

ОТЗЫВ

официального оппонента Пятакова Александра Павловича на диссертационную работу Готовко Софьи Климентовны «Электронный спиновый резонанс в мультиферроиках», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.10 – физика низких температур.

Магнитные кристаллы, в которых имеет место конкуренция обменных взаимодействий, привлекают интерес исследователей многообразием и экзотичностью реализующихся в них спиновых структур: мультипольными параметрами порядка, несоизмеримые спиновыми циклоидами и геликоидами, фен-структурами и др. В силу особенностей расположения магнитных и не магнитных ионов в таких материалах имеет место иерархия обменных связей, приводящая к образованию квазиодномерного и квазидвумерного магнитного упорядочения.

В последнее время исследование таких квазинизко-размерных фрустрированных магнетиков приобрело особую **актуальность** в связи с обнаружением в них магнитоэлектрических свойств и возможностью на их примере исследовать механизмы возникновения магнитоиндуцированной электрической поляризации в мультиферроиках второго типа. Изучению именно таких материалов методами электронного спинового резонанса посвящена диссертационная работа С.К. Готовко.

Практическая значимость работы определяется возможностью управления магнитной структурой в данных материалах с помощью электрического поля. Хотя данные эффекты реализуются при низких температурах и их использование в традиционной микроэлектронике затруднено, возрастающая роль квантовых эффектов в низкотемпературных мультиферроиках обуславливают их значимость при разработке квантовых вычислительных систем.

Структура диссертации включает введение, 4 главы, заключение, список иллюстраций и таблиц, список литературы и приложение. Работа изложена на 117 страницах, содержит 26 иллюстраций и 1 таблицу. Список литературы включает 66 наименований.

Во введении излагаются цели и задачи, актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, научные положения, выносимые на защиту, достоверность результатов, апробация работы, сведения о публикациях по теме диссертации.

В первой методической главе диссертации, описаны материалы и экспериментальные методики. Особое внимание уделено модуляционному методу измерения влияния электрического поля на спектр

электронного спинового резонанса.

Со второй по четвертую главу в тексте диссертационной работы излагаются результаты исследований в трех видах материалов. Вторая глава посвящена изучению влияния электрического поля на магнитную структуру и спиновую динамику квазидвумерного фрустрированного магнетика CuCrO_2 , обнаружен сдвиг линий электронного спинового резонанса и зависимость направления сдвига от электрической поляризации, при том, что магнитным полем направление сдвига менять не удавалось. Это позволяет исключить линейный магнитоэлектрический эффект и говорить о том, что CuCrO_2 является мультиферроиком второго типа с электрической поляризацией магнитного происхождения.

Третья глава посвящена квазиодномерному фрустрированному магнетику LiCuVO_4 . Показано, что, как и в случае CuCrO_2 , магнитная структура этого соединения может быть управляема магнитным и электрическим полями: магнитное поле задает ориентацию плоскости, в которой вращаются спины относительно кристаллографических осей, а электрическое поле определяет киральность циклоиды (направления поворота спинов). Результаты теоретического рассмотрения и симметричного анализа, также проведенных в данной главе, находятся в согласии с полученными экспериментальными данными.

В четвертой главе проводится исследование фрустрированного квазиодномерного мультиферроика $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ (линарита). Хотя в главе не приведено подтверждений магнитоэлектрических свойств линарита, это соединение интересно и чисто в магнитном отношении, своей богатой фазовой диаграммой в сильных магнитных полях. С помощью анализа результатов эксперимента и соответствующей теоретической модели автор диссертации определил параметры анизотропии магнитной структуры, и, что особенно интересно, независимо подтвердил существование гипотетической фен-фазы, ранее предложенной для объяснения результатов экспериментов по упругому рассеянию нейтронов.

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертационной работы.

К **научной новизне** диссертации можно отнести исследование с помощью методов спинового электронного резонанса свойств трех различных групп квазинизкоразмерных фрустрированных мультиферроиков. Впервые показано влияние электрического поля на частоты магнитного резонанса в квазидвумерном антиферромагнетике CuCrO_2 и квазиодномерном антиферромагнетике LiCuVO_4 , а также получено экспериментальное подтверждение возникновения в $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ фен-фазы в высоких магнитных полях. Наряду со специфическими свойствами каждого из соединений, можно сделать и

некоторые обобщения: так показано, что в CuCrO_2 и LiCuVO_4 с помощью магнитного поля можно управлять ориентацией спиновой плоскости, а с помощью электрического поля – контролировать киральность спирали (направление вращения спинов в спиновой плоскости).

Достоверность результатов, полученных соискателем, следует из воспроизводимости результатов и согласием с результатами симметричного анализа, с теоретическими моделями данной работы и с предсказаниями литературных источников, а также с данными экспериментов других групп. Результаты работы были представлены в докладах на международных научных конференциях, представлены в 3 статьях, опубликованных в авторитетных журналах *Physical Review B*.

