

用于彩色屏显的双层耦合光栅设计

尤 勳^{1,2} 黄战华^{1,2} 蔡怀宇^{1,2}

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072
² 天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 在彩色波导全息平视器的设计中,易出现色彩不均和结构复杂的问题。将折射率、厚度各异的膜层,分别嵌入双层波导中,对一种新型的双层耦合光栅结构进行了优化设计。基于严格耦合波理论(RCWA)的计算表明,该双层光栅可实现主视场内较均匀的彩色成像,且结构精简。相较于传统的体全息元件,该结构批量制造的可靠性更高。双层光栅的设计分别以 470 nm 和 632 nm 为中心波长,实现衍射能量的相互补偿。优化结构参数后,当入射角在 $[-11^\circ, 11^\circ]$ 内变化时,主视场内 RGB 三波长的衍射效率(DE)可大于 85%,各波长间最大的效率差异可小于 5%。

关键词 光栅;衍射效率;严格耦合波理论

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1005001

Design of Double-Layer Coupling Gratings for Full-Color Helmet Mounted Display

You Meng^{1,2} Huang Zhanhua^{1,2} Cai Huaiyu^{1,2}

(¹ College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract In the design of full-color waveguide holographic head-up display, the color is always uneven or the structure is over-complex. A novel double coupling grating structure is designed and optimized with embedded layers of different refractive indexes and thicknesses. Based on rigorous coupled-wave analysis (RCWA), the calculations show that the structure can achieve a more uniform color imaging in the primary field of view. It's simplified and reliable for mass production. The double-grating is designed with central wavelength of 470 nm and 632 nm, respectively, to compensate the diffraction energy. After optimization, when the incident angle changes during the range from -11° to 11° , the diffraction efficiency (DE) of the RGB wavelengths is greater than 85% in the primary field of view and the maximum efficiency differs by less than 5%.

Key words grating; diffraction efficiency; rigorous coupled-wave analysis

OCIS codes 050.1970; 230.1950; 310.6628

1 引 言

在头盔显示系统(HMD)的研发历程中,体全息、衍射元件逐渐取代了半透半反镜,成为新型HMD系统中的关键器件,以实现小体积、高效率的大视场屏显^[1~3]。其中对于单色光源的成像考虑较多,对于彩色屏显的分析相对较少。Amitai等^[4]在

单片波导板中嵌入三片体全息,以实现彩色成像。但是体全息会针对某单一波长(如绿光)发生强烈的衍射,对其余波长的衍射效率(DE)较低,使成像出现明显的偏绿现象。Mukawa等^[5]描述了重叠式体全息的屏显系统,可以实现较均匀的彩色成像,但是半视场仅为 8° ,且体全息存在难以复制的缺点,系

收稿日期: 2012-04-19; 收到修改稿日期: 2012-05-14

作者简介: 尤 勳(1986—),男,博士研究生,主要从事全息和衍射光学等方面的研究。E-mail: ymeng@tju.edu.cn

导师简介: 黄战华(1965—),男,博士,教授,主要从事信息光学和图像处理等方面的研究。E-mail: zhanhua@tju.edu.cn

(通信联系人)

统装调也过于复杂。英国的 BAE Systems 公司提出用新型光栅替代体全息,并将单色光源的屏显系统应用于工业生产。但是对于彩色屏显,该公司在专利中提出两种方案:1)楔形角直接耦合^[6],但是需要较宽的波导杆横截面,体积重量增加,且入射光源的方位必须倾斜放置;2)三层波导重叠^[7],利用高效率的光栅分别耦合 RGB 光束,实现均匀的彩色显示。但是三层波导的设计明显增加了体积和重量,对于头戴式系统来说并不适用。

本文在 BAE Systems 公司描述的系统基础上,将三层波导系统精简为两层,同时对其公布的光栅结构进行改进和优化,设计了双层耦合光栅,以实现高效率、大视场的彩色屏显。相较于体全息元件,该种光栅结构在批量制造时,可靠性更高。两层光栅分别针对 470 nm 和 632 nm 的波长作优化设计,在纵向角 $[-11^\circ, 11^\circ]$ 的入射范围内,可相互补偿能量,实现主视场显示效率大于 85% 的均匀彩色成像。

