

激光与光电子学进展

基于级联导模共振光栅的平顶光学滤波器设计

余九州¹, 胡劲华^{1*}, 任丹萍¹, 刘秀红², 包益宁², 赵继军¹

¹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 基于导模共振光栅的集成光学滤波器在光纤通信中具有潜在的应用前景,然而单个导模共振光栅的输出光谱一般呈现洛伦兹线型,这会阻碍该类结构在波分复用系统中的应用。传统方法一般采用多个谐振腔级联的方式实现平顶滤波响应,然而整个结构的体积较大,制作工艺较为复杂,因此提出一种基于级联双层导模共振光栅结构,其输出光谱响应为平顶陡边型。首先建立器件的物理模型,其物理机理是将导模共振效应与法布里-珀罗谐振效应结合,然后利用物理模型分析和设计滤波器结构。研究发现该滤波器的中心波长为 1550 nm,其 3 dB 带宽可以增加至 20 nm。

关键词 光栅; 波长滤波器; 导模共振; 法布里-珀罗谐振腔; 平顶光谱

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1105001

Design of Flat-Top Optical Filter Based on Cascaded Guided Mode Resonant Gratings

Yu Jiuzhou¹, Hu Jinhua^{1*}, Ren Danping¹, Liu Xiuhong², Bao Yining², Zhao Jijun¹

¹*School of Information & Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;*

²*School of Mathematics & Physics, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China*

Abstract Integrated optical filters based on guided-mode resonant gratings have potential applications in optical fiber communications. However, the output spectrum of a single guided-mode resonant grating is generally Lorentzian, which hinders the use of this type of structure in wavelength division multiplexing systems. Traditional methods generally use multiple resonator cascades to achieve a flat-top filter response. However, the entire structure is considerably large and the manufacturing process is complicated. Therefore, based on the output spectral response, a cascaded double-layer guided-mode resonant gratings structure of the flat-top and steep-edge type is proposed in this study. First, the physical model of the device is established. The physical mechanism is to combine the guided mode resonance effect with the Fabry-Perot resonance effect, and then use the physical model to analyze and design the filter structure. The center wavelength of the filter is observed to be 1550 nm, and its 3 dB bandwidth can be increased to 20 nm.

Key words gratings; wavelength filtering devices; guided mode resonance; Fabry-Perot resonator; flat-top spectrum

OCIS codes 050.2230; 050.6624; 050.2770; 130.7408

收稿日期: 2020-10-20; 修回日期: 2020-10-28; 录用日期: 2020-11-12

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, F2017402068, A2020402013)、河北省高等学校科学技术研究项目重点项目(ZD2021019)

*E-mail: hujh84@hebeu.edu.cn

1 引言

近年来,基于导模共振(Guided Mode Resonance, GMR)效应的波导光栅结构^[1]因其具有优异的性能和潜在的应用而引起科研人员的广泛关注。GMR 波导光栅一般具有滤波效率高(理论上可以达到 100%)^[2]、结构简单和易于入射光源直接耦合的优点,而且还可以通过改变光栅的结构参数^[3-5]或入射条件^[6-7]来调控输出光谱的带宽和谐振波长,因此一般常用于制作各种类型的集成光学滤波器,如带通滤波器^[8]和带阻滤波器^[9]。

单个 GMR 波导光栅的输出光谱呈现洛伦兹线型,这制约了该类器件在波分复用系统中的应用。为了便于光信号的接收,一般需要具有平顶陡边光谱响应的滤波器作为波长选择单元^[10-15],实现平顶集成光学滤波器一般有级联微环谐振器^[11]、级联法布里-珀罗(F-P)腔结构^[12]和级联 GMR 光栅结构^[13-15]等。级联微环谐振滤波器在实现平顶陡边滤波的过程中,入射光源难以直接耦合进光波导芯片中,而且一般需要严格控制微环与微环和微环与直波导之间的耦合间距;级联 F-P 薄膜滤波器一般采用多腔结构,为此器件的体积较大,所以不易于大规模集成。相比于以上器件,级联 GMR 光栅可以直接与入射光源耦合,光栅结构的设计较为灵活,结构加工的工艺容差较大,因此其可以满足光通信系统中信号选择性接收的需求,这是实现平顶型滤波响应的一种较好选择。Jacob 等^[13]级联了两个或三个谐振光栅,设计出一种具有平顶光谱响应的窄带光谱滤波器。Yamada 等^[14]使用了夹在两个波导中的一维光栅层结构实现具有平顶陡边光谱响应特性的器件结构,在该结构中可以利用两种波导模式将两个对应的反射谐振峰合并为一个单一的平顶光谱。Kawanishi 等^[15]将两个 GMR 光栅正交堆叠在一起,得到了带宽为 7 nm 并与偏振无关的平顶陡边光谱。

