

嵌入式三色光变器

徐平 袁霞 杨拓 黄海漩 唐少拓 黄燕燕 肖钰斐 彭文达

Design of embedded tri-color shift device

Xu Ping Yuan Xia Yang Tuo Huang Hai-Xuan Tang Shao-Tuo Huang Yan-Yan Xiao Yu-Fei Peng Wen-Da

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 124201 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.124201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.124201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

透射光学系统像平面一阶散射光照度分布规律研究

The research on the illumination distribution law of the first-order scattered light in the focal plane of transmission optical system

物理学报.2017, 66(4): 044201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.044201>

基于全相位谱分析的剪切光束成像目标重构

Sheared-beam imaging target reconstruction based on all-phase spectrum analysis

物理学报.2017, 66(2): 024203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.024203>

部分相干条件下的弱散射样品 ptychography iterative engine 成像

Ptychographic iterative engine with partially coherent illumination for weakly scattering samples

物理学报.2016, 65(18): 184202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.184202>

柱状磁光颗粒的局域表面等离激元共振及尺寸效应

Localized surface plasmon resonance and the size effects of magneto-optic rods

物理学报.2016, 65(11): 114202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.114202>

非相干照明条件下的 ptychographic iterative engine 成像技术

Ptychographic iterative engine with the incoherent illumination

物理学报.2015, 64(24): 244201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.244201>

嵌入式三色光变器*

徐平¹⁾²⁾ 袁霞¹⁾²⁾ 杨拓¹⁾²⁾ 黄海漩^{1)2)†} 唐少拓¹⁾²⁾ 黄燕燕¹⁾²⁾
肖钰斐¹⁾²⁾ 彭文达¹⁾²⁾

1) (深圳大学微纳光电子技术研究所, 深圳 518060)

2) (深圳大学电子科学与技术学院, 深圳 518060)

(2017年1月1日收到; 2017年4月17日收到修改稿)

为了提升现有导模共振防伪光变器件的性能, 设计了一种基于 ZnS 覆盖膜的一维单周期矩形结构三色光变器. 当自然光入射角为 45° 时, 可在 0° , 58° , 90° 方位角分别获得相应的蓝、绿、红三色反射峰, 对研究结果进行了物理解释. 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, 对器件的设计、制作和测试有重要指导作用. 三色光变器基于简单结构实现方位角调节的自然光三色光变效果, 可运用传统激光全息产业的模压和蒸镀工艺进行制作, 在光变图像防伪领域有重要应用.

关键词: 亚波长, 二元矩形单周期结构, 三色光变器, 防伪

PACS: 42.25.Fx, 42.79.-e, 42.79.Dj

DOI: 10.7498/aps.66.124201

1 引言

导模共振(guided-mode resonance, GMR)光栅可实现反射光在可见光波段的选择性反射, 由此带来的各向异性光变效果广泛应用于光变图像防伪领域^[1-6]. 为了便于公众识别, GMR 防伪光栅通常采用调整光栅取向的方法来实现光变效果: 当入射面与光栅沟槽相垂直时光栅呈现一种颜色, 将光栅在自身平面旋转 90° , 此时入射面与光栅沟槽相平行, 光栅呈现另一种颜色. 目前, 这种 GMR 两色光变技术在护照、身份证、驾驶证、支票、纸币等防伪领域应用广泛. 然而, 随着技术的普及, 防伪功能明显下降. 因此, GMR 三色光变技术因其设计难度高、反射光颜色丰富的优点, 成为提高现有 GMR 防伪光变器件防伪性和观赏性的有效途径.

近年来, 研究人员通过一维 GMR 光栅结构实现了三色滤波^[7-11]. 由于 GMR 光栅的 TE 波和 TM 波共振位置不一致^[12,13], 具有偏振依赖性, 其

反射光中仅有 TE 或 TM 偏振光, 因此损失了一半的入射自然光能量. 其中文献^[7-10]基于多周期、多层次或不对称结构, 实际加工制作比较困难. 为了实现消偏振滤波, 研究人员采用二维光栅结构^[14-18], 但其结构明显比一维结构具有复杂的工艺过程. 此外, 上述光栅结构均无覆盖层, 易于被复制. 为解决这些问题, 在我们课题组长期积累的二维光学衍射设计理论及应用^[19-24]以及光变器技术^[25,26]的研究基础上, 本文设计一种基于 ZnS 覆盖膜的一维单周期矩形结构三色光变器.

ZnS 材料在可见光范围内具有高折射率、高透光率, 且易于在聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)表面进行蒸镀, 在防伪产业方面应用广泛. 由于器件反射峰对覆盖膜材料的折射率非常敏感, 若基于文献^[25]的结构, 简单地应用 ZnS 取代原来的 ZnO 作为覆盖膜, 器件将不能实现三色光变效果. 因此, 本文选用 ZnS 为覆盖膜, 对嵌入式周期结构进行了优化设计, 获得了一种基于 ZnS 覆盖膜的亚波长一维矩形单周期结构三色

* 国家自然科学基金(批准号: 61275167, 60878036)和深圳市基础 Research 计划(批准号: JCYJ20140418095735591, JCYJ20130329103020637, JC201005280533A)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hhx@szu.edu.cn

光变器. 光变器可调控 TE 和 TM 波同时在指定波段获得高反射率, 实现方位角调节非偏振自然光的三色光变, 后续采用激光全息产业成熟的模压和蒸镀工艺进行制作, 在光变图像防伪领域具有重要的应用价值.

