

Заместитель директора
ИОФ РАН по научной
работе. д.ф.-м.н.

Глушков В.В.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН 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.

Актуальность темы диссертации. Решение задачи значительного повышения быстродействия устройств функциональной магнитоэлектроники за счет освоения как терагерцового, так и ближнего инфракрасного диапазонов привело к тому, что в настоящее время анализ физических свойств как диэлектрических, так и проводящих структур, включающих антиферромагнитные (АФМ) среды, является одним из активно развивающихся направлений современной физики магнитных явлений (антиферромагнитная спинтроника). Особый интерес в этом плане представляет создание композитных магнитных структур, динамическими свойствами которых можно управлять с помощью магнитных, электрических и упругих полей. Здесь следует также иметь в виду, что включение постоянного внешнего магнитного или электрического полей индуцирует эффекты, связанные с нарушениями временной или пространственной симметрии. Наконец, особое внимание в последнее время стало уделяться новым возможностям, связанным с проявлением магнитоэлектрических явлений для эффективного влияния на условия формирования и распространения электромагнитных волн в различных материалах.

Таким образом, учитывая вышесказанное, **актуальность темы** данной диссертационной работы «Поверхностная спин-волновая электродинамика антиферромагнитных сред с центром антисимметрии» не вызывает сомнений, поскольку она, во-первых, является ключевой для понимания электродинамических свойств таких активно исследуемых в настоящее время магнитных сред, как монокристаллические и композитные мультиферроики, а во-вторых, учитывая резонансный характер электродинамического отклика,

определяемого магнитной, диэлектрической и магнитоэлектрической восприимчивостями в области частот магнитных возбуждений этих антиферромагнитных сред, их можно рассматривать как материалы, перспективные с точки зрения эффективного управления электромагнитными характеристиками с помощью постоянных внешних магнитного и электрического полей в терагерцовом частотном диапазоне.

Общая характеристика диссертационной работы.

В работе развиваются методы теоретического анализа резонансной (квази)магнитооптики прозрачных ограниченных антиферромагнетиков в постоянном внешнем электрическом поле как бианизотропной электромагнитной среды с уникальными динамическими характеристиками.

Структурно диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Весь теоретический анализ эффектов спин-волновой электродинамики в ограниченной АФМ среде проведен в бездиссипативном приближении в рамках модели бианизотропной среды, учитывающей динамическое магнитоэлектрическое взаимодействие с резонансными компонентами магнитной, диэлектрической и магнитоэлектрической восприимчивостей, которые были получены из решения уравнений Ландау–Лифшица для ранее уже хорошо апробированной двухподрешеточной модели в случае антиферромагнетика как центром антисимметрии в постоянном внешнем электрическом или магнитном поле, так и для центросимметричной АФМ среды в скрещенных магнитном и электрическом полях. Для получения обзримых аналитических результатов рассмотрены только такие магнитооптические конфигурации, которые допускают независимое распространение в АФМ среде электромагнитных волн ТМ- и ТЕ-типа (в случае нескомпенсированного АФМ это - геометрия Фогта).

В рамках такого подхода в **первой главе** диссертации изложены результаты анализа влияния четности спиновой структуры обменно коллинеарного АФМ на характер рефракции плоской объемной электромагнитной волны ТМ- или ТЕ-типа, падающей извне на поверхность магнито скомпенсированного или магнито нескомпенсированного АФМ полуограниченного диэлектрика. В частности, впервые показано, что в геометрии Фогта в присутствии взаимно ортогональных векторов магнитной индукции и постоянного внешнего электрического поля для обменно коллинеарного АФМ существует диапазон частот и волновых чисел, внутри которого такой АФМ по отношению к падающей извне плоской объемной волне ТМ- или ТЕ-типа ведет себя как левая среда.

Во **второй главе** представлены результаты анализа особенностей поверхностной спин-волновой электродинамики эванесцентных

электромагнитных волн ТМ- и ТЕ-типа, распространяющихся вдоль уединенной границы раздела между оптически более плотным, изотропным немагнитным диэлектриком и бианизотропной средой (АФМ в постоянных внешних скрещенных магнитном и электрическом полях). В частности, впервые было сформулировано понятие об особой поверхностной волне ТМ- или ТЕ-типа как условии максимального усиления амплитуды эванесцентной (неоднородной) волны соответствующей поляризации. Изучена возможность формирования особой поверхностной волны таммовского типа в полуограниченной одномерной сверхрешетке.

