

# 亚波长光栅结构彩色滤光片研究

周 云 叶 燕 申 溯 方宗豹 浦东林 陈林森

(苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要** 研究了一维亚波长光栅结构彩色滤光片在可见光波段的透射光谱特性。该彩色滤光片由柔性透明基底、介质光栅和金属光栅构成。利用严格耦合波分析法(RCWA)模拟了占空比、介质光栅的厚度、金属光栅的厚度和周期等结构参数对彩色滤光片的透射光谱特性的影响,并在此基础上优化结构参数,设计出一种宽带宽、高透射效率且易于加工的彩色滤光片。该彩色滤光片带宽为 85~100 nm,色纯度好;具有高达 95%的偏振(TM)光透射效率;只需改变光栅的周期,就可获得针对 R,G,B 三色的透射光谱,降低了加工彩色滤光片的难度。与其他应用于彩色滤光片的光栅结构相比,所设计的彩色滤光片的中心光谱透射效率提高了 12%,且减少了三色输出光谱之间的重叠区域,从而提高了彩色滤光片的色度性能,适合作为液晶平板显示中的滤光器件。

**关键词** 光学器件;亚波长光学;滤光片;严格耦合波分析法;光栅

**中图分类号** O438.1;TB851 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0123003

## Research on the Characteristics of Sub-Wavelength Grating Color Filter

Zhou Yun Ye Yan Shen Su Fang Zongbao Pu Donglin Chen Linsen

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

**Abstract** Transmission characteristic of a novel sub-wavelength grating color filter at visible region is investigated theoretically. The device consists of three parts: the flexible transparent substrate, the dielectric grating and the metal grating. By using rigorous couple-wave analysis (RCWA), the transmission characteristic is analyzed as a function of the duty cycle, the thickness of the dielectric grating, the thickness of the metal grating and the period. Based on the simulation results, a high-performance color filter is proposed by optimizing the structural parameters. The bandwidth of the filters are about 85 nm. The peak transmission efficiency of the filters are about 95%. The calculated results show that the peak transmission efficiency of the filters are increased more than 12% compared with the previous color filters incorporating a grating. The overlap of the tricolor output spectra decreases effectively, which will increase the color saturation of the color filter. The proposed color filter is suitable for filtering used in liquid crystal devices.

**Key words** optical devices; sub-wavelength optics; color filter; rigorous coupled-wave analysis(RCWA); grating

**OCIS codes** 230.1950; 050.2770; 050.6624

## 1 引 言

彩色滤光片是液晶显示器的重要组成部件。液晶显示器对彩色滤光片的性能要求如下:1)高色纯

度,也就是说,R,G,B 三基色的透射光谱应适中,透射波长范围不能太窄,否则透光度太低;透射波长范围也不能太宽,否则三基色光谱将发生重叠,使滤色

**收稿日期**: 2009-12-09; **收到修改稿日期**: 2010-05-19

**基金项目**: 国家 863 计划(2006AA04Z318)、国家自然科学基金(60777039)、高校省级重点实验室开放课题(KJS0805)和江苏省高校自然科学基金基础研究项目(08KJD510006)资助课题。

**作者简介**: 周 云(1980—),女,博士研究生,主要从事高功率激光微纳结构刻蚀、亚波长光学器件相关的理论和工艺研究。E-mail: zyun@suda.edu.cn

**导师简介**: 陈林森(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光全息技术、信息光学、微纳光学关键技术、材料与系统等方面的研究。E-mail: lschen@suda.edu.cn(通信联系人)

层的彩色还原能力变差。2) 高对比度, 即要求彩色滤光片具有高透射率。而传统的彩色滤光片红、绿、蓝三色光谱的带宽均为 150 nm 左右, 三基色光谱发生重叠, 影响了色纯度。鉴于传统的彩色滤光片在性能和加工方面存在诸多问题<sup>[1,2]</sup>, 设计基于新原理的彩色滤光片, 最终实现对某一偏振方向入射的光具有高透射率和适中带宽的滤光效果, 成为背光显示、微纳光器件领域的热点研究内容。