2 设计理论与方法

嵌入式三色光变器结构如图 1 所示, 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 方向上周期分布. 入射介质层为空气, 折射率 $n_i = 1$. 选择防伪产业通用基底介质聚脂 PET, 折射率 $n_s = 1.65$; PET 上的亚波长矩形光栅结构周期为 T , 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 . 为制作方便, 选取光栅占空比 $f = 0.5$.

当自然光以固定角度入射时, 由于自然光可以分解为两振动方向相垂直、光强相等且无固定相位关系的线偏振光, 因此可用垂直入射面的 TE 偏振光和平行入射面的 TM 偏振光的叠加来模拟自然光^[3,27]. 用 ψ 表示偏振角, 则 $\psi_{\text{TM}} = 0^\circ$,

$\psi_{\text{TE}} = 90^\circ$. 入射光波矢为 $\mathbf{K}$, 定义入射光与 z 轴的夹角为入射角 θ , 入射面和 x 轴的夹角为方位角 φ .

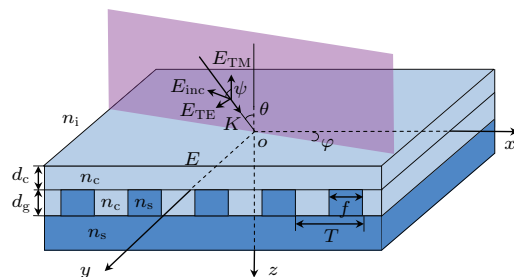


图 1 嵌入式三色光变器结构模型

Fig. 1. Structure model of the embedded tri-color shift device.

为了实现方位角调节的蓝、绿、红三色光变, 需要使 TE 和 TM 波在第一个方位角同时获得蓝光反射最大, 绿光和红光反射最小; 在第二个方位角同时获得绿光反射最大, 蓝光和红光反射最小; 在第三个方位角同时获得红光反射最大, 蓝光和绿光反射最小. 因此, 三色防伪光变器的设计目标就是确定特定的器件结构参量和入射条件, 去控制 TE 和 TM 波在三个方位角的反射效率. 因此本文构建评价函数如下:

$$\begin{aligned}
 MF = & \alpha \times \sum_{i=1}^{L_1} (1 - \eta_{\text{TM}})^2 + \beta \times \sum_{j=1}^{L_2} (0 - \eta_{\text{TM}})^2 + \gamma \times \sum_{k=1}^{L_3} (0 - \eta_{\text{TM}})^2 + \alpha' \times \sum_{i=1}^{L_1} (1 - \eta_{\text{TE}})^2 \\
 & + \beta' \times \sum_{j=1}^{L_2} (0 - \eta_{\text{TE}})^2 + \gamma' \times \sum_{k=1}^{L_3} (0 - \eta_{\text{TE}})^2 + \alpha \times \sum_{j=1}^{L_2} (1 - \eta_{\text{TM}})^2 + \beta \times \sum_{i=1}^{L_1} (0 - \eta_{\text{TM}})^2 \\
 & + \gamma \times \sum_{k=1}^{L_3} (0 - \eta_{\text{TM}})^2 + \alpha' \times \sum_{j=1}^{L_2} (1 - \eta_{\text{TE}})^2 + \beta' \times \sum_{i=1}^{L_1} (0 - \eta_{\text{TE}})^2 + \gamma' \times \sum_{k=1}^{L_3} (0 - \eta_{\text{TE}})^2 \\
 & + \alpha \times \sum_{k=1}^{L_3} (1 - \eta_{\text{TM}})^2 + \beta \times \sum_{j=1}^{L_2} (0 - \eta_{\text{TM}})^2 + \gamma \times \sum_{i=1}^{L_1} (0 - \eta_{\text{TM}})^2 + \alpha' \times \sum_{k=1}^{L_3} (1 - \eta_{\text{TE}})^2 \\
 & + \beta' \times \sum_{j=1}^{L_2} (0 - \eta_{\text{TE}})^2 + \gamma' \times \sum_{i=1}^{L_1} (0 - \eta_{\text{TE}})^2, \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中, η 表示器件的反射效率, 可由严格耦合波分析 (rigorous couple-wave analysis, RCWA) 法进行数值求解得到; L_1, L_2, L_3 分别为蓝光、绿光、红光波段的波长采样点数; $\alpha, \beta, \gamma, \alpha', \beta', \gamma'$ 为权重因子, 在 $[0, 1]$ 范围取值, 且满足 $\alpha + \beta + \gamma + \alpha' + \beta' + \gamma' = 1$, 可根据不同设计要求设置. 评价函数 MF 表达式 (1) 中, 第 1 项表示 TM 波在蓝光波段的反射率与最大反射率的差值, 第 2 项、第 3 项分别表示 TM

波在绿光、红光波段的反射率与最小反射率的差值; 第 4 项表示 TE 波在蓝光波段的反射率与最大反射率的差值, 第 5 项、第 6 项分别表示 TE 波在绿光、红光波段的反射率与最小反射率的差值. 其余各项表示类似意义. 因此, 设计的实质即求一组器件结构参量和入射条件, 使评价函数 MF 的值最小.

本文设计的三色光变器为亚波长结构, 标量衍射理论不适用, 因此运用矢量分析方法中适用于周

期结构的RCWA法计算其衍射效率^[28]. 该衍射效率数值解与入射光参数(入射波长 λ 、偏振角 ψ 、方位角 φ 、入射角 θ)、光栅结构参数(占空比 f 、周期 T 、槽深 d_g 、膜厚 d_c)以及各区折射率(入射介质层折射率 n_i 、覆盖层折射率 n_c 、基底层折射率 n_s)相关, 且与这些参量之间不存在解析关系. 通常, 在变量较少情况下, 可以通过固定部分参数, 对某一参数进行扫描, 分析亚波长光栅零级衍射效率的规律, 来设计和优化亚波长光栅. 但本文所设计的三色光变器参量众多且特定功能复杂, 因此该方法不可行.

