

嵌入式三色光变器设计

徐平 唐少拓 袁霞 黄海漩 杨拓 罗统政 喻珺

Design of an embedded tricolor-shifting device

Xu Ping Tang Shao-Tuo Yuan Xia Huang Hai-Xuan Yang Tuo Luo Tong-Zheng Yu Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 024202 (2018) DOI: 10.7498/aps.20170782

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20170782>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I2>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于液晶/聚合物光栅的高转化效率有机半导体激光器](#)

Enhancement of conversion efficiency for an organic semiconductor laser based on a holographic polymer dispersed liquid crystal

物理学报.2017, 66(24): 244204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.244204>

[透射衍射光栅内全反射级次](#)

Total internal reflection orders in transmission grating

物理学报.2016, 65(5): 054202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054202>

[软X射线全息平焦场光栅的条纹弯曲现象及其对光谱分辨率的影响](#)

Effect of curve groove on the spectral resolution for soft X-ray holographic flat-field gratings

物理学报.2014, 63(23): 234203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.234203>

[基于聚合物支撑形貌液晶/聚合物光栅的低阈值分布反馈式激光器](#)

Low threshold distributed feedback laser based on scaffolding morphologic and holographic polymer dispersed liquid crystal gratings

物理学报.2014, 63(19): 194202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194202>

[基于相干粒子数囚禁的电磁诱导光栅研究](#)

Electromagnetically induced grating based on the coherent population trapping

物理学报.2013, 62(22): 224205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224205>

## 嵌入式三色光变器设计\*

徐平 唐少拓 袁霞 黄海漩† 杨拓 罗统政 喻琚

(深圳大学电子科学与技术学院, 微纳光电子技术研究所, 深圳 518060)

(2017年4月11日收到; 2017年9月2日收到修改稿)

为解决目前亚波长二元矩形结构在光学防伪应用方面存在的防伪性能有待提升、制作困难导致性能劣化等问题, 提出正弦结构等效矩形结构实现基于嵌入式亚波长一维单周期正弦结构的三色光变器. 模拟仿真表明, 亚波长正弦结构与原亚波长矩形结构性能相似, 可获得优越的三色变换功能. 当自然光以 $45^\circ$ 角入射时, 可在方位角 $0^\circ$ ,  $58^\circ$ ,  $90^\circ$ 分别获得相应的蓝光、绿光、红光三色反射峰, 反射率分别达到90%, 89%, 100%. 分析并提出了该器件周期、槽深、膜厚以及入射角变化对反射峰的影响规律, 探索了运用无掩模的双光束干涉曝光法制作母版的实验过程. 提出的正弦结构三色光变器实现了方位角调节的高衍射效率自然光三色光变效果, 突破了目前两色光变防伪的局限, 同时降低了制作难度, 可用通用的全息生产技术制作光栅结构, 在光变图像防伪领域有重要应用.

**关键词:** 亚波长, 正弦结构, 三色光变换, 双光束干涉曝光

**PACS:** 42.40.Eq

**DOI:** 10.7498/aps.67.20170782

## 1 引言

亚波长光栅特征尺寸小于其工作波长, 经过优化设计, 可以实现极高的反(透)射率, 因此被广泛应用于彩色滤光片、抗反射片、偏振器件、光学防伪器件乃至各种超表面器件<sup>[1-6]</sup>. 亚波长光栅特征尺寸较小(工作波长为可见光波段的亚波长器件, 特征尺寸要求为几十纳米), 其性能对结构参数变化敏感, 这些特点使其制作冗余度较小, 目前采用的电子束刻蚀(electron beam lithography, EBL)和反应离子刻蚀(reactive ion etching, RIE)方法很难满足其制作要求. 特别是干法RIE固有的侧面钻蚀很难保证矩形面型陡直, 在制作高深宽比亚波长器件时, 这种效应更加明显, 器件性能劣化严重. 2009年, Feng等<sup>[7]</sup>提出了一种双功能亚波长分束器, 可实现1550 nm TM光入射下的二分束以及TE光入射下1级衍射效率高达95%的偏转, 但由于RIE的制作误差, 最终制作样品的实验

测试值均较设计值存在10%左右的误差. 2014年, Uddin等<sup>[8]</sup>设计了一种偏振调制的亚波长彩色滤波器, 但制作误差导致实验实测值较设计值下降了10%—20%; 2015年, Yoon等<sup>[9]</sup>设计了一种超稀疏纳米线亚波长结构实现了宽带高反射率, 制作误差导致实测值与理论值存在5%—8%的误差. 上述设计中亚波长矩形结构制作误差较大, 导致器件实际性能下降, 很难获得预期设计效果, 因而未能实用化.

研究人员探索了其他面型等效矩形结构的方法, 以避免矩形结构的制作误差对器件性能的劣化. Grann和Moharam<sup>[10]</sup>分析了连续面型亚波长光栅与非连续层叠结构亚波长光栅, 发现矩形面型并不是亚波长光栅产生共振的必要条件, 连续面型的亚波长光栅同样具有共振效果, 提出了连续面型结构取代矩形面型实现共振效应. 2010年, Feng等<sup>[11]</sup>提出可以通过激光干涉的方法直接获得低深宽比的正弦面型亚波长光栅; 随后, Cheng等<sup>[12]</sup>简

\* 国家自然科学基金(批准号: 61275167)和深圳市基础研究计划(批准号: JCYJ20140418095735591, JCYJ20130329103020637, JC200903120023A)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [hhx@szu.edu.cn](mailto:hhx@szu.edu.cn)

要计算了正弦面型亚波长光栅的等效折射率,设计了一种矩形两色光变器,采用正弦面型等效后,通过双光束干涉直写的方法制作样品,实验测试得到的样品衍射效率较设计值无明显下降,器件具有显著的两色变换效果. Bai等<sup>[13]</sup>进一步分析了包括正弦光栅在内的各种面型亚波长光栅应用于耦合器时的优化方法;2016年, Berthod和Gate<sup>[14]</sup>提出了一种直接在金属光栅上做出亚波长正弦面型图案的工艺方法;2017年, Cui和Wang<sup>[15]</sup>成功地将正弦面型亚波长光栅运用于薄膜激光器,使其效率显著提高. 矩形面型并非产生共振的必要条件,正弦面型同样可以产生共振,而且在低深宽比条件下正弦面型亚波长光栅的制作更简单,成本更低. 因此,可以考虑将矩形结构等效为正弦结构,从而解决器件实际制作的问题.

本课题组曾提出一种 ZnS 覆盖膜的一维单周期矩形结构三色光变器,但二元矩形结构制作较为困难,成本较高. 为此,在之前工作的基础上<sup>[16-21]</sup>,本文提出正弦结构等效二元矩形结构的方法,设计嵌入式一维单周期正弦结构亚波长三色光变器,可实现比亚波长矩形结构更优的三色变换功能. 分析该器件制作和测试冗余度,揭示光变器周期、槽深、膜厚等结构参数以及入射角对反射峰的影响规律,同时探索无掩模双光束干涉曝光法制作母版的实验过程.

## 2 三色光变器设计原理

利用正弦结构对矩形结构进行等效,完成正弦结构三色光变器的设计.