与传统的彩色滤光片相比, 光栅结构的滤光片<sup>[3~12]</sup>的制作可以采用光刻工艺和纳米压印工艺加工完成, 不仅加工成本低而且具有更优越的透射性能, 引起了许多研究者的兴趣。美国专利<sup>[3]</sup>中公开了一种彩色滤光片, 通过同时调节光栅的周期和高度对入射光中的红、绿、蓝三色进行滤光。该结构的彩色滤光片的主模的加工程序复杂, 并且后续的蚀刻过程有很高的技术难度, 在工艺上很难保证滤光片的光学效果。公开号为 2006/0147617A1<sup>[4]</sup>的美国专利提出一种具有双金属层结构的彩色滤光片, 透射光谱的带宽较窄, 为 30~50 nm, 影响了彩色滤光片的性能, 而且如何在一个 100~200 nm 的结构上溅射三种不同高度的金属层和如何在压印过程中精确控制介质光栅的高度都给实际加工该滤光片带来了极大困难。Kanamori 等<sup>[5]</sup>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。Yoon 等<sup>[6]</sup>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%。

本文提出一种基于柔性有机材料的金属光栅彩色滤光片结构, 优化得到了带宽为 80~120 nm、透射率大于 90% 的彩色滤光片。利用严格耦合波分析法(RCWA)模拟了各结构参数, 如占空比、介质光栅的厚度、金属光栅的厚度和周期对彩色滤光片的透射光谱特性的影响, 分析了介质光栅的厚度和金属光栅的厚度发生偏差时对输出光谱的影响。设计的彩色滤光片具有柔性、高透射率和高色纯度的优点, 在新型平板显示中有重要应用价值。

## 2 透射光谱特性分析

研究的光栅结构彩色滤光片如图 1 所示。该彩色滤光片由透明基底、介质光栅和金属光栅构成。透明基底为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA), 折射率  $n_s = 1.48$ , 金属光栅为铝, 色散曲线依照 Drude 模型<sup>[12]</sup>, 厚度为  $h_2$ , 介质光栅的厚度为  $h_1$ 。根据导模共振<sup>[13~19]</sup>的条件, 介质光栅选取高折射率材料 ZnS, 折射率  $n_H = 2.4$ 。入射光自光栅底部垂直入

射。介质光栅和金属光栅的宽度为  $w$ , 周期为  $p$ , 这里定义占宽比  $F = w/p$ 。

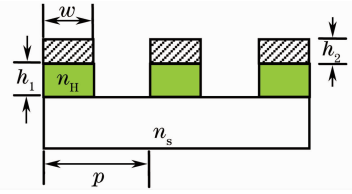


图 1 光栅结构彩色滤光片的示意图

Fig. 1 Schematic of the grating color filter

采用严格耦合波分析法(RCWA)<sup>[20,21]</sup>模拟一维亚波长光栅结构彩色滤光片的透射光谱特性。RCWA 基于麦克斯韦(Maxwell)方程, 是一种严格矢量波分析方法, 在计算色散的金属材料时也具有较好的收敛性。下面就介质光栅的厚度、金属光栅的厚度、周期和占空比等结构参数对透射光谱特性的影响进行分析。研究的光栅结构的初始参数为  $p = 330 \text{ nm}$ ,  $F = 0.75$ ,  $h_1 = 80 \text{ nm}$ ,  $h_2 = 60 \text{ nm}$ , 模拟结果如图 2 所示。

