

# Разработка программного комплекса для моделирования и анализа дифракции света на периодических структурах нанофотоники с помощью метода фурье-мод

И.С. Комаров<sup>1</sup>, Е.А. Безус<sup>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.** Работа посвящена разработке программного комплекса для моделирования и анализа дифракции света на многослойных дифракционных структурах. Сформулированы основные функциональные требования к программной системе моделирования. Описано архитектурное решение реализуемого комплекса, включающее в себя основные функциональные и логические слои системы с указанными способами их взаимодействия. Изучен и реализован метод фурье-мод расчета многослойных дифракционных структур, содержащих однородные слои и дифракционные решетки с одномерной периодичностью. Рассчитан и исследован поляризующий отражатель, состоящий из дифракционной решетки на поверхности брэгговской решетки (одномерного фотонного кристалла) из небольшого числа периодов. Для заданного критерия отражения каждого из видов поляризаций найдены оптимальные параметры структуры. Исследована область параметров, соответствующих критерию отбора. Проведено исследование влияния изменения геометрических параметров структуры на рабочие характеристики отражателя.

## 1. Введение

В настоящее время поляризующие зеркала являются важными элементами различных оптоэлектронных систем, в частности, лазерных дальномеров (лидаров), систем формирования нейтронных пучков и лазерных материалографов. Данные структуры характеризуются высоким (близким к 1) коэффициентом отражения для одной из базовых ортогональных поляризаций (ТЕ- или ТМ-) и существенно меньшим (близким к 0) коэффициентом отражения для другой. Конструктивно такие отражатели, как правило, представляют собой многослойные структуры, содержащие однородные слои и/или дифракционные решетки.

Целью данной работы являются проектирование и разработка программного комплекса, с помощью которого возможно моделирование и исследование дифракции плоской электромагнитной волны на многослойной дифракционной решетке, конфигурация которой определяется пользователем системы. В настоящее время ведется разработка программной реализации слоев системы с определением структуры и программной модели данных.

## 2. Программная реализация

### 2.1 Функциональные требования к разрабатываемому программному комплексу

Любое моделирование физического процесса связано с заданием входных данных, проведением расчетов и анализом полученных данных: необходимо задать параметры и конфигурацию моделируемой среды или структуры, математически промоделировать происходящие физические процессы; оценить погрешность вычислительного метода и с ее учетом оценить полученные результаты и сделать выводы об особенностях протекания процесса в моделируемых условиях.

В данной работе моделируемым процессом является дифракция плоской электромагнитной волны на многослойной дифракционной структуре. Моделирование данного процесса предполагает несколько основных стадий, рассмотрение которых позволит сформулировать основные функциональные требования к разрабатываемому программному комплексу.

Перечислим основные функциональные требования к приложению:

- 1) Интерфейс должен позволять определить характеристики падающей электромагнитной волны (вид поляризации, длина волны и угол падения относительно нормали к плоскостям раздела сред). Среда распространения определяется показателями преломления входной и выходной сред, в которых располагается дифракционная решетка. Также должна быть возможность задать конфигурацию этой решетки.
- 2) Разработать интерфейс запуска моделирования с отслеживанием прогресса выполняемых вычислений. Для этого реализован сервис отслеживания на основе веб-сокетов [1], так как это позволит клиенту приложения в режиме «прямого эфира» отслеживать прогресс вычислений.
- 3) Реализовать средства анализа проведенных вычислений. Интерфейс должен позволять рисовать графики энергетических характеристик промоделированного распространения электромагнитного излучения на сконфигурированной решетке. Графики должны быть реализованы на Plotly.js [2], ввиду его высокой конфигурируемости. Интерфейс должен оперировать данными, полученными через REST API [3] сервера.

### 2.2 Программная архитектура комплекса

Исходя из сформулированных требований к реализуемому программному комплексу, необходимо определить его программную структуру как набор функциональных модулей. Разрабатываемая система должна разделять упомянутые функции между отдельными модулями для удобства использования, тестирования и поддержки.

Возможности интерфейса реализуются в веб-слое приложения. В рамках данного приложения используется Angular Framework [4], который дает возможность разработки приложения в рамках компонентной модели, в которой приложение представляет собой иерархию взаимосвязанных компонентов.

