

# Интегральные резонансные дифракционные решетки для блоховских поверхностных волн

Е.А. Безус

Институт систем обработки изображений - филиал ФНИЦ  
«Кристаллография и фотоника»  
РАН  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
evgeni.bezus@gmail.com

Д.А. Быков

Институт систем обработки изображений - филиал ФНИЦ  
«Кристаллография и фотоника»  
РАН  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
bykovd@gmail.com

Л.Л. Досколович

Институт систем обработки изображений - филиал ФНИЦ  
«Кристаллография и фотоника»  
РАН  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
leonid@ipsiras.ru

**Аннотация**—Предложены и теоретически и численно исследованы резонансные дифракционные решетки «на чипе» для блоховских поверхностных волн (БПВ), распространяющихся вдоль границы раздела одномерного диэлектрического фотонного кристалла и однородного диэлектрика. Исследуемые структуры представляют собой периодический набор диэлектрических «столбиков» на поверхности фотонного кристалла. Показано, что в предложенных решетках «на чипе» существуют высокодобротные резонансы и связанные состояния в континууме, что делает их перспективными для применения в качестве узкополосных спектральных или пространственных (угловых) фильтров для БПВ.

**Ключевые слова**— дифракционная решетка, поверхностная электромагнитная волна, блоховская поверхностная волна, резонанс, связанное состояние в континууме.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Резонансные оптические эффекты играют крайне важную роль в современной фотонике, поскольку, наряду с фундаментальным интересом, они могут быть использованы при создании устройств с уникальными свойствами, перспективными для применения, в частности, в задачах оптической фильтрации, сенсорики и обработки информации [1]. Одним из наиболее известных и хорошо исследованных классов резонансных структур фотоники являются резонансные дифракционные решетки [2]. Структуры указанного типа обладают замечательными оптическими свойствами, обуславливающими возможность получения высокодобротных резонансов, а также широкополосных областей высокого отражения или пропускания.

В связи с развитием интегральной нанофотоники представляет большой интерес разработка и исследование резонансных дифракционных решеток, ориентированных на работу не с излучением, распространяющимся в свободном пространстве, а с волноводными модами или поверхностными электромагнитными волнами. В настоящей работе предложены и исследованы субволновые резонансные дифракционные решетки для блоховских поверхностных волн (БПВ) — поверхностных электромагнитных волн, распространяющихся вдоль границы раздела одномерного диэлектрического фотонного кристалла и однородного диэлектрика [3]. Показано, что в таких структурах существуют высокодобротные резонансы и

связанные состояния в континууме (специальный тип невытекающих собственных мод, существующих в структурах с открытыми каналами рассеяния [4]). Предложенные решетки могут найти применение в качестве эффективных узкополосных отражателей, спектральных или пространственных фильтров для БПВ.

## 2. РЕЗОНАНСНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ ДЛЯ БПВ

Геометрия исследуемых решеток для БПВ показана на рис. 1. Решетки состоят из периодического набора диэлектрических «столбиков» высотой  $h$ , длиной  $l$  и шириной  $w$ , расположенных на поверхности одномерного диэлектрического фотонного кристалла, состоящего из чередующихся плоскопараллельных диэлектрических слоев с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  и толщинами  $h_1$  и  $h_2$ . Толщина верхнего слоя фотонного кристалла с показателем преломления  $n_1$  составляет  $h'_1 = h_1 + h_c$ .

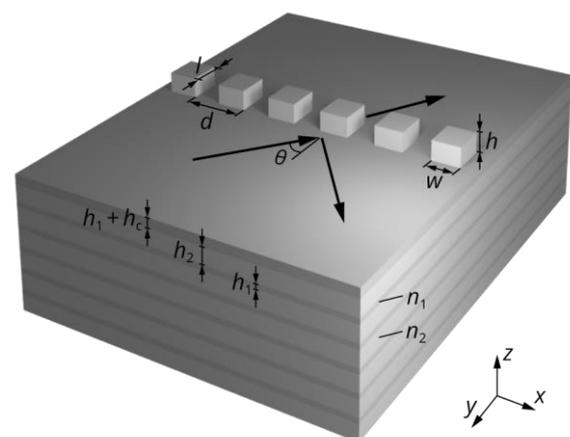


Рис. 1. Геометрия исследуемых интегральных решеток для блоховских поверхностных волн

В настоящей работе рассмотрен пример со следующими параметрами:  $n_1 = 3,3212$ ,  $n_2 = 1,4762$ ,  $h_1 = 25$  нм,  $h_2 = 164$  нм,  $h'_1 = 63$  нм. При этом полагается, что ступеньки решетки также имеют показатель преломления  $n_1$ . При указанных параметрах при длине волны  $\lambda = 630$  нм поверхность фотонного кристалла, над которым находится среда с показателем преломления  $n_0 = 1$ , поддерживает ТЕ-поляризованную БПВ с

эффективным показателем преломления (константой распространения, нормированной на волновое число)  $n_{\text{eff,TE}} = 2,4$ . Параметры фотонного кристалла выбраны таким образом, что при наклонном падении указанной БПВ на субволновую решетку, показанную на рис. 1, под углом, превышающим значение  $\theta_{cr} = 53,57^\circ$ , энергия падающей волны делится только между отраженной и прошедшей ТЕ-поляризованными БПВ, соответствующими нулевым порядкам дифракции. При этом отсутствует как возбуждение ТМ-поляризованных отраженных и прошедших БПВ, так и «паразитное» рассеяние в область над структурой и в фотонный кристалл.

