

Оптические свойства резонансных дифракционных решёток с медленно изменяющимся периодом

Д.А. Быков^{1,2}, Е.А. Безус^{1,2}, L. Qian³, 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

³Jiangsu Normal University, Xuzhou, China, 221116

Аннотация. Рассмотрена волноводная дифракционная решётка, период которой медленно изменяется в направлении периодичности. На основе методов строгого решения уравнений Максвелла (метод фурье-мод и его неперIODический вариант) исследованы оптические свойства указанной структуры. В частности, проведено моделирование дифракции плоской волны на рассматриваемой структуре. Показано, что рассматриваемая структура может работать в качестве линейно изменяющегося фильтра (LVF-фильтра). На основе пространственно-временной теории связанных мод предложена модель, описывающая оптические свойства рассматриваемой структуры. Рассмотренная оптическая структура может найти применение в спектрометрах и гиперспектральных системах.

1. Введение

В последнее время большое внимание уделяется изучению резонансных эффектов в дифракционных структурах нанофотоники [1]. Резонансные структуры имеют множество применений в качестве оптических фильтров, сенсоров, лазерных резонаторов, нелинейных оптических устройств, (магнито-)оптических модуляторов [1].

Одной из важных областей применения резонансных оптических структур являются гиперспектральные системы [2–5]. При этом, зачастую, используются спектральные фильтры в виде «дискретного» набора резонансных структур (конечных «сегментов» дифракционных решеток или систем однородных слоев) с различными фиксированными резонансными частотами. Изменение положения спектрального пика также может быть достигнуто за счет плавного изменения одного из параметров протяжённой резонансной структуры [6–11]. В частности, в т. н. линейно изменяющихся фильтрах (англ. linear variable filter) изменение положения резонанса обеспечивается изменением толщины резонатора Фабри-Перо, расположенного между двумя брэгговскими отражающими структурами [12, 13]. Спектрометры на основе такого подхода являются достаточно компактными, так как фильтр может быть расположен непосредственно на поверхности ПЗС-матрицы или линейки. Другим преимуществом структур с плавно (линейно) изменяющимися параметрами является сравнительная простота их изготовления [6–11]. Следует отметить, что большинство работ, посвящённых линейно изменяющимся фильтрам — экспериментальные [6–13], в то время как

вопросы численного моделирования и аналитического описания свойств указанных структур практически не рассмотрены в известных работах.

В настоящей работе рассматриваются оптические свойства волноводной резонансной дифракционной решётки с плавно изменяющимся периодом (см. рисунок 1). Исследование проводится на основе строгого решения задачи дифракции в рамках метода фурье-мод, а также на основе строгого расчёта собственных мод резонансных структур с медленно изменяющимися параметрами на основе формализма матрицы рассеяния.

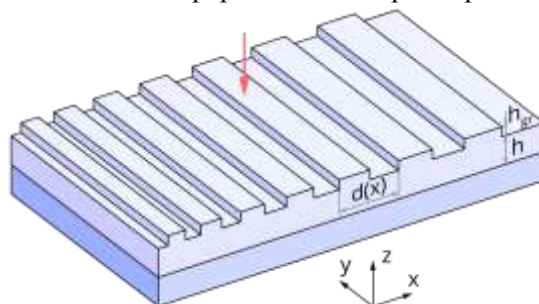


Рисунок 1. Геометрия рассматриваемой структуры.