光纤通信技术中,宽带平顶型滤波器具有重要的应用价值,其中级联 GMR 光栅是一个较好的选择方案。为了实现对输出光谱的控制,可以调节光栅的结构参数,如光栅周期、占空比和光栅刻蚀厚度等。综上,本文提出一种双层 GMR 光栅结构,优化两个光栅的结构参数可以获得所期望的光谱带宽和谐振波长。为了进一步理解该类型器件的物理机理,本文以基于标准的 F-P 模型为基础,推导级联双层 GMR 光栅反射光谱的理论表达式,分析器

件的物理机理,优化器件的结构参数。

2 结构与原理

双层 GMR 光栅滤波器的结构如图 1 所示,两个 GMR 光栅间隔一个层间衬底,其中 TE 为横电。顶部光栅的波导层为氮化硅,折射率 $n_L=1.82$ 。光栅层为二氧化钛,折射率 $n_H=2.2$ 。覆盖层聚合物的折射率 $n_C=1.479$ 。层间衬底为二氧化硅,折射率 $n_S=1.45$ 。其中层间衬底的厚度 $L=1760$ nm,顶部光栅波导层的厚度 $H_{L1}=430$ nm,光栅厚度 $H_{H1}=65$ nm,光栅周期 $\Lambda=937.9$ nm,占空比 $f_1=0.5$ 。底部 GMR 光栅与顶部 GMR 光栅为对称结构,其材料和结构参数均一致。

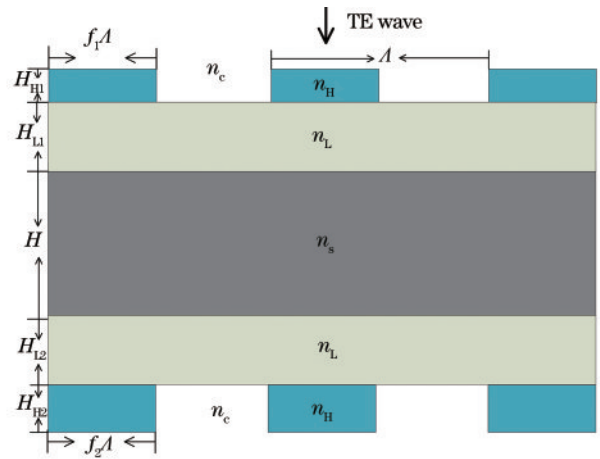


图 1 双层 GMR 光栅滤波器的结构

Fig. 1 Structure of double-layer GMR gratings filter

采用严格耦合波分析(Rigorous Coupled Wave Analysis, RCWA)算法^[16]来模拟 TE 偏振波垂直入射进级联双层 GMR 光栅和单层 GMR 光栅中,得到的反射光谱如图 2 所示。从图 2 可以看到,双层 GMR 光栅由于结合了 GMR 效应与 F-P 谐振效应,所以提供的光谱比单层 GMR 光栅具有更好的边带抑制效果。此外,由于存在额外的 F-P 腔光学谐振作用,所以级联双层 GMR 光栅的反射光谱呈现平顶滤波响应且共振波峰的中心波长仍在 1550 nm 处。

为了分析 F-P 谐振腔在级联双层 GMR 光栅中的作用,将整个光栅结构视为一个 F-P 腔,并根据标准的 F-P 腔模型来计算双层 GMR 光栅的透射率^[17-18],表达式为

$$T(\lambda) = \frac{T_1(\lambda)T_2(\lambda)}{1 + R_1(\lambda)R_2(\lambda) - 2\sqrt{R_1(\lambda)R_2(\lambda)}\cos\delta(\lambda)}, \tag{1}$$