矩形结构三色光变器由基底介质层、光栅层和覆盖层组成,光栅在  $y$  方向上均匀分布,在  $x$  方向上呈周期性分布,如图 1 所示. 入射介质层为空气,折射率  $n_i = 1$ ; 防伪产业通用基底介质为聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET), 折射率  $n_s = 1.65$ ; PET 上的亚波长矩形光栅结构周期为  $\Lambda$ , 深度为  $d_g$ , 沟槽部分用折射率  $n_c = 2.356$  的 ZnS 填充; 覆盖层选用 ZnS, 厚度为  $d_c$ . 为方便制作,选取光栅占空比  $f = 0.5$ .

自然光以适当角度倾斜入射优化设计后的矩形结构三色光变器,随着方位角的改变,人眼可依次观察到蓝、绿、红三种颜色,获得方位角调节的自然光高衍射效率三色光变效果.

目前亚波长器件主要采取 EBL 和 RIE 方法进行制作. 干法 RIE 固有的侧面钻蚀很难保证矩形面型陡直,特别是在制作高深宽比亚波长器件时,这种效应更加明显,严重影响器件性能,导致制作难度大、成本高. 由于正弦亚波长光栅具有易加工及可批量生产的优点,因此本文采用等效介质法,用正弦结构等效图 1 所示矩形结构,得到基于正弦结构的三色光变器. 如图 2 所示,该结构分为三层: 折射率为  $n_s$  的衬底层, 折射率为  $n_c$ 、厚度为  $h$  的覆盖层以及高度为  $H$ 、周期为  $T$  的正弦光栅层,其中入射光以  $\theta$  角度入射.

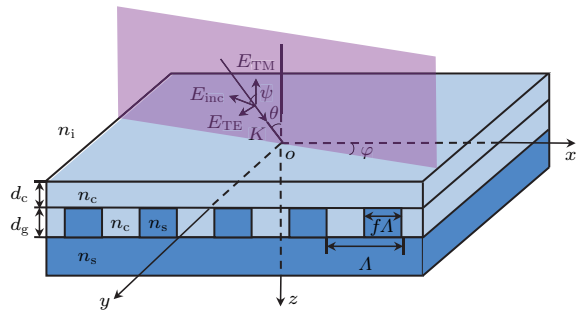


图 1 矩形结构三色光变器

Fig. 1. Embedded tricolor-shifting device with rectangular structure.

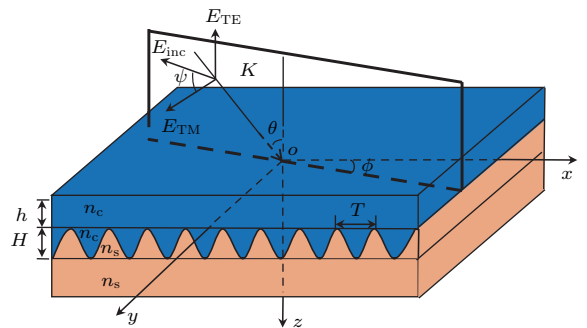


图 2 正弦结构三色光变器

Fig. 2. Tricolor-shifting device with sinusoidal structure.

等效折射率理论可以给出等效折射率的解析表达式,同时预测其共振峰值的位置<sup>[13]</sup>. 基于矩形结构三色光变器的结构参数,应用该理论获得正弦结构的等效结构参数.

由等效折射率理论可得矩形结构的等效折射率表达式为

$$\begin{cases} n_{TE}^2 = n_c^2 f + n_s^2 (1 - f), \\ \frac{1}{n_{TM}^2} = \frac{f}{n_c^2} + \frac{1 - f}{n_s^2}, \end{cases} \quad (1)$$

正弦结构的等效折射率表达式为

$$\begin{cases} n_{\text{TE}}^2 = \frac{n_c^2 + n_s^2}{2}, \\ n_{\text{TM}}^2 = \frac{2n_H^2 n_L^2}{n_H^2 + n_L^2}, \end{cases} \quad (2)$$

式中  $n_{\text{TE}}$ ,  $n_{\text{TM}}$  分别表示 TE, TM 模的等效折射率,  $n_H$  和  $n_L$  分别为覆盖层与基底的折射率.

(2) 式为 (1) 式在  $f = 0.5$  时的特解, 即当  $f = 0.5$  时, 矩形结构与正弦结构具有相同的等效折射率. 在两种结构等效折射率相等的条件下, 等效后的正弦结构三色光变器与原矩形结构三色光变器性能应类似. 基于此, 提出采用正弦结构等效矩形结构设计制作三色光变器, 并运用全息干涉光刻和涂布的方法取代 RIE, 降低制作误差, 获得更接近理论值的实际性能.

### 3 设计结果及机理分析

#### 3.1 设计结果

本课题组在前期的工作中设计了基于二元亚波长矩形周期结构的三色光变器, 其最佳结构参数如下: 光栅周期  $\Lambda = 431.5 \text{ nm}$ , 光栅深度  $d_g = 124.2 \text{ nm}$ , 镀膜厚度  $d_c = 13.1 \text{ nm}$ , TE, TM 波同时在蓝、绿、红波段达到高反射率的方位角分别为  $\varphi_b = 0^\circ$ ,  $\varphi_g = 58^\circ$ ,  $\varphi_r = 90^\circ$ . 当入射角  $\theta = 45^\circ$  时, TM 波在红光波段 (620—750 nm)、绿光波段 (500—560 nm)、蓝光波段 (420—480 nm) 的最大衍射效率分别达到 100%, 88%, 82%, 如图 3(a)—图 3(c) 所示. 若自然光入射, 在上述红、绿、蓝光波段的包络衍射效率都接近 70%, 而旁带衍射效率几乎都在 20% 以下, 可实现方位角调节的自然光高衍射效率三色光变效果.

