

## РЕЗОНАНСНЫЙ ИНТЕНСИВНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ В ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТКАХ С НАМАГНИЧЕННЫМ СЛОЕМ

© 2008 Е.А. Безус, Д.А. Быков

Институт систем обработки изображений РАН  
Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрен магнитооптический эффект, возникающий при прохождении электромагнитной волны через двухслойную структуру, состоящую из металлической дифракционной решетки и намагниченного диэлектрического слоя. В результате строгого решения задачи дифракции на структуре обнаружена сильная зависимость интенсивности нулевого порядка дифракции от намагниченности слоя. Предложено качественное объяснение возникающего эффекта, основанное на связи с волноводными модами.

*Магнитооптика, магнитооптический эффект, дифракционная решётка, строгая теория дифракции*

### Введение

Интерес к магнитооптическим материалам обусловлен как развитием технологий их производства, так и необходимостью новых механизмов для эффективного управления параметрами электромагнитного излучения. Материалы и структуры с ярко выраженными магнитооптическими свойствами могут найти применение в оптических изоляторах, модуляторах света, оптических затворах и других устройствах [1]. Существуют два основных подхода к созданию таких материалов. Первый заключается в надлежащем выборе их химического состава, так, например, допирование гранатов иттрия и гадолиния висмутом или другими редкоземельными металлами позволяет усилить некоторые магнитооптические электронные переходы, благодаря чему возможно увеличение константы Фарадея на порядок. Второй способ, являющийся дополнением к первому, – изменение свойств материалов путем микро- или наноструктурирования. Как правило, под этим подразумевают создание на поверхности или внутри плёнки периодической структуры, образованной субволновыми отверстиями или штрихами. Именно такой подход рассмотрен в настоящей работе.

Следует отметить, что существует всего несколько работ, посвященных исследованию дифракционных периодических структур из магнитного материала [2-6]. В частности, в работах [5,6] исследуются магнитооптические свойства дифракционных решёток в случае полярной намагниченности. В данной работе рассматриваются ана-

логичные структуры в случае меридиональной намагниченности.

### Геометрия структуры и параметры задачи дифракции

Геометрия исследуемой двухслойной структуры показана на рис. 1. Верхний слой представляет собой бинарную дифракционную решётку из золота. Под ней находится равномерно намагниченный слой, вектор намагниченности которого лежит в плоскости слоя и перпендикулярен штрихам решётки. Для решения задачи дифракции электромагнитной волны на данной структуре использовался модовый метод (rigorous coupled-wave analysis) [7-12]. Данный метод сводит решение задачи дифракции к решению системы линейных алгебраических уравнений. Решение задачи дифракции было основано на устойчивом алгоритме, предложенном в [7,10].

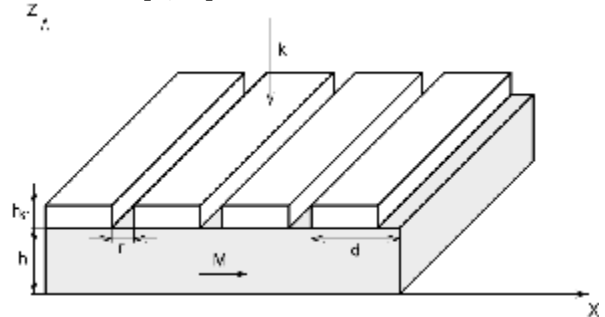


Рис. 1. Геометрия двухслойной структуры, содержащей дифракционную решётку и магнитный слой

При определении поля в каждом слое использовались специальные правила для разложения в ряд Фурье произведения функ-

ций [9,12]. Применение этих правил значительно улучшает сходимость используемого метода в случае наличия в структуре материалов с высокой проводимостью.

В решётке диэлектрическая проницаемость описывается кусочно-постоянной периодической функцией. В нижнем слое диэлектрическая проницаемость постоянна и задаётся тензором (1):

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

где  $\epsilon$  – главная диэлектрическая проницаемость среды,  $q$  – величина, характеризующая намагничённость среды. Магнитная проницаемость считалась равной единице.

