

文章编号: 1002-2082 (2020) 01-0176-04

基于双层金属光栅的中波红外多通道滤光片结构

刘永强, 金 柯, 王慧娜, 杨崇民, 韩 俊, 王颖辉, 张建付

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 提出一种多通道平面窄带滤光片阵列结构, 该结构由双层金属光栅及其两侧的分布式布拉格反射器 (DBRs) 组成。所设计的多通道滤光片中心波长范围超过 200 nm, 每一个通道的中心波长可以通过调节光栅狭缝宽度来调节, 从而实现多通道窄带滤光阵列。该结果为中波红外多通道窄带滤光片的设计提供了一条新的路径。

关键词: 多通道窄带滤光片; 双层金属光栅; 类 Fabry-Perot 腔; 中波红外

中图分类号: O484.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0106001

Multi-channel mid-infrared filter structure based on bilayer metallic grating

LIU Yongqiang, JIN Ke, WANG Huina, YANG Chongmin, HAN Jun,
WANG Yinghui, ZHANG Jianfu

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: A planar array structure of multi-channel narrowband filter was proposed, which consisted of bilayer metallic grating and its bilateral distributed Bragg reflectors (DBRs). The central wavelength range of the designed multi-channel filter exceeded 200 nm, and the central wavelength of each channel could be adjusted by grating slit width to realize the multi-channel narrowband filter array. The results provides a new approach for designing the multi-channel mid-infrared narrowband filter.

Key words: multi-channel narrowband filter; bilayer metallic grating; Fabry-Perot-like cavity; MWIR

引言

红外窄带滤光片在光学通信、光学仪器、光学传感、光谱成像、光谱分析等具有非常广泛的应用^[1-6]。由于光学系统越来越复杂, 为了简化光学系统整体结构, 提升光学系统的集成度和可靠性, 多通道窄带滤光片的应用日益增多^[7-9]。多通道滤光片替代传统滤光片组合可以极大简化光学系统, 减小体积和重量。传统的多通道窄带滤光片结构主要是基于光学薄膜窄带滤光片原理, 一种是把不同波长的滤光片拼接成多通道窄带滤光片, 但这种方法难以实现小尺寸器件^[9]; 另一种方法是利用光刻工艺刻蚀出不同厚度的间隔层来实现^[10-11], 这种结构往往每一个通道需要刻蚀一次,

通道越多工艺越复杂, 这使得其环境适应性差, 且膜层容易脱落, 给制备和应用带来困难^[11-14]。

为了获得光谱性能优良、环境适应性好的多通道中波红外窄带滤光结构, 本文结合干涉效应与 Fabry-Perot 腔共振效应, 提出采用分布式布拉格反射器 (DBRs) 结合双层金属光栅的组合来实现多通道红外窄带滤光阵列结构, 各通道透过率均大于 78%, 所设计中波红外多通道滤光器性能良好。

1 理论模型及原理

采用 DBRs-双层金属光栅-DBRs 结构来设计透射 TM 光的多通道超窄带滤光片。设计的中波

收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-08-19

基金项目: JCKY2016208B006

作者简介: 刘永强 (1976-), 男, 高级工程师, 主要从事光学薄膜技术研究。E-mail: liuyongqiang205@163.com

红外多通道窄带滤光器结构如图1所示。从下往上依次为石英基底/(HL)³H/双层金属光栅/H(LH)³。DBRs由厚度为0.25 μm的ZnS和0.35 μm的SiO₂膜层交替组成;双层金属光栅材料为金,周期0.5 μm,厚度1 μm,占空比0.6,上下金属层厚度相同为0.25 μm,填充介质折射率为SiO₂。本文采用FDTD法模拟,由于阵列的周期结构,计算时Z轴方向采用完全匹配层截断电磁场,X轴方向采用周期边界条件。ZnS折射率为2.3, SiO₂折射率为1.42,金的色散采用Drude模型:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega/\tau) \quad (1)$$

