

二维亚波长金属光栅多波长透射滤光片

周文超^{1,2} 吴一辉¹ 郝鹏¹ 刘桂根¹ 李凯伟^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为实现阵列化、多波长光探测器件的微型化与集成化,设计了一种基于亚波长金属光栅导模共振原理的透射滤光片。利用波导理论分析了二维金属光栅波导对称和非对称两种结构的共振特性,数值仿真分析了光栅各参数如占空比、光栅厚度、侧壁角度等对透射谱线的影响,并给出了结构优化参数范围。研究表明,透射滤光片的峰值波长与半峰全宽(带宽)取决于光栅周期和缓冲层厚度,带宽的调节范围为 2~45 nm,最大透射率为 81.7%,所设计的滤光片具有偏振无关性,较好地满足了当前微流控芯片、生物传感阵列等微量样品集成化探测的需求。

关键词 光栅;导模共振;透射滤光片;带宽

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1105001

Transmission Bandpass Filters Based on Two-Dimensional Subwavelength Metallic Gratings

Zhou Wenchao^{1,2} Wu Yihui¹ Hao Peng¹ Liu Guigen¹ Li Kaiwei^{1,2}

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to achieve the miniature and integration of the optical devices in multi-wavelength array detection, a novel transmission filter based on subwavelength metallic grating guided mode resonance is proposed. The resonance characteristics of the filters with symmetric and nonsymmetric waveguide structure are theoretically analyzed. The effects of the grating structural parameters on the transmission spectrum are investigated in detail, such as filling factor, grating thickness, the sidewall angle, et al. And the optimal scope of the grating structure is also presented. Simulation results show that the peak position and the full width at half maximum (FWHM) of the filter are attributed to the grating period and the buffer layer. And the FWHM can be adjusted from 2 nm to 45 nm, the maximum transmittance increases to 81.7%. Besides, the transmission spectrum is independent on the polarization of the incident field due to the symmetry of the subwavelength metallic grating. The filters can satisfy the requirements of microfluidic and biosensing and so on.

Key words gratings; guided mode resonance; bandpass filter; bandwidth

OCIS codes 050.1950; 090.1970; 050.6624; 120.2440

1 引言

透射滤光片具有非常广泛的应用,例如光谱分

析、光学传感、液晶显示等^[1-3],目前,随着光电器件的集成化,透射滤光片也逐渐朝着更小、高效、低耗

收稿日期: 2013-05-14; 收到修改稿日期: 2013-07-08

基金项目: 国家 863 计划(2012AA040503)、国家自然科学基金重点项目(11034007)、国家杰出青年基金(61102023)、吉林省科技发展计划项目(20120329)

作者简介: 周文超(1987—),男,博士研究生,主要从事微流控芯片光学检测、金属滤光片等方面的研究。

E-mail: zhouwenchao666@126.com

导师简介: 吴一辉(1965—),女,研究员,博士生导师,主要从事微光机电系统、光学传感器、声波传感器等方面的研究。

E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

等方向发展以适应市场的需求^[4]。微流控芯片由于其独特的优点在生物化学检测中的地位显得尤为重要^[5],实现真正意义上芯片实验室的关键是在一个芯片上实现分析检测功能集成化。基于吸光度方法的光学阵列检测中,透射滤光片是非常重要的光学元件。传统透射滤光片往往都是基于多层膜法布里-珀罗(F-P)腔的多光束干涉进行设计^[6],为得到窄带滤光片通常需要高达50~60层的薄膜材料,同时为抑制旁瓣得到宽截止带宽的滤光片,往往利用染料或者金属薄膜的吸收^[1],但这在很大程度上降低了峰值透射波长的透过率,并且薄膜层数越多,薄膜加工过程中不同材料受热应力、压力等因素的影响越大,所以可选择薄膜材料非常有限。另外,尺寸越小对于基于多层膜设计的多波长滤光片工艺要求越苛刻且不同波长之间存在串扰^[7-8]。随着纳米加工技术的发展,导模共振滤光片由于设计结构简单、衍射效率高、半峰全宽(带宽)窄等优点引起了越来越多的关注^[9-14]。但大部分研究都是基于介质光栅的导模共振特性得到反射滤光片,对于金属光栅的研究较少。或者基于一维金属光栅^[15-18],集中于偏振敏感的液晶显示与成像领域的研究,但偏振特性会降低入射光的利用效率。为满足阵列化光学检测中尺寸要求以及解决低能量利用率的问题,设计了

