

金属光栅型偏振彩色滤光片

叶燕 周云 张恒 申溯 陈林森

(苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要 提出了一种基于一维亚波长金属光栅结构的具有偏振片和彩色滤光片功能的偏振型彩色滤光片。该金属光栅由基底、介质光栅层-介质层和金属光栅层等三部分组成。采用严格耦合波理论分析了介质光栅层-介质层和金属光栅层对光谱特性的影响,模拟结果表明高折射率介质层-介质光栅层的存在,能有效提高彩色滤光片的性能。给出三色彩色滤光片优化的结构参数,获得同时具有透射率大于72.6%的宽带滤波和偏振消光比大于40 dB的光谱输出。其中红色滤光片的中心波长650 nm,透射率极值72.60%;绿色滤光片的中心波长550 nm,透射率极值79.86%;蓝色滤光片的中心波长445 nm,透射率极值77.00%。通过循环利用TE偏振光,其透射率极大值可提高至117.8%。

关键词 衍射;金属光栅;偏振;彩色滤光片

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0405003

Polarizing Color Filter Based on a Submicron Metal Grating

Ye Yan Zhou Yun Zhang Heng Shen Su Chen Linsen

(Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract A polarizing color filter based on one-dimensional (1D) subwavelength patterned metal grating combining the function of polarizer and color filter is proposed. The proposed device is consisted of three parts as a substrate, a dielectric grating-layer and a metal grating. The effects of the dielectric grating-layer and the metal grating are investigated in detail by rigorous coupled-wave analysis (RCWA) and its performance is enhanced effectively by utilizing a dielectric grating of high equivalent refractive index. Typical optimized structural parameters are obtained, in which more than 72.6% broadband transmission with greater than 40 dB polarization extinction ratio have been achieved simultaneously for tricolor filter. For the red color filter, the center wavelength is 650 nm and its corresponding transmittance is 72.60% for the green color one, the central wavelength is 550 nm and its corresponding transmittance is 79.86%, while for the blue color one, the central wavelength is 445 nm and its corresponding transmittance is 77.00%. The transmittance can be increased to 117.8% with the recycle of the TE-polarized light.

Key words diffraction; metal grating; polarization; color filter

OCIS codes 050.1940; 090.1970; 230.3720

1 引言

人工微纳结构可产生传统材料所不具备的各种奇异光学性质和现象^[1-4],成为近年来的研究热点;周期性纳米结构对入射光的吸收率较小,其中心光谱位置、带宽等性能参数均可由结构参数进行调节,利于减少三色光谱间的覆盖区域,且易于集成,已成为彩色滤光片重要的研究和应用方向之一。基于导模共振原理,Y. Kanamori等^[5]采用亚微米硅光栅设计彩色滤光片,但不同颜色的光利用的偏振态不

同;Y. Yoon等^[6]利用多晶硅光栅设计的彩色滤光片,光谱透射效率最大值约40%。基于表面等离子波子共振原理,P. C. Chen等^[7]提出的双层金属光栅结构,其中心光谱透射率大于80%,光谱透射率半峰全宽(FWHM)为30~50 nm;H. S. Lee等^[8]基于表面等离子体共振原理^[9-11],设计了二维亚微米金属小孔阵列,其最大透射率为57%^[11]。

依赖导模共振和表面等离子波子共振的共同作用,Y. Ye等^[12,13]设计了二维亚微米金属光栅,其透

收稿日期: 2010-09-09; **收到修改稿日期**: 2010-11-24

基金项目: 国家863计划(2009AA04Z325)、国家自然科学基金重大项目(91023044)和江苏省高校自然科学基金项目(10KJB140009)资助课题。

作者简介: 叶燕(1979—),女,博士,助理研究员,主要从事微纳结构与器件等方面的研究。

E-mail: yeyan_sz@yahoo.com.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

射率极值大于 70%。由于背光模组中照射至彩色滤光片的入射光为偏振光,因此,本文通过分析一维亚微米金属光栅的宽带透射滤光和偏振分束特性,实现具有偏振性能的彩色滤光片的设计,为设计同时实现下偏振片和彩色滤光片功能的复合膜和该复合膜的光能循环利用提供理论基础。

