

## МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ НА МАГНИТНОЙ ПОДЛОЖКЕ

© 2009 Д.А. Быков

Институт систем обработки изображений РАН, Самара

Поступила в редакцию 30.12.2008

Исследованы магнитооптические свойства гетероструктуры, состоящей из золотой дифракционной решётки и магнитной диэлектрической подложки. Вектор намагниченности параллелен штрихам решётки. Установлено, что структура обладает нечётным по намагниченности магнитооптическим эффектом. Эффект заключается в изменении интенсивности отражённого света при перемагничивании. Представлено объяснение наблюдаемого эффекта связанное с изменением условий возбуждения поверхностной электромагнитной волны.

*Ключевые слова:* дифракционная решётка, магнитооптика, поверхностная электромагнитная волна.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время металлодиэлектрические структуры с резонансными свойствами являются предметом интенсивных исследований [1]. Большой интерес представляют гетероструктуры, содержащие намагниченные слои и обладающие резонансными магнитооптическими свойствами [2–4]. В работах [2–4] исследованы магнитооптические свойства двухслойной гетероструктуры, состоящей из металлической дифракционной решётки и диэлектрического намагниченного слоя (вектор намагниченности перпендикулярен слою). В [2–4] показано, что в указанные структуры обладают как резонансами пропускания, так и резонансами углов Фарадея и Керра.

В настоящей работе исследуется структура, состоящая из золотой дифракционной решётки на намагниченной подложке, вектор намагниченности направлен параллельно штрихам решётки. В результате численного моделирования на основе метода Фурье-мод обнаружено, что в данной структуре возникает нечётный по намагниченности магнитооптический эффект, заключающийся в изменении коэффициента отражения структура при изменении намагниченности подложки. Величина эффекта на порядок превышает аналогичные эффекты для однородных магнитных плёнок [5, 6].

### ГЕОМЕТРИЯ СТРУКТУРЫ И ТИП МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Геометрия исследуемой структуры представлена на рис. 1. Структура состоит из бинарной дифракционной решётки из золота, расположен-

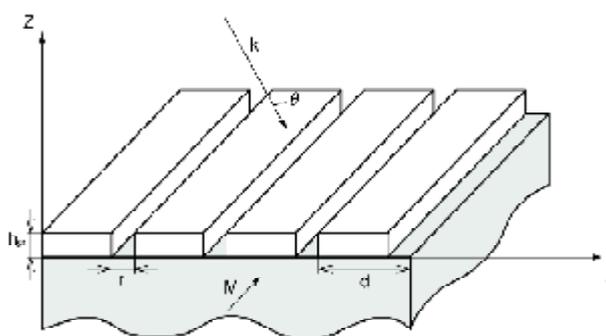


Рис. 1. Геометрия структуры

ной на подложке из намагниченного материала. Вектор намагниченности  $\mathbf{M}$  направлен вдоль штрихов решётки.

Показатель преломления среды над структурой равен единице. Тензор диэлектрической проницаемости материала подложки имеет следующий вид [7]:

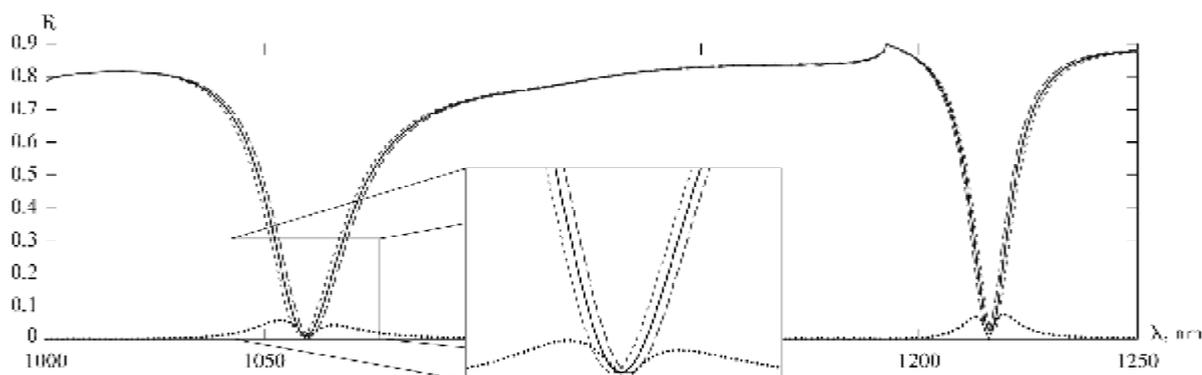
$$\epsilon_M = \begin{bmatrix} \epsilon & 0 & ig \\ 0 & \epsilon & 0 \\ -ig & 0 & \epsilon \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $g$  — модуль вектора гирации среды, пропорциональный намагниченности [5]. Магнитная проницаемость всех материалов считается равной единице [7].

