

## ВЛИЯНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ СЛОЁВ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НА ОТРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Глуценко А.Г.<sup>1</sup>, Гончарова Г.Н.<sup>1</sup>, Казанский Н.Л.<sup>2</sup>, Топоркова Л.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,

<sup>2</sup> Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН

### Аннотация

Рассматривается взаимодействие света с многослойной магнитооптической структурой, каждый слой которой имеет индивидуальное направление вектора намагниченности. Используются матричный метод расчёта коэффициентов прохождения и отражения света с учётом неоднородности параметров среды. Проведена оценка влияния неоднородности намагниченности на спектральные характеристики коэффициентов отражения и прохождения.

**Ключевые слова:** граничные условия, многослойные структуры, магнитооптические материалы, вектор намагниченности.

### Введение

В последнее время наблюдается возрождение интереса к магнитооптике [1-3] в связи с тем, что устройства магнитооптики, уступая другим оптическим устройствам по скорости обработки информации, существенно превосходят все известные системы по надёжности работы и хранения информации [4-7].

Теоретическое моделирование взаимодействия световых волн с оптически анизотропными объектами представляет интерес во многих физико-технических приложениях [8-11], таких, как оптика световодов, неразрушающий контроль, дистанционное зондирование, фильтрующие устройства магнитооптики, создание оптических компьютеров. Функциональные устройства с анизотропными включениями составляют обширный класс компонентов (базовых элементов) современной оптоэлектроники [7-10]. Наиболее интересны базовые элементы, содержащие анизотропные включения при произвольной ориентации осей анизотропии и выполненные на одно- и многослойных комбинированных подложках. Одним из актуальных направлений нанооптики является создание композитных многослойных плёночных структур с управляемыми спектральными характеристиками – магнитных фотонных кристаллов. Эффективное управление параметрами многослойных структур возможно с помощью управляющих внешних электрических и магнитных полей. Эти возможности показаны в ряде устройств магнитооптики. Вместе с тем, анализ работы устройств магнитооптики построен на усреднённом учёте параметров отдельных слоёв и проведён только для простейших случаев анизотропии [13], в то время как их параметры на границах разделов сред отличны от параметров внутри слоёв за счёт структурной неоднородности. При малой толщине слоёв эти эффекты становятся существенными и меняют электродинамические параметры структур [14-19]. В данной работе рассмотрено влияние изменения ориентации вектора намагниченности слоёв многослойной структуры феррит-граната на коэффициенты отражения и прохождения электромагнитных волн.

Метод расчёта основан на описании однородного по толщине слоя анизотропной (гиротропной) среды

однородной системой дифференциальных уравнений первого порядка с граничными условиями в виде компонент полей граничащих с анизотропным слоем сред. Это позволяет описывать анизотропный слой матрицей перехода для компонент поля, которая для тонких слоёв может быть представлена в аналитическом виде, что приводит к существенному упрощению расчёта и возможности получения аналитических решений. Неоднородность намагниченности по толщине слоя рассматривается как многослойная структура в общем случае с любыми анизотропными параметрами и описывается обобщённой матрицей перехода, определяемой матрицами перехода каждого из слоёв. Это позволяет получить аналитические выражения коэффициентов прохождения и отражения [12].

### 1. Двухсторонние граничные условия для бианизотропных структур

Используемые в данной работе граничные условия в матричном виде были использованы для расчёта коэффициентов прохождения и отражения при произвольном угле падения электромагнитной волны на поверхность в общем случае бианизотропной плёнки. Двухсторонние граничные условия в матричном виде эффективно используются для описания слоёв произвольной толщины или слоёв с неоднородными по толщине параметрами путём моделирования слоя системой тонких плёнок, удовлетворяющих соотношению  $S_{ij(k)}^2 \delta \ll S_{ij(k)}$ , где  $S_{ij(k)}$  – элементы матрицы перехода,  $\delta$  – толщина плёнки. Для получения компонент матриц перехода анизотропного слоя рассмотрим плоский и однородный по толщине тонкий анизотропный слой толщиной  $\delta$ , расположенный в плоскости  $xOy$  (рис. 1), характеризуемый тензорами диэлектрической  $\vec{\epsilon}$  и магнитной  $\vec{\mu}$  проницаемостей.