为了提高优化效率和精度, 本文采用具有全局寻优特性的遗传算法, 结合RCWA法, 对影响三色防伪光变器反射效率的重要参数进行优化. 由于入射角与折射率虽是影响器件反射率的重要参数, 但并非我们研究的重点, 而 45° 的反射角容易调整观察方便, 所以我们固定入射角 $\theta = 45^\circ$. 亚波长结构的特征尺寸与光波波长相当或更小, 但周期越小, 制备时误差控制越难, 成本越高. 因此综合考虑制备条件及设计要求, 我们设置了合理的优化范围: 周期 $T \in [100, 700]$ nm, 槽深 $d_g \in [10, 500]$ nm, 膜厚 $d_c \in [10, 500]$ nm, 蓝光方位角 $\varphi_b \in [0^\circ, 45^\circ]$, 绿光方位角 $\varphi_g \in [20^\circ, 70^\circ]$, 红光方位角 $\varphi_r \in [45^\circ, 90^\circ]$. 优化设计流程如图2所示.

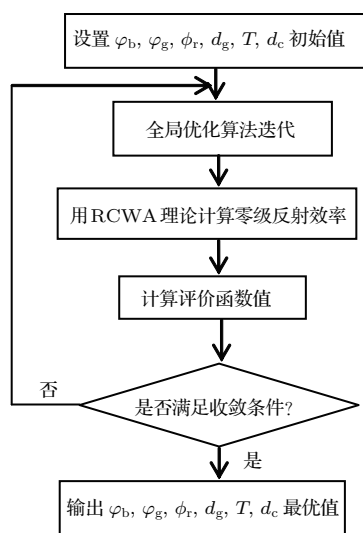


图2 优化嵌入式三色光变器参数流程图

Fig. 2. Flow chart of the device parameters optimization.

3 设计结果

不断调整评价函数权重因子 $\alpha, \beta, \gamma, \alpha', \beta', \gamma'$, 采用自编程序多次迭代优化, 本文得到一组满

足全部设计要求的最佳结构参数: 光栅周期 $T = 431.5$ nm, 光栅深度 $d_g = 124.2$ nm, 镀膜厚度 $d_c = 13.1$ 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 $\varphi_b = 0^\circ$, $\varphi_g = 58^\circ$, $\varphi_r = 90^\circ$.

下面我们利用RCWA理论计算了可见光波段400—750 nm内入射角 $\theta = 45^\circ$ 的TE, TM波在方位角分别为 $0^\circ, 58^\circ, 90^\circ$ 时的反射效率, 然后用TE, TM波反射率的平均值近似代替自然光入射时的反射率. 自然光在可见光波段的反射效率分布如图3所示. 方位角为 0° 时, 自然光在蓝光波段468, 442 nm处有反射峰; 方位角为 58° 时, 自然光在绿光波段557, 521 nm处有反射峰; 方位角为 90° 时, 自然光在红光波段690, 673, 650, 644 nm处有反射峰. 值得一提的是, 由于TE波和TM波的共振位置不一致, 峰值错开, 造成模拟自然光的反射效率降低. 但是自然光在蓝、绿、红光波段衍射效率仍然较高, 最高分别达到66.7%, 61.5% 和67.5%; 谱宽较宽, 分别有26, 37和46 nm; 同时旁带较低, 分别低于27%, 23%和20%. 因此, 当自然光以适当角度倾斜入射时, 随着方位角的改变, 人眼可依次观察到亮度较高的蓝、绿、红颜色. 材料色散将引起共振峰发生微小偏移, 但本文设计目标为人眼可感知的光变器件, 并非窄带滤波器, 只要这种微小偏移在预设波段内, 并不影响视觉效果.

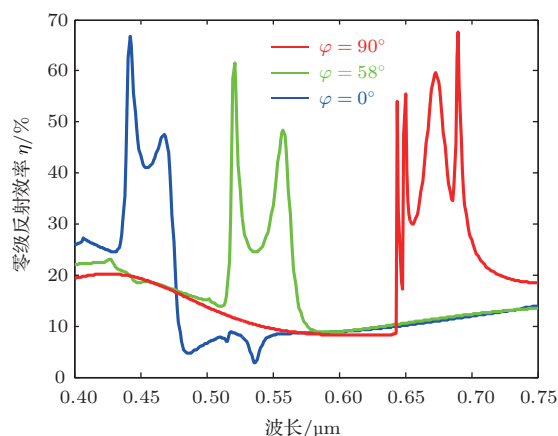


图3 自然光在三种方位角的反射谱($\theta = 45^\circ$, $T = 431.5$ nm, $d_g = 124.2$ nm, $d_c = 13.1$ nm, $f = 0.5$)

Fig. 3. Reflectivity spectra of the natural light at three azimuths ($\theta = 45^\circ$, $T = 431.5$ nm, $d_g = 124.2$ nm, $d_c = 13.1$ nm, $f = 0.5$).

上述设计结果可以用干涉相消的原理来解释^[29]. 一束平行白光照射到透明介质下的亚波长光栅, 除了零级衍射波, 其他级次的波被耦合到波

导层内成为导波, 当导波向前传播时重新衍射出光栅, 分别沿着零级透射光和零级反射光的波矢方向传播. 当满足特定的光栅参量和入射条件时, 零级透射光与从波导光栅泄漏出去的透射光完全相消干涉, 透射率为0, 入射光完全反射, 形成共振, 符合共振条件的波长光具有强烈的反射峰.

