

УДК 535-92

## МАГНИТООПТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ МОД

© 2021 г. П. В. Головки<sup>1</sup>, Д. О. Игнатьева<sup>1,2,\*</sup>, А. Н. Калиш<sup>1,2</sup>, В. И. Белотелов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Общество с ограниченной ответственностью Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий, Москва, Россия

\*E-mail: [ignatyeva@physics.msu.ru](mailto:ignatyeva@physics.msu.ru)

Поступила в редакцию 20.07.2020 г.

После доработки 28.08.2020 г.

Принята к публикации 28.09.2020 г.

Продемонстрировано усиление интенсивности магнитооптических эффектов в структурах, содержащих фотонно-кристаллические слои и ферромагнитный диэлектрик – феррит-гранат, и поддерживающих возбуждение квазиповерхностных Таммовских мод на границе фотонного кристалла и граната. Показано, что такие структуры обладают высокодобротными резонансами, а благодаря приповерхностной локализации электромагнитного поля позволяют усиливать магнитооптический экваториальный эффект Керра и достигать значений магнитооптической модуляции вплоть до 100%.

DOI: 10.31857/S0367676521010129

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальной проблемой создания новых функциональных материалов является повышение эффективности взаимодействия света и вещества. Магнитные материалы позволяют достигать скоростей переключения до десятков ГГц за счет перемангничивания материала, что используется в магнитооптических модуляторах объемного излучения, например, на основе эффекта Фарадея [1–3]. Эффект Фарадея представляет собой вращение плоскости поляризации линейно поляризованного света при прохождении через намагниченную среду, пропорциональное длине магнитного кристалла. Модуляция интенсивности при этом осуществляется за счет добавления дополнительных поляризаторов. Однако недостатком модуляторов на основе эффекта Фарадея является то, что для достижения существенной глубины модуляции (вплоть до 100%) в ячейке Фарадея требуется структура достаточно большого, макроскопического размера. В то же время другие магнитооптические эффекты, например, интенсивный магнитооптический экваториальный эффект Керра, имеют поверхностный характер и сравнительно малую величину, и поэтому их применение в модуляторах неэффективно.

В связи с этим большую важность имеет создание различных наноструктур, в которых бы за счет возбуждения оптических резонансов происходило усиление магнитооптических эффектов. Одним из перспективных направлений совре-

менной оптики функциональных материалов является применение поверхностных электромагнитных, в том числе поверхностных плазмон-поляритонных волн [4–6], для увеличения эффективности взаимодействия с веществом, а также сверхбыстрого управления оптическими импульсами на наномасштабах.

Преимущества такого подхода были продемонстрированы ранее в магнитоплазмонных кристаллах [7], триметаллических пленках [8], структурах типа металл–диэлектрик–металл [9–11]. Невзаимность распространения плазмонов в магнитоплазмонных структурах и усиление магнитооптических эффектов [12] также предложено использовать в циркуляторах [13]. Однако значительное поглощение, усиливаемое при добавлении в структуру металлов, необходимых для возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов, не позволяет реализовать устройства интегральной оптики на базе магнитоплазмонных структур с реальными, а не модельными, параметрами поглощения и гирации ферромагнетика.

Поэтому существенным преимуществом другого типа структур – полностью диэлектрической структуры с фотонным кристаллом и магнитными слоями – является увеличение добротности и связанное с ним увеличение чувствительности и магнитооптического отклика. Недавно было теоретически предсказано усиление эффекта Фарадея [14], а также экваториального эффекта Керра

[15–17] в магнитофотонном кристалле при возбуждении поверхностных (Таммовских) волн [18].

В данной работе представлены результаты исследования фотонно-кристаллической структуры с ферритом-гранатом, обеспечивающей усиление экваториального эффекта Керра (ЭЭК) за счет возбуждения высокодобротной поверхностной моды на границе на границе фотонный кристалл/феррит-гранат.