Электромагнитное поле в области слоя с анизотропными параметрами ( $0 \leq z \leq \delta$ ) описывается системой уравнений Максвелла, первые два из которых в дифференциальной форме записи имеют вид:

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -i\omega \vec{\mu}_0 \vec{H}, \\ \nabla \times \vec{H} &= i\omega \vec{\epsilon} \vec{E}. \end{aligned} \quad (1)$$

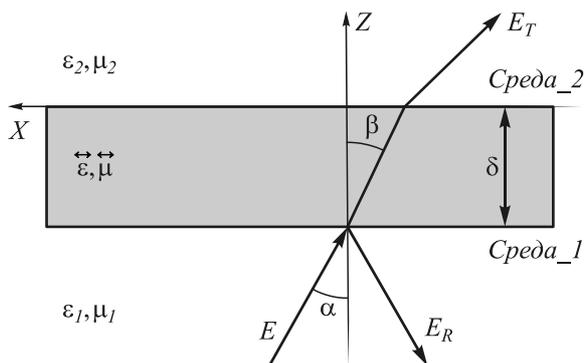


Рис. 1. Прохождение волн через слой с анизотропными параметрами

Решения этих уравнений описываются системой дифференциальных уравнений для тангенциальных составляющих поля в области слоя с анизотропными параметрами, которая при переходе к координатному представлению даёт систему четырёх дифференциальных уравнений для касательных к границе раздела сред компонент поля в декартовой системе координат. Эту систему уравнений можно записать в матричном виде:

$$\frac{\partial \vec{\Psi}}{\partial z} = \vec{S} \vec{\Psi}, \tag{2}$$

где компоненты поля и элементы матрицы перехода определяются в виде:

$$\vec{\Psi} = \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \\ H_x \\ H_y \end{Bmatrix}, \tag{3}$$

$$\vec{S} = \begin{Bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{Bmatrix}.$$

Элементы матрицы  $\vec{S}$  представляют собой дифференциальные операторы:

$$S_{11} = -\epsilon_{31} \epsilon_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial x} - \mu_{23} \mu_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial y},$$

$$S_{12} = -\epsilon_{32} \epsilon_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial x} + \mu_{23} \mu_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial x},$$

$$S_{13} = -\frac{1}{i\omega \epsilon_{33}} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} - i\omega \mu_{21} + i\omega \mu_{23} \mu_{31} \mu_{33}^{-1},$$

$$S_{14} = -\frac{1}{i\omega \epsilon_{33}} \frac{\partial^2}{\partial y^2} - i\omega \mu_{22} + i\omega \mu_{23} \mu_{32} \mu_{33}^{-1},$$

$$S_{21} = -\epsilon_{31} \epsilon_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial y} + \mu_{13} \mu_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial y},$$

$$S_{22} = -\epsilon_{32} \epsilon_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial y} - \mu_{13} \mu_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial x},$$

$$S_{23} = \frac{1}{i\omega \epsilon_{33}} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - i\omega \mu_{11} - i\omega \mu_{13} \mu_{31} \mu_{33}^{-1},$$

$$S_{24} = \frac{1}{i\omega \epsilon_{33}} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} - i\omega \mu_{12} - i\omega \mu_{13} \mu_{32} \mu_{33}^{-1},$$

$$S_{31} = \frac{1}{i\omega \mu_{33}} \frac{\partial}{\partial x \partial y} + i\omega \epsilon_{21} - i\omega \epsilon_{23} \epsilon_{31} \epsilon_{33}^{-1},$$

$$S_{32} = \frac{1}{i\omega \mu_{33}} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + i\omega \epsilon_{22} - i\omega \epsilon_{23} \epsilon_{32} \epsilon_{33}^{-1},$$

$$S_{33} = -\mu_{31} \mu_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial x} - \epsilon_{23} \epsilon_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial y},$$

$$S_{34} = -\mu_{32} \mu_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial x} + \epsilon_{23} \epsilon_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial x},$$

$$S_{41} = -\frac{1}{i\omega \mu_{33}} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - i\omega \epsilon_{11} + i\omega \epsilon_{13} \epsilon_{31} \epsilon_{33}^{-1},$$

$$S_{42} = -\frac{1}{i\omega \mu_{33}} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} - i\omega \epsilon_{12} + i\omega \epsilon_{13} \epsilon_{32} \epsilon_{33}^{-1},$$

$$S_{43} = -\mu_{31} \mu_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial y} + \epsilon_{13} \epsilon_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial y},$$

$$S_{44} = \mu_{32} \mu_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial y} - \epsilon_{13} \epsilon_{33}^{-1} \frac{\partial}{\partial x}.$$

