

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.

Задачи поиска новой элементной базы для создания высокопроизводительных устройств спин-волновой электроники в сочетании с впечатляющими технологическими достижениями в изготовлении высококачественных магнитных структур лежат в основе резко возросшего в последнее время числа научных исследований, посвященных различным аспектам физики композитных сред с участием антиферромагнитных (АФМ) материалов, резонансные частоты которых лежат в терагерцовом и ближнем инфракрасном диапазонах. Чтобы убедиться в этом, достаточно обратиться к публикациям в ведущих физических журналах последних лет, и в том числе, таких как Phys Rev, Review of Modern Physics и т.д. Нельзя также не отметить и тот факт, что существующее в АФМ средах разнообразие спиновых структур как пространственно однородных, так и модулированных, делает возможным появление уже в рамках однофазного АФМ материала магнитоэлектрических и пьезомагнитных свойств, что, в частности, крайне важно с точки зрения миниатюризации устройств, использующих подобные взаимодействия. При этом хорошо известно, что в пространственно однородной конденсированной среде наличие постоянного магнитного поля может приводить к эффектам невзаимности относительно инверсии знака направления распространения при прохождении электромагнитной волны.

Что же касается динамических эффектов, связанных с влиянием постоянного внешнего электрического поля, то следует отметить, что начиная с работ В.Г. Барьяхтара и др. в конце восьмидесятых годов, рядом авторских коллективов было теоретически показано, что характером пространственной локализации электромагнитной волны ТМ или ТЕ типа вблизи границы раздела вакуум - полуограниченный центросимметричный немагнитный диэлектрик можно управлять, прикладывая постоянное внешнее электрическое поле вдоль нормали к границе раздела сред (динамический магнитоэлектрический эффект). Наконец, хорошо известно, что в зависимости от симметрии равновесной спиновой структуры магнитной среды даже в рамках двухподрешеточной модели АФМ возможно существование не только магнито-, но и электродипольно активных спин-волновых колебаний (в частности, в АФМ с центром антисимметрии). Если суммировать все вышесказанное и учесть, что частоты собственных колебаний спиновой системы АФМ и падающей извне электромагнитной плоской волны ТМ или ТЕ типа могут лежать в одном частотном диапазоне, то можно ожидать формирования вблизи поверхности ограниченного магнито некомпенсированного АФМ, находящегося в постоянном внешнем электрическом поле, дополнительных резонансных рефракционных магнитооптических эффектов, которые могут иметь не только несомненный академический, но и практический интерес. Однако до появления исследований, результаты которых представлены в данной диссертационной работе, такая задача не рассматривалась. Все это позволяет считать тему диссертации и полученные в ней результаты, несомненно, **актуальными** и своевременными.

Структурно диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Текст работы изложен на 138 страницах, включая 10 рисунков, а также имеет 9 приложений и список литературы из 125 наименований.

В диссертации как отдельный раздел отсутствует обзор литературы по теме диссертации, а вместо этого в начале каждого раздела указаны основные результаты предыдущих авторов, имеющие непосредственное отношение к вопросам, изложенным в конкретно этом разделе. В работе в рамках феноменологической теории без учета диссипации рассматривается ряд малоизученных вопросов магнитооптики ограниченного двухподрешеточного АФМ с центром антисимметрии и centrosимметричной АФМ среды в скрещенных магнитном и электрическом полях.

Первая глава диссертации начинается с предложенного в работах Федорова “бескоординатного подхода“, что позволило автору для достаточно общей структуры уравнений связи бианизотропной среды, допускающей независимое распространение волн ТМ и ТЕ типа, получить соотношения для френелевских коэффициентов рефракции в декартовой системе координат, оси которой связаны не характерными направлениями в бианизотропной среде АФМ, а с направлениями вектора нормали к границе раздела сред, вектора нормали к плоскости падения в рассматриваемой бианизотропной среде плоской электромагнитной волны ТМ- (ТЕ-) типа и вектора, ориентированного вдоль линии пересечения плоскости падения и плоскости уединенной границы раздела оптически изотропной и бианизотропной сред. Далее автором было проведено решение уравнения Ландау–Лифшица для выбранных моделей АФМ среды. Показано, что при определенных условиях как АФМ с центром антисимметрии, так и centrosимметричный АФМ в постоянных внешних магнитном и электрическом полях, с точки зрения своих электродинамических свойств (структуры уравнений связи), представляют собой бианизотропную среду, одновременно обладающую гиротропным, псевдокиральным и линейным магнитоэлектрическим взаимодействием, причем все соответствующие коэффициенты в уравнениях связи носят, в зависимости от частоты, резонансный характер. На этой основе при произвольном угле падения для условий частичного отражения падающей извне на поверхность полуограниченного АФМ плоской объемной волны ТМ или ТЕ типа проанализированы рефракционные эффекты, являющиеся результатом резонансного взаимодействия спиновой подсистемы АФМ и преломленной в полуограниченную легкоосную АФМ среду (как магнито скомпенсированную, так и магнито нескомпенсированную) электромагнитной волны. В частности, найдены условия формирования эффектов отрицательной фазовой скорости и отрицательной рефракции, эффекта невзаимности относительно инверсии знака угла падения. Указана связь этих эффектов с параметрами спиновой подсистемы АФМ, а также с величиной и направлением приложенных постоянных внешних магнитного и электрического полей. Показано, что все перечисленные эффекты вследствие отсутствия центра инверсии в АФМ среде в зависимости от конкретной магнитооптической конфигурации могут обладать невзаимностью не только от инверсии знака угла падения, но и от того, верхнее или нижнее полупространство по отношению к оптически более плотной немагнитной среде, из которой падает плоская объемная волна ТМ или ТЕ типа, занимает полуограниченный АФМ.