一种基于二维金属光栅导模共振特性的透射滤光片,该滤光片的性能不受限于波导结构,利用缓冲层调节带宽。基于平板波导理论详细研究了波导对称和非对称两种不同结构的共振特性,利用严格耦合波分析方法(RCWA)^[19-20]数值模拟分析了缓冲层厚度、光栅占空比、金属光栅厚度、光栅侧壁角度等对透射谱线的影响。以工作波长0.551 μm为例介绍了二维亚波长滤光片金属光栅结构的优化范围。

2 结构设计与原理

图1为所设计的二维金属光栅透射滤光片结构示意图,同一入射光在不同光栅周期下得到不同的透射波长。该滤光片由二维亚波长金属光栅、缓冲层、波导层和基底四层结构组成。入射介质为空气(折射率为1),缓冲层、波导层和基底的折射率分别为 n_0, n_1 和 n_2 ,缓冲层和波导层厚度分别为 h_0 和 h 。光栅周期为 $P(P < \lambda)$,光栅厚度为 h_m ,二维金属光栅在 x, y 两个方向的占空比均为 $f, f = \Gamma/P$,其中 Γ 为光栅在 x, y 方向的长度。金属光栅实际加工过程中,反应离子刻蚀(RIE)或者聚焦离子束(FIB)干法刻蚀往往引起光栅侧壁的宽度变化,侧壁角度 $\alpha = 0$ 时,光栅结构为一矩形光栅。

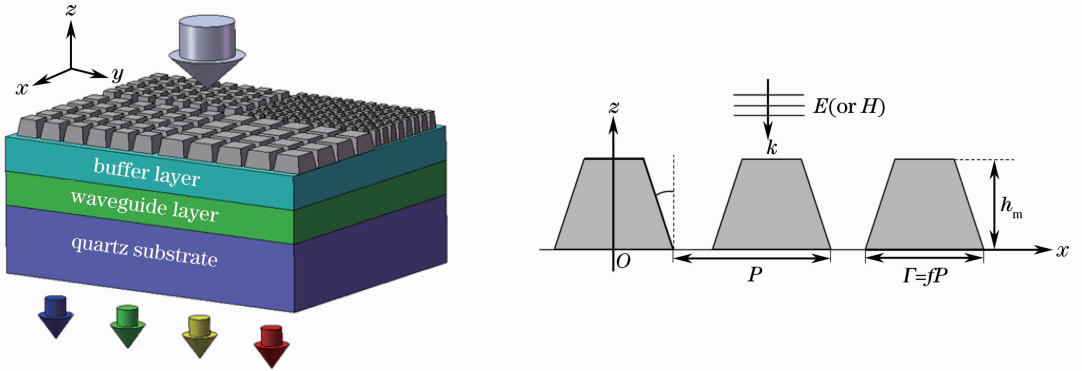


图1 二维亚波长金属光栅透射滤光片示意图

Fig. 1 Schematic view of two-dimensional subwavelength metallic grating filter

导模共振效应是指光栅波导支持的导模由于受到衍射光栅的作用引起衍射场能量的重新分配^[9]。利用介质光栅的导模共振效应可以设计窄带宽反射式滤光片,对于金属光栅来说,周期性结构产生表面等离子激元(SPP)波^[21],当某一SPP波模式与波导层的导模位相匹配时,两者之间发生共振,因此可以把上述原理理解为金属光栅的导模共振特性,共振波长取决于滤光片结构中的波导层、基底和缓冲层折射率、波导层厚度以及二维金属光栅的周期,基于

SPP波设计的滤光片避免了多波长之间的串扰^[22]。二维金属光栅周期结构在金属光栅表面激发多个SPP波模式,为了得到单峰值的透射滤光片,波导层结构应该满足单模条件,利用波导的单模特性实现不同SPP波的模式选择。假设 $n_1 > n_2 \geq n_0$,根据平板波导理论特征方程^[23-24],满足单模条件的波导层截止厚度为

$$h_c = \frac{\lambda_c(m\pi + \phi_0)}{2\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}, \quad (1)$$