Бизнес-слоем разрабатываемой системы служит серверное Java-приложение. Веб-часть этого приложения организуется с использованием Spring Framework, который предоставляет все возможности веб-приложения с компонентным разделением функционала между его частями на основе концепции внедрения зависимостей. REST API реализуется REST-контроллерами приложения, которые связывают HTTP-запрос определенного формата с методом класса контроллера. Контроллер может вызывать методы компонентов приложения через механизм CDI [5]. Через этот механизм контроллер обращается к сервисам, отвечающим за разные функции. В данном приложении основными сервисами являются сервис получения ранее вычисленных данных моделирования и сервис запуска вычислений с отслеживанием прогресса. Важно отметить, что сервер данных не занимается вычислениями распространения волны: эту функцию берет на себя вычислительное ядро. Это отдельный вычислительный сервер, который предоставляет API для подсчета энергетических характеристик решетки заданной конфигурации в известной среде. Все необходимые расчеты проводятся с помощью реализации метода фурье-мод на языке программирования Python 3.5. Для математических вычислений использовалась библиотека NumPy.

Такая модульная структура дает следующие преимущества:

- 1) клиент-серверное взаимодействие: обработка данных отделена от клиентского слоя;
- 2) модульность: отдельные функции приложения разделены на отдельные структурные части, что обеспечивает их высокую взаимозаменяемость;
- 3) тестируемость независимых модулей системы,
- 4) расширяемость: при разработке других вычислительных процессов, смежных разрабатываемому, проще и безопаснее внедрить новые функциональные возможности, требуемые от системы;
- 5) низкое связывание и высокая связность: REST API, регламентирующий взаимодействие уровней приложения, четко разделяет функциональные обязанности между ними.

### 3. Метод моделирования дифракционных структур, содержащих однородные слои и одномерные дифракционные решетки

Существует большое количество работ, посвященных строгому решению прямой задачи дифракции на периодических структурах. В данной работе используется метод фурье-мод (rigorous coupled-wave analysis) в сочетании с процедурой моделирования прохождения электромагнитной волны через набор плоскопараллельных слоев [6, 7]. Опишем метод для случая ТЕ-поляризации.

Пусть ТЕ-поляризованная электромагнитная волна с единичной амплитудой и с длиной волны в вакууме  $\lambda_0$  падает под углом  $\alpha$  на многослойную дифракционную решетку. Над и под решеткой находятся полубесконечные среды с показателями преломления  $n_I$  и  $n_{II}$  соответственно. Тогда компонента электрического поля в направлении оси Y имеет вид:

$$E_y = \exp[-ik_0 n_I (x \sin \alpha + z \cos \alpha)], \quad (1)$$

где  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ . В свою очередь, аналогичные компоненты отраженного и прошедшего электрических полей будут иметь вид:

$$\begin{aligned} E_{Iy} &= E_y + \sum_j R_j \exp[-i(k_{xj}x - k_{I,zj}z)], \\ E_{IIy} &= \sum_j T_j \exp\{-i[k_{xj}x - k_{II,zj}(z-d)]\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $k_{xi}$  получены из теоремы Флоке [8] в виде:

$$\begin{aligned} k_{xj} &= k_0 (n_l \sin \alpha - j \frac{\lambda_0}{\Lambda}); \\ k_{l,zj} &= \begin{cases} k_0 \sqrt{n_l^2 - (\frac{k_{xj}}{k_0})^2}, k_0 n_l > k_{xj}; \\ -ik_0 \sqrt{(\frac{k_{xj}}{k_0})^2 - n_l^2}, k_0 n_l < k_{xj}; \end{cases} \quad l = I, II. \end{aligned} \quad (4)$$

Также в выражении (2) величины  $R_j$  и  $T_j$  - амплитуды соответственно прошедших и отраженных порядков дифракции в соответствующих средах.

Отметим, что магнитное поле в каждой из сред можно найти из уравнений Максвелла, а именно:

$$\vec{H} = \left( \frac{i}{\omega \mu} \right) \text{rot } \vec{E}, \quad (5)$$

где  $\mu$  - абсолютная магнитная проницаемость среды.

Перейдем к рассмотрению поля в решетке. В слое решетки с индексом  $l = \overline{1, L}$ , где L - число слоев решетки, представим амплитуды тангенциальных компонент в виде ряда Фурье:

$$E_{l,gy} = \sum_j S_{l,yj}(z) \exp(-ik_{xj}x), \quad (6)$$

$$H_{l,gx} = -i \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \sum_j U_{l,xj}(z) \exp(-ik_{xj}x). \quad (7)$$

Аналогичным образом получаем систему уравнений для конкретного слоя, а именно:

$$\frac{\partial^2 S_{l,y}}{\partial \tilde{z}^2} = A_l S_{l,y}, \quad (8)$$

где  $\tilde{z} = k_0 z$ ,  $A_l = \mathbf{K}_x^2 - \mathbf{E}_l$ ,  $\mathbf{K}_x$  - диагональная матрица из величин  $\frac{k_{xj}}{k_0}$ ,  $\mathbf{E}$  - теплицева матрица,

состоящая из коэффициентов разложения в ряд Фурье функции диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_l(x)$ .