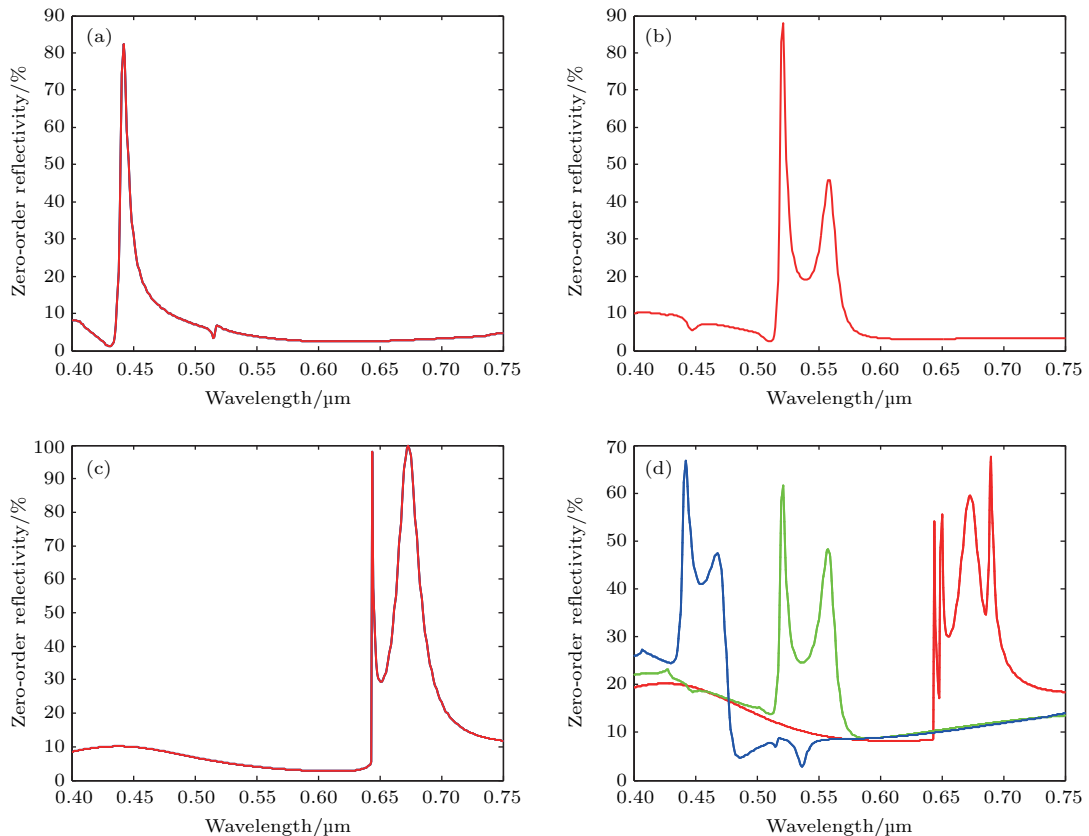


图3 TM波、自然光入射矩形结构三色光变器三个方位角方向上的反射谱 ( $\theta = 45^\circ$ ,  $\Lambda = 431.5 \text{ nm}$ ,  $d_g = 124.2 \text{ nm}$ ,  $d_c = 13.1 \text{ nm}$ ,  $f = 0.5$ ) (a) TM,  $\varphi_b = 0^\circ$ , 蓝光; (b) TM,  $\varphi_g = 58^\circ$ , 绿光; (c) TM,  $\varphi_r = 90^\circ$ , 红光; (d) 自然光,  $\varphi_b = 0^\circ$ ,  $\varphi_g = 58^\circ$ ,  $\varphi_r = 90^\circ$ , 线条颜色表示反射光颜色

Fig. 3. Reflectivity of TM wave and natural light in different azimuths incident to rectangular tricolor-shifting device ( $\theta = 45^\circ$ ,  $\Lambda = 431.5 \text{ nm}$ ,  $d_g = 124.2 \text{ nm}$ ,  $d_c = 13.1 \text{ nm}$ ,  $f = 0.5$ ): (a) TM,  $\varphi_b = 0^\circ$ , blue light; (b) TM,  $\varphi_g = 58^\circ$ , green light; (c) TM,  $\varphi_r = 90^\circ$ , red light; (d) natural light,  $\varphi_b = 0^\circ$ ,  $\varphi_g = 58^\circ$ ,  $\varphi_r = 90^\circ$ , line color indicates color of reflected light.

采用等效介质法对图1所示矩形结构三色光变器进行等效, 得到图2所示正弦结构的参数为: 光栅深度  $H = d_g = 124.2 \text{ nm}$ ; 光栅周期  $T = \Lambda = 431.5 \text{ nm}$ ; 光栅膜厚  $h = d_c = 13.1 \text{ nm}$ .

采用严格耦合波法(RCWA)对等效后的正弦结构进行性能分析, 研究其是否具备与上述矩形结构三色光变器相同的三色光变效果. 严格耦合

波法是一种基于周期结构严格求解麦克斯韦方程的分析方法. 该方法将求解麦克斯韦方程组问题转化成为求解特征函数的问题, 最终通过光栅区域与介质区域的边界条件求解得到衍射效率的数值[22]. 本文运用基于RCWA的商用软件RSoft分别对TM波、自然光入射等效后的正弦结构三色光变器的反射峰特性进行仿真计算, 结果如图4所示.

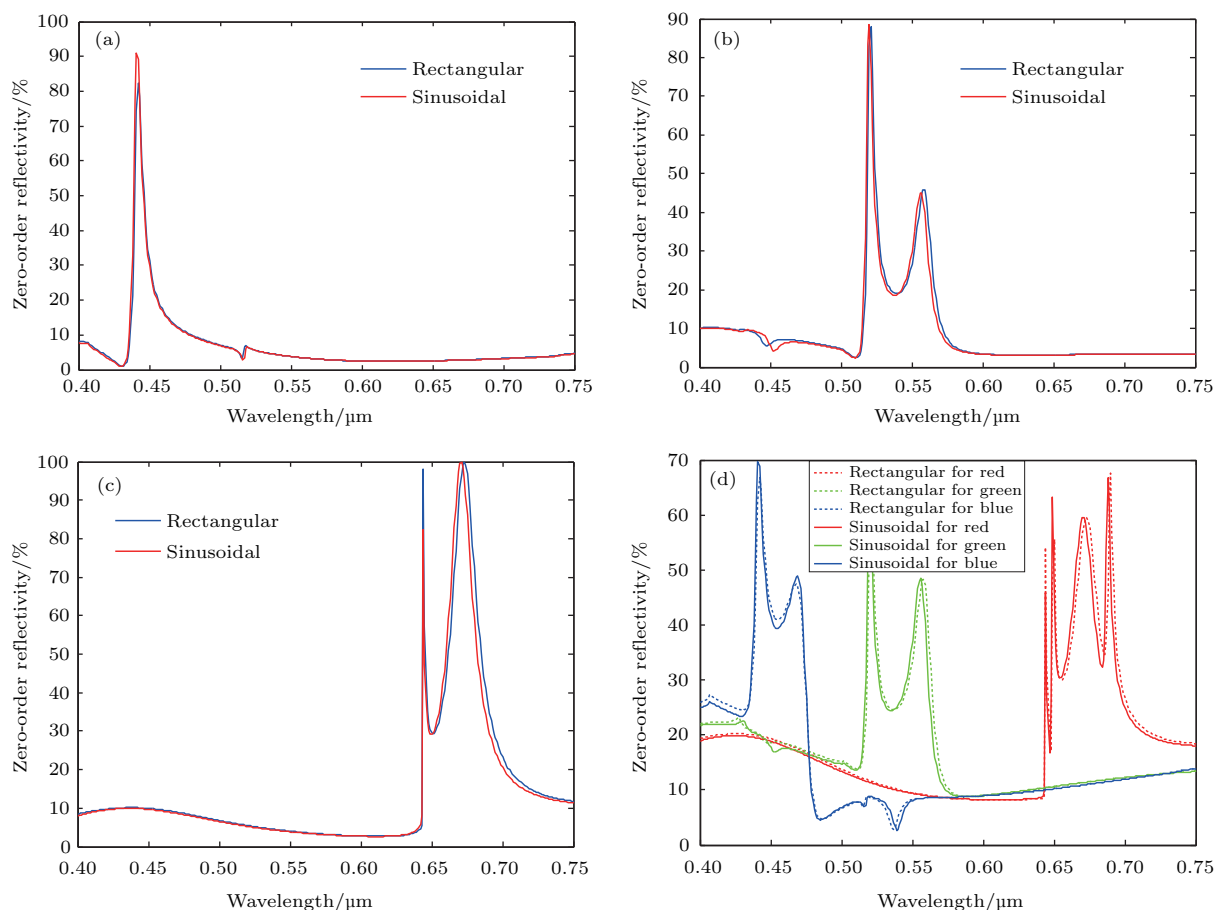


图4 TM波、自然光入射等效的正弦结构三种方位角方向的反射谱 ( $\theta = 45^\circ$ ,  $T = \Lambda = 431.5 \text{ nm}$ ,  $H = d_g = 124.2 \text{ nm}$ ,  $h = d_c = 13.1 \text{ nm}$ ) (a) TM,  $\varphi_b = 0^\circ$ , 蓝光; (b) TM,  $\varphi_g = 58^\circ$ , 绿光; (c) TM,  $\varphi_r = 90^\circ$ , 红光; (d) 自然光,  $\varphi_b = 0^\circ$ ,  $\varphi_g = 58^\circ$ ,  $\varphi_r = 90^\circ$ , 线条颜色表示反射光颜色