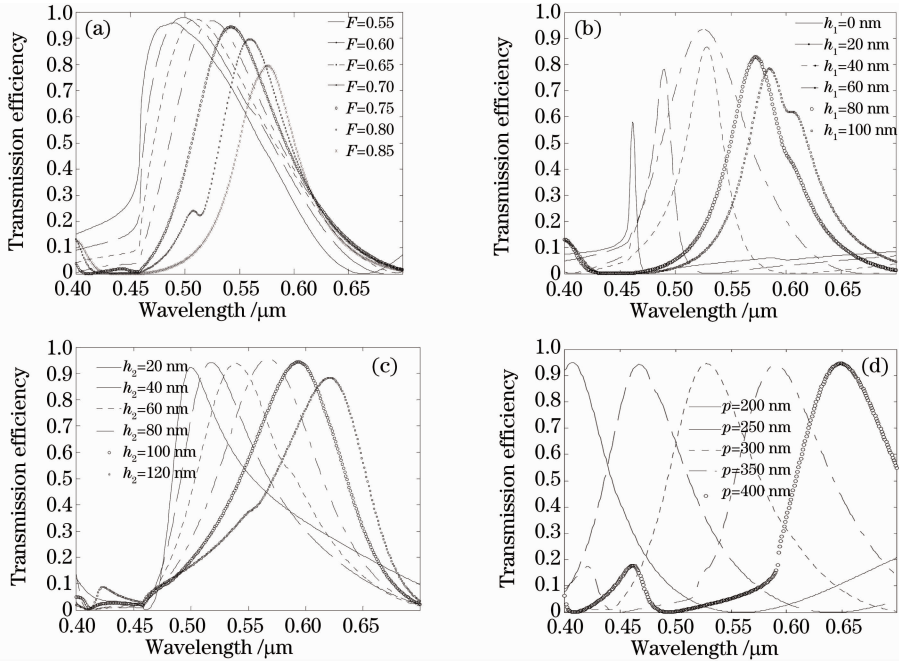
由图 2(a)可知, 随着  $F$  在 0.55~0.85 之间逐渐增加, 光谱峰值透射效率先基本保持不变, 后逐渐减小; 旁带越来越低; 半峰全宽(FWHM)逐渐减小。因此, 在该光栅结构彩色滤光片中, 介质光栅和金属光栅的脊部宽度不仅影响光谱透射效率, 而且能影响透射光谱 FWHM 的大小。

由图 2(b)可知, 随着  $h_1$  在 0~100 nm 之间逐渐增大, 光谱峰值位置向长波方向漂移, 透射光谱的 FWHM 及中心光谱透射效率先逐渐增大后减小, 旁带光谱透射效率逐渐减小。因此, 介质光栅能有效提高透射光谱的带宽及中心光谱透射效率。

由图 2(c)可知, 随着  $h_2$  在 20~120 nm 之间逐渐增大, 光谱峰值位置向长波方向漂移, 透射光谱的 FWHM 越来越宽,  $h_2 = 80 \text{ nm}$  时旁带光谱透射效率最小。

图 2(d)表明, 光栅周期  $p$  在 200~400 nm 之间变化时, 随着  $p$  的增大, 光谱峰值位置以较快的速度向长波方向漂移, 且光栅周期对峰值透射效率及 FWHM 影响很小。因此, 可通过调整光栅周期获得不同颜色光的输出。

综上所述, 介质光栅层能有效增强基底与金属光栅之间的表面等离子体共振<sup>[17,19]</sup>, 从而提高透射光谱的 FWHM 值和透射效率; 金属光栅的厚度能有效影响光谱峰值位置; 光栅周期能快速改变光谱峰值位置。因此, 可通过调整光栅的结构参数, 设计三色光宽带宽、高透射效率滤光片。

图2 透射光谱随不同参数。(a) $F$ 、(b) $h_1$ 、(c) $h_2$ 和(d) $p$ 的变化Fig. 2 Variation of the transmission spectra with different parameter. (a)  $F$ , (b)  $h_1$ , (c)  $h_2$  and (d)  $p$ 

### 3 彩色滤光片结构设计

在上述透射光谱特性分析的基础上,针对 $R, G, B$ 三色,保证介质光栅的厚度、金属光栅的厚度相同的前提下,优化其他结构参数,设计出一种宽带宽、高透射效率且易于加工的彩色滤光片。具体结构参数为: $h_1=80\text{ nm}$ ,  $h_2=60\text{ nm}$ ,  $F=0.75$ 。

