

入射角调谐的三基色导模共振滤光片

杨 赛 盛 斌* 张大伟 钱林勇 陈 鹏 黄元申

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200082

摘要 介绍一种入射角调谐红绿蓝三基色导模共振滤光片(GMRF)的实现方法。利用严格耦合波理论(RCWA)分析入射角对导模共振滤光片反射光谱的影响,用TM偏振波在斜入射下得到两个不同位置的共振峰,通过调节入射角,使两个共振峰分别落在可见光波段和红外波段,并通过调整角度实现对可将光波段滤波波长的调谐。通过对参数的优化、调整,设计并制作了周期为544 nm的红、绿、蓝三基色导模共振彩色滤光片,结果显示该结构在26.8°、39.6°、46.0°入射角得到了良好的红、绿、蓝三基色,效率均在80%左右,半峰全宽约为5 nm。当其作为蓝、绿两色滤光片工作时,与传统亚波长导模共振结构相比,其周期相对较长,从而大大降低光栅制作难度。实验结果实现导模共振结构在彩色滤光片方面的应用,并对大周期导模共振器件的制作提供了积极的指导。

关键词 光学设计; 彩色滤光片; 导模共振; 亚波长结构; 严格耦合波理论

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0416002

Guided-Mode Resonance Filter for Three Primary Color Tuned by Incident Angle

Yang Sai Sheng Bin Zhang Dawei Qian Linyong Chen Peng Huang Yuanshen

College of Optical & Electronic Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200082, China

Abstract A method of designing guided-mode resonance filter (GMRF) for three-primary-color is proposed under oblique incidence. The effects of incident angle on the guided-mode resonance filter reflection spectrum are investigated with the method of rigorous coupled wave analysis (RCWA). A single resonance splits into two formants under oblique incidence by TM-polarized light. By adjusting incident angle, one resonance wavelength is located in visible wavelength range, and the other one falls inside the infrared spectrum and the wavelength of the visible light can be tuned by incident angle. A 544 nm grating period guided-mode resonance filter is designed and fabricated for three-primary-color by adjusting and optimizing the parameters of the device. The fabricated filter exhibits blue, green and red color responded at incident angles of 26.8°, 39.6°, 46.0° and it has a bandwidth of 5 nm with efficiency near 80%. Besides, when it works as blue and green color filter, it has a larger period compared with traditional sub-wavelength structure and greatly reduces the cost of grating fabrication. The experimental result promotes the application of guided-mode resonance structure in color filters and it has active guidance meaning for the fabrication of large-period guided-mode resonance device.

Key words optical design; color filter; guided-mode resonance; sub-wavelength structure; rigorous coupled wave analysis

OCIS codes 220.4241; 230.4000; 230.7408; 300.6550

1 引 言

彩色滤光片广泛应用于显示仪器、图像传感器等设备上,如电视机,投影仪,数码相机等^[1-3]。传统的滤

收稿日期: 2014-11-14; 收到修改稿日期: 2014-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(11105149)、科技部重大仪器专项(2012YQ170004)

作者简介: 杨 赛(1990—),男,硕士研究生,主要从事离子束刻蚀、微纳光学器件等方面的研究。E-mail: 995690553@qq.com

导师简介: 张大伟(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事微纳光学器件和工程等方面的研究。E-mail: usstoe@vip.163.com

* 通信联系人。E-mail: bsheng@usst.edu.cn

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

光片制作方法存在一些明显的弊端,如工艺步骤繁琐,色纯度低及成本高。为解决这些问题,许多研究人员做了广泛的工作来获得传统滤光片的替代结构。Kanamori等^[14]通过在石英基底上面制作硅材料的亚波长光栅结构获得了透射型彩色滤光片;Yoon等^[15]报道了一种在多晶硅上面制作的亚波长光栅结构的彩色滤光片。这些结构显示出了一些独特性能,但是没有解决低峰值效率及高旁带的问题,会严重影响彩色滤光片的单色性能。