В целом, диссертационная работа представляет собой завершенное и целостное научное исследование, разработанные в рамках работы экспериментальные методики, а также теоретические модели могут в дальнейшем успешно применены в исследованиях мультиферроиков. При общей высокой оценке диссертационной работы следует отметить ряд замечаний:

1. Было бы полезным предпослать тексту работы указатель сокращений, он даже более востребован, чем указатель рисунков и таблиц. Так, в тексте встречаются наряду с общеупотребимыми аббревиатурами СВЧ, встречаются узкоспециальные: «ЭСР», «ДФП», «ЛОВ», «ДМ-взаимодействие».
2. Структура диссертации отличается от традиционной, начинаясь не с литературного обзора, а с описания экспериментальных методик. Литературные же данные приведены в главах, посвященных каждому из исследуемых материалов в отдельности. Такой подход имеет право на существование, однако, стоит отметить, что частные литературные обзоры не достаточно подробны и описание литературных данных несколько формально. Так на с.27 указано, что «Механизм возникновения поляризации в CuCrO_2 в рамках микроскопического рассмотрения был предложен в работе [33]», однако сам механизм не пояснен. Не пояснен термин «феноменологическая гидродинамическая теория» на с. 42 и с. 72. Также не пояснен термин «теория Дзялошинского-Ландау», хорошо бы дать ссылку. В обзоре ко второй главе уместно было бы дать литературные данные о симметричном анализе CuCrO_2 , проведенном ранее другими авторами.
3. с. 28 Фраза о том, что ось “с” является легкой для магнитных моментов, при указании констант анизотропии одна из которых на два порядка превышает другую несколько дезориентирует, поскольку возникает ощущение, что все моменты вытянуты вдоль оси с. В этом контексте лучше

- было бы говорить об анизотропии типа легкая плоскость» перпендикулярно вектору \mathbf{n} .
- с. 29 Также смущает фраза «поворот спиновой плоскости относительно вектора “ \mathbf{n} ”»: учитывая, что вектор “ \mathbf{n} ” является нормалью к плоскости, при ее вращении она будет переходить сама в себя. Имеет смысл говорить о вращении спинов в плоскости, но не самой плоскости.
 - с. 40 Одна часть (отклика) пропорциональна производной мощности прошедшего сигнала - не поясняется, производной по какой переменной.
 - В третьей главе, с. 56, в подписи к рисунку 3.6 используется ранее не введенное обозначение H_c , надо ли под ним понимать поле спин-флопа H_{s-f} ?
 - с. 65 Сказано, что в *высоких электрических* полях образцы LiCuVO_4 полностью поляризованы, т.е. присутствует «только один *магнитный* домен». Здесь, по видимости, имеется в виду циклоида одной киральности, что заслуживает отдельного пояснения.
 - В текст работы имеются другие недомолвки и стилистические огрехи: с. 69 «с нулевыми средними магнитными ионами»; с. 70 “электрическое поле влияет на ориентацию вектора \mathbf{n} ” (возможно имеется в виду не ориентация плоскости относительно кристаллографических осей, а киральность спирали); с. 73 “При приложении магнитного поля вдоль оси в спиральной плоскости вдоль легкой оси x ” – стиль
 - Содержание диссертации было более весомым, если бы были проведены магнитоэлектрические измерения в линарите $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$
 - Текст несвободен от англицизмов («ферроэлектрической» на с.70) и ряда опечаток, впрочем, немногочисленных: с. 24 «темературе», с. 31 «описывемых», с. 95 «экспериментов».

Вместе с тем, указанные замечания, имеющие характер пожеланий или редакторской правки, не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Основные результаты диссертации опубликованы в трёх статьях в рецензируемом журнале высокого уровня *Physical Review B* и доложены на российских и международных конференциях. Все поставленные в диссертационной работе цели достигнуты и соответствуют положениям, выносимым на защиту. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.10 «Физика низких температур» (по физико-математическим наукам) и удовлетворяет требованиям, установленным "Положением о порядке присуждения учёных степеней" №842 от 24.09.2013 г. и предъявляемым к кандидатским диссертациям. Соискатель Готова Софья Климентовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.10 «Физика низких температур».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор РАН,

профессор физического факультета, отделения радиофизики,

кафедры физики колебаний, МГУ имени М.В. Ломоносова

Пятаков Александр Павлович

10.10.22



Контактные данные:

тел.: +7-916-522-05-87, e-mail: pyatkov@physics.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация:
1.3.12(01.04.11) - Физика магнитных явлений

Адрес места работы: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, дом 1, строение 2, тел.: +7 916 313-75-79, e-mail: info@physics.msu.ru

Декан физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова,

доктор физико-математических наук,

профессор



Подпись проф. А.П. Пятакова заверяю,
сотрудник отдела кадров:

Начальник
отдела кадров



10.10.2022