如图3所示,当 $p=400\text{ nm}$ 时,只有红光透过,光谱峰值位置波长为 $650\text{ nm}$ ,透射效率为 $94\%$ ,FWHM为 $94\text{ nm}$ ;当 $p=310\text{ nm}$ 时,只有绿光透过,光谱峰值位置波长为 $540\text{ nm}$ ,透射效率为 $94\%$ ,FWHM为 $93\text{ nm}$ ;当 $p=230\text{ nm}$ 时,只有蓝光透过,光谱峰值位置波长为 $430\text{ nm}$ ,透射效率为 $95\%$ ,FWHM为 $85\text{ nm}$ 。计算结果表明,设计出的彩色滤光片带宽为 $85\sim 100\text{ nm}$ ,色纯度好;具有高达约

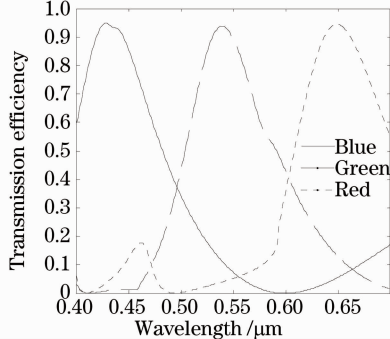


图3 彩色滤光片的透射光谱

Fig. 3 Transmission spectra of the color filter

$95\%$ 的偏振(TM)光透射效率;只需改变光栅的周期,就可获得针对 $R, G, B$ 三色的透射光谱,降低了加工彩色滤光片的难度。

### 4 光栅结构彩色滤光片性能比较

表1为现有的基于光栅结构的彩色滤光片与所设计的彩色滤光片的光学性能比较。从表1可以看出,所设计的彩色滤光片的FWHM约 $85\sim 100\text{ nm}$ ,三色输出光谱之间的重叠区域较小,有利于提高彩色滤光片的色度性能;透射光谱峰值透射效率为 $95\%$ ,提高了能量利用率。

表1 基于光栅结构的彩色滤光片性能比较

Table 1 Comparison between the existing and the proposed color filter based on the grating

Designs for color filter	Grating dimension	Peak transmission efficiency / %	FWHM / nm
Ref. [4]	1-D	~85	30~50
Ref. [5]	1-D	58.1~71.1	~100
Ref. [6]	1-D	~40	~90
Our work	1-D	~95	80~100

### 5 误差分析

由于实际加工时,易出现镀膜误差,因此,针对中心波长为 $540\text{ nm}$ ,透射光谱峰值为 $94\%$ 的绿光滤

光片,分析介质光栅的厚度和金属光栅层的厚度发生偏差时对输出光谱的影响。

介质光栅的厚度为  $80 \pm 10$  nm 时,引起的透射光谱的变化如图 4 所示。金属光栅的厚度为  $60 \pm 10$  nm 时,引起的透射光谱的变化如图 5 所示。由图 4、图 5 可知,当介质光栅的厚度和金属光栅层的厚度存在  $\pm 10$  nm 偏差时,中心波长位置和透射光谱峰值偏差都很小。因此,该结构具有良好的工艺可行性。