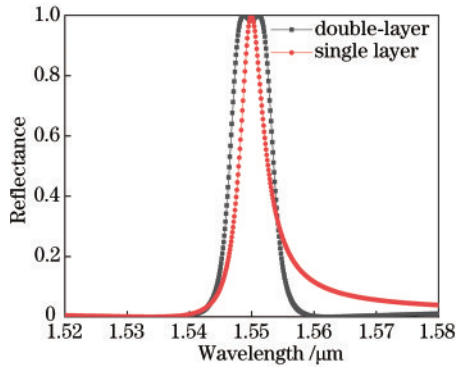


图 2 双层和单层 GMR 光栅的反射光谱

Fig. 2 Reflection spectra of double and single GMR gratings

式中： λ 为波长； $T_1(\lambda)$ 和 $R_1(\lambda)$ 分别为顶部 GMR 光栅的透射率和反射率； $T_2(\lambda)$ 和 $R_2(\lambda)$ 分别为底部 GMR 光栅的透射率和反射率； $\delta(\lambda)$ 为 F-P 模型的往返相位，可表示为

$$\delta(\lambda) = \frac{4\pi nL}{\lambda} - \phi_1(\lambda) - \phi_2(\lambda), \quad (2)$$

式中： n 和 L 分别为层间衬底的折射率和腔长； $\phi_1(\lambda)$ 和 $\phi_2(\lambda)$ 分别为顶部 GMR 光栅和底部 GMR 光栅的反射相位。根据能量守恒定律可知， $R(\lambda) + T(\lambda) = 1$ ，由此可以得到整个结构的反射效率。

由(2)式可知，F-P腔的腔长变化主要影响 F-P 模型的往返相位，从而影响整个结构的反射效率。在保持光栅结构参数不变的情况下，采用 RCWA 算法来模拟 TE 偏振波垂直入射进双层 GMR 光栅中的情况，通过改变 F-P 腔的腔长来分析光谱的变化，器件在腔长 $L=1760$ nm 具有良好的光谱响应。

为了分析器件的物理机制，分别使用 RCWA 算法和 F-P 标准理论模型来模拟 TE 偏振波垂直入射进双层 GMR 光栅中的情况，器件结构的参数与图 2 一致，得到的光谱如图 3 所示。从图 3 可以看到，两

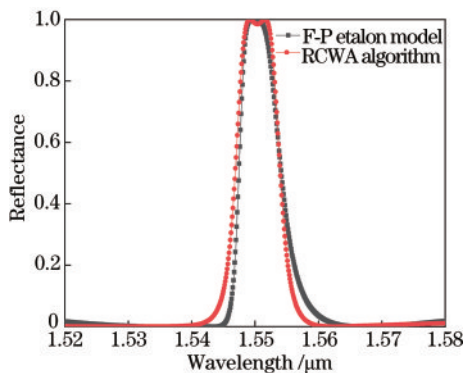


图 3 不同方法下双层 GMR 光栅的反射光谱

Fig. 3 Reflection spectra of double-layer GMR gratings under different methods

个光谱具有良好的 consistency；在谐振波峰附近，由于结合了 GMR 效应和 F-P 谐振效应，所以产生平顶型光谱。

3 结果与讨论

为了分析光栅参数对双层 GMR 光栅滤波器滤波效果的影响，在图 2 结构参数的基础上分析和优化上、下两层光栅厚度对输出光谱的影响。采用 RCWA 算法来模拟 TE 偏振波垂直入射到不同厚度的双层 GMR 光栅表面的情况，得到的输出反射光谱如图 4 所示。从图 4 可以看到，当光栅厚度 H_{H1} 和 H_{H2} 分别为 55, 65, 75 nm 时，谐振波峰的中心波长分别为 1546.7, 1550.0, 1553.1 nm，光谱的 3 dB 带宽分别为 5.4, 7.2, 9.1 nm；随着光栅厚度的增加，光谱的谐振波峰发生红移，光谱的带通区域出现展宽。综上可知，通过调节光栅厚度可以调控输出光谱的带宽^[3]。由(1)式可知，单个光栅光谱的变化会引起整个结构的光谱发生变化，因此通过改变光栅厚度可以获得所需的光谱带宽。

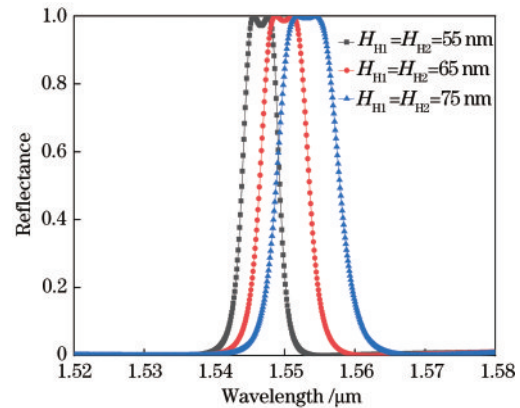


图 4 不同光栅厚度下双层 GMR 光栅的反射光谱

Fig. 4 Reflection spectra of double-layer GMR gratings under different grating thicknesses

