

Интегральные спектральные фильтры из нескольких диэлектрических ступенек на поверхности плоскопараллельного волновода

Е.А. Безус^{1,2}, Д.А. Быков^{1,2}, Л.Л. Досколович^{1,2}

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

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

Аннотация. Исследованы узкополосные интегральные спектральные фильтры, состоящие из нескольких одинаковых диэлектрических ступенек, расположенных на поверхности диэлектрического плоскопараллельного волновода. Рассмотренные структуры работают в отражении и позволяют осуществлять спектральную фильтрацию наклонно падающих ТЕ-поляризованных волноводных мод. Показано, что за счет выбора расстояния между соседними ступеньками возможно получение пиков отражения почти прямоугольной формы с помощью всего нескольких ступенек. Результаты работы могут найти применение при создании новых интегральных оптических фильтров, сенсоров и устройств для преобразования оптических сигналов.

1. Введение

Спектральные фильтры, которые избирательно отражают или пропускают падающий свет, незаменимы в различных оптических устройствах, включающих анализаторы спектра, химические и биологические сенсоры и (де-)мультиплексоры длин волн. В широком классе планарных (интегральных) оптоэлектронных систем спектральная или пространственная фильтрация выполняется в плоскопараллельном волноводе [1–4]. Такая геометрия соответствует платформе «диэлектрик на диэлектрике» и подходит для создания полностью интегрированных оптических устройств.

Для спектральной фильтрации излучения, распространяющегося в плоскопараллельном волноводе, часто применяются планарные брэгговские решетки и брэгговские решетки с дефектом [1, 5–7]. Интересной альтернативой планарной брэгговской решетке является очень простая резонансная структура в виде одной диэлектрической ступеньки на поверхности одномодового плоскопараллельного волновода [8–10]. При дифракции ТЕ-поляризованной моды в геометрии наклонного падения в спектрах отражения ступеньки появляются выраженные резонансные пики, связанные с возбуждением кросс-поляризованных мод ступеньки [8–10]. При высокой добротности пики имеют симметричную лоренцеву форму, что позволяет использовать ступеньку в качестве узкополосного отражающего фильтра. Однако лоренцева форма пика отражения не всегда соответствует практическим требованиям. Для многих практических приложений весьма желательно получение спектров отражения почти

прямоугольной формы с плоской вершиной и отсутствующими (или малыми) боковыми лепестками [7, 11].

В настоящей работе исследуются «композитные» резонансные структуры, состоящие из нескольких последовательно расположенных ступенек на поверхности волновода. Показано, что при правильном выборе ширин областей между ступеньками возможно получение пиков отражения почти прямоугольной формы с помощью всего нескольких ступенек. При этом спектральная ширина полосы отражения может контролироваться за счет выбора ширины ступеньки.

2. Резонансные оптические свойства единичной ступеньки на поверхности плоскопараллельного волновода

Начнем рассмотрение с отдельной ступеньки, расположенной на поверхности волновода. На рис. 1 показаны расчетные спектры отражения ступенек с двумя различными ширинами при наклонном падении ТЕ-поляризованной волноводной моды, демонстрирующие резонансные оптические свойства ступенек. Графики были рассчитаны с использованием собственной реализации неперiodического метода связанных волн [12]. Расчет отражения проводился при следующих параметрах: показатель преломления волноводного слоя $n_f = 3.3212$ (фосфид галлия), показатели преломления обкладок $n_i = 1.45$ (плавленый кварц) и $n_u = 1$, толщина волноводного слоя $h_f = 80$ нм, толщина волновода в области ступеньки $h_r = 110$ нм (см. рис. 2). Спектры отражения были рассчитаны для значений ширины ступеньки $w_1 = 360$ нм и $w_2 = 380$ нм. Соответствующие углы падения $\theta_1 = 53.37^\circ$ и $\theta_2 = 53.72^\circ$ были выбраны из условия нахождения резонансного пика в спектре отражения на центральной длине волны $\lambda = 630$ нм.

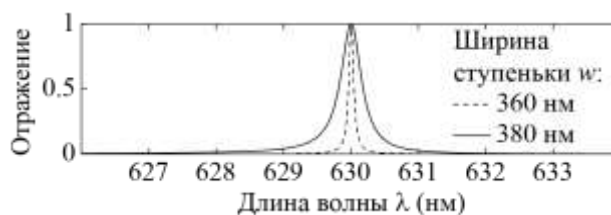


Рисунок 1. Спектры отражения при наклонном падении ТЕ-поляризованной моды на ступеньку на поверхности волновода. Углы падения: 53.37° и 53.72° при значениях ширины ступеньки 360 и 380 нм соответственно.

