

**Received:** 23.10.2018  
**Revised:** 26.11.2018  
**Accepted:** 30.11.2018  
**DOI:** 10.17804/2410-9908.2018.6.149-156

## MAGNETOTRANSMISSION EFFECT IN MAGNETOSTRICTIVE $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ FOR THE CASE OF THE VOIGT GEOMETRY

A. V. Telegin<sup>a)\*</sup> and Yu. P. Sukhorukov<sup>b)</sup>

*M.N. Miheev Institute of Metal Physics, UB RAS,  
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620137, Russian Federation*

<sup>a)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-7209-4307>  [telegin@imp.uran.ru](mailto:telegin@imp.uran.ru);

<sup>b)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-8874-1019>  [sukhorukov@imp.uran.ru](mailto:sukhorukov@imp.uran.ru)

\*Corresponding author. E-mail: [telegin@imp.uran.ru](mailto:telegin@imp.uran.ru)

Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620137, Russian Federation  
Tel.: +7 (343) 378 37 43; fax: +7 (343) 374 52 44

Infrared absorption spectra are obtained for a ferrimagnetic single crystal of ferrite  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ . It is shown that an external magnetic field applied in the Voigt geometry leads to a noticeable change in the transparency of the single crystal possessing high magnetostriction – the magnetotransmission effect (up to 10 % in a 2 kOe field). The direct correlation between magnetotransmission and magnetostriction in the ferrite was established at room temperature. The anisotropy of the magnetotransmission of natural infrared radiation in  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  is studied for the first time.

**Keywords:** magnetostriction, magnetotransmission, strain-magneto-optics, ferrite, straintronics, IR range.

### Acknowledgment

*The work was performed within the state assignment from FASO Russia (Spin, No. AAAA-A18-118020290104-2, with a partial support from UB RAS (grant No. 18-10-2-3) and the RF Ministry of Education (grant No. 14.Z50.31.0025).*

### References

1. Bukharaev A.A., Zvezdin A.K., Pyatakov A.P., Fetisov Yu.K. Straintronics: a new trend in micro-, nanoelectronics and material science. *Phys. Usp.*, 2018, vol. 61, iss. 12. DOI: 10.3367/UFNe.2018.01.038279. Available at: <https://ufn.ru/en/articles/2018/12/b/>
2. Roy K. Ultra-low-energy straintronics using multiferroic composites. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 103, pp. 173110-1–173110-5. DOI: 10.1063/1.4826688.
3. Ustinov A.B., Kolkov P.I., Nikitin A.A., Kalinikos B.A., Fetisov Y.K., Srinivasan G. Ferrite-ferroelectric phase shifters controlled by electric and magnetic fields. *Technical Physics*, 2011, vol. 56, no. 6, pp. 821–825. DOI: 10.1134/S1063784211060259.
4. Krupicka, S. *Physics of Ferrites*, Akademie der Wissenschaften, Prag, Czechoslovakia, 1973.
5. Sato-Turtelli R., Kriegisch M., Atif M., Grossinger R. Co-ferrite – A material with interesting magnetic properties. In: *Materials Science and Engineering*: IOP Conf. Series, 2013, vol. 60, pp. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/60/1/012020.
6. Ferre J., Gehring G.A. Linear optical birefringence of magnetic crystals. *Rep. Prog. Phys.*, 1984, vol. 47, pp. 513–611. DOI: 10.1088/0034-4885/47/5/002.
7. Smolenskii G.A., Pisarev R.V., Sinii I.G. Birefringence of light in magnetically ordered crystals. *Physics-Uspeski*, 1975, vol. 18, pp. 410–429. DOI: 10.1070/PU1975v018n06ABEH001964.