2 结构模型

所设计的金属光栅由聚甲基丙烯酸甲酯

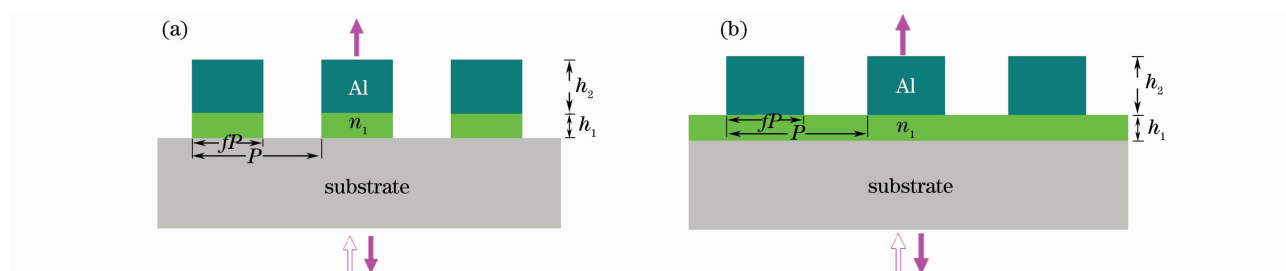


图 1 金属光栅结构示意图。(a)结构 I:基底-介质光栅层-金属光栅层,(b)结构 II 基底-介质层-金属光栅层

Fig. 1 Schematic of the metal grating. (a) type I: substrate-dielectric grating-metal grating, (b) type II: substrate-dielectric film-metal grating

所设计的金属光栅结构初始参数为 $P=0.32 \mu\text{m}$, $h_1=0.08 \mu\text{m}$, $h_2=0.08 \mu\text{m}$, $f=0.65$ 。采用严格耦合波算法^[15,16]分析结构参数变化对透射光谱特性的影响。

3 理论分析

3.1 介质层折射率的影响

结构 I 中介质光栅层折射率 n_1 在 1.5~3 之间变化时,相应衍射特性的变化如图 2 所示,其中图 2(a)为其对 TM 偏振光的透射特性的影响,当 n_1 从 1.5 增大到 2.1 时,其透射率极值增加明显,而 n_1 在 2.1~3 之间变化时,其透射率极值变化较小,共振波长逐渐红移,FWHM 逐渐增大。

图 2(b)为 n_1 变化对 TE 偏振透射特性的影响,当 n_1 小于 2.4 时,在可见光区域,其透射光谱小于

(PMMA)基底、介质光栅层/介质膜层和金属 Al 光栅层组成,光栅面形为矩形,入射光自光栅底部垂直入射,如图 1 所示。设空气折射率为 n_0 ,基底 PMMA 折射率为 1.48,介质光栅/介质膜层折射率为 n_1 ,厚度为 h_1 ,光栅周期为 P ,槽深为 h_2 ,光栅脊区宽度为 fP 。金属 Al 的折射率 $n_{\text{Al}} = n_r + jn_i$,根据 Drude 模型^[14],在可见光波段, n_r 和 n_i 分别在 0.5~1.8 和 4.3~7.1 之间变化。

1.5%,当 n_1 大于 2.4 时,在可见光区域出现导模共振输出, n_1 的变化对共振波长影响较小,其透射率极值小于 7.3%。

定义偏振消光比

$$f_{\text{EP}} = 10 \lg(T_{\text{TM}}/T_{\text{TE}}), \quad (1)$$

式中 T_{TM} , T_{TE} 分别为 TM 偏振和 TE 偏振下的透射率。图 2(c)为 n_1 变化对偏振消光比的影响,由图可知,随着 n_1 的增大,其偏振消光比的极值位置红移,当 n_1 在 2.4~2.7 之间变化时,在 0.5~0.6 μm 光谱区域内的偏振消光比大于 43.1 dB。

结构 II 中介质层折射率在相同范围内变化时,相应衍射特性的变化如图 3 所示。其中图 3(a)为其对 TM 偏振光的透射特性的影响,与结构 I 相比,当 n_1 从 1.5 增大到 2.1 时,其透射率极值增加速度相对较慢,而 n_1 在 2.1~3 之间变化时,FWHM 变化