近年来,一种基于亚波长波导光栅的导模共振滤光片(GMRF)得到了广泛关注,对于周期性的亚波长光栅结构,当高级次衍射光与波导所支持的某一泄漏模相位匹配时,会产生高衍射效率的反射或者透射峰,这种现象称为导模共振效应^[6]。王琦等^[17]提出利用导模共振效应制作反射式彩色滤光片阵列可以实现无油墨印刷;张大伟等^[18-19]研究了表面镀膜对GMRF性能的影响以及方位角调谐的窄带GMRF的设计;周文超等^[10]设计了一种基于亚波长金属光栅导模共振原理二维结构的透射滤光片;陈志勇等^[11]设计了一种基于超低折射率为衬底的大角度偏振无关蜂窝状空气孔型结构的二维硅基光子晶体宽带滤波器;马靖等^[12]利用光散射与导模共振理论设计了一种薄膜太阳能电池的陷光结构来有效提升自身光吸收率。导模共振效应对入射光与泄漏模发生相位匹配时的敏感特性及其极窄的共振峰、高峰值效率、低旁带的优点使其成为获得高纯度滤光片一个更好的选择^[13-16]。

为方便实现导模共振效应,多数研究者主要制作亚波长周期性导模共振结构,即结构周期比共振波长的数值小几十甚至几百纳米^[17-21]。而在亚波长导模共振器件的制造过程中,精确控制光栅占空比及其周期面临很大困难,光栅周期与槽深的误差会造成设计波长的偏离;同时制作过程中有时还需要用到昂贵的电子束直写设备等,制造过程费时费力。目前对于非亚波长结构的导模共振器件的研究鲜有涉及,制作大周期GMRF可以有效解决这一难题,对导模共振器件的实际使用有很大帮助。针对这一问题,设计并制作了红、绿、蓝三基色的GMRF,器件工作时通过调整入射角,可得到红、绿、蓝三基色;制作得到的光栅周期为544 nm,工作于绿光和蓝光时,与传统亚波长导模共振结构相比,周期大于工作波长,减小了制作难度及误差。

2 入射角对导模共振效应的影响

2.1 理论分析与结构设计

将光栅看作被调制的平面波导,利用严格耦合波理论进行分析,就可以近似得到发生导模共振的位置。图1为单层平面波导光栅模型,(I)区为覆盖层,介电常数为 ϵ_1 ; (II)区为波导光栅层,可将其近似看作均匀膜层,介电常数为 ϵ_2 ; (III)区为基底层,介电常数为 ϵ_3 。当入射波入射到光栅时,其产生的高级次衍射光场与波导所支持的导模相位匹配时,就会发生导模共振现象。当以TE偏振波(电场矢量垂直于入射面)入射时,其在波导中传播的耦合波方程为

$$\frac{d^2 \hat{S}_i(z)}{dz^2} + \left[k^2 \epsilon_g - k_2 (\sqrt{\epsilon_g} \sin \theta - i\lambda/\Lambda)^2 \hat{S}_i(z) + 1/2 k^2 \Delta \epsilon [\hat{S}_{i+1}(z) + \hat{S}_{i-1}(z)] \right] = 0, \quad (1)$$

式中 \hat{S}_i 为*i*级次非均匀平面波的振幅, $k = 2\pi/\lambda$, Λ 为光栅周期, ϵ_g 为光栅层折射率,将其看作均匀层时, $\Delta \epsilon \rightarrow 0$, $\epsilon_2 = \epsilon_g$,此时(1)式简化为

$$\frac{d^2 E(z)}{dz^2} + (k^2 \epsilon_g - \beta^2) E(z) = 0, \quad (2)$$

β 为传播常量, $\Delta \epsilon \rightarrow 0$ 时, $\beta \rightarrow \beta_i = k(\sqrt{\epsilon_g} \sin \theta - i\lambda/\Lambda)$ 。由未调制平板波导的本征值方程可以得到横向电场(TE)波相应的本征方程为^[22-23]

$$\tan(k_i d) = \frac{k_i (\gamma_i + \delta_i)}{k_i^2 - \gamma_i \delta_i}, \quad (3)$$

式中 $k_i = (\epsilon_g k^2 - \beta_i^2)^{1/2}$, $\gamma_i = (\beta_i^2 - \epsilon_1 k^2)^{1/2}$, $\delta_i = (\beta_i^2 - \epsilon_3 k^2)^{1/2}$ 。

对于TM波则相应地有:

$$\tan(k_i d) = \frac{\varepsilon_g k_i (\varepsilon_3 \gamma_i + \varepsilon_1 \delta_i)}{\varepsilon_1 \varepsilon_3 k_i^2 - \varepsilon_g^2 \gamma_i \delta_i} \quad (4)$$