### Результаты расчётов

На рис. 2 представлена зависимость пропускания от длины волны для намагничённого слоя и при отсутствии намагничённости (при  $q = 0$  в (1)). Расчёт проводился для нормального падения плоской волны с ТМ-поляризацией при следующих параметрах: период  $d = 886$  нм, ширина отверстия  $r = 88$  нм, толщина решётки  $h_{gr} = 302$  нм,

толщина магнитного слоя  $h = 883$  нм. В качестве значений диэлектрической проницаемости материала решётки использовались справочные данные для золота. Для магнитного слоя использовались параметры  $\epsilon = 5,5 + 0,0025i$ ,  $q = (1 - 0,15i) \times 10^{-2}$ , соответствующие материалу Bi:YIG (железотриевый гранат, допированный висмутом).

Рис. 2 показывает, что в случае намагничённого слоя спектр пропускания структуры имеет резкий минимум при длине волны  $\lambda = 1013$  нм. Данный эффект также проявляется в виде пика в спектре отражения (рис. 3). Узкая спектральная ширина наблюдаемого эффекта говорит о его резонансной природе. По аналогии с эффектом изменения коэффициента отражения, возникающим при отражении от магнитного материала, будем называть данный эффект интенсивностным.

Для объяснения природы резонансных пиков на рис. 2, 3 были исследованы взаимные зависимости параметров структуры (высота и ширина ступенек, период, высота магнитного слоя, материалы решётки и слоя), при которых проявляются аналогичные свойства.

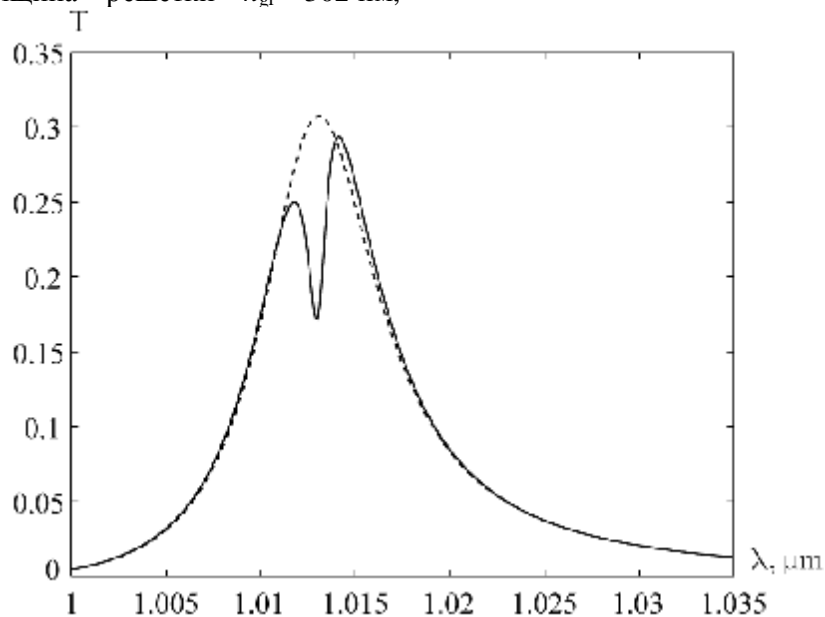


Рис. 2. Пропускание в случае намагничённости (сплошная линия) и отсутствия намагничённости (пунктирная линия)

