04,05,16

# Особенности спектра эффекта фарадея в $FeBO_3$, обусловленного компонентой намагниченности параллельной оси $C_3$

© В.Е. Зубов[1], А.Д. Кудаков[1], М.Б. Стругацкий[2], С.В. Ягупов[2]

[1] Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[2] Физико-технический институт Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

E-mail: kudakov@inbox.ru

Поступила в Редакцию 26 мая 2025 г.
В окончательной редакции 27 мая 2025 г.
Принята к публикации 27 мая 2025 г.

В борате железа в области его прозрачности впервые измерена спектральная зависимость эффекта Фарадея, обусловленного намагниченностью параллельной оси $C_3$ кристалла. На спектральной зависимости наблюдался пик эффекта на длине волны света равной 475 nm. Происхождение пика на спектральной зависимости эффекта связано с переходом $({}^6A_{1g} \to {}^4A_{1g}, {}^4E_g)$ в ионе $Fe^{3+}$ бората железа.

**Ключевые слова:** эффект Фарадея.

DOI: 10.61011/FTT.2025.05.60747.143-25

Слабый ферромагнетик борат железа $FeBO_3$ к настоящему времени хорошо изучен, но до сих пор он привлекает внимание исследователей как модельный объект для изучения новых магнитных свойств, проявляющихся, в частности, в экспериментах по сверхбыстрой магнитной динамике [1] и при сверхвысоких давлениях [2,3]. Кроме того, исследования магнитных свойств кристаллов $FeBO_3$ как модельных объектов позволяют углубить наши представления о природе магнитной анизотропии, в частности, о взаимодействии Дзялошинского-Мория. Обзор последних результатов по исследованию магнитных свойств бората железа представлен в работе [4]. Подробно изучены также магнитооптические свойства бората железа, в частности, линейные магнитооптические эффекты (см. [5,6]). В работе [7] при освещении образцов бората железа белым светом впервые наблюдался эффект Фарадея (ЭФ), обусловленный компонентой намагниченности параллельной оси $C_3$ кристалла.

Появление небольшой спонтанной намагниченности $(m_D)$ в базисной плоскости ромбоэдрических антиферромагнетиков является естественным следствием симметрии этих кристаллов [8]. Намагниченность $m_D$ возникает при учете в разложении по компонентам намагниченности подрешеток термодинамического потенциала антиферромагнетика членов не выше второго порядка. Спонтанная намагниченность обусловлена релятивистскими взаимодействиями спин-решетка кристалла. Отношение величины $m_D$ к сумме величин намагниченностей подрешеток антиферромагнетика пропорционально квадрату отношения скорости электронов в кристалле к скорости света $(\mathrm{v/c})^2$ и составляет $10^{-2}$–$10^{-5}$. При учете в термодинамическом потенциале членов четвертого порядка по компонентам намагниченности подрешеток теория предсказывает наличие спонтанной намагниченности $(m_z)$ вдоль оси третьего порядка $C_3$ кристалла перпендикулярной базисной плоскости. Относительная величина $m_z$ пропорциональна $(\mathrm{v/c})^4$. Угловая зависимость $m_z$ при повороте $m_D$ вокруг оси $C_3$ описывается выражением $m_z = m_{z0} \cdot \cos 3\varphi$, где $\varphi$ — угол в базисной плоскости между направлением $m_D$ и линией пересечения базисной плоскости с зеркальной плоскостью симметрии. Существование компоненты $m_z$ было обнаружено в борате железа Фландерсом методом вращения образца вокруг оси $C_3$ в постоянном магнитном поле параллельном базисной плоскости и измерением компоненты $m_z$ на частоте, в три раза превышающей частоту вращения [9]. Измеренная величина $m_z$ оказалась в две с половиной тысячи раз меньше, чем $m_D$. Отметим существенные отличия между компонентами $m_D$ и $m_z$:

– большая разница в величинах;

– $m_D$ лежит в базисной плоскости бората железа и ее величина не зависит от ориентации в этой плоскости;

– $m_z$ перпендикулярна базисной плоскости и при повороте спинов магнитных подрешеток вокруг оси $C_3$ на 360° компонента $m_z$ меняет знак 6 раз.