Система дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами (8) решается нахождением собственных чисел и векторов матрицы системы. Так получаем решение системы вида:

$$S_{l,yj}(z) = \sum_{m=1}^n w_{l,j,m} \{c_{l,m}^+ \exp[-k_0 q_{l,m}(z - D_l + d_l)] + c_{l,m}^- \exp[k_0 q_{l,m}(z - D_l)]\}, \quad (9)$$

$$U_{l,xj}(z) = \sum_{m=1}^n v_{l,j,m} \{-c_{l,m}^+ \exp[-k_0 q_{l,m}(z - D_l + d_l)] + c_{l,m}^- \exp[k_0 q_{l,m}(z - D_l)]\}, \quad (10)$$

где  $w_{l,j,m}$  - элементы матрицы собственных векторов  $\mathbf{W}_l$ ,  $q_{l,m}$  - элементы матрицы сингулярных чисел  $\mathbf{Q}_l$ ,  $v_{l,j,m}$  - элементы матрицы  $\mathbf{V}_l = \mathbf{W}_l \mathbf{Q}_l$ ;  $c_{l,m}^+$ ,  $c_{l,m}^-$  - неизвестные постоянные, которые будут найдены из граничных условий;  $d_l$  - толщина рассматриваемого слоя,  $D_l$  - общая толщина слоев до рассматриваемого включительно.

Записывая граничные условия в матричном виде и добавляя к ним условие на границе смежных слоев, получим систему уравнений, решением которой являются искомые амплитуды отраженных и прошедших порядков дифракции:

$$\begin{pmatrix} \delta_{j0} \\ n_l \cos \alpha \delta_{j0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{I} \\ -i\mathbf{Z}_l \end{pmatrix} \mathbf{R} = \prod_{l=1}^L \begin{pmatrix} \mathbf{W}_l & \mathbf{W}_l \mathbf{X}_l \\ \mathbf{V}_l & -\mathbf{V}_l \mathbf{X}_l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{W}_l \mathbf{X}_l & \mathbf{W}_l \\ \mathbf{V}_l \mathbf{X}_l & -\mathbf{V}_l \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{I} \\ i\mathbf{Z}_l \end{pmatrix} \mathbf{T}. \quad (11)$$

где  $\delta_{j0}$  - символ Кронекера и  $\mathbf{X}_l, \mathbf{Z}_l, \mathbf{Z}_l$  - диагональные матрицы с элементами, соответственно,  $\exp(-k_0 q_{l,m} d_l)$ ,  $\frac{k_{l,xj}}{k_0}$  и  $\frac{k_{l,zj}}{k_0}$ . Заметим, что каждый множитель произведения в правой части имеет одно обращение матрицы, которая может быть плохообусловленной при большом значении  $q_{l,m}$ . Для этого произведем декомпозицию обращаемой матрицы и рассмотрим последний множитель данного произведения и сделаем замену:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{a}_L \\ \mathbf{b}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{W}_L & \mathbf{W}_L \\ \mathbf{V}_L & -\mathbf{V}_L \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{f}_{L+1} \\ \mathbf{g}_{L+1} \end{pmatrix}; \mathbf{T} = \mathbf{a}_L^{-1} \mathbf{X}_L \mathbf{T}_L. \quad (12)$$

Повторяя процедуру замены для остальных слоев дифракционной решетки, формула (11) примет вид:

$$\begin{pmatrix} \delta_{j0} \\ n_l \cos \alpha \delta_{j0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{I} \\ -i\mathbf{Z}_l \end{pmatrix} \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{g}_1 \end{pmatrix} \mathbf{T}_1, \quad (13)$$

откуда находим  $\mathbf{T} = \mathbf{a}_L^{-1} \mathbf{X}_L \times \dots \times \mathbf{a}_1^{-1} \mathbf{X}_1 \mathbf{T}_1$ .

Система уравнений (13), в свою очередь, решается без численных погрешностей для любого числа слоев решетки.