通过以上研究发现，光栅厚度对光谱的谐振波峰和带宽均有较大的影响。保持光栅厚度 $H_{H1} = H_{H2} = 65$ nm，其他光栅结构参数和入射条件不变，光栅周期 Λ 分别为 932.9, 937.9, 942.9 nm，当光栅周期不同时，双层 GMR 光栅的反射光谱如图 5 所示。从图 5 可以看到，随着光栅周期的增加，光谱的谐振波长发生红移，但光谱的带宽基本不变。综上可知，光栅周期小范围内的改变可以调控反射光谱的谐振波长，但不会影响光谱的线型^[4]。

在其他光栅结构参数和入射条件不变的情况下，双层 GMR 光栅的光栅厚度 H_{H1} 和 H_{H2} 对反射光

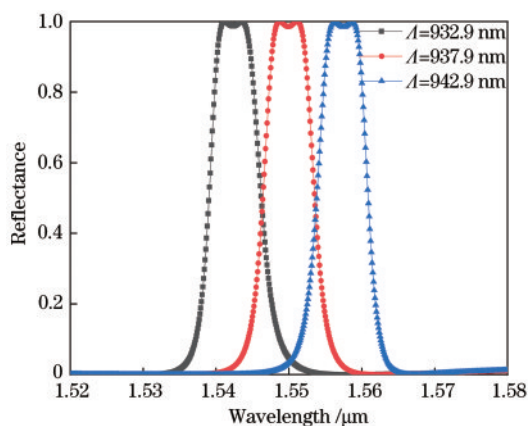


图 5 不同光栅周期下双层 GMR 光栅的反射光谱
Fig. 5 Reflection spectra of double-layer GMR gratings under different grating periods

谱的影响如图 6 所示。从图 6 可以看到,反射光谱的带宽随着光栅厚度的增加而变大,其谐振波长逐渐红移,但是随着光栅厚度的增加,反射光谱不再对称,陡边响应受到影响^[18],因此增加光谱带宽,既需要满足平顶光谱的性质,又需要选择合适的光栅厚度。

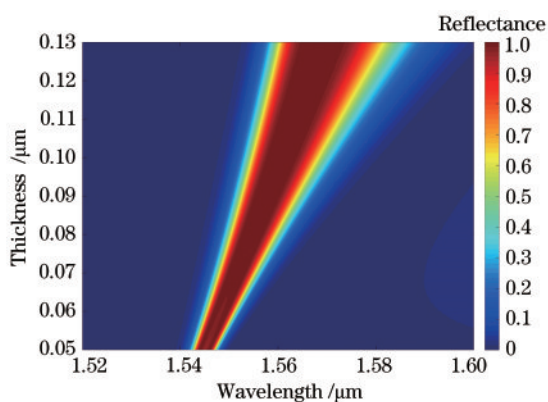


图 6 不同反射率下双层 GMR 光栅的光栅厚度与波长的关系
Fig. 6 Relationship between grating thickness and wavelength of double-layer GMR gratings under different reflectivity

通过调整双层 GMR 光栅的光栅厚度和光栅周期,可以在波长为 1550 nm 处获得较大带宽的反射光谱,调整后双层 GMR 光栅的光栅厚度 $H_{H1}=H_{H2}=100$ nm,光栅周期 $\Lambda=930.9$ nm。采用 RCWA 算法计算的反射光谱如图 7 所示。从图 7 可以看到,双层 GMR 光栅呈现平顶陡边光谱响应,中心波长在 1550 nm 处,3 dB 带宽为 15.5 nm。