На границах раздела слоя с прилегающими к нему средами должны выполняться граничные условия:

$$\vec{\Psi}(z=0) = \vec{\Psi}_1, \tag{5}$$

$$\vec{\Psi}(z=\delta) = \vec{\Psi}_2,$$

где индексы 1 и 2 соответствуют компонентам электромагнитного поля в средах, граничащих с рассматриваемым слоем. Уравнения (5) можно использовать как граничные условия для функции  $\vec{\Psi}(z)$ , являющейся решением уравнения (2):

$$\vec{\Psi}(z) = \exp(z\vec{S}) \cdot \vec{\Psi}(z=0). \tag{6}$$

Учёт граничного условия на второй границе раздела сред (5) даёт возможность установить взаимную связь компонент тангенциальных полей на обеих границах разделов сред, что обеспечивает двухсторонние граничные условия. Точное соотношение имеет вид:

$$\vec{\Psi}(z=\delta) = \exp(\delta\vec{S}) \cdot \vec{\Psi}(z=0), \tag{7}$$

или для сокращения записи

$$\vec{\Psi}_2 = \vec{T} \vec{\Psi}_1, \tag{8}$$

где

$$\vec{T} = \exp(\delta\vec{S}). \tag{9}$$

Условие малой толщины слоя позволяет воспользоваться разложением матрицы  $\vec{T}$  по малому параметру:

$$\exp(\delta\vec{S}) = \vec{I} + \delta\vec{S} + \frac{\delta^2 \vec{S}^2}{2!} + \dots, \tag{10}$$

где  $\vec{I}$  – единичная матрица. Подстановка в (7) даёт соотношение:

$$\vec{\Psi}(z=\delta) = (\vec{I} + \delta\vec{S} + \dots) \vec{\Psi}(z=0). \tag{11}$$

Граничные условия (7) позволяют учитывать основные физические свойства исследуемых плёнок (при некоторых ограничениях на толщину плёнок), которые зависят от параметров плёнок, самой структуры и частоты, поскольку возможность их использования связана с необходимостью обеспечить малую величину вариации поля по толщине анизотропного слоя.

## 2. Взаимодействие света с многослойной магнитооптической тонкоплёночной структурой

Для многослойной структуры с анизотропными параметрами, описываемыми матрицами  $\vec{S}_i$  и имеющими толщины  $\delta_i$ , двухсторонние граничные условия (7) можно записать:

$$\begin{aligned} \vec{\Psi}(z = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_N) = \\ = \left\{ \exp(\delta_1 \vec{S}_1) \exp(\delta_2 \vec{S}_2) \dots \exp(\delta_N \vec{S}_N) \right\} \cdot \vec{\Psi}(z = 0), \end{aligned} \quad (12)$$

где произведение матриц в фигурных скобках нельзя заменить матрицей  $\exp\left\{\sum_{i=1}^N \delta_i \vec{S}_i\right\}$ , т. к. матрицы, в общем случае, не коммутирующие. Используя условие малой толщины каждого слоя и разложение матриц состояния по малому параметру, получим:

$$\vec{\Psi}(z = \delta) = \prod_{k=1}^N (\vec{I} + \delta_k \vec{S}_k + \dots) \cdot \vec{\Psi}(z = 0). \quad (13)$$

Рассмотрим прохождение электромагнитной волны через многослойную структуру, состоящую из нескольких тонких ферритовых плёнок.

Элементы матриц рассеяния (9) для каждого слоя структуры в этом случае имеют вид:

$$\begin{aligned} T_{11} &= 1, \\ T_{12} &= \frac{\mu_{23} \delta}{\mu_{33}} \frac{\partial}{\partial x}, \\ T_{13} &= i\omega \delta \mu_0 \left( \frac{\mu_{23} \mu_{31}}{\mu_{33}} - \mu_{21} \right), \\ T_{14} &= i\omega \delta \mu_0 \left( \frac{\mu_{23} \mu_{32}}{\mu_{33}} - \mu_{22} \right), \\ T_{21} &= 0, \\ T_{22} &= 1 - \frac{\mu_{13} \delta}{\mu_{33}} \frac{\partial}{\partial x}, \\ T_{23} &= i\omega \delta \mu_0 \left( -\frac{1}{\omega^2 \epsilon_{33}} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\mu_{13} \mu_{31}}{\mu_{33}} + \mu_{11} \right), \\ T_{24} &= i\omega \delta \mu_0 \left( \mu_{12} - \frac{\mu_{13} \mu_{32}}{\mu_{33}} \right), \\ T_{31} &= 0, \\ T_{32} &= i\omega \epsilon_{22} \epsilon_0 \delta, \\ T_{33} &= 1 - \frac{\mu_{31} \delta}{\mu_{33}} \frac{\partial}{\partial x}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} T_{34} &= -\frac{\mu_{32} \delta}{\mu_{33}} \frac{\partial}{\partial x}, \\ T_{41} &= i\omega \delta \left( \frac{1}{\omega^2 \mu_{33} \mu_0} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \epsilon_{11} \epsilon_0 \right), \\ T_{42} &= 0, \\ T_{43} &= 0, \\ T_{44} &= 1. \end{aligned}$$

Каждый слой имеет фиксированную ориентацию вектора намагниченности, определяемую углами  $\theta$ ,  $\psi$  (рис. 2).