式中 λ_c 为截止波长, m 为模式序数, ϕ_0 为 n_0/n_1 界面发生全反射时的相位变化, 截止状态下 n_1/n_2 界面的相位变化 $\phi_1 = 0$ 。

根据不同偏振态下发生全反射时界面的相位变化^[23], 可得

$$h_c = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \left\{ m\pi + \arctan \left[\left(\frac{n_1}{n_0} \right)^{2q} \sqrt{\frac{n_2^2 - n_0^2}{n_1^2 - n_2^2}} \right] \right\} \quad (\text{TE: } q = 0, \text{ TM: } q = 1), \quad (2)$$

(2)式表明, 不同导模模式在同一波长下的截止厚度取决于每层的折射率以及传输光的偏振特性。设计的滤光片工作波段范围内, 为满足单模传输条件, 波导层的厚度应该小于 TE 偏振状态下最小波长 1 阶模式的截止厚度 h_{\max} , 同时大于 TM 偏振状态下最大波长基模的截止厚度 h_{\min} , 即 $h_{\min} < h < h_{\max}$, 其中

$$h_{\min} = \frac{\lambda_{\max}}{2\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \cdot \arctan \left[\left(\frac{n_1}{n_0} \right)^2 \sqrt{\frac{n_2^2 - n_0^2}{n_1^2 - n_2^2}} \right], \quad (3)$$

$$h_{\max} = \frac{\lambda_{\min}}{2\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \left(\pi + \arctan \sqrt{\frac{n_2^2 - n_0^2}{n_1^2 - n_2^2}} \right), \quad (4)$$

式中 λ_{\min} , λ_{\max} 分别为工作波段范围的最小和最大波长。

(3)、(4)式适用于波导对称与非对称两种结构, 特殊地, 当波导形式为对称结构 ($n_0 = n_2$) 时, $h_{\min} = 0$, 此时基模截止厚度为零, 即任意波长在任一厚度基模都存在; $h_{\max} = \frac{\lambda_{\min}}{2 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$ 为在工作波段内 1 阶波导模式可以存在的波导层最小截止厚度。

导模共振时, 某一 SPP 波模式与导模模式位相匹配, 根据波导横向谐振条件和光栅方程^[23]可得

$$h \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta_j^2} - \arctan \left[\left(\frac{n_1}{n_0} \right)^{2q} \sqrt{\frac{\beta_j^2 - n_0^2 k_0^2}{n_1^2 k_0^2 - \beta_j^2}} \right] - \arctan \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^{2q} \sqrt{\frac{\beta_j^2 - n_2^2 k_0^2}{n_1^2 k_0^2 - \beta_j^2}} \right] = m\pi, \quad (\text{TE: } q = 0, \text{ TM: } q = 1), \quad (5)$$

式中自由空间波数 $k_0 = 2\pi/\lambda$, $\beta_j = k_0(n_c \sin \theta_c \pm j\lambda/P)$, j 为衍射级次, θ_c 为入射介质中传输光的入射角度, 入射光垂直入射时, 由于金属光栅为亚波长结构, 除 0 级以外的高级次的衍射波均为消逝形式, 本文考虑 1 级衍射波与波导中导模模式发生共振, 即 $\beta_1 = 2\pi/P$ 的情况。波导对称结构 ($n_0 = n_2$) 有

$$h \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta_j^2} - 2 \arctan \left[\left(\frac{n_1}{n_0} \right)^{2q} \sqrt{\frac{\beta_j^2 - n_0^2 k_0^2}{n_1^2 k_0^2 - \beta_j^2}} \right] = m\pi, \quad (\text{TE: } q = 0, \text{ TM: } q = 1), \quad (6)$$

滤光片中波导材料和结构一定时, 由(5)、(6)式可知共振波长与金属光栅周期 P 存在对应关系, 由于(5)、(6)式均为超越方程, 只能通过数值计算的方法得到两者之间的对应曲线, 然后在工作波段内设计得到滤光片的光栅周期。