8. Gan'shina E.A., Zenkov A.V., Krinchik G.S., Moskvina A.S., Trifonov A.Yu. Quadratic magneto-optic effects in orthoferrites. *JETP*, 1991, vol. 72, no. 1, pp. 154–159.
9. Sukhorukov Yu.P., Telegin A.V., Bebenin N.G., Nosov A.P., Bessonov V.D., Buchkevich A.A., Patrakov E.I. Magnetotransmission and magnetostriction in ferrimagnetic spinels  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ . *JETP*, 2018, vol. 126, no. 1, pp. 106–114. DOI: 10.7868/S004445101801011X.
10. Sukhorukov Yu.P., Telegin A.V., Bebenin N.G., Nosov A.P., Bessonov V.D., Buchkevich A.A. Strain-magneto-optics of a magnetostrictive ferrimagnets  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ . *Solid State Communication*, 2017, vol. 263, pp. 27–30. DOI: 10.1016/j.ssc.2017.07.003.
11. Sukhorukov Yu.P., Bebenin N.G., Telegin A.V., Nosov A.P. Magneto-optical properties of ferro- and ferrimagnetic spinels. *FMM*, 2018, vol. 119, no. 12, pp. 1231–1238. (In Russian).
12. Holinsworth B.S., Mazumdar D., Sims H., Sun Q.-C., Yurtisigi M.K., Sarker S.K., Gupta A., Butler W.H., Musfeldt J.L. Chemical tuning of the optical band gap in spinel ferrites:  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  vs  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ . *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 103, pp. 082406. DOI: 10.1063/1.4818315.
13. Sukhorukov Yu.P., Telegin A.V., Bebenin N.G., Buchkevich A.A., Nosov A.P., Bessonov V.D. Magnetotransmission in magnetostrictive crystal of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  in the Faraday geometry. *JETP letters*, 2018, vol. 108, no. 1, pp. 48-53. DOI: 10.1134/S0021364018130131.
14. Rahman A., Gafur A., Sarker A.R. Impact of cobalt doping on structural, electronic and optical properties of cobalt ferrite prepared by solid-state reaction. *Int. J. Innovative Research in Advanced Engineering*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 99–107. DOI: 10.1016/j.rinp.2017.09.057.
15. Danil'kevich M.I., Litvinovich G.V., Naumenko V.I. IR reflection spectra and optical constants of cobalt ferrite–gallates. *J. of Applied spectroscopy*, 1976, vol. 24, no. 1, pp. 38–43. DOI: 10.1007/BF01100715.
16. Bujakiewicz-Koronska R., Hetmanczyk L., Garbarz-Gios B., Budziak A., Kalvane A., Bormanis K., Druzbecki K. Low temperature measurements by infrared spectroscopy in  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  ceramic. *Cent. Eur. J. Phys.*, 2012, vol. 10, no. 5, pp. 1137–1143. DOI: 10.2478/s11534-012-0101-4.
17. Bozorth R.M., Tilden E.F., Williams A.J. Anisotropy and magnetostriction of some ferrites. *Phys. Rev.*, 1955, vol. 99, no. 6, pp. 1788–1799. DOI: 10.1103/PhysRev.99.1788.
18. Kambale R.C., Song K.M., Won C.J., Lee K.D., Hur N. Magnetic and magnetostrictive behavior of  $\text{Dy}^{3+}$  doped  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  single crystals grown by flux method. *J. Crystal Growth*, 2012, vol. 340, pp. 171–174. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2011.12.007.

Подана в журнал: 23.10.2018

УДК 535-5, 53.098

DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.149-156

## МАГНИТОПРОПУСКАНИЕ В МАГНИТОСТРИКЦИОННОМ КРИСТАЛЛЕ $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ В ГЕОМЕТРИИ ФОХТА

А. В. Телегин<sup>а)</sup>\*, Ю. П. Сухоруков<sup>а)</sup>

*Институт Физики Металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. С. Ковалевской 18, Екатеринбург, Российская Федерация*

<sup>а)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-7209-4307>  [telegin@imp.uran.ru](mailto:telegin@imp.uran.ru);

<sup>б)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-8874-1019>  [suhorukov@imp.uran.ru](mailto:suhorukov@imp.uran.ru)

\*Ответственный автор. Электронная почта: [telegin@imp.uran.ru](mailto:telegin@imp.uran.ru)

Адрес для переписки: 620137, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18, Российская Федерация