Резонансные пики отражения на рис. 1 имеют симметричную лоренцеву форму. В нашей работе [8] было показано, что ширина пика отражения может быть сделана сколь угодно малой за счет выбора ширины ступеньки вблизи значения ширины, при котором для выбранной центральной длины волны имеет место т. н. связанное состояние в континууме (ССК) — мода с бесконечной добротностью, существующая в структуре с открытыми каналами рассеяния [13]. Для рассматриваемого примера ССК существует в ступеньке шириной 344 нм [8].

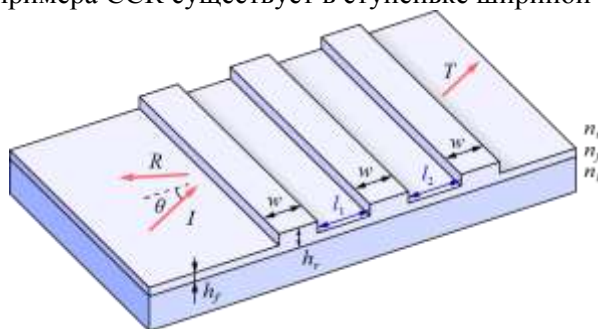


Рисунок 2. Геометрия композитной структуры, состоящей из нескольких диэлектрических ступенек на поверхности плоскопараллельного диэлектрического волновода.

3. Спектральные фильтры из нескольких ступенек

Исследуем теперь «композитные» структуры, состоящие из нескольких ступенек на поверхности волновода (рис. 2). Будем рассматривать случай, когда ширины ступенек, составляющих композитную структуру, являются одинаковыми, а ширины областей, разделяющих их, могут быть различными.

На рис. 3 показаны спектры отражения композитных структур с шириной ступеньки $w = 380$ нм, состоящие из двух (рис. 3(а)), четырех (рис. 3(б)) и шести (рис. 3(в)) ступенек. Для сравнения также приведен спектр отражения исходной ступеньки (пунктирные линии). Значения расстояний между ступеньками были рассчитаны с помощью оптимизационной процедуры и составили: $l_1 = 948$ нм для структуры из двух ступенек, $l_1 = l_3 = 1278$ нм, $l_2 = 1395$ нм для структуры из четырех ступенек, и $l_1 = l_5 = 1486$ нм, $l_2 = l_4 = 1383$ нм, $l_3 = 1485$ нм для структуры из шести ступенек. Отметим, что детальный теоретический анализ резонансных свойств композитных структур проведен в нашей недавней работе [14].

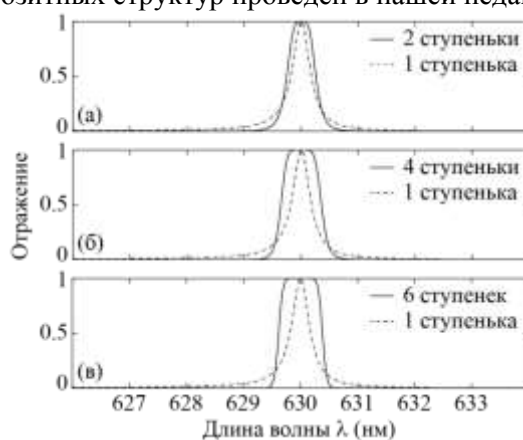


Рисунок 3. Спектры отражения при наклонном падении ТЕ-поляризованной моды (угол падения 53.72°) на композитную структуру из двух (а), четырех (б) или шести (в) ступенек с шириной $w = 380$ нм на поверхности волновода.

На рис. 4 приведены аналогичные графики для структур с шириной ступеньки $w = 360$ нм, показывающие уменьшение ширины резонансного пика отражения композитной структуры при увеличении добротности резонанса исходной ступеньки. Расстояния между ступеньками равны: $l_1 = 948$ нм для структуры из двух ступенек, $l_1 = l_3 = 1285$ нм, $l_2 = 1410$ нм для структуры из четырех ступенек, и $l_1 = l_5 = 1286$ нм, $l_2 = l_4 = 1405$ нм, $l_3 = 1282$ нм для структуры из шести ступенек.

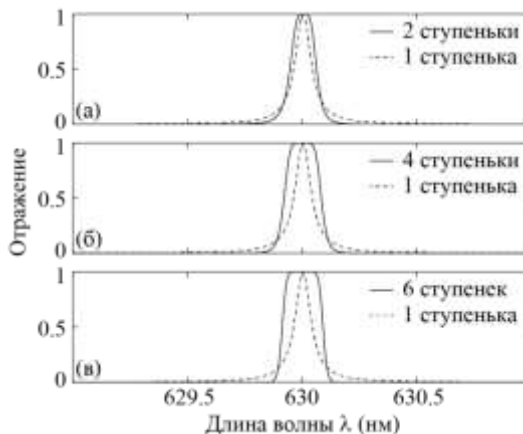


Рисунок 4. Спектры отражения при наклонном падении ТЕ-поляризованной моды (угол падения 53.37°) на композитную структуру из двух (а), четырех (б) или шести (в) ступенек с шириной $w = 360$ нм на поверхности волновода.

