

基于金属-介质薄膜的反射型彩色滤光片

余 鹏 沈伟东 章岳光 牛海亮 刘 旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 基于诱导反射原理设计了一种可见光波段金属-介质薄膜结构的反射型彩色滤光片。高吸收铬和高反射铝的应用使它既能获得高反射率又有很高的宽波段截止度,通过改变介质匹配层的厚度实现适当的导纳匹配,得到了反射率大于 72%、较高色饱和度的红绿蓝三色滤光片。实验制作了样品,测试结果与设计相吻合。基于半色调技术,采用光刻和剥离工艺制备了不同面积占空比的滤光片阵列,实现了高分辨率、介于红绿蓝三色之间中间色的光学反射单元。

关键词 光学薄膜;彩色滤光片;诱导反射

中图分类号 O484.4⁺1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1231003

Reflective Color Filters Based on Metal – Dielectric Thin Films

Yu Peng Shen Weidong Zhang Yueguang Niu Hailiang Liu Xu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Reflective color filters with metal-dielectric thin films in visible range are designed based on induced reflection method. High-absorption chromium and high-reflection aluminum enable these color filters to acquire both high reflectance and cut-off level in a broadband spectral region. Red, green and blue reflective filters with the reflectance larger than 72% and wide color gamut are obtained by adjusting thickness of their matching dielectric layers respectively for proper admittance matching. Filter samples are experimentally fabricated and the measured results agree well with those of the simulation. According to the halftone technique, filter arrays with different area duty ratios are prepared by lithography and stripping technology to realize optical reflective units with high resolution and intermediate colors among red, green and blue.

Key words optical thin films; color filter; induced reflection

OCIS codes 310.1620; 310.1860

1 引 言

彩色滤光片能够过滤入射光中特定波段的光辐射,获得具有某种颜色的出射光,因而在成像和显示领域中广泛应用^[1~4]。常用的彩色滤光片都是透射型滤光片^[5~7],然而随着一些新兴领域对反射型彩色滤光片需求的增加,针对不同应用的反射滤光片逐渐引起了人们的兴趣。Cho 等^[8]提出一种二维光子晶体反射滤光片,采用纳米压印、等离子体增强化学气相沉积(PECVD)等技术在玻璃上硅(SOG)基底上制备非晶硅亚波长二维光栅,从而实现了高反射率和大角度容差。然而其红绿蓝(RGB)三色光

峰值反射率相差较大,而且工艺复杂,制备难度大。Saito 等^[9]通过模拟翅膀表面的微结构成功再现了大闪蝶蓝色,它通过在石英基底上交替淀积随机排列的 SiO₂-TiO₂ 多层膜堆,构成亚波长级三维光子晶体结构,具有色彩逼真、角度容差大的特点,但制备过程涉及光刻^[10]、纳米压印和刻蚀等多种工艺,对设计水平和工艺条件的要求很高。

本文提出一种结构简单、制备容易的金属-介质薄膜诱导反射型彩色滤光片。该滤光片根据光学薄膜干涉理论设计,利用 SiO₂ 膜层诱导高反射率的金属铝(Al)使其在中心波长处获得最大反射率;高吸

收稿日期: 2011-05-30; 收到修改稿日期: 2011-07-09

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y1090504)和中央高校基本科研业务费专项资金(2010QNA5036)资助课题。

作者简介: 余 鹏(1985—),男,硕士研究生,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: 20930086@zju.edu.cn

导师简介: 章岳光(1968—),男,博士,副教授,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: zhangyueguang@zju.edu.cn

收极薄金属铬(Cr)薄膜实现反射波段之外的宽波段截止。实验制备了高反射率、较高色饱和度的红绿蓝三色反射滤光片。最后采用光刻与剥离工艺,将微小的三色滤光片(最小尺寸为 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$)按照一定的面积比例排列,获得了中间颜色的反射单元。