Тел.: +7 (343) 378-37-43; факс: +7 (343) 374-52-44

Получены спектры поглощения для ферримагнитного монокристалла феррита  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  в инфракрасном диапазоне спектра. Показано, что внешнее магнитное поле в фохтовской геометрии эксперимента приводит к заметному изменению прозрачности магнито-стрикционного монокристалла в широкой ИК-спектральной области – эффекту магнито-пропускания света (до ~10 % в поле 2 кЭ). Установлена корреляция между магнито-пропусканием и магнито-стрикцией феррита при комнатной температуре. Впервые изучена анизотропия магнито-пропускания ИК-излучения в монокристалле  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ .

**Ключевые слова:** магнито-стрикция, магнито-пропускание, стрейн-магнитооптика, феррит, стрейн-электроника, ИК-диапазон.

### 1. Введение

Новое актуальное направление в физике конденсированного состояния – стрейн-электроника – связано с направленным использованием механических деформаций для изменения физических свойств материалов. Физические эффекты, на которых она основана, ее преимущества по отношению к традиционной электронике и стоящие перед ней проблемы и фундаментальные ограничения довольно подробно рассмотрены в [1, 2, 3]. Основное внимание в работах по стрейн-электронике уделено магнитным и магнитоэлектрическим свойствам материалов в связи с задачами снижения энергопотребления при совершении компьютерных вычислений, разработке новых элементов памяти и т. п. Одним из самых распространенных магнито-стрикционных материалов является кобальтовый феррит, обладающий практически максимальной магнито-стрикцией среди диэлектрических и полупроводниковых материалов [4, 5]. В то же время хорошо известны магнитооптические эффекты в пьезо- и магнито-стрикционных материалах, но в основном – в поляризованном свете и в видимом диапазоне спектра [6–9]. Совокупность этих эффектов по аналогии можно назвать стрейн-магнитооптикой.

Недавно были опубликованы работы по стрейн-магнитооптике кристаллов кобальтового феррита  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  в области «окна прозрачности» ( $E < 1$  эВ) [10, 11]. Было показано, что в таком непроводящем магнито-стрикционном ферримагнетике существуют большие эффекты магнитоотражения и магнито-пропускания (до 35 % в поле ~4 кЭ перпендикулярно плоскости образца) в естественном свете. Важным фактом является то, что эти эффекты наблюдаются в спектральной области, где традиционные магнитооптические эффекты Керра и Фарадея стремятся к нулю [6–12]. Также было подтверждено, что необходимым условием для стрейн-магнитооптики является наличие большой величины магнито-стрикции ИК-прозрачного

CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Однако не исследованной осталась корреляция магнитопротекания и магнито-стрикции в зависимости от направления кристаллографических осей кристалла во внешнем магнитном поле, приложенном в плоскости образца (т. е. Фохтовская геометрия эксперимента).

Цель работы – изучение эффекта магнитопротекания естественного света в фохтовской геометрии и обнаружение корреляции магнитоупругих свойств и магнитопротекания в монокристаллах CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, обладающих большими значениями магнито-стрикции.

## 2. Эксперимент

Монокристаллы CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ( $a_0 = 8,38 \text{ \AA}$ ) были выращены методом бестигельной зонной плавки с радиационным нагревом. Рентгеновский микроанализ показал, что образцы являются однофазными и по химическому составу соответствуют формульному. Данные по намагниченности и магнито-стрикции исследуемых образцов приведены в [10, 12]. Исследуемые образцы представляли собой ориентированные пластины с плоскостью (001) площадью  $5 \times 5 \text{ мм}^2$  и толщиной  $d = 200 \text{ мкм}$ . Пропускание неполяризованного (естественного) света образцом измерялось с помощью ИК-призмного спектрометра при нормальном падении света на поверхность образца. Магнитопротекание рассчитывалось как относительное изменение интенсивности протекания (поглощения) света образцом под действием магнитного поля  $\Delta t/t = (t_H - t_0)/t_0 \cdot 100 \%$  (где  $t_H$  и  $t_0$  – интенсивности прошедшего через образец света в поле и без поля соответственно) в постоянном поле до  $H = 5 \text{ кЭ}$ , приложенном в плоскости образца.

