

УДК 535.016:537.62

## МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В НАНОСТРУКТУРАХ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ

© 2022 г. С. В. Луценко<sup>1, \*</sup>, О. В. Боровкова<sup>1, 2</sup>, А. Н. Калиш<sup>1, 2</sup>, Д. А. Сылгачева<sup>1, 2</sup>, М. А. Кожаев<sup>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”, Сколково, Россия

\*E-mail: savlucenko@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.10.2021 г.

После доработки 11.10.2021 г.

Принята к публикации 22.10.2021 г.

Предложен новый метод детектирования периодически модулированной намагниченности ферромагнитных материалов, основанный на измерении магнитооптических эффектов в магнитоплазмонной наноструктуре и их зависимости от периода модуляции намагниченности. Показано, что величина магнитооптических эффектов зависит от пространственного фазового сдвига между периодически модулированной намагниченностью и плазмонной решеткой. Данная зависимость является гармонической и позволяет судить о периоде модуляции намагниченности.

DOI: 10.31857/S036767652202017X

В последние годы был достигнут значительный прогресс в области разработки различных магнитных наноструктур [1–11]. Магнитные наноструктуры – это объекты, в которых улучшение магнитооптических свойств достигается в первую очередь не за счет их химического состава, но посредством использования специально подобранной геометрии с характерным размером порядка длины волны света или даже меньше, что открывает возможности для совершенно новых физических свойств и эффектов. За счет создания специальных плазмонных и фотонных структур в виде металл-диэлектрических решеток, полностью диэлектрических решеток, комплексов наночастиц достигается значительная локализация и концентрация электромагнитного поля на субволновых масштабах за счет возбуждения волноводных и поверхностных плазмон-поляритонных мод (ППП). Это обеспечивает резкое, резонансное увеличение эффективности магнитооптических эффектов. Например, недавно в магнитоплазмонных структурах было продемонстрировано усиление эффектов Фарадея [1–3] и экваториального магнитооптического эффекта Керра [4–8] на порядки величины, а также появление принципиально нового интенсивного магнитооптического эффекта [9, 10]. Помимо регулярных и строго периодических плазмонных наноструктур, недавно было предложено использовать магнитные нано-

структуры с нарушенной пространственной симметрией. Комбинация нарушения временной симметрии из-за приложенного внешнего магнитного поля и нарушения пространственной симметрии специально подобранной геометрией плазмонной решетки позволяют добиться совершенно новых свойств у уже известных магнитооптических эффектов [11].

Кроме того, сама по себе субволновая локализация света плазмонными наноструктурами позволяет проводить измерения вариаций оптических свойств материала даже на пространственных масштабах меньше дифракционного предела. Однако к настоящему времени широко исследовались лишь структуры с однородно намагниченным магнитным слоем.

В то же время является возможным пространственный контроль вектора намагниченности в магнитном материале. Намагниченность может быть модулирована периодическим образом как за счет внутренних полей, в виде чередующихся полос доменов [12, 13], так и за счет внешних воздействий: посредством сжатия и растяжения [14, 15], из-за облучения ионами гелия [16], или, например, посредством взаимодействия ферроэлектрического и ферромагнитного слоев в двуслойных структурах [17]. Более того, спиновые волны, представляющие интерес для информационных технологий, создают меняющуюся со

временем периодическую модуляцию намагниченности в магнитных пленках [18–24].

В данной работе рассмотрены магнитоплазмонные структуры с намагниченностью, модулированной периодическим образом. Исследованы зависимости спектра пропускания и магнитооптического интенсивностного эффекта в зависимости от вида модуляции намагниченности в такой гибридной структуре. Изучено влияние ППП на магнитооптический отклик.