当其他结构参数确定后,通过(3)、(4)式可获得TE、横向磁场(TM)偏振态下,导模共振波长与入射角 θ 间的关系。关于导模共振效应的理论分析,在文献[24-25]中有更为详尽的理论推导。

所设计的三基色 GMRF 结构如图2所示,该结构由3层构成:光栅层,波导层及基底层。最下面是基底层,上面一层为波导层, d_w 为厚度, n_w 为折射率;波导层上面是一层光刻胶的光栅结构, Λ 为周期, d_g 为厚度, f_Λ 为占空比。

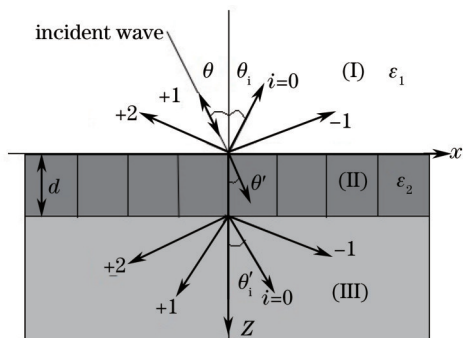


图1 单层平面波导光栅模型

fig.1 Model of single-layer planar waveguide grating

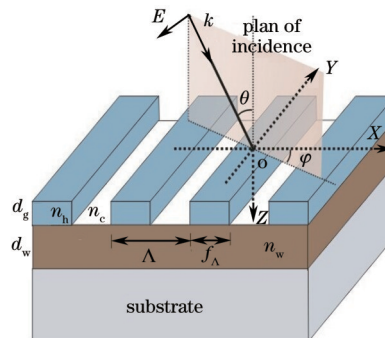


图2 红绿蓝三基色 GMRF 的设计结构

Fig.2 Schematic of GMRF for three-primary-color

2.2 角度对导模共振效应的调谐特性分析

(3)、(4)式为依据严格耦合波理论(RCWA)推导而来,RCWA^[26-27]是一种基于麦克斯韦(Maxwell)方程的严格波矢量分析方法。为研究不同入射角对导模共振效应的影响,利用基于RCWA的Gsolver软件进行了模拟,模拟结果如图3所示。

TM 偏振波入射时,不同入射角下峰值波长的变化情况如图3所示,黑色曲线为正入射情况($\theta=0^\circ$),单一的共振峰出现在 836 nm 处。随着入射角增大,共振峰分裂为两个,且光栅衍射+1级激发导模共振的峰值波长向长波方向移动,-1级激发导模共振的峰值波长向短波方向移动;红色曲线为 3° 入射,共振峰分裂成两个,峰值波长分别为 809 nm 和 863 nm;蓝色曲线为 10° 入射,峰值波长分别为 748 nm 和 927 nm。

图4为以TM偏振光入射时,峰值波长随入射角($0^\circ \sim 80^\circ$)的变化情况,在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 之间,角度对峰值波长有很好的线性调谐,随着角度的增大,角度对峰值波长的调谐不再为线性关系。并且在入射角为 $15.8^\circ \sim 75.0^\circ$ 之间,-1级激发导模共振的峰值波长落在 $400 \sim 700$ nm 的可见光波段,+1级激发导模共振的峰值波长则向长波方向移动而落在红外区域,这样就可以通过选取合适的入射角度来分别实现红、绿、蓝三基色 GMRF 功能。图3、4中数据为Gsolver软件所模拟,其中以TM偏振光入射,基底层为BK7玻璃;波导层为氧化锌,其厚度 d_w 为 140 nm,折射率 n_w 为 1.95;波导层上面是一层光刻胶的光栅结构,周期 Λ 为 550 nm,槽深为 120 nm,

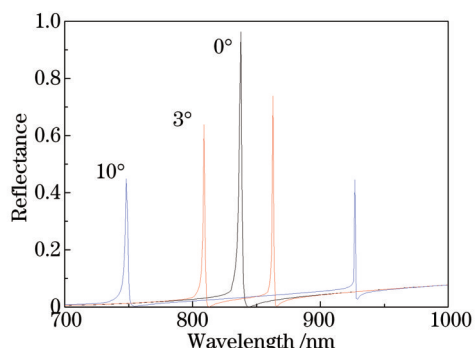


图3 所设计 GMRF 在 $0^\circ, 3^\circ, 10^\circ$ 入射时的反射光谱
Fig.3 Reflection spectra of GMRF at incident angles of $0^\circ, 3^\circ, 10^\circ$

