

О Т З Ы В

официального оппонента о диссертационной работе ФРЕЙДМАНА Александра Леонидовича “*Экспериментальное исследование прямого и обратного магнитоэлектрического эффекта в монокристаллах $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$ и $\text{SmFe}_3(\text{VO}_3)_4$* ”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

На протяжении последних лет мультиферроики привлекают к себе пристальное внимание исследователей. Сосуществование двух параметров порядка – в данном случае магнитного и сегнетоэлектрического – не часто встречающееся явление, но мультиферроики интересны не только с точки зрения фундаментальной физики конденсированных сред, но и тем, что сулят определенные перспективы практических применений в современных электронных технологиях. Однако наиболее привлекательные материалы этого класса имеют сложную кристаллическую структуру, да и в понимании природы магнитоэлектрического (МЭ) эффекта немало белых пятен. Поэтому получить новые, значимые результаты в этой актуальной области физики – непростое дело, требующее глубокого понимания физики, экспериментального мастерства и изрядной изобретательности. В этой связи не вызывает сомнений актуальность сформулированных в диссертации задач экспериментального исследования прямого и обратного МЭ эффектов в монокристаллах алюмобората гольмия $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$ и ферробората самария $\text{SmFe}_3(\text{VO}_3)_4$. Следует подчеркнуть, что А.Л. Фрейдман в своем исследовании применяет комплексный метод изучения МЭ свойств выбранных систем, измеряя не только ME_H –эффект (изменение поляризации образца ΔP во внешнем магнитном поле H), но и обратный ему ME_E – эффект (изменение намагниченности под действием электрического поля), а также диэлектрическую проницаемость как функцию магнитного поля и температуры (т.е. магнитодиэлектрический эффект). Тем самым автор диссертации в значительной мере преодолевает некую однобокость, свойственную большинству подобных экспериментальных работ, строящихся на измерении только ME_H –эффекта.

В первой главе диссертации (литературный обзор) автор рассматривает вопросы, связанные с феноменологическим подходом к описанию МЭ эффектов, методиками измерения МЭ свойств материалов, а также опубликованным в печати результатам изучения оксиборитов с упором на соединения $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$ и $\text{SmFe}_3(\text{VO}_3)_4$, исследованию которых посвящен его труд.

Вторая глава посвящена разработке экспериментальной установки для измерения прямого и обратного МЭ эффектов, созданной на базе существовавшего в институте вибрационного магнитометра (который, насколько я понимаю, тоже был построен силами самого Института физики). Этот раздел диссертации производит очень сильное впечатление. Во-первых, потому, что установку, созданную автором диссертации, можно назвать

уникальной, поскольку она позволяет проводить измерения ME_E – эффекта на монокристаллах. Сейчас публикации такого рода в литературе отсутствуют. Во-вторых, Александр Леонидович реализовал на этой установке оригинальную методику измерения ME_E – эффекта, основанную на том, что намагниченность в образце создается за счет подачи на обкладку образца синусоидального переменного напряжения. Преимущество этого метода состоит в том, что он позволяет детектировать сигнал на нескольких гармониках. Таким образом, измеряя сигнал на первой гармонике можно определить вклад в намагниченность от пьезоэлектрического эффекта, а на второй – вклад от электрострикции. Автор справедливо отмечает, что измерения ME_H – эффекта не позволяют зафиксировать стрикционный вклад, так как вынужденная деформация не изменяет поляризации образца. В-третьих, как уже отмечалось, на созданной автором установке можно измерять прямой и обратный магнитоэлектрические эффекты, а также диэлектрическую проницаемость и магнитодиэлектрический эффект. Важно, что все это можно измерять на одном и том же образце. Далее, А.Л. Фрейдман провел тщательную работу по калибровке установки во всех предполагаемых режимах измерений. Все это показывает высокий профессиональный уровень автора диссертации как физика-экспериментатора.

В третьей главе приводятся результаты изучения магнитоэлектрического эффекта в монокристалле $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$. Это соединение не является мультиферроиком в общепринятом смысле, так как в нем отсутствует магнитное упорядочение. Однако, в нем наблюдается гигантский ME_H – эффект. Механизмы магнитоэлектрического взаимодействия, в частности, роль редкоземельного иона, в этом соединении изучены далеко не полностью, поэтому автор поставил перед собой цель исследовать ME_E – эффект и диэлектрическую проницаемость, чтобы прояснить микроскопический механизм магнитоэлектрического эффекта в данном соединении. Прежде всего А.Л. Фрейдман провел измерения намагниченности монокристалла $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$ в зависимости от температуры и величины магнитного поля и показал, что в этом соединении ось третьего порядка c является осью легкого намагничивания. Далее он выполнил подробные измерения ME_E – эффекта на монокристалле $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$ в зависимости от температуры и величины магнитного поля. Эти данные получены им впервые. Он показал, что изменение намагниченности $\Delta M(E, H, T)$ – линейная функция приложенного электрического поля, однако тангенс угла наклона $\Delta M(E)$ сильно зависит от величины магнитного поля. Отметим, что намагниченность измерялась вдоль и перпендикулярно направлению электрического поля. Измерения ME_H – эффект показали, что изменение поляризации в зависимости от величины магнитного поля не является линейным. Анализируя полученные данные, автор построил магнитоэлектрическую проницаемость ME_E – эффекта $\beta_{ij} = \Delta M_{ij} / E_j$ для двух конфигураций измерений и показал, что эти функции имеют максимумы в зависимости от магнитного поля, сдвигающиеся в стороны более высоких полей при повышении температуры. Далее, автор выполнил измерения температурной и