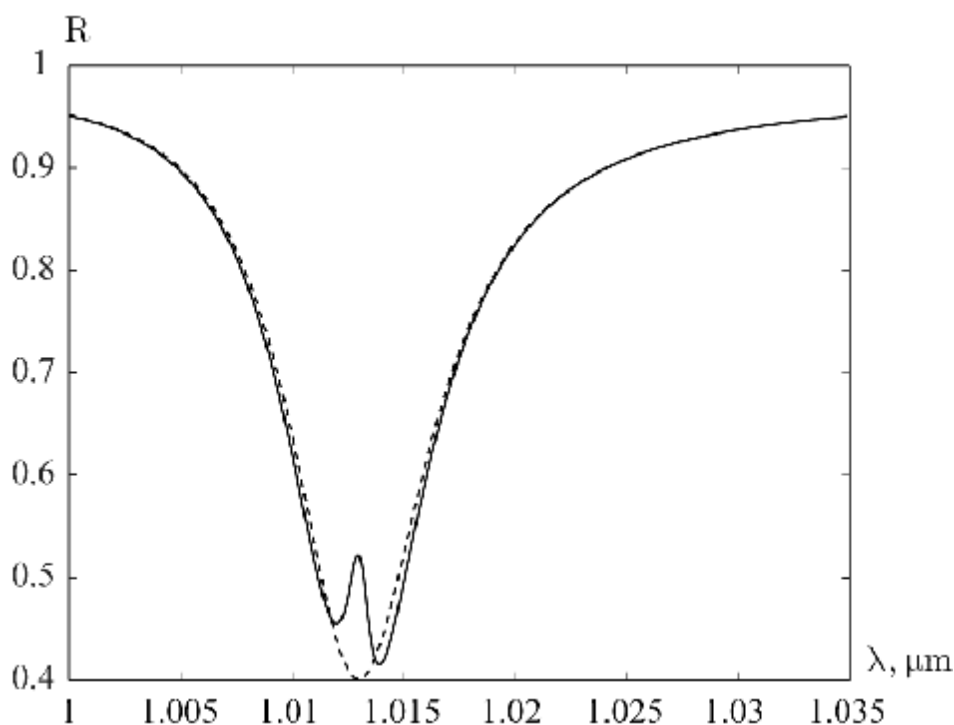


Рис. 3. Отражение в случае намагниченности (сплошная линия) и отсутствия намагниченности (пунктирная линия)

Было обнаружено, что интенсивностный эффект не зависит от таких параметров решётки, как ширина и высота ступеньки. Изменение этих параметров влияет лишь на величину пика, но не на длину волны, при которой возникает рассматриваемый эффект. При изменении таких параметров структуры, как период, диэлектрическая проницаемость материала намагниченного слоя и его толщина, минимум пропускания смещается. Это позволяет сделать предположение о связи наблюдаемого эффекта с одним из порядков дифракционной решётки в магнитном слое. В рассматриваемом случае нормального падения дифракционные порядки симметричны. Порядки с номерами  $-k$ ,  $+k$  распространяются под одинаковыми углами, и, следовательно, их влияние на спектр пропускания происходит при одной длине волны. Рассмотрим наклонное падение под малым углом в  $0,2^\circ$  (рис. 4). При наклонном падении, соответствующие порядки  $-k$ ,  $+k$  будут различаться. Соответственно их влияние на спектр будет происходить при различных длинах волн. Приравняв направления распространения поряд-

ков (1), можно установить номер порядка по разнице длин волн (2).

$$k_0 \left( n \sin \theta + m \frac{\lambda_1}{d} \right) = -k_0 \left( n \sin \theta - m \frac{\lambda_2}{d} \right), \quad (2)$$

$$m = \frac{2d \sin \theta}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (3)$$

где  $m$  – номер порядка,  $d$  – период,  $n = 1$  – показатель преломления над и под рассматриваемой структурой.

Расстояние между минимумами на рис. 4 соответствует второму прошедшему порядку дифракции.

На рис. 5 представлены графики зависимостей длин волн, при которых возникают различные типы резонансов, от главной компоненты диэлектрической проницаемости магнитного слоя.

Сплошная линия на рис. 5 описывает интенсивностный эффект. Кривая интенсивностного эффекта совпадает с условием возбуждения ТЕ-моды 2-го порядка.

Расчёт мод проводился аналитически в предположении, что над магнитным слоем находится однородный слой из золота. При

рассматриваемых параметрах значением намагниченности также можно пренебречь.