2 设计原理

考虑到剥离工艺中涉及的显影液等化学试剂会对 Al 进行腐蚀,因此铝膜必须在基板的最外层,作为最后一个加工步骤来镀制。反射滤光片结构如图 1 所示,照明光从玻璃基板一侧正入射,经过 TiO_2 层、极薄的 Cr 层、诱导反射匹配层 SiO_2 ,在 Al 层表面被反射后,原路返回,最后从玻璃基板出射。该结构中的 Al 薄膜用于提供高反射率,而金属 Cr 的吸收大,所以选用 Cr 薄膜吸收反射波段之外的光辐射,以提供宽波段的深截止度。 SiO_2 作为匹配层,作用是将膜系在特定波长附近的反射率诱导至最大。由于该结构的光学特性对 SiO_2 层的厚度敏感,因此只需改变其中的 SiO_2 层厚度就可以诱导反射出不同的颜色。 TiO_2 膜层是 Cr 薄膜的减反射层,用以提高诱导反射的截止度。

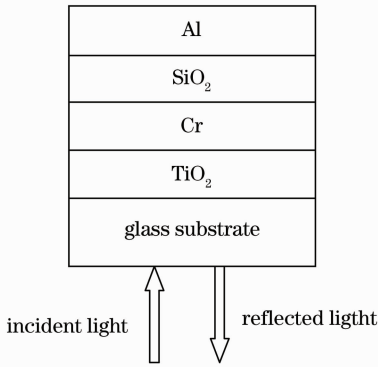


图 1 诱导反射彩色滤光片结构示意图

Fig. 1 Schematic of the induced reflective color filter

先不考虑 TiO_2 膜层,分析膜系 $\text{Air}|\text{Al}|\text{SiO}_2|\text{Cr}|\text{Glass}$ 的光学特性。Al 膜的光学常数为 $n' - ik'$,物理厚度为 $100\ \text{nm}$; SiO_2 层的光学常数为 $n_1 = 1.46$,厚度为 D ; Cr 膜的光学常数为 $n - ik$,物理厚度为 d 。照明光从玻璃基板入射,入射介质和出射介质的光学常数分别是 n_s 和 n_o 。

金属 Cr 的消光系数 $k \approx n^{[11]}$,吸收很大,当 Cr 膜的厚度达到 $40\ \text{nm}$ 左右时,几乎没有光透过。因此膜系中用 $d \ll \lambda_0$ 的极薄 Cr 膜,其相位厚度为 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n - ik)d$ 。Cr 膜的特征矩阵是

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos \delta & i \sin \delta / (n - ik) \\ i(n - ik) \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

由于 $d \rightarrow 0$,所以 $\delta \rightarrow 0$,对(1)式中的 $\cos \delta, \sin \delta$ 进行泰勒展开,只取第一项,忽略高次项,且考虑 $k \approx n$,得到

$$\mathbf{M} \approx \begin{bmatrix} 1 & i2\pi d/\lambda \\ 4\pi nkd/\lambda & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

假设 $\text{Air}|\text{Al}|\text{SiO}_2$ 的等效导纳为 $Z = X + iY$,则玻璃基板上的膜系 $\text{Air}|\text{Al}|\text{SiO}_2|\text{Cr}$ 的组合导纳为

$$\eta = \frac{4\pi nkd/\lambda + X + iY}{1 - 2\pi dY/\lambda + i2\pi dX/\lambda}, \quad (3)$$

整个膜系 $\text{Air}|\text{Al}|\text{SiO}_2|\text{Cr}|\text{Glass}$ 的反射率为

$$R = \left(\frac{n_s - \eta}{n_s + \eta} \right) \left(\frac{n_s - \eta}{n_s + \eta} \right)^* = \frac{\left(n_s - X - \frac{2\pi}{\lambda} d Y n_s - \frac{4\pi}{\lambda} k n d \right)^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda} d X n_s - Y \right)^2}{\left(n_s + X - \frac{2\pi}{\lambda} d Y n_s + \frac{4\pi}{\lambda} k n d \right)^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda} d X n_s + Y \right)^2}. \quad (4)$$

