

基于级联复合光栅的窄带平顶型滤波器设计

余九州¹, 刘秀红², 包益宁², 任丹萍¹, 胡劲华^{1*}, 赵继军¹¹河北工程大学信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038;²河北工程大学数理科学与工程学院, 河北 邯郸 056038

摘要 导模共振光栅作为一种重要的滤波单元,在光通信中有着广泛的应用。然而,普通的导模共振光栅的传输光谱为洛伦兹型,该类结构在高性能光纤通信系统中的应用受到限制。采用级联导模共振光栅可以实现平顶滤波响应,但是整个器件的体积较大,制作工艺复杂。此外,单一复合光栅结构难以直接实现窄带平顶滤波响应。提出了一种级联双层复合光栅结构以解决这一问题,利用严格耦合波算法和本征模式分析法分析了其输出光谱。仿真结果表明该滤波器的中心波长为 1549.9 nm,其平顶光谱的线宽为 0.5 nm。

关键词 衍射; 波长滤波器; 导模共振; 严格耦合波分析; 平顶光谱; 复合光栅

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2005001

Design of Narrow-Band Flat-Top Filter Based on Cascaded Compound Gratings

Yu Jiuzhou¹, Liu Xiuhong², Bao Yining², Ren Danping¹, Hu Jinhua^{1*}, Zhao Jijun¹¹School of Information & Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;²School of Mathematics & Physics, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China

Abstract As key filtering elements, guided-mode resonance (GMR) gratings have wide applications in optical communication. However, the transmission spectrum of a conventional GMR grating shows Lorentzian-type response, which limits the further application of GMR gratings in high-performance optical communication systems. Cascaded GMR gratings have been presented to realize flat-top filtering response, but the entire device has a large size and the fabrication process is complicated. In addition, it is difficult to achieve narrow-band flat-top filtering response with only a single-layer compound GMR grating. Hence, a cascaded double-layer compound grating is proposed to solve the problem in this work. The output spectra are analyzed by a combination of rigorous coupled wave analysis and eigenmode analysis, and the results show that the central wavelength of the filter is 1549.9 nm, and the line width of the flat-top spectrum is 0.5 nm.

Key words diffraction; wavelength filter; guided-mode resonance; rigorous coupled wave analysis; flat-top spectrum; compound grating

OCIS codes 050.6624; 050.2770; 130.7408

1 引言

光纤通信技术的迅速发展,使得实际应用对器件性能和集成化的要求日益提高。传统的分立光器

件存在尺寸大、成本高、损耗大等缺点,难以满足现代光通信技术的需求;微纳光子集成器件凭借着易于封装、低损耗、高可靠性等优点而备受人们青睐^[1]。光子集成滤波器作为光通信技术中一个重要

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-04-14; 录用日期: 2021-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(61905060)、河北省自然科学基金(F2019402063, F2019402240, F2018402198, A2020402013)、河北省高等学校科学技术研究项目重点项目(ZD2021019)

通信作者: *hujh84@hebeu.edu.cn

的功能单元受到国内外学者的广泛关注。普通的光子集成滤波器呈现洛伦兹型光谱响应。该类器件应用在光通信接收机系统中时,对发射机和信道传输质量的要求都较高。具有平顶陡边滤波响应的光子集成滤波器是一种较好的解决方案,在接收机中使用该类滤波器时,可以有效降低发射机的波长要求。