3 数值计算与分析

首先, 利用 RCWA^[19-20] 验证上述金属光栅的导模共振特性, 对于图 1 中所示结构, 在可见光工作波段内, 分别设计波导对称与非对称两种结构, 基底材料为石英晶体 (SiO_2 , $n_2 = 1.45$)。为得到宽截止带宽, 光栅材料需要满足除共振波长外其它波长均有高反射, 仿真计算中两种结构的光栅材料为铝 (Al), 二维金属光栅的占空比 $f = 0.85$, 光栅厚度为 40 nm, 侧壁角度 $\alpha = 0$ 。波导对称结构中, 缓冲层的材料与基底材料一致, 波导层的材料为 Si_3N_4 ($n_1 = 2.0$), 缓冲层和波导层的厚度均为 100 nm, 满足波导单模条件; 非对称结构中缓冲层的材料为低折射率材料 MgF_2 ($n_0 = 1.38$), 厚度为 100 nm, 波导层的材料也选择 Si_3N_4 ($n_1 = 2.0$), 厚度为 80 nm。

图 2(a)和(c)分别为波导对称结构和非对称结构共振波长在不同光栅周期下的变化曲线, 二维光栅周期依次为: 0.25 (波导非对称结构中为 0.27 μm)、0.3、0.35、0.4 μm 。图 2(b)和(d)分别为理论模型结果和 RCWA 仿真结果对比, 图中蓝色直线为(5)、(6)式利用 Matlab 软件数值计算解, 红色实方框为图 2(a)和(c)中 5 个不同光栅周期对应的峰值波长。从图 2 仿真计算结果中可以看出, 无论是对称波导还是非对称波导结构, 随着光栅周期的增加, 峰值透射波长红移, 不同周期下对应的共振波长与理论分析结果完全一致。

波长为 0.55~0.65 μm 的光广泛用于数据存储、光纤通讯、激光陀螺和光学传感等领域, 因此, 设计工作波长为 0.551 μm 的透射滤光片, 给出了该波长下二维金属光栅的最优设计参数范围。峰值透射波长 0.551 μm 下光栅周期 $P = 0.35 \mu\text{m}$, 为更好地理解在峰值波长处产生共振, 分析了对称波导结构中共振波长 0.551 μm 下的电磁场分布图, 即图 2(a)中 A 点, 入射光为 TM 偏振, 电磁场分量 H_y 的振幅与相位变化, 如图 3 所示, 从图 3 中可以看出, 在峰值透射波长位置, 波导层中形成一驻波产生共振。此峰值透射波长下的共振是二维的, 在 x 、 z 方向都存在波矢量, x 方向的波矢抑制传输, z 方向的波矢支持传输^[17]。

