

# 基于导模共振光栅阵列的彩色图像再现

徐邦联 黄元申 王 琦 陶春先 张大伟 倪争技 庄松林

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

**摘要** 利用导模共振(GMR)光栅阵列再现彩色图像,不同于传统的彩色油墨印刷中所采用的三色染料混合的方式,它是利用光栅的滤光特性直接从自然光中分离出红、绿、蓝三色光充当三基色来代替化学油墨。由于GMR光栅在偏振光入射下衍射曲线在特定波长处会呈现很强的共振峰,且旁带非常低,因此很容易得到高纯度的单色光。考虑到降低实际加工的难度,只通过改变光栅周期来移动共振峰的位置以获得所需的三种基元光栅结构,然后对这些基元光栅进行分布处理即可得到彩色图像。

**关键词** 光栅;导模共振;彩色图像;衍射效率

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1205002

## Reproducing Colored Image with Guided-Mode Resonance Gratings Array

Xu Banglian Huang Yuanshen Wang Qi Tao Chunxian Zhang Dawei  
Ni Zhengji Zhuang Songlin

(Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract** A method of reproducing colored image with guided-mode resonance (GMR) gratings array is presented. It is different from traditional color impression which uses three kinds of pigment mixed to obtain various colors, but utilizes the filtering characteristics of grating to extract red, green and blue light which can be acted as three primary colors from natural light. As GMR grating shows strong resonant peak at specific wavelength as well as low sideband when illuminated by polarized light, monochromatic light with high purity can be obtained easily. In order to reduce the difficulty of actual manufacturing, only the period of grating is altered to shift the resonant position. After getting the three kinds of basic grating structures, colored image can be reappeared by distributing them. Computer simulation shows that using this method can restore colored images factually when the incident light is TE-polarized.

**Key words** grating; guided-mode resonance; colored image; diffraction efficiency

**OCIS codes** 350.2770; 330.1690; 310.6628; 220.4241

## 1 引 言

结构诱导的颜色效应很早就引起科学家们的关注<sup>[1~4]</sup>,其中以对昆虫翅膀的研究最具典型。文献[5]在扫描电子显微镜下观察了蝴蝶和飞蛾翅膀的微结构,阐明了翅膀颜色是光与其精细的周期性结构阵列的相互作用而产生的。文献[6]利用激光聚

焦技术,对两种大闪蝶翅膀的单层微结构的反射和透射特性进行了研究,并对其颜色的大角度可视性原理予以解释。文献[7]从多层膜结构的角度阐述了自然光下蝴蝶翅膀产生明亮彩虹色是光通过这些薄膜结构时干涉、散射以及衍射共同作用的结果,并对不同的入射角度下的这种颜色效应进行研究。文

**收稿日期**: 2011-06-20; **收到修改稿日期**: 2011-07-15

**基金项目**: 国家自然科学基金(60908021)、上海市纳米专项(1052nm07100)、上海市科技启明星(09QA1404200)上海理工大学研究生创新基金(JWCXSL1022)和宝山区产学研项目及上海市重点学科项目第三期(S30502)资助课题。

**作者简介**: 徐邦联(1988—),男,硕士研究生,主要从事亚波长光栅的理论和应用等方面的研究。

E-mail: xbl19880609@163.com

**导师简介**: 黄元申(1963—),男,硕士,高级工程师,主要从事微纳光学器件方面的研究。E-mail: hyshyq@sina.com

献[8]中利用树状的周期性光栅结构来模拟蝴蝶翅膀的微纳结构,提出了一种由衍射效率计算颜色的方法,理论计算的结果与实际很好吻合,从而为研究微纳结构的颜色效应提供了理论依据。近年来,越来越多的研究人员通过各种技术手段在实验室制作人工的微纳结构来研究这种颜色效应。文献[9]利用飞秒激光脉冲在金属 Al 上进行刻蚀,使得 Al 在未经任何镀膜工艺的条件下呈现出丰富多彩的颜色。文献[10]报道了利用超快激光脉冲在不锈钢基片上刻蚀不同方位角的光栅阵列制作出一幅彩色图像。Lochbihler<sup>[11]</sup>提出利用亚波长光栅阵列再现彩色图像的概念,利用四种不同槽深的基元金属光栅的组合来再现颜色,但由于结构的局限性,图像的整体颜色偏向蓝色。之后他又将两层金属光栅结构改进为三层<sup>[12]</sup>以增加光栅阵列所能表示的颜色的种类,最终制作的样品在整体效果上比先前有了很大的改进,但仍然存在着颜色大量缺失的问题。