В работе исследована спектральная зависимость ЭФ, обусловленного компонентой $m_z$, в области прозрачности бората железа. Исследованные образцы представляют собой тонкие пластинки зеленого цвета параллельные базисной плоскости кристалла с поперечными размерами $\sim 3$ mm. Толщина образцов составляла 4.2 и 6.6 $\mu$m. Среди имеющихся образцов были выбраны наиболее тонкие, поскольку они обладают высокой оптической однородностью и совершенными гранями. Совершенные плоские поверхности образца и объемная однородность играют существенную роль в данном исследовании. Источником света служила дуговая

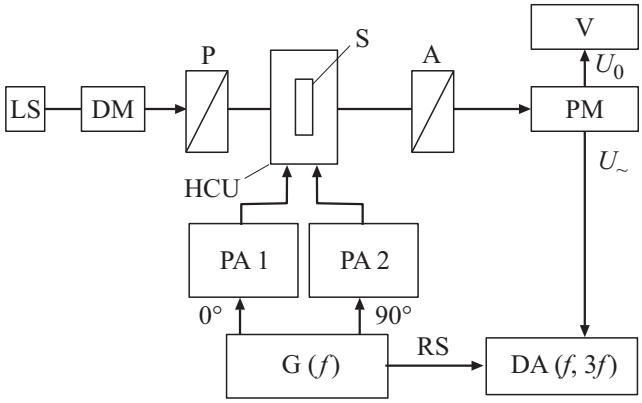


**Рис. 1.** Блок-схема установки.

ксеноновая лампа, свет от которой поступал на монохроматор. Луч света ориентировался перпендикулярно плоскости образца вдоль его оси $C_3$. Точная ориентация света вдоль оси $C_3$ важна, поскольку отклонение луча от оси приводит к появлению ЭФ, обусловленного компонентой $m_D$, который на порядки больше ЭФ, обусловленного компонентой $m_z$. Образец помещался во вращающееся магнитное поле, плоскость вращения которого совпадала с базисной плоскостью кристалла $FeBO_3$. Вращающееся магнитное поле создавалось двумя парами одинаковых катушек Гельмгольца, ориентированных перпендикулярно друг к другу. Фаза тока в парах катушек отличалась на 90°. Частота вращающегося магнитного поля была установлена $f = 265$ Hz, а величина поля составляла 10 Oe, что на порядок превосходило поле насыщения в базисной плоскости образцов [10]. Измерения эффекта Фарадея производились на утроенной частоте $3f$ с помощью цифрового измерительного усилителя Saluki-SE1022, который позволяет производить одновременное измерение сигналов на частотах $f$ и $3f$ с использованием цифрового фазового детектирования. В качестве опорного на усилитель подается синусоидальный сигнал с генератора на частоте $f$. Опорный сигнал на частоте $3f$, согласованный по фазе с сигналом на частоте $f$, создается в самом усилителе.

Блок-схема установки представлена на рис. 1. LS — источник света, DM — двойной монохроматор, P — поляризатор, S — образец, HCU — блок катушек Гельмгольца, A — анализатор, PM — фотоумножитель, V — вольтметр, DA — цифровой измерительный усилитель, G — генератор, PA 1 и PA 2 — усилители мощности, RS — опорный сигнал.

Плоскость поляризации анализатора повернута по отношению к плоскости поляризации поляризатора, что позволяет преобразовать поворот плоскости поляризации света, создаваемый образцом, в изменение интенсивности света пропорциональное углу поворота. Угол между плоскостями поляризации поляризатора и анализатора составляет 45°.