2 严格耦合波理论的计算简述

由于耦合光栅的特征尺寸在波长量级,所以选择了严格耦合波理论(RCWA)进行矢量计算^[8,9],以求得各级 DE 的严格解。RCWA 的出发点在于各层相应级次的横向谐波耦合,即空间频率需要保持一致。以 TE 波入射为例,求出入射与透射区域的电场表达式 $E_{1,y}$ 与 $E_{II,y}$:

$$E_{1,y} = E_{inc,y} + \sum R_i \exp[-j(k_{zi} - k_{1,zi})], \quad (1a)$$

$$E_{II,y} = \sum T_i \exp\{-j[k_{zi}x - k_{II,zi}(z-d)]\}. \quad (1b)$$

由麦克斯韦方程得到光栅内部的电磁场分量 E_{gx} 与 H_{gy} :

$$E_{gx} = \sum S_{yi}(z) \exp(-jk_{xi}x), \quad (2a)$$

$$H_{gy} = -j \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \sum U_{yi}(z) \exp(-jk_{xi}x). \quad (2b)$$

结合光栅内的介电常数 $\epsilon(x)$ 并在 $z=0$ 与 $z=d$ 处运用边界条件,得到不同介质分界面电磁场的连续分量,列方程组即可求解各衍射级次的能量。求解过程中采用透射矩阵以提高计算效率,并运用薄层光栅的递推方法以避免数值的不稳定^[10,11]。以下的计算均设定为 TE 模式入射。

3 双层耦合光栅的设计

如图 1 所示,光束由成像源出射,准直后的光束由带箭头的粗直线表示。准直光束入射波导 I,在光栅 I 发生衍射,衍射光束耦合入波导 I 中,继续全反射

传播;经光栅 I 透射的光束在光栅 II 发生衍射,衍射光束耦合入波导 II 中全反射传播。图 1 中,准直光束与波导 I、波导 II 的入射夹角定义为纵向角 b 。

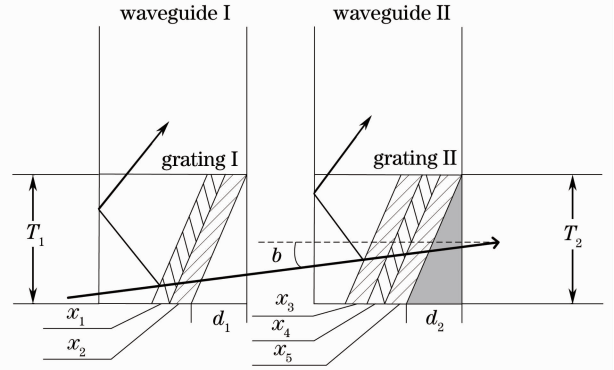


图 1 双层耦合光栅

Fig. 1 Double-layer coupling gratings

在图 1 所示的波导 I 中,给出了光栅 I 单周期形貌示意图。光栅 I 的周期表示为 T_1 。光栅 I 的形貌类似于闪耀光栅,刻槽深度为 d_1 。在光栅 I 的斜面上镀双层膜,膜的上、下表面与斜面平行。膜层厚度从左至右依次为 x_1 、 x_2 。膜层材料的选择考虑镀膜的工艺和常用的材料,选用二氧化钛(折射率为 2.5)和二氧化硅(折射率为 1.52)。光栅 I 的膜层折射率从左至右依次为 2.5 和 1.52。

在图 1 所示的波导 II 中,给出了光栅 II 单周期形貌示意图。光栅 II 的周期表示为 T_2 。光栅 II 的刻槽深度为 d_2 ,在光栅 II 的斜面上镀三层与斜面平行的膜层,厚度从左至右依次为 x_3 、 x_4 、 x_5 ,折射率从左至右依次为 2.5、1.52、2.5。在光栅 II 最右侧膜层的顶端,覆盖金属银,以灰色阴影区显示。

由于光束由成像源出射后,存在一定的视场角度,所以不同视场角的光束入射耦合光栅后,其衍射光束需要满足波导内的全反射条件,才能继续传播,如图 1 中带箭头的细直线所示。为了满足大视场光束的入射条件,需要减小全反射的临界角,即增大波导 I 和波导 II 的材料折射率。考虑常见的高折射率透明材料,波导 I 和波导 II 的折射率均设定为 1.65。

4 耦合光栅的衍射特性

HMD 的视场角通常设定为 $30^\circ \times 20^\circ$ ^[12],入射光的横向角 a (所在平面与图 1 中纵向角 b 的平面垂直)与纵向角 b 需满足 30° 和 20° 的角度变化范围。计算中发现,横向角 a 对 DE 的影响并不明显,故仅考虑纵向角 b 的影响,并设定其在 $\pm 10^\circ$ 内变化。同时,根据市场上常见的彩色 OLED 参数,将三基色