针对上述的不足,本文提出了一种利用导模共振(GMR)<sup>[13~15]</sup>光栅阵列实现彩色图像再现的方法。GMR 光栅有着极好的滤光特性,当入射光为偏振光时,它的反射谱线在某一波长处会呈现一个共振峰,峰值几乎可以达到 100%,而且旁带特别低,因此利用这种结构可以很容易从自然光中滤出高纯度的单色光。因此若能设计出能从自然光中精确分离出红、绿、蓝三种颜色的基元光栅结构,通过它们的组合便能产生特定的颜色,进而再现出整幅彩色图像。采用 GMR 光栅阵列可以大大增加可再现的颜色种类,而且与文献[11,12]提出的调制光栅槽深的方法不同,我们通过改变光栅周期来产生“三基色”,这在实际的加工中会更容易实现。

## 2 GMR 基元光栅结构的设计

### 2.1 GMR 基元光栅参数的选取

为了尽可能大地降低实际制造的难度,选取的 GMR 光栅结构层数尽可能少,如图 1 所示。自下而上可以分为 4 个部分,分别为:衬底、波导层、光栅层以及覆盖层。其中衬底材料为 ZF3 玻璃,折射率  $n_s=1.717$ ;衬底上镀有一层氧化铪( $\text{HfO}_2$ )薄膜作为波导层,折射率  $n_1=2.0$ ,厚度  $d_1=128\text{ nm}$ ;光栅结构刻蚀在光刻胶上,光刻胶的折射率  $n_H=1.6$ ,填充介质为空气,即  $n_L=1$ ,占空比  $f=0.5$ ;覆盖层也是空气,故折射率  $n_c=1$ 。当这些参数确定以后,光栅的深度  $d_2$  和周期  $\Lambda$  成为影响其衍射效率的主要因素,利用严格的耦合波理论<sup>[16,17]</sup>对光栅在可见光波段内的反射效率进行了计算,入射光为 TE 偏振,即  $\mathbf{E}$  矢量的振动方向平行于光栅槽形方向( $x-z$  平面),入射角  $\theta=0^\circ$ ,计算结果如图 2 所示。其中图 2(a)显示的是  $\Lambda=300\text{ nm}$  时不同光栅槽深所对应的反射曲线,可以看出,光栅槽深对共振峰的位置没有明显影响,但选取适当却可以明显地降低旁带;图 2(b)显示的是  $d_2=102\text{ nm}$  时不同光栅周期所对应的反射曲线,由图可知共振峰波长随着光栅周期

