

双层交叉叠合式共振亚波长光栅

陈永利^{1,2}, 赵达尊¹

1. 北京理工大学信息科学技术学院, 颜色科学与工程国家专业实验室, 北京 100081
2. 天津科技大学包装与印刷工程学院, 天津 300222

摘要 提出了一种防伪光栅结构-双层交叉叠合式共振亚波长光栅, 其特点是可以展宽共振亚波长光栅的共振波长宽度, 使得当将其应用于防伪时能得到更佳的光变效果。分析了半峰全宽展宽的原理, 指出共振宽度值的大小依赖于耦合到光栅波导层内一级衍射光的能量。优化设计了此种光栅的结构参量。用矢量衍射理论对该结构的共振特性和制作工艺误差进行了研究。研究表明: 这种防伪光栅的共振光谱峰值并不随着入射角的变化而降低, 共振半峰全宽最大值约为同等条件下基本共振光栅结构的7倍, 该结构的共振性能对光栅制作误差不是很敏感, 是一种应用价值较高的防伪光栅结构。

关键词 共振亚波长光栅; 半峰全宽展宽; 层叠光栅; 光变图像防伪

中图分类号: TH741.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)04-1147-04

引言

亚波长光栅是一种能够提高产品防伪能力的光学元件, 它利用了光栅的窄带共振和峰值分裂特性, 优化设计后, 可以在不同的照明条件下(和不同的观察方向上)呈现肉眼可察觉, 或仪器可探测的各向异性彩色变化效果^[1,2]。但是, 由于受到光栅材料和制作工艺的限制, 这种基本光栅的共振光谱线宽通常较小, 峰值分裂的同时也伴随着能量的降低, 不利于清晰可见防伪光变图像的获得^[3,4]。目前, 虽有文献^[5,6]报道亚波长光栅的衍射特性, 但主要局限于共振窄带特性的研究, 对共振带宽展宽(和防伪光栅结构优化)方面的探讨极少, 特别是在整个可见光范围内, 在不同入射条件下都能保持共振峰值和带宽几乎不变的光栅结构。为了解决上述问题, 我们研究了共振光栅带宽展宽的原理, 优化设计了一种性能优良的防伪光栅结构, 即双层交叉叠合式共振亚波长光栅。

1 共振带宽展宽的原理

设光波波长为 λ , 一维折射率光栅的周期为 Λ , 槽宽为 $(1-f)\Lambda$, 槽深为 d , 脊背和沟槽的折射率分别为 n_H 和 n_L , 覆层和基底的折射率分别为 n_C 和 n_S , 见图1。对于覆层中垂直于光栅线条方向、入射角为 θ 的入射平面光波, 只要光

栅层的等效折射率 n_G , Λ 和 d 满足:

$$\textcircled{1} n_G > n_C, n_G > n_S, \text{ 其中 } n_G = [f \cdot n_H^2 + (1-f) \cdot n_L^2]^{1/2};$$

$$\textcircled{2} \Lambda \in [\lambda/n_G + n_C \sin\theta, \min[\lambda/(\max(n_C, n_S) + n_C \sin\theta), 2\lambda/(n_G + n_C \sin\theta)]];$$

$\textcircled{3} d \geq (\phi_C + \phi_S)/(n_G k \cos\psi)$, 其中 $k=2\pi/\lambda$, ψ 为共振光栅内的一级衍射光的衍射角, ϕ_C 和 ϕ_S 分别为导波在光栅波导上下界面全反射时引起的位相跃变^[7]; 那么, 覆层和基底区域就仅有0级光波传播, 光栅区域仅有0级和1级光波向前传播, 从而能够形成共振亚波长光栅结构。共振亚波长光栅同时有光栅衍射和波导导波特性的, 其反射光的复振幅和衍射效率分别为^[8]

$$E_R = \frac{\eta \exp(i\phi)}{1 - (1-\eta) \exp(i\phi)},$$

$$I_R = \frac{\eta^2}{\eta^2 + 4(1-\eta) \sin^2(\phi/2)} \quad (1)$$

式中: ϕ 为导波在光栅波导内传播1个周期后的位相变化, η 为光栅的等效强度(耦合到光栅内一级谐波的能量), 其与光栅结构参量(深度和填充因数等)、周围介质折射率和入射光偏振态有关。当入射光的衍射波与光栅结构支持的导波达到位相匹配时, 将发生共振($\phi=2m\pi, m=0, 1, 2, \dots$), 入射光全部反射回介质。此时, 共振光栅的光谱半峰全宽 $\Delta\lambda_{FWHM}$ 为^[9]

$$\Delta\lambda_{FWHM} = \frac{\Delta\phi_{FWHM}}{d\phi/d\lambda} = \frac{4 \arcsin\{\eta/[2(1-\eta)^{1/2}]\}}{d\phi/d\lambda} \quad (2)$$

收稿日期: 2007-11-18, 修订日期: 2008-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(60678052)资助

作者简介: 陈永利, 1978年生, 北京理工大学光电工程系博士研究生

e-mail: yongli_chen0@163.com

式中: $\Delta\phi_{FWHM}$ 是位相半峰全宽; $\Delta\lambda_{FWHM}$ 随 η 的增大而增大, $d\phi/d\lambda$ 与 η 无关。