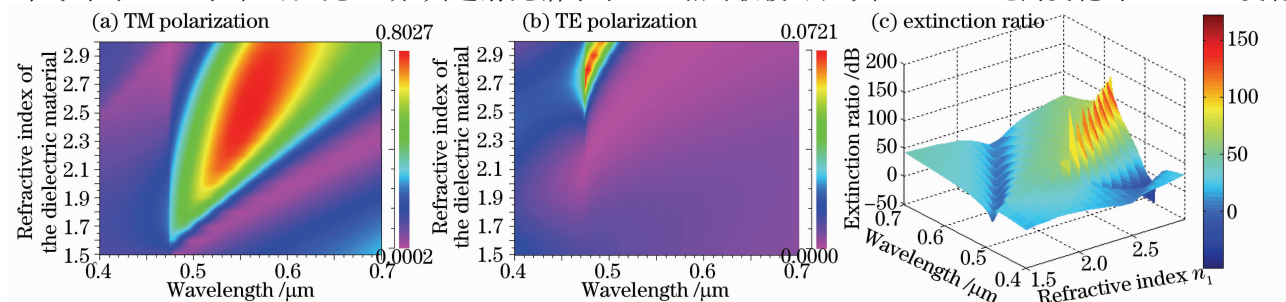


图 2 结构 I 中介质光栅层折射率的影响

Fig. 2 Effect of the refractive index n_1 for dielectric grating of type I

相对较小,随着 n_1 的增大,共振波长逐渐红移速度相对较快,并且在 n_1 小于 2.2 时,其透射光谱中存在具有导模共振特点的窄带滤波输出。

图 3(b) 为其对 TE 偏振透射特性的影响,当 $n_1 > 1.7$ 时,窄带滤波输出现象较为明显,与结构 I 相比,随着 n_1 的增大,其共振光谱位置以较快的速

度向长波方向偏移。

图 3(c) 为 n_1 变化对偏振消光比的影响,由图可知,随着 n_1 的增大,其偏振消光比的极值位置红移,当 n_1 在 2.4~2.7 之间变化时,在 0.5~0.6 μm 光谱区域内的偏振消光比大于 18.1 dB。

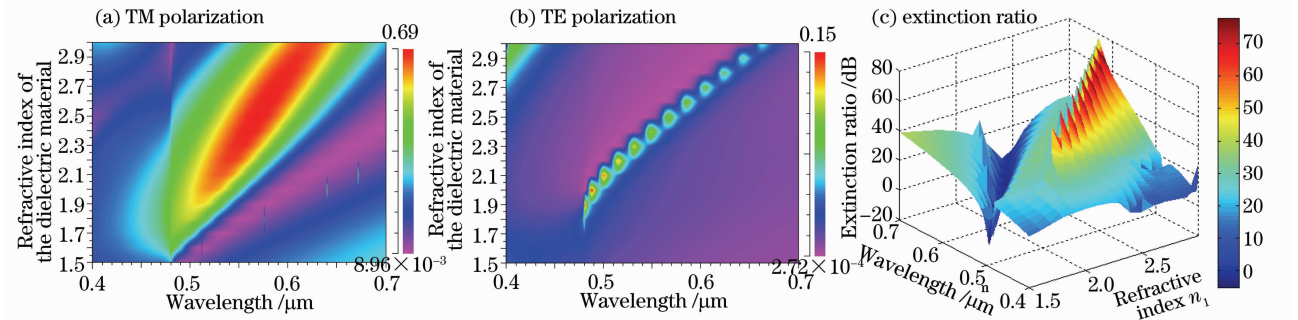


图 3 结构 II 中介质层折射率的影响

Fig. 3 Effect of the refractive index n_1 for dielectric layer of type II

根据图 2 和图 3 中 n_1 的变化对衍射特性的影响可知高折射率介质层/介质光栅层的存在,能有效提高彩色滤光片的性能。为获得 TM 偏振下透射光谱的对称性、较高的 TM 偏振光透射率和偏振消光比,两种结构中 n_1 的取值为 2.4。

3.2 介质厚度的影响

其他参数不变,结构 I 中介质光栅槽深 h_1 在

0~0.12 μm 之间变化时,相应衍射特性的变化如图 4 所示。其中图 4(a) 为其对 TM 偏振光的透射特性的影响,当 h_1 从 0 增大到 0.05 μm 时,其透射率极值增加明显,而 h_1 在 0.05~0.12 μm 之间变化时,其透射率极值变化较小,共振波长逐渐红移,FWHM 小幅度增大。