从应用角度看, GMR两色光变防伪光栅自2003年起成功应用于乌克兰农业部管理证书、斯洛伐克护照、新版菲律宾比索以及我国二代身份证、新版驾照等. 本文设计的全新的基于ZnS覆盖膜的一维单周期矩形结构三色光变器, 不仅结构简单, 尤其可实现方位角调节的自然光三色光变效果. 由原来的两色扩展为三色, 并使TE和TM波同时在指定波段达到高反射效率, 设计难度更高, 在视觉效果和防伪性能上均有重要技术提升. 因此, 本文设计的嵌入式三色光变器具有可行性和实用性, 在光变图像防伪领域有广阔的应用空间.

4 参数冗余度分析

器件结构参数、入射光参数会对嵌入式三色光变器的显色及衍射效率有重要影响. 在实际制作和测试中, 这些参数均会产生一定的偏差, 由此导致了零级反射峰的变化, 从而影响三色光变器的防伪性能. 因此, 有必要对影响三色光变器反射特性的关键参数——周期 T 、槽深 d_g 、膜厚 d_c 和入射角 θ 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.

首先研究周期偏差对三色光变器反射峰的影响. 固定其他参数为设计值, 研究周期 T 变化时反射峰的变化规律. 如图4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. T 在[360 nm, 500 nm]之间光变器均能产生较高反射效率, 但反射峰的波长随周期变化较快. 当 T 在[411.5 nm, 451.5 nm]之间变化时, 方位角为 0° 的共振波长在蓝光波段, 方位角为 58° 的共振波长在绿光波段, 方位角为 90° 的共振波长在红光波段. 因此, 周期控制在[411.5 nm, 451.5 nm]之间, 相对于设计值431.5 nm偏移 $\pm 4.6\%$, 即偏移 ± 20 nm, 可保证在原方位角上仍然得到蓝、绿、红的光变效应.

其次研究槽深偏差对器件反射峰的影响. 固定其他参数为设计值, 研究槽深 d_g 变化时反射峰的变化规律. 如图5所示, 其他参数为理想值时, 随

着 d_g 增大, 反射峰缓慢红移. d_g 减小时, 衍射效率降低较快, 大于50%的衍射效率集中在两条狭长区域. 当 d_g 在[90.2 nm, 158.2 nm]之间变化, 方位角为 0° 时, 共振波长在蓝光波段且有较高反射效率, 方位角为 58° 时, 共振波长在绿光波段且有较高反射效率, 方位角为 90° 时, 共振波长在红光波段且有较高反射效率. 因此, 槽深应在[90.2 nm, 158.2 nm]之间变化, 相对于理想值124.2 nm偏移 $\pm 27.4\%$, 即偏移 ± 34 nm, 可保证在原方位角上仍然得到蓝、绿、红的光变效应.

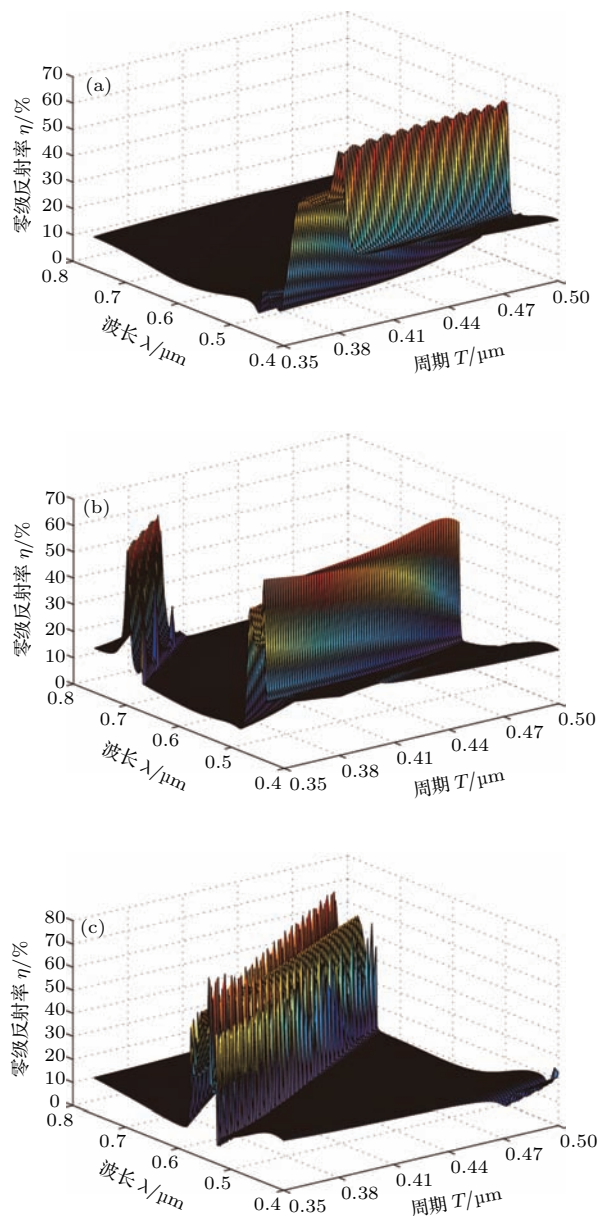


图4 反射峰随器件周期 Λ 的变化($\theta = 45^\circ$, $d_g = 124.2$ nm, $d_c = 13.1$ nm, $f = 0.5$) (a) $\varphi_b = 0^\circ$; (b) $\varphi_g = 58^\circ$; (c) $\varphi_r = 90^\circ$

Fig. 4. The changes of reflection peaks with the device period ($\theta = 45^\circ$, $d_g = 124.2$ nm, $d_c = 13.1$ nm, $f = 0.5$): (a) $\varphi_b = 0^\circ$; (b) $\varphi_g = 58^\circ$; (c) $\varphi_r = 90^\circ$.