波长选定为 470、532、632 nm。

由于双层光栅需要对三种波长实现均匀的耦合,所以设定光栅 I 针对最短的波长 470 nm 进行设计,而光栅 II 针对最长的波长 632 nm 进行设计。对于 532 nm 的波长,光栅 I 会对其部分入射角度进行衍射,而光栅 II 会对其余的入射角度进行补偿衍射,从而使两层光栅分别衍射不同的波段,实现能量的均匀耦合。

计算光栅 I 的周期 T_1 。设定入射光波长为 470 nm,纵向入射角在 $\pm 10^\circ$ 内变化。 T_1 的取值需要使光栅 I 衍射的光束,在波导内满足全反射条件。由于波导的折射率为 1.65,得到全反射的临界角约为 37° 。经过计算,设定 $T_1 = 350$ nm,此时一级衍射的最小角度为 40° ,大于临界角,可以满足全反射条件。考虑其余的入射波长,532 nm 仅在部分入射角度存在一级衍射,632 nm 几乎没有一级衍射的发生。这样光栅 I 可以在 $\pm 10^\circ$ 的变化范围内,完整衍射 470 nm 波长,部分衍射 532 nm 波长,近似完整的透射 632 nm 波长。

然后计算光栅 II 的周期 T_2 。由于 632 nm 的波长经过光栅 I 后,几乎没有发生衍射,能量集中在透射零级进入光栅 II,所以光栅 II 需要针对 632 nm 进行设计。计算后设定 $T_2 = 460$ nm,在 $\pm 10^\circ$ 的变

化范围内,光栅 II 的最小衍射角为 39.3° ,满足波导的全反射条件,从而对光栅 I 的透射能量形成补偿。

4.1 光栅 I

光栅 I 的结构中,存在膜厚 x_1 、 x_2 、刻槽深度 d_1 三个变量。这些变量的组合需要使三种波长发生高效、平稳的一级衍射,同时抑制高阶衍射级次,使未衍射的能量集中在透射零级,进入光栅 II。

在优化变量的过程中,由于光栅 I 的周期是针对 470 nm 波长设计的,所以对于该波长,一级 DE 一般可达 70% 以上,变化不大。对于 632 nm 的波长,由于几乎不发生一级衍射,所以大部分的能量会零级透射。而 532 nm 波长的情况就比较复杂。由于距离 470 nm 波长较近,该波长会在 $[-8^\circ, 10^\circ]$ 的角度范围内发生一级衍射,且 DE 随参数的变化明显。

预设 $x_2 = 100$ nm,在图 2 显示了当 x_1 不同时,一级衍射和零级透射效率曲线。图中的箭头方向表示,穿越的曲线分别为 $x_1 = 50、40、30、20、10$ nm。从这些曲线的走势可以看出,当选择 $x_1 = 30$ nm 时,一级衍射与零级透射效率的曲线变化较为平坦,对均匀成像比较有利。

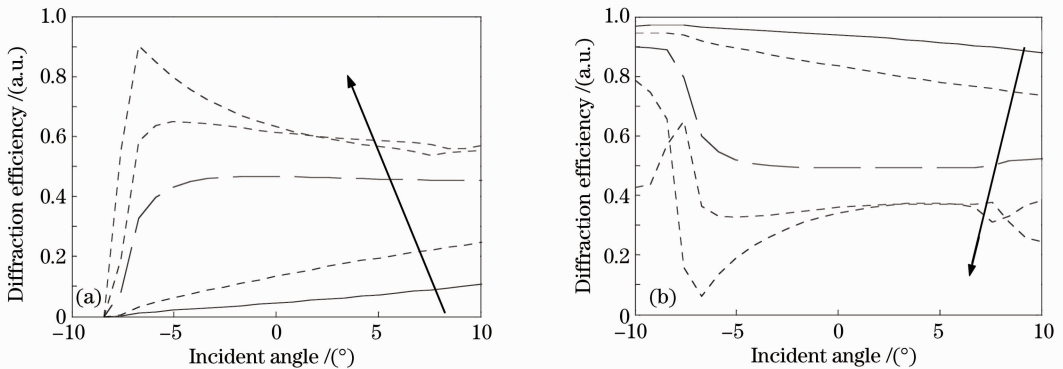


图 2 DE 曲线。(a)一级衍射;(b)零级透射

Fig. 2 DE curves. (a) 1st-order diffraction; (b) 0th-order transmission

设定 $x_1 = 30$ nm 后改变 x_2 的厚度值,由于该膜的折射率较低,对于整体 DE 的影响并不明显,如图 3(a)所示,其中 $T(0)$ 表示零级透射, $R(-1)$ 表示负一级反射衍射。图中的箭头方向表示,穿越的曲线分别为 $x_2 = 50、60、70、80、90$ nm。观察后选择 $x_2 = 70$ nm。

