

# Паразитное рассеяние при дифракции блоховских поверхностных волн

Е.А. Кадомина<sup>1</sup>, Е.А. Безус<sup>1,2</sup>, Л.Л. Досколович<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

**Аннотация.** В качестве перспективной платформы для интегрированных «на чипе» систем фотоники рассматриваются одномерные фотонные кристаллы (ФК), выполненные в виде системы однородных диэлектрических слоев. Информационными носителями в таких интегрированных системах являются блоховские поверхностные волны (БПВ), распространяющиеся по границе ФК. В настоящей работе исследуются потери на паразитное рассеяние при дифракции БПВ на диэлектрической ступеньке, расположенной на поверхности ФК. Показано, что при соблюдении определенных условий, накладываемых на угол падения БПВ и параметры ФК (толщины и показатели преломления слоев), потери на паразитное рассеяние могут быть полностью устранены.

## 1. Введение

В настоящее время фотоника рассматривается в качестве основного научного направления, призванного обеспечить дальнейшее развитие вычислительных систем за счет создания альтернативы электронным компонентам или дополнения к ним. При этом элементы нанофотоники рассматриваются как новая платформа для электронно-оптических систем передачи и обработки информации.

Одной из перспективных платформ для оптической обработки информации и управления оптическими сигналами «на чипе» является платформа блоховских поверхностных волн (БПВ) [1]. БПВ–платформа представляет собой одномерный фотонный кристалл (ФК), выполненный в виде системы однородных диэлектрических слоев [2], на границе которого распространяются блоховские поверхностные волны. Высокая «чувствительность» БПВ к изменению оптических свойств границы распространения позволяет эффективно управлять свойствами БПВ за счет изменения толщины верхнего слоя ФК или за счет формирования дифракционной наноструктуры непосредственно на нём.

В настоящей работе исследуется «паразитное» рассеяние БПВ при наклонном падении БПВ на диэлектрическую ступеньку, расположенную на поверхности ФК. Предложен метод подавления «паразитного» рассеяния БПВ, основанный на выборе геометрии слоев фотонного кристалла, обеспечивающей достаточно широкие запрещенные зоны для ТЕ- и ТМ-поляризаций. Показано, что в этом случае при превышении некоторого «критического» угла падения БПВ возможно полное устранение потерь энергии падающей БПВ на паразитное рассеяние.

## 2. Геометрия структуры и условия существования БПВ на границе ФК

Рассмотрим простую интегральную структуру, показанную на рисунке 1а. Структура состоит из диэлектрической ступеньки с высотой  $h_r > 0$ , шириной  $l_r$  и диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1$ , расположенной на поверхности одномерного фотонного кристалла с диэлектрическими проницаемостями слоев  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , толщинами слоев  $h_1$  и  $h_2$ , соответственно, и числом периодов  $N_{per}$  ( $d = h_1 + h_2$  – период ФК). Для существования в ФК БПВ с заданным эффективным показателем преломления  $n_{eff}$  на ФК помещается слой с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1$  и толщиной  $h'_1 = h_1 + h_c$  (рисунок 1а). Отметим, что высота ступеньки  $h_r$  также выбирается из условия существования в ней БПВ с эффективным показателем преломления  $n_{eff}^r$  ( $n_{eff}^r > n_{eff}$ ). Среда под структурой (подложка) и над структурой имеют диэлектрические проницаемости  $\varepsilon_{sub}$  и  $\varepsilon_{sup}$  соответственно. Возбуждаемая на границе ФК и диэлектрика БПВ падает на ступеньку под углом  $\theta$  (рисунок 1б).

Рассмотрим более подробно условия существования БПВ в ФК. Дисперсионное соотношение моды полубесконечного ФК в случае ТЕ-поляризации можно записать следующим образом [3,4]:

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

где  $\tilde{k}$  — волновое число моды,  $k_{z,i} = \sqrt{k_0^2\varepsilon_i - k_{x,0}^2}$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\lambda$  — длина волны. Отметим, что для ТМ-поляризации дисперсионное соотношение мод ФК имеет вид, аналогичный (1), с тем отличием, что значения  $k_{z,i}$  в рациональной функции в правой части заменяются на  $k_{z,i}/\varepsilon_i$ . Дисперсионное соотношение БПВ для случая ТЕ-поляризации [3,4] имеет вид

$$\exp(2ik_{z,1}h_c) = -C \exp(-ik_{z,1}h_c) \frac{k_{z,sup} + k_{z,1}}{k_{z,sup} - k_{z,1}}, \quad (2)$$