Fig. 4. Reflectivity of equivalent sinusoidal grating for the TM wave with azimuth of  $0^\circ$ ,  $58^\circ$  and  $90^\circ$  and the natural light ( $\theta = 45^\circ$ ,  $T = \Lambda = 431.5 \text{ nm}$ ,  $H = d_g = 124.2 \text{ nm}$ ,  $h = d_c = 13.1 \text{ nm}$ ): (a) TM,  $\varphi_b = 0^\circ$ , blue light; (b) TM,  $\varphi_g = 58^\circ$ , green light; (c) TM,  $\varphi_r = 90^\circ$ , red light; (d) natural light,  $\varphi_b = 0^\circ$ ,  $\varphi_g = 58^\circ$ ,  $\varphi_r = 90^\circ$ , line color indicates color of reflected light.

由图4可知, 当入射光以  $\theta = 45^\circ$  入射等效后的正弦结构光栅时, TM波在红光波段(620—750 nm)、绿光波段(500—560 nm)、蓝光波段(420—480 nm)的最大衍射效率分别达到100%, 89%, 90%. 因此, 等效后的正弦结构光变器不仅可以实现矩形结构三色光变器所具备的方位角调节的自然光高衍射效率三色光变效果, 还可应用全息曝光方法降低制作难度和成本, 更好地实现产业化和实用化.

### 3.2 物理机理

分非共振以及共振两种情况分析正弦结构等效矩形结构的物理机理.

非共振情况下, 由于亚波长光栅不存在高阶衍射级次, 故亚波长光栅可以看作一层光学薄膜, 其折射率由等效折射率决定. 矩形结构亚波长光栅TE与TM偏振入射的等效折射率可根据(1)式计算; 正弦结构亚波长光栅TE与TM偏振入射的等

效折射率可根据(2)式计算. 当矩形光栅的占空比取1:1, 即 $f = 0.5$ 时, 二者的等效折射率完全一致, 所以非共振情况下, 可将二者看作完全等效的光学薄膜, 具有完全相同的光学特性.

共振情况下, 共振的产生是因为倏逝波高阶衍射级次与亚波长光栅结构本身所支持的模式发生耦合, 导致能量重新分布. 亚波长光栅只有0级衍射波, 故光能只能在0级透射波与0级反射波之间重新分布, 此时需应用导模共振理论进行分析. 根据导模共振理论, 可将亚波长光栅看作一个平板波导, 通过该平板波导的等效折射率可以预测共振峰位置以及各个参数[23].

因此, 从物理机理角度而言, 只要保持二者等效折射率相同, 就可以用正弦结构等效矩形结构获得功能相同的亚波长器件.

#### 4 关键参数冗余度分析

实际制作和测试中, 三色光变器的结构参数和入射光参数均会发生一定的偏差, 导致0级反射峰的变化, 从而影响其防伪性能. 因此, 有必要对影响正弦结构三色光变器反射特性的关键参数——周期 $T$ , 槽深 $H$ , 膜厚 $h$ 和入射角 $\theta$ 进行冗余度分析, 找出对性能影响敏感的参数以指导测试和制作.

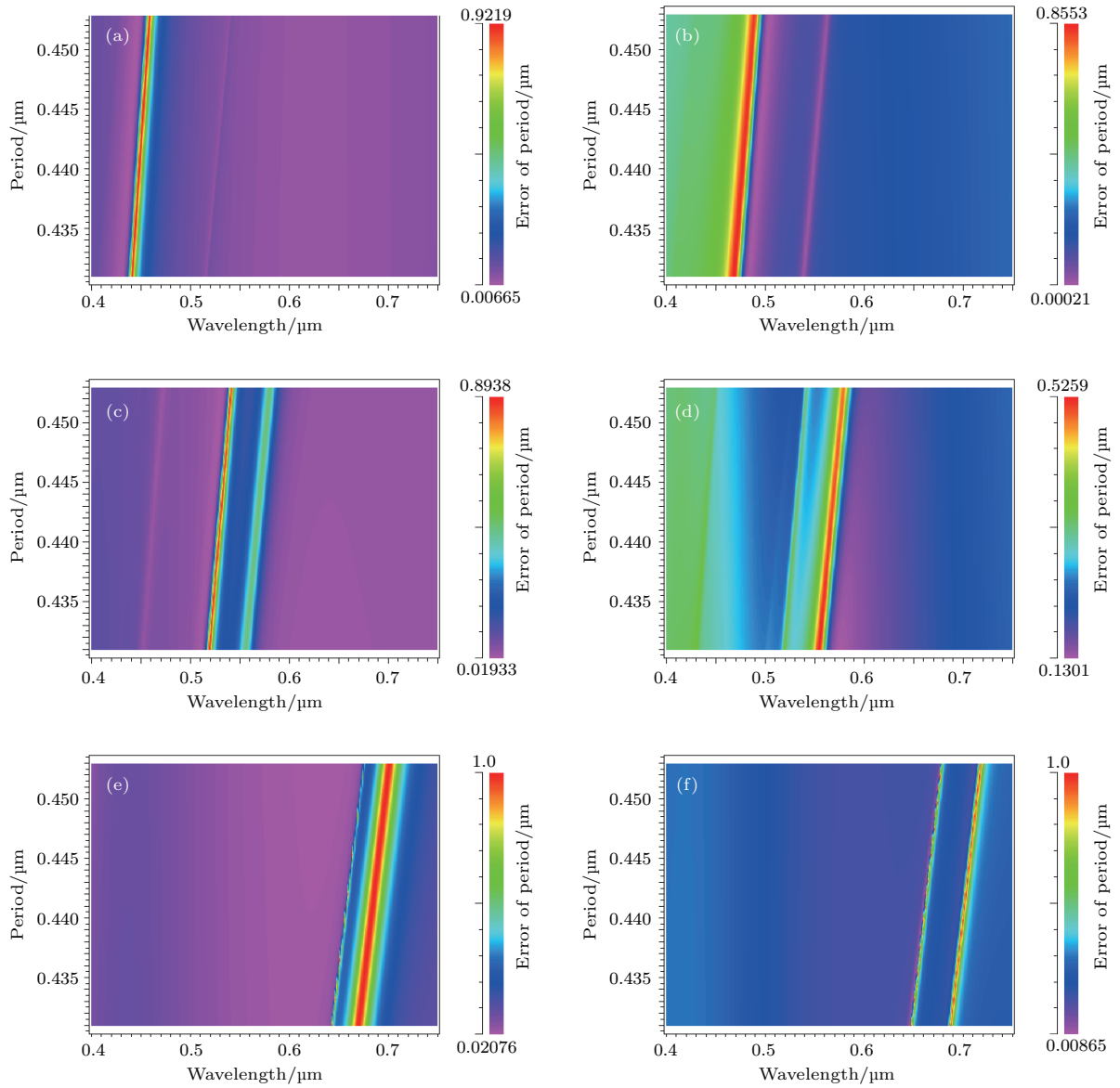


图5 正弦结构周期冗余度 (a) TM,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (b) TE,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (c) TM,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (d) TE,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (e) TM,  $\varphi_r = 90^\circ$ ; (f) TE,  $\varphi_r = 90^\circ$

Fig. 5. Redundancy of period for sinusoidal grating: (a) TM,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (b) TE,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (c) TM,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (d) TE,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (e) TM,  $\varphi_r = 90^\circ$ ; (f) TE,  $\varphi_r = 90^\circ$ .