Для моделирования процесса дифракции света на рассмотренной структуре применялся метод Фурье-мод [8]. В расчётах была использована численно-устойчивая реализация метода, рассмотренная в [9, 10].

На рис. 2 представлены расчётные зависимости коэффициента отражения от длины волны для трёх значений намагниченности:  $-g$ ,  $0$ ,  $+g$ . Случай  $g = 0$  соответствует нена-

Быков Дмитрий Александрович, техник.  
E-mail: bycovd@gmail.com



**Рис. 2.** Зависимость интенсивности нулевого отражённого порядка от длины волны при отсутствии намагниченности ( $g = 0$  — непрерывная линия) и противоположных направлениях (“+g” — длинный пунктир, “-g” — короткий пунктир). Величина интенсивностного эффекта (2) — точечная линия

магнитной подложке, случаи “-g” и “+g” соответствуют двум противоположным направлениям вектора намагниченности. Расчёт проводился при наклонном падении волны с ТМ-поляризацией под углом  $\theta = 12^\circ$  при следующих параметрах: период  $d = 485$  нм, ширина отверстия  $a = 0.05 \cdot d = 24$  нм, толщина решётки  $h_{gr} = 163$  нм. Для диэлектрической проницаемости материала решётки использовались справочные данные для золота [11]. Для тензора диэлектрической проницаемости магнитного слоя использовались параметры  $\varepsilon = 5.06 + 0.0004i$ ,  $g = (1.53 - 0.003i) \times 10^{-2}$ . Указанные параметры являются типичными для магнитооптических материалов типа висмут-замещённый диспрозиевый или иттриевый феррит-гранат в области ближнего ИК.

Рис. 2 показывает, что введение намагниченности приводит к смещению спектров, соответствующих случаям “-g” и “+g”. Определим величину интенсивностного эффекта в отражении по формуле

$$I_R(g) = |R_0(-g) - R_0(g)|, \quad (2)$$

где  $R_0(g)$  — интенсивность нулевого отражённого порядка дифракции при намагниченности подложки “+g”. Величина интенсивностного эффекта показана на рис. 2 точечной линией. Максимальная величина эффекта близка к 8%. Следует отметить, что величина эффекта (2) для плёнок ферромагнитных материалов составляет всего порядка 0.1% [5]. В работе [6] исследован аналогичный интенсивностный эффект в многослойной системе магнитных плёнок. В [6] показано усиление интенсивностного эффекта при генерации в системе ПЭВ, однако величина эффекта также составляет менее процента. Таким образом, величина интенсивностного эффекта на рис. 2 является значительной по сравнению с аналогичными эффектами для намагниченных однородных плёнок.

## ОБЪЯСНЕНИЕ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Согласно рис. 2, интенсивностный эффект наблюдается в окрестностях длин волн  $\lambda = 1060$  нм и  $\lambda = 1220$  нм. Отметим, что в разных минимумах спектра смещение происходит в разные стороны. Например, при длине волны  $\lambda = 1060$  нм смещение минимума отражения при намагниченности “+g” происходит в сторону больших длин волн, а при длине волны  $\lambda = 1220$  нм — в сторону меньших.