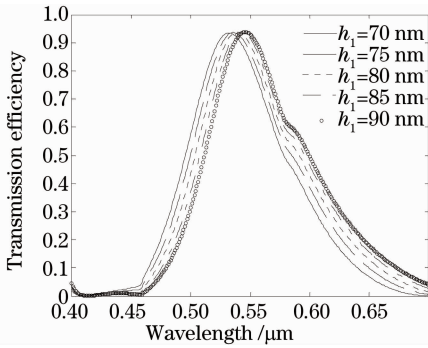


图 4 透射光谱随  $h_1$  变化的规律

Fig. 4 Variation of the transmission spectra with different  $h_1$

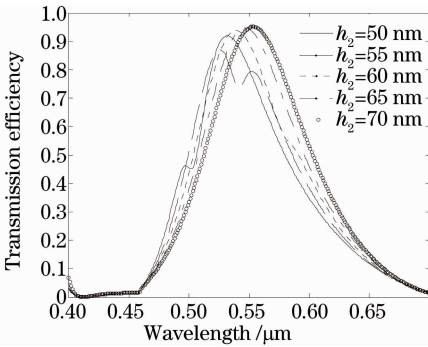


图 5 透射光谱随  $h_2$  变化的规律

Fig. 5 Variation of the transmission spectra with different  $h_2$

## 6 结 论

针对液晶平板显示器件中所应用的彩色滤光片,研究了一种亚波长光栅结构在可见光波段的透射光谱特性,获得了红绿蓝三色光的宽带宽、高透射效率滤波输出,其 FWHM 约  $85 \sim 100$  nm,中心光谱透射效率约 95%,与其他应用于彩色滤光片的光栅结构相比提高了 12%。而且只需改变光栅的周期,就可获得 R,G,B 三色的透射光谱,降低了加工彩色滤光片的难度。误差分析表明,该结构具有良好的工艺可行性。本文提出的彩色滤光片适合用作液晶平板显示中的滤光器件,基于柔性有机材料的

金属光栅不仅色纯度好,而且光能利用率高,具有很高的应用价值。

## 参 考 文 献

- Li Hongyan, Yang Jiuxia, Lü Yanying *et al.*. Development of the color filter technology [J]. *Advanced Display*, 2005, **52**(6): 40~44
- 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**(6): 40~44
- Zheng Shaoyu, Meng Qinghua, Huang Deyin. The color filter for LCD manufactured by ink-jet printing method [J]. *Information Recording Materials*, 2007, **8**(2): 30~35
- 郑少瑜, 孟庆华, 黄德音. 基于喷墨工艺的液晶显示用彩色滤光片 [J]. 信息记录材料, 2007, **8**(2): 30~35
- W. Kim, T. Jang, J. Choi. Hybrid-type Polarizer, Method of Manufacturing the Same and Display Device Having the Same [P]. US Patent, 0019292, 2007
- P. C. Chen, H. Kuo, C. Chiu *et al.*. Color Filter and Method of Fabricating the Same [P]. US Patent, 0246652, 2006
- Y. Kanamori, M. Shhimono, K. Hane. Fabrication of transmission color filters using silicon subwavelength gratings on quartz substrate [J]. *IEEE Photonic Technol Lett.*, 2006, **18**(20): 2126~2128
- 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
- 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
- Douglas S. Hobbs. Microstructured Optical Device for Polarization and Wavelength Filtering [P]. US Patent, 0262250, 2006
- Yoshiaki Kanamori, Takashi Kitani, Kazuhiro Hane. Guided-mode resonant grating filter fabricated on silicon-on-insulator substrate [J]. *JPN J. Appl. Phys.*, 2006, **45** (3A): 1883~1885
- R. Magnusson, S. S. Wang. Transmission bandpass guided-mode resonance filters [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34** (35): 8106~8109
- Zhang Liang, Li Chengfang. Polarization effect of 150 nm subwavelength aluminum wire grating in near infrared [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 467~471
- 张亮, 李承芳. 150 nm 亚波长铝光栅的近红外偏振特性 [J]. 中国激光, 2006, **33**(4): 467~471
- Ordal M. A., Long L. L., Bell R. J. *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
- D. L. Brundrett, E. N. Glytsis, T. K. Gaylord. Normal-incidence guided-mode resonant grating filters: design and experimental demonstration [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23** (9): 700~702
- C. F. R. Mateus, M. C. Y. Huang, L. Chen *et al.*. Broad-band mirror (1.12~1.62 μm) using a subwavelength grating [J]. *IEEE Photonic Technol Lett.*, 2004, **16**(7): 1676~1678
- S. Tibuleac, R. Magnusson. Reflection and transmission guided-mode resonance filters [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(7): 1617~1626
- Wang Zhenhua, Wu Yonggang, Sang Tian *et al.*. Reflection spectra properties of guided-mode resonance filters with buffer layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1425~1428
- 王振华, 吴永刚, 桑田 等. 带缓冲层的导模共振滤光片反射光谱特性 [J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1425~1428

- 17 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
- 18 Fu Xiaoyong, Yi Kui, Shao Jianda *et al.*. Design of single-material guided-mode resonance filter [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 9~11
- 19 G Veronis, Z. Yu, S. E. Kocabas *et al.*. Metal-dielectric-metal plasmonic waveguide devices for manipulating light at the nanoscale[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(4): 302~308
- 20 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
- 21 M. G. Moharam, Eric B. Grann, Drew A. Pommet. 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