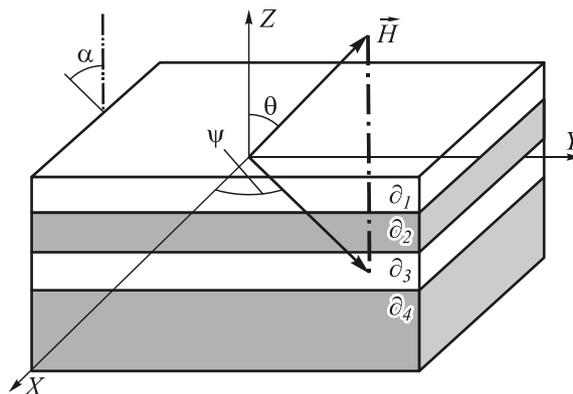


Рис. 2. Свет падает на многослойную структуру под углом  $\alpha$ . Слой  $i$  – ферритовая плёнка толщиной  $\delta_i$

Тензор магнитной проницаемости с учётом, в общем случае, кристаллографической и перпендикулярной анизотропии в системе  $xyz$  имеет вид [4]:

$$\vec{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} \mu_{11} &= \mu_{11}' \sin^2 \psi + (\mu_{22}' \cos^2 \theta + \sin^2 \theta) \cos^2 \psi + \\ &+ \frac{1}{2} (\mu_{12}' + \mu_{21}') \sin 2\psi \cos \theta, \\ \mu_{22} &= \mu_{11}' \cos^2 \psi + (\mu_{22}' \cos^2 \theta + \sin^2 \theta) \sin^2 \psi + \\ &+ \frac{1}{2} (\mu_{12}' + \mu_{21}') \sin 2\psi \cos \theta, \\ \mu_{33} &= \mu_{22}' \sin^2 \theta + \cos^2 \theta, \\ \mu_{12} &= -\frac{1}{2} (\mu_{11}' - \mu_{22}' \cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \sin 2\psi \pm \\ &\pm \cos \theta (\mu_{12}' \sin^2 \psi - \mu_{21}' \cos^2 \psi), \\ \mu_{21} &= -\frac{1}{2} (\mu_{11}' - \mu_{22}' \cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \sin 2\psi \pm \\ &\pm \cos \theta (\mu_{12}' \cos^2 \psi - \mu_{21}' \sin^2 \psi), \\ \mu_{13} &= -\mu_{12}' \sin \theta \sin \psi + \frac{1}{2} (1 - \mu_{22}') \sin 2\theta \cos \psi, \\ \mu_{31} &= -\mu_{21}' \sin \theta \sin \psi + \frac{1}{2} (1 - \mu_{22}') \sin 2\theta \cos \psi, \end{aligned}$$

$$\mu_{23} = \mu_{12} \sin \theta \cos \psi + \frac{1}{2}(1 - \mu_{22}') \sin 2\theta \sin \psi,$$

$$\mu_{32} = \mu_{21} \sin \theta \cos \psi + \frac{1}{2}(1 - \mu_{22}') \sin 2\theta \sin \psi.$$

где  $\mu_{ij}'$  – компоненты тензора магнитной проницаемости (включая, в общем случае, константы структурной анизотропии) в системе координат с осью  $z'$ , совпадающей с направлением внутреннего поля подмагничивания  $\vec{H}_0$ :

$$\mu_{11}' = \mu_{22}' = \mu = 1 - \frac{(1 - \xi^2)\sqrt{1 + \Delta^2} - \frac{2\Delta^2}{\sqrt{1 + \Delta^2}} \xi A}{(1 - \xi^2)^2 + 4\xi^2 \frac{\Delta^2}{1 + \Delta^2}} - i \frac{1 + \xi^2}{(1 - \xi^2)^2 + 4\xi^2 \frac{\Delta^2}{1 + \Delta^2}} \Delta A,$$

$$\mu_{12}' = \mu_{21}' = i\mu_a = iA \frac{(1 - \xi^2) + 2\xi \frac{\Delta}{\sqrt{1 + \Delta^2}}}{(1 - \xi^2)^2 + 4\xi^2 \frac{\Delta^2}{1 + \Delta^2}},$$

