

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 $h'_1 = h_1 + h_c$.

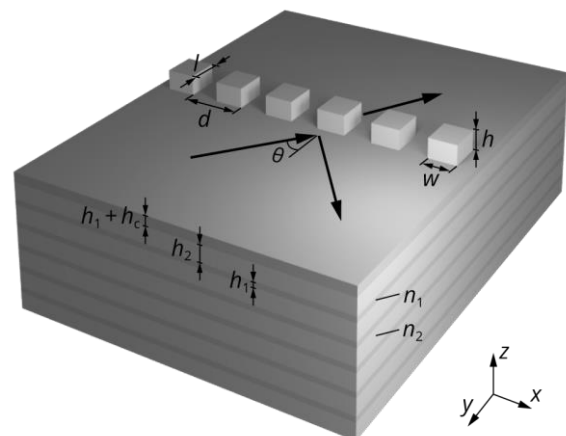


Рис. 1. Геометрия исследуемых интегральных решеток для блоховских поверхностных волн

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) $n_{eff,TE} = 2,4$. 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).

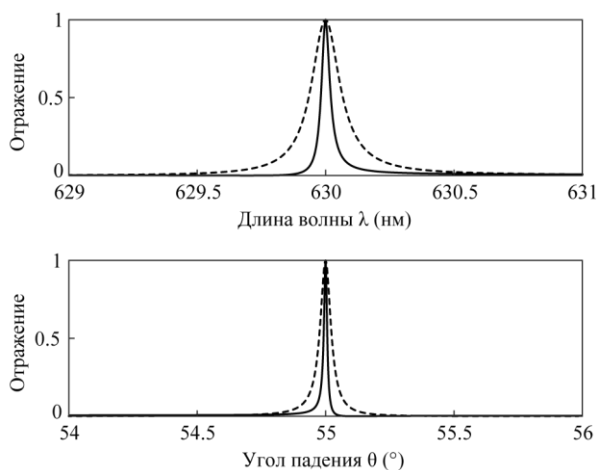


Рис. 2. Спектры отражения, рассчитанные при фиксированном угле падения $\theta = 55^\circ$ и изменяющейся длине волны (сверху) и фиксированной длине волны $\lambda = 630$ нм и изменяющемся угле падения (снизу) для двух интегральных субволновых дифракционных решеток для БПВ с параметрами $(\lambda/d,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