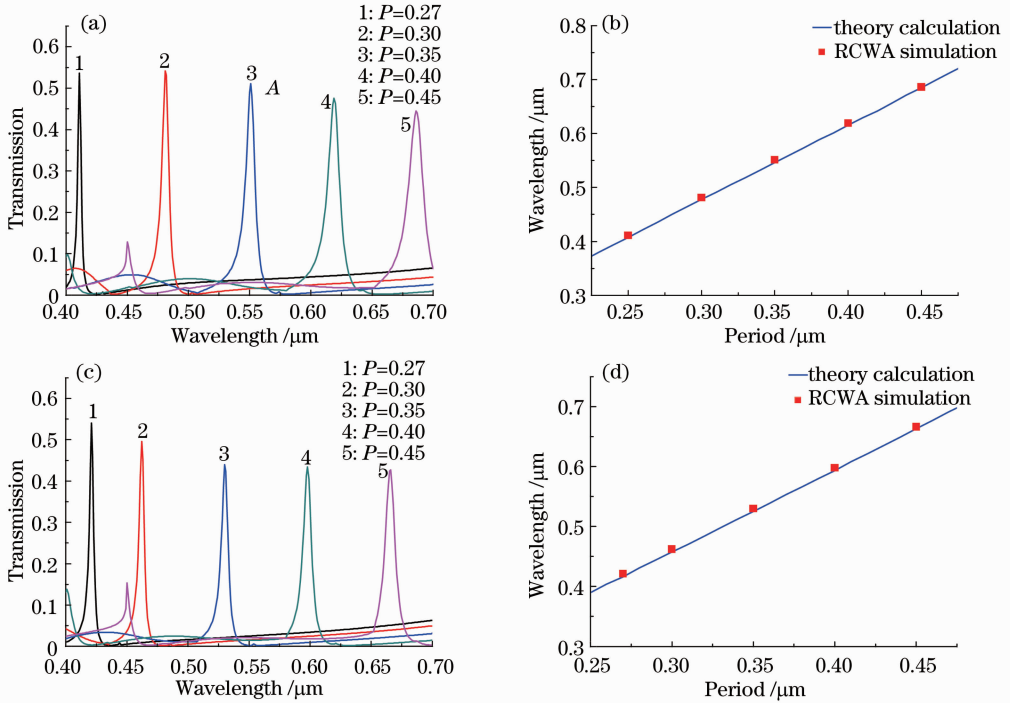


图 2 (a)波导对称和(c)非对称结构滤光片共振波长随光栅周期的变化；(b)波导对称和 (d)非对称结构理论分析与仿真计算对比图

Fig. 2 (a) Transmission spectra of different grating periods with the symmetric and (c) nonsymmetric structures; Comparison between (b) calculated results and (d) analytical results of symmetric and nonsymmetric structures

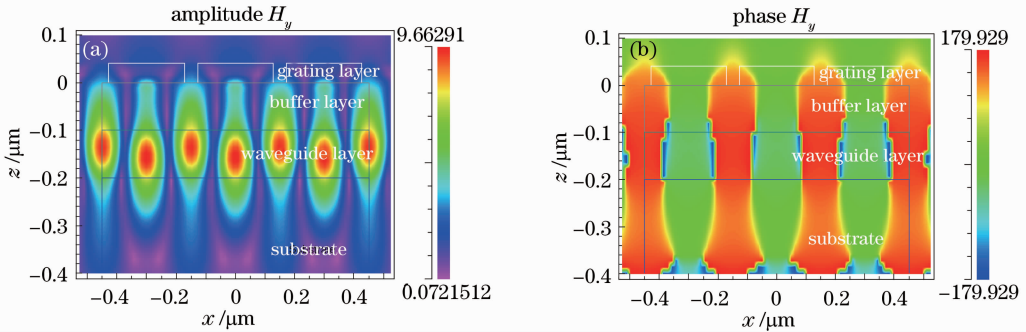


图 3 对称波导结构下磁场分量 H_y 在共振波长处的(a)振幅及(b)相位变化

Fig. 3 (a) Amplitude and (b) phase of the magnetic field H_y at the resonance wavelength with the symmetric waveguide structure

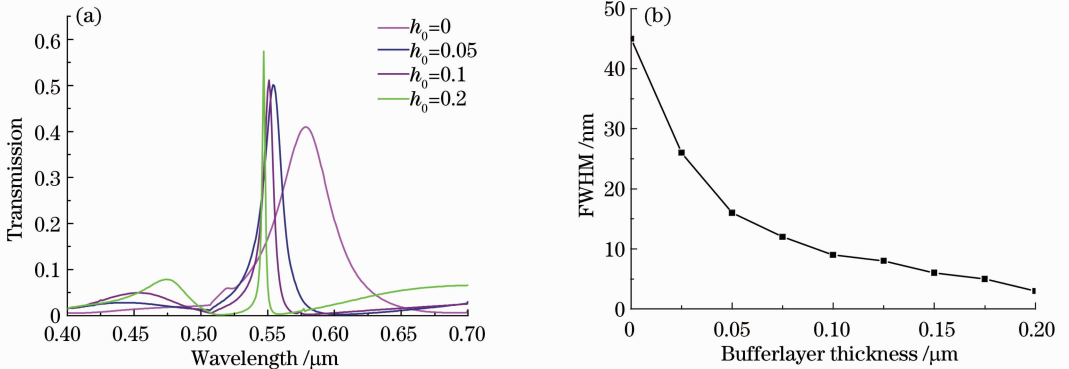


图 4 (a)不同厚度缓冲层的透射光谱；(b)不同缓冲层对应的半峰全宽

Fig. 4 (a) Transmission spectra with different buffer layers; (b) FWHM of different buffer layers