对于倾斜量 d_1 ,图 3(b)显示了其数值为 160~200 nm 时,DE 的变化曲线。可以看出该参数的影响也较小,观察后选择 $d_1 = 180$ nm。

综合上述参数值,计算光栅 I 在不同波长入射下,随角度变化的一级 DE 和零级透射效率,如图 4 所示。对于波长 470 nm,一级 DE 接近 60%,透射效率接近 40%。对于波长 532 nm,当入射角在 $[-5^\circ, 11^\circ]$ 间变化时,一级 DE 接近 46%,透射效率接近 50%。而对于波长 632 nm,仅当入射角大于 8° 时,才开始出现一级衍射,其余入射角下的透射效率接近 97%。

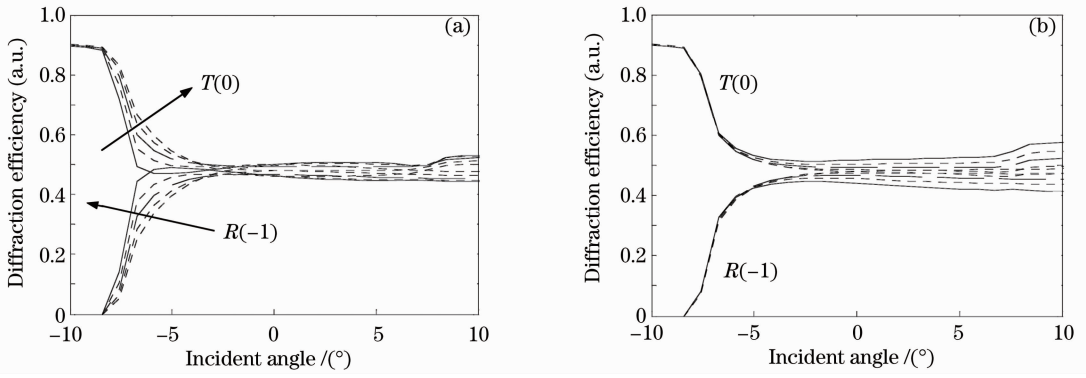


图 3 DE 曲线。(a)随 x_2 变化；(b)随 d_1 变化
Fig. 3 DE curves. (a) Changing with x_2 ; (b) changing with d_1

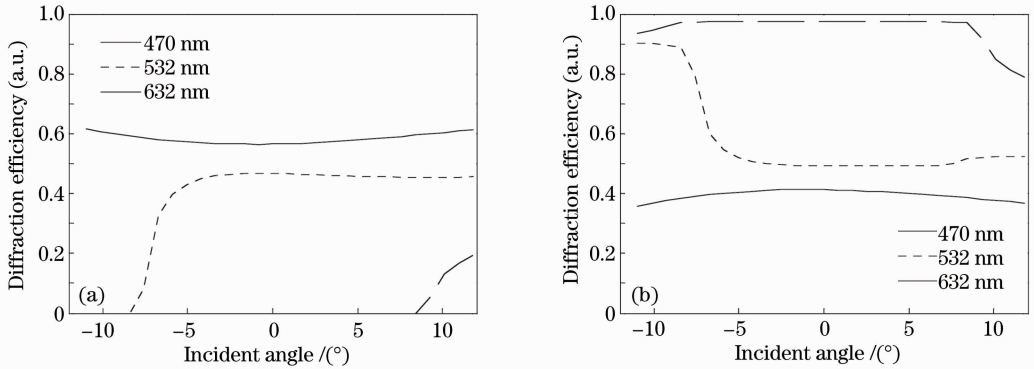


图 4 DE 曲线。(a)一级衍射；(b)零级透射
Fig. 4 DE curves. (a) 1st-order diffraction; (b) 0th-order transmission