由(4)式可以看出,如果设计膜系 $\text{Air}|\text{Al}|\text{SiO}_2$ 在中心波长处的导纳实部 $X \rightarrow \infty$ 、虚部 $Y \rightarrow \infty$,就可得到 $R \rightarrow 1$ 。该导纳即为最大反射匹配导纳。

膜系 $\text{Air}|\text{Al}|\text{SiO}_2$ 中 SiO_2 层的作用是将 Al 膜的导纳诱导至最大反射匹配导纳。可以将它看作两层:与 Al 膜相接的适当厚度的 SiO_2 层先将金属 Al 的导纳转换到 0;再令与 Cr 膜相接的 SiO_2 层的光学厚度等于 $1/4$ 中心波长的奇数倍,从而获得 X, Y 都趋于无穷大的最大反射匹配导纳。

设厚度为 D 的 SiO_2 层中,与 Al 膜相接的部分厚度为 D_1 ,与 Cr 膜相接的部分的厚度为 D_2 ,则 $D_2 = (2m + 1)\lambda_0/4n_1$ (m 为整数)。Al 膜厚度为 $100\ \text{nm}$,可作为基板处理,在其导纳实部 $n' \approx 0$ 的近似下,求得 $D_1 = \frac{\lambda_0}{2\pi n_1} \arctan(k'/n_1)$ 。由此确定膜系中 SiO_2 层厚度为

$$D = \frac{\lambda_0}{2\pi n_1} \arctan(k'/n_1) + (2m + 1)\lambda_0/4n_1, \quad (5)$$

式中 λ_0 是最大诱导反射的中心波长, m 是干涉级次。在同一级次 m 中, SiO_2 厚度 D 和 λ_0 呈线性关系。

基于上述原理,对膜系 $\text{Air}|\text{Al}|\text{SiO}_2|\text{Cr}|\text{TiO}_2|\text{Glass}$ 进行了设计和优化,结果如表 1 所示。

用薄膜软件 TFCalc 分别计算红绿蓝三色诱导反射型彩色滤光片的反射光谱,如图 2 所示。

所设计的蓝色和绿色滤光片均使用第 2 级干涉级次,以获得带宽合适的反射光谱形状。为防止出

现多余的蓝光反射峰,红色滤光片使用第1级干涉级次。设计得到的红绿蓝滤光片,其反射光的中心波长分别为706,516和451 nm,峰值反射率分别是75.9%,79.5%和78.0%(在所关注的400~700 nm波段,取700 nm处的反射率作为红色光的峰值反射率),带宽分别是58,56和47 nm(红光按半峰波长到700 nm的宽度计算)。

表1 红绿蓝彩色滤光片的膜系

Table 1 Film stacks of red-green-blue color filter

Material	Physical thickness of films / nm		
	Blue	Green	Red
Al	100	100	100
SiO ₂	289.6	336	225.4
Cr	8	8	8
TiO ₂	20	20	20

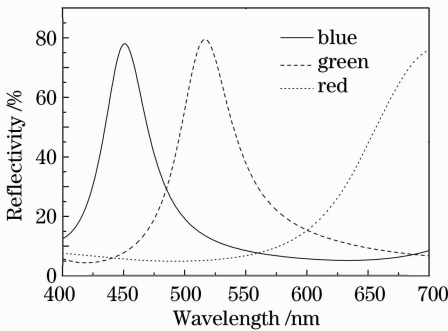


图2 红绿蓝彩色滤光片的反射光谱的计算结果

Fig. 2 Calculated RGB color filters' reflective spectra

3 制备与测试

实验使用南光700型箱式真空镀膜机,用电阻蒸发和电子束蒸发工艺在K9玻璃基板上分别镀制红绿蓝彩色滤光片。实验条件如下:基板温度300℃,背景真空 3×10^{-3} Pa, TiO₂, Cr和SiO₂的沉积速率分别为0.3, 0.3和1 nm/s,镀制TiO₂时的氧压为 1.8×10^{-2} Pa,最外层的铝在真空室降到室温时(25℃左右)快速蒸发,薄膜的厚度采用石英晶体监控(MDC-360C)。