Третья глава диссертации посвящена анализу условий, при выполнении которых становится возможным формирование нового механизма поверхностного поляритонного резонанса, а значит, и нового механизма усиления пространственного эффекта Гуса-Хенхен для остро направленного пучка электромагнитных волн ТМ- или ТЕ-типа, падающего в условиях полного внутреннего отражения из оптически изотропного диэлектрика на поверхность рассматриваемой полуограниченной АФМ среды. Впервые показано, что максимальное усиление эффекта пространственного смещения пучка вдоль уединенной границы немагнитной и АФМ сред достигается при таких сочетаниях частоты и продольного волнового числа, которые отвечают спектру особой поверхностной волны соответствующей поляризации, формирующейся в АФМ среде.

Заключительная, **четвертая глава** диссертации посвящена интерференционным эффектам, возникающим в спин-волновой электродинамике, во-первых, при полуволновом прохождении плоской электромагнитной волны ТМ- или ТЕ-типа в слое АФМ среды в присутствии гиротропного, магнитоэлектрического и псевдокирального взаимодействий (геометрия Фогта), во-вторых, при произвольном направлении распространения безобменных спиновых волн вдоль слоя одноосного магнито скомпенсированного АФМ с центром антисимметрии, легкая ось которого лежит в плоскости границы раздела сред.

Таким образом, характеризуя диссертацию в целом, можно утверждать, что цикл исследований, положенный в её основу, носит завершённый характер и представляет собой логически связанные задачи.

Научная новизна. В обсуждаемой диссертационной работе получен целый ряд новых, физически интересных и практически важных результатов, к числу которых, в первую очередь, несомненно, следует отнести:

1. Аналитическое доказательство того, 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 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 бианизотропной среды плоской объемной волны как ТМ-, так и ТЕ-типа условие максимального усиления интенсивности возбуждаемой эванесцентной электромагнитной волны ТМ- или ТЕ-типа внутри области полного внутреннего отражения достигается в случае, когда мгновенный поток энергии, переносимый такой волной через границу раздела “оптически прозрачный диэлектрик – АФМ”, строго равен нулю в любой момент времени. В диссертации, следуя аналогии с известными в кристаллоакустике и кристаллооптике особыми объемными волнами, такую волну предложено называть особой поверхностной волной. Резонансное возбуждение такой особой поверхностной волны, падающей извне на поверхность АФМ квазиплоской волной соответствующей поляризации, приводит к усилению пространственного эффекта Гуса–Хенхен, максимально возможному для данной магнитооптической конфигурации.

3. Направление потока энергии, переносимого вдоль полуволнового АФМ слоя при падении извне плоской объемной волны ТМ- или ТЕ-типа, может не определяться формой сечения плоскостью падения поверхности волновых векторов для соответствующей поляризованной нормальной электромагнитной волны в модели неограниченного АФМ.

4. В слое скомпенсированного АФМ с центром антисимметрии возможно формирование нового класса распространяющихся гибридных дипольных спиновых волн с уникальными для традиционных типов магнитоэлектрических спиновых волн дисперсионными свойствами – магнитоэлектрических магнонов.

Достоверность полученных результатов определяется использованием при анализе адекватных, хорошо апробированных аналитических методов, как современной феноменологической теории физики магнитных явлений, так и волновой теории анизотропных слоистых структур, совпадением в предельных случаях результатов, полученных в диссертации, с результатами, полученными другими авторами, наличием прозрачных физических аналогий для большинства спин-волновых эффектов, впервые найденных в данной диссертации.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что они позволяют углубить представления о роли спин-волновой

подсистемы АФМ в динамике одномерных многослойных структур, использующих контакт магнитной и немагнитной сред. Найденные резонансные динамические эффекты могут служить основой для практического применения, прежде всего для создания устройств функциональной магнитоэлектроники, связанных с управлением прохождением и локализацией электромагнитной волны с помощью внешних магнитного и электрического полей.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в исследованиях резонансных свойств разнообразных магнитных материалов, метаматериалов, причем как полностью диэлектрических, так и магнитоплазменных структур в научно-исследовательских организациях и высших учебных заведениях, таких как МГУ им. М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургский университет, Саратовский университет, МИРЭА, ИРЭ, ИФМ УрО РАН, Казанский госуниверситет, Челябинский госуниверситет, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институт физики им. Л.В. Киренского РАН.

