

一种亚波长高折射率差光栅滤波器的设计与分析

胡劲华^{1,2} 刘秀红³ 赵继军^{1,2} 任丹萍^{1,2} 黄永清⁴ 任晓敏⁴

¹河北工程大学信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038

²光纤通信与宽带接入技术邯郸市重点实验室, 河北 邯郸 056038

³河北工程大学理学院, 河北 邯郸 056038

⁴北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 为了便于理解亚波长高折射率差光栅的谐振滤波机制,将光栅看作一个光学谐振器,用时域耦合模理论分析光栅滤波器的透射光谱,同时也验证了分析结果与严格耦合波算法仿真结果的一致性。在此基础上,分别分析入射角、光栅宽度以及温度对光栅滤波器的透射特性的影响及机理。研究表明通过改变入射角可以调控光栅滤波器透射光谱的线宽,而在小范围内改变光栅宽度和工作温度对透射光谱线宽没有影响。

关键词 光栅;亚波长光栅;光滤波器;谐振器;时域耦合模理论

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.050502

Design and Analysis of Optical Filter Based on Subwavelength High-Contrast Grating

Hu Jinhua^{1,2} Liu Xiuhong³ Zhao Jijun^{1,2} Ren Danping^{1,2} Huang Yongqing⁴
Ren Xiaomin⁴

¹ School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China

² Handan Key Laboratory of Optical Fiber Communication & Broadband Access Technologies,
Handan, Hebei 056038, China

³ School of Science, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China

⁴ State Key Lab of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and
Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract Subwavelength high contrast grating (SHCG) is considered as an optical resonator for understanding its resonant filtering mechanism clearly. The transmission spectrum of SHCG is investigated by employing temporal coupled mode theory. The calculated result is in good agreement with the simulation obtained by using the rigorous coupled-wave analysis method. In addition, the influence and mechanism of the filter's transmittance on incident angle, grating width and temperature are also investigated, respectively. The simulated results show that the spectrum linewidth of SHCG filter is mainly controlled by the incident angle. However, the spectrum linewidth is insensitive to the minor change of the grating width and the operating temperature.

Key words gratings; subwavelength grating; optical filter; resonator; temporal coupled mode theory

OCIS codes 050.1950; 050.6624; 230.7408; 230.5750

收稿日期: 2015-10-16; 收到修改稿日期: 2015-12-22; 网络出版日期: 2016-05-05

基金项目: 河北省自然科学基金(A2015402035)、河北省高等学校科学技术研究青年基金(QN2014134, QN2016090)、河北工程大学学术骨干基金

作者简介: 胡劲华(1984—),男,博士,讲师,主要从事光通信和信息感知技术方面的研究。E-mail: hujh84@163.com

* 通信联系人。E-mail: liuxiuhong@hebeu.edu.cn

1 引言

近年来,亚波长光栅凭借着独特的光学特性引起国内外学者的广泛关注,已经成为集成光学中一个重要的功能单元,被广泛用作宽带反射镜^[1]、光学传感器^[2]和光滤波器^[3]等器件。2004年,加州大学伯克利分校的 Chang-Hasnain C J 研究组提出一种亚波长高折射率差的光栅(SHCG)^[4]。其结构特点是:光栅由高折射率介质(比如 Si 或者 InP)组成,其周围覆盖着低折射率的介质(比如空气)。SHCG 会表现出两种光学特性。一方面,在宽光谱范围内具有高反射特性^[5-6];另一方面,具有光学谐振滤波特性^[7-8]。然而,传统的分析谐振光栅滤波器的方法主要是利用严格的电磁场分析方法,比如严格耦合波算法(RCWA)^[9-10]和时域有限差分算法(FDTD)^[11]。这些方法在分析光栅滤波器时难以从物理本质上阐明其光学谐振的机制。为了深入研究 SHCG 的谐振滤波机理,便于理解光栅滤波器的物理图像,本文利用 RCWA 和时域耦合模理论(TCMT)^[12-13]相结合的方法分析光栅滤波器的物理机制。验证了时域耦合模理论与严格耦合波算法两者计算结果的一致性。通过进一步仿真证明了光栅滤波器的透射光谱的线宽对入射角的变化较为敏感,然而其光谱线宽对光栅的宽度或者温度的小范围变化不敏感。