где коэффициент  $C$  определяется из решения системы линейных уравнений, получаемой при сшивке компонент поля в слоях ФК. Для случая ТМ-поляризации с (2) нужно провести такие же преобразования, как с выражением (1). Для существования БПВ на границе ФК и диэлектрика должны выполняться два условия, обеспечивающие затухание поля при удалении от границы раздела:  $|\cos(\tilde{k}d)| > 1$  (затухание в ФК, условие фотонной запрещенной зоны) и  $n_{eff} > \sqrt{\varepsilon_{sup}}$  (затухание в диэлектрике), где  $n_{eff} = k_{x,0}/k_0$  — эффективный показатель преломления БПВ.

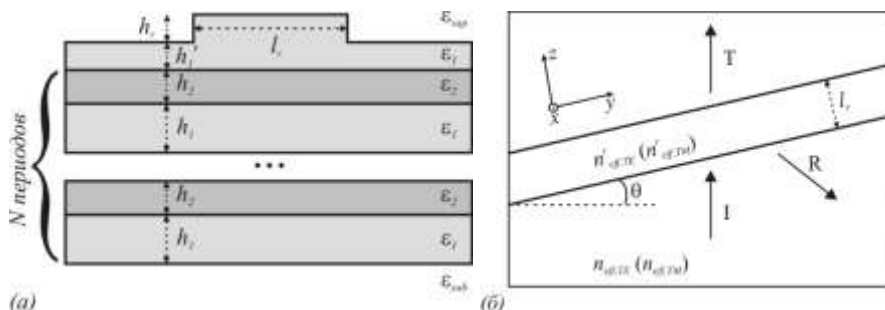


Рисунок 1. Геометрия структуры: поперечное сечение (а) и вид сверху (б).

## 3. Устранение паразитного рассеяния

На рисунке 1б показана геометрия наклонного падения БПВ с эффективным показателем преломления  $n_{eff,TE}$  на диэлектрическую ступеньку на поверхности ФК (угол падения  $\theta$ ). В

общем случае, при дифракции на ступеньке для выбранной БПВ с  $n_{eff,TE}$  (ТЕ-поляризованная волна) формируются не только прошедшие и отраженные ТЕ-поляризованные БПВ с  $n_{eff,TE}$ , а также ТМ-поляризованные БПВ с  $n_{eff,TM}$  и волны, распространяющиеся в областях ФК (вне слоя с толщиной  $h_1'$ ), подложки и над структурой («паразитное» рассеяние). Данные эффекты вызваны несовпадением поперечных профилей электромагнитного поля БПВ в области ступеньки и вне ее.

Для плоскопараллельных волноводов было показано, что при соблюдении определенных условий можно полностью устранить паразитное рассеяние, а также возбуждение «кросс-поляризованных» (ТМ-поляризованных) мод [5,6]. Указанный эффект связан с тем, что тангенциальная компонента волнового вектора  $k_y = k_0 n_{eff,TE} \sin \theta$  падающей волны сохраняется для всех рассеянных волн. Если при выбранном угле падения  $\theta$  будут выполняться неравенства  $k_y^2 > k_0^2 \varepsilon_{sup}$  и  $k_y^2 > k_0^2 \varepsilon_{sub}$ , «паразитное» рассеяние в подложку и в область над структурой будет полностью устранено. Кроме того, если  $k_y^2 > k_0^2 (n_{eff,TM})^2$ , то рассеянное поле не будет содержать кросс-поляризованные моды с эффективным показателем преломления  $n_{eff,TM}$ . Запишем углы отсечки для перечисленных неравенств:

$$\theta_{sup} = \arcsin\left(\frac{\sqrt{\varepsilon_{sup}}}{n_{eff,TE}}\right), \quad \theta_{sub} = \arcsin\left(\frac{\sqrt{\varepsilon_{sub}}}{n_{eff,TE}}\right), \quad \theta_{TM} = \arcsin\left(\frac{n_{eff,TM}}{n_{eff,TE}}\right). \quad (3)$$