По диссертации имеются следующие замечания.

1. Все расчеты в диссертации выполнены в бездиссипативном пределе (оптически прозрачная среда). Вместе с тем, учет диссипации в целом ряде случаев может существенно повлиять на обсуждаемые динамические явления, особенно это касается области резонансных частот мод антиферромагнитного резонанса, где и должны сильно проявляться исследуемые эффекты. В частности, диссипация приведет к тому, что волновой вектор преломленной волны будет комплексным, что в целом сильно усложнит общую картину взаимодействия электромагнитной волны с поверхностью поглощающей АФМ среды (в частности, это касается изменения как топологии сечения поверхности волновых векторов, так и отсутствия области полного внутреннего отражения). В этой связи было бы целесообразно вычислять и моделировать непосредственно спектры комплексного (с учетом фазы) пропускания и отражения излучения, которые измеряются в экспериментах.
2. Автору следовало бы более подробно обсудить примеры реальных антиферромагнитных материалов, привести данные об их кристаллической и магнитной структуре, дать их основные характеристики (частоты АФМР, обменные поля и константы анизотропии, магнитные восприимчивости, диэлектрические и магнитоэлектрические параметры) и промоделировать соответствующие компоненты магнитных, диэлектрических и магнитоэлектрических восприимчивостей, а также остальных

рассчитываемых электродинамических характеристик, чтобы оценить возможность экспериментальной проверки изучаемых эффектов. Особенно это касается влияния электрического поля магнитную структуру, которое, как правило, очень слабое.

3. При анализе динамических эффектов в магнитоэлектрическом отклике автор ограничился линейным (или квадратичным) магнитоэлектрическим взаимодействием в термодинамическом потенциале антиферромагнетика. Было бы интересно расширить класс исследуемых антиферромагнетиков, в которых допускаются градиентные магнитоэлектрические слагаемые типа инвариантов Лифшица.

4. В автореферате полностью отсутствуют рисунки, что затрудняет восприятие результатов работы. В самой диссертации также следовало бы более детально проиллюстрировать графически решаемые задачи и изучаемые эффекты.

Указанные замечания не имеют принципиального характера и не снижают общей высокой оценки работы.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации, новые научные результаты и выводы.

Подводя итог, можно заключить, что диссертация А.С. Тарасенко «Поверхностная спин-волновая электродинамика антиферромагнитных сред с центром антисимметрии» является законченной научно-квалификационной работой, результаты которой имеют существенное значение не только для развития таких актуальных направлений физики магнитных явлений как резонансная магнитооптика, физика управляемых магнитных метаматериалов, но и для других, бурно развивающихся областей современной физики конденсированного состояния, в том числе, электродинамики сегнетоэлектрических и жидкокристаллических сред. Таким образом, и область исследований, с которой связана диссертация, и полученные в ней результаты полностью соответствуют п.п. 1, 3-5 паспорта научной специальности 01.04.11 - физика магнитных явлений (ВАК РФ).

Это позволяет утверждать, что по объему выполненных исследований, их актуальности и научному уровню данная диссертационная работа отвечает всем требованиям (п. II 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Тарасенко Артем Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Доклад по материалам диссертационной работы Тарасенко А.С. заслушан и обсужден на заседании семинара отдела субмиллиметровой спектроскопии ИОФ РАН «29» октября 2019 года.

Доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН»

Адрес: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

тел.: +7 (499) 503-8777 доб.1-75, E-mail: aavol@bk.ru

На обработку персональных данных согласен.

Александр Александрович Волков

Кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией диэлектрической спектроскопии магнитных материалов отдела субмиллиметровой спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН»

Адрес: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

тел.: +7 (499) 503-8777 доб.1-75, E-mail: mukhin@ran.gpi.ru

На обработку персональных данных согласен.

Александр Алексеевич Мухин

Подпись А.А. Волкова и Мухина А.А. удостоверяю

Ученый секретарь ИОФ РАН

д.ф.-м.н. В.В. Глушков