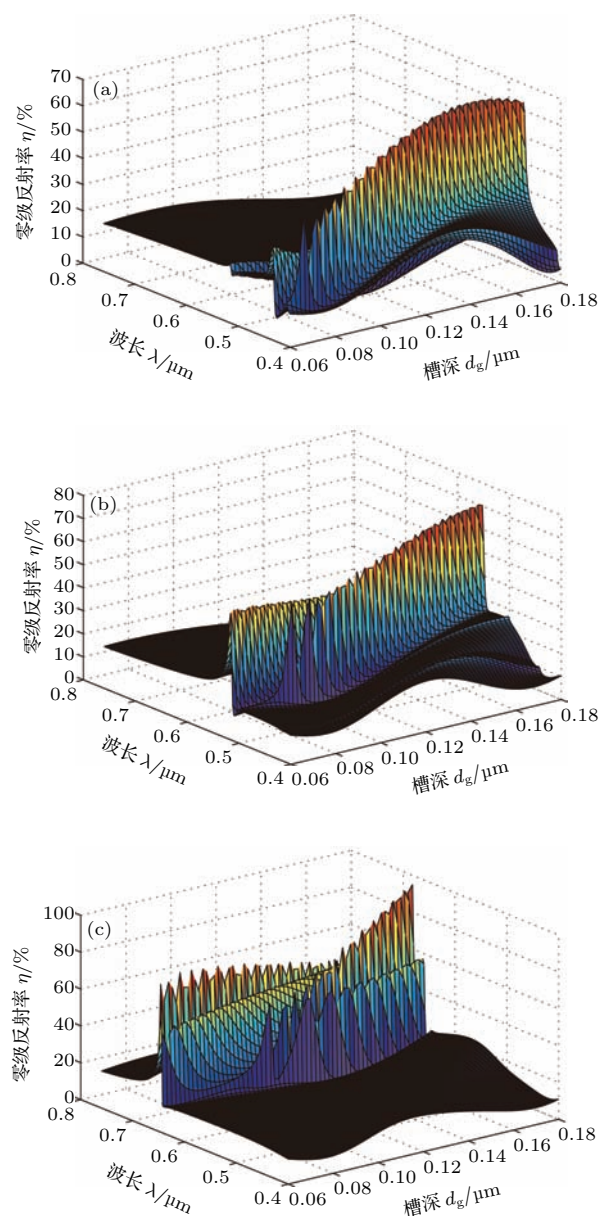


图5 反射峰随器件槽深 d_g 的变化 ($\theta = 45^\circ$, $T = 431.5$ nm, $d_c = 13.1$ nm, $f = 0.5$) (a) $\varphi_b = 0^\circ$; (b) $\varphi_g = 58^\circ$; (c) $\varphi_r = 90^\circ$

Fig. 5. The changes of reflection peaks with the groove depth ($\theta = 45^\circ$, $T = 431.5$ nm, $d_c = 13.1$ nm, $f = 0.5$): (a) $\varphi_b = 0^\circ$; (b) $\varphi_g = 58^\circ$; (c) $\varphi_r = 90^\circ$.

再次研究膜厚偏差对器件反射峰的影响. 固定其他参数为设计值, 研究膜厚 d_c 变化时反射峰的变化规律. 如图6所示, d_c 在 [0 nm, 50 nm] 之间光变器均能产生较高反射效率, 随着 d_c 增大, 反射峰缓慢红移, 高衍射效率的共振波长越来越多, 带宽逐渐增加. 因此 d_c 的冗余度较大. 当 d_c 在 [0 nm, 26.2 nm] 之间变化, 方位角为 0° 时, 共振波长在蓝光波段且有较高反射效率, 方位角为 58° 时, 共振波长在绿光波段且有较高反射效率, 方位角为 90°

时, 共振波长在红光波段且有较高反射效率. 因此, 膜厚保持在 [0 nm, 26.2 nm] 之间, 相对于设计值 13.1 nm 偏移 $\pm 100\%$, 即偏移 ± 13.1 nm, 可保证在原方位角上仍然得到蓝、绿、红的光变效应.