Несмотря на то, что превышение первых двух углов из (3) приводит к устранению рассеяния в область над структурой и подложку, по-прежнему возможно рассеяние в «объёмные» моды ФК. Для его устранения необходимо выбрать конфигурацию слоев фотонного кристалла таким образом, чтобы при заданной длине волны (или в заданном диапазоне длин волн) для ТЕ- и ТМ-поляризаций у фотонного кристалла существовали достаточно широкие («протяжённые») запрещённые зоны, захватывающие эффективный показатель преломления падающей БПВ и продолжающиеся вплоть до показателя преломления более оптически плотного слоя ФК. При этом будет существовать некоторый «критический» угол падения БПВ, при превышении которого все волны, рассеянные в ФК, будут являться затухающими. В этом случае потерь на паразитное рассеяние происходить не будет, и вся энергия падающей БПВ будет переходить в отраженные и прошедшие БПВ. Таким образом, при наличии «протяжённых» запрещённых зон условие полного подавления паразитного рассеяния и преобразования поляризации можно записать в следующем виде:

$$\theta > \theta_{TM} > \max(\theta_{TE}^{bg}, \theta_{TM}^{bg}) > \theta_{sub} > \theta_{sup}, \quad (4)$$

где  $\theta_{TE}^{bg}$  и  $\theta_{TM}^{bg}$  — углы падения БПВ, соответствующие началу протяжённых запрещённых зон:  $\theta_{TE}^{bg} = \arcsin(n_{eff,TE}^{bg}/n_{eff,TE})$ ,  $\theta_{TM}^{bg} = \arcsin(n_{eff,TM}^{bg}/n_{eff,TE})$ , где  $n_{eff,TE}^{bg}$  и  $n_{eff,TM}^{bg}$  — эффективные показатели преломления, при которых начинаются фотонные запрещённые зоны.

#### 4. Результаты численного моделирования

Покажем, что выполнение неравенства (4) действительно приводит к устранению паразитного рассеяния на примере двух ФК с «протяжённой» и «разрывной» запрещёнными зонами в области относительно больших значений эффективного показателя преломления. Моделирование дифракции БПВ на ступеньке проводилось в рамках строгой электромагнитной теории дифракции с помощью собственного программного обеспечения, разработанного в среде MATLAB и реализующего метод фурье-мод (англ. Fourier modal method или rigorous coupled-wave analysis) [7,8], адаптированный для задач интегральной оптики [9,10].

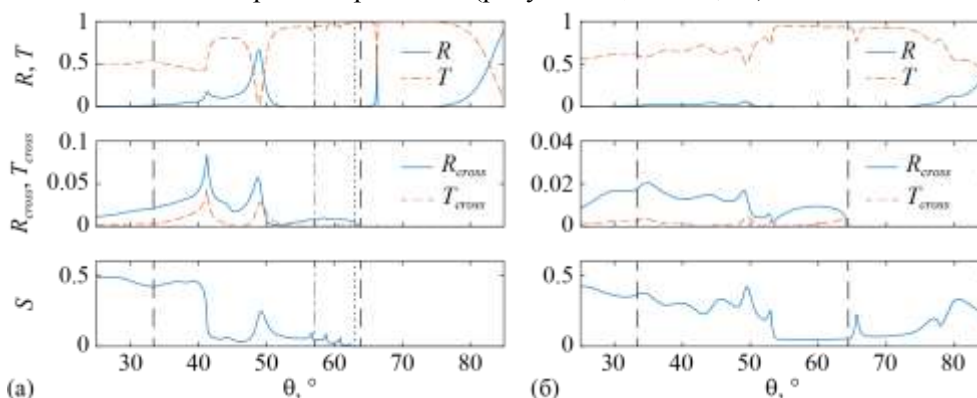
Рассмотрим два ФК со следующими параметрами:  $\varepsilon_1 = 2,1^2$ ,  $\varepsilon_2 = 1,44^2$ ,  $\varepsilon_{sub} = \varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_{sup} = 1$  для длины волны  $\lambda = 0,8$  мкм. Число периодов в обоих ФК  $N_{per} = 5$ , а ширина ступеньки  $l_r = 0,6$  мкм. Для обоих кристаллов выберем значения  $n_{eff,TE} = 1,81$  и  $n_{eff,TE}^r = 1,95$ , которым соответствуют следующие значения углов отсечки:  $\theta_{sup} = 33,4^\circ$  и  $\theta_{TM} = 63,8^\circ$ . В таблице 1 приведены параметры, различные для выбранных ФК. Прочерк в последних запрещённых зонах означает, что далее все значения  $n_{eff}$  находятся в запрещённой зоне.