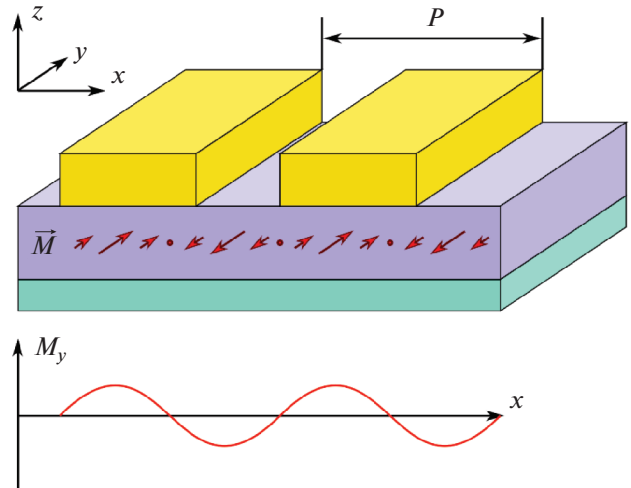
Принципиальная схема рассматриваемой магнитоплазмонной наноструктуры приведена на рис. 1. Она представляет собой одномерную субволновую золотую решетку, нанесенную поверх тонкой магнитной пленки на немагнитной подложке из гадолиний-галлиевого граната. В качестве материала для магнитной пленки выбран висмут-замещенный феррит-гранат, так как он сочетает низкие оптические потери и высокий магнитооптический отклик в видимом спектральном диапазоне, а также ближнем ИК. Для возбуждения ППП мод период плазмонной решетки выбран равным 630 нм, а ширина воздушного зазора – 85 нм, поэтому 86.5% поверхности покрыто золотом. Толщина металла 80 нм, толщина ферритмагнитной пленки 100 нм. Отметим, что такой тонкий ферритмагнитный слой препятствует возбуждению волноводных мод и для них была выбрана немного другая конфигурация.

В работе рассматривается конфигурация модуляции намагниченности в плоскости магнитной пленки перпендикулярно плазмонной решетке вдоль оси  $x$ , т.е. вектор намагниченности направлен вдоль оси  $y$ , но его амплитуда модулирована вдоль оси  $x$  (см. рис. 1). Модуляция величины намагниченности вдоль оси  $x$ , описывается гармоническим законом. В свою очередь, гирация ферритмагнитной среды пропорциональна намагниченности, следовательно, ее можно записать следующим образом:

$$g(x) = g_0 \sin\left(\frac{2\pi}{P_m} x + \phi\right), \quad (1)$$

где  $g_0$  – амплитуда модуляции намагниченности,  $P_m$  – период модуляции намагниченности,  $\phi$  – фазовый сдвиг между модуляцией намагниченности и плазмонной решеткой.

Так как гирация определяет соответствующие недиагональные элементы тензора диэлектрической проницаемости среды,  $\epsilon$ , то в рассматриваемой конфигурации гирация будет определять компоненты  $\epsilon_{xz}$  и  $\epsilon_{zx}$ . Таким образом, диэлектрические свойства исследуемой наноструктуры периодически модулируются как за счет плазмонной решетки, так и за счет модуляции намагниченности. Если период модуляции намагниченности соответствует периоду плазмонной решетки, то на-



**Рис. 1.** Схема рассматриваемой магнитоплазмонной наноструктуры. Гармоническая модуляция  $y$ -компоненты намагниченности внутри магнитного слоя схематически показана красной линией. Желтые области относятся к плазмонной решетке, фиолетовые – к магнитному слою, а зеленая область – к немагнитной подложке.

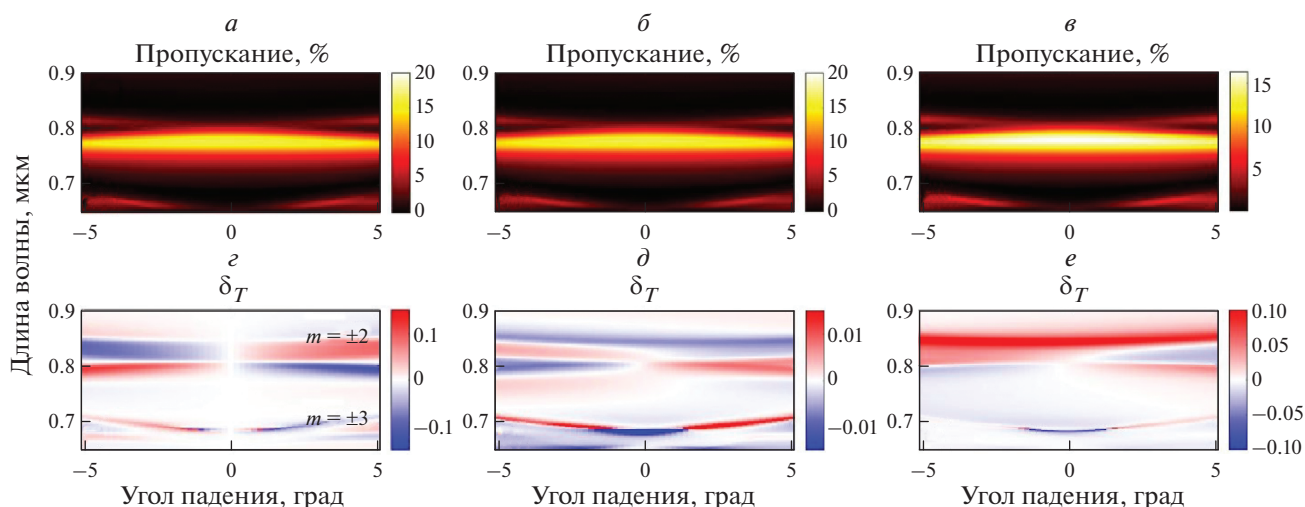
блюдаемые в такой наноструктуре магнитооптические эффекты имеют некоторые особенности, которые можно использовать для детектирования магнитных свойств структур.