### 4.1 周期冗余度

固定其他参数为设计值, 研究周期 $T$ 变化时可见光波段不同波长反射率的变化规律. 如图5所示, 在三种方位角下, 反射峰的波长都随 $T$ 呈线性变化, 且随 $T$ 的增大产生红移. 由图5可见, 当 $T$ 在430—455 nm之间变化时, 方位角为 $0^\circ, 58^\circ, 90^\circ$ 时反射峰分别保持在蓝、绿、红光波段, 因此, 周期 $T$ 控制在430—455 nm范围内, 可保证在原方位角条件下仍然得到蓝、绿、红的三色光变效应.

### 4.2 槽深冗余度

固定其他参数为设计值, 研究槽深 $H$ 变化时对可见光波段不同波长反射峰的影响规律. 如图6所示, 随着 $H$ 增大, 反射峰缓慢红移. 当 $H$ 在88—160 nm范围内变化时, 方位角为 $0^\circ, 58^\circ, 90^\circ$ 的反射峰分别在蓝、绿、红光波段有较高反射率(高于最高衍射效率的70%). 因此, 槽深 $H$ 应保持在88—160 nm范围内, 可保证在原方位角条件下仍然得到蓝、绿、红的三色光变效应.

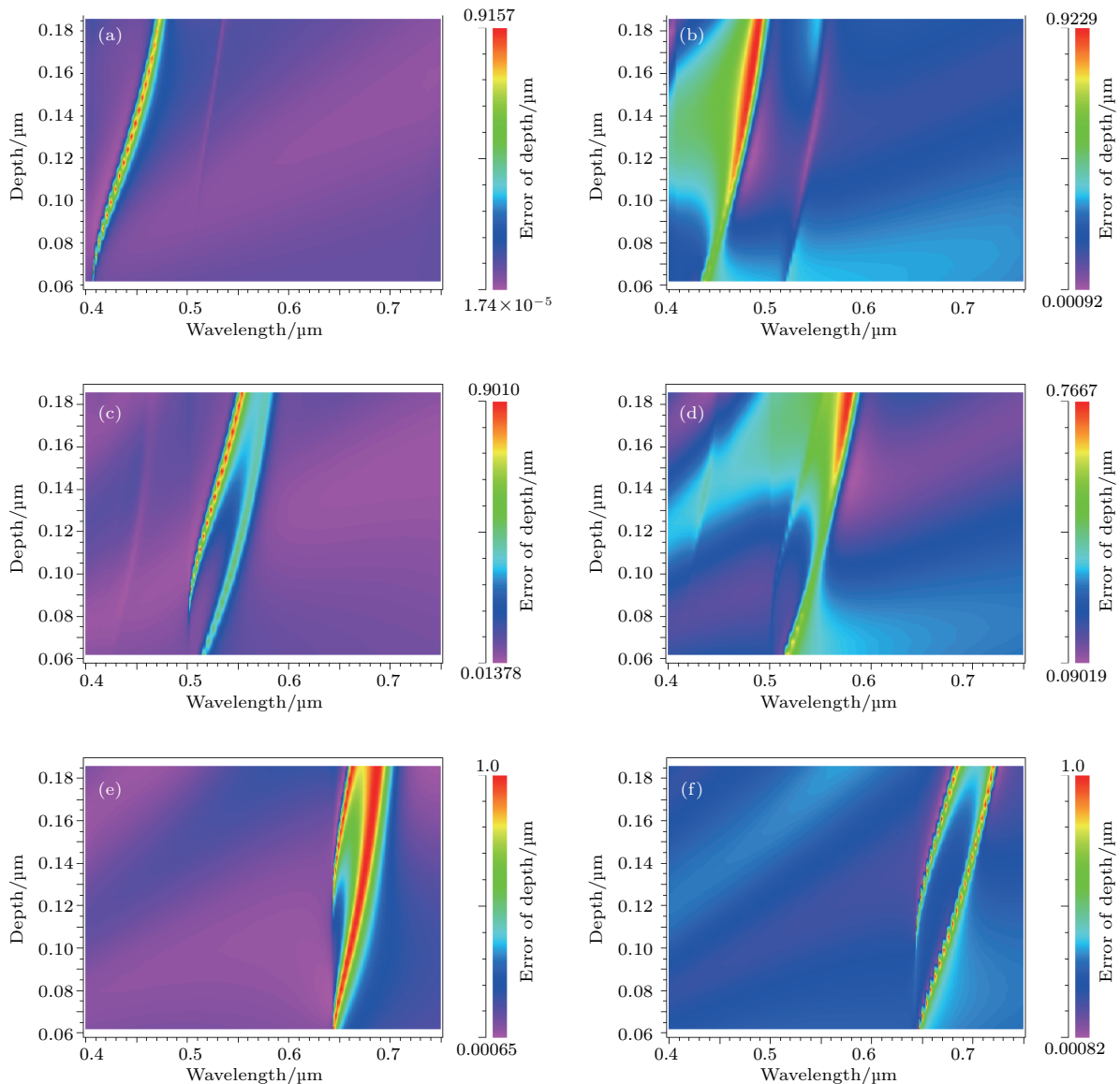


图6 正弦结构刻蚀深度冗余度 (a) TM,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (b) TE,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (c) TM,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (d) TE,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (e) TM,  $\varphi_r = 90^\circ$ ; (f) TE,  $\varphi_r = 90^\circ$

Fig. 6. Redundancy of depth for sinusoidal grating: (a) TM,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (b) TE,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (c) TM,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (d) TE,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (e) TM,  $\varphi_r = 90^\circ$ ; (f) TE,  $\varphi_r = 90^\circ$ .

### 4.3 膜厚冗余度

固定其他参数为设计值, 研究膜厚  $h$  变化对可见光波段不同波长反射峰的影响规律. 如图 7 所示, 随着  $h$  增大, 反射峰缓慢红移, 且冗余度非常大: 膜厚从 10 nm 增加到 40 nm, 误差高达 400%

时, TE, TM 模的衍射效率及红移都非常小. 当  $h$  在 10—40 nm 范围内变化时, 方位角为  $0^\circ$ ,  $58^\circ$ ,  $90^\circ$  的反射峰分别在蓝、绿、红光波段有较高反射率 (高于最高衍射效率的 70%). 因此, 膜厚保持在 10—40 nm 范围内, 可在原方位角条件下仍然得到蓝、绿、红的光变效应.