где безразмерная величина  $\xi = \omega_0/\omega$  пропорциональна приложенному магнитному полю,  $\omega_0$  – резонансная частота,  $\omega$  – частота падающей волны,  $\Delta$  – характеризует потери в ферритовой плёнке, величина  $A = \omega_m/\omega$  пропорциональна намагниченности феррита  $M_0$ ,

$$\omega_m = \mu_0 \gamma M_0, \quad \gamma = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}.$$

**2. Анализ результатов вычислительных экспериментов, выводы**

На рис. 3-5 показаны результаты расчёта коэффициентов отражения и прохождения света через четырёхслойную ферритовую структуру на частоте  $\omega = 33,07 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ , на которой феррит-гранат проявляет значительную магнитооптическую активность.

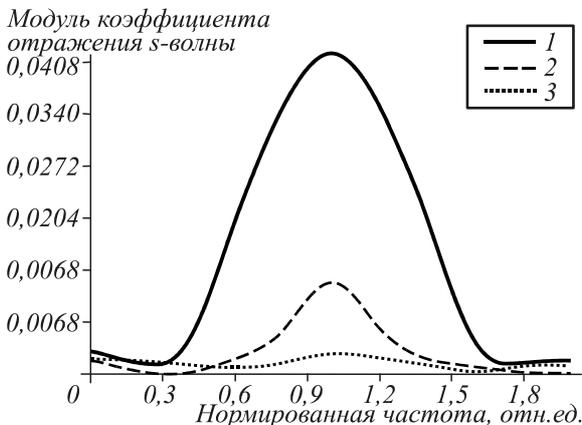


Рис. 3. Коэффициент отражения s-волны от четырёхслойной гиротропной структуры

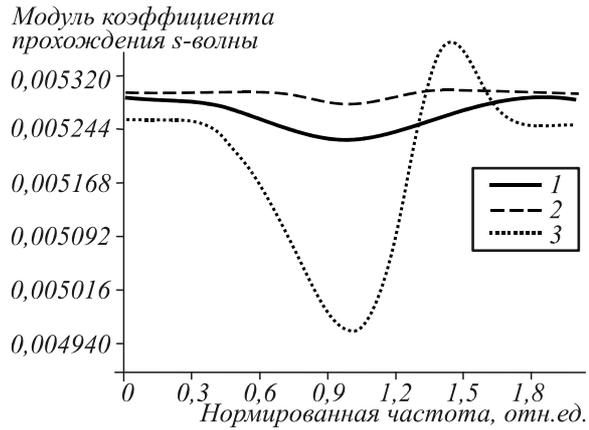


Рис. 4. Коэффициент прохождения s-волны через четырёхслойную гиротропную структуру

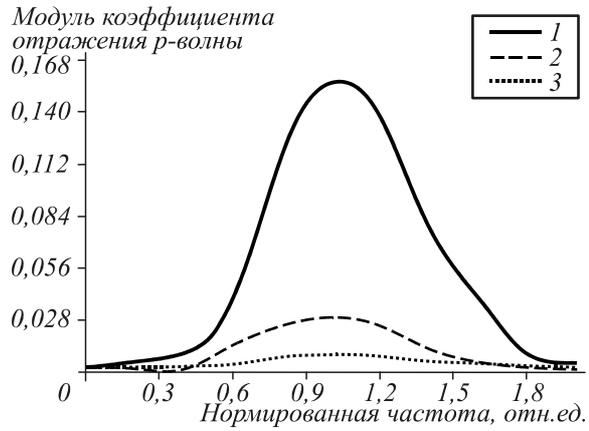


Рис. 5. Коэффициент отражения p-волны через четырёхслойную гиротропную структуру

В результате взаимодействия с многослойной структурой происходит изменение направления поляризации света. Зависимости модулей коэффициентов отражения и прохождения s-волн с компонентами  $\{E_y, H_x, H_z\}$  и p-волн с компонентами  $\{H_y, E_x, E_z\}$  от величины нормированной частоты при угле подмагничивания  $\theta = \pi/3$ , угле падения волны на поверхность структуры  $\alpha = \pi/3$ , толщине слоёв ( $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = 2 \text{ мкм}$ ) показаны на рис. 3-5. Кривая 1 соответствует значениям угла подмагничивания  $\psi$ , который изменяется в каждом последующем слое на  $\pi/3$  ( $\psi_1 = 0, \psi_2 = \pi/3, \psi_3 = 2\pi/3, \psi_4 = \pi$ ), кривая 2 – для значений  $\psi_1 = \psi_2 = \psi_3 = \psi_4 = 0$ , а кривая 3 – при  $\psi_1 = \psi_2 = \psi_3 = \psi_4 = \pi/3$ . Расчёт показывает, что при данной комбинации параметров величина модуля коэффициента отражения существенно больше величины модуля коэффициента пропускания. Управление величиной и ориентацией намагниченности позволяет менять параметры структуры в широких пределах. Таким образом, изменение направления оси гиротропии ферритовых слоёв с помощью внешней магнитной системы может быть использовано для создания новых магнитооптических устройств управления интенсивностью, фазой и поляризацией светового излучения. Известно, что