2. Геометрия структуры и результаты моделирования

Геометрия рассматриваемой структуры представлена на рисунке 1. Структура представляет собой волноводный слой на подложке, на верхнюю поверхность которого нанесена дифракционная решётка с периодом, линейно изменяющимся в направлении периодичности по закону $d = d_0(1 + \alpha x)$. В настоящей работе рассмотрена структура со следующими параметрами: средний период $d_0 = 195$ нм; скорость изменения периода $\alpha = 0,5$ нм/мкм (также рассмотрен случай $\alpha = 0,05$ нм/мкм); коэффициент заполнения решётки (отношение ширины ступеньки решетки к периоду) 90%; высота решётки $h_{gr} = 30$ нм; толщина волноводного слоя $h = 50$ нм; показатель преломления решётки и волноводного слоя $n_{gr} = 3,5$; показатель преломления подложки $n_{sub} = 1,5$. Указанные параметры обеспечивают симметричный лоренцев профиль резонанса в спектре отражения, что позволяет использовать рассмотренную структуру в качестве фильтра.

Для моделирования оптических свойств рассматриваемой структуры в настоящей работе использовался т. н. метод суперпериода (англ. supercell approach), заключающийся в том, что рассматривается некоторое большое (но конечное) число периодов исходной структуры N (в настоящей работе использовалось значение $N = 400$), а затем указанная конечная структура периодически продолжается в направлении оси x , после чего полученная периодическая структура с «большим» периодом моделируется с использованием метода фурье-мод [14, 15]. Данный метод применим в случае, когда рассматривается не более $N = 500$ периодов. При большем значении N целесообразно использовать метод, предложенный в работах [16, 17].

На рисунке 2 представлено распределение поля, формируемое на расстоянии 150 нм над структурой при освещении её нормально падающей плоской волной. На рисунке представлена зависимость от длины волны падающего излучения. Расчёт поля проводился с использованием метода фурье-мод, при этом на рисунке 2 приведено лишь распределение отражённого поля без падающей волны. Из рисунка 2 видно, что структура с изменяющимся периодом проявляет резкий спектральный пик в отражении, при этом пространственное положение максимума отражения зависит от длины волны падающего излучения. Это означает, что рассматриваемая структура может быть использована в качестве линейного переменного фильтра (LVF-фильтра). При этом спектральная полоса отражения фильтра и пространственная область, в которой фильтр отражает излучение заданной длины волны, зависят от скорости изменения периода α . Отметим, что в спектре отражения наблюдаются выраженные «вторичные» максимумы в диапазоне больших периодов и меньших длин волн относительно главного

максимума. Наиболее выраженными данные максимумы оказываются в случае структуры с более быстрым изменением периода.

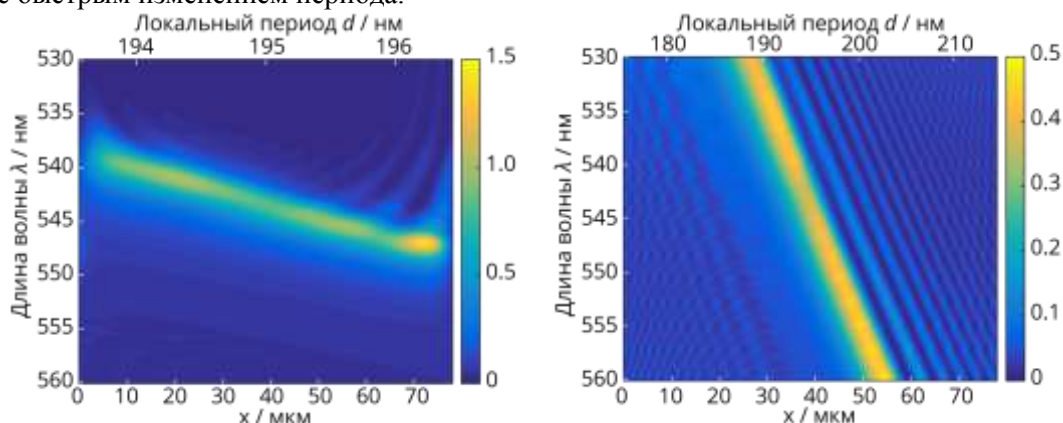


Рисунок 2. Распределение поля, отражённого структурой при различных длинах волн падающей плоской волны. Скорость изменения периода 0,05 нм/мкм (слева) и 0,5 нм/мкм (справа).