实现平顶陡边滤波响应的基本功能器件有法布里-珀罗(F-P)腔结构^[2]、微环谐振器结构^[3-4]、导模共振(GMR)光栅^[5]等。然而,基于 F-P 薄膜滤波器实现平顶滤波一般采用多腔结构,其器件的体积较大,不易于大规模集成;微环结构在实现平顶滤波时需要严格控制微环与微环、微环与直波导之间的耦合间距且入射光源难以直接耦合微环波导。相比于以上两类器件,导模共振光栅^[6]一般具有相对简单的结构、高滤波效率^[7],且易于与入射光源直接耦合。通过改变光栅的结构参数^[8-9]或入射条件^[10-11]可调控输出光谱的带宽和谐振波长。然而,普通的导模共振光栅的输出光谱为洛伦兹型,难以直接实现平顶陡边的窄带滤波。因此,一般采用级联导模共振光栅实现平顶陡边滤波。Thurman 等^[12]级联了多个导模共振光栅,设计了具有平顶光谱响应的窄带滤波器,然而器件的体积较大,制作工艺较为复杂。Kawanishi 等^[13]提出了与偏振无关的平顶陡边滤波器,其输出光谱的半峰全宽(FWHM)较大,为 7 nm。Hsu 等^[14]使用复合波导光栅结构得到了平顶光谱,但光谱的边带抑制效果较差。另外,复合波

导光栅结构还可以对光谱的线宽进行控制,Liu 等^[15]通过调整复合光栅同一周期内光栅条之间的间距,使光谱线宽显著减小,形成窄带滤波,并且光谱线型和共振波长均未改变,但该结构无法形成平顶陡边型光谱响应。

本文提出一种基于复合光栅级联的窄带光学滤波器结构,采用严格耦合波分析(RCWA)算法^[16]仿真光栅结构的光谱响应。仿真结果表明,该结构在 TE 偏振光垂直入射时呈现良好的平顶陡边滤波响应。此外,本文也讨论了光栅结构参数变化对滤波性能的影响,为设计具有平顶光谱响应的窄带滤波器提供了新的思路和方法。

2 结构与 设计

本文提出的一种窄带平顶陡边滤波器的结构示意图如图 1(a)所示。该器件由两个相同的复合导模共振光栅级联而成,其中单层复合导模共振光栅结构如图 1(b)所示。光栅的波导层和光栅层材料为硅,其折射率 $n_h = 3.47$;覆盖层为空气,其折射率 $n_c = 1$;基底材料为二氧化硅,其折射率 $n_s = 1.45$ 。器件结构参数为:光栅层厚度为 T ,波导层厚度为 T_1 ,光栅周期为 Λ ,光栅宽度为 W ,两光栅条间距为 d ,级联光栅的夹层厚度为 L 。器件的工作原理如下:光波斜入射至顶层和底层两个导模共振光栅结构,由于顶层与底层两次反射光波的相位不同,最后两反射波在顶部光栅叠加形成具有平顶陡边响应的光谱^[17]。

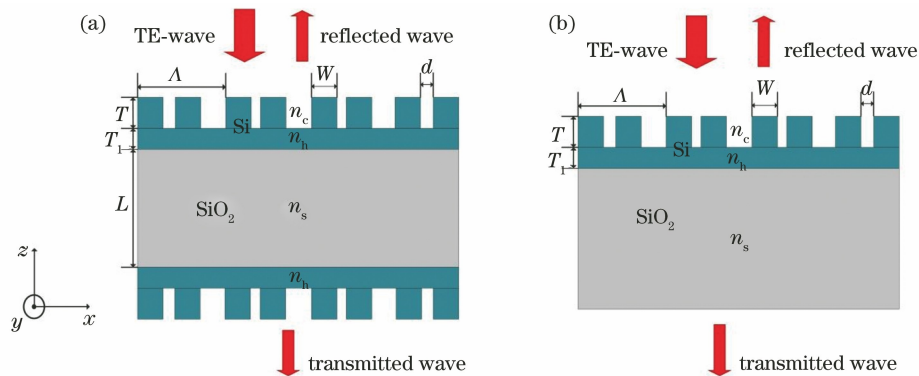


图 1 结构示意图。(a)双层复合导模共振光栅滤波器;(b)单层复合导模共振光栅滤波器

Fig. 1 Structural diagrams. (a) Double-layer compound GMR grating filter; (b) single-layer compound GMR grating filter

为了比较图 1 中两种结构的反射光谱特性,假定单层光栅的结构参数如下:光栅层厚度 $T = 177$ nm,波导层厚度 $T_1 = 86$ nm,光栅周期 $\Lambda = 750$ nm,两光栅条宽度 $W = 150$ nm,两光栅条之间的距离 $d = 367$ nm。而双层导模共振光栅结构参数与单层光栅一致,其中夹层厚度 $L = 2100$ nm。