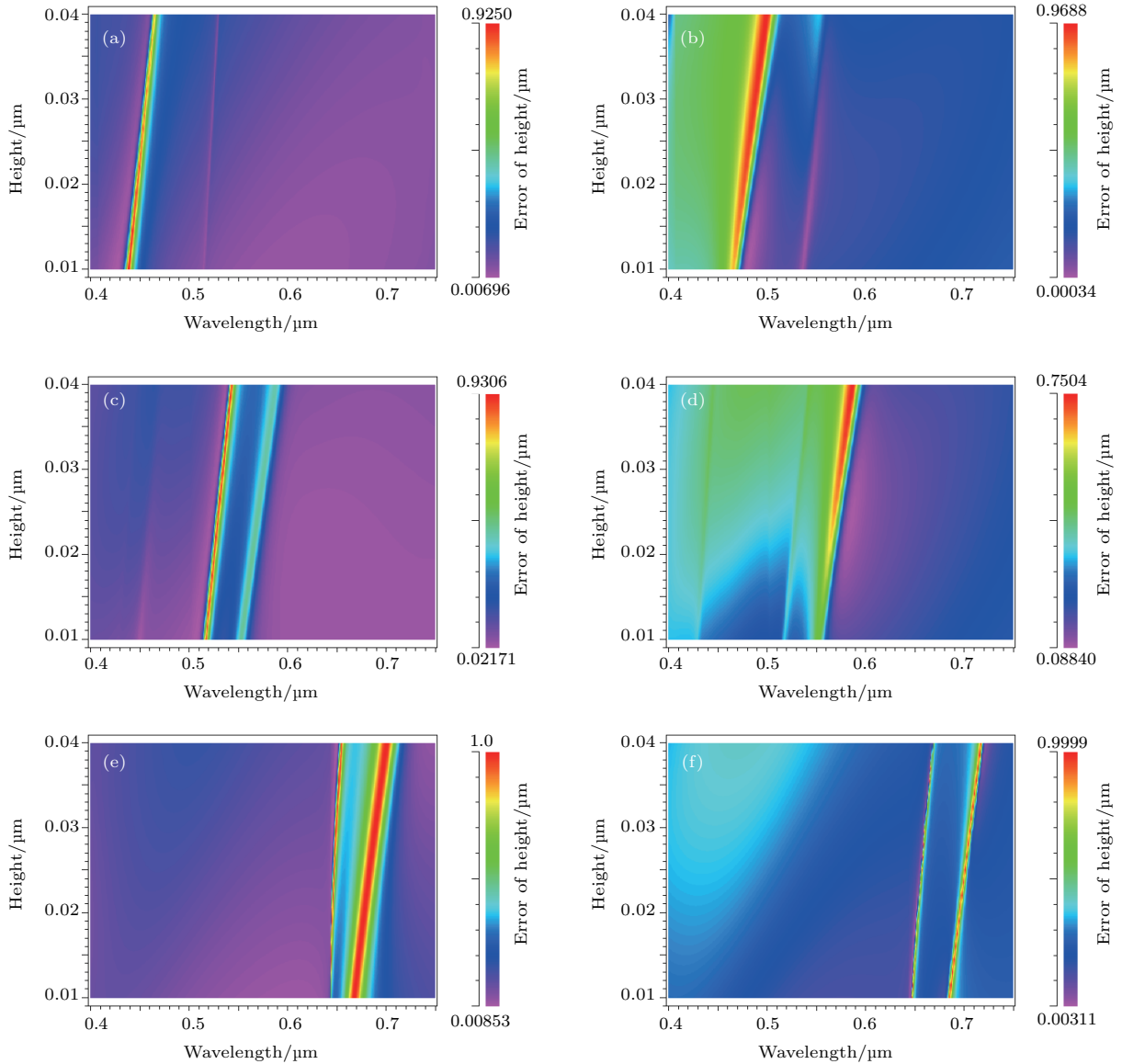


图 7 正弦结构膜厚冗余度 (a) TM,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (b) TE,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (c) TM,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (d) TE,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (e) TM,  $\varphi_r = 90^\circ$ ; (f) TE,  $\varphi_r = 90^\circ$

Fig. 7. Redundancy of height for sinusoidal grating: (a) TM,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (b) TE,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (c) TM,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (d) TE,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (e) TM,  $\varphi_r = 90^\circ$ ; (f) TE,  $\varphi_r = 90^\circ$ .

### 4.4 入射角冗余度

固定其他参数为设计值, 研究入射角  $\theta$  变化对可见光波段不同波长反射峰的影响. 如图 8 所示, 其他参数为设计值时, 在三种方位角下, 反射峰的波长随  $\theta$  呈线性变化, 且随  $\theta$  增大发生蓝移. 当  $\theta$  在

$40^\circ$ — $50^\circ$  范围内变化时, 方位角为  $0^\circ$ ,  $58^\circ$ ,  $90^\circ$  的反射峰波长分别保持在蓝、绿、红光波段, 反射率均高于最高衍射效率的 70%. 因此, 入射角保持在  $40^\circ$ — $50^\circ$  范围内, 可在原方位角条件下仍保持蓝、绿、红的三色光变效应.

综上所述, 随着器件周期、槽深、膜厚的增加,

反射峰红移; 随着入射角的增大, 反射峰蓝移. 其中, 反射峰受周期的影响最大, 受膜厚的影响最小. 根据上述分析, 得到器件保持三色光变性能的各参数冗余度为: 周期范围为 430—455 nm, 槽深范围为 88—160 nm, 膜厚范围为 10—40 nm, 入射角范围

为 40°—50°. 因此, 进行全息曝光制作时, 应严格控制周期的误差, 以获得较好的防伪效果. 当前全息曝光的工艺水平完全可以满足该周期精度. 可应用目前全息产业成熟的模压蒸镀工艺控制槽深和膜厚误差, 实现三色防伪光变器的实用化与产业化.