Анализ распределения поля под решёткой показал, что рассматриваемые эффекты связаны с возбуждением поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ) на нижней границе решётки. Действительно, длины волн  $\lambda = 1060$  нм и  $\lambda = 1220$  нм хорошо совпадают с условием возбуждения ПЭВ на нижней границе дифракционной решётки порядками  $\pm 1$ . Условие возбуждения ПЭВ порядком с номером  $m$  имеет вид

$$k_{x,m} = \text{Re}(k_{SPP}), \quad (3)$$

где

$$k_{SPP} = \pm k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_1}{\varepsilon + \varepsilon_1}} \quad (4)$$

— константа распространения ПЭВ для границы раздела сред между металлом (диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_1$ ) и немагнитным диэлектриком (диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$ ). Из (4) получим длину волны в виде

$$\lambda_m = \frac{d}{m} \left( \frac{\text{Re} k_{SPP}}{k_0} - \sin \theta \right). \quad (5)$$

Из (5) при  $m = \pm 1$  получим  $\lambda_{-1} = 1056$  нм и  $\lambda_{+1} = 1226$  нм, соответственно. Таким образом, минимумы отражения на рис. 1 при  $g = 0$  хорошо совпадают с условием возбуждения ПЭВ.

Смещения спектров при значениях намагниченности  $\pm g$  связаны с зависимостью условия возбуждения ПЭВ от величины намагниченности. Константа распространения ПЭВ на границе раздела между металлом и магнитной средой с тензором диэлектрической проницаемости (1) может быть получена из уравнений Максвелла в виде:

$$k_{SPP}(g) = k_{SPP}(0) - ik_0 g \frac{\varepsilon_1^2}{(\varepsilon + \varepsilon_1)^{3/2}(\varepsilon - \varepsilon_1)} + o(g), \quad (6)$$

где первое слагаемое – константа распространения ПЭВ для границы двух немагнитных сред. В (6) в качестве  $\varepsilon$ ,  $g$  следует использовать вышеприведенные компоненты тензора (1) диэлектрической проницаемости подложки. Согласно (6), при малых  $g$  зависимость константы распространения ПЭВ от намагниченности  $g$  является линейной. Уравнение (6) позволяет получить длины волн, при которых происходит возбуждение ПЭВ при намагниченной подложке в виде

$$\lambda_m(g) = \lambda_m(0) + \frac{d}{m} \operatorname{Im} g \frac{\varepsilon_1^2}{(\varepsilon + \varepsilon_1)^{3/2}(\varepsilon - \varepsilon_1)}, \quad (7)$$

где  $\lambda_m(0)$  имеет вид (5). Формула (7) объясняет смещение минимумов отражения по длине волны на рис. 2. Согласно (7), смещение минимумов, соответствующих порядкам с номерами  $+1$  и  $-1$ , должно происходить в разных направлениях, что также наблюдается на рис. 2. Формула (7) также позволяет оценить величину смещения минимумов спектров на рис. 2. Для первых порядков получим следующие величины смещений  $\Delta\lambda_{-1} = |\lambda_{-1}(g) - \lambda_{-1}(-g)| = 2.2 \text{ нм}$ ,  $\Delta\lambda_{+1} = |\lambda_{+1}(g) - \lambda_{+1}(-g)| = 1.7 \text{ нм}$ . Расчётные значения согласуются с расстояниями между минимумами спектров при намагниченностях “ $+g$ ” и “ $-g$ ”. При  $\lambda = 1060 \text{ нм}$  и  $\lambda = 1220 \text{ нм}$  расстояния между минимумами смещенных спектров на рис. 2 составляют 2 нм и 1.4 нм, соответственно.

При малых  $g$  не только константа распространения ПЭВ, но и величина наблюдаемого эффекта (2) линейно зависит от  $g$ . На рис. 3 приведена расчётная зависимость величины интенсивностного эффекта от  $g$  при  $\lambda = 1065 \text{ нм}$ . Значения по оси абсцисс нормированы на величину  $\operatorname{Re}(g) = 0.0153$ , использованную при расчёте спектров на рис. 2. Рис. 3 показывает близкий к линейному вид эффекта по  $g$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структура, состоящая из золотой решётки на диэлектрической подложке, намагниченной параллельно штрихам решётки, обладает нечётным