На основе вычисления полюсов матрицы рассеяния [18, 19] были рассчитаны собственные моды структуры. Расчёты показывают, что в структурах рассматриваемого вида существует конечное число мод с примерно одинаковыми добротностями. Действительные части комплексных частот оказываются равномерно расположены в спектральном диапазоне работы фильтра. Поле моды с частотой ω локализовано в той области структуры, в которой локально аппроксимирующая периодическая структура проявляет резонансные свойства на частоте ω . При этом распределение поля моды описывает профили резонанса на рисунке 2 (т. е. сечения рисунка 2). Отметим, что для аналитического описания оптических свойств дифракционных решёток с изменяющимися параметрами может быть применена теория связанных мод с переменными коэффициентами [20, 21].

3. Заключение

Показано, что волноводная резонансная дифракционная решётка с изменяющимся периодом может быть использована в качестве линейного переменного фильтра (LVF-фильтра). При этом как ширина полосы пропускания, так и форма отражённого сигнала существенно зависят от скорости изменения периода рассматриваемой структуры. Данные свойства рассматриваемой структуры могут быть описаны в терминах возбуждения собственных мод структуры, каждая из которых описывается комплексной частотой. Такие моды могут быть рассчитаны на основе вычисления полюсов матрицы рассеяния структуры. При этом для адекватного описания оптических свойств рассматриваемой структуры достаточно рассмотреть конечное число мод.

4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (20-57-53007, 18-37-20038).

5. Литература

- [1] Zhou, W. Progress in 2D photonic crystal Fano resonance photonics / W. Zhou, D. Zhao, Y.-C. Shuai, H. Yang, S. Chuwongin, A. Chadha, J.-H. Seo, K. X. Wang, V. Liu, Z. Ma, S. Fan // Prog. Quantum Electron. – 2014. – Vol. 38. – P. 1-74.
- [2] Lai, W.-C. Photonic crystal slot waveguide absorption spectrometer for on-chip near-infrared spectroscopy of xylene in water / W.-C. Lai, S. Chakravarty, X. Wang, C. Lin, R.-T. Chen // Appl. Phys. Lett. – 2011. – Vol. 98. – P. 023304.
- [3] Gordon, R. A new generation of sensors based on extraordinary optical transmission / R. Gordon, D. Sinton, K.L. Kavanagh, A.G. Brolo // Acc. Chem. Res. – 2008. – Vol. 41. – P. 1049.