Вторая глава диссертации посвящена изложению установленных в работах автора аномалий эванесцентных волн, формирующихся в полуограниченной АФМ среде в присутствии постоянных внешних электрического и (или) магнитного полей. В частности, указаны новые резонансные магнитооптические эффекты, возникающие в условиях полного внутреннего отражения в случае плоской монохроматической электромагнитной волны ТМ или ТЕ типа, падающей из оптически изотропного немагнитного диэлектрика

на поверхность полуограниченного магнито скомпенсированного или магнито нескомпенсированного АФМ в присутствии постоянного внешнего электрического поля.

Среди ряда полученных автором диссертации результатов важное место занимает введенное понятие об особой поверхностной волне как распространяющейся вдоль уединенной границы раздела оптически изотропной и АФМ сред однопарциальной эванесцентной ТМ или ТЕ волны, у которой мгновенный поток энергии через границу раздела сред строго равен нулю в любой момент времени и которая существует в АФМ среде только в присутствии в сопряженной немагнитной среде стоячей вдоль нормали к границе раздела сред плоской объемной электромагнитной волны. Сочетания частоты и угла падения, одновременно удовлетворяющие закону дисперсии такой особой поверхностной волны, определяют максимально возможное в этом случае (двукратное) усиление амплитуды электромагнитной волны, распространяющейся в АФМ среде. Показано, что при заданных значениях частоты и угла падения спектр и условия формирования такой особой поверхностной волны обладают невзаимностью как относительно инверсии знака проекции внешнего электрического поля на нормаль к границе раздела, так и инверсии знака постоянного внешнего магнитного поля, приложенного ортогонально плоскости падения волны (геометрия Фогта). В конце главы показано, что понятие особой поверхностной волны может быть перенесено и на случай полуограниченных одномерных сверхрешеток (особая поверхностная волна таммовского типа).

В **третьей главе** диссертации показано, что на уединенной границе раздела между немагнитным диэлектриком и полуограниченной АФМ средой в условиях полного внутреннего отражения резонансное возбуждение особой поверхностной волны ТМ или ТЕ типа, падающей извне квазиплоской волной соответствующей поляризации, представляет собой новый механизм усиления пространственного эффекта Гуса-Хенхен для такой магнитооптической конфигурации. В результате, учитывая немонотонность дисперсионной кривой спектра особой поверхностной волны, возбуждаемой в АФМ среде, появляется возможность управления не только величиной, но и знаком эффекта Гуса-Хенхен с помощью изменения величины и инверсии направления приложения внешних постоянных магнитного и электрического полей.

Четвертая глава диссертации содержит изложение результатов проведенных автором исследований интерференционных эффектов, возникающих в случае, когда рассматриваемая АФМ среда с центром симметрии или с центром антисимметрии представляет собой слой в симметричном окружении.

В частности, рассматривая условия полуволнового прохождения через АФМ слой плоской объемной волны ТМ или ТЕ типа (геометрия Фогта), было показано, что для некоторых магнитооптических конфигураций, отличающихся положением равновесного вектора антиферромагнетизма в плоскости падения волны, знак потока энергии, переносимого объемной волной ТМ или ТЕ типа вдоль АФМ слоя, может не определяться локальной кривизной кривой сечения плоскостью падения поверхности волновых векторов для полуограниченного АФМ. Характеристикой в этом случае для заданных значений частоты и угла падения является локальная геометрия кривой, которая определяется как полуразность кривых, отвечающих сечениям поверхности волновых векторов плоскостью падения в случаях, когда рассматриваемая АФМ среда занимает по отношению к полуограниченной немагнитной среде верхнее или нижнее полупространство. Для специального выбора граничных условий удалось в аналитической форме в явном виде представить спектр нового класса безобменных магнонов с азимутально зависящим спектром магнитоэлектрических магнонов, возникающих в слое АФМ с центром антисимметрии.