两个不同的亚波长光栅间隔一个层间衬底可以实现超宽带反射^[19],因此只改变双层 GMR 光栅

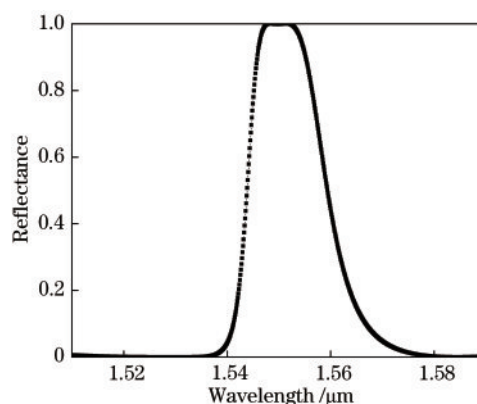


图 7 双层 GMR 光栅平顶陡边的反射光谱
Fig. 7 Reflection spectrum of flat-top and steep-edge of double-layer GMR gratings

中其中一个 GMR 光栅的结构参数,可以形成非对称双层 GMR 结构。假定双层 GMR 光栅中的顶部 GMR 光栅周期 $\Lambda=930.9$ nm,光栅厚度 $H_{H1}=100$ nm。改变底部 GMR 光栅的结构参数,光栅厚度 $H_{H2}=107$ nm,其他光栅结构参数和入射条件不变。将得到的光谱与图 7 进行对比,结果如图 8 所示。从图 8 可以看到,随着底部 GMR 光栅厚度的增加,反射光谱的带宽将会变大,但并未影响光谱的线型,因此改变底部光栅的厚度可以再次扩大光谱带宽。

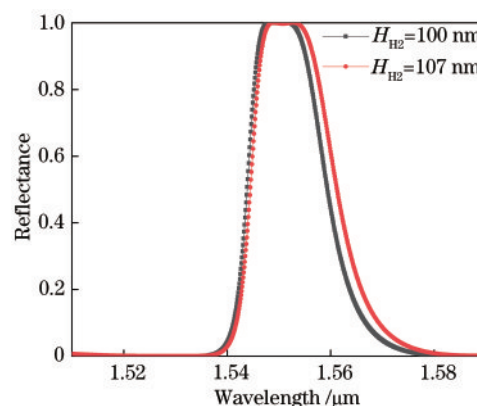


图 8 底部 GMR 光栅不同厚度下的反射光谱
Fig. 8 Reflection spectra of bottom GMR grating under different thicknesses

在其他光栅结构参数和入射条件不变的情况下,底部 GMR 光栅的光栅厚度 H_{H2} 对反射光谱的影响,如图 9 所示。从图 9 可以看到,光谱的带宽随着底部 GMR 光栅厚度的增加而变大,但是随着光栅厚度的增加,光谱的边带抑制效果逐渐变差;当底部 GMR 光栅的厚度大于 122 nm 时,反射光谱的顶部出现明显的波纹,因此小范围调整底部 GMR 光

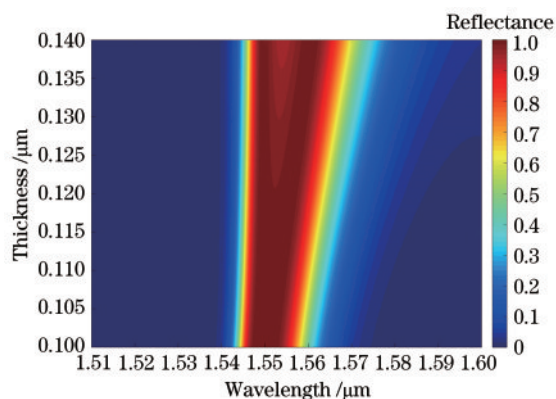


图9 不同反射率下双层 GMR 光栅的底部光栅厚度与波长关系

Fig. 9 Relationship between bottom grating thickness and wavelength of double-layer GMR gratings under different reflectivity

栅的厚度可以在不影响光谱线型的情况下进一步扩大光谱带宽。

根据上述研究,设置非对称双层 GMR 光栅中顶部光栅的光栅厚度 $H_{H1}=100$ nm,底部光栅的光栅厚度 $H_{H2}=120$ nm,光栅周期 $\Lambda=930.9$ nm,其他光栅结构参数和入射条件不变,得到的反射光谱如图 10 所示。从图 10 可以看到,光谱波峰凹陷处的反射效率为 98.6%。为了计算光谱的平坦度,定义滤波器的矩形系数中光谱峰值下降到 90% 的线宽 $\Delta\lambda_{0.9}$ 与光谱下降到 10% 的线宽 $\Delta\lambda_{0.1}$ 的比值 $S=\Delta\lambda_{0.9}/\Delta\lambda_{0.1}$,由此可以计算得到 $S=0.385$,说明该光谱具有较好的平顶陡边特性^[20]。非对称双层 GMR 光栅具有平顶陡边光谱响应,中心波长在 1550 nm 处,3 dB 带宽为 20 nm,相比于级联对称光栅结构增加了 4.5 nm。