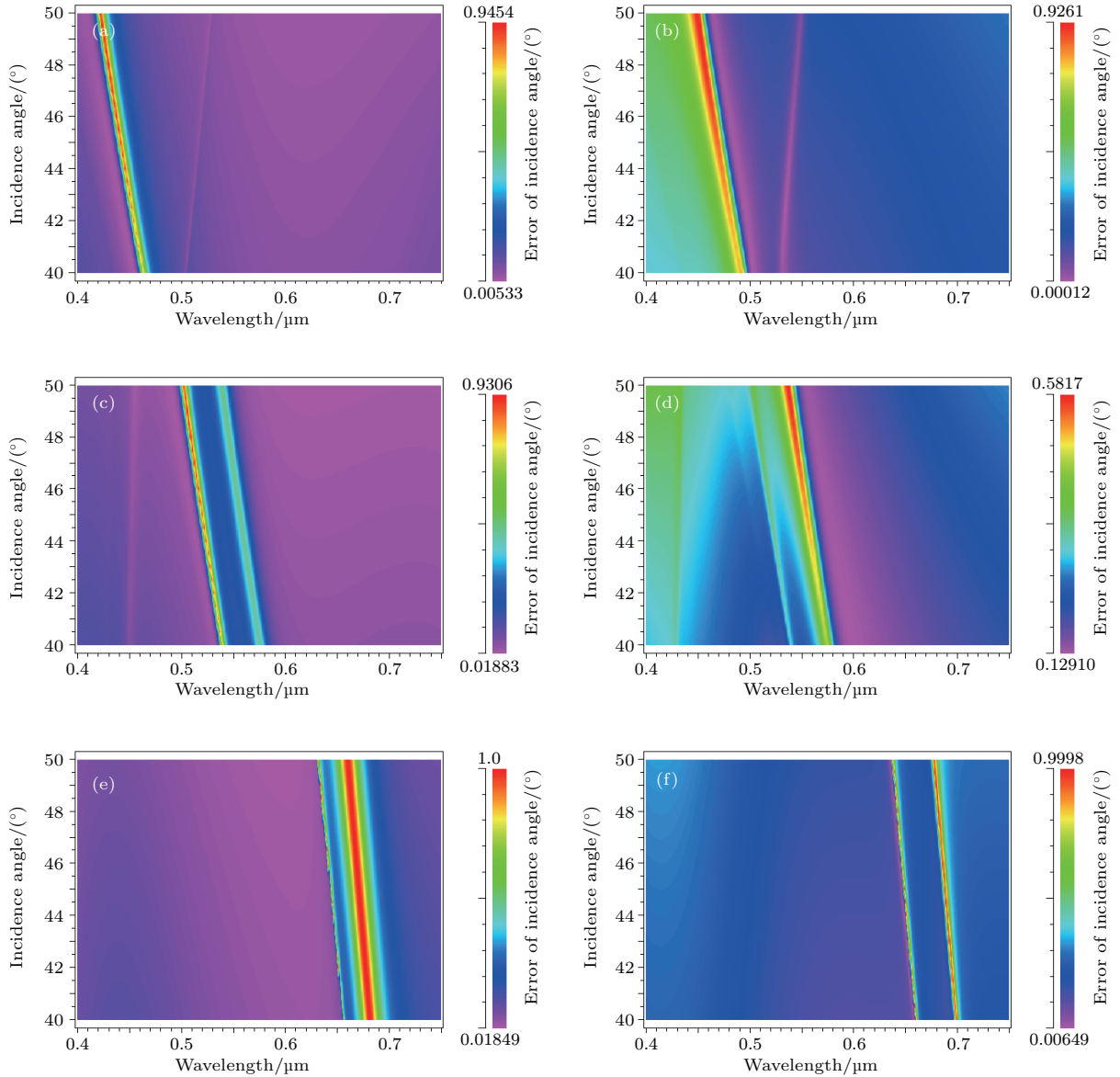


图8 正弦结构入射角冗余度 (a) TM,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (b) TE,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (c) TM,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (d) TE,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (e) TM,  $\varphi_r = 90^\circ$ ; (f) TE,  $\varphi_r = 90^\circ$

Fig. 8. Redundancy of incidence angle for sinusoidal grating: (a) TM,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (b) TE,  $\varphi_b = 0^\circ$ ; (c) TM,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (d) TE,  $\varphi_g = 58^\circ$ ; (e) TM,  $\varphi_r = 90^\circ$ ; (f) TE,  $\varphi_r = 90^\circ$ .

## 5 母版制作

根据得到的参数冗余度, 采用无掩模的双光束干涉曝光法制作正弦结构三色光变器母版. 首先由

激光器产生两束相干光束, 在光致抗蚀剂或其他光敏材料的涂层上产生一系列均匀的干涉条纹, 使光敏物质感光, 然后用特种溶剂溶蚀感光波长分, 在蚀层上获得干涉条纹的全息像, 制得全息正弦光栅. 实验装置如图9所示.

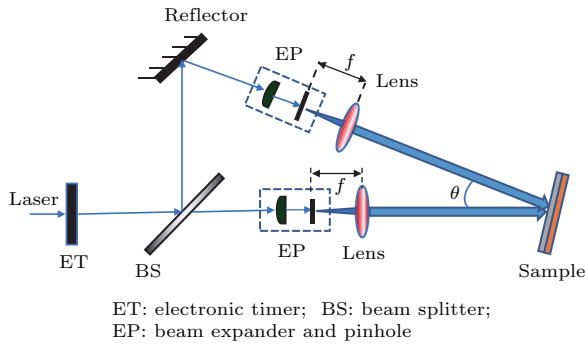


图9 全息干涉曝光法制作正弦光栅装置示意图  
Fig. 9. Schematic of the experimental system to fabricate sinusoidal grating by exposed holographic interferometry.

若两束相干的平行光在空气中以一定角度  $\alpha$  对称入射时, 在它们的重叠空间内会形成明暗交替、平行、等间距的直条纹系统, 条纹的间距为

$$T = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}, \quad (3)$$

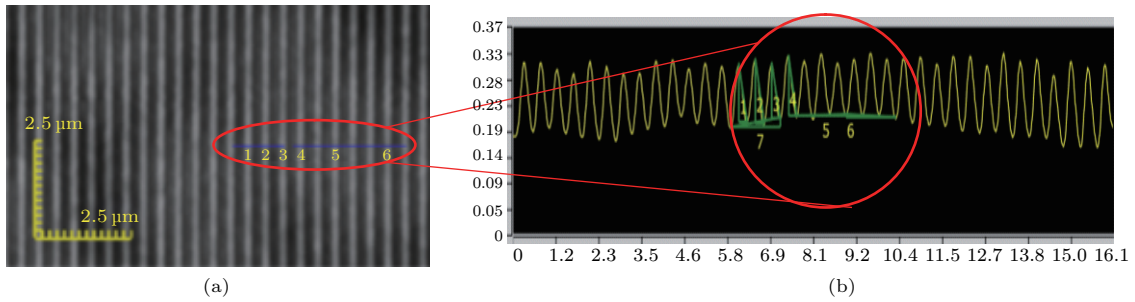


图10 正弦光栅母版表面形貌测试结果 (a) 二维俯视图; (b) 剖面图  
Fig. 10. Experimental results of sinusoidal grating surface morphology: (a) 2D vertical view; (b) sectional view.

由图10可知, 实验制作的正弦光栅母版平均周期  $T = 442.8 \text{ nm}$ , 平均槽深  $d = 108.5 \text{ nm}$ , 上述设计允许的周期范围为  $430\text{—}455 \text{ nm}$ , 槽深范围为  $88\text{—}185 \text{ nm}$ . 若在实验制作的母版基础上后续进行电镀、转印、模压、镀膜等处理, 并将制作误差控制在容许范围内, 将得到可实现方位角调节的自然光高衍射效率三色光变效果的正弦结构三色光变器. 实验证明了设计和制作方法的可行性, 并可降低制作难度和成本, 更好地实现三色光变器的产业化和实用化.

## 6 结 论

提出了正弦结构等效二元矩形结构的方法, 设计了嵌入式一维单周期正弦结构亚波长三色光变

式中  $\lambda$  为光波长. 若改变夹角和光波长, 则可以得到不同的条纹间距, 即正弦光栅的周期. 采用波长为  $457 \text{ nm}$ 、输出功率为  $52 \text{ mW}$  的单纵模蓝光激光器作为光源, 通过精密旋转平台控制干涉角度  $\alpha$ , 从而实现对光栅周期的控制. 由冗余度分析可知, 周期的冗余度为  $430\text{—}455 \text{ nm}$ , 由(3)式可计算得到干涉角度  $\alpha$  取值范围应为  $58^\circ\text{—}62^\circ$ .