不同缓冲层厚度可实现峰值透射波长带宽的调谐,如图 4 所示,缓冲层的厚度越大,带宽越小。这是因为缓冲层可以通过控制金属光栅与波导层之间的耦合强度来改变波导层内共振 Q 值,缓冲层厚度越大,金属光栅引起的损耗越小,波导层 Q 值越大,带宽变窄;反之亦然^[15]。从图 4 中还可以看出,带宽的调节范围为 2~45 nm,同时带宽变窄时,峰值波长稍微发生蓝移,根据不同的适用场合设计不同带的滤光片。

金属光栅的占空比是光栅设计的一个重要参数,为更好地理解占空比对峰值透射谱线的影响,数值计算了不同占空比对于最大透射率的影响,如图 5 所示。从图中可以看出,占空比不影响共振波长,只影响透射波长的透射率,占空比越小,峰值透射率越大,最大透射率高达 81.7%,但是随着占空比的减小,峰值透射波长附近出现一个次峰值(图 5 中白色圈内),这是由于二维金属光栅中,任意偏振态的入射光在光栅衍射过程中能够同时激发 TM 模式和 TE 模式^[25],在保证足够透射率的前提下,可以适当增加 f 值抑制次峰值的产生,从图 5 中可以看出占空比 f 的最佳范围为 0.75~0.85。

由于二维金属光栅结构的对称性,所以无论波导对称还是非对称结构,峰值透射波长偏振无关,图 6(a)为透射谱线的偏振特性,其中偏振角 δ 如图 6(b)所示。

从图 7 中可以看出光栅厚度不改变共振波长的位置,随着厚度的增加,透射率逐渐减小,当厚度位

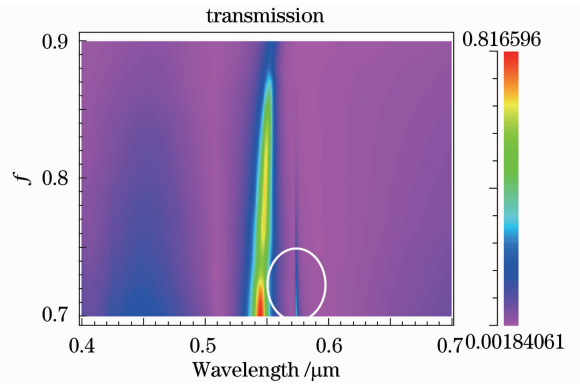


图 5 占空比对透过率的影响

Fig. 5 Effect of fill factor on transmission spectrum

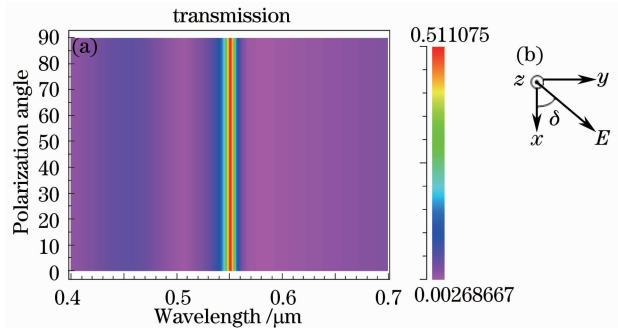


图 6 (a)入射光的偏振方向对透射的影响;(b)偏振角 δ
Fig. 6 (a) Effect of polarization of incident light on transmission spectrum; (b) polarization angle δ

于 0.08~0.12 μm 之内时,透射率急剧变小,此时产生最大吸收峰,这可能是由于导模与光栅腔模之间的耦合作用引起的。为了得到高透射率的透射滤光片,二维金属光栅的最佳厚度是 0.02~0.06 μm 与 0.12~0.24 μm 。