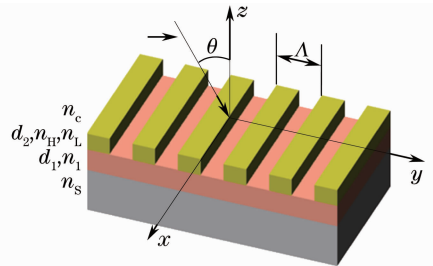


图 1 GMR 光栅的结构图

Fig. 1 Structure of the GMR grating

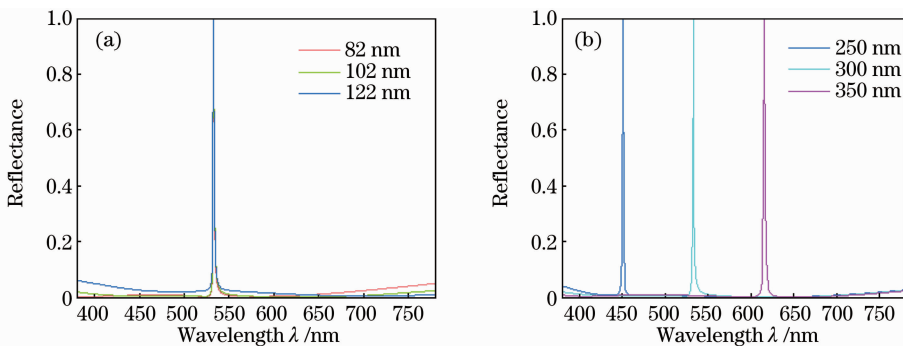


图 2 在(a)不同槽深  $d_2$  和(b)不同周期  $\Lambda$  条件下 TE 偏振光入射时光栅反射效率与波长的关系曲线

Fig. 2 Calculated reflectance under TE polarized incident light as a function of wavelength for (a) various groove depth  $d_2$  and (b) various grating period  $\Lambda$

的增大而增大,且旁带几乎没有发生变化,这就完全有可能只通过改变光栅周期就能从自然光中分离出红、绿、蓝三基色的三种基元光栅结构。而且制作整幅图像需要利用激光直写技术<sup>[18]</sup>进行逐“点”曝光来形成所需的光栅阵列,若要不断改变槽深需要不断变换激光光功率,实现起来非常困难,因此只需改变周期也为实际制造带来很大的便利。

## 2.2 光栅呈现颜色的计算方法

光栅的这些基本参数确定以后,为了最终确定

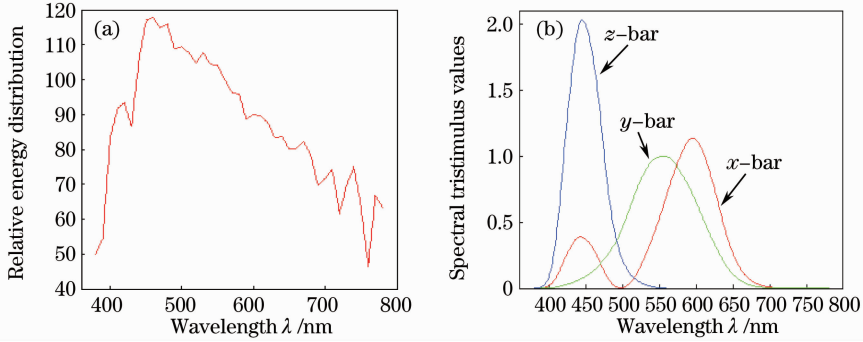


图3 (a)光源 D65 相对能量分布;(b) CIE 1964 光谱三刺激值

Fig. 3 (a) Relative energy distribution of D65; (b) CIE 1964 spectral tristimulus values

简要介绍根据光栅衍射效率计算其所对应颜色并将其转化为计算机可显示的 RGB 值的方法。利用下面的公式可由光栅的光谱反射效率 $[\rho(\lambda)]$ 计算出其对应的 CIE XYZ 三刺激值:

$$\begin{aligned} X &= k \int_{380}^{780} S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{380}^{780} S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z &= k \int_{380}^{780} S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  [图 3(b)] 为 CIE 1964 光谱三刺激值,  $k$  为调整系数,为了便于比较不同光源的色度,一般对于完全反射体 $[\rho(\lambda) = 1]$ 将  $Y$  的值调整到 100,这样便可得到  $k$  的计算公式为

$$k = 100 / \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

(1)式和(2)式的积分范围均与人眼观察的光谱带宽相一致的。

通过一些变换便可以将得到的 XYZ 值转化为计算机可以识别的 RGB 值。根据用于计算机显示的标准的 RGB 颜色空间标准 sRGB,作一个线性变换:

所需的光栅周期,接下来需要讨论的便是不同共振峰位置的衍射曲线所对应的颜色,它不仅取决于光栅的光谱衍射效率,还与照明光源的光谱能量分布密切相关。由于要研究一种自然光下利用光栅结构阵列再现彩色图像的技术,因此在计算中光源选择的是 CIE(国际照明委员会)标准照明体 D65,它的相对光谱能量分布  $S(\lambda)$  [图 3(a)]与自然光最为接近。

$$\begin{bmatrix} R_{\text{linear}} \\ G_{\text{linear}} \\ B_{\text{linear}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2406 & -1.5372 & -0.4986 \\ -0.9689 & 1.8758 & 0.0415 \\ 0.0557 & -0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

中间变量  $R_{\text{linear}}$ ,  $G_{\text{linear}}$  和  $B_{\text{linear}}$  的定义范围均为  $[0, 1]$ ,这就意味着初始的 XYZ 值也必须在相同的数量级上,若不在一个数量级,可以通过将它们同除  $10^n$  ( $n$  为整数)转化为区间  $[0, 1]$  之间的数值。将线性的 RGB 值转化为 sRGB 值:

$$C_{\text{srgb}} = \begin{cases} 12.92 C_{\text{linear}} & C_{\text{linear}} \leq 0.0031308 \\ (1+a) C_{\text{linear}}^{1/2.4} & C_{\text{linear}} > 0.0031308 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $a=0.055$ ,  $C_{\text{srgb}}$  代表  $R_{\text{srgb}}$ ,  $G_{\text{srgb}}$  或者  $B_{\text{srgb}}$ , 对应地  $C_{\text{linear}}$  代表  $R_{\text{linear}}$ ,  $G_{\text{linear}}$  或者  $B_{\text{linear}}$ 。由于计算机采用的是 8 位颜色深度,为了进行计算机显示,最终值需要转化为  $0 \sim 255$  之间的整数,通常的做法就是将初始值乘以 255 然后取整即可。至此,光栅的衍射效率曲线与色品图(图 5)中的颜色点之间便建立了对应关系,为光栅结构的设计提供了理论依据。这样选择光栅周期的最终目标便是使其计算得出的 RGB 值尽可能接近“三基色”,即红色(255,0,0)、绿色(0,255,0)以及蓝色(0,0,255),与此同时需要注意的是要尽可能大的抑制非零级衍射光的传播,这

样才可以使所需零级光的能量达到最大,从而保证颜色不会由于亮度过低而无法识别。根据上述原则,优选后用于充当红、绿、蓝三基色的三种基元光栅的周期分别定为 346,308 和 250 nm。

### 3 计算机仿真模拟结果及分析

#### 3.1 GMR 基元光栅衍射效率及颜色的计算

由于自然光是非偏振光,计算时需要将它分解成两个偏振方向相互垂直的偏振光,即 TE 偏振光和 TM 偏振光( $E$  矢量振动方向垂直于光栅槽形方向的偏振光),利用严格的耦合波理论分别计算了光栅在两种不同偏振光照射下的衍射效率,然后取 TE 偏振光与 TM 偏振光的平均值近似替代自然光照射的情况。图 4(a),(b),(c)分别给出了第二部分所述用于产生红、绿、蓝三基色的 3 种 GMR 光栅结构的零级反射效率曲线,其中各子图中的插图给出的是 TE 和 TM 偏振光入射时的反射效率,主图是对应的代表自然光入射时的平均反射效率。每个子图中均有一个色块,它代表的便是根据第二部分

介绍的方法计算出来的与反射效率曲线所对应的颜色,值得一提的是计算出来的初始颜色要比现在给出的稍微暗一些,但由于人眼对不同等级亮度的区分能力要比计算机显示器好得多,所以这些暗的颜色并不能反映真实的视觉感知<sup>[8]</sup>。将计算出来的颜色的 RGB 值都乘以一个因子使得 R,G,B 中的最大值达到 255,通过这种方法,颜色的色度和饱和度都没有发生改变,但增强后的亮度却与人眼的视觉感知更为接近。由于在结构参数选取时目前还只能满足 TE 偏振光入射时光栅呈现的颜色接近于三基色(参照图 5),而在相同条件下采用 TM 偏振光入射,由于模式本征方程的偏离,衍射曲线的峰值会发生微小的偏移,这就使得它们的平均值出现两个峰值,且最大衍射效率也相应的降到 50%左右,进而影响光栅呈现颜色的单色性,因此图 4 中给出的 3 个色块还没有完全达到三基色的标准,这对最终的彩色图像的再现也会有一定的影响,因此寻求一种偏振无关的光栅结构也成为亟待解决的问题。