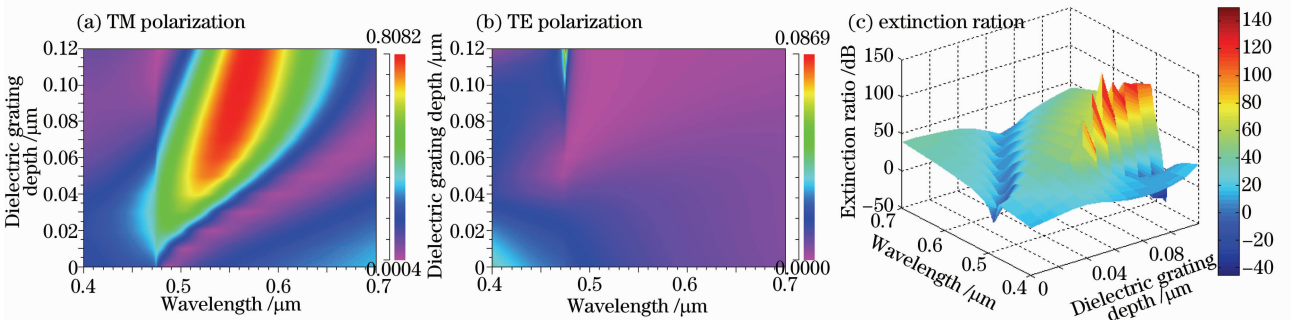


图 4 结构 I 中介质光栅槽深的影响

Fig. 4 Effect of the groove depth h_1 for dielectric grating of type I

图 4(b) 为 h_1 在 0~0.12 μm 之间变化时对 TE 偏振透射特性的影响,当 $h_1 < 0.04 \mu\text{m}$ 时,TE 偏振透射光在蓝光区域取得较大值,透射率小于 4%;当 h_1 在 0.04~0.08 μm 之间变化时,其透射率小于 2%;当 h_1 在 0.08~0.12 μm 之间变化时,其透射率在波长为 0.47 μm 附近取得极大值,透射率小于 8.7%;并且在 475 nm 波长附近,存在导模共振窄带滤波输出。

图 4(c) 为 h_1 在 0~0.12 μm 之间变化时对偏振消光比的影响。由图可知,随着 h_1 的增大,偏振

消光比极值位置红移。当 h_1 在 0.06~0.12 μm 之间变化时,在 0.5~0.6 μm 光谱区域内的偏振消光比大于 38.8 dB。

其他参数不变,结构 II 中介质层厚度 h_1 在 0~0.12 μm 之间变化时,相应衍射特性的变化如图 5 所示。其中图 5(a) 为其对 TM 偏振光的透射特性的影响,与结构 I 相比,当 h_1 从 0 增大到 0.04 μm 时,其透射率极值增加速度相对较慢,而 h_1 在 0.04~0.12 μm 之间变化时,其透射率极值变化同样较小,FWHM 变化相对较小。与结构 I 相比,其共振波长

红移速度较快。

图 5(b)为 h_1 在 $0\sim 0.12\ \mu\text{m}$ 之间变化时对 TE 偏振透射特性的影响,当 $h_1 < 0.02\ \mu\text{m}$ 时,TE 偏振透射效率小于 4%;当 $h_1 > 0.03\ \mu\text{m}$ 时,在可见光区