полевой зависимостей величины магнитоэлектрической поляризации ΔP_{yy} , т.е. ME_H – эффекта в тех конфигурациях, в которых ранее эффект не изучался. Магнитное поле прикладывалось вдоль оси y кристалла, поляризация измерялась вдоль того же направления. В соответствии с ранее опубликованными данными, изменение поляризации в зависимости от величины магнитного поля не является линейным. А.Е. Фрейдман отмечает, что, хотя качественно полученные им кривые согласуются с аналогичными данными, опубликованными другими авторами, абсолютная величина эффекта в его монокристалле оказалась примерно в 4 раза меньше. Автор связывает это обстоятельство со структурными особенностями монокристаллов (с наличием двойников).

Любопытна замеченная автором диссертации схожесть форм зависимости магнитоэлектрическую проницаемость ME_E – эффекта $\beta_{yy}(H)$ и восприимчивости $\alpha_{yy}(H)=d(\Delta P(H))/dH$ ME_H -эффекта, причем наиболее похожи кривые при низких температурах.

Примечательны и результаты измерения диэлектрической проницаемости как функции температуры и приложенного магнитного поля. В этом эксперименте магнитное поле прикладывалось вдоль направления y кристалла (перпендикулярного кристаллографическому направлению a и оси c кристалла), а электрическая ёмкость измерялась вдоль осей x (т.е. вдоль a) и y . Диэлектрическая проницаемость оказалась анизотропной функцией, уменьшающейся с температурой и растущей с увеличением магнитного поля при измерении вдоль направления x (т.е. перпендикулярно магнитному полю), в то время как при измерении вдоль направления y (параллельно полю) проницаемость также уменьшается с ростом температуры, но падает и при увеличении магнитного поля.

Чтобы систематизировать полученный обширный экспериментальный материал и понять механизм возникновения МЭ явлений в оксоборите $HoAl_3(BO_3)_4$, Александр Леонидович предложил, как он её назвал, качественную микроскопическую модель (я бы назвал её скорее качественной структурной моделью), рассматривая взаимодействие $4f$ электронов ионов Ho^{3+} с ближайшим кислородным окружением. Как представляется, автору удалось в первом приближении объяснить сложное поведение магнитострикции в этом соединении, отличие знаков продольного и поперечного ME_H -эффектов, наличие максимумов в зависимости ME_E -эффекта от внешнего магнитного поля, а также особенности зависимости диэлектрической проницаемости от магнитного поля, т.е. практически все обнаруженные закономерности магнитоэлектрических явлений в этом соединении.

В четвертой главе диссертации А.Л. Фрейдман представляет результаты исследования монокристалла $SmFe_3(BO_3)_4$, Выбор этого материала автор аргументирует тем, что, во-первых, в нем наблюдается гигантский магнитодиэлектрический эффект, а во-вторых, в отличие от алюмобората гольмия, в нем присутствует антиферромагнитная подсистема железа, т.е. в $SmFe_3(BO_3)_4$ поляризация имеет несобственный характер и возникает

вследствие антиферромагнитного упорядочения ($T_N \approx 40$ К) ионов Fe^{3+} , индуцирующим также сегнетоэлектрическое упорядочение. Кроме того, хотя на данном соединении проводились измерения ME_H - и магнитоэлектрического $\varepsilon(H)$ эффектов, однако, данные по ME_E -эффекту, как и в случае алюмобората гольмия, в литературе отсутствуют. Таким образом, данные о ME_E -эффекте в $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ получены Александром Леонидовичем впервые, причем данные обширные и, по моему мнению, весьма надежные.

Автор анализирует отличия магнитоэлектрического эффекта в двух изучаемых им соединениях. Он подчеркивает, что отличия в поведении МЭ эффектов в $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ по сравнению с $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$ (сдвиг максимума МЭ эффекта в сторону меньших магнитных полей при низких температурах, противоположное температурное поведение максимума МЭ эффекта как функции магнитного поля) обусловлены влиянием подрешетки железа. Однако самым замечательным достижением Александра Леонидовича при исследовании $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ является, на мой взгляд, обнаружение магнитоэлектрического отклика на частоте, в два раза превышающей частоту прикладываемого электрического поля, т.е. на второй гармонике. Замечательно также, что вторая гармоника ME_E -эффекта оказалось строго квадратичной функцией электрического поля, что и объясняет ее появление на удвоенной частоте.