С точки зрения физики, создание модуляции намагниченности действует как нарушение пространственной симметрии в наноструктуре. Если период колебаний намагниченности равен периоду плазмонной решетки, пространственная симметрия нарушается внутри одной ячейки решетки. Недавно было показано, что нарушение пространственной симметрии в магнитоплазмонных наноструктурах может привести к новому магнитооптическому эффекту, экваториальному интенсивностному магнитооптическому эффекту в пропускании [11]. В работе [11] нарушение пространственной симметрии было создано из-за нарушения пространственной симметрии элементарной ячейки плазмонной решетки. Такого же нарушения пространственной симметрии можно добиться при возбуждении спиновой волны.

Экваториальный интенсивностный магнитооптический эффект в пропускании определяется как относительное изменение интенсивности проходящего света  $T(M)$  при перемагничивании структуры:

$$\delta_T = 2 \frac{T(M_y) - T(-M_y)}{T(M_y) + T(-M_y)}, \quad (2)$$

где  $M_y$  –  $y$ -компонента намагниченности образца.



**Рис. 2.** Спектр пропускания и магнитооптического интенсивностного эффекта при отсутствии модуляции намагниченности (*a*, *z*), при модуляции намагниченности равной периоду плазмонной структуры (*b*, *d*), при модуляции намагниченности равной половине периода плазмонной структуры (*e*, *e*).

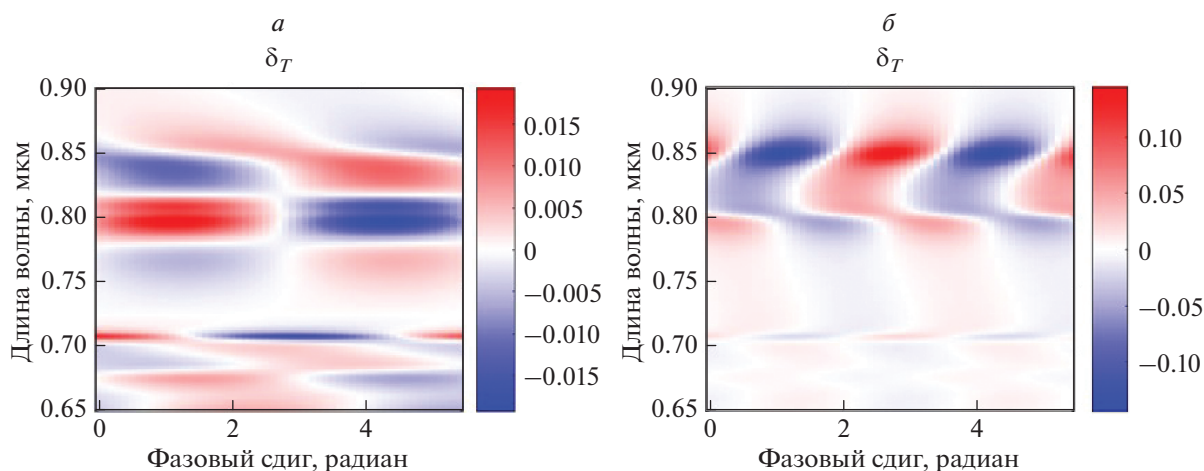
Одна из основных особенностей экваториального интенсивностного магнитооптического эффекта в пропускании для несимметричных структур состоит в том, что он не равен нулю даже при нормальном падении света.

Присутствие модуляции намагниченности в ферромагнитном слое нарушает пространственную симметрию наноструктуры с регулярной плазмонной решеткой, как на рис. 1, и возникает экваториальный интенсивностный магнитооптический эффект в пропускании при нулевом угле падения света. При помощи метода связанных мод в пространстве Фурье были рассчитаны спектры пропускания для системы с пространственной модуляцией гирации в среде для двух противоположных направлений  $M_y$ . На рис. 2*d*, 2*e* показаны спектры эффекта в зависимости от угла падения света (горизонтальная ось) и длины волны (вертикальная ось) при разных значениях периода модуляции намагниченности. Видно, что магнитооптический эффект отличен от нуля при нормальном падении света в спектральном диапазоне возбуждения ППП-мод, более того, магнитооптический интенсивностный эффект имеет постоянный знак и его величина практически одинакова в широком диапазоне углов падения. Но стоит обратить внимание, что величина эффекта в первом случае на порядок меньше чем в случае, когда модуляция намагниченности равна половине периода плазмонной структуры и когда модуляция намагниченности отсутствует вовсе (рис. 2*z*). То есть по величине эффекта можно судить о периоде модуляции намагниченности в анализируемых структурах, но это не всегда бывает удобно.