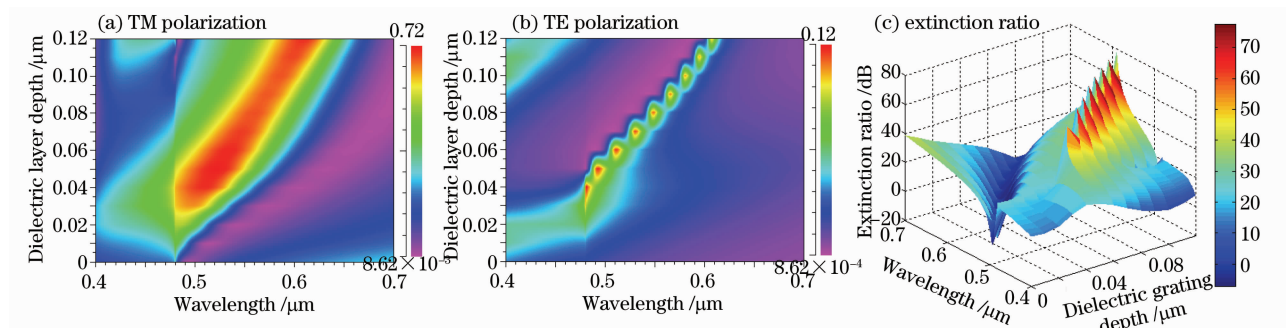


图 5 结构 II 中介质层厚度的影响

Fig. 5 Effect of the dielectric film height h_1 for type II

图 5(c)为 h_1 在 $0\sim 0.12\ \mu\text{m}$ 之间变化时对偏振消光比的影响。由图可知,随着 h_1 的增大,偏振消光比极值位置红移。当 h_1 在 $0.06\sim 0.12\ \mu\text{m}$ 之间变化时,在 $0.5\sim 0.6\ \mu\text{m}$ 光谱区域内的偏振消光比大于 17.3 dB。

3.3 金属光栅槽深的影响

其他参数不变,结构 I 中金属光栅槽深 h_2 在 $0\sim$

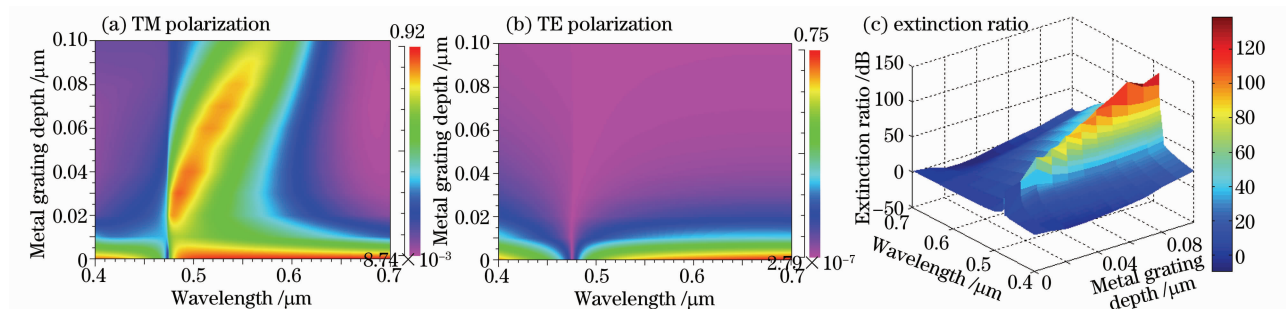


图 6 结构 I 中金属光栅槽深的影响

Fig. 6 Effect of the groove depth h_2 for metal grating of type I

图 6(b)为其对 TE 偏振透射特性的影响,其透射光谱为导模共振输出,其窄带带阻滤波输出的共振波长在 474 nm 附近,且 h_2 的增大,其共振波长位置几乎不变。当 $h_2 < 0.03\ \mu\text{m}$ 时,其在可见光区域的透射效率相对较大,当 $h_2 > 0.03\ \mu\text{m}$ 时,其在可见光区域的透射衍射效率小于 8%。

图 6(c)为 h_2 在 $0\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 之间变化时对偏振消光比的影响。由图可知,随着 h_2 的增大,偏振消光比极值位置红移。当 h_2 在 $0.06\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 之间变化时,在 $0.5\sim 0.6\ \mu\text{m}$ 光谱区域内的偏振消光比大于 33.1 dB。

其他参数不变,结构 II 中金属光栅槽深 h_2 在 $0\sim$

域内,存在导模共振窄带输出,且随着 h_1 的增大,透射率极值逐渐减小,与结构 I 相比,共振波长位置以较快的速度红移。

图 6(a)为其对 TM 偏振光的透射特性的影响,当 h_2 为 0 时,其透射光谱为明显的导模共振滤波光谱,其共振波长位置约为 473 nm;当 $h_2 > 0.02\ \mu\text{m}$ 时,其透射率在 473 nm 波长附近出现突变,实现宽带滤波输出,且随着 h_2 的增大,透射率极值变化缓慢,FWHM 的变化较小,共振波长位置红移。

图 7(a)为其对 TM 偏振光的透射特性的影响,当 $h_2 > 0.01\ \mu\text{m}$ 时,其透射光谱为宽带滤波输出,随着 h_2 的增大,透射率极值类似于正弦曲线变化,FWHM 小幅增大,共振波长位置红移。

图 7(b)为其对 TE 偏振透射特性的影响,当 $h_2 > 0.01\ \mu\text{m}$ 时,其在可见光区域的存在窄带透射滤波输出,随着 h_2 的增大,窄带滤波带宽逐渐减小,透射率极值逐渐减小,共振光谱位置变化较小。当 $h_2 > 0.06\ \mu\text{m}$ 时,其在可见光区域的透射衍射效率小于 10%。