Для определения интенсивностей дифракционных порядков найдем отношение абсолютных величин  $z$ -компонент усредненного по времени вектора Умова-Пойнтинга к соответствующей величине у падающей волны. В случае ТЕ-поляризации такие компоненты имеют вид:

$$|\overline{S}_z| = \left| \frac{E_y H_x^*}{2} \right|. \quad (14)$$

Для падающей волны эта компонента имеет вид:

$$|\overline{S}_{z,I}| = \frac{k_0 n_l \cos \alpha}{2\omega \mu_0}. \quad (15)$$

Для отраженных и прошедших порядков дифракции эти компоненты имеют вид, соответственно:

$$|\overline{S}_{z,R_j}| = \frac{\operatorname{Re}\{k_{l,j}\} |R_j|^2}{2\omega \mu_0}, \quad |\overline{S}_{z,T_j}| = \frac{\operatorname{Re}\{k_{ll,j}\} |T_j|^2}{2\omega \mu_0}. \quad (16)$$

Таким образом, интенсивности порядков дифракции имеют вид:

$$DE_{R_j} = \frac{|R_j|^2 \operatorname{Re}\{k_{l,j}\}}{k_0 n_l \cos \alpha}, \quad DE_{T_j} = \frac{|T_j|^2 \operatorname{Re}\{k_{ll,j}\}}{k_0 n_l \cos \alpha}. \quad (17)$$

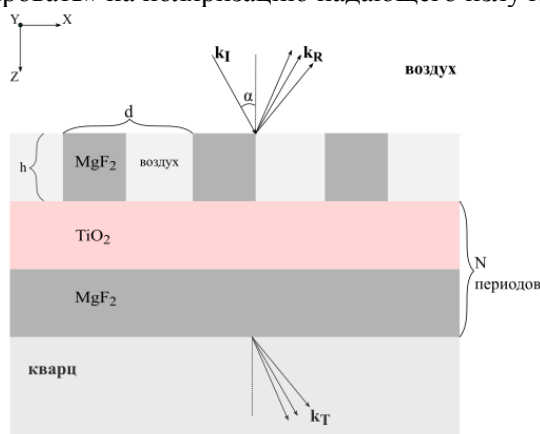
Сумма интенсивностей порядков дифракции равняется единице и не зависит от выбранного числа гармоник.

Таким образом, описанный метод позволяет вычислить интенсивности дифракционных порядков для анализа энергетических характеристик моделируемой дифракционной структуры.

#### 4. Исследование поляризующего отражателя на основе дифракционной решетки и фотонного кристалла

##### 4.1 Постановка задачи

В ряде задач оптоэлектронной техники и лазерной оптики (например, в лазерной дальнометрии) используются поляризационно-селективные зеркала (ПСЗ). Данные отражатели обеспечивают необходимые уровни отражения каждой из поляризаций (ТЕ-, ТМ-) на рабочей длине волны. Это связано с тем, что брэгговская решетка при верном подборе параметров эффективно отражает необходимый диапазон длин волн, а в сочетании с дифракционной решеткой позволяет «реагировать» на поляризацию падающего излучения.



**Рисунок 1.** Схема рассматриваемого ПСЗ из дифракционной и брэгговской решеток.

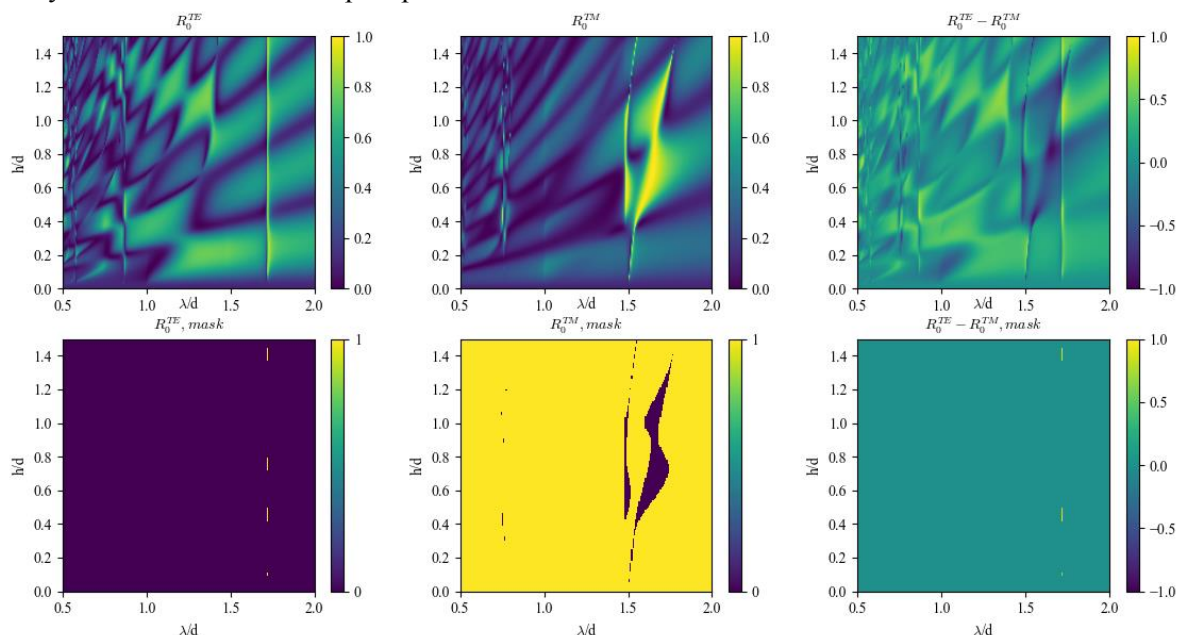
Схема рассматриваемого ПСЗ представлена на рисунке 1. Оно представляет собой дифракционную решетку, нанесенную на структуру из плоскопараллельных однородных слоев. Необходимая разница в отражении поляризаций достигается за счет разницы в отражении  $\pm 1$  порядков дифракции для ТЕ и ТМ поляризаций и их интерференции с нулевым порядком дифракции при отражении от многослойной структуры.