аналогичные управляющие ферритовые устройства широко применяются в СВЧ диапазоне [13]. Для оптического диапазона ещё не решена проблема разработки оптически прозрачных ферритов, однако обнадеживающие результаты уже получены. Монокристаллы иттриевого феррита-граната в инфракрасном диапазоне и висмут-содержащие ферриты-гранаты, ортоферриты в оптическом диапазоне уже в настоящее время имеют приемлемый уровень потерь [1].

Полученные результаты показывают возможность применения предлагаемого метода для расчёта характеристик различных магнитных многослойных гиротропных структур с заранее заданными параметрами и проектирования на их основе оптических устройств с магнитным управлением параметров. Поскольку ограничения на число слоёв и их электродинамические параметры не накладываются, предложенная методика может быть использована для анализа физических свойств магнитных фотонных кристаллов в резонансных областях, в которых наблюдается резкое усиление магнитооптических эффектов.

### Литература

1. **Звездин, А.К.** Магнитооптика тонких плёнок / А.К. Звездин, В.А. Котов. – М.: Наука, 1988.
2. **Кравченко, А.Ф.** Магнитная электроника / А.Ф. Кравченко. – Новосибирск: Изд-во РАН, 2002.
3. **Климов, В.В.** Наноплазмоника / В.В. Климов // УФН. – 2008. – Т. 178. – С. 875.
4. **Котляр, В.В.** Нанопластика – манипулирование светом с помощью наноструктур / В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 2. – С. 119-135.
5. **Грейсух, Г.И.** Дифракционные элементы в оптических системах современной оптоэлектроники / Г.И. Грейсух, Е.А. Безус, Д.А. Быков, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 7. – С. 25-29.
6. **Соифер, В.А.** Дифракционные оптические элементы в устройствах нанопластики / В.А. Соифер, В.В. Котляр, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 4. – С. 352-368.
7. **Быков, Д.А.** Магнитооптические свойства дифракционной решётки на магнитной подложке / Д.А. Быков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2009. – Т. 11, № 3. – С. 42-45.
8. **Белотелов, В.И.** Оптические свойства перфорированных металлодиэлектрических гетероструктур, намагниченных в плоскости / В.И. Белотелов, Д.А. Быков, Л.Л. Досколович, А.Н. Калиш, А.К. Звездин // Физика твёрдого тела. – 2009. – Т. 51, Вып. 8. – С. 1562-1567.
9. **Досколович, Л.Л.** Расчёт и исследование дифракционных микро- и наноструктур / Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 2. – С. 136-150.
10. **Казанский, Н.Л.** Формирование лазерного излучения для создания наноразмерных пористых структур материалов / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, А.В. Меженин, Е.Л. Осетров // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 3. – С. 246-248.
11. **Досколович, Л.Л.** Резонансные магнитооптические эффекты в дифракционных решётках с намагниченным слоем / Л.Л. Досколович, Е.А. Безус, Д.А. Быков, В.И. Белотелов, А.К. Звездин // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, № 1. – С. 4-8.
12. **Глушенко, А.Г.** Двухсторонние граничные условия / А.Г. Глушенко // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1987. – С. 27-29.
13. **Курушин, Е.П.** Электродинамика анизотропных волнораспространяющих структур / Е.П. Курушин, Е.И. Нефёдов. – М.: Наука, 1983. – 224 с.
14. **Иванов, О.В.** Распространение света в неоднородных бианизотропных плоскостных структурах / О.В. Иванов, Д.И. Семенов // Оптика и спектроскопия. – 1999. – Т. 87, № 3. – С. 484-489.
15. **Жук, Н.П.** Дифракция плоской электромагнитной волны на бианизотропном слое с анизотропной подложкой / Н.П. Жук, А.В. Малоскин, С.Н. Шульга // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45, № 6. – С. 654-661.
16. **Vytovtov, K.A.** Analytical investigation of electromagnetic waves in bianisotropic media / K.A. Vytovtov // IEEE Proc. Microwaves, Antennas and Propag. – 2001. – V. 148, N 4. – P. 257-260.
17. **Третьяков, С.А.** Электродинамика сложных сред: киральные, биизотропные и некоторые бианизотропные материалы / С.А. Третьяков // Радиотехника и электроника. – 1994. – Т. 39, № 10. – С. 1457-1470.
18. **Терентьев, Ю.М.** Матрица преобразования N-слойной периодической среды с анизотропными слоями / Ю.М. Терентьев, К.А. Вытовтов // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45, № 3. – С. 279-281.
19. **Евельсон, Р.Л.** Метод решения задачи о распространении электромагнитных волн в многослойной плоскостной поглощающей анизотропной магнитоэлектрической среде / Р.Л. Евельсон // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45, № 8. – С. 918-925.