图 7(c)为 h_2 在 $0\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 之间变化时对偏振

消光比的影响。由图可知,随着 h_2 的增大,偏振消光比极值位置几乎不变。当 h_2 在 $0.06 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 之

间变化时,在 $0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 光谱区域内的偏振消光比大于 12.9 dB 。

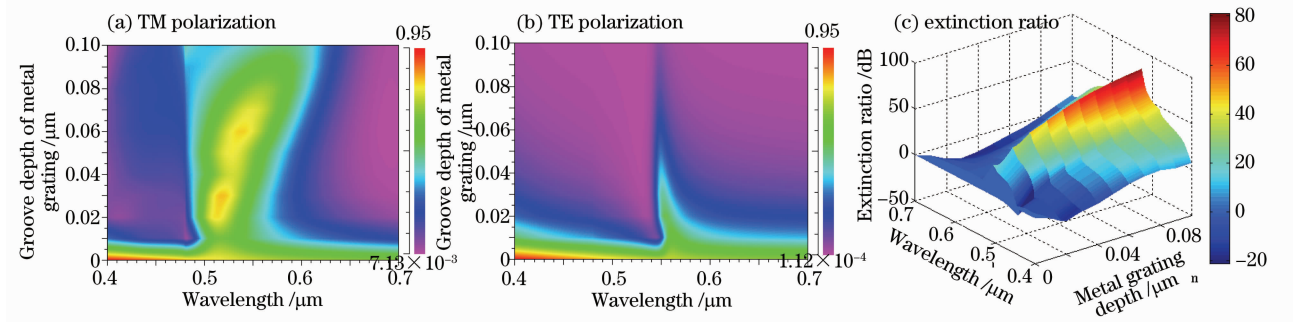


图 7 结构 II 中金属光栅槽深的影响

Fig. 7 Effect of the groove depth h_2 for metal grating of type II

4 彩色滤光片及其性能比较

以获得高透射率的光谱输出为目标,结构 I 中,针对光透射率的优化结构参数为: $P=0.32 \mu\text{m}$, $h_1=0.08 \mu\text{m}$, $h_2=0.08 \mu\text{m}$, $f=0.65$ 。此时其透射光谱输出为绿光,透射光谱极值为 79.86% , $0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 波长间的偏振消光比大于 51.4 dB ; 仅改变周期,在 $P=0.4 \mu\text{m}$ 时,其透射光谱输出为红光,透射光谱极值为 72.62% , $0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 波长间的偏振消光比大于 43.8 dB ; 在 $P=0.24 \mu\text{m}$ 时,其透射光谱输出为蓝光,透射光谱极值为 77.00% , $0.4 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 波长间的偏振消光比大于 57.7 dB 。结构 I 的红、绿、蓝三色滤波输出如图 8 所示。

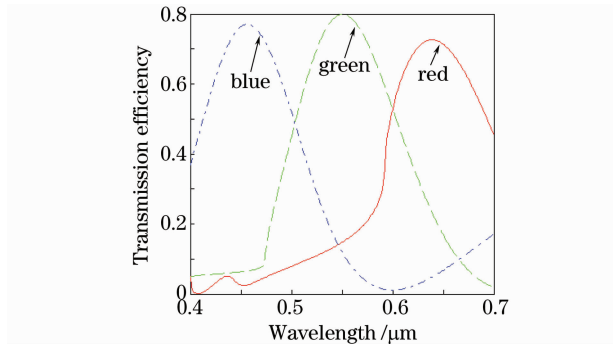


图 8 结构 I 红绿蓝三色滤波输出

Fig. 8 Tricolor filtered output for type I

结构 II 中,针对光透射率优化结构参数为: $P=0.33 \mu\text{m}$, $h_1=0.08 \mu\text{m}$, $h_2=0.05 \mu\text{m}$, $f=0.65$ 。此时其透射光谱输出为绿光,透射光谱极值为 74.13% , $0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 波长间的偏振消光比大于 8.3 dB ; 仅改变周期,在 $P=0.4 \mu\text{m}$ 时,其透射光谱输出为红光,透射光谱极值为 78.32% , $0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 波长间的偏振消光比大于 8.8 dB ; 在 $P=0.24 \mu\text{m}$ 时,其透射