Ситуация обстоит иначе если рассмотреть зависимость интенсивностного магнитооптического эффекта от фазового сдвига между периодической модуляцией намагниченности и плазмонной структурой. На рис. 3*a* и 3*b* видно, что при изменении пространственного смещения модуляции намагниченности относительно элементарной ячейки плазмонной структуры картина эффекта кардинально меняется, что значительно упрощает задачу на детектирование и исследование модуляции намагниченности в ферромагнетике, так как речь идет уже не о величине эффекта, а о виде спектра.

Такая концепция может быть распространена и на микрометровый диапазон. Были рассмотрены такие геометрии структур, чтобы в них наблюдалась модуляция намагниченности с микрометровым периодом, причем благодаря особенностям спектра магнитооптического эффекта такой пространственный масштаб модуляции намагниченности может быть измерен, например, на длине волны широко распространенных лазерных диодов (с рабочей длиной волны 1.064 мкм).

Предложенная методика исследования модуляции намагниченности может использовать не только резонанс вблизи плазмонных мод, но и резонанс на волноводных модах, с одним лишь условием, что магнитный слой в таком случае должен быть более толстый, для лучшего возбуждения резонанса (рис. 4). Для демонстрации этого эффекта период плазмонной решетки был выбран равным 580 нм, а ширина воздушного зазора — 75 нм. Толщина металла 80 нм, толщина ферромагнитной пленки взята 150 нм. Поскольку один и тот же образец магнитоплазмонной наноструктуры может поддерживать возбуждение обо-

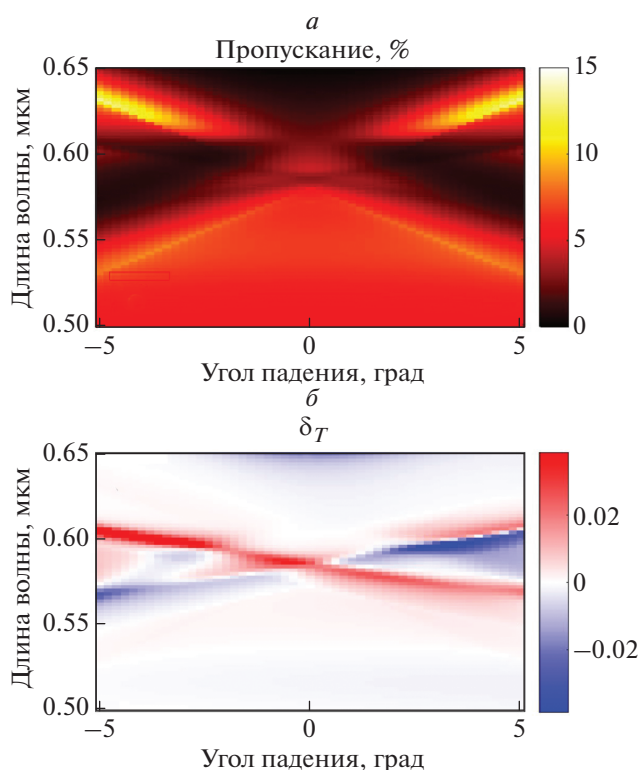


**Рис. 3.** Спектры зависимости магнитооптического интенсивностного эффекта от фазового сдвига при модуляции намагниченности равной периоду плазмонной структуры (а), равной половине периода плазмонной структуры (б).

их типов мод, а также может содержать набор плазмонных решеток с различными параметрами, а именно периодом и воздушным зазором, поэтому, измеряя магнитооптический эффект с разных решеток, можно определять колебания намагниченности с разным пространственным периодом модуляции.

Таким образом, можно сказать, что нарушение пространственной симметрии наноструктуры посредством модуляции намагниченности приводит к усилению или новым свойствам магнитооптических эффектов в таких структурах. Это может быть использовано для обнаружения присутствия в магнитном слое структуры модуляции намагниченности с заданным пространственным периодом без дополнительного Фурье-анализа.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-72-10159). О.В.Б. благодарит за персональную поддержку Фонд развития теоретической физики и математики “БАЗИС”. А.Н.К. и В.И.Б. являются членами научно-образовательной школы МГУ “Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина”.