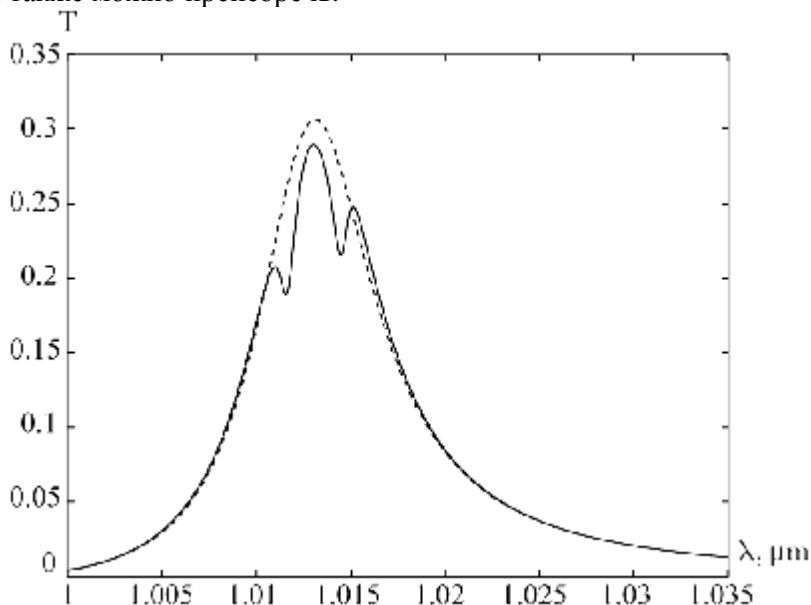


Рис. 4. Пропускание в случае намагниченности (сплошная линия) и в отсутствии намагниченности (пунктирная линия) при наклонном падении под углом  $0,2^\circ$

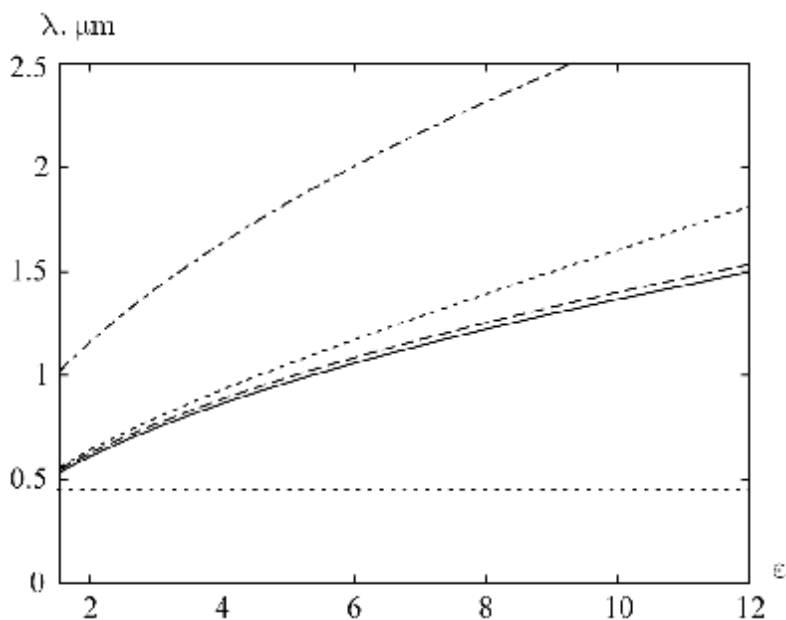


Рис. 5. Длины волн резонансов структуры в зависимости от главной диэлектрической проницаемости слоя: интенсивностный эффект, мода  $TE_2$  – сплошная линия; возбуждение 2-ым порядком решётки ПЭВ на верхней и нижней границах – точечная; возникновение 2-го порядка (аномалия Рэля-Вуда) – пунктирная, мода  $TE_1$  – точка-тире

Вблизи кривой интенсивностного эффекта пунктирной линией показана аномалия Рэля-Вуда, связанная с появлением 2-го распространяющегося порядка дифракции. Остальные графики резонансов, связанных с возбуждением на верхней и нижней границах

решетки поверхностных электромагнитных волн и условием возбуждения  $TE$ -моды 1-го порядка, находятся на большем расстоянии.

На рис. 6а представлена зависимость величины эффекта (разности пропускания при отсутствии и наличии намагниченности)

от двух параметров структуры: периода и высоты слоя. Аналогичный график с наложенными кривыми, соответствующими рассчитанным модам, показан на рис. 6б. Аналитические кривые мод точно совпадают с максимумами на графике. Кроме того, максимального значения эффект достигает в окрестностях прямых  $d = \lambda$  и  $d = 2\lambda$ , которые соответствуют возникновению новых порядков дифракции.

Таким образом, интенсивный эффект возникает при той же длине волны, что и волноводная ТЕ-мода, возбуждаемая одним из порядков дифракции в магнитном слое. Помимо этого, условием является близость к аномалиям Рэля-Вуда для соответствующего порядка. Отметим, что в этом случае порядок распространяется почти параллельно плоскости слоя. Такое распространение, как и модовое, дает увеличение оптической длины пути в магнитном слое.