利用 RCWA 算法模拟了 TE 偏振波分别垂直入射到单层复合导模共振光栅和级联双层复合导模共振光栅的反射光谱,如图 2 所示。从图 2 中可以看出双层导模共振光栅比单层导模共振光栅的输出光谱具有更好的边带抑制效果,并且其反射光谱呈现平顶滤波响应,其光谱的谐振波长为 1549.9 nm,光谱

的 FWHM 为 0.5 nm。

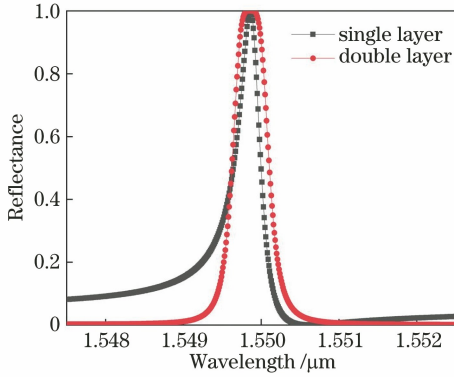


图 2 单层和双层导模共振光栅的反射光谱

Fig. 2 Reflection spectra of double-layer and single-layer GMR gratings

3 结果与讨论

首先,分析夹层间距离 L 的变化对输出光谱线

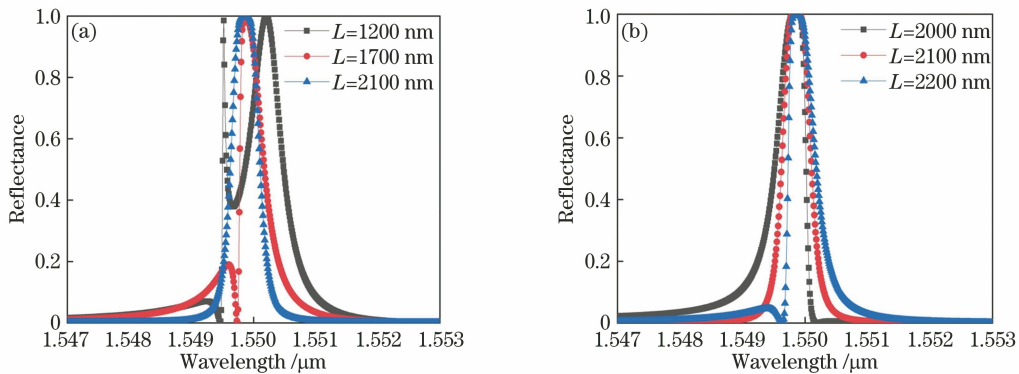


图 3 不同 L 的双层导模共振光栅的反射光谱

Fig. 3 Reflection spectra of double-layer GMR gratings with different L

进一步分析了该双层复合导模共振光栅滤波器在同一周期内两光栅条之间的距离 d 的变化对输出光谱的影响(图 4)。保持结构参数和入射条件不变,利用 RCWA 算法分别计算了 d 为 337, 347, 357, 367 nm 对应的反射光谱,其结果如图 4 所示。从图中可以看出光谱的线宽随着 d 的增加而减小,当 $d=337$ nm 时光谱的 FWHM 为 10.3 nm,而当 $d=367$ nm 时光谱的 FWHM 为 0.5 nm。随着 d 的增加光谱的 FWHM 减小为原来的 1/20 左右,而光谱的谐振波峰几乎没有变化。

为了阐明光栅条间距变化对级联复合导模共振光栅的调控机理,本文将双层复合光栅结构视为一个单模无损耗的谐振器,选择一个周期单元为研究对象,左右边界采用 Floquet 周期边界条件,上下边界采用散射边界条件,保持光栅结构参数和入射条件不变。利用有限元算法计算上述 4 种不同间距的