Работа измерительного усилителя на различных частотах звукового диапазона была протестирована путем подачи на его вход прямоугольного сигнала с известной амплитудой, изменявшейся на 5 порядков, что охватывает диапазон измеряемых сигналов. На выходе усилителя регистрировались амплитуды первой и третьей гармоник измеряемого прямоугольного сигнала. Результаты тестирования показали хорошее соответствие амплитуд указанных гармоник ожидаемым значениям, получаемым в результате разложения прямоугольного сигнала в ряд Фурье.

Вследствие большого различия величин ЭФ, обусловленного компонентами намагниченности $m_D$ и $m_z$, возникает вопрос о возможном влиянии первого ЭФ на результаты измерения второго. Отклонение луча света от оси $C_3$, а также расходимость пучка приводят во вращающемся магнитном поле к появлению ЭФ, обусловленного намагниченностью $m_D$ и имеющего частоту $f$. Расходимость пучка света была минимизирована с помощью диафрагм. Диаметр луча составлял $\sim 1$ mm, угловая расходимость луча была меньше, чем $10^{-2}$ радиана. Для точной установки светового луча вдоль оси $C_3$ производился поворот образца относительно двух взаимно перпендикулярных осей перпендикулярных к падающему на образец лучу света с помощью микрометрических подач при одновременном измерении ЭФ на первой гармонике с целью его минимизации.

Измерения спектральной зависимости ЭФ, обусловленного компонентой намагниченности $m_z$, в диапазоне длин волн света ($\lambda$) 450–670 nm в обоих исследованных образцах показали аналогичные результаты. На рис. 2 представлен обусловленный компонентой $m_z$ спектр ЭФ, измеренный в образце толщиной 4.2 $\mu$m.

Из рисунка видно, что при увеличении длины волны света величина эффекта резко возрастает от 1.5 deg/cm при $\lambda = 450$ nm до максимума 4 deg/cm при $\lambda = 475$ nm и затем сначала резко, а затем монотонно спадает до 1 deg/cm при $\lambda = 670$ nm (отметим, что из-за некорректной работы канала измерения постоянного сигнала $U_0$

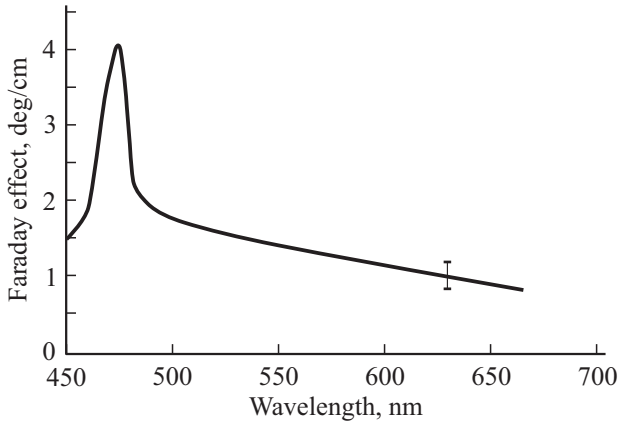


**Рис. 2.** Спектр ЭФ, обусловленный компонентой $m_z$.

в работе [7], величина ЭФ в работе [7], обусловленного компонентой $m_z$, значительно меньше, чем на рис. 2).

