

04,05,16

Особенности спектра эффекта фарадея в FeVO_3 , обусловленного компонентой намагниченности параллельной оси C_3

© В.Е. Зубов¹, А.Д. Кудakov¹, М.Б. Стругацкий², С.В. Ягупов²

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 (${}^6A_{1g} \rightarrow {}^4A_{1g}, {}^4E_g$) в ионе Fe^{3+} бората железа.

Ключевые слова: эффект Фарадея.

DOI: 10.61011/FTT.2025.05.60747.143-25

Слабый ферромагнетик борат железа FeVO_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 FeVO_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 $(v/c)^2$ 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 $(v/c)^4$. Угловая зависимость m_z при повороте m_D вокруг оси C_3 описывается выражением $m_z = m_{z0} \cdot \cos 3\varphi$, где φ — 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 ~ 3 mm. Толщина образцов составляла 4.2 и 6.6 μm . 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

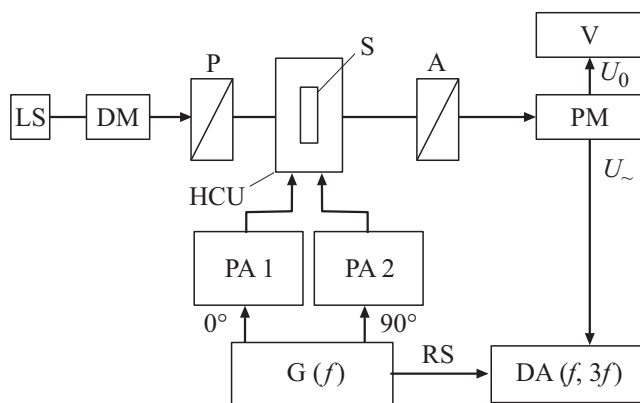


Рис. 1. Блок-схема установки.

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 $f = 265 \text{ Hz}$, 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.

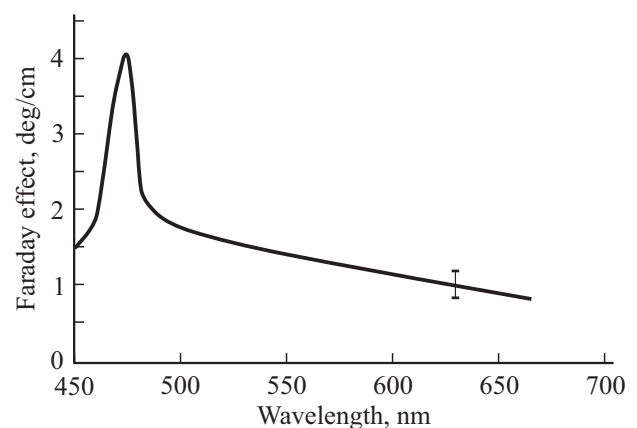
Плоскость поляризации анализатора повернута по отношению к плоскости поляризации поляризатора, что позволяет преобразовать поворот плоскости поляризации света, создаваемый образцом, в изменение интенсивности света пропорциональное углу поворота. Угол между плоскостями поляризации поляризатора и анализатора 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 $\sim 1 \text{ mm}$, 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 (λ) $450\text{--}670 \text{ nm}$ в обоих исследованных образцах показали аналогичные результаты. На рис. 2 представлен обусловленный компонентой m_z спектр ЭФ, измеренный в образце толщиной $4.2 \mu\text{m}$.

Из рисунка видно, что при увеличении длины волны света величина эффекта резко возрастает от 1.5 deg/cm при $\lambda = 450 \text{ nm}$ до максимума 4 deg/cm при $\lambda = 475 \text{ nm}$ и затем сначала резко, а затем монотонно спадает до 1 deg/cm при $\lambda = 670 \text{ nm}$ (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 λ 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 $\lambda = 472 \text{ nm}$. Пик ЭФ при $\lambda = 472 \text{ nm}$ авторы работы [11] связали с электронным переходом внутри d -оболочки иона Fe^{3+} бората железа (${}^6A_{1g} \rightarrow {}^4A_{1g}, {}^4E_g$). Вследствие аналогии поведения спектров ЭФ, обусловленных компонентами m_D и m_z , естественно связать появление пика на кривой ЭФ при $\lambda = 475 \text{ nm}$, 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. Любутич, 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. Кудачков, 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. Кудачков, 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