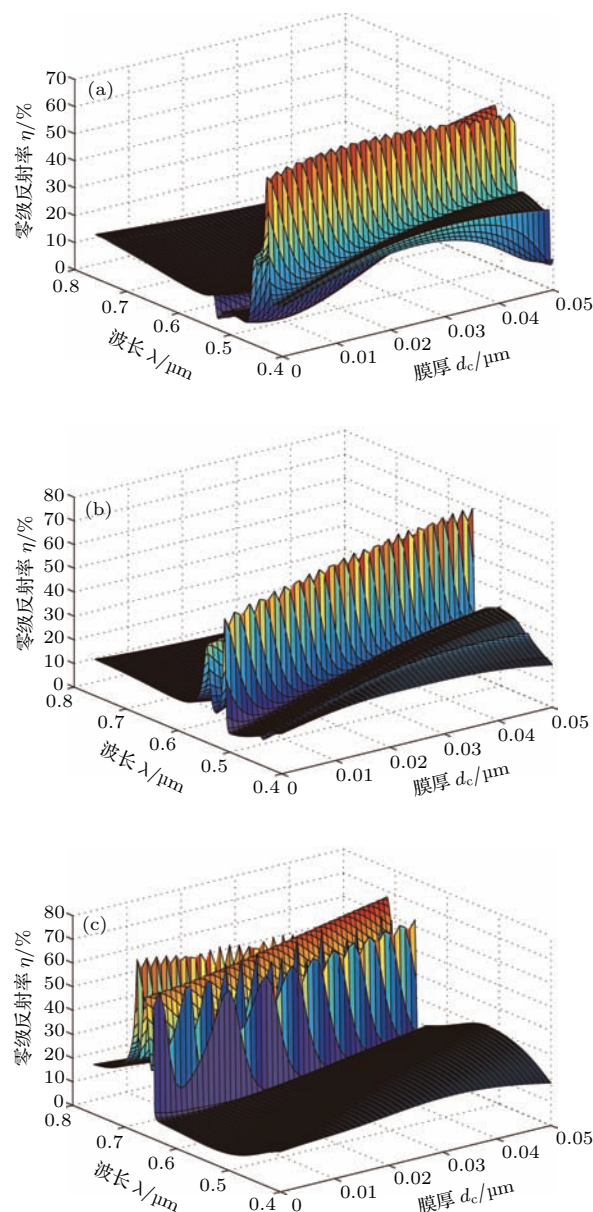


图6 反射峰随器件膜厚 d_c 的变化 ($\theta = 45^\circ$, $T = 431.5$ nm, $d_g = 13.1$ nm, $f = 0.5$) (a) $\varphi_b = 0^\circ$; (b) $\varphi_g = 58^\circ$; (c) $\varphi_r = 90^\circ$

Fig. 6. The changes of reflection peaks with the coating thickness ($\theta = 45^\circ$, $T = 431.5$ nm, $d_g = 13.1$ nm, $f = 0.5$): (a) $\varphi_b = 0^\circ$; (b) $\varphi_g = 58^\circ$; (c) $\varphi_r = 90^\circ$.

最后研究入射角偏差对器件反射峰的影响. 固定其他参数为设计值, 研究入射角 θ 变化时反射峰的变化规律. 如图7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 θ 呈线性变化, 且随 θ 增大蓝移. 当 θ 在 $[50^\circ, 40^\circ]$ 之间变化时, 方位

角为 0° 的共振波长在蓝光波段, 方位角为 58° 的共振波长在绿光波段, 方位角为 90° 的共振波长在红光波段. 因此, 入射角保持在 $[50^\circ, 40^\circ]$ 之间, 相对于设计值 45° 偏移 $\pm 11.1\%$, 即偏移 $\pm 5^\circ$ 可在原方位角上仍保持蓝、绿、红的三色光变效应.

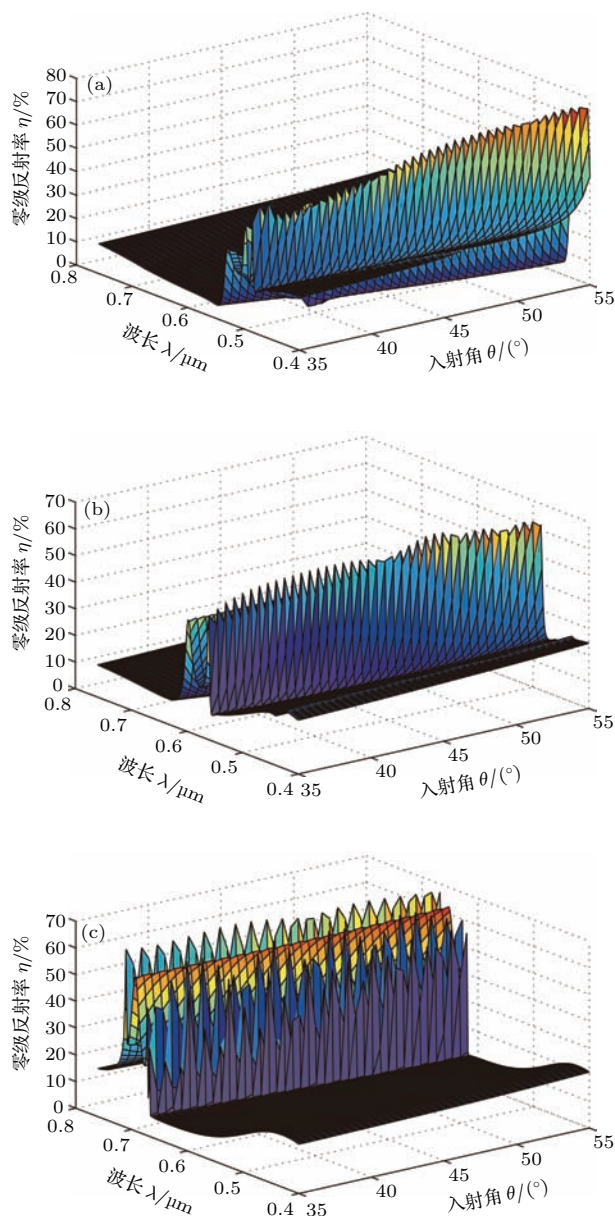


图7 反射峰随入射角 θ 的变化($T = 431.5$ nm, $d_g = 13.1$ nm, $d_c = 124.2$ nm, $f = 0.5$) (a) $\varphi_b = 0^\circ$; (b) $\varphi_g = 58^\circ$; (c) $\varphi_r = 90^\circ$

Fig. 7. The changes of reflection peaks with the incident angle ($T = 431.5$ nm, $d_g = 13.1$ nm, $d_c = 124.2$ nm, $f = 0.5$): (a) $\varphi_b = 0^\circ$; (b) $\varphi_g = 58^\circ$; (c) $\varphi_r = 90^\circ$.