- [4] Carlborg, C.F. A packaged optical slot-waveguide ring resonator sensor array for multiplex label-free assays in labs-on-chips / K.B. Gylfason, A. Kaźmierczak, F. Dortu, M.B. Polo, A.M. Catala, G.M. Kresbach, H. Sohlström, T. Moh, L. Vivien, J. Popplewell // *Lab Chip*. – 2010. – Vol. 10. – P. 281.
- [5] Adato, R. In-situ ultra-sensitive infrared absorption spectroscopy of biomolecule interactions in real time with plasmonic nanoantennas / R. Adato, H. Altug // *Nat. Commun.* – 2013. – Vol. 4. – P. 2154.
- [6] Hsu, H.-Y. A gradient grating period guided-mode resonance spectrometer / H.-Y. Hsu, Y.-H. Lan, C.-S. Huang // *IEEE Photonics J.* – 2018. – Vol. 10(1). – P. 4500109.
- [7] Fang, C. Tunable guided-mode resonance filter with a gradient grating period fabricated by casting a stretched PDMS grating wedge / C. Fang, B. Dai, Z. Li, A. Zahid, Q. Wang, B. Sheng, D. Zhang // *Opt. Lett.* – 2016. – Vol. 41(22). – P. 5302-5305.
- [8] Ganesh, N. Compact wavelength detection system incorporating a guided-mode resonance filter / N. Ganesh, A. Xiang, N.B. Beltran, D.W. Dobbs, B.T. Cunningham // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – Vol. 90. – P. 081103.
- [9] Liu, L. A strain-tunable nanoimprint lithography for linear variable photonic crystal filters / L. Liu, H.A. Khan, J. Li, A.C. Hillier, M. Lu // *Nanotechnol.* – 2016. – Vol. 27. – P. 29301.
- [10] Qian, L. Non-homogeneous composite GMR structure to realize increased filtering range / L. Qian, K. Wang, G. Wu // *Opt. Express*. – 2018. – Vol. 26(18). – P. 23602-23612.
- [11] Qian, L. Tunable filter with varied-line-spacing grating fabricated using holographic recording / L. Qian, K. Wang, C. Han // *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2017. – Vol. 29(11). – P. 925-928.
- [12] Emadi, A. Design and implementation of a sub-nm resolution microspectrometer based on a linear-variable optical filter / A. Emadi, H. Wu, G. de Graaf, R. Wolffenbuttel // *Opt. Express*. – 2012. – Vol. 20. – P. 489-507.
- [13] Ayerden, N.P. Compact gas cell integrated with a linear variable optical filter / N.P. Ayerden, G. de Graaf, R.F. Wolffenbuttel // *Opt. Express*. – 2016. – Vol. 24. – P. 2981-3002.
- [14] 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, T.K. Gaylord // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 1995. – Vol. 12. – P. 1068-1076.
- [15] Li, L. Formulation and comparison of two recursive matrix algorithms for modeling layered diffraction gratings // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 1996. – Vol. 13. – P. 1024-1035.
- [16] Pisarenco, M. Aperiodic Fourier modal method in contrast-field formulation for simulation of scattering from finite structures / M. Pisarenco, J. Maubach, I. Setija, R. Mattheij // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2010. – Vol. 27. – P. 2423-2431.
- [17] Pisarenco, M. Modified S-matrix algorithm for the aperiodic Fourier modal method in contrast-field formulation / M. Pisarenco, J. Maubach, I. Setija, R. Mattheij // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2011. – Vol. 28. – P. 1364-1371.
- [18] Bykov, D.A. Numerical methods for calculating poles of the scattering matrix with applications in grating theory / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich // *J. Lightwave Technol.* – 2013. – Vol. 31. – P. 793-801.
- [19] Bykov, D.A. Use of aperiodic Fourier modal method for calculating complex-frequency eigenmodes of long-period photonic crystal slabs / D.A. Bykov, E.A. Bezus, L.L. Doskolovich // *Opt. Express*. – 2017. – Vol. 25. – P. 27298-27309.
- [20] Johnson, S.G. Adiabatic theorem and continuous coupled-mode theory for efficient taper transitions in photonic crystals / S.G. Johnson, P. Bienstman, M.A. Skorobogatiy, M. Ibanescu, E. Lidorikis, J.D. Joannopoulos // *Phys. Rev. E*. – 2002. – Vol. 66. – P. 066608.
- [21] Chen, Y.-S. On the general solutions of coupled-mode equations with varying parameters / Y.-S. Chen, A. Ishimaru // *Washington univ. Seattle dept. of electrical engineering*, 1966. – 31 p.

Optical properties of resonant gratings with slowly varying period

D.A. Bykov^{1,2}, E.A. Bezus^{1,2}, L. Qian³, 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

³Jiangsu Normal University, Xuzhou, China, 221116

Abstract. We consider a guided-mode resonant grating, the period of which slowly changes in the direction of periodicity. The optical properties of this structure are investigated using Fourier modal method and its aperiodic version. In particular, the diffraction of a plane wave by the considered structure is simulated. We demonstrate that the considered structure can be used as a linear variable filter (LVF-filter). On the basis of the spatiotemporal coupled-mode theory, we propose a model, which describes the optical properties of the investigated structure. This structure can find applications in spectrometers and hyperspectral optical systems.