

# Дифракционные оптические элементы для белого света на основе брэгговских структур с дефектным слоем

А.И. Капустин<sup>1</sup>, Р.В. Скиданов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментов дифракции света с использованием дифракционных оптических элементов на основе брэгговских структур с дефектным слоем. Произведено качественное сравнение результатов экспериментов и результатов численного моделирования. Композитный образец состоит из оксида цинка и диоксида титана.

## 1. Введение

Оптические устройства, осуществляющие заданные пространственно-временные преобразования оптических сигналов, представляют большой интерес для широкого спектра приложений, включающих сверхбыструю оптическую обработку информации и аналоговые оптические вычисления. Особый интерес представляют диэлектрические структуры, позволяющие получить резонанс в отражении либо прохождении падающей волны.

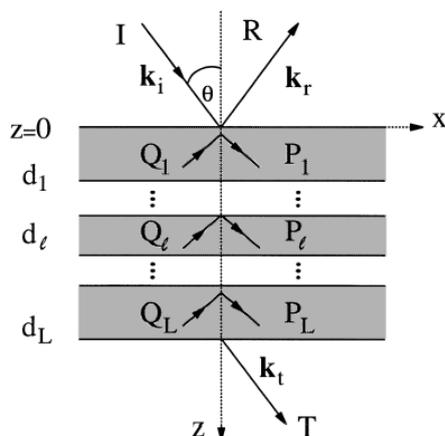
Моделирование многослойных оптических элементов с двумерным структурированием и дефектным слоем позволит создать компактные системы для получения мультиспектральных и гиперспектральных изображений.

В данной работе описываются метод расчета и моделирования многослойных дифракционных оптических элементов для работы в некогерентном свете, метод расчета спектра оптических фильтров с двумерной функцией пропускания.

В данной работе проведены теоретические расчёты двумерной многослойной структуры, которая освещается световым пучком с длиной 550 нм. После расчёта структуры была получена двумерная функция пропускания структуры для длин волн из интервала 500..600 нм.

## 2. Теоретическое описание

Рассмотрим произвольную многослойную структуру, состоящую из  $L$  слоев, каждый из которых имеет ширину  $d_l$  и показатель преломления  $n_l$ , на которую под углом  $\theta$  к нормали падает с длиной волны в вакууме, равной  $\lambda_0$  (волновое число  $k_0 = 2\pi / \lambda_0$ ). Также заданы показатели преломления вне структуры  $n_I$  и  $n_{II}$ .



**Рисунок 1.** Падение света на произвольную систему слоев.

Тогда значения тангенциальной составляющей электрического поля в каждом из слоёв составят

$$E_0 = \left[ \exp(-jk_{l,z}z) + \text{Re} \exp(jk_{l,z}z) \right] \exp(-jk_x x) \quad \text{при } z \leq 0, \quad (1)$$

$$E_l = \left\{ P_l \exp[-k_0 \gamma_l (z - D_{l-1})] + Q_l \exp[-k_0 \gamma_l (z - D_l)] \right\} \exp(-jk_x x) \quad \text{при } D_{l-1} \leq z \leq D_l, \quad (2)$$

$$E_l = T \exp\{-j[-k_x x + k_{l,z}(z - D_l)]\} \exp(-jk_x x) \quad \text{при } z \geq D_l, \quad (3)$$

где введены следующие обозначения:

$$k_x = k_0 n_l \sin \theta,$$

$$k_{l,z} = k_0 n_l \cos \theta,$$

$$k_{l,z} = k_0 (n_l^2 - n_l^2 \sin^2 \theta)^{1/2},$$

$$\gamma_l = j(n_l^2 - n_l^2 \sin^2 \theta)^{1/2}, \quad l = 1, \dots, L,$$

$$D_l = \sum_{p=1}^l d_p,$$

$R$  и  $T$  – комплексные коэффициенты отражения и прохождения электрического поля,

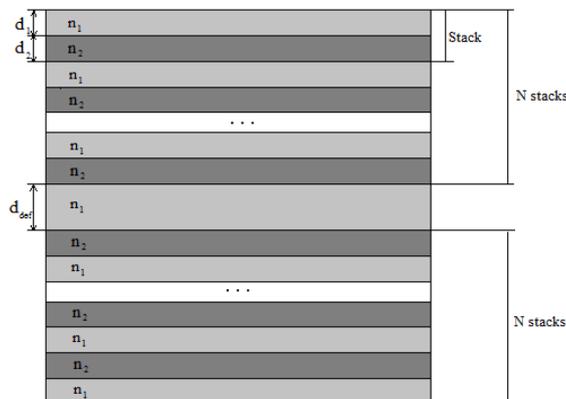
$P$  и  $Q$  – комплексные амплитуды электрического поля в каждом из слоёв.

Используя граничные условия (сохранение тангенциальной составляющей электрического поля и её производной), получим следующую систему линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов отражения и пропускания и комплексных амплитуд электрического поля в каждом слое:

$$\begin{cases} 1 + R = P_1 + Q_1 \exp(-k_0 \gamma_1 d_1), \\ j(k_{l,z} / k_0)(1 - R) = \gamma_1 [P_1 - Q_1 \exp(-k_0 \gamma_1 d_1)], \\ \dots \\ P_{l-1} \exp(-k_0 \gamma_{l-1} d_{l-1}) + Q_{l-1} = P_l + Q_l \exp(-k_0 \gamma_l d_l), \\ \gamma_{l-1} [P_{l-1} \exp(-k_0 \gamma_{l-1} d_{l-1}) - Q_{l-1}] = \gamma_l [P_l - Q_l \exp(-k_0 \gamma_l d_l)], \\ \dots \\ P_L \exp(-k_0 \gamma_L d_L) + Q_L = T, \\ \gamma_L [P_L \exp(-k_0 \gamma_L d_L) - Q_L] = j(k_{l,z} / k_0) T. \end{cases} \quad (4)$$

### 3. Результаты моделирования

Рассмотрим задачу дифракции плоской волны ТЕ-поляризации на системе плоскопараллельных слоёв (рис.2). Структура включает в себя набор стеков, каждый из которых состоит из слоёв с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ , а также дефектный слой, отличающийся толщиной от остальных слоёв с показателем преломления  $n_1$ .