4. Заключение

В работе исследованы резонансные оптические свойства композитных структур, состоящих из нескольких одинаковых ступенек на поверхности плоскопараллельного волновода. Показано, что за счет оптимизации длин областей, разделяющих ступеньки, можно получить почти прямоугольные пики отражения с использованием всего нескольких ступенек. По мнению авторов, предлагаемая композитная структура является более простой и компактной по сравнению с планарными фильтрами на основе брэгговских решеток. При этом размер полосы отражения может быть сделан сколь угодно малым за счет выбора ширины ступеньки в окрестности существующего в ступеньке связанного состояния в континууме. Результаты работы могут найти применение при расчете и создании интегральных оптических фильтров, сенсоров и устройств для преобразования оптических сигналов.

5. Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-37-20038; исследование композитных структур, раздел 3) и Министерства науки и высшего образования РФ (гос. задание ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26; моделирование резонансных ступенек, раздел 2).

6. Литература

- [1] Haus, H.A. *Waves and Fields in Optoelectronics* – Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1984. – 402 p.
- [2] Mossberg, T. Planar holographic optical processing devices // *Opt. Lett.* – 2001. – Vol. 26(7). – P. 414-416.
- [3] Calafiore, G. Holographic planar lightwave circuit for on-chip spectroscopy / G. Calafiore, A. Koshelev, S. Dhuey, A. Goltsov, P. Sasorov, S. Babin, V. Yankov, S. Cabrini, C. Peroz // *Light: Sci. & Appl.* – 2014. – Vol. 3. – P. e203.
- [4] Doskolovich, L.L. Two-groove narrowband transmission filter integrated into a slab waveguide / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov // *Photon. Res.* – 2018. – Vol. 6(1). – P. 61-65.
- [5] Schmidt, R.V. Narrow-band grating filters for thin-film optical waveguides / R.V. Schmidt, D.C. Flanders, C.V. Shank, R.D. Standley // *Appl. Phys. Lett.* – 1974. – Vol. 25(11). – P. 651-652.
- [6] Hong, C.S. Broadband grating filters for thin film optical waveguides / C.S. Hong, J.B. Shellan, A.C. Livanos, A. Yariv, A. Katzir // *Appl. Phys. Lett.* – 1977. – Vol. 31(4). – P. 276-278.
- [7] Zengerle, R. Phase-shifted Bragg grating filter with improved transmission characteristics / R. Zengerle, O. Leminger // *J. Lightwave Technol.* – 1995. – Vol. 13(12). – P. 2354-2358.
- [8] 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.
- [9] Bezus, E.A. Spatial integration and differentiation of optical beams in a slab waveguide by a dielectric ridge supporting high-Q resonances / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, D.A. Bykov, V.A. Soifer // *Opt. Express.* – 2018. – Vol. 26(19). – P. 25156-25165.
- [10] Nguyen, T.G. Ridge resonance in silicon photonics harnessing bound states in the continuum / T.G. Nguyen, G. Ren, S. Schoenhardt, M. Knoerzer, A. Boes, A. Mitchell // *Laser & Photonics Rev.* – 2019. – Vol. 13(10). – P. 1900035.
- [11] Ko, Y.H. Flat-top bandpass filters enabled by cascaded resonant gratings / Y.H. Ko, R. Magnusson // *Opt. Lett.* – 2016. – Vol. 41(20). – P. 4704-4707.
- [12] Silberstein, E. Use of grating theories in integrated optics / E. Silberstein, P. Lalanne, J.-P. Hugonin, Q. Cao // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2001. – Vol. 18(11). – P. 2865-2875.
- [13] 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(9). – P. 16048.
- [14] Doskolovich, L.L. Integrated flat-top reflection filters operating near bound states in the continuum / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov // *Photon. Res.* – 2019. – Vol. 7(11). – P. 1314-1322.

Integrated spectral filters consisting of several dielectric ridges on the surface of a slab waveguide

E.A. Bezus^{1,2}, D.A. Bykov^{1,2}, L.L. Doskolovich^{1,2}

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

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. We investigate narrowband integrated spectral filters consisting of several identical dielectric ridges located on the surface of a dielectric slab waveguide. The studied structures operate in reflection and enable spectral filtering of obliquely incident TE-polarized guided modes. We demonstrate that by properly choosing the distances between the adjacent ridges, one can obtain nearly rectangular reflectance peaks using just a few ridges. The obtained results may find application in the design of novel integrated optical filters, sensors and devices for the transformation of optical signals.