**Таблица 1.** Параметры фотонных кристаллов и границы фотонных запрещённых зон.

| Параметры ФК   | ФК с «протяжённой» запрещённой зоной | ФК с «разрывной» запрещённой зоной |
|--|--------------------------------------|------------------------------------|
| Толщины слоев<br>[ $h_1$ ; $h_2$ ; $h_1'$ ; $h_r$ ] мкм                                    | [0,08; 0,4; 0,213; 0,142]            | [0,278; 0,176; 0,22; 0,121]        |
| Запрещённые зоны, ТЕ-поляризация<br>( $n_{TE,начало\ 33}^{bg}$ ; $n_{TE,конец\ 33}^{bg}$ ) | (1,18; 1,49), (1,62; —)              | (1,48; 1,86), (1,94; —)            |
| Запрещённые зоны, ТМ-поляризация<br>( $n_{TM,начало\ 33}^{bg}$ ; $n_{TM,конец\ 33}^{bg}$ ) | (1,26; 1,31), (1,52; —)              | (1,46; 1,75), (1,86; —)            |

Из таблицы 1 следует, что условие существования протяженных фотонных запрещённых зон, захватывающих эффективный показатель преломления падающей БПВ, выполняется только для первого из рассматриваемых ФК.

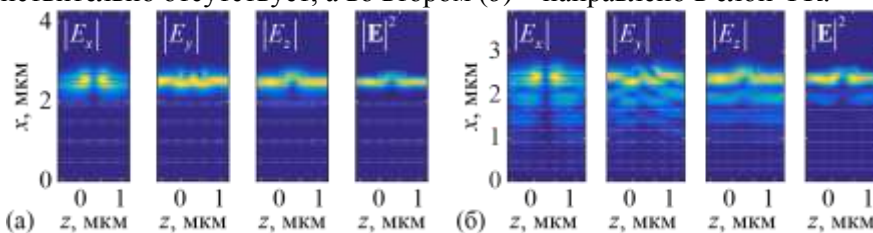
На рисунке 2 приведены зависимости коэффициентов отражения, пропускания и потерь на паразитное рассеяние от угла  $\theta$ . Рисунок 2 демонстрирует, что в первом случае (рисунок 2а) для всех углов  $\theta$ , больших угла отсечки  $\theta_{TM} = 63,8^\circ$  (отметим, что углы, соответствующие левой границе (началу) последней запрещённой зоны, составляют  $57,2^\circ$  и  $62,9^\circ$  для ТМ-и ТЕ-поляризации соответственно), рассеяние пропадает, а во втором (рисунок 2б) остается существенным во всем диапазоне углов падения. Также можно отметить, что, как и в случае с плоскопараллельным волноводом [6], при подавлении рассеяния при определённых углах  $\theta > \theta_{TM}$  наблюдается высокодобротный резонанс (рисунок 2а,  $\theta = 66,3^\circ$ ).



**Рисунок 2.** Зависимости коэффициентов отражения  $R$  и пропускания  $T$ , а также потерь на рассеяние  $S$  от угла падения  $\theta$  для ФК с «протяжённой» запрещённой зоной (а) и с «разрывной» запрещённой зоной (б). Вертикальными пунктирными линиями показаны углы отсечки  $\theta_{sup}$  и  $\theta_{TM}$ . Вертикальная штрихпунктирная линия соответствует углу  $\theta_{TM}^{bg} = 57,2^\circ$ , а

точечная –  $\theta_{TE}^{bg} = 62,9^\circ$ .

На рисунке 3 показаны компоненты электрического поля в структуре для обоих вариантов фотонного кристалла при  $\theta = 65,4^\circ$ . Рисунок 3 подтверждает, что в первом случае (а) рассеяние действительно отсутствует, а во втором (б) – направлено в слой ФК.