Моделируемое ПСЗ имеет следующие конструктивные параметры: на кварцевую ( $n=1,48$ ) подложку наносится брэгговская решетка, состоящая из чередующихся слоев  $\text{TiO}_2$  ( $n=1,38$ ) и  $\text{MgF}_2$  ( $n=2,35$ ) четвертьволновой толщины. На эту решетку наносится бинарная дифракционная решетка, имеющая в области непропускания  $\text{MgF}_2$  и воздух в пропускающей области. На данную структуру падает ортогонально (ТЕ- или ТМ-) поляризованный свет с длиной волны 1064 нм.

Задача состоит в расчете таких параметров структуры (число периодов брэгговской решетки, период и высота дифракционной решетки), при которых отражение ТЕ-поляризованной волны было близко к 100% (свыше 99%), а отражение ТМ-поляризованной волны – как можно меньше 80%. Заметим, что данный критерий не ограничивает нижний порог отражения ТМ-поляризации.

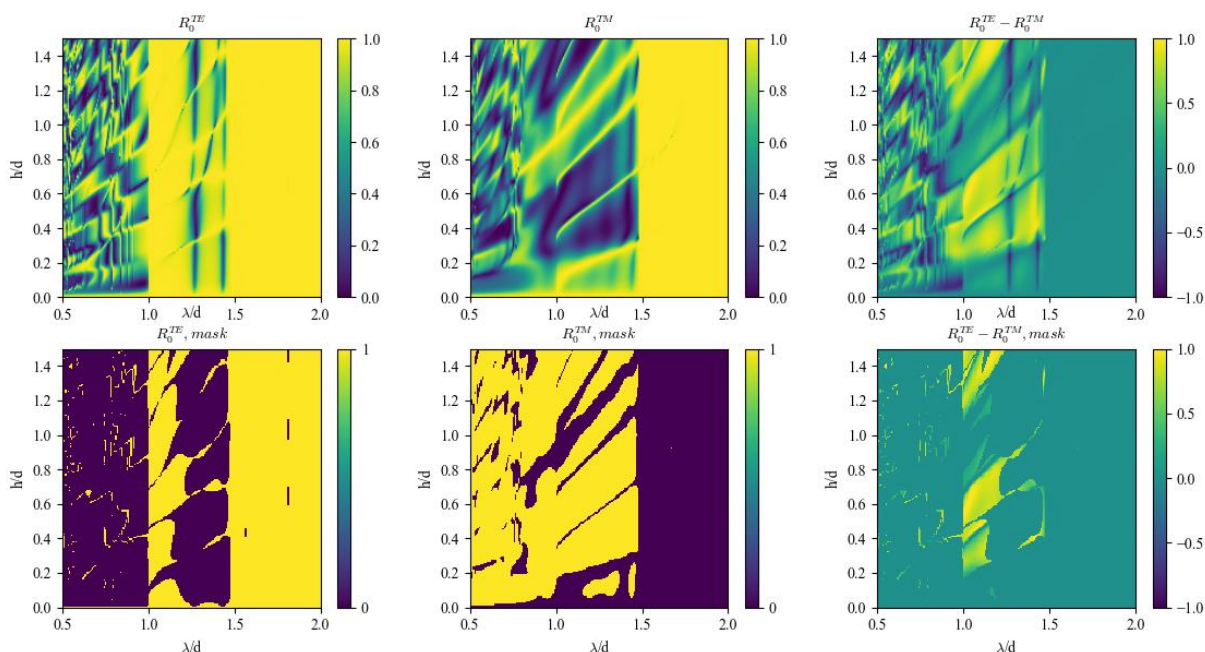
#### 4.2 Расчет параметров ПСЗ

С помощью метода фурье-мод промоделируем нормальное падение волны на рассматриваемую структуру. Для анализа достижения заданного критерия отражения поляризаций построим зависимость отражений от длины волны, нормированной на период дифракционной решетки, и от ее высоты, также нормированной на период. Будем рассчитывать следующие зависимости: интенсивность нулевого отраженного порядка дифракции для каждой из поляризаций и их разность (верхние три графика) и проводить пороговую обработку этих зависимостей