Т.о. диссертационная работа А.Л. Фрейдмана представляет собой законченный научный труд, содержащий существенные новые результаты, которые сформулированы в Заключение. Автору, несомненно, удалось решить те задачи, которые перед ним стояли. И сделал он это, я бы сказал, с блеском, продемонстрировав высокое профессиональное мастерство физика-экспериментатора и глубокое понимание физики магнитоэлектрических явлений.

Вместе с тем, считаю необходимым сделать несколько замечаний.

1. Несомненным достоинством работы А.Л. Фрейдмана является то, что измерения МЭ явлений в исследуемых системах выполнены на монокристаллах. К сожалению, ни в диссертации, ни в оригинальных публикациях автора по теме диссертации, ничего не говорится об аттестации исследуемых монокристаллов. Представляется, что в экспериментальных работах это совершенно необходимо делать.

2. По моему мнению, в заключении автору следовало бы обсудить полученные им результаты в более широком контексте физики магнитоэлектрических явлений, например, сравнивая МЭ свойства алюмобората гольмия и ферробората самария с известными свойствами других МЭ материалов. На мой взгляд, вклад А.Л. Фрейдмана в изучение физики МЭ явлений от этого только бы повысился.

3. На некоторых рисунках, приведенных в диссертации, (например, на рисунке 3.1) не указана температура измерений. Как правило, легко догадаться, о какой температуре идет речь, но все-таки в подписях к рисункам приятно приводить исчерпывающую информацию.

4. В качестве чисто редакционного замечания я бы советовал автору обратить внимание на знаки препинания (6 строка сверху на стр. 6, в нижнем абзаце на стр. 10, во втором абзаце раздела 1.4 на стр. 21 и т.д.).

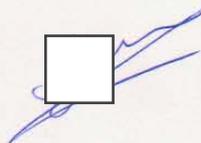
Указанные замечания ни в коей мере не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Диссертация написана хорошим языком, легко читается и оставляет очень хорошее общее впечатление от проделанной автором работы.

Основные результаты, приведенные в диссертации, своевременно опубликованы в реферируемых научных журналах и докладывались на международных.

Автореферат полно и правильно отражает основные положения диссертации.

Таким образом, есть все основания заключить, что диссертация «Экспериментальное исследование прямого и обратного магнитоэлектрического эффекта в монокристаллах $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$ и $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ » удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Фрейдман Александр Леонидович – безусловно заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Главный научный сотрудник
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ
им. академ. Е.И. Забабахина»,
д.ф.-м.н.



А.В. Мирмельштейн

Подпись А.В. Мирмельштейна удостоверяю

Ученый секретарь
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ
им. академ. Е.И. Забабахина»,
к.ф.-м.н.



В.Н. Ногин

Тел. раб.: +7 (35140) 5 11-55

email: mirtf@vniitf.ru

Почтовый адрес: Федеральное Государственное Унитарное Предприятие
«Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики
имени академ Е.И. Забабахина»
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»)
456770 Снежинск, Челябинская область,
ул. Васильева, 13, а.я. 245

А.В. Мирмельштейн

Список основных публикаций 2011-16

1. J.G. Tobin, S.-W. Yu, B.W. Chung, M.V. Ryzhkov, **A. Mirmelstein**
Direct comparison of spectroscopic data with cluster calculations of plutonium dioxide and uranium dioxide
J. Vac. Sci. Technol. A, vol. **31** No.1 (2013) 013001.
2. M.V. Ryzhkov, **A. Mirmelstein**, S.-W. Yu, B.W. Chung, and J.G. Tobin
Probing Actinide Electronic Structure through Pu Cluster Calculations
International Journal of Quantum Chemistry **113** (2013) 1957-1965.
3. M.V. Ryzhkov, **A. Mirmelstein**, B. Delley, S.-W. Yu, B.W. Chung, J.G. Tobin
The Effects of Mesoscale Confinement in Pu Clusters and Isolated Particles
Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena **194** (2014) 45-56.
4. A. Mirmelstein, A. Podlesnyak, António M. dos Santos, G. Ehlers, O. Kerbel, V. Matvienko, A.S. Sefat, B. Saparov, G. Halder, J.G. Tobin
Pressure-Induced Structural Phase Transition in CeNi: X-ray and Neutron Scattering Studies and First-Principles Calculations
Phys. Rev. B **92** (2015) 054102.

Главный научный сотрудник
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ
им. академ. Е.И. Забабахина»,
д.ф.-м.н.



А.В. Мирмельштейн

Подпись А.В. Мирмельштейна удостоверяю

Ученый секретарь
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ
им. академ. Е.И. Забабахина»,
к.ф.-м.н.



В.Н. Логин