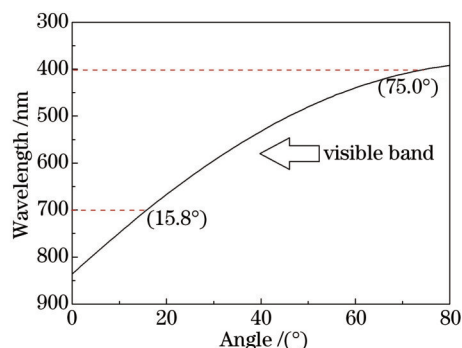


图4 TM 偏振波入射时角度对峰值波长的调谐特性曲线
Fig.4 Tunable property of peak wavelength with different incident angles of TM polarization mode

占空比 0.55。

3 入射角调谐红绿蓝三基色 GMRF 的设计与模拟结果

以相同结构参数模拟并记录了从 $0^\circ \sim 80^\circ$ 不同入射角下, 峰值波长的移动情况及对应峰值效率。其中, 在红光光谱范围内, 28.5° 入射时, 在 605 nm 波长处其峰值效率达到最大, 为 88%; 同样, 在绿光光谱范围内, 38.0° 入射时, 在 544 nm 波长处其峰值效率达到最大, 为 95%; 在蓝光光谱范围内, 47.4° 入射时, 在 493 nm 波长处其峰值效率达到最大, 为 97%。

图 5 为所设计的红绿蓝三基色 GMRF 的反射光谱, 图中数据同为 Gsolver 软件所模拟, 参数与图 4 相同。从图 5 可以看出, 在 28.5° 、 38.0° 、 47.4° 入射角下 GMRF 的峰值波长分别为 605、544、493 nm, 且峰值效率都在 90% 左右, 蓝色 GMRF 的峰值效率更是达到了 97%。其半峰全宽分别为 2.4 nm(红)、2.6 nm(绿)和 2.9 nm(蓝), 旁带的反射效率都控制在 5% 以下。这样高效率、窄半宽、低旁带的特性正是 GMRF 所需具备的。并且作为绿、蓝色滤光片工作时, 周期 550 nm 大于工作波长, 相较于传统的亚波长结构, 实现了通过调整入射角来制作较大周期的 GMRF。

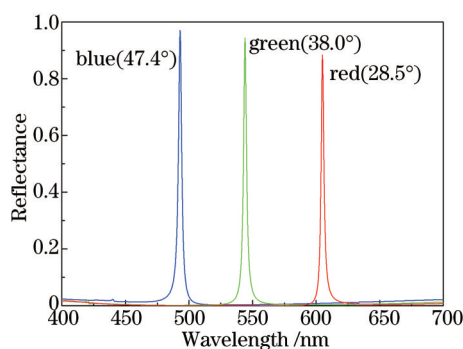


图 5 设计红绿蓝三基色 GMRF 反射光谱

Fig.5 Reflection spectra of designed GMRF for three-primary-color

4 实验结果与分析

GMRF 的主要制作流程如下: 1) 在洁净的 BK7 玻璃基底上面用磁控溅射设备镀一层氧化锌薄膜, 用椭偏仪测得其膜厚为 145 nm; 2) 用旋涂工艺在氧化锌薄膜上面甩一层光刻胶, 所用光刻胶为 AZ1550, 5000 r/min, 椭偏仪测得光刻胶厚度为 300 nm; 3) 用氦离子激光器进行双光束干涉曝光, 曝光位置单束扩束后光强为 $15 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 曝光时间 4 min, 最后用质量分数为 4% 的稀释 NaOH 水溶液显影 10 s, 最终在表面获得线条质量良好的光刻胶光栅结构。用椭偏仪测得氧化锌折射率为 1.95, 光刻胶层折射率为 1.60。图 6 为实验所制作 GMRF 的原子力显微镜(AFM)图。