图 1 所述基本共振光栅本身有优良的窄带共振特性。但由于其 $\Delta\lambda_{FWHM}$ 太小(约为几个 nm), 这将导致反射光的亮度太低, 难以得到易可见的彩色变化效果, 故笔者对这种光栅结构进行了优化, 发现双层交叉叠合式光栅的 η 和 $\Delta\lambda_{FWHM}$ 都较大, 能够再现明显的彩色光变效果, 结构示意图, 见图 2。该光栅制作工艺并不复杂: 首先将光栅蚀刻到低折射率 (n_s) 材料上, 然后涂上与光栅沟槽等深度的高折射率 (n_H) 膜层即可。由于涂布过程中保留了光栅母版的形状, 故可以形成双层交叉叠合式光栅结构。从衍射功能上讲, 双层光栅可以等效为 2 个光栅层和 1 个中间波导层, 交叉双层光栅的反射光复振幅、衍射效率和共振带宽公式形式上与式 (1) 和式 (2) 相同^[8,10], 但其等效光栅强度 η_i 与单层光栅明显不同 ($\Delta\lambda_{FWHM}$ 也不同), 为

$$\eta_i = \eta_1 + \eta_2 + 2\sqrt{\eta_1\eta_2}\cos(\delta + \pi/2) \quad (3)$$

式中: η_1 和 η_2 分别是交叉光栅的顶部和底部光栅的 1 级衍射效率; δ 为顶部和底部光栅产生的 1 级衍射光由于路径差引起的位相变化, $\pi/2$ 为第 2 个光栅衍射引起的位相变化。同等条件下, 双层光栅与单层光栅的共振带宽比 $\Delta\lambda_{d,FWHM}/\Delta\lambda_{FWHM}$ 为

$$\Delta\lambda_{d,FWHM}/\Delta\lambda_{FWHM} \approx [\eta_i(1-\eta)^{1/2}]/[\eta(1-\eta_i)^{1/2}] \quad (4)$$

因此, 优化双层交叉叠合式光栅的结构参量, 即通过优化 δ 增加 $\Delta\lambda_{d,FWHM}$, 有望增加共振带宽, 从而获得清晰可见的防伪彩色变化效果。

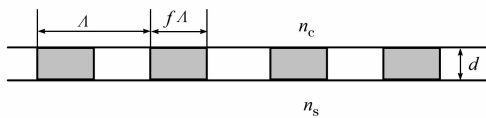


Fig. 1 The basic geometry of resonant sub-wavelength gratings

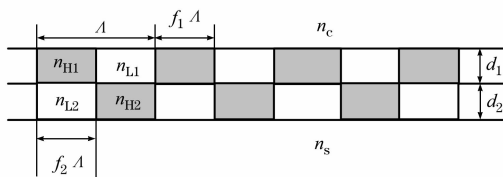


Fig. 2 Intercross cascaded dual-layer resonant gratings

2 双层交叉叠合式光栅的参量优化和光谱峰值分裂

为了展现双层交叉叠合式光栅的可见光共振特性, 笔者用光栅矢量衍射理论^[11], 研究了基本光栅和交叉双层光栅的共振带宽展宽和光谱峰值分裂性能, 默认光栅参数为: $\Lambda = 0.4 \mu\text{m}$, $n_{12} = n_s = 1.46$, $n_{11} = n_c = 1$, $n_{H1} = n_{H2}$, $f_1 = f_2 = 0.5$ 。

2.1 栅槽深度优化

选择 SiO_2 ($n = 1.46$) 和 Ta_2O_5 ($n = 2.09$) 为光栅材料。基

本光栅的栅脊和栅槽材料分别为 Ta_2O_5 和 SiO_2 , 交叉光栅的 d_1 层(和 d_2 层)的栅背和栅槽材料分别为 Ta_2O_5 , 空气(和 Ta_2O_5 , SiO_2)。图 3 给出了这两种光栅在垂直入射条件下的反射光效率, 随可见光波长 λ 和槽深 (d 或 $d_1 = d_2$) 的变化情况。可知, 当槽深在 $0 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 之间变化时, 这两种光栅都仅支持单模共振。与基本光栅相比, 交叉光栅的效率大于 90% (或 50%) 的区域较大, 但它们在槽深时的有无共振特性基本一致。其共振波长的变化趋势明显不同 ((a) 图呈线性单调增加趋势, (b) 图为准正弦曲线形状, 可解释为由于 d_1 和 d_2 层光栅的材料不同引起了共振波长的振荡)。图 4 为这两种光栅结构的共振半峰全宽 (FWHM), 随栅槽深度 (d 或 $d_1 = d_2$) 的变化。这两条曲线的变化趋势相同, 但交叉光栅的 FWHM 远大于基本光栅, 这是双层光栅耦合到波导内的谐波能量较大的缘故。充分考虑国内现有的光栅制作工艺条件^[12] 和人眼的视觉特性^[13], 防伪双层光栅的栅槽蚀刻深度 ($d_1 = d_2$) 可以选取 $0.1 \mu\text{m}$ (理论分析选取值)、 $0.22 \mu\text{m}$ 和 $0.28 \mu\text{m}$ 。此时, 它的 FWHM 约为 $0.07 \mu\text{m}$, 大于基本光栅的最大值 ($0.04 \mu\text{m}$), 能够再现鲜艳的彩色效果。