**Рис. 4.** Спектры пропускания и магнитооптического интенсивностного эффекта в случае использования волноводных мод для исследования периодической модуляции намагниченности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yao Chin J., Steidle T., Wehler T. et al. // Nature. Commun. 2013. V. 4. No. 1. Art. No. 1599.
2. Krichevsky D.M., Kuzmichev A.N., Sylgacheva D.A. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 1092. No. 1. Art. No. 012069.
3. Levy M., Borovkova O.V., Sheidler C. et al. // Optica. 2019. V. 6. No. 5. P. 642.
4. Belotelov V.I., Akimov I.A., Pohl M. et al. // Nature Nanotech. 2011. V. 6. No. 6. P. 370.
5. Kreilkamp L.E., Belotelov V.I., Chin J.Y. et al. // Phys. Rev. X. 2013. V. 3. No. 4. Art. No. 041019.
6. Borovkova O.V., Hashim H., Kozhaev M.A. et al. // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 112. No. 6. Art. No. 063101.
7. Borovkova O.V., Spitzer F., Belotelov V.I. et al. // Nanophotonics. 2019. V. 8. No. 2. P. 287.
8. Borovkova O., Kalish A., Belotelov V. // Opt. Lett. 2016. V. 41. No. 19. P. 4593.
9. Belotelov V.I., Kreilkamp L.E., Akimov I.A. et al. // Nature Commun. 2013. V. 4. No. 1. P. 1.
10. Knyazev G.A., Kapralov P.O., Gusev N.A. et al. // ACS Photonics. 2018. V. 5. No. 12. P. 4951.

11. *Borovkova O.V., Hashim H., Ignatyeva D.O. et al.* // Phys. Rev. B. 2020. V. 102. No. 8. Art. No. 081405.
12. *Hubert A., Schäfer R.* Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures. Springer, 2008.
13. *Barturen M., Rache Salles B., Schio P. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. Art. No. 092404.
14. *Dho J., Kim Y.N., Hwang Y.S. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. No. 9. P. 1434.
15. *Dai G., Xing X., Shen Y., Deng X.* // J. Phys. D. 2020. V. 53. Art. No. 055001.
16. *Saerbeck T., Huckfeldt H., Toperverg B.P., Ehresmann A.* // Nanomaterials. 2020. V. 10. Art. No. 752.
17. *Lahtinen T.H.E., Tuomi J.O., van Dijken S.* // Adv. Mater. 2011. V. 23. P. 3187.
18. *Van Kampen M., Jozsa C., Kohlhepp J.T. et al.* // Phys. Rev. 2002. V. 88. No. 22. Art. No. 227201.
19. *Kalashnikova A.M., Kimel A.V., Pisarev R.V. et al.* // Phys. Rev. 2007. V. 99. No. 16. Art. No. 167205.
20. *Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing T.* // Rev. Modern Phys. 2010. V. 82. No. 3. Art. No. 2731.
21. *Никитов С.А., Калябин Д.В., Луценков И.В. и др.* // УФН. 2015. Т. 185. № 10. С. 1099.
22. *Satoh T., Terui Y., Moriya R. et al.* // Nature Photon. 2012. V. 6. No. 10. P. 662.
23. *Kimel A.V., Kirilyuk A., Usachev P.A. et al.* // Nature. 2005. V. 435. No. 7042. P. 655.
24. *Trager N., Gruszecki P., Lisecki F. et al.* // Nanoscale 2020. V. 12. Art. No. 17238.

## Magneto-optical effects in the nanostructures with spatial magnetization modulation

S. V. Lutsenko<sup>a, \*</sup>, O. V. Borovkova<sup>a, b</sup>, A. N. Kalish<sup>a, b</sup>, D. A. Sylgacheva<sup>a, b</sup>,  
M. A. Kozhaev<sup>a</sup>, V. I. Belotelov<sup>a, b</sup>

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

<sup>b</sup> *Russian Quantum Centre, Skolkovo, 143025 Russia*

\*e-mail: savlucenko@yandex.ru

The novel detection method of the ferrimagnetic materials with the periodically modulated magnetization is proposed. The method is based on the measurements of the magneto-optical effects in magnetoplasmonic nanostructure and their dependences on the magnetization modulation period. It is shown that the magnitude of the magneto-optical effects depends on the phase shift between periodic magnetization modulation and the plasmonic grating. Such dependence is periodic and allows to determine the period of the magnetization modulation.