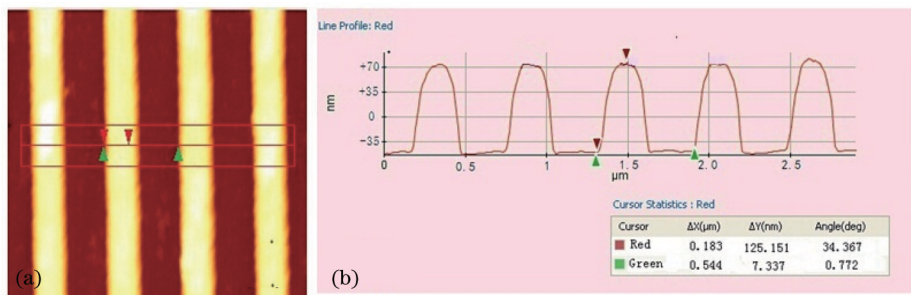


图 6 实验制作 GMRF 的 AFM 图。(a) 图为俯视图; (b) 图为剖面图

Fig.6 AFM diagram of GMRF fabricated in laboratory. (a) Vertical view; (b) cutaway view

测量结果显示, 光栅周期为 544 nm, 光栅槽深为 125 nm, 氧化锌厚度为 145 nm, 占空比为 0.52, 与设计参数相比, 光栅周期 550 nm, 波导层厚度 140 nm, 槽深为 120 nm, 占空比 0.55, 周期、槽深与波导层厚度的测量结果与设计结果的误差都控制在 5 nm 左右, 相对于实际制作周期为 300 nm 左右的亚波长结构与设计结果存在 15 nm 左右的误差^[20], 显示出了大周期导模共振器件在制作上相对易于控制的优点。相信通过工艺的

严格控制与改进,与设计结果间的误差可以进一步减小。

图7是用光谱分析仪(OSA)对实验制作的GMRF测量的红、绿、蓝反射光谱图。所制作的GMRF分别在 26.8° 、 39.6° 、 46.0° 入射角下在红、绿、蓝光谱范围内反射峰值达到最大,所对应的峰值波长分别为614、533、498 nm。在614 nm测得的峰值效率为77%,半峰全宽为4.5 nm;在533 nm处测得峰值效率为81%,半峰全宽为4.8 nm;在498 nm处测得峰值效率为83%,半峰全宽为5.1 nm,各个光谱旁带反射率均控制在10%以下,这些数据显示所制作的GMRF具备良好性能。

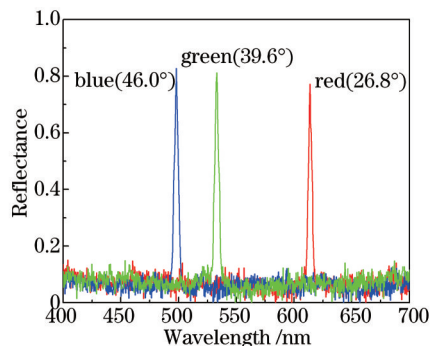


图7 实验制作GMRF的红绿蓝三色的反射光谱

Fig.7 Reflection spectra of three-primary-color of GMRF fabricated in laboratory

图8为实验制作GMRF反射光谱的测量结果与模拟结果及设计结果对比图,从图中可以看到测量结果与实验参数模拟的结果(黑色曲线)在峰值位置上有很好的匹配,与设计结果相比(黑色虚线),红色GMRF峰值波长向右偏移了9 nm,绿色GMRF峰值波长向左偏移了11 nm,蓝色GMRF峰值波长向右偏移了5 nm;峰值效率较模拟结果低了11%、14%、14%。与设计结果出现偏差的原因,主要是因为实验制作过程中出现的结构参数偏差,峰值波长的偏移主要是由于实验制作光栅周期(544 nm)与设计周期(550 nm)的偏差及工作入射角度不同造成的;峰值效率的降低主要由于制作光栅占空比(0.52)与设计结果(0.55)存在偏差所致;同时,实验测量的半峰全宽在5 nm左右,而模拟结果为2.5 nm左右,这主要由于曝光时使用球面波,使得光栅样品的周期并非处处完全相同。综上所述,通过明确误差来源,相关问题可以在以后的工作中加以解决。