型的影响。在保持光栅结构参数不变的情况下,使用 RCWA 算法模拟了 TE 偏振波垂直入射到该结构中的反射谱,通过改变 L 的大小来分析光谱,仿真结果如图 3 所示。从图 3(a)可以看出,当 $L=1200$ nm 时,夹层间距较小,光谱出现两个共振波峰。这是因为当两个相同的波导光栅间距较小时,漏模会相互耦合,形成两个奇偶对称超模。这两种模的色散特性不同,形成两个共振波长^[18]。而随着 L 的增加,两光栅之间的相互耦合强度降低,两波峰逐渐靠近,当层间衬底 $L=2100$ nm 时,得到平顶陡边光谱响应。另外分析 L 分别为 2000 nm 和 2200 nm 时的输出光谱,如图 3(b)所示。可以看出 L 的小范围变化会使光谱的线型发生改变,出现光谱线型的不对称现象,边带抑制效果也将变差。因此,当夹层厚度 $L=2100$ nm 时,可以得到良好的平顶陡边光谱响应。

双层复合导模共振光栅滤波器的本征模 $N = N_{\text{real}} - i \times N_{\text{imag}}$,其中实部为 N_{real} ,虚部为 N_{imag} ^[19]。 d 为 337, 347, 357, 367 nm 时对应的本征值大小为 $1.2154 \times 10^{15} - 2.9511 \times 10^{12}i$, $1.2154 \times 10^{15} - 1.6185 \times 10^{12}i$, $1.2154 \times 10^{15} - 6.8217 \times 10^{11}i$ 和 $1.2155 \times 10^{15} - 1.5070 \times 10^{11}i$ 。

该光学滤波器的谐振频率和品质因数可以表示为^[19]

$$\begin{cases} \omega_0 = N_{\text{real}} \\ q_0 = N_{\text{real}} / 2N_{\text{imag}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: ω_0 为谐振频率; q_0 为品质因子。从计算的本征值结果可以看出,随着 d 的增加该结构本征值的实部基本不变,虚部逐渐减小,根据本征值大小和(1)式可以得到该光学滤波器的谐振频率 ω_0 基本不变,品质因子 q_0 增加。谐振器中品质因子的物理意义表示为存储能量与消耗能量的比值。随着两光