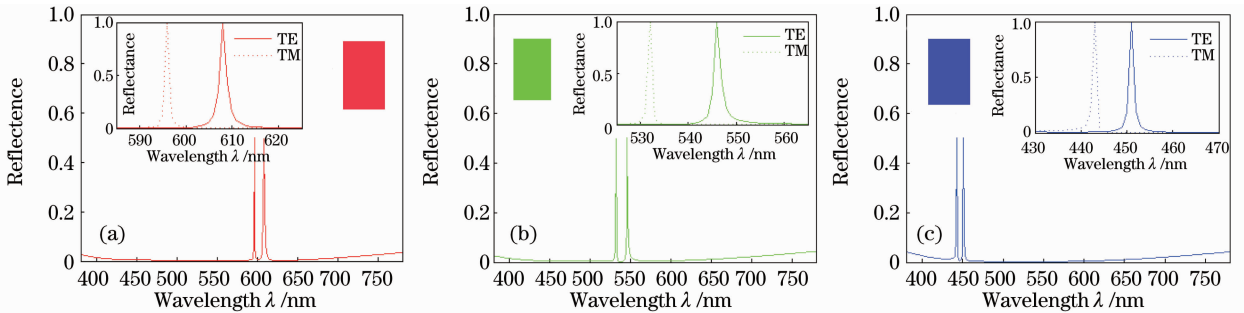


图 4 自然光入射下三种 GMR 基元光栅零级反射曲线及对应的颜色。(a)红色;(b)绿色;(c)蓝色

Fig. 4 Calculated zeroth-order reflection efficiency and its corresponding color of three kinds of GMR elementary grating for natural light. (a) Red; (b) green; (c) blue

#### 3.2 CIE 色品图

图 5 给出了 CIE 1931 色品图,图中所有颜色都是由其色品坐标  $x$  和  $y$  决定的。由于之前计算颜色采用的是 CIE 1964 光谱三刺激值,所以这里给出的是相应的用于 1964 10 度观察者的色品图。图中,实线三角形的 3 个顶点分别对应于三种 GMR 基元光栅在 TE 偏振光入射下所呈现的颜色,根据颜色的相加原理,三角形内部的所有颜色都可以通过顶点处颜色不同比例的混合而得到,考虑到计算机实际只能显示圆点三角形内部的颜色,可以看出,在 TE 偏振光的照射下,几乎可以得到所有的颜色。图 5 同时给出了对应于光栅在非偏振的日光(TE 偏振与 TM 偏振的平均值)照射下的颜色三角形,用点划线表示,显而易见由于上述 TM 偏振光入射

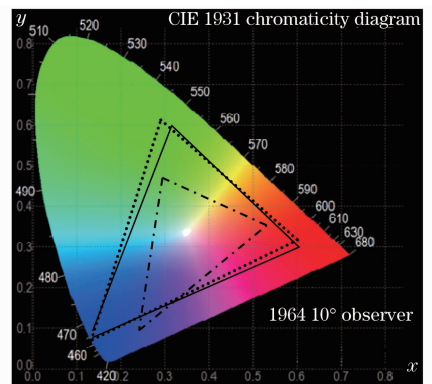


图 5 GMR 基元光栅颜色的计算值在 CIE 1931 色品图中的位置图

Fig. 5 Reflected colors of the GMR elementary gratings plotted in the CIE 1931 chromaticity diagram