### ОСОБЕННОСТИ ЭЭК ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ТАММОВСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

В работе рассматривается структура: фотонный кристалл, на поверхность которого нанесен толстый слой феррита-граната, в которой возбуждаются поверхностные электромагнитные волны призмным методом. При этом на длинах волн порядка 700–800 нм, в качестве призмы возможно использование прозрачных полупроводниковых материалов с большим показателем преломления, таких как GaP ( $n_{\text{GaP}} = 3.1$ ), для повышения эффективности ввода излучения в структуру. Выбор рабочей длины волны для возбуждения Таммовской поверхностной волны  $\lambda_{\text{TSW}} = 0.78$  мкм обусловлен тем, что с ростом длины волны в феррите-гранате уменьшается как поглощение, так и магнитооптическая активность, в связи с чем выбранная длина волны обеспечивает баланс между прозрачностью и магнитооптическим откликом.

Существование поверхностных электромагнитных волн в фотонно-кристаллической структуре обусловлено, с одной стороны, полным внутренним отражением от внешней границы (с гранатом) при углах, больших чем  $\theta_{\text{TIR}} = \arcsin(n_{\text{BIG}}/n_{\text{prism}})$ , где  $n_{\text{prism}}$  – показатель преломления призмы,  $n_{\text{BIG}} = 2.35$  – показатель преломления граната,  $\theta_{\text{TIR}}(\text{GaP}|\text{BIG}) = 49.29^\circ$ . С другой стороны поверхностная электромагнитная волна удерживается за счет наличия запрещенной зоны фотонного кристалла, препятствующей вытеканию излучения обратно в призму. Такие волны также называются Таммовскими, так как по своим свойствам они аналогичны Таммовским состояниям электронов в кристалле. Для обеспечения большой глубины проникновения излучения в феррит-гранат, и, соответственно, достижения большой чувствительности к его намагниченности, мода должна возбуждаться вблизи угла полного внутреннего отражения:  $\theta_{\text{TSW}} \approx \theta_{\text{TIR}}$ , где  $\theta_{\text{TSW}}$  – угол падения, при котором возбуждается Таммовская мода.

Параметры фотонного кристалла при этом оптимизируются так, чтобы обеспечить наибольшую эффективность при волновых векторах, соответствующих распространяющейся поверхностной

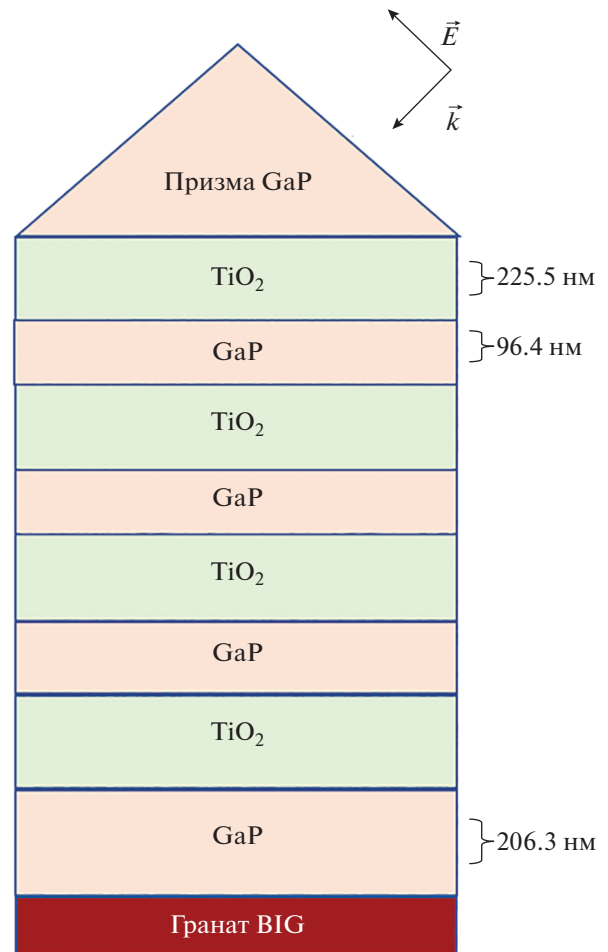
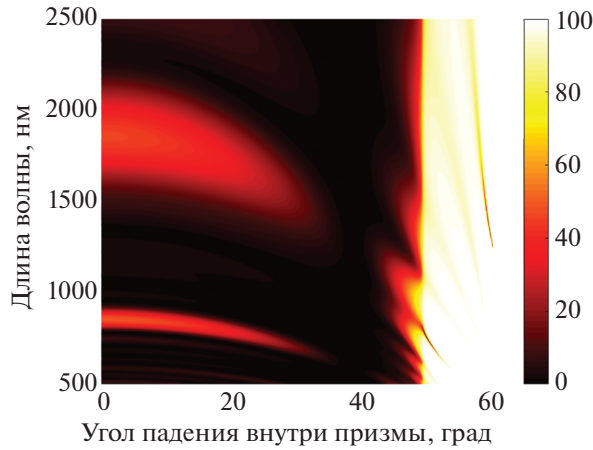


Рис. 1. Схема фотонно-кристаллической структуры с ферритом-гранатом для возбуждения поверхностных Таммовских мод на границе с гранатом.