## 3. Спектры поглощения и магнитопротекания

Спектры поглощения монокристалла CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (рис. 1 а) формируются краем фундаментального поглощения при  $E_g = 1,18 \text{ эВ}$  ( $\sim 1 \text{ мкм}$ ) и  $T = 295 \text{ К}$  [13] в результате непрямых межзонных переходов из гибридных  $d\text{Co} + p\text{O}$ -состояний валентной зоны в точке  $X$  зоны Бриллюэна в  $d\text{Fe}$ -состояния зоны проводимости в точке  $\Gamma$ . При длине волны  $\lambda_1 = 2,6 \text{ мкм}$  ( $0,48 \text{ эВ}$ ) в спектре отчетливо проявляется полоса примесного поглощения (I), положение которой практически не зависит от температуры. Предполагается, что эта полоса связана с вакансиями в анионной подрешетке [14, 15]. Длинноволновая часть спектра поглощения кристалла образуется тонкой структурой из полос (II), центрированных при  $\lambda_2 = 6,1 \text{ мкм}$  ( $0,2 \text{ эВ}$ );  $\lambda_3 = 7 \text{ мкм}$  ( $0,17 \text{ эВ}$ );  $\lambda_4 = 8,4 \text{ мкм}$  ( $0,14 \text{ эВ}$ ) и  $\lambda_5 = 10 \text{ мкм}$  ( $0,12 \text{ эВ}$ ) с максимумом при  $\lambda_6 = 12,5 \text{ мкм}$  ( $0,1 \text{ эВ}$ ). Положение этих полос близко значению полос примесного поглощения для поликристаллического CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, легированного ионами Zn, Zr, Cd [15]. Рост поглощения при  $\lambda > 15 \text{ мкм}$  связан с фононами [2, 16, 17].

Полученный спектр поглощения хорошо согласуется со спектром оптической проводимости, рассчитанным методом Крамерса-Кронинга из спектров отражения монокристалла [10]. Внешнее магнитное поле, приложенное в плоскости образца, приводит к слабому красному сдвигу края поглощения  $\Delta\epsilon(H) \approx -2 \text{ мэВ}$  в отличие от синего сдвига  $\Delta\epsilon(H) \approx 10 \text{ мэВ}$  для фарадеевской геометрии эксперимента [14]. Различие скорее всего обусловлено перестройкой электронного спектра под действием поля разной геометрии. Кроме того, приложение магнитного поля приводит к незначительному смещению полосы I и уменьшению интенсивности полос II (вставка на рис. 1 а).

Отметим, что в пределах точности измерений не было обнаружено наличие эффекта Фохта (эллиптичности света) в эксперименте в спектральном интервале от 1 до 15 мкм. Следовательно вклад эффекта Фарадея в исследуемой геометрии эксперимента для неполяризованного света практически отсутствует. Таким образом, в монокристалле CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> обнаружен эффект магнитопоглощения света в ИК-области спектра в фохтовской геометрии эксперимента, связанный с изменением под действием поля интенсивности и положения края поглощения и полос примесных состояний.