4.2 光栅 II

光栅 II 需要较高的 DE, 以满足对光栅 I 透射光束的能量补偿。为此在光栅 II 的设计中, 采用了底面镀银^[13]的方式, 并在入射面采用三层折射率、厚度变化的膜层, 以提高一级 DE。

光栅 II 的周期依 632 nm 的波长而定, 可以满足其高效衍射的要求。但是 470 nm 波长的 DE 比较低。由于其存在约 40% 的透射能量, 所以光栅 II 的优化重点在于, 针对 470 nm 的波长, 获得较高的一级 DE。

计算中发现, 与光栅 I 类似, 厚度 x_4 的膜层折射率较低, 该参数的影响并不明显。多次尝试后, 设定 $x_4 = 50$ nm, 同时变化 x_3 和 x_5 的数值, 观察不同组合下, 470 nm 波长可以获得的最高 DE, 如图 5(a) 所示。图中虚线包括的区域效率较高, 当 $x_3 = 40$ nm、 $x_5 = 25$ nm 时, 470 nm 波长的一级效率可达 70%。

图 5(b) 给出了倾斜量 d_2 对各波长 DE 的影响。在兼顾 632 nm 获得高效率的同时, 也要保证其余波长的衍射峰值。由图可以看出, 当 $d_2 = 240$ nm

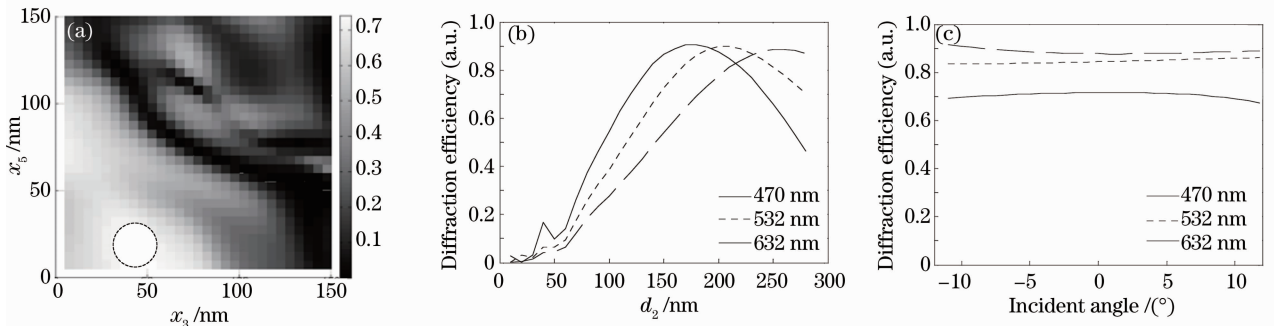


图 5 DE 图。(a)随 x_3 和 x_5 变化；(b)随 d_2 变化；(c) 一级衍射
Fig. 5 DE figures. (a) Changing with x_3 and x_5 ; (b) changing with d_2 ; (c) 1st-order diffraction

时,632 nm 的衍射峰值为 88%,532 nm 的峰值为 85%,470 nm 的峰值为 72%,可以满足设计要求。

图 5(c)显示了光栅 II 随入射角变化的各波长 DE 曲线。图中的曲线总体变化平稳,且存在明显的偏红现象(632 nm 效率偏高,约 90%),这是由其固定的周期结构所导致的^[14,15]。最低的 DE 为 470 nm,约 70%。

4.3 总体耦合效率

双层光栅的总体耦合效率,是由光栅 I 和光栅 II 组合计算而得。将光栅 I 的透射效率乘以光栅 II 的 DE,所得结果加上光栅 I 的 DE,就是该耦合系统所获得的最终效率。

如图 6 所示,当入射角在 $[-5^{\circ}, 11^{\circ}]$ 内变化时,三种波长的耦合效率均大于 85%,且相互效率的差异不大于 5%。该角度的变化范围包括了中心视场,并涵盖了约 75%的全部视场。当入射角在 $[-11^{\circ}, -5^{\circ}]$ 内变化时,532 nm 的耦合效率出现下降,接近 75%,在这个视场区域会出现偏紫的成像,但是效率的差异也在 10%以内。