### References

1. **Zvezdin, A.K.** Magneto-optics of thin films / A.K. Zvezdin, V.A. Cats. – Moscow: "Nauka" Publisher, 1988. – (In Russian).
2. **Kravchenko, A.F.** Magnetic electronics / A.F. Kravchenko. – Novosibirsk: "Izdatel'stvo RAN" Publisher, 2002. – (In Russian).
3. **Klimov, V.V.** Nanoplasmonics / V.V. Klimov // UFN. – 2008. – V. 178. – P. 875. – (In Russian).
4. **Kotlyar, V.V.** Nanophotonics – the manipulation of light by nanostructures / V.V. Kotlyar // Computer Optics. – 2008. – V. 32, N 2. – P. 119-135. – (In Russian).
5. **Greysuh, G.I.** Diffractive elements in optical systems of modern optoelectronics / G.I. Greysuh, E.A. Bezus, D.A. Bykov, E.G. Ezhov and S.A. Stepanov // Opt. Journal. – 2009. – V. 76, N 7. – P. 25-29. – (In Russian).
6. **Soifer, V.A.** Diffractive optical elements in devices, nanophotonics / V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, L.L. Doskolovich // Computer Optics. – 2009. – V. 33, N 4. – P. 352-368. – (In Russian).
7. **Bykov, D.A.** Magneto-optical properties of a diffraction grating on a magnetic substrate / D.A. Bykov // Proceedings of Samara Research Center. – 2009. – V. 11, N 3. – P. 42-45. – (In Russian).
8. **Belotelov, V.I.** The optical properties of perforated metal-dielectric heterostructures, magnetized in the plane / V.I. Belotelov, D.A. Bulls, L.L. Doskolovich, A.N. Kalish, A.K. Zvezdin // Physics of the Solid body. – 2009. – V. 51, Issue 8. – P. 1562-1567. – (In Russian).
9. **Doskolovich, L.L.** Calculation and investigation of diffractive micro- and nanostructures / L.L. Doskolovich // Computer Optics. – 2008. – V. 32, N 2. – P. 136-150. – (In Russian).
10. **Kazanskiy, N.L.** Formation of laser light to create a nanoporous structure of materials / N.L. Kazanskiy, S.P. Murzin, A.V. Mezhenin, E.L. Sturgeon // Computer Optics. – 2008. – V. 32, N 3. – P. 246-248. – (In Russian).
11. **Doskolovich, L.L.** Resonant magneto-optical effects in diffraction gratings with a magnetized layer / L.L. Doskolovich,

- E.A Bezus, D.A Bykov, V.I Belotelov, A.K. Zvezdin // Computer Optics. – 2007. – V. 31, N 1. – P. 4-8. – (In Russian).
12. **Glushchenko, A.G.** Bilateral boundary conditions / A.G. Glushchenko // News of the Universities – Radio. – 1987. – P. 27-29. – (In Russian).
  13. **Kurushin, E.P.** Electrodynamics of anisotropic waveguide structures / E.P. Kurushin, E.I. Nefedov. – Moscow: “Nauka” Publisher, 1983. – 224 p. – (In Russian).
  14. **Ivanov, O.V.** Light propagation in inhomogeneous bianisotropic planar layered structures / O.V. Ivanov, D.I. Sementsov // Optics and Spectroscopy. – 1999. – V. 87, N 3. – P. 484-489. – (In Russian).
  15. **Zhuk, N.P.** Diffraction of plane electromagnetic waves in bianisotropic layer with anisotropic the substrate / N.P. Zhuk, A.V. Malyuskin, S.N. Shulga // Technology and Electronics. – 2000. – V. 45, N 6. – P. 654-661. – (In Russian).
  16. **Vytovtov, K.A.** Analytical investigation of electromagnetic waves in bianisotropic media / K.A Vytovtov // IEE Proc. Microwaves, Antennas and Propag. – 2001. – V. 148, N 4. – P. 257-260.
  17. **Tretyakov, S.A.** Electrodynamics of complex media: chiral, biisotropic and some bianisotropic insulating materials / S.A. Tretyakov // Technology and Electronics. – 1994. – V. 39, N 10. – P. 1457-1470. – (In Russian).
  18. **Terentyev, Y.M.** The transformation matrix N-layer periodic medium with anisotropic layers / Y.M. Terent'ev, K.A. Vytovtov // Radiotechnics and electronics. – 2000. – V. 45, N 3. – P. 279-281. – (In Russian).
  19. **Evelson, R.L.** The method of solving the problem of propagating electromagnetic waves in absorbing multi-layer stratified anisotropic magneto-dielectrics medium / R.L. Evelson // Radiotechnics and electronics. – 2000. – V. 45, N 8. – P. 918-925. – (In Russian).