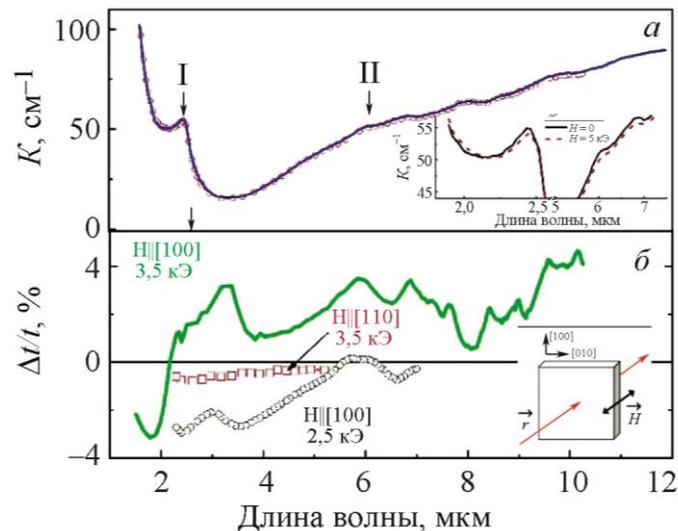


Рис. 1. Спектры монокристалла  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ : *a* – поглощения при  $T = 295$  К без поля (сплошная кривая) и в поле  $H = 5$  кЭ (пустые символы). На вставке – увеличенные участки спектра; *б* – магнитопропускания ( $\Delta t/t$ ) света для разной ориентации кристалла в магнитном поле 2,5 и 3,5 кЭ. На вставке – схема ориентации кристалла в магнитном поле

Влияние магнитного поля на оптические свойства феррита более наглядно демонстрируют спектральные и полевые зависимости магнитопропускания света. На рис. 1 *б* представлены спектры магнитопропускания  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  при  $T = 295$  К для разной ориентации кристалла в магнитном поле (поле направлено в плоскости (100)). Спектры  $\Delta t/t$  имеют сложную форму с резонансо-подобными особенностями в окрестности края поглощения и примесных полос. Отметим, что чувствительность полос примесного поглощения к магнитному полю указывает на то, что примеси должны занимать низкосимметричные позиции в элементарной ячейке. Природа этих примесных состояний требует отдельного исследования.

Как это уже отмечалось ранее и по аналогии с хромхалькогенидными шпинелями [12] магнитооптический отклик в кристалле феррита формируется несколькими конкурирующими механизмами, которые имеют разную температурную [14] и полевую зависимость. Соответственно вид спектра и величина магнитопропускания сильно зависят, например, от величины внешнего магнитного поля, в котором производилось измерение (рис. 1 *б*). Спектры  $\Delta t/t$  в фохтовской геометрии в полях насыщения  $H > 3,5$  кЭ также указывают на зависимость магнитопропускания от ориентации поля в плоскости кристалла (рис. 1 *б*). В случае  $H \parallel [110]$  при комнатной температуре  $\Delta t/t$  не превышает  $0,5\% \pm 0,2\%$  во всем измеряемом интервале. При  $H \parallel [100]$  величина  $\Delta t/t$  составляет менее 4 %, что значительно меньше  $\Delta t/t \sim -11\%$  в Фарадеевской геометрии [12, 14] при  $H \perp (100)$ . Более наглядно анизотропия магнитопропускания и ее связь с магнитострикцией феррита видна из полевых зависимостей.

#### 4. Полевые зависимости магнитопропускания

Полевые зависимости намагниченности кристалла дают величину  $M = 82$  Гс·см<sup>3</sup>/Г и коэрцитивной силы  $H_C \sim 80$  Э [12], что близко к литературным данным [18]. Анизотропия магнитострикции для  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  подробно изучена [4, 18 и др.]. Полевые зависимости магнитострикции  $\Delta l/l$  исследуемых образцов подобны данным для не отожденных  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  [19], а величина  $(\Delta l/l)_{100}$  превышает известные значения для нестехиометрических и легированных монокристаллов [16–19]. При ориентации магнитного поля вдоль оси [100] кристалла магнитострикция демонстрирует резкий рост в поле  $H \sim 2$  кЭ и выходит на насыщение эффекта в полях больше 3 кЭ. Более детально результаты исследования полевых зависимостей намаг-

ниченности и магнитострикции  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , а также магнитопротекания в геометрии Фарадея, изложены в [11, 14].

В связи с этим особый интерес при исследовании магнитопротекания (магнитопоглощения) света в магнитострикционном кристалле представляет зависимость магнитооптического эффекта от ориентации кристалла в магнитном поле, приложенном в плоскости образца.

Используя известные отношения для зависимости энергии магнитной анизотропии кубического кристалла от направляющих косинусов намагниченности [4], для зависимости коэффициента протекания неполяризованного света от ориентации поля в области насыщения намагниченности при направлении внешнего магнитного поля вдоль осей [100] и [110] можно записать следующее выражение:

$$t = t_{[100]} + 4(t_{[110]} - t_{[100]})\alpha_x^2\alpha_y^2, \quad (1)$$

где  $\alpha_{x,y}$  – направляющие косинусы вектора намагниченности.