в соответствии с заданным критерием отражения и отбор точек, соответствующих критерию, с указанием разности (нижние три графика). При построении графиков будем увеличивать число слоев брэгговской решетки для формирования широкой области допустимых параметров ПСЗ с наилучшим соответствием критерию.

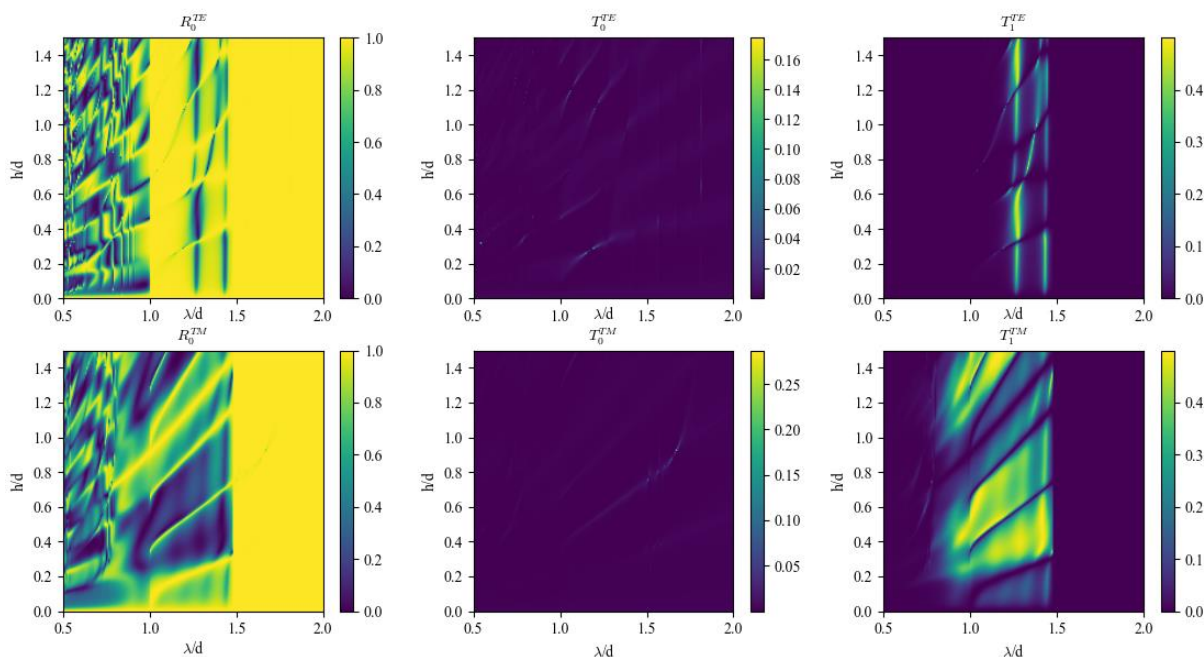


**Рисунок 2.** Результаты расчетов интенсивностей для одного периода слоев: нулевой порядок дифракции в ТЕ-поляризации (верхний ряд, первый рисунок), в ТМ-поляризации (верхний ряд, второй рисунок), их разность (верхний ряд, третий рисунок) и изображения, полученные с помощью пороговой обработки соответствующих распределений (нижний ряд).

Увеличение количества периодов многослойной структуры ведет к формированию области допустимых параметров. На рисунке 3, соответствующем семи периодам, эта область значительно увеличилась до параметров, при которых разница в отражении достигает 99,7%. Оптимальными параметрами ПСЗ выберем следующие значения из «желтой» области: период решетки – 1031 нм, высота решетки – 634 нм.



**Рисунок 3.** Результат расчета отражения поляризаций для семи периодов многослойной структуры фильтра в ТЕ-поляризации (верхний ряд, первый рисунок), в ТМ-поляризации (верхний ряд, второй рисунок), их разность (верхний ряд, третий рисунок) и изображения, полученные с помощью пороговой обработки соответствующих распределений (нижний ряд).