光谱输出为蓝光,透射光谱极值为 77.60% , $0.4 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 波长间的偏振消光比大于 9.9 dB 。结构 II 的红、绿、蓝三色滤波输出如图 9 所示。

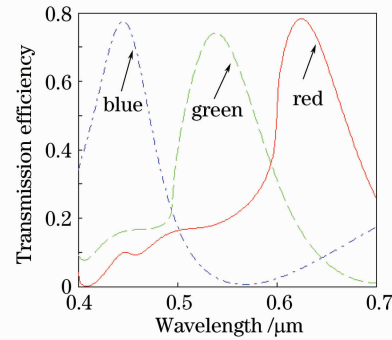


图 9 结构 II 红绿蓝三色滤波输出

Fig. 9 Filtered tricolor output for type II

由此可知,与结构 II 相比,两者的透射光谱极值接近,但是结构 I 在对应波长下的偏振消光比较大。与结构 I 相比,结构 II 虽然偏振消光比相对较小,但是其制作相对容易。

基于光栅结构彩色滤光片的性能比较如表 1 所示。由表 1 可知,本文所设计的结构,透射光谱极值大于 72% , 具有较高的光能利用率; FWHM 大于 70 nm 并小于 120 nm , 在有利于获得良好的色度性能的同时充分提高了光能利用率。

此外,用于液晶显示(LCD)的传统二向色性偏振片的偏振消光比为 30 dB ^[17], 结构 I 的偏振消光比大于 43.8 dB , 而由前述第 3.2 节可知,结构 II 也能获得偏振比为 38.8 dB 的光谱输出, 具有更好的偏振分束性能, 并且有利于设计系统循环利用 TE 偏振光, 进一步提高光能利用率。

表 1 不同光栅结构的彩色滤光片的性能比较
Table 1 Performance comparison color filters of different structures

Designs for color filter	Grating dimension	Peak efficiency / %	FWHM / nm
Silicon SWG ^[1]	1D	71.1	~100
Poly silicon SWG ^[2]	1D	40	~90
Bi-layer metal grating ^[3]	1D	85	~30
Metal SWG ^[7]	2D	57	~150
Propose 1	1D	72.6	~100
Propose 2	1D	74.1	~70

5 光能循环利用

将金属光栅反射的 TE 偏振光部分转换为 TM 偏振光重新入射至金属光栅,从而进一步提高其光能利用率,其光能循环利用^[18]原理如图 10 所示。定义增强的 TM 偏振光输出为

$$f_{BE} = T + \alpha \times T \times R \times \beta / [1 - (1 - \alpha) \times R \times \beta], \quad (2)$$

式中 T 为 TM 偏振光透射率, R 为 TE 偏振光的反射率, α 为 TE 偏振光至 TM 偏振光的转换率,其实实验值一般为 0.5^[18], β 为反射层对光的反射,为 0.9。

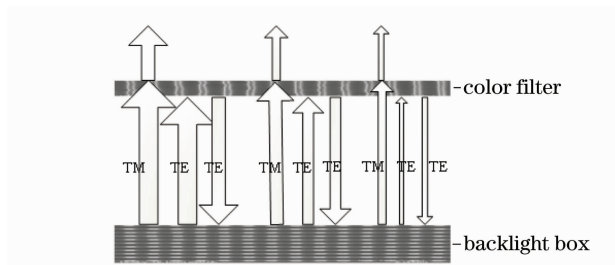


图 10 光能循环利用示意图

Fig. 10 Schematic of the light-energy recycling system

以结构 I 为例,TE 偏振光三次反射后的光谱输出如图 11 所示。红、绿、蓝三色光的透射率极值分

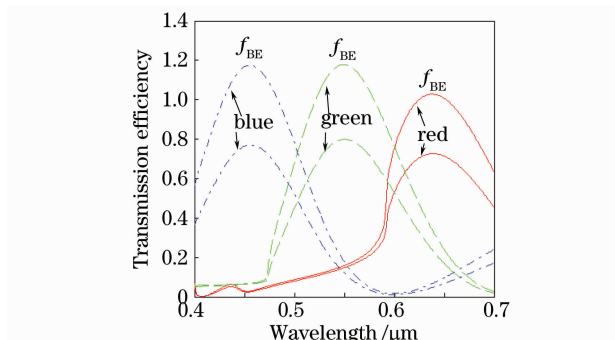


图 11 光能循环利用前后 TM 偏振光透射光谱比较

Fig. 11 Transmittance comparison between proposed device and the one with recycled system