В этом случае магнитопротекание запишется в виде:

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{\{[t_{[100]} + 4(t_{[110]} - t_{[100]})\alpha_x^2(H_{ext})\sigma_y^2(H_{ext})] - [t_{[100]} + 4(t_{[110]} - t_{[100]})\alpha_x^2(H = 0)\alpha_y^2(H = 0)]\}}{[t_{[100]} + 4(t_{[110]} - t_{[100]})\alpha_x^2(H = 0)\alpha_y^2(H = 0)]}. \quad (2)$$

Таким образом, феноменологическое выражение (2) демонстрирует линейную корреляцию между магнитострикцией и  $\Delta t/t$ , как и в случае магнитоотражения в работе [10]. Справедливость выражения (2) демонстрируют полевые зависимости магнитопротекания.

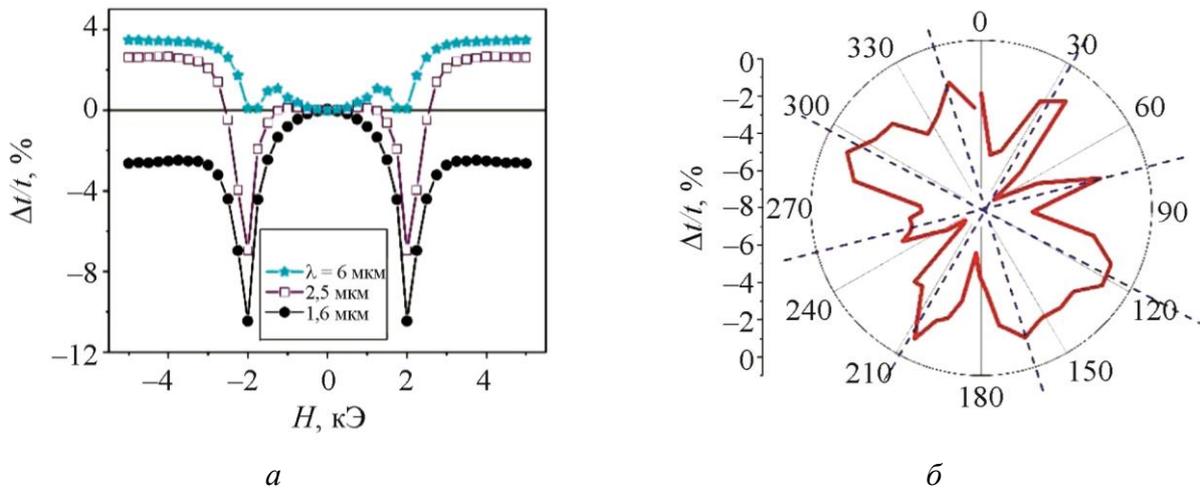


Рис. 2. Полевые зависимости магнитопротекания  $\Delta t/t$  света при комнатной температуре: а – для разных длин волн в поле  $H||[100]$ ; б – для  $\lambda = 3,4$  мкм при различных направлениях магнитного поля  $H = 3,5$  кЭ в плоскости монокристалла  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$

Из полевых зависимостей магнитопротекания следует, что заметный рост магнитопротекания начинается в поле  $H||[100] \sim 1,5$  кЭ и достигает насыщения в полях  $H > 3,5$  кЭ. Вид полевых зависимостей  $\Delta t/t(H)$  подобен соответствующим зависимостям магнитострикции для монокристалла  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  [18]. Отметим, что исследуемый эффект магнитопротекания является квадратичным, что подтверждает минимальное влияние линейных магнитооптических эффектов.