下较差的结果导致很多颜色还不能被表示出来,因此在结构的设计上还要继续不断地进行探索。

### 3.3 计算机仿真图像再现

为了确定采用 GMR 光栅阵列对彩色图像进行再现的效果,选择梵高的一幅作品[图 6(a)]进行仿真,选择这幅图画的原因是由于它的色彩种类多,可以同时进行普适性验证。仿真中,原图中的每一个像素都被分为很多的子像素,每个子像素代表之前设计三种光栅结构中的一种。这样,原像素颜色的色度及饱和度便由三种光栅数目的比例来决定,为了区分不同的亮度,引入了黑色的子像素,实际制作中它代表该处没有任何光栅结构。为确定每个像素中各子像素的具体数目,首先需由图像处理软件读出原像素的 RGB 值,如第二部分所述,它们都是 0~255 之间的整数,这些数值的比例决定像素的颜色,且数值越接近 255 表示颜色的亮度越高,为了不丢失颜色的信息,必须要等比例的放大或缩小这些 RGB 值,因此可得到

$$n(R,G,B) = \frac{m(R,G,B)}{3 \times 255} \times n_{\text{total}}, \quad (5)$$

式中  $n(R,G,B)$  即为“红”、“绿”、“蓝”子像素的数目, $m(R,G,B)$  表示对应的计算机读出的原像素 RGB 数值, $n_{\text{total}}$  为每个像素所分割成的子像素的总数目,容易知道  $n_{\text{total}}$  越大,三种光栅数目的比例就可以越接近该像素处颜色的 RGB 分量的初始比值,但最终整幅图像的尺寸就会变得越大,从而制作的时间也会变得越长,因此在实际制作中,必须综合考虑以得到最佳的分割方法,在仿真中,每个像素被分为  $8 \times 8$  个子像素。

的一个像素被  $8 \times 8$  个子像素代替了,每个子像素都只是“红”、“绿”、“蓝”、“黑”中的一种,为了使得最终的图像均匀性更好,这些子像素均是随机排列的。由于原图大小为  $343 \text{ pixel} \times 449 \text{ pixel}$ ,故仿真图应为  $2744 \text{ pixel} \times 3592 \text{ pixel}$ ,假设实际制作中每个像素中的基元光栅取 100 个周期,则按最大周期  $346 \text{ nm}$  计算最终样品尺寸  $9.5 \text{ mm} \times 12.4 \text{ mm}$ 。从图 6 可以看出,采用基于 GMR 的方法可以清晰的再现出原图的细节,但由于三种基元光栅的反射曲线的旁带在长波方向均有一定的突起,使得它们呈现的颜色与标准三基色产生偏离,各基色中均带有部分红色分量,从而导致整幅图像的色彩有点偏红,这些存在的问题还需要不断优化结构来解决。

## 4 结 论

提出了一种利用 GMR 光栅结构阵列再现彩色图像的方法,通过改变光栅的周期设计出三种 GMR 光栅结构分别从自然光中精确分离出红、绿、蓝三种颜色充当三基色,通过它们的组合来还原自然界中的各种色彩,然后对这些光栅基元进行特定的分布处理,便可得到相应的彩色图像。通过对梵高的一幅作品的仿真可以看出所设计的结构在 TE 偏振光入射下已基本满足要求,但在无偏振的白光照射下颜色缺失的问题仍需要解决。此外,由于 GMR 光栅的共振峰会随着入射角的改变而发生偏移<sup>[19]</sup>,因此该技术在宽角度图像再现的应用中仍然存在着限制。尽管面临着一些困难,但其应用前景还是巨大的,相信随着微纳加工技术及材料科学的发展,一旦找到合适的载体,该技术便可应用于印刷领域,运用光栅基元充当“光学颜料”来“打印”各种各样的彩色图案,从而使印刷过程与油墨完全脱离,实现节能、无污染的“无油墨”印刷。