别从 72.6%, 79.8% 和 77.0% 增加至 117.4%, 117.8% 和 102.8%,较大的提高了其光能利用率。

6 结 论

在两种结构下,同时获得了具有偏振分束特性和宽带滤波特性的彩色滤光片,其中结构 I 在 TM 偏振下的透射率极值大于 70%,其半峰全宽约为 100 nm。宽带宽滤波光谱范围内,偏振消光比大于 40 dB,具有良好的彩色滤光和偏振分束性能。可作为同时实现偏振片和彩色滤光片功能的复合膜使用。

参 考 文 献

- 1 Yan Bin, Yuan Weizheng, Yu Yiting *et al.*. Fabrication and experimental investigation of diffraction characteristics for a pitch-tunable grating based on SOG process[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3128~3132
- 2 燕 斌, 苑伟政, 虞益挺 等. 一种新型 SOG 周期可调光栅的制作及其衍射性能测试[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3128~3132
- 3 Zheng Guangwei, He Yanlan, Huang Shuihua *et al.*. Low-pass spatial filtering for continuous-wave laser beam by transmission volume phase gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 863~868
- 4 郑光威, 何焰蓝, 黄水花 等. 透射型体相位光栅对连续激光束的空间高通滤波[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 863~868
- 5 Zhou Yun, Shen Su, Ye Yan *et al.*. Research on the characteristics of subwavelength metal grating polarizers with a high refractive-index dielectric layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1158~1161
- 6 周 云, 申 溯, 叶 燕 等. 带有高折射率介质层的金属光栅偏振器特性的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1158~1161
- 7 Yu Kan, Huang Dexiu, Fan Ling *et al.*. Research on bandwidth depolarization of the angle-tuning filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 214~217
- 8 俞 侃, 黄德修, 樊 玲 等. 角度调谐滤光片带宽消偏振研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 214~217
- 9 Y. Kanamori, M. Shimono, K. Hane. Fabrication of transmission color filters using silicon subwavelength gratings on quartz substrate [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(20): 2126~2128
- 10 Y. Yoon, H. Lee, S. Lee *et al.*. Color filter incorporating a subwavelength patterned grating in poly silicon [J]. *Opt. Express*, 2008, **4**(16): 2374~2380
- 11 P. C. Chen, H. Kuo, C. Chiu *et al.*. Color Filter and Method of Fabricating the Same[P]. United States Patent, 0,147,617 (6 July 2006) A1
- 12 H. Lee, Y. Yoon, S. Lee *et al.*. Color filter based on a subwavelength patterned metal grating[J]. *Opt. Express*, 2007, **23**(15): 15457~15463
- 13 T. J. Kim, T. Thio, T. W. Ebbesen *et al.*. Control of optical transmission through metals perforated with subwavelength hole arrays[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(4): 256~258
- 14 A. Degion, H. J. Lezec, W. L. Barnes *et al.*. Effects of hole depth on enhanced light transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(23): 4327~4329
- 15 W. L. Barnes, A. Dereux, T. W. Ebbesen. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824~830
- 16 Yan Ye, Heng Zhang, Yun zhou *et al.*. Color filter based on a

- submicrometer cascaded grating [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(4): 613~616
- 13 Yan Ye, Yun Zhou, Linsen Chen. Color filter based on a two-dimensional submicrometer metalgrating[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(27): 5035~5039
- 14 M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell *et al.*. Optical properties of the metals, Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti and W in the infrared and far infrared[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(7): 1099~1119
- 15 M. G. Maharam, T. K. Gaylord. Three dimensional vector coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(9): 1105~1112
- 16 M. G. Maharam, T. K. Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of metallic surface-relief grating[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(11): 1780~1787
- 17 Gong Jianxun, Liu Zhengyi, Qiu Wanji. Research progress in polarizer[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2004, **19**(4): 259~265
- 龚建勋, 刘正义, 邱万奇. 偏振片研究进展[J]. *液晶与显示*, 2004, **19**(4): 259~265
- 18 S. H. Kim, J. D. Park, K. D. Lee. Fabrication of a nano-wire grid polarizer for brightness enhancement in liquid crystal display [J]. *Nanotechnology*, 2006, **17**(17): 4436~4438