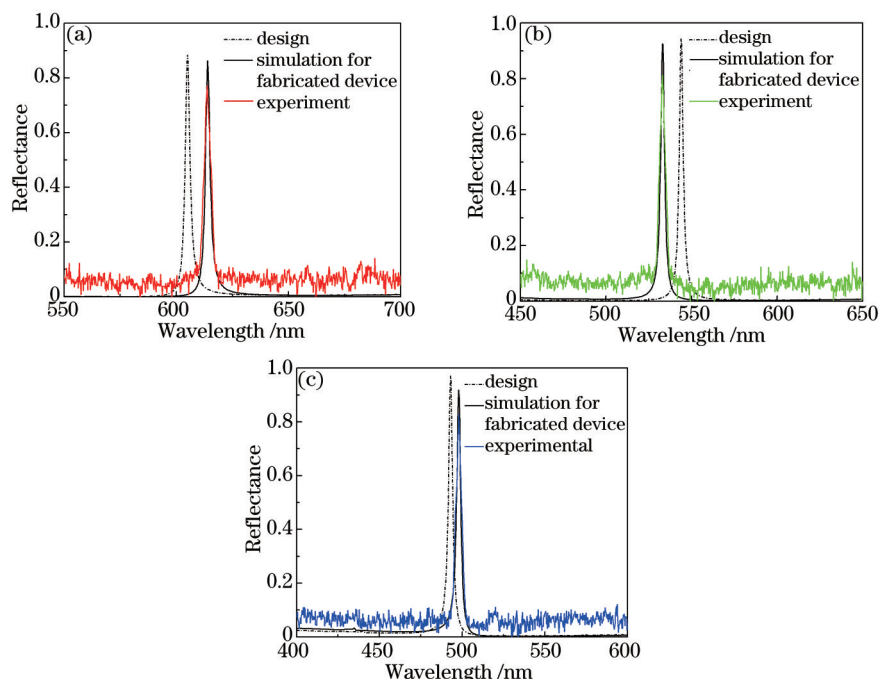


图8 实验制作GMRF反射光谱的测量结果与模拟结果及设计结果对比图。(a) 红色;(b) 绿色;(c) 蓝色

Fig.8 Reflection spectra of GMRF designed versus simulation and experiment. (a) Red; (b) green; (c) blue

5 结 论

设计了一种一维三层结构的红绿蓝三基色 GMRF, 并实验制作出了以 BK7 为基底, 中间层为 145 nm 厚氧化锌波导层, 表面层为周期为 544 nm 的光刻胶光栅结构导模共振滤光片。实验测量结果表明, 通过改变入射角, 该滤光片分别在 26.8°、39.6°、46.0° 入射角下展示出了良好的红绿蓝三种彩色滤光片性能。相较于传统亚波长结构, 该红、绿、蓝三基色 GMRF 具有较长周期, 在保证高效率、低旁带、窄半宽的同时, 使得制作工艺相对简单、易控制。而相较于传统的彩色滤光片, 该滤光片通过调整入射角即可实现红、绿、蓝三种彩色滤光片特性, 实现一物多用。相信在今后, 该红、绿、蓝三基色 GMRF 将会在显示、图像传感技术上得到广泛应用。