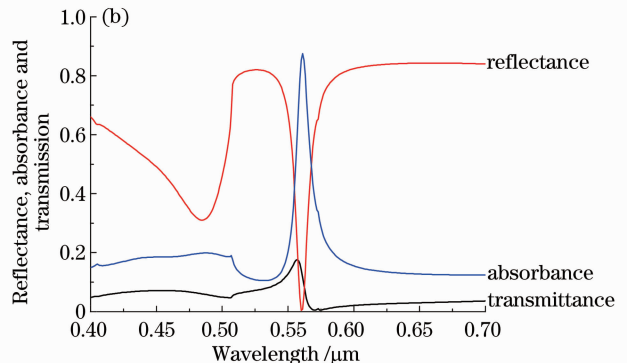
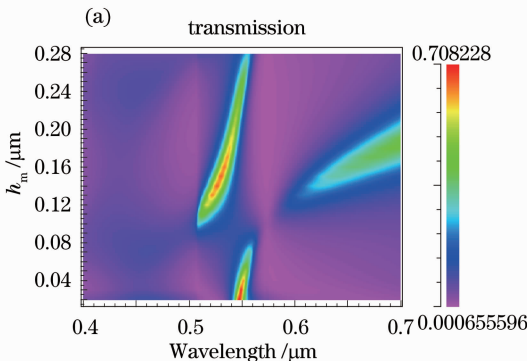


图 7 (a)不同光栅厚度透射谱线;(b)光栅厚度为 0.08 μm 时反射、透射和吸收谱线

Fig. 7 (a) Transmission spectra of different metallic grating thicknesses; (b) transmittance, reflectance and absorbance of metallic grating with thickness of 0.08 μm

为了使所设计的滤光片中的金属光栅更接近实际工艺加工过程中的光栅结构,从图 8 中可以看出,随着光栅槽侧壁倾角的增大,峰值波长的透射率逐

渐增大,但是在 24°和 36°附近会产生透射最小值,因此实际加工过程中需要避免这两个角度。

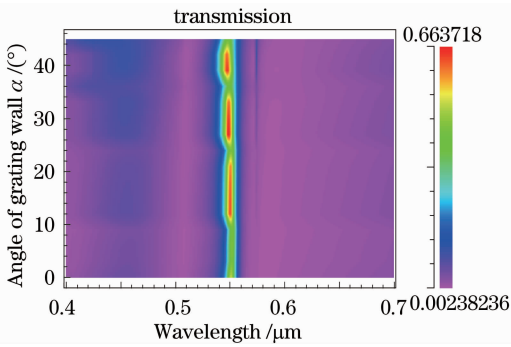


图 8 光栅侧壁角度 α 对透射率的影响

Fig. 8 Effect of angle of grating wall α on transmission

4 结 论

从理论上研究了基于金属光栅导模共振原理的透射滤光片,仿真计算了各个结构参数对于透射谱线的影响,并给出了滤光片设计的优化参数范围。研究表明,通过改变金属光栅的周期和缓冲层的厚度可以改变滤光片的峰值透射波长和带宽,带宽的调节范围为 $2\sim 45$ nm,影响透射率的光栅结构参数包括占空比、侧壁角度和光栅厚度等。由于所设计的滤光片性能主要取决于金属光栅周期结构,因此可以在很小的尺寸上一次性加工出多波长阵列滤光片,加上所设计的滤光片利用了表面等离子激元的局域化效应,所以便于集成,同时避免了波长之间的串扰,且可以提高透射率,最大透射率为 81.7% 。这为解决微流控芯片、生物检测等集成阵列化探测中滤光片的设计提供了参考。

参 考 文 献

- 1 E H Cho, H S Kim, B H Cheong, *et al.*. Two-dimensional photonic crystal color filter development [J]. *Opt Express*, 2009, 17(10): 8621–8629.
- 2 Y Yeh, S H Park. Fiber-optic tunable filter with a concave mirror [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(4): 626–628.
- 3 R Magnusson, Y Ding. MEMS tunable resonant leaky mode filters [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(14): 1479–1481.
- 4 Y J Liu, G Y Si, E S P Leong, *et al.*. Optically tunable plasmonic color filters [J]. *Appl Phys A*, 2012, 107(1): 49–54.
- 5 R Gorkin, J Park, J Siegrist, *et al.*. Centrifugal microfluidics for biomedical applications [J]. *Lab Chip*, 2010, 10(14): 1758–1773.
- 6 S Boutami, B Benbakir, X Letartre, *et al.*. Ultimate vertical Fabry-Perot cavity based on single-layer photonic crystal mirrors [J]. *Opt Express*, 2007, 15(19): 12443–12449.
- 7 L Frey, P Parrein, J Raby, *et al.*. Color filters including infrared cut-off integrated on CMOS image sensor [J]. *Opt Express*, 2011, 19(14): 13073–13080.
- 8 Q Chen, D R S Cumming, *et al.*. High transmission and low color cross-talk plasmonic color filters using triangular-lattice hole arrays in aluminum films [J]. *Opt Express*, 2010, 18(13):