2 器件结构与理论分析

2.1 光栅滤波器结构

亚波长高折射率差光栅滤波器的结构如图 1 所示,TE 偏振光斜入射到光栅表面,其入射角为 θ 。光栅滤波器的周期小于入射光波的波长,相关结构参数如下:光栅的周期为 Λ ,光栅宽度为 W ,光栅厚度为 t_g 。光栅的周围为空气(折射率 $n_L = 1$),光栅层选择硅材料,其折射率 n_H 可以表示为^[14]:

$$\begin{cases} n_H(\lambda) = A_0 + A_1 L + A_2 L^2 + A_3 \lambda^2 + A_4 \lambda^4 + (T - T_0) \frac{dn}{dT} \\ L = \frac{1}{\lambda^2 - 0.028} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $A_0 = 3.41696$, $A_1 = 0.138497$, $A_2 = 0.013924$, $A_3 = 22.09 \times 10^{-5}$, $A_4 = 1.48 \times 10^{-7}$, T 为环境温度, T_0 表示室温为 300 K。

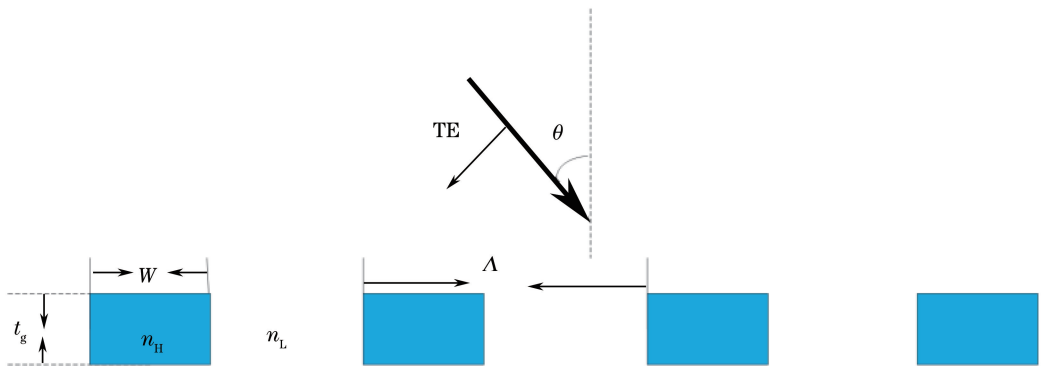


图 1 SHCG 滤波器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SHCG filter

图 2 给出了利用 RCWA 计算出的该器件透射光谱的等高线图,其中, $\theta = 2^\circ$ 和光栅宽度 $W = 323$ nm。从图中可以发现在 $0.15 \leq t_g/\Lambda \leq 0.25$ 内有带通区域,如果选取光栅的工作波长 $\lambda = 1550$ nm,那么当光栅厚度 $t_g'' = 220$ nm,周期 $\Lambda = 1017$ nm 时,会出现完全透射的效果。此时 SHCG 表现出谐振滤波的作用。根据光栅的漏模共振原理可知:入射光照射到 SHCG 后,光栅的导模被激发,当入射光的波长和谐振器的谐振波长接近时,入射光与 SHCG 的导模会发生耦合,使得该光波从 SHCG 中完全泄漏出来,出现谐振滤波的效果。在模式耦合过程中光栅的导模没有形成真正的导波模式,而是成为泄漏模,所以称导模或者漏模共振^[15]。

2.2 理论分析

为了便于分析 SHCG 的谐振滤波物理机理,从物理本质上理解光栅滤波器的光谱响应特性,将该

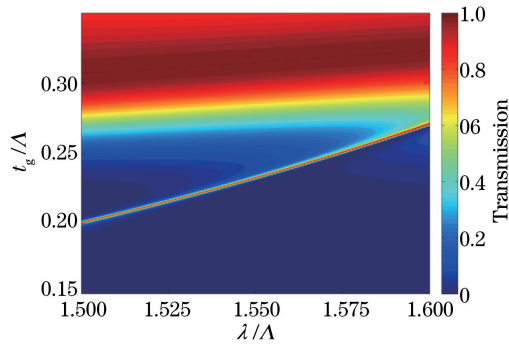


图2 SHCG的透射率的等高线图

Fig. 2 Contour map of SHCG transmittance

SHCG 结构简化成一个二端口的光学谐振器,并建立时域耦合模方程如下^[12-13]:

$$\frac{d\psi}{dt} = (j\omega_0 - 2\gamma)\psi + \sqrt{2\gamma}W_{1+}, \quad (2)$$

$$W_{1-} = \sqrt{2\gamma}\psi - W_{in}, \quad (3)$$

$$W_{2-} = \sqrt{2\gamma}\psi, \quad (4)$$

式中, ω_0 和 ψ 分别为谐振器的谐振频率和谐振振幅, W_{1+} 和 W_{1-} 为光信号从一端口的输入和输出光波振幅, W_{2-} 为从另一个端口输出的光波振幅, γ 为谐振器的外漏因子。可以推导出光栅滤波器的透射率为:

$$T = |W_{2-}/W_{1+}|^2 = \frac{4\gamma^2}{(\omega - \omega_0)^2 + 4\gamma^2}, \quad (5)$$

从(5)式可以看出, ω_0 和 γ 是决定光栅滤波器线型的主要参量,可以通过分析 ω_0 和 γ 的变化来理解光栅的内在滤波特性。根据 $\omega = 2\pi c/\lambda$ 关系可以将谐振频率 ω_0 转换成谐振波长 λ_0 ,其中 $\gamma = \omega_0/4Q$, Q 为谐振器的品质因子。

为了验证时域耦合模理论分析的准确性,先利用 RCWA 计算出光谱曲线,提取谐振波长和线宽的信息,代入到(5)式中,进而得出 TCMT 计算的结果。如图3所示,将 TCMT 和 RCWA 计算出的光谱相比较,发现两种透射光谱的线型吻合较好。因此,可以将 SHCG 滤波器看作一个光学谐振器,根据(5)式合理设计光栅滤波器的谐振波长和光谱线宽,然后再利用 RCWA 寻找出光栅结构参数和谐振波长、光谱线宽之间的关系,进而确定光栅的结构参数。相比文献[8],TCMT 与 RCWA 算法相结合对 SHCG 滤波器的物理分析将更加简洁。

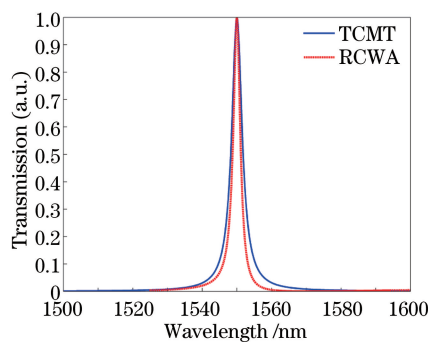


图3 RCWA算法和TCMT理论计算SHCG透射光谱曲线

Fig. 3 Calculated SHCG transmission spectrum from RCWA and TCMT methods

3 仿真结果与讨论

为了进一步说明入射角对光栅滤波效果的影响,利用 RCWA 算法计算出在 1500~1600 nm 波长范围内的 TE 偏振光在不同入射角照射 SHCG 时的透射光谱,如图4所示。从图中可以发现,当入射角 θ 分别为

2° 、 4° 、 6° 时,对应谐振峰的波长分别为 1550、1552、1556 nm。随着入射角度的增加,SHCG 滤波器的谐振峰位置红移,其光谱的线宽也在增加。可以用时域耦合模理论解释:随着入射角度的增加,光栅的外漏因子 γ 也逐渐增加,光栅作为光学谐振器而言,其品质因子 Q 就会逐渐减小,透射光谱的带宽就会增加。实现了利用入射角度调控 SHCG 滤波器工作带宽的功能。相比利用光栅的结构参数来调控光栅滤波器的带宽,改变入射角度的方法较为简单。