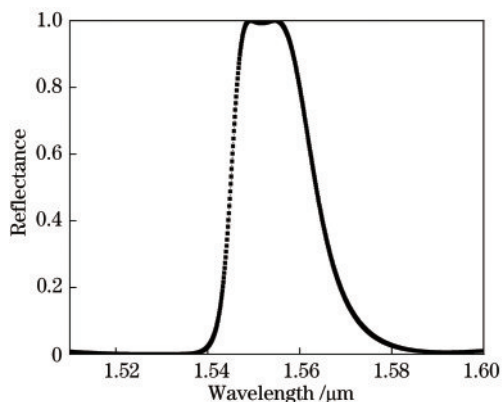


图 10 非对称双层 GMR 光栅平顶陡边的反射光谱

Fig. 10 Reflection spectrum of flat-top and steep-edge of asymmetric double-layer GMR gratings

4 结 论

本文设计一种入射波以 TE 偏振垂直入射的平顶陡边光栅滤波器,该滤波器的输出光谱具有平顶陡边响应。在此基础上,分析对称型和非对称型级联 GMR 光栅结构。研究结果表明,相比于对称型结构,非对称型结构既可以实现平顶陡边响应,又能够增加输出光谱的 3 dB 带宽,所提出的双层 GMR 光栅滤波器结构在高性能光纤系统中具有一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Qian L Y. Design and fabrication of the guided-mode resonance tunable filters[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science & Technology, 2016: 32-34.
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: 32-34.
- [2] Liu Z S, Tibuleac S, Shin D, et al. High-efficiency guided-mode resonance filter[J]. Optics Letters, 1998, 23(19): 1556-1558.
- [3] Liu W, Lai Z, Guo H, et al. Guided-mode resonance filters with shallow grating[J]. Optics Letters, 2010, 35(6): 865-867.
- [4] Liu Z Y, Guan B L, Hu P L, et al. Design of resonant filter for ultra-narrow linewidth guide mode[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(1): 72-76.
刘振扬, 关宝璐, 胡丕丽, 等. 超窄线宽导模共振滤波器的设计[J]. 半导体光电, 2019, 40(1): 72-76.
- [5] 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.
- [6] Niederer G, Nakagawa W, Herzig H, et al. Design and characterization of a tunable polarization-independent resonant grating filter[J]. Optics Express, 2005, 13(6): 2196-2200.
- [7] 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.
- [8] Sakat E, Vincent G, Ghenuche P, et al. Guided

- mode resonance in subwavelength metallodielectric free-standing grating for bandpass filtering[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3054-3056.
- [9] Lin H A, Huang C S. Linear variable filter based on a gradient grating period guided-mode resonance filter [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(9): 1042-1045.
- [10] Doskolovich L L, Golovastikov N V, Bykov D A, et al. Analytical design of flat-top transmission filters composed of several resonant structures[J]. *Optics Express*, 2019, 27(19): 26786-26798.
- [11] Wang Y. Transfer characteristic research and parameter optimization of cascaded micro ring flat-top filter[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018: 25-36.
汪颖. 串联微环平顶型滤波器的传输特性研究和参数优化[D]. 南京: 南京大学, 2018: 25-36.
- [12] Chen H X, Gu P F, Li H F, et al. Design of interleaver with cascaded thin film filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(1): 62-64.
陈海星, 顾培夫, 李海峰, 等. 薄膜多腔滤光片型梳状滤波器的设计[J]. *光学学报*, 2004, 24(1): 62-64.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Moharam M G, Gaylord T K, Grann 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] Born M, Wolf E. *Principles of optics*[M]. 6th ed. Oxford: Pergamon Press, 1980: 323-329.
- [18] Ko Y H, Magnusson R. Flat-top bandpass filters enabled by cascaded resonant gratings[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4704-4707.
- [19] Zhang J L, Shi S K, Jiao H F, et al. Ultra-broadband reflector using double-layer subwavelength gratings[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(3): 426-429.
- [20] Qin Y F, Huang Y Q, Ren X M, et al. Parallel-cascaded micro-ring resonators waveguide photodetector with flat-top and steep-edge response[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7847: 78472S.