14056–14062.

- 9 S S Wang, R Magusson. Theory and applications of guided-mode resonance filters [J]. *Appl Opt*, 1993, 32(14): 2606–2613.
- 10 R Magusson, S S Wang. Transmission bandpass guided-mode resonance filters [J]. *Appl Opt*, 1995, 34(35): 8106–8109.
- 11 W X Liu, Z Q Lai, H Guo, *et al.*. Guided-mode resonance filters with shallow grating [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(6): 865–867.
- 12 Kong Weijin, Zheng Bingbin, Yun Maojin, *et al.*. Guided-mode resonance filter with narrow waveband for three primary colors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1005006.
孔伟金, 郑併斌, 云茂金, 等. 基于导模共振效应三色色窄带滤光片的研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1005006.
- 13 Xu Banglian, Huang Yuanshen, Wang Qi, *et al.*. Reproducing colored image with guided-moderesonance gratings array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1205002.
徐邦联, 黄元申, 王琦, 等. 基于导模共振光栅阵列的彩色图像再现[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1205002.
- 14 Ma Weitao, Zhou Jun, Huang Shuiping, *et al.*. Characteristic of subwavelength dielectric grating with metal layer and its sensing applications [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(9): 0905008.
马伟涛, 周骏, 黄水平, 等. 金属膜衬底上亚波长介电光栅结构的特性及传感应用[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0905008.
- 15 A F Kaplan, T Xu, L J Guo. High efficiency resonance-based spectrum filters with tunable transmission bandwidth fabricated using nanoimprint lithography [J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 99(14): 143111.
- 16 E Sakat, G Vincent, P Ghenuche, *et al.*. Guided mode resonance in subwavelength metallodielectric free-standing grating for bandpass filtering [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(16): 3054–3056.
- 17 Z J Sun, Y Yang, X L Zuo. Narrow-band optical transmission of metallic nanoslit arrays [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(17): 171106.
- 18 E Sakat, G Vincent, P Ghenuche, *et al.*. Free-standing guided-mode resonance band-pass filters: from 1D to 2D structures [J]. *Opt Express*, 2012, 20(12): 13082–13090.
- 19 M G Moharam, T K Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of metallic surface-relief gratings [J]. *J Opt Soc Am A*, 1986, 3(11): 1780–1787.
- 20 S Peng, G M Morris. Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings [J]. *J Opt Soc Am A*, 1995, 12(5): 1087–1096.
- 21 Gao Xingyu, Ning Lihua. Optical properties of surface plasmons excited by metallic nanostructure waveguides [J]. *Laser & Optoelectron Progress*, 2011, 48(4): 042401.
高兴宇, 宁黎华. 金属纳米结构波导激发表面等离子体的光学特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(4): 042401.
- 22 S Yokogawa, S P Burgos, H A Atwater. Plasmonic color filter for CMOS image sensor applications [J]. *Nano Lett*, 2012, 12(8): 4349–4354.
- 23 M Born, E Wolf. *Principle of Optics; Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* [M]. London: Cambridge University Press, 1999. 73–75, 529.
- 24 Ming Hai, Zhang Guoping, Xie Jianping. *Opto-Electronics Technology* [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1998. 23, 71.
明海, 张国平, 谢建平. *光电子技术* [M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1998. 23, 71.
- 25 S Boonruang, A Greenwell, M G Moharam. Multiline two-dimensional guided-mode resonant filters [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(22): 5740–5747.

栏目编辑: 何卓铭