式中: ε_{∞} 为1;等离子体频率 ω_p 为 1.38×10^{16} rad/s; τ 为33 fs^[15]。

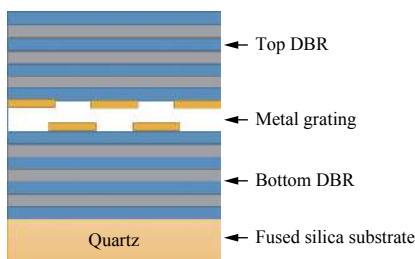


图1 多通道滤光片结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of multi-channel filter

多通道窄带透射峰机理为:光通过金属狭缝时,相当于通过一个类Fabry-Preot腔的结构^[16],当入射光波长与双层金属光栅的厚度之间满足谐振(2)式时,对应的波长形成透射增强峰。

$$2n_{\text{eff}}L + 2n_d d = m\lambda \quad (2)$$

式中: m 为共振模式数; n_{eff} 为狭缝有效折射率, $n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k_0}$; L 为光栅金属层总厚度; d 为双层金属光栅金属层之间介质的厚度; n_d 为光栅中介质折射率。入射光在亚波长金属狭缝中的复传播常数 β 由下式计算:

$$\tan\left(\frac{w}{2} \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_d^2}\right) = \frac{n_d^2}{n_m^2} \sqrt{\frac{\beta^2 - k_0^2 n_m^2}{k_0^2 n_d^2 - \beta^2}} \quad (3)$$

式中 w 为金属光栅狭缝宽度。

通过以上理论分析我们可以通过设计金属光栅狭缝的宽度来调节多通道窄带滤光片单个通道的中心波长;通过DBRs、金属光栅厚度和光栅中填充介质的折射率来选择多通道窄带滤光片的设计波段。我们分析了金属光栅厚度和光栅中填充介质的不同窄带滤光片单个通道的中心波长变化

规律,最后利用金属光栅狭缝宽度梯度变化设计了平面阵列滤光片。

2 结果与讨论

图2为金属光栅中不同填充介质的TM偏振光透过率曲线。图中左侧的窄带透射峰为多层膜滤光片的透射峰,其透射峰位置由下式确定:

$$\frac{1}{2} \left(\phi_1 + \phi_2 - \frac{4\pi}{\lambda} n_{\text{TM}} L - \frac{4\pi}{\lambda} n_d d \right) = m\pi \quad (4)$$

式中: ϕ_1 和 ϕ_2 为反射膜反射位相; m 为整数; n_{TM} 为亚波长金属光栅TM光等效折射率^[17]。右侧尖锐的透射峰为金属光栅内类Fabry-Preot共振峰。从图中可以看出,光栅填充不同的介质左侧共振峰位置随着填充介质折射率增加向长波方向移动,这是因为金属光栅的等效光学厚度增加的缘故。右侧透射峰随着填充介质折射率增加向长波方向移动。由(2)式可知,金属光栅波导电磁模式的色散关系受金属狭缝中介质折射率的影响,随着折射率增加类Fabry-Preot腔长增加,因此共振峰的位置向长波方向移动。

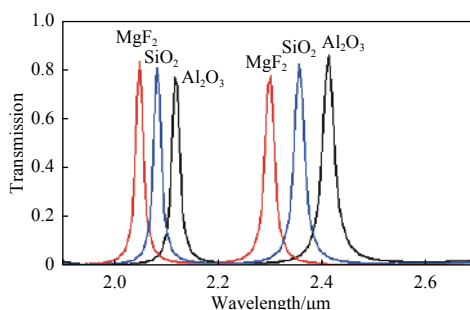


图2 金属光栅中不同填充介质的透过率曲线

Fig. 2 Transmittance curves of different filling mediums in bilayer metallic grating

图3为双层金属光栅填充SiO₂时,不同金属光栅厚度下的TM偏振光透过率。从图中可以看出不同金属光栅厚度时,左侧透射峰位置随着光栅厚度增加峰值透射率向长波方向微小移动,这是因为金属光栅的等效光学厚度增加的缘故。右侧金属光栅内共振峰同样随着光栅厚度增加向长波方向移动,因为随着厚度增加类Fabry-Preot腔长增大,所以共振峰的位置向长波方向移动。从图(2)、图(3)可以看出,我们通过调节金属光栅填充介质及光栅厚度来调节多通道超窄带滤光片透射波段。