**Рисунок 3.** Компоненты электрического поля в структуре: ФК с «протяжённой» запрещённой зоной (а) и с «разрывной» запрещённой зоной (б).

## 5. Заключение

В работе исследован механизм подавления паразитного рассеяния при дифракции блоховских поверхностных волн (БПВ) на диэлектрической ступеньке, помещенной на поверхность ФК. На примере двух ФК, различия которых заключаются только в толщинах слоев и, соответственно, в границах запрещенных зон, показано, что для полного устранения паразитного рассеяния необходимо, чтобы в ФК существовали протяжённые запрещённые зоны для ТЕ- и ТМ-поляризованных волн, которые включают эффективный показатель преломления падающей БПВ. В этом случае потери на паразитное рассеяние могут быть полностью устранены при превышении некоторого «критического» угла падения. Полученный результат может найти применение при создании новых интегральных структур нанофотоники на платформе БПВ, распространяющихся по границе одномерного ФК.

## 6. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00514; численное исследование паразитного рассеяния БПВ) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-37-20038; реализация моделирующего программного обеспечения).

## 7. Литература

- [1] Descrovi, E. Special Issue "Surface Waves on Planar Photonic Crystals" – Applied Sciences, 2018.
- [2] Yu, L. Manipulating Bloch surface waves in 2D: a platform concept-based flat lens / L. Yu, E. Barakat, T. Sfez, L. Hvozdar, J.D. Francesco, H.P. Herzig // Light: science & applications. – 2014. – Vol. 3(e124).
- [3] Безус, Е.А. Фазовая модуляция поверхностных электромагнитных волн с помощью дифракционного микрорельефа на границе одномерного фотонного кристалла / Е.А. Безус, Л.Л. Досколович, Д.А. Быков, В.А. Сойфер // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2014. – Т. 99, № 2. – С. 67 – 71.
- [4] Кадомина, Е.А. Спектрально-селективное усиление ближнего поля в фотоннокристаллической структуре с дифракционной решёткой / Е.А. Кадомина, Е.А. Безус, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 462 – 468.
- [5] Hammer, M. Full resonant transmission of semiguide planar waves through slab waveguide steps at oblique incidence / M. Hammer, A. Hildebrandt, J. Forstner // Journal of Lightwave Technology. – 2016. – Vol. 34 (3). – P. 997-1005.
- [6] Bezus, E.A. Bound states in the continuum and high-Q resonances supported by a dielectric ridge on a slab waveguide / E.A. Bezus, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich // Photonics Research. – 2018. – Vol. 6 (11). – P. 1084-1093.
- [7] Moharam, M.G. Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings / M.G. Moharam, T.K. Gaylord // J. Opt. Soc. Am. – 1982. – Vol. 72. – P. 1385-1392.

- [8] Moharam, M.G. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach / M.G. Moharam, D.A. Pommet, E.B. Grann, T.K. Gaylord // J. Opt. Soc. Am. A. – 1995. – Vol. 12. – P. 1077-1086.
- [9] Granet, G. Reformulation of the lamellar grating problem through the concept of adaptive spatial resolution // J. Opt. Soc. Am. A. – 1999. – Vol. 16(10). – P. 2510-2516.
- [10] Vallius, T. Reformulation of the Fourier modal method with adaptive spatial resolution: application to multilevel profiles / T. Vallius, M. Honkanen // Optics Express. – 2002. – Vol. 10(1). – P. 24-34.

## Parasitic scattering of Bloch surface waves

E.A. Kadomina<sup>1</sup>, E.A. Bezus<sup>1,2</sup>, L.L. Doskolovich<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

<sup>2</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

**Abstract.** One-dimensional photonic crystals (PCs) consisting of alternating homogeneous dielectric layers are considered as a promising platform for integrated photonic systems, since they can support Bloch surface waves (BSWs; surface electromagnetic waves propagating along an interface of a PC), which can be used as information carriers in such integrated systems. Here, we study the parasitic scattering losses arising upon diffraction of BSW on a dielectric ridge located on the surface of the PC. We demonstrate that under certain conditions imposed on the BSW angle of incidence and the PC parameters (thicknesses and refractive indices of the PC layers), the parasitic scattering losses can be completely eliminated.