采用Olympus USPM-RU反射光谱仪测试了实验制备的RGB三色滤光片反射光谱,光谱测量范围为400~700 nm,测试波长间隔1 nm。如图3所示,测得RGB三色反射光的中心波长分别为707, 516和451 nm,反射率分别达到73.4%,73.4%和72.1%,实验样品的反射率曲线与设计整体上相吻合。但是峰值反射率比设计值分别下降了2.5%, 6.1%和5.9%,这是由于金属铝薄膜易被氧化导致反射率降低,而且铝薄膜的光学常数与设计采用的

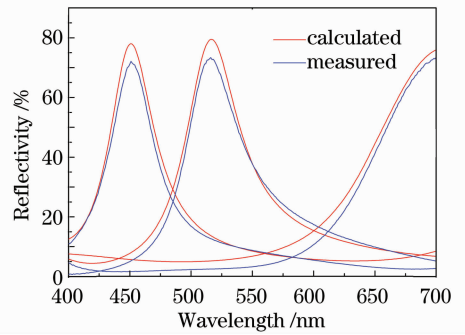


图3 RGB滤光片的设计光谱与测试光谱

Fig. 3 Calculated and measured spectra of RGB filters

大块材料光学常数存在差异。极薄金属铬层也存在同样的问题:蒸发过程中部分气态Cr分子易氧化生成Cr₂O₃,影响铬层的光学常数。所以实际镀制的铬薄膜与设计金属铬的光学常数存在偏差,这是图3中RGB三色滤光片设计和测得的宽波段截止度不一致的原因。

由测试得到的反射率曲线可以得到RGB滤光片的反射光色坐标,图4即为在CIE-1931色品图上RGB色坐标点连线划出的三角形颜色空间。从图中可以看出红色滤光片的饱和度较高,而绿色和蓝色的饱和度仍有待改进。实验制作的红绿蓝滤光片的照片也显示在图4中。

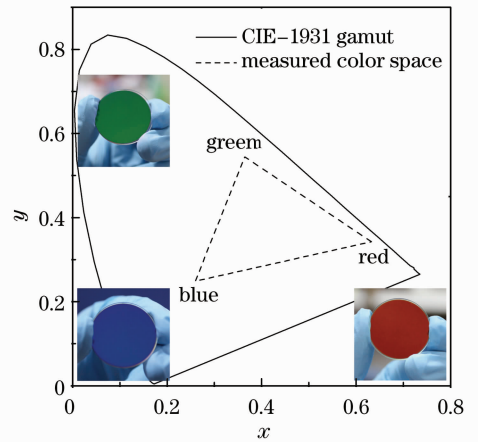


图4 CIE-1931色品图中RGB反射滤光片的颜色空间

Fig. 4 Color space of reflective RGB filters in CIE-1931 chromaticity diagram

有了红绿蓝三种基本颜色滤光片,就可以通过半色调技术也即改变R,G,B三种滤光片的面积占空比实现介于红绿蓝三色之间的中间色的显示^[12]。实验采用剥离工艺制备了RGB三色滤光片合成的彩色像素,其中每个像素尺寸为 $85 \mu\text{m} \times 85 \mu\text{m}$,达到了300 dpi(Dot per inch)的印刷分辨率,像素中单个滤光片的尺寸从最大的 $85 \mu\text{m} \times 85 \mu\text{m}$ 到最小

的 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 。

图5所示为实验制备的彩色滤光片像素阵列和像素。滤光片阵列尺寸为 $2\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ ，二维排列着805个 $85\ \mu\text{m} \times 85\ \mu\text{m}$ 的滤光片像素，每个像素中含有2个红色滤光片、1个绿色滤光片和1个蓝色滤光片。采用Nikon ECLIPSE80i光学显微镜观察滤光片像素，由于照明光源是钠黄灯，所以图5中绿色滤光片呈现黄色，而蓝色滤光片呈现深褐色。每个像素中红色滤光片面积占50%，绿色和蓝色滤光片各占25%，所以整个滤光片阵列呈现橙红色。采用这种技术可以获得介于上述滤光片红绿蓝三色之间的中间色，同时光刻、剥离等半导体微加工工艺的应用，可以制备最小尺寸为 $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 的滤光片，因此在高分辨率绿色印刷等领域具有应用前景。