Необходимо подчеркнуть, что форма полевых зависимостей и величина магнитопротекания сильно зависят от спектрального диапазона исследований, что, возможно, связано с

конкуренцией различных механизмов магнитооптического отклика в феррите (рис. 2 а). В данном случае была выбрана область вблизи примесной полосы ( $\lambda \sim 3,4$  мкм) с оптимальным соотношением сигнал/шум и большой величиной магнитопротекания при комнатной температуре. Однако эта область испытывает сильное влияние температурных и полевых сдвигов «хвостов» края поглощения, поэтому представляется целесообразным в дальнейшем провести подобные исследования для разных длин волн с учетом спектра поглощения кристалла при разных температурах.

Зависимость величины магнитопротекания от ориентации магнитного поля в кристалле задается в основном анизотропией вкладов магнитокристаллической и магнитоупругой энергий. Из полевых зависимостей магнитопротекания на рис. 2 б можно выделить 4 симметричных максимума, связанных с наличием четырех осей симметрии третьего порядка в кубическом кристалле, на фоне сильной одноосной анизотропии. Вклады анизотропии формы и ростовой анизотропии кристалла, а также погрешность в ориентации кристалла, приводят к размытию и неточному воспроизведению положения максимумов наблюдаемых угловых зависимостей.

Таким образом, корреляция полевых зависимостей магнитопротекания и магнитострикции позволяет нам сделать вывод о том, что наблюдаемый магнитооптический эффект связан как со сдвигом края поглощения, так и с оптическим откликом на магнитострикцию в феррите. При этом влияние магнитного поля на протекание (поглощение) света является непрямым [11]: магнитное поле сначала приводит к сильной деформации кристаллической решетки, а та в свою очередь приводит к изменению электронной структуры и, соответственно, спектров протекания (поглощения) феррита.

## 5. Заключение

Впервые изучено влияние магнитного поля на спектры поглощения в ИК-области спектра для магнитострикционной монокристаллической ферритмагнитной шпинели  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  в фоxtовской геометрии эксперимента. Обнаружен эффект магнитопротекания неполяризованного света (до 10 %) в широкой ИК-области спектра до 16 мкм, связанный с изменением положения края фундаментального поглощения и полос примесного поглощения. Показана корреляция между магнитопротеканием света и магнитострикцией в феррите. Впервые изучена зависимость магнитопротекания от ориентации кристалла феррита в магнитном поле, которая свидетельствует о наличии преобладающего вклада магнитоупругой анизотропии в магнитооптические свойства кристалла  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ .

## Благодарности

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Спин») № АААА-А18-118020290104-2, при частичной поддержке гранта УрО РАН № 18-10-2-3 и гранта Минобразования РФ № 14.Z50.31.0025.*

## Литература

1. Straintronics: a new trend in micro- and nanoelectronics and material science / A. A. Bukharaev, A. K. Zvezdin, A. P. Pyatakov, Yu. K. Fetisov // Phys. Usp. – 2018. – Vol. 61, iss. 12. – DOI: 10.3367/UFNe.2018.01.038279. – URL: <https://ufn.ru/en/articles/2018/12/b/>
2. Roy K. Ultra-low-energy straintronics using multiferroic composites // Appl. Phys. Lett. – 2013. – Vol. 103. – P. 173110-1–173110-5. – DOI: 10.1063/1.4826688.
3. Ferrite-ferroelectric phase shifters controlled by electric and magnetic fields / A. B. Ustinov, P. I. Kolkov, A. A. Nikitin, B. A. Kalinikos, Y. K. Fetisov, G. Srinivasan // Technical Physics. – 2011. – Vol. 56, no. 6. – P. 821–825. – DOI: 10.1134/S1063784211060259.

4. Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов / пер. с нем. А. Г. Гуревича, А. Ф. Дите, В. А. Козлова, А. С. Пахомова; под ред. И. Г. Нахимсона. – М. : Мир, 1976. – 353 с.
5. Co-ferrite – A material with interesting magnetic properties / R. Sato-Turtelli, M. Kriegisch, M. Atif, R. Grossinger // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2013. – Vol. 60. – P. 012020. – DOI: 10.1088/1757-899X/60/1/012020.
6. Ferre J., Gehring G. A. Linear optical birefringence of magnetic crystals // Rep. Prog. Phys. – 1984. – Vol. 47. – P. 513–611. – DOI: 10.1088/0034-4885/47/5/002.
7. Smolenskii G. A., Pisarev R. V., Sinii I. G. Birefringence of light in magnetically ordered crystals // Physics-Uspekhi. – 1975. – Vol. 18. – P. 410–429. – DOI: 10.1070/PU1975v018n06ABEH001964.
8. Quadratic magneto-optic effects in orthoferrites / E. A. Gan'shina, A. V. Zenkov, G. S. Krinchik, A. S. Moskvina, A. Yu. Trifonov // JETP. – 1991. – Vol. 72, no. 1. – P. 154–159.
9. Magnetotransmission and magnetostriction in ferrimagnetic spinels  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  / Yu. P. Sukhorukov, A. V. Telegin, N. G. Bebenin, A. P. Nosov, V. D. Bessonov, A. A. Buchkevich, E.I. Patrakov // JETP. – 2018. – Vol. 126, no. 1. – P. 106–114. – DOI: 10.7868/S004445101801011X.
10. Strain-magneto-optics of a magnetostrictive ferrimagnets  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  / Yu. P. Sukhorukov, A. V. Telegin, N. G. Bebenin, A. P. Nosov, V. D. Bessonov, A. A. Buchkevich // Solid State Communication. – 2017. – Vol. 263. – P. 27–30. – DOI: 10.1016/j.ssc.2017.07.003.
11. Магнитооптические свойства ферро- и ферримагнитных шпинелей / Ю. П. Сухоруков, Н. Г. Бебенин, А. В. Телегин, А. П. Носов // ФММ. – 2018. – Т. 119, № 12 – С. 1231–1238.
12. Chemical tuning of the optical band gap in spinel ferrites:  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  vs  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  / B. S. Holinsworth, D. Mazumdar, H. Sims, Q.-C. Sun, M. K. Yurtisigi, S. K. Sarker, A. Gupta, W. H. Butler, J. L. Musfeldt // Appl. Phys. Lett. – 2013. – Vol. 103. – P. 082406. – DOI: 10.1063/1.4818315.
13. Magnetotransmission in magnetostrictive crystal of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  in the Faraday geometry / Yu. P. Sukhorukov, A. V. Telegin, N. G. Bebenin, A. A. Buchkevich, A. P. Nosov, V. D. Bessonov // JETP letters. – 2018. – Vol. 108, no. 1. – P. 48–53. – DOI: 10.1134/S0021364018130131.
14. Rahman A., Gafur A., Sarker A. R. Impact of doping on structural, electronic and optical properties of cobalt ferrite prepared by solid-state reaction // Int. J. Innovative Research in Advanced Engineering. – 2015. – Vol. 2, no. 1. – P. 99–107. – DOI: 10.1016/j.rinp.2017.09.057.
15. Danil'kevich M. I., Litvinovich G. V., Naumenko V. I. IR reflection spectra and optical constants of cobalt ferrite – gallates // J. of Applied Spectroscopy. – 1976. – Vol. 24, no. 1. – P. 38–43. – DOI: 10.1007/BF01100715.
16. Low temperature measurements by infrared spectroscopy in  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  ceramic / R. Bujakiewicz-Koronska, L. Hetmanczyk, B. Garbarz-Gios, A. Budziak, A. Kalvane, K. Bormanis, K. Druzbecki // Cent. Eur. J. Phys. – 2012. – Vol. 10, no. 5. – P. 1137–1143. – DOI: 10.2478/s11534-012-0101-4.
17. Bozorth R. M., Tilden E. F., Williams A. J. Anisotropy and magnetostriction of some ferrites // Phys. Rev. – 1955. – Vol. 99, no. 6. – P. 1788–1799. – DOI: 10.1103/PhysRev.99.1788.
18. Magnetic and magnetostrictive behavior of  $\text{Dy}^{3+}$  doped  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  single crystals grown by flux method / R. C. Kambale, K. M. Song, C. J. Won, K. D. Lee, N. Hur // J. Crystal Growth. – 2012. – Vol. 340. – P. 171–174. – DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2011.12.007.