Результаты, представляющие наибольший интерес. Среди целого ряда новых и практически важных результатов, впервые полученных автором диссертации, в первую очередь, можно отметить следующие.

1. Найдено, что при падении извне на поверхность магнито нескомпенсированного обменно коллинеарного легкоосного АФМ плоской объемной волны как ТМ, так и ТЕ типа гибридизация псевдокирального, гиротропного и антисимметричного магнитоэлектрического взаимодействий может приводить к эффекту левой среды, даже если на заданной частоте волны не все компоненты тензоров магнитной и диэлектрической проницаемостей рассматриваемой АФМ среды одновременно отрицательны.

2. При отражении падающей извне на поверхность оптически прозрачной полуограниченной электрически (или магнитно) поляризованной АФМ среды плоской объемной волны как ТМ, так и ТЕ типа максимальное усиление интенсивности возбуждаемой в магнетике эванесцентной электромагнитной волны ТМ или ТЕ типа для области полного внутреннего отражения достигается в случае, когда мгновенный поток энергии, переносимый такой волной через границу раздела “АФМ среда – оптически прозрачный диэлектрик“, строго равен нулю в любой момент времени.

3. В слое скомпенсированного АФМ с центром антисимметрии возможно формирование магнитоэлектрических магнонов – нового класса распространяющихся гибридных дипольных спиновых волн с уникальными для этого класса безобменных магнонов дисперсионными характеристиками.

Достоверность проведенных исследований полученных результатов обеспечена использованием методов современной фенологической теории магнетизма и электродинамики сплошных сред, а также совпадением в предельных случаях полученных в диссертации результатов с результатами ранее уже проведенных исследований других авторов.

Практическая ценность. Найденные в работе новые магнитооптические аномалии, возникающие при прохождении электромагнитной волны через границу раздела оптически прозрачных немагнитной и антиферромагнитной сред, могут быть полезными для разработки широкого круга устройств функциональной магнито- и оптоэлектроники.

Рецензируемая диссертационная работа не свободна от недостатков, среди которых я хотел бы отметить следующие:

- 1) В работе не учтены эффекты неоднородного обменного взаимодействия, которые могут оказаться существенными для всех рассмотренных в диссертационной работе динамических эффектов;
- 2) Нет анализа поверхностной спин-волновой электродинамики полуограниченного АФМ с центром антисимметрии в скрещенных постоянных внешних магнитном и электрическом полях, в то же время для АФМ с центром симметрии такой анализ в диссертации проведен.

Но все эти замечания не могут существенно повлиять на общую высокую оценку обсуждаемой диссертационной работы. Она, безусловно, является вполне завершенной научной работой в актуальном и практически важном направлении современной физики и имеет целый ряд новых научно обоснованных результатов, которые в совокупности являются существенными для развития теории магнитооптических явлений в сложных магнитоупорядоченных системах. Диссертация хорошо оформлена.

В результате можно обоснованно утверждать, что как тема данной диссертационной работы, так и полученные в ней результаты носят общезначимый характер и, по моему мнению, полностью отвечают пунктам 1,3-5 паспорта специальности 01.04.11 - Физика магнитных явлений ВАК РФ.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Главные результаты работы достаточно полно изложены в 10 статьях в ведущих специализированных отечественных и международных научных журналах; они прошли апробацию на международных и национальных научных конференциях и хорошо известны специалистам.

Таким образом, по объему выполненных исследований, новизне и практической ценности полученных результатов диссертационная работа Тарасенко Артема Сергеевича «Поверхностная спин-волновая электродинамика антиферромагнитных сред с центром антисимметрии» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук (п. П. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.), а ее автор, Тарасенко Артем Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, профессор
(01.04.11 – физика магнитных явлений),

Попов Александр Иванович,

профессор кафедры общей физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (Национальный исследовательский Университет «МИЭТ»)

124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

Телефон: +7(499)720-85-58,

E-mail: aip_2001@mail.ru

Подпись профессора кафедры общей физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (Национальный исследовательский Университет «МИЭТ») д.ф.-м.н., проф. А.И. Попова заверяю: