

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Физический ИНСТИТУТ



имени
П.Н.Лебедева

Российской академии наук

Ф И А Н

119991, Москва, ГСП-1
Ленинский проспект, 53, ФИАН
Телефоны: +7 (499) 135 14 29
 +7 (499) 132 65 54
Телефакс: +7 (499) 135 78 80
E-mail: office@sci.lebedev.ru
www.lebedev.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. директора Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Физический институт
им. П.Н. Лебедева Российской академии
наук,
доктор физ.-мат. наук


«07» октября 2021 г.



В.А. Вайбов

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

В последнее время наблюдается рост интереса к магнитным материалам, в которых реализуются спиральные магнитные структуры, поскольку такое спиральное упорядочение может индуцировать спонтанную электрическую поляризацию в этих материалах. Связь между магнитным и электрическим упорядочением в таких материалах, называемых мультиферроиками, даёт возможность управлять их магнитной структурой с помощью электрического поля. Научные исследования мультиферроиков, а именно изучение влияния электрического поля на их магнитные свойства, открывают широкие перспективы в области практических приложений, таких как устройства магнитной памяти, СВЧ-техники, магнитофотоники и магноники.

Актуальность темы. Диссертационная работа С.К. Готовко посвящена экспериментальному изучению магнитной структуры квазинизкоразмерных фрустрированных мультиферроиков CuCrO_2 , LiCuVO_4 и $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ (линарит), в которых в связи с фрустрацией обменных взаимодействий при магнитоупорядочении реализуются уникальные фазовые диаграммы. Данные соединения являются мультиферроиками: в области магнитных полей, при которых в данных соединениях реализуется планарная спиральная несоизмеримая структура, в них возникает спонтанная электрическая

поляризация, направление и величину которой можно контролировать с помощью внешнего магнитного поля. Целью работы С.К. Готовко было изучить обратный эффект, а именно влияние электрического поля на магнитную структуру. Для этого были проведены исследования электронного спинового резонанса (ЭСР) в CuCrO_2 и LiCuVO_4 в присутствии электрического поля. Такие исследования актуальны как с точки зрения фундаментальной науки, так и с точки зрения возможных практических применений, например, в элементах памяти. Вторая часть диссертации посвящена исследованию магнитной структуры квазиодномерного цепочечного магнетика со спином $S=1/2$ $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ линарит, который представляет исключительный интерес с точки зрения возможности реализации в нём экзотических фаз, таких как фазы с мультипольными параметрами порядка и фазы волны спиновой плотности. Мультичастотные ЭСР-исследования линарита позволили определить необходимые для адекватного описания магнитных свойств параметры анизотропии, а также идентифицировать магнитную фазу, реализующуюся в высоких магнитных полях. В связи с этим, проведённые С.К. Готовко исследования мультиферроиков CuCrO_2 , LiCuVO_4 и $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ (линарит) являются значительными как в фундаментальном, так и в возможном прикладном аспектах.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения, изложена на 117 страницах машинописного текста и включает в себя 26 рисунков, 1 таблицу, список литературы из 66 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель диссертационной работы и поставлены задачи исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** обсуждаются методы, с помощью которых проводились исследования. Основным методом исследования являлся электронный спиновый резонанс. Для изучения влияния электрического поля на спектр ЭСР в мультиферроиках CuCrO_2 и LiCuVO_4 использовался модуляционный метод, дополнительные исследования в линарите в диапазоне частот 140-250 ГГц проводились с помощью квазиоптического метода. Эксперименты проводились при температурах $T = 0.5-25$ К. В главе подробно рассмотрена схема ЭСР-спектрометра, описан принцип регистрации сигналов малой величины с помощью модуляционного метода, приведена схема квазиоптических измерений.

Вторая глава содержит результаты исследования влияния внешнего электрического поля на магнитные свойства квазидвумерного мультиферроика CuCrO_2 , а именно на спектр ЭСР в данном соединении. В главе приведены основные сведения о кристаллографической и магнитной структурах данного соединения и детали эксперимента. Сдвиг резонансного

поля в достигаемых экспериментально электрических полях мал по сравнению с шириной линии ЭСР, поэтому для его обнаружения использовался модуляционный метод – изучались осцилляции резонансной кривой под действием переменного электрического поля. В результате исследований впервые экспериментально был обнаружен и измерен сдвиг резонансного поля в мультиферроиках. Изучены основные характеристики этого нового эффекта.

В третьей главе продемонстрированы результаты изучения влияния внешнего электрического поля на магнитные свойства квазиодномерного мультиферроика LiCuVO_4 . Во введении к главе представлены сведения о кристаллографической и магнитной структуре данного вещества. Направление электрической поляризации относительно спиновой структуры в этом магнетике отлично от случая, исследованного в предыдущей главе. Для измерения величины сдвига резонансной кривой также использовался модуляционный метод. Был обнаружен сдвиг резонансного поля во внешнем электрическом поле. Для объяснения экспериментальных результатов был проведён симметричный анализ. В рамках макроскопического подхода описана связь между возникающей в данном соединении спонтанной электрической поляризацией и магнитным параметром порядка. Анализ показывает, что смена направления вектора электрической поляризации при смене знака внешнего электрического поля приводит к смене направления магнитного параметра порядка, определяющего киральность магнитной структуры. Было проведено количественное сравнение ожидаемых в результате анализа величин сдвига резонансного поля во внешнем электрическом поле и сдвигов, наблюдаемых непосредственно в эксперименте.

Четвертая глава посвящена результатам мультиспектрального изучения магнитной структуры квазиодномерного мультиферроика $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ (линарит). Магнитные ионы Cu^{2+} в данном соединении формируют слабо взаимодействующие цепочки спинов $S = 1/2$, в то же время соотношение величин обменных взаимодействий между магнитными моментами ближайших и следующих за ближайшими ионов близко к критическому, при котором реализуется полностью поляризованное ферромагнитное состояние. В таких веществах ожидается наблюдение экзотических фаз, таких как фазы с мультипольными параметрами порядка и фаза волны спиновой плотности вблизи поля насыщения. Поле насыщения в линарите составляет ~ 10 Тл, что находится в удобной для экспериментатора области полей. В то же время в линарите представлена уникальная фазовая диаграмма: в малых полях реализуется спиральная планарная несоизмеримая структура, в промежуточных полях реализуется соизмеримая скошенная антиферромагнитная фаза, а в высоких полях

реализуется фаза, которая может быть идентифицирована как фаза волны спиновой плотности или веерная фаза. Представленные в диссертационной работе спектры ЭСР позволяют определить микроскопические параметры анизотропии, необходимые для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований линарита, и идентифицировать реализующуюся в высоких полях фазу как веерную фазу, а не фазу волны спиновой плотности, предлагавшуюся в ранних работах. Необходимо отметить, что преимуществом метода ЭСР в данном случае является высокое энергетическое разрешение, которое позволило определить параметры анизотропии.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Наиболее значимыми научными результатами диссертационной работы С.К. Готовко являются следующие:

1. Обнаружено влияние электрического поля на частоты магнитного резонанса в квазидвумерном антиферромагнетике CuCrO_2 . Экспериментальные результаты подтверждают предсказания теоретического анализа, проведённого в рамках феноменологического макроскопического подхода.

2. Экспериментально изучено влияние электрического поля на спектр ЭСР и магнитную структуру в LiCuVO_4 в спиральной фазе. В области малых полей обнаружен сдвиг линий резонансного поглощения. В полях выше поля спин-переориентационного перехода, в которых ожидается отсутствие электрической поляризации, обнаружен сдвиг спектра ЭСР, что свидетельствует о значительном влиянии электрического поля на характер спин-переориентационного перехода.

3. Проведён симметричный анализ магнитной структуры в мультиферроике LiCuVO_4 в рамках макроскопической модели. Описана связь между спонтанной электрической поляризацией в данном веществе и магнитным параметром порядка. Теоретически описан поворот структуры и рассчитан спектр ЭСР в присутствии внешних электрического и магнитного полей.

4. Изучена связанная динамика магнитной системы и электрической поляризации в присутствии внешнего электрического поля для мультиферроиков CuCrO_2 и LiCuVO_4 .

5. Экспериментально показано, что с помощью магнитного поля можно управлять ориентацией спиновой плоскости в соединениях CuCrO_2 и LiCuVO_4 , а с помощью электрического поля можно контролировать направление вращения спинов в спиновой плоскости.

6. Проведено мультимчастотное исследование спектра ЭСР в квазиодномерной магнетике $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ (линарит) в области полей вплоть до поля насыщения. Получены основные макроскопические и микроскопические параметры анизотропии. Полученные спектры ЭСР подтверждают, что в низких полях реализуется планарная спиральная структура, а в промежуточных полях при ориентациях полей, близких к направлению вдоль спиновой цепочки, реализуется соизмеримая антиферромагнитная фаза. Спектры ЭСР в высоких полях могут быть интерпретированы в рамках реализации веерной фазы.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов работы достигнуты использованием современного научного оборудования, физической обоснованностью используемых автором подходов, а также согласованностью полученных данных с известными результатами в области исследований сложных магнитных систем и мультиферроиков ЭСР и другими экспериментальными методами.

Материалы диссертации прошли широкую апробацию на международных и российских конференциях и опубликованы в ряде статей в высокорейтинговом рецензируемом научном журнале «Physical Review B».

Научная и практическая значимость работы

Полученные в диссертации научные результаты являются новыми и вносят существенный вклад в понимание физических свойств квазинизкоразмерных мультиферроиков. Наиболее существенными результатами являются: обнаружение сдвига спектра ЭСР в мультиферроиках CuCrO_2 и LiCuVO_4 , описание связи магнитного параметра порядка и спонтанной электрической поляризации в LiCuVO_4 ; определение параметров анизотропии в $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$.

Представленные результаты могут использоваться при дальнейшем изучении квазинизкоразмерных мультиферроиков, расширяют возможности методики ЭСР. С практической точки зрения данные результаты работы могут найти применение в области разработок энергоэффективной магнитной памяти.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования в исследованиях геликоидальных магнитных систем и мультиферроиков. В частности, в ИОФ РАН, ФИ РАН, ФИЦ КазНЦ РАН, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Институт физики микроструктур РАН, ведущими университетами, такими как МГУ, Санкт-Петербургский университет, МИЭТ, МИРЭА, Уральский федеральный университет, КФУ и др.

Необходимо отметить следующие замечания:

1. В разделе 3.3 диссертации приведены детали эксперимента в LiCuVO_4 , однако не указана частота модуляции переменного электрического поля. Оставлен открытым вопрос зависимости результатов эксперимента от выбранной частоты модуляции переменного электрического поля.

2. В тексте не содержится описание и анализ микроскопического механизма возникновения поляризации в исследованных веществах.

3. В тексте не отмечается, является ли несоизмеримость магнитной структуры обязательным условием возникновения спонтанной электрической поляризации.

Представленные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. В целом, диссертационная работа Готовко С.К. является законченным научным исследованием, содержит новые результаты, имеющие большую научную значимость и практическую ценность. Основные результаты работы опубликованы в виде 3 статей в ведущих рецензируемых журналах (входящих в список журналов ВАК, индексируемых в базах РИНЦ, Web of Science и Scopus), а также неоднократно докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат достоверно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Работа С.К. Готовко на тему «Электронный спиновый резонанс в мультиферроиках» является логически завершенным исследованием и удовлетворяет требованиям пункта № 9 Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, утвержденных постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., № 842, а ее автор, Готовко Софья Климентовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.10 - физика низких температур.

Отзыв составлен главным научным сотрудником лаборатории ЯМР твердого тела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), доктором физико-математических наук по специальности 1.3.10 (01.04.09) - физика низких температур Гиппиусом Андреем Андреевичем.

Доклад С.К. Готовко по материалам диссертации был заслушан и обсужден на семинаре Отделения физики твердого тела (ОФТТ) ФИАН 7 октября 2022 г. Отзыв на диссертационную работу одобрен на заседании Ученого совета ОФТТ ФИАН, протокол № 10/22 от 7 октября 2022 г.

Главный научный сотрудник лаборатории
ЯМР твердого тела ФИАН,

доктор физико-математических наук

тел. +7(499)132-64-24,

gippius@mail.ru

Гиппиус Андрей Андреевич

Главный научный сотрудник, исполняющий
обязанности руководителя ОФТТ ФИАН.

доктор физико-математических наук

тел. 8(499)135-41-74,

demihovei@lebedev.ru

Демихов Евгений Иванович

Подписи А.А. Гиппиуса и Е.И. Демихова заверяю:

Заместитель директора

кандидат физико-математических наук

Колобов Андрей Владимирович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Россия, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53, тел. +7(499)135-42-64, факс +7(499)135-78-80. <http://www.lebedev.ru:office@lebedev.ru>