волны.

**В третьей главе** диссертации рассмотрены особенности отражения квазиплоской волны ТМ или ТЕ типа, падающей извне на поверхность рассматриваемой полуограниченной АФМ среды в тех конфигурациях, которые отвечают условиям формирования особой поверхностной волны соответствующей поляризации. Это позволило автору указать на возможность нового механизма резонансного усиления бокового смещения вдоль границы раздела магнитной и немагнитной сред остронаправленного волнового пучка ЭМ волны ТМ или ТЕ типа после отражения от поверхности полуограниченного АФМ.

В заключительной, **четвертой главе** диссертации аналитически изучены некоторые интерференционные эффекты, сопровождающие распространение объемной электромагнитной волны ТМ или ТЕ типа в слое АФМ среды.

Работа обладает несомненной **новизной**, которая определяется как самим предметом исследования, так и полученными результатами. В отзыве невозможно остановиться на обсуждении всех многочисленных новых результатов, полученных в диссертации, поэтому останавлиюсь только на некоторых из них, имеющих, по моему мнению, наибольшее значение. Среди целого ряда новых и практически важных результатов, впервые полученных автором диссертации, прежде всего заслуживают упоминания следующие:

1. Впервые показано, что для волны как ТМ, так и ТЕ типа во внешних скрещенных магнитном и электрическом полях в геометрии Фогта возможно возникновение эффекта левой среды и для магнито некомпенсированного АФМ с центром антисимметрии, и для centrosymmetric АФМ. При этом для заданной поляризации ЭМ волны условия формирования эффекта существенно зависят не только от частоты и угла падения волны на поверхность магнетика, но и от знаков проекции как постоянного внешнего электрического поля на нормаль к границе раздела сред, так и проекции постоянного внешнего магнитного поля на направление нормали к плоскости падения рассматриваемой ЭМ волны.

2. Впервые введено понятие, найдены условия существования и исследованы свойства особой поверхностной волны. Она обладает удивительным свойством, что при заданных значениях частоты и угла падения мгновенный поток энергии через границу раздела (в данном случае АФМ и немагнитной сред) строго равен нулю в любой момент времени. Это соответствует ситуации, когда падающая из немагнитного диэлектрика извне на поверхность АФМ плоская объемная электромагнитная волна будет отражаться с нулевым набегом фазы (т.е. в случае волны ТМ типа - как от идеального электрического проводника и в случае волны ТЕ типа - как от идеального магнитного проводника).

3. Найден новый механизм резонансного усиления пространственного эффекта Гуса-Хенхен, причем управляемый внешним магнитным или электрическим полем.

4. Найдена возможность для формирования в слое магнитоэлектрического АФМ распространяющихся безобменных спиновых волн, закон дисперсии которых может быть исключительно результатом гибридизации магнито- и электродипольного механизмов косвенного спин-спинового взаимодействия в ограниченном АФМ слое.

По сути сделанных выводов у оппонента замечаний нет. Однако, работа не свободна от недостатков:

1. В работе отсутствует обзор. Первая глава начинается сразу с описания модели. Хотя это и допустимо, но в данном случае мне представляется неоправданным, так как следовало хотя бы дать объяснение всем терминам и ссылки на предисторию. Тем более, что диссертант в публикациях делает это. Перенос рисунков в многочисленные приложения несколько затрудняет чтение работы
2. Как говорил Паули – поверхность придумал дьявол. Поэтому считать поверхность раздела идеальной можно далеко не всегда. Тем более когда изучается магнитооптика. Следовало бы упомянуть наличие поверхностной анизотропии, специальных видов спин-орбитального взаимодействия, наконец, взаимодействия Дзялошинского-Мория, и по возможности, обсудить хотя бы на качественном уровне их влияние на результаты
3. Мне представляется, что главным недостатком работы является полное отсутствие указания реальных материалов, для которых применима развиваемая теория. На протяжении всей диссертации нет ни указания материалов, ни частотного диапазона, ни каких-либо конкретных рекомендаций по наблюдению предсказанных эффектов.
4. Трудно согласиться с использованием термина «плоская объемная волна», «поверхностная спин-волновая электродинамика», но, по-видимому, этот упрек касается руководителя диссертации, а не соискателя. Утверждение на первой странице автореферата о том, что собственные спиновые колебания АФМ могут лежать в ближней ИК области спектра, является преувеличением- пока рекордное значение не превышает 2-4 ТГц.