### 参 考 文 献

- 1 C. W. Mason. Structural colors in insects I[J]. *J. Phys. Chem.*, 1926, **30**(3): 383~395
- 2 C. W. Mason. Structural colors in insects II[J]. *J. Phys. Chem.*, 1927, **31**(3): 321~354
- 3 R. B. Morris. Iridescence from diffraction structures in the wing scales of *Callophrys rubi*, the green hairstreak[J]. *J. Entomol. Ser. A*, 1975, **49**(2): 149~154
- 4 J. Huxley. The coloration of *Papilio zalmoxis* and *P. antimachus* and the discovery of Tyndall blue in butterflies[J]. *Proc. R. Soc. London Ser. B*, 1976, **193**(1113): 441~453
- 5 H. Ghiradella. Light and color on the wing: structural colors in butterflies and moths [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(24): 3492~3500
- 6 P. Vukusic, J. R. Sambles, C. R. Lawrence *et al.*. Quantified

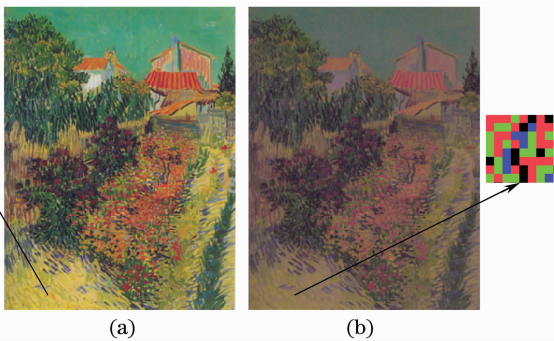


图 6 计算机仿真结果。(a)原图;(b)仿真图

Fig. 6 Computer simulation results. (a) Master image; (b) simulated image

图 6(b)给出了模拟无偏自然光入射情况下整块光栅呈现图像的计算结果。各子图旁的小图表示的是同一个像素位置的局部放大图,可以看出原图

- interference and diffraction in single Morpho butterfly scales[J]. *Proceedings: Biological Sciences, The Royal Society of London*, 1999, **266**: 1403~1411
- 7 Haruna Tada, Seth E. Mann, Ioannis N. Miaoulis *et al.*. Effects of a butterfly scale microstructure on the iridescent color observed at different angles[J]. *Opt. Express*, 1999, **5**(4): 87~92
- 8 B. Gralak, G. Tayeb, S. Enoch. Morpho butterflies wings color modeled with lamellar grating theory[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(11): 567~578
- 9 A. Y. Vorobyev, Chunlei Guo. Colorizing metals with femtosecond laser pulses[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(4): 041914
- 10 B. Dusser, S. Sagan, H. Soder *et al.*. Controlled nanostructures formation by ultra fast laser pulses for color marking[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(3): 2913~2924
- 11 H. Lochbihler. Colored images generated by metallic sub-wavelength gratings [J]. *Opt. Express*, 2009, **17** (14): 12189~12196
- 12 H. Lochbihler. Color filtering by trilayer subwavelength gratings [C]. Recife: Latin America Optics and Photonics Conference, 2010. WD4
- 13 R. Magnusson, S. S. Wang. New principle for optical filters [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(9): 1022~1024
- 14 Z. S. Liu, S. Tibuleac, D. Shin *et al.*. High-efficiency guided-mode resonance filter [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23** (19): 1556~1558
- 15 Wang Zhenhua, Wu Yonggang, Sang Tian *et al.*. Impact of buffer layer on cut-off properties of reflection spectra for guided-mode resonance filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 849~852  
王振华, 吴永刚, 桑田等. 缓冲层对导模共振滤光片反射光谱截止特性的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 849~852
- 16 M. G. Moharam, E. B. Grann, D. 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
- 17 Zhou Chuanhong, Wang Lei, Nie Ya *et al.*. The rigorous coupled-wave analysis of guided-mode resonance in dielectric grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(1): 68~73  
周传宏, 王磊, 聂娅等. 介质光栅导模共振耦合波分析[J]. *物理学报*, 2002, **51**(1): 68~73
- 18 K. K. B. Hon, L. Li, I. M. Hutchings. Direct writing technology-advances and developments [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2008, **57**(2): 601~620
- 19 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

栏目编辑: 李文喆