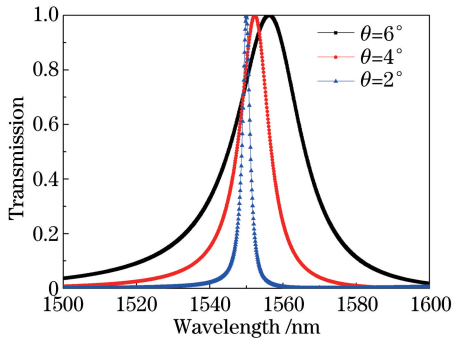


图 4 不同角度入射角时 SHCG 滤波器的透射光谱
Fig. 4 Transmission spectrum of SHCG filter with different incident angles

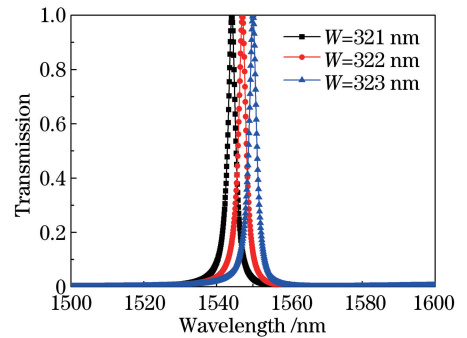


图 5 不同光栅宽度的 SHCG 滤波器的透射光谱
Fig. 5 Transmission spectrum of SHCG filter with different grating widths

为了研究光栅结构参数变化对透射光谱的影响,分析光栅滤波器保持周期 $\Lambda = 1017$ nm、入射角 $\theta = 2^\circ$ 不变时,光栅宽度 W 分别为 321、322、323 nm 三种结构的光谱响应曲线,如图 5 所示。可以发现随着光栅宽度的增加,透射光谱红移,但是光谱的线宽基本不变,这样进一步说明了光栅谐振器的泄漏因子对光栅宽度的小范围变化不敏感,谐振波长的变化对光栅宽度的小范围变化较敏感。

在以上研究的基础上,通过进一步优化结构参数和入射角度,在周期 $\Lambda = 1017$ nm 不变时,通过合理选择不同入射角度和宽度,得到如图 6 所示的透射光谱响应。可以发现三个透射光谱的谐振峰波长基本在 1550 nm 处,随着入射角度的增加,其透射光谱的带宽逐渐增加。其仿真的结果也进一步说明选择不同的光栅宽度和不同的入射角度可以保证在同一谐振波长处调控光栅滤波器的工作带宽。

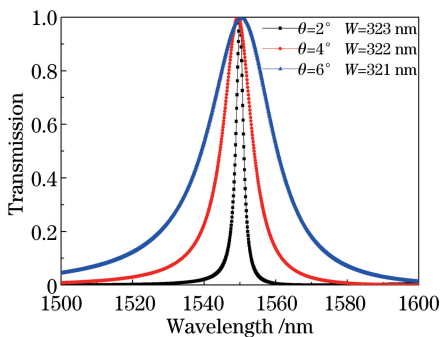


图 6 不同入射角和光栅宽度的 SHCG 滤波器的透射光谱
Fig. 6 Transmission spectrum of SHCG filter with different incident angles and grating widths

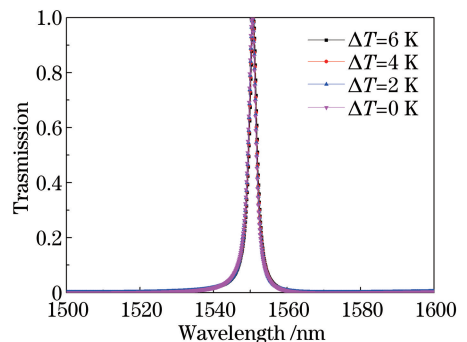


图 7 不同温度下的 SHCG 滤波器的透射光谱
Fig. 7 Transmission spectrum of SHCG filter with different temperatures

根据 Si 材料的折射率模型,分析小范围变化的温度对光栅滤波器滤波性能的影响,给定 TE 偏振光以 $\theta = 2^\circ$ 角度入射光栅,同时保证光栅的周期 $\Lambda = 1017$ nm 和光栅宽度 $W = 323$ nm 不变,用 RCWA 算法计算不同温度时的透射光谱,如图 7 所示。其中 ΔT 表示温度增加量, $\Delta T = 0$ K 时,起始温度 $T_0 = 300$ K。可以发现温度增加 6 K 范围内时,透射光谱的线型基本不变。温度的小范围变化会引起硅材料折射率的较小变化,其物理的实质是当光栅的材料折射率在小范围变化时,光栅滤波器的透射光谱的谐振波长和线宽基本保持不变,因此保持光谱线型的变化不敏感。