**Рисунок 4.** Расчет отражения нулевого порядка дифракции в ТЕ и ТМ поляризациях (первый столбец), пропускания нулевого порядка дифракции в ТЕ и ТМ поляризациях (второй столбец) и пропускания первого порядка дифракции в ТЕ и ТМ поляризациях (третий столбец).

Для объяснения полученного результата рассчитаем пропускание в нулевом и первом порядках дифракции. Результат расчетов представлен на рисунке 4. Видно, что низкое отражение ТМ-поляризации связано с тем, что основная часть энергии падающей ТМ-поляризованной волны переходит в  $\pm 1$ -ые порядки дифракции.

Заметим, что причиной такого эффекта является существование в многослойной структуре под решеткой фотонной запрещенной зоны, в которой моды являются затухающими и не



распространяются [9]. Данная зона для ТЕ-поляризации определяется дисперсионным соотношением фотонного кристалла:

$$\cos(kd) = \cos(k_{z,1}h_1)\cos(k_{z,2}h_2) - \frac{k_{z,1}^2 + k_{z,2}^2}{2k_{z,1}k_{z,2}}\sin(k_{z,1}h_1)\sin(k_{z,2}h_2), \quad (18)$$

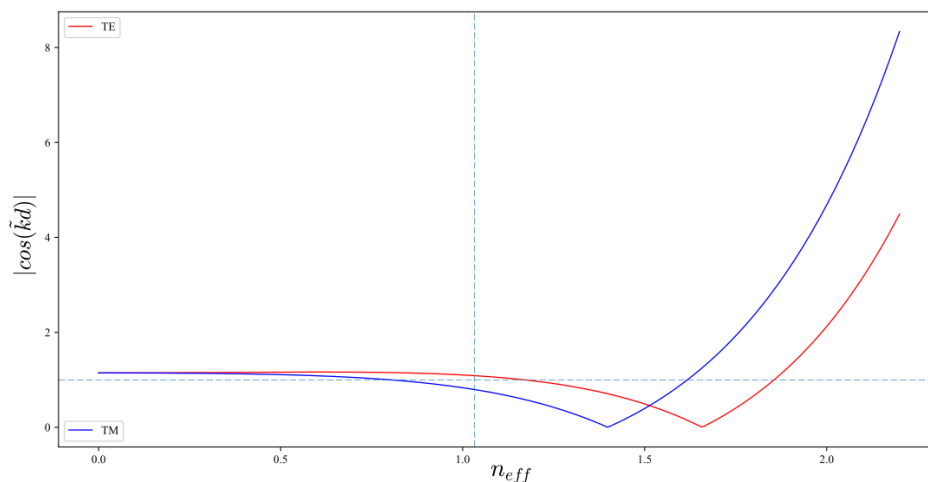
где  $h_1, h_2$  - толщина каждого из слоев кристалла,  $d$  - суммарная толщина двух слоев,

$$k_{z,i} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{n_i^2 - n_{eff}^2}.$$

Условие  $|\cos(kd)| > 1$  определяет фотонную запрещенную зону. Заметим, что в случае ТМ-поляризации дисперсионное соотношение имеет такой же вид, но  $k_{z,i}$  в рациональной функции в правой части заменяется на  $\frac{k_{z,i}}{n_i^2}$ . Построим зависимости правой части дисперсионных

соотношений для разных поляризации от эффективного показателя преломления. Рассчитанные зависимости представлены на рисунке 5. Вертикальной линией на графике отмечен эффективный показатель преломления, равный 1,033 и соответствующий  $\pm 1$ -м порядкам дифракции. Область выше горизонтальной линии определяет фотонную запрещенную зону – из пересечения линии эффективного показателя преломления с кривыми для двух поляризации видно, что в случае ТМ-поляризации первые порядки дифракции не находятся в запрещенной зоне, а в случае ТЕ-поляризации – находятся. Это объясняет высокую интенсивность прошедших первых порядков в случае ТМ-поляризации на рисунке 5.

Также отметим, что область нахождения первого порядка дифракции в запрещенной зоне ТЕ-поляризации при разрешенном первом порядке у ТМ-поляризации достаточно широка (от 0,81 до 1,17), что и определяет ширину «желтой» зоны из рисунка 3.



**Рисунок 5.** Правые части дисперсионных соотношений фотонного кристалла для обеих поляризации.

В соответствии с графиком на рисунке 5 оптимальными параметрами ПСЗ выбраны следующие значения из «желтой» области: период решетки – 1031 нм, высота решетки – 634 нм. Эти значения соответствуют разнице в 99,7% между отражениями поляризации, что максимально удовлетворяет поставленному критерию.