волне. Наибольший контраст показателей преломления обеспечивается, например, в фотонном кристалле из чередующихся слоев GaP/TiO<sub>2</sub> с показателями преломления  $n_{\text{GaP}} = 3.1$ ,  $n_{\text{TiO}_2} = 2.5$ , соответственно. Толщины слоев фотонного кристалла  $d_j$  для возбуждения поверхностных Таммовских волн подбираются четвертьволновыми на соответствующей длине волны и угле распространения внутри слоев:

$$d_j = \frac{\lambda_{\text{TSW}}}{4n_j} \frac{1}{\cos \left[ \arcsin \left( \left( \frac{n_{\text{GaP}}}{n_j} \right) \sin \theta_{\text{TSW}} \right) \right]}, \quad (1)$$

где  $n_j$  – показатель преломления слоя фотонного кристалла, соответственно. Для выбранного фотонного кристалла  $d_{\text{TiO}_2} = 228.5$  нм,  $d_{\text{GaP}} = 96.4$  нм. Было подобрано оптимальное число пар слоев  $N = 4$ , последний слой является дефектным и имеет толщину  $d_{\text{GaP}4} = 206.3$  нм. Структура схематически изображена на рис. 1.



**Рис. 2.** Угловой и частотный спектр коэффициента отражения от рассматриваемой структуры с фотонным кристаллом и ферритом-гранатом.

Угловой и частотный спектр коэффициента отражения структуры при падении оптического излучения р-поляризации, рассчитанный методом матриц перехода, показан на рис. 2. В спектре видно возбуждение поверхностной Таммовской моды в виде узкого и глубокого ( $R_{min} = 0.96\%$ ) резонанса в области полного внутреннего отражения в диапазоне 700–800 нм. Добротность резонанса составляет  $Q = 77$ , длина пробега моды вдоль границы магнитного материала и фотонного кристалла  $L_{prop} = 35$  мкм, глубина проникновения в феррит-гранат  $L_0 = 1.3$  мкм.

Поверхностные Таммовские волны чувствительны к намагниченности материалов, нанесенных на поверхность фотонного кристалла [15–17]. При этом, за счет возбуждения эванесцентных внутри магнитного материала мод, локализованных на его границе, возможно значительное уси-

ление магнитооптических эффектов, связанных с поверхностными свойствами магнитного вещества, в частности, магнитооптического экваториального эффекта Керра.

Магнитооптический экваториальный эффект Керра состоит в модуляции интенсивности отраженного от магнитной структуры излучения  $R$  при приложении противоположно направленного внешнего магнитного поля и противоположном намагничивании структуры  $\pm \vec{M}$  в экваториальной конфигурации и определяется величиной  $\delta$ :

$$\delta = 2 \frac{R(+\vec{M}) - R(-\vec{M})}{R(+\vec{M}) + R(-\vec{M})}. \quad (2)$$

При этом угловой спектр коэффициента отражения вблизи резонанса имеет Лоренцевскую форму:

$$R(\theta) = 1 - \frac{4\beta''_{loss}\beta''_{leak}}{\left(k_0 n_{\text{Gap}} \sin \theta - \left(\beta'_0 + \Delta\beta'_M\right)\right)^2 + \left(\beta''_{loss} + \beta''_{leak} + \Delta\beta''_M\right)^2}, \quad (3)$$

где  $\theta$  – угол падения излучения из воздуха,  $\beta_{surf} = \left(\beta'_0 + \Delta\beta'_M\right) + i\left(\beta''_{loss} + \beta''_{leak} + \Delta\beta''_M\right)$  – волновое число поверхностной Таммовской моды, учитывающее магнитооптическую добавку  $\Delta\beta'_M + i\Delta\beta''_M$  к волновому числу в немагнитном случае  $\beta'_0 + i\left(\beta''_{loss} + \beta''_{leak}\right)$ . Мнимая часть волнового числа соответствует потерям на поглощение  $\beta''_{loss}$  и ради-

ационным потерям на вытекание излучения в призму  $\beta''_{leak}$ , соответственно.