图4为单个通道的窄带滤光片中心波长的光场分布,其中双层金属光栅填充 SiO_2 ,金属光栅厚度 $1\text{ }\mu\text{m}$,光入射方向沿 Z 轴正方向。从图4可见,光场在金属光栅的分布为驻波分布,光场对称分布在光栅两侧,金属光栅等效介质层作为滤光片的谐振腔,光场主要分布在双层金属光栅中。金属光栅中的谐振波由两边DBRs引起,说明中心波长为光波在金属光栅中共振产生,满足(2)式的共振波长都会形成透射峰。

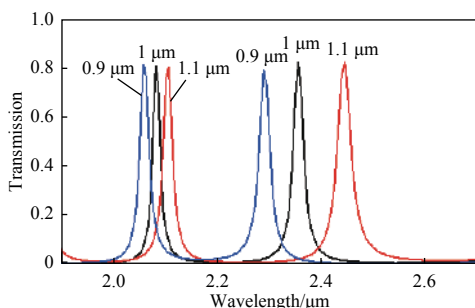


图3 不同双层金属光栅厚度下的透过率

Fig. 3 Transmittance curves of bilayer metallic grating with different thicknesses

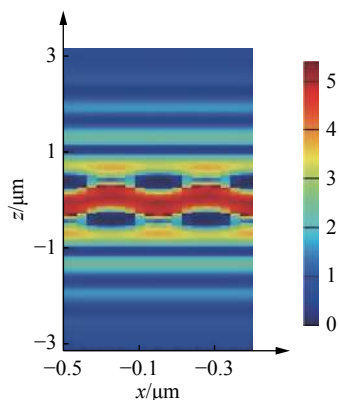


图4 窄带滤光片中心波长的光场分布

Fig. 4 Optical field distribution of central wavelength on narrowband filter

图5为不同光栅狭缝宽度时不同共振波长下,双层金属光栅对于共振波长的相位厚度。从图上可以看出随着狭缝宽度增加相位增加,说明随着狭缝宽度增加类Fabry-Preot腔长增大。图6为利用金属光栅狭缝宽度梯度变化及阵列式分布所设计的多通道滤光片透射曲线。金属光栅狭缝沿着 X 轴正方向宽度从 160 nm 变化至 400 nm ,狭缝宽度均匀变化,梯度为 30 nm 。随着狭缝宽度增加,滤光片中心波长也依次增加,从 $2\text{ }230\text{ nm}$ 增加至

$2\text{ }433\text{ nm}$,所设计的多通道滤光片中心波长覆盖范围超过 200 nm 。峰值透过率随着波长增加,从 78% 增加到 93% 。

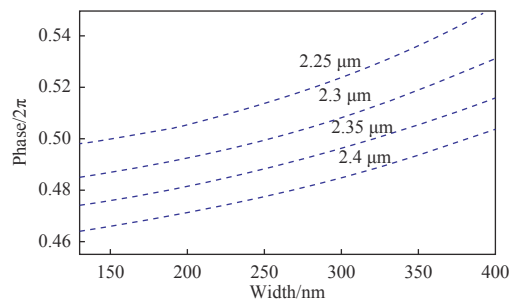


图5 不同狭缝宽度时共振波长的相位厚度。

Fig. 5 Phase thickness of resonance wavelength at different slit widths

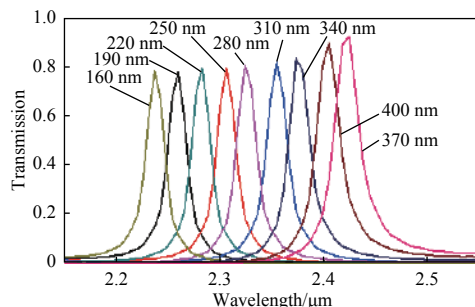


图6 设计的多通道滤光片透射曲线

Fig. 6 Transmittance curves of designed multi-channel filter

3 结论

设计了一种中波红外多通道窄带滤光器,采用DBRs-双层金属光栅-DBRs结构来设计多通道窄带滤光片,通过光栅狭缝宽度梯度变化得到了多通道窄带滤光片。所设计的滤光片透射峰可调,从理论计算得到了金属光栅填充介质及金属光栅厚度与透射峰位置关系,并从理论上给予了解释。为设计中波红外多通道窄带滤光片提供了理论根据。所设计的多通道窄带滤光片滤光性能良好,在许多光学系统中有非常好的应用潜能。