参 考 文 献

- 1 Sabnis R W. Color filter technology for liquid crystal displays[J]. *Displays*, 1999, 20(3): 119-129.
- 2 Li Hongyan, Yang Jiuxia, Lü Yanying, *et al.*. Color filter for TFT-LCD[J]. *Advanced Display*, 2005, 52: 41-44.
李宏彦, 杨久霞, 吕艳英, 等. TFT-LCD 用彩色滤光片[J]. *现代显示*, 2005, 52: 41-44.
- 3 Cho Y, Choi Y K, Sohn S H. Optical properties of neodymium-containing polymethylmethacrylate films for the organic light emitting diode color filter[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(5): 051102.
- 4 Kanamori Y, Shimono M, Hane K, *et al.*. Fabrication of transmission color filters using silicon subwavelength gratings on quartz substrates[J]. *Photonics Technology Letters*, 2006, 18(20): 2126-2128.
- 5 Yoon Y T, Lee H S, Lee S S, *et al.*. Color filter incorporating a subwavelength patterned grating in poly silicon[J]. *Opt Express*, 2008, 16(4): 2374-2380.
- 6 Hessel A, Oliner A. A new theory of Wood's anomalies on optical gratings[J]. *Appl Opt*, 1965, 4(10): 1275-1299.
- 7 Wang Q, Zhang D, Xu B, *et al.*. Colored image produced with guided-mode resonance filter array[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(23): 4689-4691.
- 8 Zhang Dawei, Yuan Limeng, Huang Yuanshen, *et al.*. Influence of film on the characteristics of sub-wave grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 3060-3063.
张大伟, 袁丽萌, 黄元申, 等. 导模共振滤光片表面镀膜对其物理特性的影响[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 3060-3063.
- 9 Zhang Dawei, Wang Qi, Zhu Yiming, *et al.*. Design of guided mode resonant filters tuned by azimuthal angle[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(4): 950-953.
张大伟, 王琦, 朱亦鸣, 等. 方位角调谐的反射窄带导模共振滤光片设计[J]. *中国激光*, 2010, 37(4): 950-953.
- 10 Zhou Wenchao, Wu Yihui, Hao Peng, *et al.*. Transmission bandpass filters based on two-dimensional subwavelength metallic gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1105001.
周文超, 吴一辉, 郝鹏, 等. 二维亚波长金属光栅多波长透射滤光片[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1105001.
- 11 Chen Zhiyong, Hao Xiaolong, Zheng Yanmin, *et al.*. Large-angle polarization-independent broadband filters based on silicon photonic crystal slabs[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0305002.
陈志勇, 郝小龙, 郑彦敏, 等. 大角度偏振无关硅膜光子晶体宽带滤波器[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0305002.
- 12 Ma Jing, Lin Sile, Cheng Shuying. Application of scattered light model and guided mode resonant in structure design of thin film solar cells[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0431002.
马靖, 林斯乐, 程树英. 光散射与导模共振模型在薄膜太阳能电池结构设计中的应用[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0431002.
- 13 Wang Qi, Zhang Dawei, Chen Jiabi, *et al.*. Recent progress of guided-mode resonance filters[J]. *Laser technology*, 2010, 34(1): 71-74.
王琦, 张大伟, 陈家璧, 等. 导模共振滤光片的研究进展[J]. *激光技术*, 2010, 34(1): 71-74.
- 14 Magnusson R, Wang S S. New principle for optical filters[J]. *Appl Phys Lett*, 1992, 61(9): 1022-1024.
- 15 Magnusson R, Shin D, Liu Z S, *et al.*. Guided-mode resonance Brewster filter[J]. *Opt Lett*, 1998, 23(8): 612-614.
- 16 Wang Q, Zhang D, Huang Y, *et al.*. Type of tunable guided-mode resonance filter based on electro-optic characteristic of polymer-dispersed liquid crystal[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(8): 1236-1238.
- 17 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, 郑饼斌, 云茂金, 等. 基于导模共振效应三基色窄带滤光片的研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1005006.
- 18 Zhou Yun, Ye Yan, Shen Su, *et al.*. Research on the characteristics of sub-wavelength grating color filter[J]. *Acta Optica Sinica*,

- 2011, 31(1): 0123003.
- 周 云, 叶 燕, 申 溯, 等. 亚波长光栅结构彩色滤光片研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0123003.
- 19 Ding Qiulan, Zhou Yun, Ye Yan, *et al.*. Reflection characteristics of metal-dielectric-metal reflective-type color filter[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(4): 693-697.
- 丁秋兰, 周 云, 叶 燕, 等. 基于金属-介质-金属结构的反射式彩色滤光片特性研究[J]. 应用光学, 2012, 33(4): 693-697.
- 20 M J Uddin, R Magnusson. Efficient guided-mode-resonant tunable color filters[J]. Photonics Technology Letters, 2012, 24(17): 1552-1554.
- 21 Yoshiaki K, Toshikazu O, Kazuhiro H. Fabrication of ultrathin color filters for three primary colors using guided-mode resonance in silicon subwavelength gratings[J]. Optical Review, 2014, 21(5): 723-727.
- 22 Ma Jianyong, Liu Shijie, Wei Chaoyang, *et al.*. Design of reflection resonant grating filters[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(2): 827-833.
- 麻健勇, 刘世杰, 魏朝阳, 等. 反射型导模共振滤波器设计[J]. 物理学报, 2008, 57(2): 827-833.
- 23 Wang S S, Magnusson R. Theory and applications of guided-mode resonance filters[J]. Applied Optics, 1993, 32(14): 2606-2613.
- 24 Niederer G, Herzig H P, Shamir J, *et al.*. Tunable, oblique incidence resonant grating filter for telecommunications[J]. Appl Opt, 2004, 43(8): 1683-1694.
- 25 Sang T, Zhao H, Cai S, *et al.*. Design of guided-mode resonance filters with an antireflective surface at oblique incidence[J]. Optics Communications, 2012, 285(3): 258-263.
- 26 Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled wave analysis of metallic surface-relief gratings[J]. J Opt Soc Am A, 1986, 3(11): 1780-1787.
- 27 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.

栏目编辑: 张 雁