Теоретический анализ на основе модели связанных волн [5] и строгое численное моделирование на основе неперриодической модификации метода Фурье-мод [6] показывают, что исследуемые интегральные решетки для БПВ поддерживают высокодобротные резонансы, проявляющиеся в виде пиков отражения и минимумов пропускания, а также связанные состояния в континууме. В частности, на рис. 2 показаны спектры отражения в зависимости от длины волны (сверху) и угла падения (снизу) решеток со следующими параметрами:  $h = 33$  нм,  $w = d/2$ ,  $(\lambda/d, l/d) = (4,469, 3,775)$  (сплошные кривые) или  $(\lambda/d, l/d) = (4,479, 4,6)$  (пунктирные кривые).

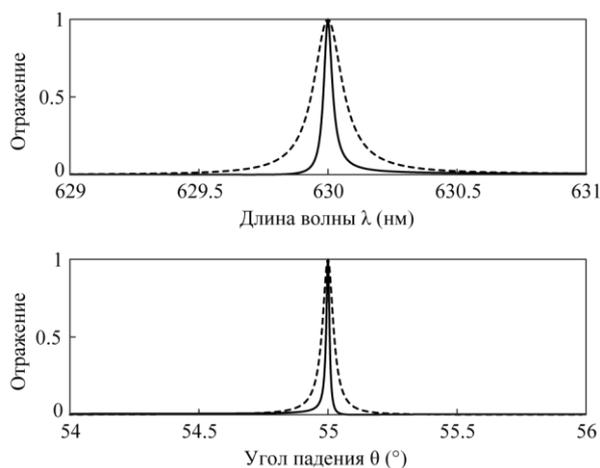


Рис. 2. Спектры отражения, рассчитанные при фиксированном угле падения  $\theta = 55^\circ$  и изменяющейся длине волны (сверху) и фиксированной длине волны  $\lambda = 630$  нм и изменяющемся угле падения (снизу) для двух интегральных субволновых дифракционных решеток для БПВ с параметрами  $(\lambda/d, l/d) = (4,469, 3,775)$  (сплошные кривые) и  $(\lambda/d, l/d) = (4,479, 4,6)$  (пунктирные кривые)

Теоретический анализ показывает, что резонансы на рис. 2 близки к связанному состоянию в континууме, существующему в структуре при  $(\lambda/d, l/d) = (4,463, 3,35)$ . Как следует из рис. 2, добротность резонансов может контролироваться за счет «приближения» или «удаления» параметров структуры к параметрам решетки, поддерживающей связанное состояние в континууме.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложены и теоретически и численно исследованы резонансные субволновые дифракционные решетки «на чипе» для блоховских поверхностных волн, распространяющихся вдоль границы раздела одномерного фотонного кристалла и однородного диэлектрика. Показано, что в случае, когда в решетках отсутствует «паразитное» рассеяние и энергия падающей ТЕ-поляризованной БПВ делится только между отраженной и прошедшей БПВ той же поляризации, которые соответствуют нулевым порядкам дифракции, в таких структурах существуют высокодобротные резонансы и связанные состояния в континууме, что делает их перспективными для применения в качестве узкополосных оптических фильтров «на чипе». По нашему мнению, полученные результаты могут быть распространены и на другие платформы интегральной нанофотоники, в частности, платформу поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся вдоль границ раздела металла и диэлектрика, а также платформу диэлектрических плоскопараллельных волноводов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящая работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00514).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Limonov, M.F. Fano resonances in photonics / M.F. Limonov, M.V. Rybin, A.N. Poddubny, Y.S. Kivshar // Nat. Photonics. – 2017. – Vol. 11(9). – P. 543-554.
- [2] Collin, S. Nanostructure arrays in free-space: optical properties and applications / S. Collin // Rep. Prog. Phys. – 2014. – Vol. 77(12). – P. 126402.
- [3] Безус, Е.А. О связи константы распространения блоховской поверхностной волны с толщиной верхнего слоя фотонного кристалла / Е.А. Безус, Д.А. Быков, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 22-27. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-22-27.
- [4] Hsu, C.W. Bound states in the continuum / C.W. Hsu, B. Zhen, A.D. Stone, J.D. Joannopoulos, M. Soljačić // Nat. Rev. Mater. – 2016. – Vol. 1. – P. 16048.
- [5] 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 // Photon. Res. – 2018. – Vol. 6(11). – P. 1084-1093.
- [6] Lecamp, G. Theoretical and computational concepts for periodic optical waveguides / G. Lecamp, J.-P. Hugonin, P. Lalanne // Opt. Express. – 2007. – Vol. 15(18). – P. 11042-11060.