Исследуем влияние изменения геометрических параметров структуры на ее оптические свойства. Центральная длина волны 1064 нм является локальным минимумом отражения ТМ-поляризации, что очевидно в силу расчета параметров ПСЗ, и, во-вторых, структура имеет достаточно широкий диапазон длин волн, в котором отражение ТМ-поляризации не превышает 20% (от 1040 до 1110 нм). Также наблюдается широкая область значений периода дифракционной решетки, при которых отражение ТМ-поляризации не превышает 30% (от 877 до 1055 нм), что не накладывает на период производимой дифракционной решетки



значительных ограничений. Аналогичным образом выбранное оптимальное значение высоты дифракционной решетки 634 нм является локальным минимумом и вокруг этого значения имеется широкий диапазон значений, при которых отражение ТМ-поляризации не превышает 20% (от 500 до 700 нм), что так же облегчает процесс изготовления.

Кроме этих очевидных характеристик, можно варьировать коэффициент заполнения (англ. *fill factor*, отношение ширины ступеньки решетки к периоду) дифракционной решетки. При моделировании ранее предполагалось, что решетка бинарная с равной шириной ступеньки и областей между ступеньками. Однако моделирование показывает, что, во-первых, можно варьировать отношение ширины ступеньки к периоду от 0,24 до 0,59, имея интенсивность отражения ТМ-поляризации 20%, и, во-вторых, имеется еще один локальный минимум ( $\approx 0,25$ ), где отражение менее 0,5%.

## 5. Заключение

В ходе работы сформулированы основные функциональные требования к программной системе и описано архитектурное решение реализуемого комплекса. Рассмотрен и реализован метод фурье-мод расчета многослойных дифракционных структур, содержащих однородные слои и дифракционные решетки с одномерной периодичностью. Промоделирован и изучен поляризующий отражатель, состоящий из дифракционной решетки на поверхности брэгговской решетки из небольшого числа периодов. Для заданного критерия отражения каждого из видов поляризаций исследована область оптимальных параметров, соответствующих критерию отбора. Рассчитано влияние изменения геометрических параметров структуры на рабочие характеристики отражателя. Проведенные исследования показывают, что рассматриваемый поляризующий отражатель может соответствовать более строгому критерию отражения и обладает большими областями допусков по геометрическим параметрам.

## 6. Литература

- [1] Асинхронный веб, или что такое веб-сокеты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tproger.ru/translations/what-are-web-sockets> (25.06.2018).
- [2] Plotly.js | JavaScript graphing library [Electronic resource]. – Access mode: <https://plot.ly/javascript/> (28.11.2017).
- [3] Roy Fielding. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures / Roy Thomas Fielding. – University of California, Irvine, 2000. – 180 p.
- [4] Angular Docs [Electronic resource]. – Access mode: <https://angular.io> (25.12.2017).
- [5] Introduction to Contexts and Dependency Injection for the Java EE Platform - The Java EE 6 Tutorial [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.oracle.com/javaee/6/tutorial/docs/giwhb.html> (31.05.2018).
- [6] Moharam, M.G. Stable implementation of the rigorous coupled wave analysis for surface-relief gratings enhanced transmittance matrix approach / M.G. Moharam [et al.] // J. Opt. Soc. Am. A. – 1995. – Vol 12(5). – P. 1077-1084.
- [7] Moharam, M.G. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings / M.G. Moharam, E.B. Grann, D.A. Pommet // J. Opt. Soc. Am. A. – 1995. – Vol. 12(5). – P. 1068-1072.
- [8] Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1973. – 343 с.
- [9] Joannopoulos, J.D. Photonic crystals: Molding the flow of light / J.D. Joannopoulos [et al.]. – Princeton: Princeton University Press, 2008. – 305 p.

# Development of a software package for modeling and analysis of light diffraction on periodic structures of nanophotonics by the rigorous coupled-wave analysis

I.S. Komarov<sup>1</sup>, E.A. Bezus<sup>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.** The subject of this article is the development of software package which it is possible to simulate and study the propagation of a plane electromagnetic wave on a multilayer diffraction grating with. The main functional requirements to the system are emphasized. The architectural solution of the implemented complex including the main functional and logical layers of the system with the specified methods of their interaction is described. The method allowing to model multilayer diffraction structures localized layers and diffraction gratings with one-dimensional periodicity is studied and implemented. A polarizing reflector consisting of a diffraction grating on the Bragg grating surface with a small number of periods is calculated and investigated. The optimal parameters of the structure are found for the given reflection criterion of each polarization type. The area of parameters corresponding to the selection criterion is investigated. The influence of changes in the geometric parameters of the structure on the reflector performance characteristics was studied.