

Резонансные эффекты в субволновых дифракционных решётках с изменяющимся периодом

Д.А. Быков
ИСОИ РАН — филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника» РАН
Самара, Россия
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
bykovd@gmail.com

Е.А. Безус
ИСОИ РАН — филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника» РАН
Самара, Россия
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
evgeni.bezус@gmail.com

Л.Л. Досколович
ИСОИ РАН — филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника» РАН
Самара, Россия
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
leonid@ipsiras.ru

Аннотация — Исследованы оптические свойства резонансной дифракционной решётки с периодом, изменяющимся в направлении периодичности. Показано, что оптические свойства такой структуры существенным образом зависят от скорости изменения периода. Разработана теория связанных мод с изменяющимися параметрами, описывающая резонансные эффекты в рассматриваемых структурах. На основе сравнения с результатами строгого численного моделирования в рамках метода Фурье-мод показана высокая точность предложенной теоретической модели.

Ключевые слова — дифракционная решётка, резонанс, линейно перестраиваемые фильтры

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается большой интерес к изучению резонансных свойств, проявляемых субволновыми дифракционными решётками [1]. Одно из своих важнейших применений резонансные дифракционные решётки находят в задаче спектральной фильтрации света [1]. Оптические свойства таких структур, а именно узкие пики и провалы в спектрах отражения и пропускания, имеют резонансную природу и связаны с возбуждением квазиволноводных мод в решетке или в волноводном слое.

При создании спектрометрических систем возникает задача разделения падающего излучения на большое количество спектральных каналов. Эффективным подходом к созданию спектральных фильтров для таких систем является использование резонансных дифракционных структур, в которых один или несколько параметров изменяются в плоскости структуры. Это позволяет фильтровать разные длины волн в разных областях фильтра. Обычно резонансная длина волны изменяется линейно в определенном пространственном измерении фильтра; такие структуры называются линейно перестраиваемыми фильтрами. Наиболее известный тип таких фильтров основан на многослойных брэгговских решетках с клиновидным центральным слоем [2].

Резонансные дифракционные решетки с одним или несколькими параметрами, изменяющимися в направлении периодичности или в перпендикулярном направлении, представляют собой еще один перспективный тип линейно перестраиваемых фильтров [3–7]. Главным преимуществом таких решеток является относительная простота изготовления, так как для их создания можно использовать простые и дешевые

методы интерференционной литографии [3, 4] и ионно-лучевого травления с маской [3]. В дополнение к спектрометрическим приложениям решетки с пространственно изменяющимися параметрами также перспективны для использования в качестве датчиков показателя преломления [5], биосенсоров [6] и датчиков крутящего момента [7].

Следует отметить, что большинство известных работ являются исключительно экспериментальными. В теоретических работах оптические свойства дифракционных решёток с изменяющимися параметрами описываются в рамках локально периодической аппроксимации, предполагающей, что локальный коэффициент пропускания (отражения) в некоторой точке равен коэффициенту пропускания (отражения) дифракционной решётки с постоянными параметрами, равными параметрам исследуемой структуры в рассматриваемой точке. В настоящей работе показано, что это предположение зачастую не выполняется и для описания оптических свойств следует использовать более точное теоретическое описание.

2. РЕЗОНАНСНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЁТКИ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ПЕРИОДОМ

Рассмотрим дифракционную решётку, представленную на врезке к рис. 1 и имеющую следующие параметры: период решётки $d_0 = 350$ нм, коэффициент заполнения (отношение ширины ступеньки к периоду решётки) $f = 0,5$, высота решётки $h_{gr} = 100$ нм, толщина волноводного слоя $h_{wg} = 200$ нм, показатель преломления решётки и подложки $n_{gr} = n_{sub} = 1,45$, показатель преломления волноводного слоя $n_{wg} = 2,1$, показатель преломления области над структурой $n_{sup} = 1$. Локальный период изменяется по закону $d^{-1}(x) = d_0^{-1} - \alpha x / d_0^2$, где безразмерная величина $\alpha = 10^{-3}$ задаёт скорость изменения периода.

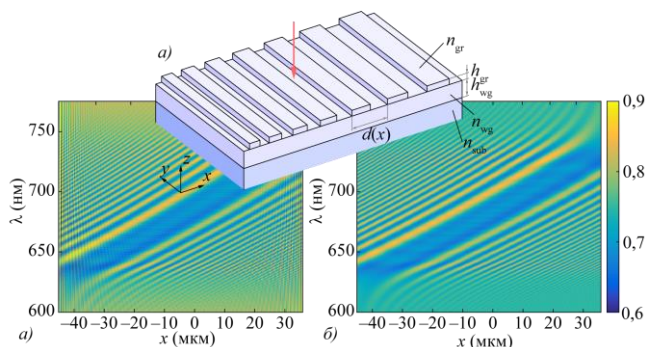


Рис. 1. Распределение прошедшего поля при различных длинах волн падающей ТМ-поляризованной плоской волны: строгое моделирование (а) и предсказание теории связанных мод (б). На врезке показана геометрия структуры

Для численного моделирования дифракции света на рассматриваемой структуре использовался так называемый метод суперпериода, в рамках которого рассматривается некоторое большое число периодов исходной структуры, а затем данная конечная структура периодизуется в направлении оси x , при этом соседние суперпериоды отделяются идеально согласованными поглощающими слоями. Дифракция света на полуженной структуре может быть промоделирована с использованием метода фурье-мод [8].