Как следует из самого характера сделанных замечаний они ни в коей мере не влияют на сделанные выводы.

**Достоверность** результатов, полученных в диссертационной работе, обусловлена применением современных и адекватных избранным задачам математических методов, которые многократно продемонстрировали свою состоятельность для решения широкого круга задач спин-волновой электродинамики магнитных сред. Представлен огромный фактический материал в виде рисунков, подробно даются выводы всех выражений.

**Практическая ценность**: Полученные автором диссертации результаты расширяют и углубляют современные теоретические представления о возможности целенаправленного и эффективного влияния с помощью постоянного внешнего электрического поля

на условия локализации и прохождения поляризованной электромагнитной волны через границу раздела centrosymmetric антиферромагнитной и немагнитной сред. Они могут быть использованы для разработки принципов работы устройств функциональной микроэлектроники, в частности, управляемых электрическим полем оптических модуляторов и фильтров, линий задержки и пр. Кроме того, все найденные в работе особенности формирования как поверхностных, так и объемных магнитных поляритонов могут быть реализованы для композитных мультиферроиков, которые имеют привлекательные перспективы применения в магнитной памяти произвольного доступа, фазовращателях, магнитоэлектрических гираторах и т.п.

Поэтому результаты работы можно рекомендовать для ознакомления и использования в организациях занимающихся как разработкой новых электромагнитных материалов, в том числе метаматериалов, антиферромагнитных материалов спинтроники и магнетики, так и ведущих исследования в области магнитооптики, магнитной памяти, магнитных сенсоров, тонкопленочных элементов и др., как например, МГУ им. М.В.Ломоносова (г. Москва), Санкт-Петербургский, Уральский, Новосибирский и Тверской университеты, Воронежский технический университет, МИРЭА, Российский научный центр «Курчатовский институт» (г. Москва), Институт физики твердого тела РАН РФ (п. Черноголовка Московская обл.), ФТИ РАН РФ им. Иоффе (г. С-Петербург), РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров, Нижегородская обл.), Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН (г.Красноярск), Институт Теоретической и Прикладной Электродинамики РАН (Москва) и др.

Характеризуя диссертацию в целом, можно утверждать, что цикл исследований, положенный в её основу, носит завершённый характер и представляет собой решение логически связанных задач. Основное содержание диссертационной работы достаточно полно опубликовано в специализированных журналах. Результаты диссертации многократно докладывались на российских и международных конференциях и хорошо известны специалистам.

Содержание диссертации отвечает паспорту специальности 01.04.11 - физика магнитных явлений (п.п. 1, 4).

Автореферат диссертации адекватно отражает её содержание.

Резюмируя сказанное можно констатировать, что диссертация Тарасенко А.С. посвящена актуальной теме, содержит ряд новых, важных в научном и практическом плане результатов, которые вносят значительный вклад в понимание взаимодействия электромагнитных волн с антиферромагнетиками, является завершённым научным исследованием, соответствует профилю диссертационного совета, паспорту заявлен-

ной специальности и требованиям, предъявляемым ВАК Министерства образования и науки РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» в редакции, утвержденной Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями от 21.04.2016 г. № 335), а её автор, Тарасенко А.С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент

Профессор, доктор физико-математических наук,

(01.04.11 – физика магнитных явлений),

профессор кафедры магнетизма физического факультета

Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Александр Борисович Грановский

119991, Российская Федерация, г. Москва,

Ленинские горы, д. 1

МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический Факультет

+7-495-9394787, [granov@magn.ru](mailto:granov@magn.ru)

Подпись профессора кафедры магнетизма Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д.ф.-м.н., проф. А.Б. Грановского заверяю

Декан физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

 И.Н. Сысоев