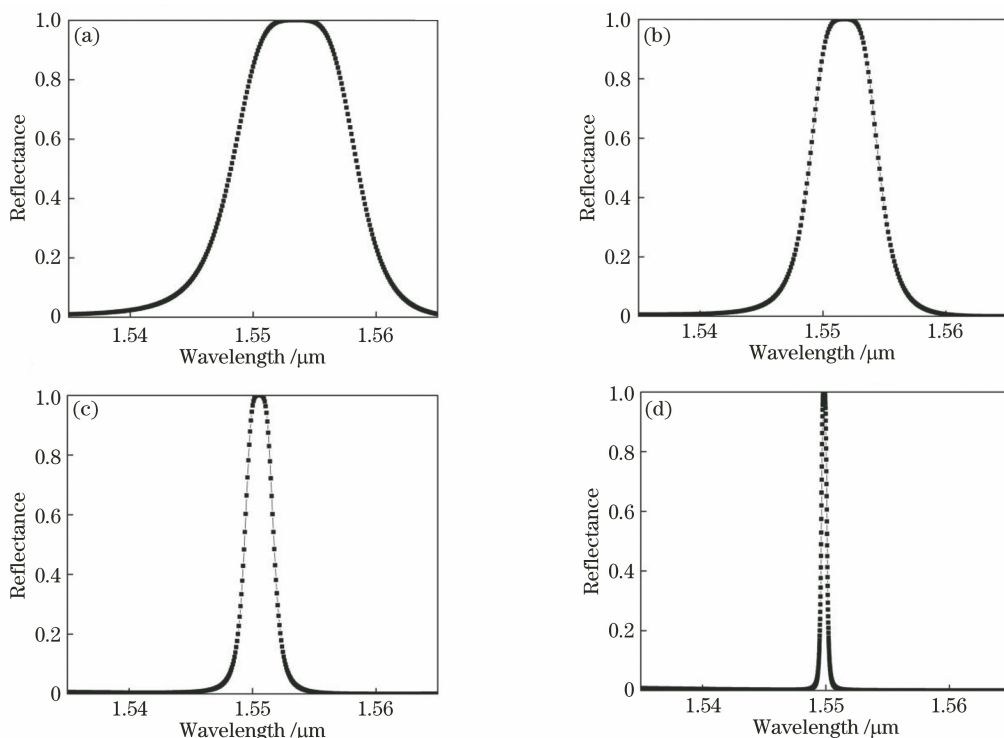


图 4 不同间距 d 下的双层复合导模共振光栅反射光谱。(a) $d=337$ nm; (b) $d=347$ nm; (c) $d=357$ nm; (d) $d=367$ nm

Fig. 4 Reflection spectra of double-layer GMR gratings with different spacings d . (a) $d=337$ nm; (b) $d=347$ nm; (c) $d=357$ nm; (d) $d=367$ nm

栅条间距 d 的增加,光学谐振器内存储的能量也增加。这进一步说明了光栅结构对入射光波的局域能力在提升。

为了进一步了解本征模式的物理性质,分析了该结构不同间距 d 下的本征模式的电场强度分布,如图 5 所示。可以看出随着 d 的增加,越来越多的电场被局限在波导层和两光栅条之间。从本征模式角

度分析计算光栅对光场的束缚因子^[20]:

$$\Gamma = \frac{\int_G |E_{\text{norm}}|^2 dx dz}{\int_U |E_{\text{norm}}|^2 dx dz}, \quad (2)$$

式中: G 为光栅层和波导层的积分面积; U 为整个周期的积分面积; E_{norm} 为本征模式的电场强度。计算得

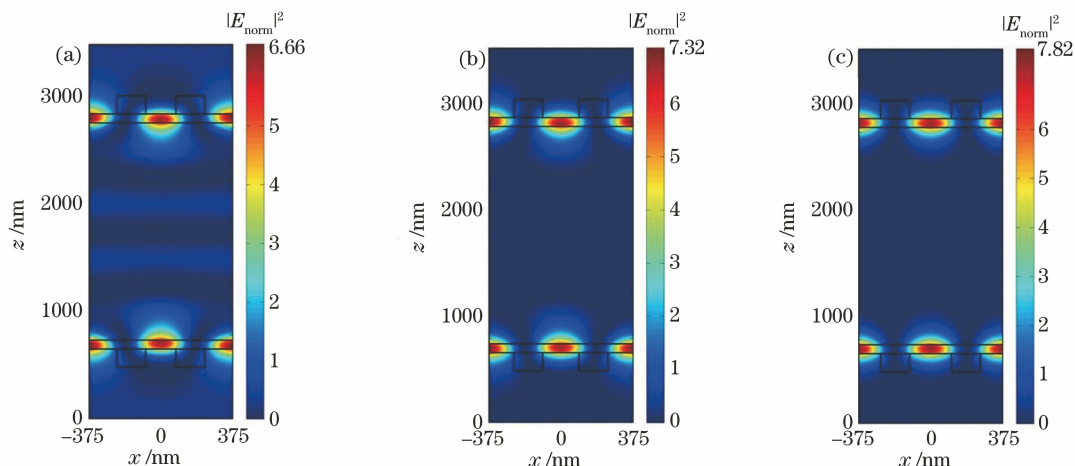


图 5 不同间距 d 下的双层复合光栅结构中本征模式的电场强度分布。(a) $d=307$ nm; (b) $d=337$ nm; (c) $d=367$ nm

Fig. 5 Electric field intensity distributions of the eigenmode mode in different double-layer compound grating structures with various spacings d . (a) $d=307$ nm; (b) $d=337$ nm; (c) $d=367$ nm