Для аналитического описания экваториального эффекта Керра в структурах с Таммовскими модами может быть применено приближение:  $|\Delta\beta_M| \ll \beta'_0$ , ввиду малости вносимой намагниченностью среды поправки к волновому числу. Таким образом, магнитооптическая модуляция коэффициента отражения в геометрии Керра будет иметь вид:

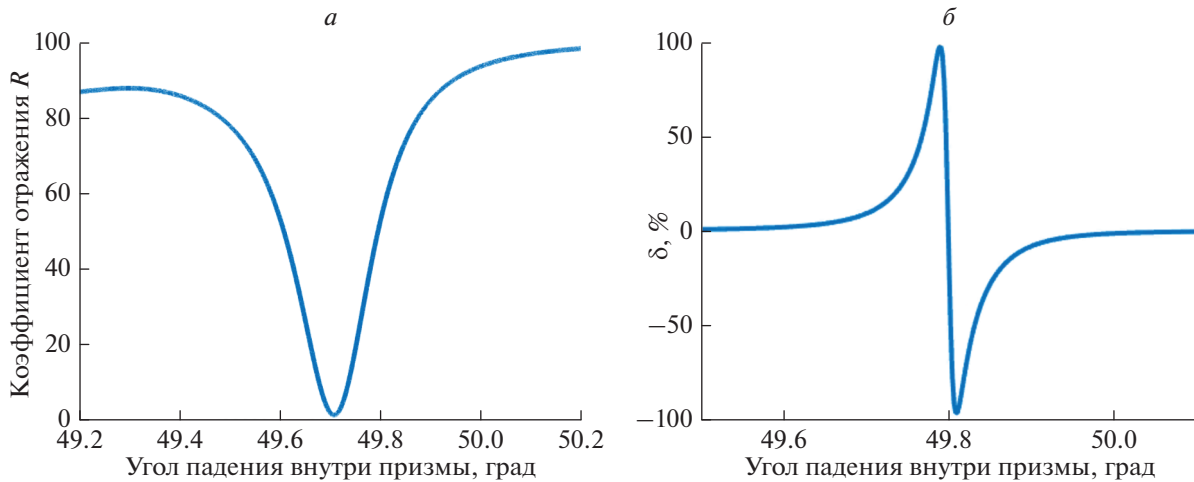


Рис. 3. Угловой спектр коэффициента отражения (а) и экваториального эффекта Керра при возбуждении Таммовской моды (б).

$$\delta = - \frac{8\Delta\beta'_M\beta''_{loss}\beta''_{leak} (k_0 n_{prism} \sin \theta - \beta'_0)}{\left( (k_0 n_{prism} \sin \theta - \beta'_0)^2 + \frac{1}{4}(\beta''_{loss} + \beta''_{leak})^2 - 4\beta''_{loss}\beta''_{leak} \right) \left( (k_0 n_{prism} \sin \theta - \beta'_0)^2 + \frac{1}{4}(\beta''_{loss} + \beta''_{leak})^2 \right)} \quad (4)$$

причем при  $\beta''_{loss} = \beta''_{leak}$  величина экваториального эффекта Керра максимальна. Согласно формуле (4) резонанс имеет симметричный S-образный профиль с двумя максимумами разных знаков, а в центре резонанса  $\delta = 0$ .

За счет высокой добротности резонанса и эванесцентного характера Таммовской моды амплитуда экваториального эффекта Керра может достигать значений  $\delta = 98\%$  (при характерном для феррита-граната значении коэффициента гирации  $g = 0.02$ ). Угловой спектр экваториального эффекта Керра, показанный на рис. 3, демонстрирует качественное соответствие с аналитической формулой (4): резонанс имеет S-форму, симметричную относительно  $\theta = \theta_{TSW}$ , с максимальной амплитудой эффекта  $\delta_{max} = |\delta_{min}| = 98\%$ .