4 结 论

利用 TCMT 和 RCWA 相结合分析亚波长高折射率差光栅的谐振滤波特性。利用 RCWA 验证 TCMT 方法的一致性。在此研究基础上,进一步分析在 1500~1600 nm 波长范围内 TE 偏振光以不同角度斜入射亚波长高折射率光栅时的光谱响应变化,仿真结果表明随着入射角度的增加光栅滤波器的谐振波长红移,光谱的线宽明显增加。此外,还发现光栅滤波器透射光谱的线宽对光栅宽度和工作温度的小范围变化不敏感。这些研究结果将为亚波长高折射率光栅滤波器的研究提供基础,也为进一步研究基于亚波长光栅结构的新型光电子器件提供指导^[16-17]。

参 考 文 献

- Mateus C F R, Huang M C Y, Chen L, *et al.*. Broad-band mirror (1.12-1.62 μm) using a subwavelength grating[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(7): 1676-1678.
- Liu Anjin, Werner H E Hofmann, Dieter H Bimberg. Integrated high-contrast-grating optical sensor using guided mode [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2015, 51(1): 1-8.
- Foley Justin M, Jamie D Phillips. Normal incidence narrowband transmission filtering capabilities using symmetry-protected modes of a subwavelength, dielectric grating[J]. Opt Lett, 2015, 40(11):2637-2640.
- Mateus C F R, Huang M C Y, Deng Y F, *et al.*. Ultrabroadband mirror using low-index cladded subwavelength grating [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(2): 518-520.
- Huang Michael C Y, Y Zhou, Connie J Chang-Hasnain. A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwavelength grating[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2):119-122.
- Yang Yisu, Huang Yongqing, Huang Hui, *et al.*. Design of photodetector with subwavelength grating structure[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2352-2357.
杨一粟, 黄永清, 黄 辉, 等. 一种具有亚波长光栅结构的光探测器的设计[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2352-2357.
- Zhou Y, Moewe M, Kern J, *et al.*. Surface-normal emission of a high-Q resonator using a subwavelength high-contrast grating[J]. Opt Express, 2008, 16(22): 17282-17287.
- Karagodsky V, Chase C, Chang-Hasnain C J. Matrix Fabry-Perot resonance mechanism in high-contrast gratings[J]. Opt Lett, 2011, 36(9): 1704-1706.
- Moharam M G, Pommet D A, Grann E B, *et al.*. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: Enhanced transmittance matrix approach[J]. J Opt Soc Am A, 1995, 12(5):1077-1086.
- Moharam M G, Grann E B, Pommet D A, *et al.*. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. J Opt Soc Am A, 1995, 12(5):1068-1076.
- Taflove A, Hagness S C. Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method [M]. Norwood: Artech House Publishers, 2005.
- Haus H A. Wave and fields in optoelectronics (Prentice-Hall series in solid state physical electronics)[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1983.
- Fan S, Suh W, Joannopoulos J D. Temporal coupled-mode theory for the Fano resonance in optical resonators[J]. J Opt Soc Am A, 2003, 20(3):569-572.
- Wei H, Zhong J, Liu L, *et al.*. Signal bandwidth of general $N \times N$ multimode interference couplers[J]. J Lightwave Technol, 2001, 19(5): 739-745.
- Fu X Y, Yi K, *et al.*. Design of single-material guided-mode resonance filter[J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(1): 9-11.
- Hu Jinhua, Huang Yongqing, Duan Xiaofeng, *et al.*. Polarization-selective and wide-angle photodetector based on resonant waveguide grating[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0405005.
胡劲华, 黄永清, 段晓峰, 等. 基于谐振波导光栅的偏振选择广角光探测器[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0405005.
- Hu J H, Huang Y Q, Ren X M, *et al.*. Realization of quantum efficiency enhanced PIN photodetector by assembling resonant waveguide grating[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(7): 072301.