正弦光栅的槽深由曝光量来控制. 在曝光强度一定的情况下, 可以通过曝光时间来控制曝光量. 实验选用北京镭思顿公司 CHP-C 全息干板, 分辨率为  $1500 \text{ line/mm}$ , 感光波段为  $441.6 \text{ nm}$ , 胶层厚度为  $1.5\text{—}2 \text{ }\mu\text{m}$ , 实验测得干涉面激光面功率为  $0.6 \text{ mW/cm}^2$ , 用电子快门设定曝光时间为  $40 \text{ s}$ , 控制显影时间为  $3 \text{ s}$ , 显影后获得正弦全息光栅模板样品.

采用激光共聚焦显微镜 (OSL4000, Olympus) 对样品进行测量, 结果如图10所示.

器. 模拟仿真表明, 亚波长正弦结构与原亚波长矩形结构性能相似, 可获得优越的三色变换功能. 当入射角为  $45^\circ$  时, 自然光可在方位角  $0^\circ, 58^\circ, 90^\circ$  分别获得相应的蓝光、绿光、红光三色反射峰, 反射率分别达到  $90\%, 89\%, 100\%$ . 采用无掩模的双光束干涉曝光制作母版样品, 实验制作误差在设计容许范围内. 研究结果突破了目前矩形面型亚波长器件制作困难、成本高等瓶颈, 降低了制作成本和制作难度, 可促进三色光变器的批量生产与实用化.

## 参考文献

[1] Wang Y, Shi W, Wang X 2015 *Opt. Lett.* **40** 4647  
[2] Lin D, Fan P 2014 *Science* **345** 298  
[3] Lo Y L, Chen Y B, Yang T Y 2011 *Appl. Opt.* **50** 415

- [4] Feng J, Zhou C, Wang B, Zheng J, Jia W, Cao H, Lv P 2008 *Appl. Opt.* **47** 6638
- [5] Lee H S, Yoon Y T, Lee S S, Kim S H, Lee K D 2007 *Opt. Express* **15** 15457
- [6] Oonishi T, Konishi T, Itoh K 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **46** 5019
- [7] Feng J, Zhou C, Zheng J 2009 *Appl. Opt.* **48** 2697
- [8] Uddin M J, Khaleque T, Magnusson R 2014 *Opt. Express* **22** 12307
- [9] Yoon J W, Lee K J, Magnusson R 2015 *Opt. Express* **23** 28849
- [10] Grann E, Moharam M 1996 *J. Opt. Soc. Am. A* **13** 988
- [11] Feng J, Zhou C, Cao H, Lu P 2010 *Appl. Opt.* **49** 5697
- [12] Chen Y L, Liu W X, Liao N F 2010 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **30** 1922 (in Chinese) [陈永利, 刘文霞, 廖宁放 2010 光谱学与光谱分析 **30** 1922]
- [13] Bai B, Laukkanen J, Kuittinen M 2010 *Appl. Opt.* **49** 5454
- [14] Berthod L, Gate V 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 2508
- [15] Cui W, Wang H 2017 *Opt. Express* **25** 4097
- [16] Xu P, Yuan X, Huang H X, Yang T, Zhu T F, Tang S T, Peng W D 2016 *Nanoscale Res. Lett.* **11** 485
- [17] Xu P, Hong C Q, Cheng G X, Zhou L, Sun Z L 2015 *Opt. Express* **23** 6773
- [18] Xu P, Huang Y Y, Su Z J, Zhang X L, Luo T Z, Peng W D 2015 *Opt. Express* **23** 4887
- [19] Huang H X, Ruan S C, Yang T, Xu P 2015 *Nano-Micro Lett.* **7** 177
- [20] Xu P, Huang Y Y, Zhang X L, Huang J F, Li B B, Ye E, Duan S F, Su Z J 2013 *Opt. Express* **21** 20159
- [21] Xu P, Huang H X, Wang K, Ruan S C, Yang J, Wang L L, Chen X X, Liu J Y 2007 *Opt. Express* **15** 809
- [22] Cormier G, Boudreau B, Thériault S 2001 *J. Opt. Soc. Am. A* **18** 1771
- [23] Wang S, Magnusson R 1990 *J. Opt. Soc. Am. A* **7** 1470

# Design of an embedded tricolor-shifting device\*

Xu Ping Tang Shao-Tuo Yuan Xia Huang Hai-Xuan<sup>†</sup> Yang Tuo  
Luo Tong-Zheng Yu Jun

(*Institute of Micro-Nano Optoelectronic Technology, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University,  
Shenzhen 518060, China*)

( Received 11 April 2017; revised manuscript received 2 September 2017 )

## Abstract

Insufficient anti-counterfeiting performance and difficulties in manufacturing lead to performance degradation of the subwavelength rectangular structure grating, when it is applied to the field of optical anti-counterfeiting. To solve the problem, an embedded subwavelength one-dimensional simple periodic sinusoidal grating structure is proposed in this paper to replace the previous structure with a rectangular structure. By using equivalent medium theory, we find that the rectangular structure whose duty ration is 0.5 has the same effective refractive index as the sinusoidal structure. Then equivalent structure parameters of a sinusoidal structure are obtained based on a rectangular structure tricolor-shifting device, and the characteristics of the reflection peak are analyzed. The result shows that the sinusoidal structure gating can realize the same tricolor-shifting properties with a higher reflective efficiency as the rectangular structure gating. When the incidence angle of natural light is  $45^\circ$  for TE and TM polarization, the highest reflectivity values of 90%, 89% and 100% in blue, green and red bands can be obtained at the azimuths of  $24^\circ$ ,  $63^\circ$  and  $90^\circ$ , respectively. Then the azimuth-induced color shifts of blue, green and red are realized. Physical mechanism of the equivalent rectangular structure to sinusoidal structure is explained in non-resonance and resonance conditions. Under the non-resonance condition, both of them can be regarded as a layer of completely equivalent optical film, possessing exactly the same optical properties. Under the resonance condition, they can be regarded as a slab waveguide. So when their effective refractive indexes, periods, film thicknesses and depths are equal, they have the same optical characteristic matrixes, supported guided modes, and resonant peak positions. In addition, we investigate the influences of the deviations of key parameters, including grating period, grating depth, coating film thickness, and incidence angle, and propose the rigorous redundancy of these parameters. When the values of period, depth, thickness, and incidence angle are kept within the ranges of 430–455 nm, 88–160 nm, 10–40 nm, and  $40^\circ$ – $50^\circ$ , respectively, the device can well keep the color-shifting effects of blue, green and red light. A model structure of the sinusoidal grating is fabricated by two-beam laser interference lithography experimentally. The tricolor-shifting device based on the sinusoidal structure presented in this paper can realize high diffraction efficiency azimuth-induced color shifts of blue, green and red light when natural light is incident, which breaks through the limit of bi-color shifting technology and lowers the difficulties in manufacturing, and may have great applications in the field of the optically variable image security.

**Keywords:** sub-wavelength, sinusoidal structure, tricolor-shifting, two-beam laser interference lithography

**PACS:** 42.40.Eq

**DOI:** 10.7498/aps.67.20170782

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61275167) and the Fundamental Research Program of Shenzhen, China (Grant Nos. JCYJ20140418095735591, JCYJ20130329103020637, JC200903120023A).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [hxx@szu.edu.cn](mailto:hxx@szu.edu.cn)