Высокая добротность Таммовской моды и одновременно чувствительность ее постоянной распространения к намагниченности внешнего материала, нанесенного на фотонный кристалл, приводит к тому, что магнитооптическое смещение резонанса по длине волны оказывается сопоставимым с шириной резонанса. В результате величина коэффициента  $\delta$  достигает практически 100%, что свидетельствует о высокой эффективности модуляции электромагнитного излучения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрировано усиление магнитооптического экваториального эффекта Керра при возбуждении поверхностных Таммовских волн в структурах с фотонным кристаллом и ферритом-гранатом на поверхности магнетика. Такие структуры имеют большое прикладное значение и могут быть использованы для повышения эффективности магнитооптических модуляторов света.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-72-10139).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zvezdin A.K., Kotov V.A.* Modern magneto-optics and magneto-optical materials. CRC Press, 1997.
2. *Gaugitsch M., Hauser H.* // J. Lightwave Technol. 1999. V. 17. P. 2633.
3. *Irvine S.E., Elezabi A.Y.* // J. Phys. D. 2003. V. 36. P. 18.
4. *Ignatyeva D.O., Sukhorukov A.P.* // Appl. Phys. A. 2012. V. 109. P. 813.
5. *Khokhlov N.E., Ignatyeva D.O., Belotelov V.I.* // Opt. Expr. 2014. V. 22. Art. No 28019.
6. *Ignatyeva D.O., Sukhorukov A.P.* // Phys. Rev. A. 2014. V. 89. Art. No 013850.
7. *Wurtz G.A., Hendren W., Pollard R. et al.* // New J. Phys. 2008. V. 10. Art. No 105012.
8. *D.M. Becera.* Active plasmonic devices based on magnetoplasmonic nanostructures. Springer, 2017.

9. *Ferreiro-Vila E., García-Martín J.M., Cebollada A. et al.* // Opt. Expr. 2013. V. 21. Art. No 4917.
10. *Armelles G., Cebollada A., García-Martín J.M. et al.* // J. Opt. A. 2009. V. 11. Art. No 114023.
11. *Ignatyeva D.O., Davies C.S., Sylgacheva D.A. et al.* // Nat. Commun. 2019. V. 10. No 1. P. 1.
12. *Chin J.Y., Steinle T., Wehls T. et al.* // Nat. Commun. 2013. V. 4. P. 1599.
13. *Davoyan A.R., Engheta N.* // New J. Phys. 2013. V. 15. Art. No 083054.
14. *Romonina M.N., Soboleva I.V., Fedyanin A.A.* // J. Magn. Magn. Mater. 2016. V. 415. P. 82.
15. *Игнатъева Д.О., Капралов П.О., Князев Г.А. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 104. С. 689; *Ignatyeva D.O., Kapralov P.O., Knyazev G.A. et al.* // JETP Lett. 2016. V. 104. P. 679.
16. *Ignatyeva D.O., Knyazev G.A., Kapralov P.O. et al.* // Sci. Rep. 2016. V. 6. Art. No 28077.
17. *Borovkova O.V., Ignatyeva D.O., Sekatskii S.K.* // Photon. Res. 2020. V. 8. No 1. P. 57.
18. *Konopsky V.N.* // New J. Phys. 2010. V. 12. Art. No 093006.

## Magneto-optical control of radiation in photonic-crystal structures at excitation of surface modes

**P. V. Golovko<sup>a</sup>, D. O. Ignatyeva<sup>a, b, \*</sup>, A. N. Kalish<sup>a, b</sup>, V. I. Belotelov<sup>a, b</sup>**

<sup>a</sup>*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991 Russia*

<sup>b</sup>*International Center for Quantum Optics & Quantum Technologies Limited Liability Company, Moscow, 121205 Russia*

*\*E-mail: ignatyeva@physics.msu.ru*

Received July 20, 2020; revised August 28, 2020; accepted September 28, 2020

The enhancement of intensity magneto-optical effects in structures containing photonic-crystal layers and a ferromagnetic dielectric—iron garnet, and supporting the excitation of quasi-surface Tamm modes at the boundary of the photonic crystal and garnet, has been demonstrated. It was shown that such structures possess high-Q resonances, and due to the near-surface localization of the electromagnetic field, they allow enhancement of the transverse magneto-optical Kerr effect and achievement of magneto-optical modulation values up to 100%.