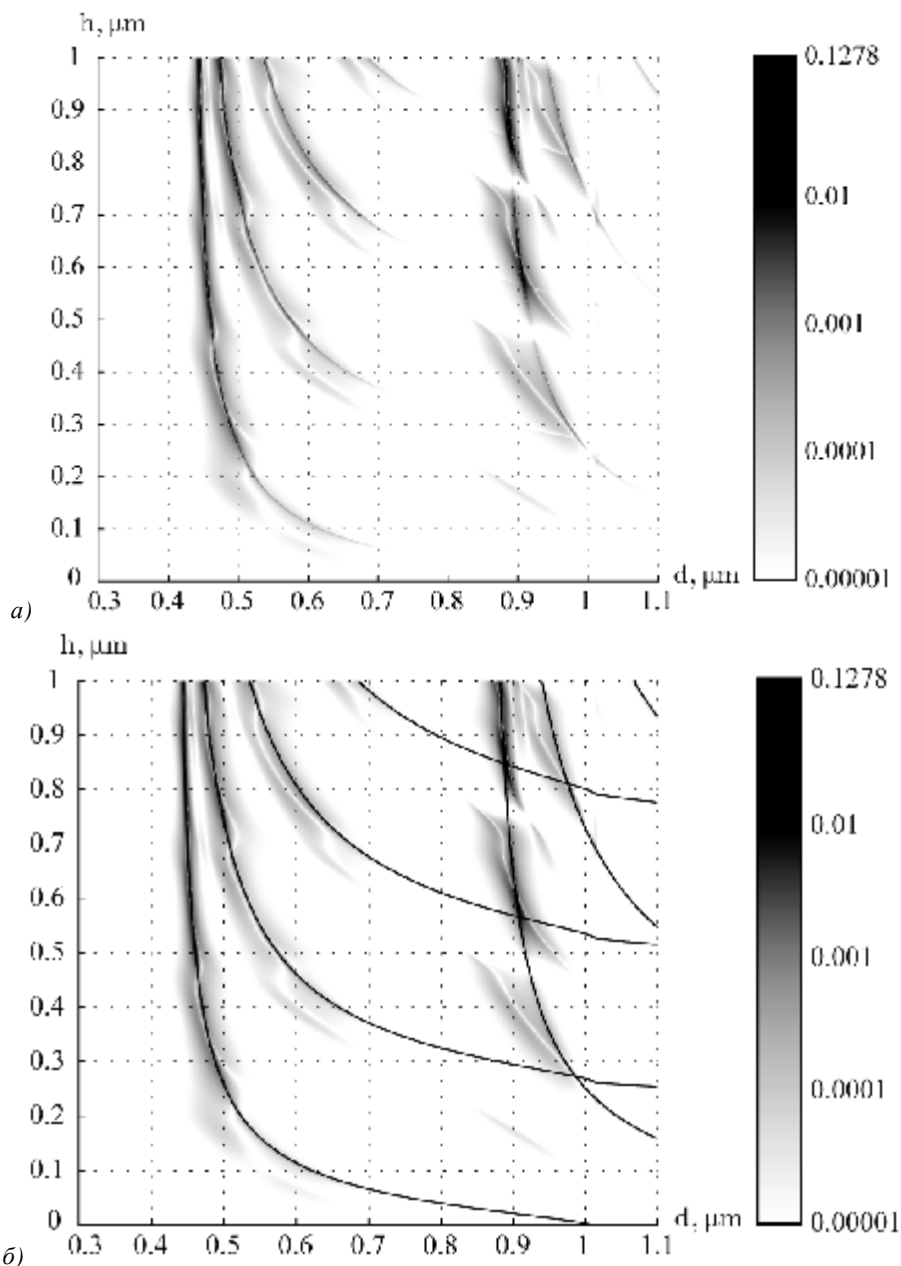


Рис. 6. Величина эффекта (разности пропускания при отсутствии и наличии намагниченности) в зависимости от высоты слоя и периода дифракционной решётки (а); то же с наложенными кривыми, соответствующими возбуждению мод одним из порядков (б)

Кроме указанного эффекта, обусловленного возбуждением ТЕ-моды, в структурах данного типа могут наблюдаться эффекты, напрямую не связанные с конверсией поляризации. В частности, при наклонном падении при различных направлениях вектора намагниченности (в плоскости слоя параллельно и перпендикулярно штрихам решетки) возникают более слабые эффекты **изменения коэффициента пропускания** в окрестностях резонансов немагнитной структуры, которые могут быть объяснены изменением условий возникновения этих резонансов вследствие изменений тензора диэлектрической проницаемости среды.