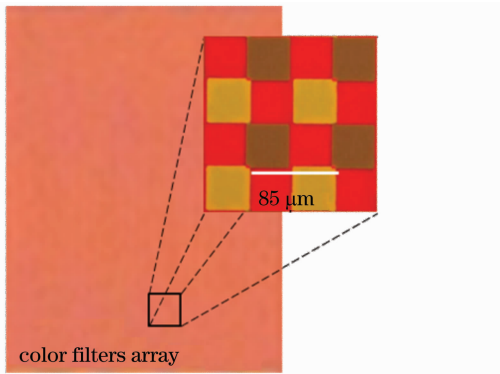


图5 RGB滤光片阵列($2\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$)及其中4个像素的显微照片

Fig. 5 RGB color filters array ($2\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$) and microscopic photo of 4 color pixels

4 结 论

基于诱导反射原理设计并制作了一种金属-介质薄膜结构的反射型彩色滤光片，测试了其光学性能，并研究了利用不同面积占空比的彩色滤光片阵列实现中间颜色方法。该滤光片不但反射率高、色饱和度较高、性能稳定，而且结构简单，制作工艺成熟，为设计制作反射型彩色滤光片提供了一种新的技术方案。在此基础上结合光刻、剥离工艺制备的

彩色滤光片阵列具有分辨率高、颜色丰富的特点，有望在高分辨率绿色印刷、商品包装、建筑装饰和彩色照明等领域得到应用。

参 考 文 献

- 1 Ram W. Sabnis. Color filter technology for liquid crystal displays [J]. *Displays*, 1999, **20**(3): 119~129
- 2 Marcus Frank, Uwe B. Schallenberg, Norbert Kaiser. Multispectral dielectric microfilter arrays for local resolving color sensors [J]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(9): 2647~2654
- 3 Chan-Jae Lee, Duck-Kyun Choi, Jeong-In Han. Characteristics of ITO and overcoat layer for full color organic light emitting diode with color filter [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2009, **499**(1): 380~387
- 4 Du Lili, Yi Weining, Zhang Dongying *et al.*. Multispectral image acquisition system based on liquid crystal tunable filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 187~191
杜丽丽, 易维宁, 张冬英等. 基于液晶可调谐滤光片的多光谱图像采集系统 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 187~191
- 5 Horng-Show Koo, Mi Chen, Po-Chuan Pan. LCD-based color filter films fabricated by a pigment-based colorant photo resist inks and printing technology [J]. *Thin Solid Films*, 2006, **515**(3): 896~901
- 6 Cheng-Chung Jaing, Chii-Rong Yang, Chun-Ming Chang *et al.*. Patterning of multilayer dielectric optical filters using metal masks fabricated by electroforming and photolithography [J]. *J. Micro-Nanolithography MEMS and MOEMS*, 2009, **8**(3): 033009
- 7 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
- 8 Eun-Hyoung Cho, Hae-Sung Kim, Byoung-Ho Cheong *et al.*. Two-dimensional photonic crystal color filter development [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(10): 8621~8629
- 9 Akira Saito, Yusuke Miyamura, Yoko Ishikawa *et al.*. Reproduction, mass-production, and control of the morpho-butterfly's blue [C]. *SPIE*, 2009, **7205**: 720506
- 10 Wang Shaowei, Chen Xiaoshuang, Lu Wei. Fabrication of step filter for miniature wavelength-division device based on photolithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1358~1362
王少伟, 陈效双, 陆卫. 基于光刻工艺的阶跃滤光片式微型分光器件研制 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1358~1362
- 11 P. B. Johnson, R. W. Christy. Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd [J]. *Phys. Rev. B*, 1974, **9**(12): 5056~5070
- 12 Basak Oztan, Gaurav Sharma. Per-separation clustered-dot color halftone watermarks: separation estimation based on spatial frequency content [J]. *J. Electronic Imaging*, 2010, **19**(4): 043007

栏目编辑: 韩峰