На рис. 1(а) представлены результаты расчёта распределения прошедшего поля по методу фурье-мод [8]. Важно отметить, что даже при такой относительно малой скорости изменения периода распределения поля на рис. 1(а) существенно отличаются от результатов, предсказываемых в рамках локально периодической аппроксимации. Действительно, в строго периодических структурах резонансы имеют выраженный Лоренцев вид или же вид, описываемый профилем Фано [1]. На рис. 1(а) видно несколько близко расположенных резонансных максимумов, которые обусловлены ненулевой скоростью изменения периода α .

Для описания полученных результатов моделирования была разработана теория связанных мод для дифракционных решёток с изменяющимся периодом. В результате была получена система дифференциальных уравнений, позволяющая вычислить распределения прошедшего поля $\tilde{f}_T(x, \omega)$:

$$\begin{cases} v_g \frac{d\tilde{u}}{dx} = \left[i(\omega - \omega_0) - \gamma + i\alpha \frac{2\pi v_g}{d_0^2} x \right] \tilde{u} + \kappa \tilde{v} + q; \\ -v_g \frac{d\tilde{v}}{dx} = \left[i(\omega - \omega_0) - \gamma + i\alpha \frac{2\pi v_g}{d_0^2} x \right] \tilde{v} + \kappa \tilde{u} + q; \\ \tilde{f}_T(x, \omega) = t_0 + q(\tilde{u} + \tilde{v}). \end{cases}$$

где $\omega_0, \gamma, \kappa, v_g, q, t_0$ — параметры модели, которые могут быть рассчитаны на основе анализа оптических свойств строго периодической дифракционной решётки [9].

На рис. 1(б) представлены результаты расчёта распределения прошедшего поля на основе разработанной теории связанных мод. Из рисунков видно, что предсказания, полученные на основе

указанной теории, хорошо согласуются с результатами моделирования на основе метода фурье-мод. В частности, для длины волны 675 нм нормированное среднее квадратическое отклонение не превышает 5%. При этом, незначительные отличия, проявляющиеся в виде высокочастотных осцилляций на границах вычислительной области на рис. 1(а), отсутствуют на рис. 1(б), обусловлены конечным числом фурье-гармоник, использованных при моделировании в рамках метода фурье-мод. Отметим, что предложенный подход позволяет существенно сократить время расчёта с нескольких часов (для рис. 1(а)) до нескольких секунд (для рис. 1(б)).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследованы оптические свойства резонансных дифракционных решёток с изменяющимся периодом с помощью строгого численного моделирования, основанного на методе фурье-мод. Показано, что оптические свойства структуры существенно зависят от скорости изменения периода. Данная зависимость описана в рамках теории связанных мод, предсказания которой находятся в согласии с результатами моделирования. Представленные результаты важны для расчёта и создания компактных линейно перестраиваемых фильтров на основе резонансных дифракционных решёток.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящая работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-00120).

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(1). — P. 1-74.
- [2] 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.
- [3] Qian, L. Tunable guided-mode resonant filter with wedged waveguide layer / L. Qian, D. Zhang, C. Tao, et al // Opt. Lett. — 2016. — Vol. 41. — P. 982-985.
- [4] 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. — P. 925-928.
- [5] Hsiung, C.-T. Refractive index sensor based on a gradient grating period guided-mode resonance / C.-T. Hsiung, C.-S. Huang // IEEE Photon. Technol. Lett. — 2019. — Vol. 31. — P. 253-256.
- [6] Triggs, G. J. Chirped guided-mode resonance biosensor / G. J. Triggs, Y. Wang, C.P. Reardon, et al. // Optica. — 2017. — Vol. 4. — P. 229-234.
- [7] Wang, Y.-C. Lightweight torque sensor based on a gradient grating period guidedmode resonance filter / Y.-C. Wang, W.-Y. Jang, and C.-S. Huang // IEEE Sensors J. — 2019. — Vol. 19. — P. 6610-6617.
- [8] 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, and T. K. Gaylord // J. Opt. Soc. Am. A. — 1995. — Vol. 12. — P. 1068-1076.
- [9] Bykov, D. A. Spatiotemporal coupled-mode theory of guided-mode resonant gratings / D. A. Bykov, L. L. Doskolovich // Opt. Express. — 2015. — Vol. 23. — P. 19234-19241.