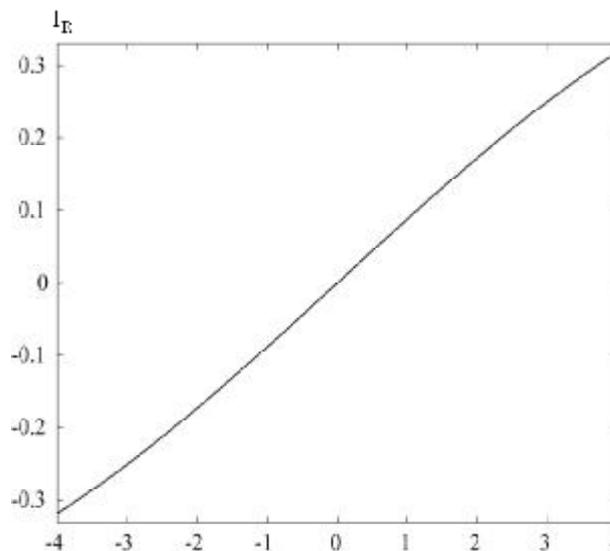


Рис. 3. Величина интенсивностного эффекта в зависимости от  $g$

по намагниченности интенсивностным эффектом. Эффект объясняется зависимостью условий возбуждения ПЭВ волн на нижней границе решётки от величины намагниченности материала подложки. Изменение условий возбуждения ПЭВ вызывает смещение минимумов в спектре пропускания при изменении намагниченности. Рассмотренные гетероструктуры могут быть использованы в оптических датчиках магнитного поля.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 09-07-92421, 08-07-99005, 07-01-96602, 07-07-91580, гранта Президента РФ № НШ-3086.2008.9, “Фонда содействия отечественной науке”, фонда “Фундаментальные исследования и высшее образование” (RUXO-014-SA-06).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ebbesen T. W., Lezec H. J., Ghaemi H. F., Thio T., Wolff P. A.* Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays // *Nature*, 1998. 391. Pp. 667–669.
2. *Belotelov V. I., Doskolovich L. L., Zvezdin A. K.* Extraordinary Magneto-Optical Effects and Transmission through Metal-Dielectric Plasmonic Systems // *Physical Review Letters*, 2007. Vol. 98. no. 7. Pp. 77401.
3. *Досколович Л. Л., Безус Е. А., Быков Д. А. и др.* Резонансные магнитооптические свойства в дифракционных решетках с намагниченным слоем // *Компьютерная оптика*, 2007. Т. 32. №1. С. 4–8.
4. *Belotelov V. I., Doskolovich L. L., Kotov V. A. et al.* Magneto-optical effects in the metal-dielectric gratings // *Optics Communications*, 2007, Vol. 278, no. 1, Pp. 104–109
5. *Zvezdin A. K., Kotov A. K.* Modern Magnetooptics and Magneto-optical Materials – Bristol and Philadelphia,

- 
- IOP Publishing, 1997.
6. *Bonod N., Reinisch R., Popov E., Neviere M.* Optimization of surface-plasmon-enhanced magneto-optical effects // *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, Vol. 21, No. 4. Pp. 791–797
  7. *Višovský T., Postava K., Yamaguchi T., Lopusnik R.* Magneto-Optic Ellipsometry in Exchange-Coupled Films // *Appl. Opt.*, 2002. 41(19). Pp. 3950–3960.
  8. *Moharam M.G., Grann Eric B., Pommet Drew A., Gaylord T.K.* Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings // *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995. 12(5). Pp.1068–1076.
  9. *Li Lifeng.* Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures // *J. Opt. Soc. Am A*, 1996. 13(9). Pp.1870–1876.
  10. *Moharam M.G., Pommet Drew A., Grann Eric B., Gaylord T.K.* Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach // *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995. 12(5). Pp.1077–1086.
  11. *Palik, E.D.* Handbook of optical constants of solids. Academic Press Handbook Series – New York, Academic Press, 1985.

## MAGNETO-OPTICAL PROPERTIES OF DIFFRACTION GRATING ON MAGNETIZED SUBSTRATE

© 2009 D.A. Bykov

Image Processing Systems Institute of Russian Academy of Science, Samara

Magneto-optical properties of perforated heterostructure consisting of metallic grating on magnetic dielectric substrate are investigated. It is shown that considered structure demonstrates a magnetization-odd magneto-optical effect determined by the relative change in intensity of the transmitted or reflected light when the sample is magnetized parallel to the grating slits. Magneto-optical effect is explained in terms of surface plasmon-polariton excited on grating – magnetic substrate interface.

Keywords: diffraction grating, magneto-optics, surface plasmon-polariton.