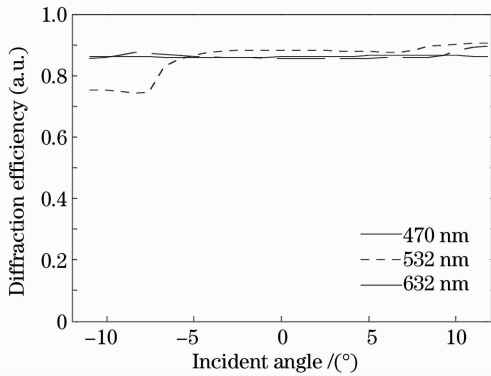


图 6 RGB 三种波长的 DE 曲线图

Fig. 6 DE curves of RGB wavelengths

当入射光经过双层光栅后,耦合的光束会在波导 I 与波导 II 中全反射传播。光束在传播过程中,会反复的经过效率递增的出射光栅区域^[6,7],从而衍射成像。

对比图 6 与图 5(c),可以发现该双层耦合光栅的优势。图 5(c)是典型的高效率光栅,在多波长入射下随角度变化的效率曲线图。效率总会出现偏重某一波长的情况,这是由其固定的周期结构所导致的。同样的情况也会出现在高效率的体全息元件中。而双层耦合光栅可以在主视场内,使三种波长的 DE 差异小于 5%,总体效率大于 85%,仅在小部分视场出现 10%的效率差异。这与图 5(c)中最高 20%的效率差异相比,有了明显的提高。相较于体

全息元件,该光栅结构批量制造的可靠性更高^[16,17]。而相较于三层波导板的设计,该双层结构精简了体积和重量,更适用于小型轻便的头戴式屏显系统。

5 结 论

优化设计了一种新型的双层耦合光栅。在优化了折射率、膜厚和倾斜量等参数后,该结构可在主视场内实现较均匀的彩色成像,RGB 三种波长的 DE 可大于 85%,各波长间最大的效率差异可小于 5%。该双层光栅的结构较为精简,批量制造的可靠性高,适用于头戴式的彩色屏显系统。

参 考 文 献

- O. Cakmakci. Head-worn displays: a review[J]. *J. Dis. Tech.*, 2006, **2**(3): 199~210
- Y. Amitai, S. Reinhom, A. A. Friesem. Visor-display design based on planar holographic optics[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(8): 1352~1355
- L. Eisen, M. Meyklyar, M. Golub *et al.*. Planar configuration for image projection [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45** (17): 4005~4008
- Y. Amitai, I. Shariv, M. Kroch *et al.*. White-light holographic display based on planar optics[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(15): 1265~1268
- H. Mukawa, K. Akutsu, I. Matsumura *et al.*. A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms[J]. *J. Soc. Inf. Display.*, 2009, **17**(3): 185~193
- M. Simmons, R. Howard. A projection display with a rod-like, rectangular cross-section waveguide and a plate-like waveguide, each of them having a diffraction grating[P]. W. O. Patent, 2007
- L. Noui. Improvements in or relating to waveguides[P]. W. O. Patent, 2010
- M. G. Moharam. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1995, **12**(5): 1068~1072
- M. G. Moharam. Stable implementation of the rigorous coupled wave analysis for surface-relief gratings enhanced transmittance matrix approach [J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1995, **12** (5): 1077~1081
- 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波片设计[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 950~953
- Pei Xuedan, Cui Qingfeng, Leng Jiakai. Effect of incident angle on diffraction efficiency of a two-layer diffractive optical element [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **29**(1): 120~125
- 裴雪丹,崔庆风,冷家开. 入射角对双层衍射光学元件衍射效率的影响[J]. *光学学报*, 2008, **29**(1): 120~125
- Q. Huang, H. J. Caulfield. Waveguide holography and its applications [C]. *SPIE*, 1991, **1461**: 303
- E. P. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids (1st Ed.) [M]. San Diego: Academic Press.
- 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,王茂金等. 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
- 15 Zhou Yun, Ye Yan, Shen Su. Research on the characteristics of sub-wavelength grating color filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0123003
周 云, 叶 燕, 申 溯. 亚波长光栅结构彩色滤光片研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0123003
- 16 Wang Ning. Experimentation of deposition rate control of SiO₂ by e-beam auto-sweeping [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **31**(10): 2615~2619
王 宁. 电子束自动扫描 SiO₂ 材料沉积速率控制实验研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(10): 2615~2619
- 17 Xu Zongwei, Fang Fengzhou. Fabrication of complicated micronano structures using focused ion beam milling method [J]. *J. Tianjin University*, 2009, **42**(1): 91~94
徐宗伟, 房丰洲. 基于聚焦离子束铣削的复杂微纳结构制备[J]. 天津大学学报, 2009, **42**(1): 91~94

栏目编辑: 李文喆