到 d 为 307, 337, 367 nm 时限制因子分别为 0.4472, 0.5736, 0.6531。可以看到随着间距 d 的增加, 本征模的约束能力明显增强。这表明增加 d 可以改善所设计结构对本征模的约束, 从而增大了品质因子。

仿真结果表明, 随着光栅间距 d 的增加, 光栅结构对光场的限制因子逐渐增加。调节光栅结构参数 d 可以增强谐振器对光波的局域能力。借助本征模式分析法, 可以分析和预测光谱线型变化的规律。

图 6 表示光栅周期不同时双层复合导模共振光栅的反射光谱。保持光栅结构参数和入射条件不变, 光栅周期 Λ 分别为 750 nm、760 nm、770 nm 时, 利用 RCWA 算法分析了不同周期的反射光谱。从图中可以看出, 随着光栅周期的增加, 光谱的谐振波峰发生红移, 光谱的 FWHM 增加。这是因为当相位匹配时, 光栅周期增加, 为了达到导模共振条件^[21], 谐振波长也会随之变大。而光谱的 FWHM 可以表示为^[12]

$$W_{\text{FWHM}} = \lambda_0 \Delta\gamma / \pi, \quad (3)$$

式中: λ_0 为谐振波长; γ 为泄漏模式的损耗。由 (3) 式可知, 光谱的 FWHM 主要由漏模的损耗和光栅周期决定。而上述结构仅改变了光栅周期, 其余结构参数均未改变, 因此该结构的漏模损耗并没有发生变化, 而光栅周期的增加导致光谱的 FWHM 变大。

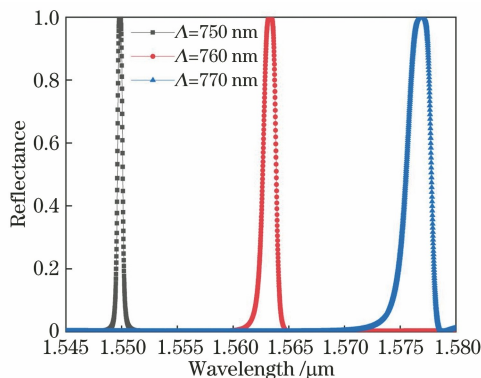


图 6 不同光栅周期的双层导模共振光栅反射光谱

Fig. 6 Reflection spectra of double-layer GMR grating with different grating periods

为了阐明光栅周期变化对双层复合导模共振光栅的调控机理, 保持光栅结构参数和入射条件不变。利用有限元方法计算上述三种不同光栅周期的双层复合导模共振光栅滤波器的本征模式对应的本征值 N 的变化。当 Λ 为 750, 760, 770 nm 时, 对应的 N 分别为 $1.2155 \times 10^{15} - 1.5070 \times 10^{11}i$, $1.2052 \times$

$10^{15} - 4.0806 \times 10^{11}i$, $1.1951 \times 10^{15} - 8.4465 \times 10^{11}i$ 。

可以看出, 随着光栅周期的增加, 该结构本征值的实部减小, 虚部逐渐增加, 根据三种不同光栅周期对应的本征值 N 以及 (1) 式, 得到该光学滤波器的谐振频率和品质因子均减小。研究发现结构参数引起本征值的信息变化与 RCWA 模拟输出光谱的线型变化的本质上是一致的。

4 结 论

提出了一种基于级联复合导模共振光栅的窄带平顶型滤波器结构, 其输出光谱的中心波长为 1549.9 nm, FWHM 为 0.5 nm。在此基础上, 利用光栅结构的本征模式分析法研究了光栅结构参数对其本征值的影响。通过调控光栅结构参数, 改变其本征值的大小, 达到调节输出光谱的谐振波长和线宽的目的, 进而实现光子集成滤波器的平顶陡边光谱响应。