## EFFECT OF MAGNETIZATION OF MAGNETOOPTIC STRUCTURE ON THE REFLECTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES

A.G. Glushchenko<sup>1</sup>, G.N. Goncharova<sup>1</sup>, N.L. Kazanskiy<sup>2</sup>, L.V. Toporkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Volga State University of Telecommunications and Informatics,

<sup>2</sup> S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)

### Abstract

This work considers the interaction of light with a magneto-optical multilayer structure. Each layer structure has an individual direction of magnetization. To calculate the transmission and reflection coefficients of light, given the heterogeneity of environmental parameters used the matrix method. As a result of numerical calculations evaluated the influence of inhomogeneity of magnetization on the spectral characteristics of reflection and transmission coefficients.

*Key words:* boundary conditions, multi-layered heterogeneous structures, magneto-optical materials, the magnetization vector.

### Сведения об авторах



**Глущенко Александр Григорьевич**, доктор физико-математических наук (ИРЭ РАН, 1991), профессор (1993), действительный член Академии телекоммуникаций (1996), Российской академии естествознания (2008), Европейской академии естествознания (2008), Мастер связи РФ (1996), Почётный работник Высшей школы РФ (2010), декан факультета базового телекоммуникационного образования, заведующий кафедрой физики Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Область научных интересов – физические проблемы построения инфо- и телекоммуникационных систем, электродинамика нелинейных композитных структур с анизотропными, нестационарными параметрами, электродинамика субволновых структур.

E-mail: [gag@psati.ru](mailto:gag@psati.ru).

**Alexander G. Glushchenko**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (IRE RAS, 1991), Professor (1993), member of the Academy of Telecommunications (1996), Russian Academy of Natural Sciences (2008), the European Academy of Natural Sciences (2008), Master of Communication of the Russian Federation (1996), Honorary Worker of Higher School of Russia (2010), Dean of the Faculty of Education basic telecommunications, the head of the physics department of the Volga State University of Telecommunications and Informatics (VSUTI). Research interests – physical problems of building info and telecommunications systems, electrodynamics of nonlinear composite structures with anisotropic, time-dependent parameters, electrodynamics of subwavelength structures.



**Гончарова Галина Николаевна**, 1960 года рождения. В 1985 году окончила Куйбышевский политехнический институт. Защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в Самарском государственном техническом университете в 1999 году. В настоящее время работает доцентом кафедры физики Поволжского государственного университета телекоммуникации и информатики (ПГУТИ). Область научных интересов: материаловедение, нанофотоника.

**Galina Nikolaevna Goncharova** (b. 1960). She graduated from the Kuibyshev Polytechnic Institute (KPI) in 1985. She received her Candidate in Technical sciences at Samara State Technical University (SSTU) in 1999. She is currently working associate professor of the physics department of the Volga State University of Telecommunications and Informatics (VSUTI). Her research interests: material science, nanophotonics.

*Сведения об авторе Казанском Николае Львовиче – см. стр. 227 этого номера.*



**Топоркова Любовь Владимировна**, 1966 года рождения. В 1988 году окончила Куйбышевский государственный университет, физический факультет. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры физики Поволжского государственного университета телекоммуникации и информатики (ПГУТИ). Область научных интересов: электродинамика структур с бианизотропными параметрами, математическое моделирование, фотонно-кристаллические устройства.

E - mail: [toporkova2005@yandex.ru](mailto:toporkova2005@yandex.ru).

**Lubov Vladimirovna Toporkova**, (b.1966). In 1988 she graduated from the Kuibyshev State University (KSU), majoring in Physics. Currently a senior lecturer of the physics department of the Volga State University of Telecommunications and Informatics (VSUTI). Her region of scientific interests: electrodynamic of bianisotropic parameters, mathematical modeling, photonic crystal devices.

*Поступила в редакцию 3 марта 2011 г.*