### Заключение

Рассмотрена структура, состоящая из золотой бинарной дифракционной решетки и намагниченного слоя. Показано, что такая система обладает выраженным магнитооптическим эффектом изменения коэффициента пропускания в зависимости от намагниченности нижнего слоя. Предложено качественное объяснение наблюдаемых эффектов.

Изменение оптических свойств рассмотренной системы при изменении намагниченности делает перспективным использование данных структур в оптических изоляторах, модуляторах света, оптических затворах.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 07-07-97601-р\_офи, 07-01-96602-р\_Поволжье\_а, 07-07-91580-АСП\_а, гранта Президента РФ № НШ-3086.2008.9, фонда «Фундаментальные исследования и высшее образование» (RUXO-014-SA-06), Фонда содействия отечественной науке.

### Библиографический список

1. **Dotsch, H.** Applications of magneto-optical waveguides in integrated optics: review [текст] / H. Dotsch [and others] // J. Opt. Soc. Am. B. – 2005. – 22 (1). – P. 240-253.
2. **Diwekar, M.** Optical and magneto-optical studies of two-dimensional metallodielectric photonic crystals on cobalt films [текст] / M. Diwekar [and others] // Appl. Phys. Lett. – 2004. – 84 (16). – P.3112-3114.
3. **Belotelov, V.I.** Magneto-optics and extraordinary transmission of the perforated metallic films magnetized in polar geometry [текст] / V.I. Belotelov, A.K. Zvezdin // JMMM, 2005. – 300 (1). – P.260-263.
4. **Bergman, D.J.** Strong-field magnetotransport of conducting composites with a columnar microstructure [текст] / D.J. Bergman, Y.M. Strel'niker // Phys. Rev. – 1999. – B59. – P.2180 – 2198.
5. **Досколович, Л.Л.** Резонансные магнитооптические эффекты в дифракционных решётках с намагниченным слоем [текст] / Л.Л. Досколович [и др.] // Компьютерная оптика, 2007. – Т. 31, №1. – С.4-8.
6. **Белотелов, В.И.** Магнитооптические эффекты дифракционных решёток, связанные с аномалиями Рэлея-Вуда и возбуждением плазмонов [текст] / В.И. Белотелов [и др.] // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, №3. – С.4-8.
7. **Moharam, M.** Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach [текст] / M. Moharam, D. Pommet, E. Grann // Journal of Optical Society of America A. – 1995. – Vol.12, №5. – P.1077-1086.
8. **Moharam, M.G.** Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [текст] / M.G. Moharam [and other] // Journal of Optical Society of America A. – 1995. – Vol.12, №5. – P.1068-1076.
9. **Li, L.** Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures [текст] / L. Li // Journal of Optical Society of America A. – 1996. – Vol.13, № 9. – P.1870-1876.
10. **Peng, S.** Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings [текст] / S. Peng, G.M. Morris // J. Opt. Soc. Am. A. – 1995. – Vol. 12, No. 5, – P.1087-1096.

11. **Li, L.** Fourier modal method for crossed anisotropic gratings with arbitrary permittivity and permeability tensors [текст] / L. Li // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2003. – N 5. – P. 345–355.

12. **Li, L.** New formulation of the Fourier modal method for crossed surface-relief gratings [текст] / L. Li // J. Opt. Soc. Am. A. – 1997. – Vol. 14, No. 10. – P.2758-2767

### **Сведения об авторах**

**Быков Дмитрий Александрович**, Институт систем обработки изображений РАН, техник лаборатории дифракционной оптики (ЛДО). Область научных интересов - дифракционная оптика, магнитооптика.

**Безус Евгений Анатольевич**, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева (6 курс). Область научных интересов - дифракционная оптика, магнитооптика.