参 考 文 献

- [1] Hu F, Wen H F, Zhou H Y, et al. Multi-branch photonic crystal exiting light bundle based on Y-shaped defect [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0805004.
胡帆, 文化锋, 周华英, 等. 基于 Y 缺陷的多支路型光子晶体出射光集束 [J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0805004.
- [2] Huang G L, Xie D. Cascaded Fabry-Perot cavity photodetector for flat-top steep-edge spectral response [J]. Optik, 2017, 141: 1-9.
- [3] Ren Y, Perron D, Aurangozeb F, et al. Silicon photonic vernier cascaded microring filter for broadband tunability [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(18): 1503-1506.
- [4] Zhang F L, Zhai S, Pan J, et al. Three-dimensional multi-microring resonance filter based on Sagnac-like interferometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1113003.
张福领, 翟珊, 潘俊, 等. 类 Sagnac 干涉仪结构的三维多微环谐振滤波器 [J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1113003.
- [5] Yamada K, Lee K J, Ko Y H, et al. Flat-top narrowband filters enabled by guided-mode resonance in two-level waveguides [J]. Optics Letters, 2017, 42(20): 4127-4130.
- [6] Wang S S, Magnusson R. Theory and applications of guided-mode resonance filters [J]. Applied Optics, 1993, 32(14): 2606-2613.

- [7] Liu Z S, Tibuleac S, Shin D, et al. High-efficiency guided-mode resonance filter [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(19): 1556-1558.
- [8] Zhang C, Hu J P, Zhou R Y, et al. Design and analysis of inverse polarization grating devices for deep ultraviolet light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0301005.
张冲, 胡敬佩, 周如意, 等. 深紫外光栅反常偏振器件的设计与分析 [J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0301005.
- [9] Wang Z H, Wu Y G, Sang T, et al. Reflection spectra properties of guided-mode resonance filters with buffer layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1425-1428.
王振华, 吴永刚, 桑田, 等. 带缓冲层的导模共振滤光片反射光谱特性 [J]. *光学学报*, 2008, 28(7): 1425-1428.
- [10] Chen Y, Zhou X D, Zhou J, et al. Fano-resonance sensing mechanism of sub-wavelength dielectric grating-metal Ag thin film-periodic photonic crystal hybrid structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0413001.
陈颖, 周鑫德, 周健, 等. 亚波长介质光栅-金属 Ag 薄膜-周期性光子晶体混合结构的 Fano 共振传感机理 [J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0413001.
- [11] Xiao P P, Wang F, Deng M L. Nanometer gap measurement based on metal-cladding waveguide configurations [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 212302.
肖平平, 王霏, 邓满兰. 基于金属包覆波导结构的纳米间隙测量研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(21): 212302.
- [12] Thurman S T, Morris G M. Controlling the spectral response in guided-mode resonance filter design [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(16): 3225-3233.
- [13] Kawanishi K, Shimatani A, Lee K J, et al. Cross-stacking of guided-mode resonance gratings for polarization-independent flat-top filtering [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 312-314.
- [14] Hsu C L, Wu M L, Liu Y C, et al. Flattened broadband notch filters using guided-mode resonance associated with asymmetric binary gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(24): 2572-2574.
- [15] Liu W X, Li Y H, Jiang H T, et al. Controlling the spectral width in compound waveguide grating structures [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 163-165.
- [16] Moharam M G, Gaylord T K, Gramm E B, et al. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(5): 1068-1076.
- [17] Jacob D K, Dunn S C, Moharam M G. Flat-top narrow-band spectral response obtained from cascaded resonant grating reflection filters [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(7): 1241-1245.
- [18] Song H Y, Kim S, Magnusson R. Tunable guided-mode resonances in coupled gratings [J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 23544-23555.
- [19] Hu J H, Liu X H, Zhao J J, et al. Investigation of Fano resonance in compound resonant waveguide gratings for optical sensing [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(3): 030502.
- [20] Hu J H, Huang Y Q, Ren X M, et al. Modeling of Fano resonance in high-contrast resonant grating structures [J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(6): 064205.
- [21] Qian L Y. Design and fabrication of the guided-mode resonance tunable filters [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science & Technology, 2016: 34-36.
钱林勇. 导模共振可调谐滤光片的设计和制备 [D]. 上海: 上海理工大学, 2016: 34-36.