Качественно поведение ЭФ, обусловленного компонентой намагниченности $m_z$, в исследованном диапазоне $\lambda$ согласуется с поведением ЭФ, обусловленного компонентой намагниченности $m_D$ и представленного в работе [11]. Более того, пик ЭФ, наблюдаемый в настоящей работе, практически совпадает по положению с пиком ЭФ, наблюдаемым в [11] при $\lambda = 472$ nm. Пик ЭФ при $\lambda = 472$ nm авторы работы [11] связали с электронным переходом внутри $d$-оболочки иона $Fe^{3+}$ бората железа ($^6A_{1g} \to {}^4A_{1g}, {}^4E_g$). Вследствие аналогии поведения спектров ЭФ, обусловленных компонентами $m_D$ и $m_z$, естественно связать появление пика на кривой ЭФ при $\lambda = 475$ nm, обусловленного компонентой $m_z$, с тем же электронным переходом в ионе $Fe^{3+}$. Величина ЭФ, обусловленного $m_D$, в максимуме пика составляет примерно 4000 deg/cm, в то время как величина ЭФ, обусловленного компонентой $m_z$, в максимуме пика составляет около 4 deg/cm. Во втором случае величина эффекта в 1000 раз меньше, чем в первом. Выше указывалось, что величина намагниченности $m_z$ в борате железа меньше, чем величина $m_D$ в 2500 раз. То есть, не наблюдается пропорциональности между величинами компонент намагниченности $m_z$ и $m_D$ и величинами ЭФ, обусловленного этими компонентами.

В общем случае пропорциональности между величинами $m_D$ и $m_z$ и значениями ЭФ, определяемыми этими намагниченностями, быть не должно. Это связано с тем, что спонтанная намагниченность в базисной плоскости $m_D$ возникает при учете в разложении по компонентам намагниченности подрешеток термодинамического потенциала бората железа членов не выше второго порядка. И только при учете членов четвертого порядка по компонентам намагниченности подрешеток теория предсказывает и эксперимент подтверждает наличие спонтанной намагниченности $m_z$ вдоль оси третьего порядка. Эффективные поля, определяющие существование намагниченностей $m_D$ и $m_z$, взаимно перпендикулярны и по-разному изменяются при повороте вектора антиферромагнетизма в базисной плоскости. Следовательно, различны микроскопические механизмы, определяющие возникновение этих полей. Различны также и механизмы, определяющие появление ЭФ в двух обсуждаемых случаях.

### Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

### Конфликт интересов

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

## Список литературы

[1] D. Afanasiev, I. Razdolski, K.M. Skibinsky, D. Bolotin, S.V. Yagupov, M.B. Strugatsky, A. Kirilyuk, Th. Rasing, and A.V. Kimel. Phys. Rev. Lett. **112**, 147403 (2014)
[2] В.П. Глазков, С.Е. Кичанов, Д.П. Козленко, Б.Н. Савенко, В.А. Соменков. Письма в ЖЭТФ. **76**, *4*, 251 (2002).
[3] В.А. Саркисян, И.А. Троян, И.С. Любутин, А.Г. Гаврилюк, А.Ф. Кашуба. Письма в ЖЭТФ. **76**, *11*, 788 (2002).
[4] С.Г. Овчинников, В.В. Руденко, Н.В. Казак, И.С. Эдельман, В.А. Гавричков. ЖЭТФ, **158**, *1*, 184 (2020).
[5] К.Г. Архипов, В.Е. Зубов. Оптика и спектроскопия, **73**, *3*, 952 (1992).
[6] R. Wolfe, A.J. Kurtzig and R.C. LeCraw. J. Appl. Phys., **41**, *3*, 1218 (1970).
[7] В.Е. Зубов, А.Д. Кудаков, Д.А. Булатов, М.Б. Стругацкий, С.В. Ягупов. Письма в ЖЭТФ, **116**, *5–6*, 387 (2022).
[8] И.Е. Дзялошинский. ЖЭТФ, **32**, *6*, 1547 (1957).
[9] P.J. Flanders. J. Appl. Phys. **43**, *5*, 2430 (1972).
[10] В.Е. Зубов, А.Д. Кудаков, Н.Л. Левшин, М.Б. Стругацкий. Письма в ЖЭТФ, **105**, *11*, 675 (2017).
[11] W. Jantz, J.R. Sandercock and W. Wettling. J. Phys. C: Solid State Phys., **9**, *11*, 2229 (1976).

*Редактор Т.Н. Василевская*