参考文献:

- [1] PAN Yongqiang, CHEN Jia. Design and fabrication of microstructure narrowband filter[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(1): 78-82.
潘永强, 陈佳. 微结构窄带滤光片设计及制备工艺研究[J]. 应用光学, 2017, 38(1): 78-82.
- [2] WANG Zhenhua, WU Yonggang, XIA Zihuan, et al. Mul-

- timode resonance bandpass filter with twin wideband channels[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(8): 5-7.
- [3] LI Detian, WANG Duoshu, WANG Jizhou, et al. Research on long stripe assembled filters[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2018, 24(6): 374-379.
李得天, 王多书, 王济洲, 等. 拼接式集成滤光片的研制[J]. *真空与低温*, 2018, 24(6): 374-379.
- [4] GHOSH R, GHOSH K K, CHAKRABORTY R. Narrow band filter using 1D periodic structure with defects for DWDM systems[J]. *Optics Communications*, 2013, 289(4): 75-80.
- [5] DUAN Weibo, LI Daqi, YU Deming, et al. Design and fabrication of an integrated order blocking filter for hyper-spectral imaging system[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(4): 430-434.
段微波, 李大琪, 余德明, 等. 一种用于超光谱成像系统中消高级次光谱集成滤光片的设计与研制[J]. *红外与毫米波学报*, 2016, 35(4): 430-434.
- [6] CAI Y, ZHOU S, MA X F, et al. Fabrication of short-wavelength infrared dual-band-pass filter based on combination of Fabry-Perot filters[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(33): 9412.
- [7] LIAO Chengsheng, WU Zheng, ZENG Libo, et al. Real-time multi-spectral imaging system based on multi-channel narrow-band filter and color image sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(4): 100-108.
廖乘胜, 吴正, 曾立波, 等. 基于多通道窄带滤光片和彩色图像传感器的实时多光谱成像系统[J]. *光子学报*, 2017, 46(4): 100-108.
- [8] CAI Y, ZHOU S, LIU D Q. Design of dual-band-pass optical filter based on combination of fabry-perot coatings in mid-infrared band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0222004.
- [9] HORIE Y, ARBABI A, ARBABI E, et al. Wide bandwidth and high resolution planar filter array based on DBR-metasurface-DBR structures[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 11677-11682.
- [10] JIAO Hongfei, CHENG Xinbin, DING Tao, et al. Narrowband multi-channel filters[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(s1): 192-195.
- [11] TIBULEAC S, MAGNUSSON R. Diffractive narrow-band transmission filters based on guided-mode resonance effects in thin-film multilayers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(4): 464-466.
- [12] SHEN W D, SUN X Z, ZHANG Y G, et al. Narrow band filters in both transmission and reflection with metal/dielectric thin films[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(2): 242-246.
- [13] LIU J, SCHULMERICH M V, BHARGAVA R, et al. Optimally designed narrowband guided-mode resonance reflectance filters for mid-infrared spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 24182.
- [14] MACLEOD H A. Thin film narrow band optical filters[J]. *Thin Solid Films*, 1976, 34(2): 335-342.
- [15] JIN Ke, LIU Yongqiang, HAN Jun, et al. Middle-wave infrared and broadband polarization conversion based on metamaterial[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(13): 81-85.
金柯, 刘永强, 韩俊, 等. 基于超材料的中波红外宽带偏振转换研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(13): 81-85.
- [16] TAKAKURA Y. Optical resonance in a narrow slit in a thick metallic screen[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(24): 5601.
- [17] BRUNDRETT D L, GLYTSIS E N, GAYLORD T K. Subwavelength transmission grating retarders for use at 10.6 μm [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(31): 6195-6202.