综上所述, 随着光变器周期、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. 相对于设计值, 周期偏移 $\pm 4.6\%$ (± 20 nm), 槽深偏移 $\pm 27.4\%$ (± 34 nm), 膜厚偏移 $\pm 100\%$ (± 13.1 nm), 入射角偏移 $\pm 11.1\%$ ($\pm 5^\circ$)时, 在原方位角 0° , 58° , 90° , 仍分别在蓝、绿、红波段有较高的反射峰. 三色光变器反射峰随以上参数的改变红移或蓝移, 是亚波长光栅外部传播的衍射场与波导光栅产生的泄漏模位相匹配的结果. 部分位相匹配的衍射光进入透射区域, 引起共振响应的退化, 表现为反射峰峰值的降低.

基于上述设计参数, 我们采用电子束曝光和刻蚀工艺制备了硅基模板; 后续采用模压全息工艺, 用电镀法将模板上的亚波长结构转移到镍版, 然后通过热压印转移到PET基材; 最后采用真空蒸镀的方式进行镀膜, 得到最终样品. 上述参数冗余度分析结果指导并控制整个制作流程的工艺误差, 目前样品制作已进入转印PET基材阶段. 后续将对制作完成的样品进行性能测试以及先前的参数冗余度分析结果进行对比研究, 由于其内容较多, 详细结果我们将另文报道.

5 结 论

为了提升现有GMR防伪光变器件的性能, 本文基于RCWA法和遗传算法, 设计了一种基于ZnS覆盖膜的一维单周期矩形结构三色光变器. 当TE, TM波以 45° 角入射时, 可以同时蓝($\varphi_b = 0^\circ$)、绿($\varphi_g = 58^\circ$)、红($\varphi_r = 90^\circ$)三个波段获得高反射率. 因此, 人眼在自然光光照环境下, 能明显观察到蓝、绿、红三种颜色的转换. 对研究结果进行了物理机理分析解释. 通过对三色光变器的关键参数进行冗余度分析可知, 实际制作和测试过程中, 相对于设计值, 周期允许偏移 $\pm 4.6\%$ (± 20 nm), 槽深允许偏移 $\pm 27.4\%$ (± 34 nm), 膜厚允许偏移 $\pm 100\%$ (± 13.1 nm), 入射角允许偏移 $\pm 11.1\%$ ($\pm 5^\circ$). 冗余度分析结果表明三色光变器具有良好的工艺可行性, 并为器件的设计、制作和测试提供了理论依据. ZnS覆盖膜的引入则进一步实现了光变器的实用化和产业化.

与目前现有的两色光变器件相比, 本文设计的嵌入式三色光变器视觉效果更丰富, 可观赏性更强; 设计难度更高, 因此防伪性能更好. 可采用自然光为光源, 方便大众在普通光照环境下识别, 也可通过机读实现专家级防伪. 一维单周期结构有利

于制作高精度模板,可采用激光全息产业通用的模压和 ZnS 蒸镀工艺进行批量生产,进一步实现实用化与产业化,可望在光变图像防伪领域具有重要的应用价值.

参考文献

- [1] Gale M T, Knop K, Morf R 1990 *SPIE* **1210** 83
- [2] Renesse R L V 1998 *Optical Document Security* (3rd Ed.) (London: Artech House) pp212–218
- [3] Wu M L, Hsu C L, Lan H C, Huang H I, Liu Y C, Tu Z R, Lee C C, Lin J S, Su C C, Chang J Y 2007 *Opt. Lett.* **32** 1614
- [4] Ye Y, Chen L S 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 2255 (in Chinese) [叶燕, 陈林森 2008 光学学报 **28** 2255]
- [5] Chen Y L, Liu W X 2011 *Opt. Eng.* **50** 048001
- [6] Chen Y L, Liu W X, Cai S Y 2012 *J. Opt. Technol.* **79** 758
- [7] Uddin M J, Magnusson R 2013 *Opt. Express* **21** 12495
- [8] Uddin M J, Khaleque T, Magnusson R 2014 *Opt. Express* **22** 12307
- [9] Chen Y L, Liu W X 2012 *Opt. Lett.* **37** 4
- [10] Pesala B, Madhusudan M 2013 *SPIE* **8633** 86330D
- [11] Uddin M J, Magnusson R 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1552
- [12] Magnusson R, Wang S S 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 1022
- [13] Wang S S, Magnusson R 1993 *Appl. Opt.* **32** 2606
- [14] Fehrembach A L, Sentenac A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 121105
- [15] Boyko O, Lemarchand F, Talneau A, Fehrembach A L, Sentenac A 2009 *J. Opt. Soc. Am. A* **26** 676
- [16] Hu X H, Gong Ke, Sun T Y, Wu D M 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 74211
- [17] Fehrembach A L, Yu K C S, Monmayrant A, Arguel P, Sentenac A, Oliver G L 2011 *Opt. Lett.* **36** 1662
- [18] Hong L, Yang C Y, Shen W D, Ye H, Zhang Y G, Liu X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064204 (in Chinese) [洪亮, 杨陈楹, 沈伟东, 叶辉, 章岳光, 刘旭 2013 物理学报 **62** 064204]
- [19] Xu P, Hong C Q, Cheng G X, Zhou L, Sun Z L 2015 *Opt. Express* **23** 6773
- [20] Xu P, Huang Y Y, Su Z J, Zhang X L, Luo T Z, Peng W D 2015 *Opt. Express* **23** 4887
- [21] Huang H X, Ruan S C, Yang T, Xu P 2015 *Nano-Micro Lett.* **7** 177
- [22] Huang H X, Xu P, Ruan S C, Yang T, Yuan X, Huang Y Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154212 (in Chinese) [黄海漩, 徐平, 阮双琛, 杨拓, 袁霞, 黄燕燕 2015 物理学报 **64** 154212]
- [23] 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
- [24] Xu P, Huang H X, Wang K, Ruan S C, Yang J, Wan L L, Chen X X, Liu J Y 2007 *Opt. Express* **15** 809
- [25] Xu P, Yuan X, Huang H X, Yang T, Huang Y Y, Zhu T F, Tang S T, Peng W D 2016 *Nanoscale Res. Lett.* **11** 485
- [26] Xu P, Yuan X, Huang H X, Yang T 2014 *CN Patent* 2014103957471 (in Chinese) [徐平, 袁霞, 黄海漩, 杨拓 2014 中国发明专利 2014103957471]
- [27] Wang Q, Zhang D W, Xu B L, Huang Y S, Tao C X, Wang C F, Li B C, Ni Z J, Zhuang S L 2011 *Opt. Lett.* **36** 4698
- [28] Moharam M G, Grann E B, Pommet D A, Gaylord T K 1995 *J. Opt. Soc. Am. A* **12** 1068
- [29] Golubenko G A, Svakhin A S, Sychugov V A 1985 *Quantum Electron* **15** 886