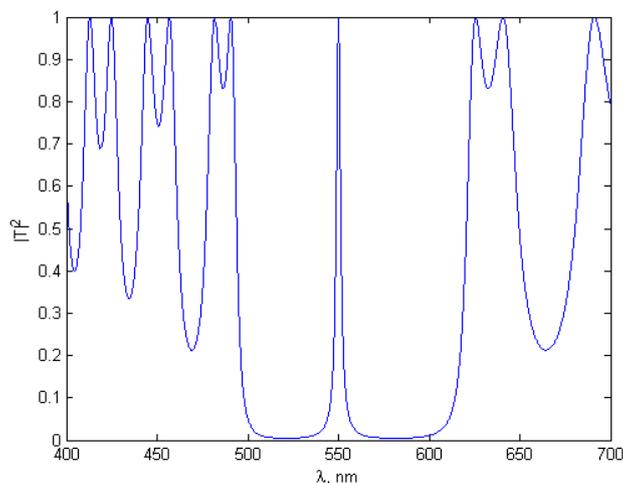


**Рисунок 2.** Брэгговская структура с дефектным слоем.

Рассчитаем параметры двух структур: первая будет соответствовать максимуму пропускания света заданной длины волны, а вторая – минимуму. Структуры должны отличаться только толщиной дефектного слоя  $d_{def}$ .

Структура включает в себя набор стеков, каждый из которых состоит из слоя оксида цинка ( $n_1 = 2,015$ ) и слоя диоксида титана ( $n_2 = 2,55$ ), а также дефектный слой, толщина которого отличается от остальных слоев оксида цинка.

Результаты моделирования представлены на рисунках 2 и 3.



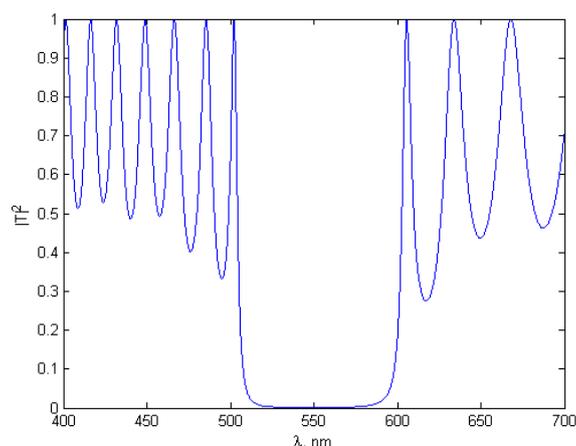
**Рисунок 3.** Результаты численного моделирования дифракции плоской волны на структуре, соответствующей максимуму пропускания для длины волны 550 нм.

### 4. Заключение

В работе описан метод расчета и моделирования многослойных дифракционных оптических элементов. Произведено моделирование процесса дифракции плоской волны на брэгговской структуре с дефектным слоем в случаях максимума и минимума пропускания для длины волны 550 нм.

### 5. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) и гранта Президента НШ-6307.2018.8.



**Рисунок 4.** Результаты численного моделирования дифракции плоской волны на структуре, соответствующей минимуму пропускания для длины волны 550 нм.

## 6. Литература

- [1] Головашкин, Д.Л. Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л.Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Соيفер, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с.
- [2] Гаврилов, А.В. Дифракционная нанофотоника / А.В. Гаврилов, Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, П.Н. Дьяченко, А.А. Ковалёв, В.В. Котляр, А.Г. Налимов, Д.В. Нестеренко, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Соифер, С
- [3] Moharam, M.G. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings / M.G. Moharam, D.A. Pommet, E.B. Grann // J. Opt. Soc. Am. A. – 1995. – Vol. 5. – P. 1077-1080.
- [4] Moharam, M.G. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction / M.G. Moharam, T.K. Gaylord // Journal of the Optical Society of America. – 1981. – Vol. 71(7). – P. 811-818.
- [5] Moharam, M.G. Rigorous coupled-wave analysis of planar grating diffraction – E-mode polarization and losses / M.G. Moharam, T.K. Gaylord // Journal of the Optical Society of America. – 1983. – Vol. 73(5). – P. 451-455.
- [6] Головастиков, Н.В. Резонансные дифракционные решётки для пространственного дифференцирования оптических пучков / Н.В. Головастиков, Д.А. Быков, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2012. –Т. 36, №2. – С. 151-161.
- [7] Doskolovich, L.L. Spatial differentiation of optical beams using phase-shifted Bragg grating / L.L. Doskolovich, D.A. Bykov, E.A. Bezus, V.A. Soifer // Optics Letters. – 2014. –Vol. 39(5). – P. 1278-1287.

## DOEs for white light based on Bragg gratings with defect layer

A. Kapustin<sup>1</sup>, R. Skidanov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

**Abstract.** We represented experimental results of diffraction of light with DOEs based on Bragg gratings with defect layer. Qualitative comparison of experimental results and results calculated by numerical modelling is performed. Composite sample consists of zinc oxide and titanium dioxide.

**Keywords:** diffraction of light, Bragg gratings, DOE, Composite sample, Maxwell's equations.