Design of embedded tri-color shift device*

Xu Ping¹⁾²⁾ Yuan Xia¹⁾²⁾ Yang Tuo¹⁾²⁾ Huang Hai-Xuan¹⁾²⁾† Tang Shao-Tuo¹⁾²⁾
Huang Yan-Yan¹⁾²⁾ Xiao Yu-Fei¹⁾²⁾ Peng Wen-Da¹⁾²⁾

1) (Institute of Micro-Nano Optoelectronic Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

2) (College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

(Received 1 January 2017; revised manuscript received 17 April 2017)

Abstract

To improve the performance of existing guided-mode resonance (GMR) anti-counterfeiting grating, a tri-color shift device based on a one-dimensional (1D) singly periodic rectangular structure and ZnS film is reported. By turning the azimuths, the proposed device exhibits tri-color shifts of blue, green, and red for both TE and TM polarizations simultaneously. As the natural light can be considered as a superposition of TE and TM polarizations, in order to achieve the azimuth-tuned tri-color shifts of blue, green, and red, the wavebands and magnitudes of the reflection peaks for TE and TM polarizations should be designed at three azimuths, that is, at the first azimuth, high reflectivity in blue band and low reflectivity in green and red band should be reached; at the second azimuth, high reflectivity in green band and low reflectivity in blue and red band should be reached; at the third azimuth, high reflectivity in red band and low reflectivity in blue and green band should be reached. Considering these design goals, the evaluation function is established. By making the rigorous coupled wave analysis, the 0th reflectivity of the device can be numerically solved, which is relative to the incident light parameters (λ , ψ , φ , θ), the structure parameters (f , T , d_g , d_c), as well as the refractive indices of all the regions (n_i , n_c , n_s). There is no analytical relationship between these parameters and the 0th reflectivity. So genetic algorithm is used to optimize the evaluation function, and then the optimal parameters of the tri-color shift device are obtained. When $T = 431.5$ nm, $d_g = 124.2$ nm, $d_c = 13.1$ nm, $f = 0.5$, and $\theta = 45^\circ$, at azimuth angle 0° , natural light has reflection peaks at 468 nm and 442 nm; at azimuth angle 58° , natural light has reflection peaks at 557 nm and 521 nm; at azimuth angle 90° , natural light has reflection peaks at 690 nm, 673 nm, 650 nm and 644 nm. As a result, the device exhibits blue, green and red color responses at 0° , 58° and 90° azimuth, respectively. The research results are explained in physics. Furthermore, the influences of key parameters on the reflection peaks are investigated. It is found that the reflection peaks of blue, green and red light are red-shifted with the increase of device period, groove depth, coating thickness and the decrease of incident angle. When the period, depth, thickness, and the incident angle are changed by $\pm 4.6\%$ (± 20 nm), $\pm 27.4\%$ (± 34 nm), $\pm 100\%$ (± 13.1 nm), and $\pm 11.1\%$ ($\pm 5^\circ$) with respect to the original designs, respectively, the device can well keep the color-shift effects of blue, green and red. The results above are meaningful in the designing, manufacturing and testing of the device. Compared with the existing GMR anti-counterfeiting grating, the tri-color shift device has high anti-counterfeit and appreciative value because of the harder designing and richer visual effect. Moreover, the 1D simple periodical structure is good for the manufacture of the high-precision master masks, and the device can be massively produced at low cost by the traditional embossing and evaporating technique in the laser holography industry. This tri-color shift device breaks through the limit of bi-color shifting technology, and may have great applications in the field of the optically variable image security.

Keywords: subwavelength, binary rectangular single-period structure, tri-color shift device, anti-counterfeiting

PACS: 42.25.Fx, 42.79.-e, 42.79.Dj

DOI: 10.7498/aps.66.124201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61275167, 60878036) and the Basic Research Project of Shenzhen, China (Grant Nos. JCYJ20140418095735591, JCYJ20130329103020637, JC201005280533A).

† Corresponding author. E-mail: hbx@szu.edu.cn