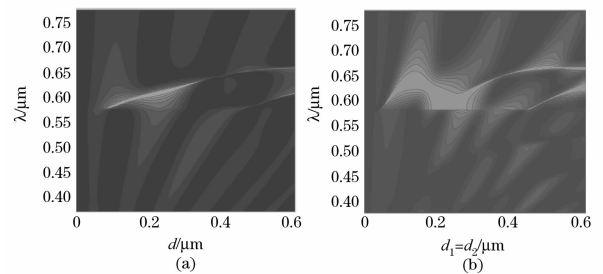


Fig. 3 The reflection efficiency of resonant gratings

(a): The basic grating; (b): Intercross grating

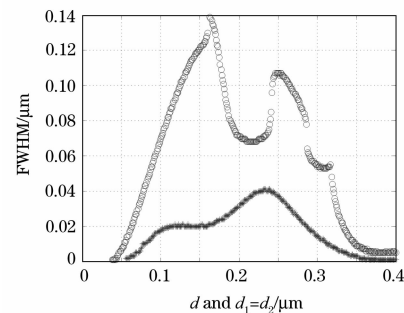


Fig. 4 FWHM vs. grating groove depth

1: Basic grating; 2: Intercross grating

2.2 斜入射光谱峰值分裂和光变特性

图 5 给出了双层交叉光栅经上述参量优化后的共振光谱分裂特性图。可知, 偏振入射光的反射共振光谱频带宽度并不随着观察角度的增加而一直减小, 共振峰值效率均大于 90% (40° 入射时大于 80%)。偏振入射光则大部分透过光栅结构。在入射光斜入射条件下, 它们的反射共振峰值发生分裂。随着入射角的不断增加 (从 0° 到 30°), 这种结构能够展现鲜艳的彩色防伪光变效果 (红-绿-蓝), 且反射光是线偏振光。与文献 [1] 介绍的基本光栅结构 (栅槽深度为 $0.50 \mu\text{m}$) 相比, 这种结构的反射光谱和光变效果均较好, 光谱峰值也

不随着观察角度的增加而减小(颜色较纯), 栅槽深度可以较小。

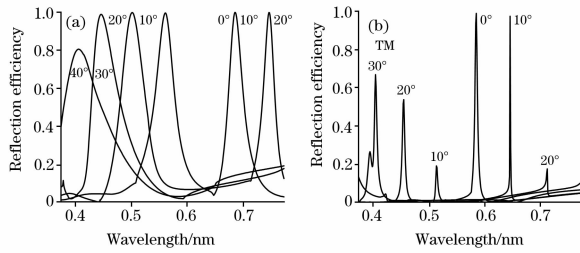


Fig. 5 Reflection spectrum of intercross grating

(a); TE polarization; (b); TM polarization

3 交叉叠合式光栅误差分析

实际光栅蚀刻和涂布工艺中, 总会存在一些误差, 使得光栅结构不能精确达到理论设计的要求, 这将对器件的性能造成很大影响。这些误差主要包括蚀刻和涂布的栅槽深度 ($d_1 = d_2$, 同时变化) 和填充因数 ($f_1 = f_2$, 同时变化)、涂层栅脊填充因数 (f_1) 和涂层栅槽深度 (d_1)。本节对偏振平行白光垂直入射条件下的填充因数 ($f_1 = f_2$, 同时变化, 或仅 f_1 变化) 和涂层栅槽深度 (d_1 仅变化) 误差进行分析, 而蚀刻和涂层的栅槽深度 ($d_1 = d_2$, 同时改变) 误差可依据图 3 和图 4 分析, 此处从略。

3.1 填充因数误差

交叉层叠光栅(和涂层栅脊)填充因数的改变对可见光波段共振的影响, 见图 6[(a)图: $f_1 = f_2$, 同时变化; (b)图: 仅 f_1 变化]。不难发现, 这种优化设计的双层光栅结构仅支持单模共振, 对填充因数的依赖性不强。当填充因数全部设计为 0.5 时, 共振半峰全宽最大, 约为 $0.07 \mu\text{m}$ 。此时, 值对填充因数的变化非常不敏感, 见图 7(a)图, 其中, 1 和 2 分别表示 $f_1 = f_2$ 同时变化和仅 f_1 改变情形。在不同填充因数条件下, 后者的值大于前者。当填充因数在 0.4 到 $0.6 \mu\text{m}$ 之间变化时, 值大于 0.6, 这说明, 双层交叉光栅对填充因数制作误差并不敏感。同时, 这也表明该防伪光栅结构对光栅面形的要求不是很严格, 采用其他光栅面形(如正弦光栅)也能得到相似的性能。当填充因数在上述范围内变化时, 共振波长 λ_{res} 不改变, 见图 7(b)图, 这是由于 d_1 和 d_2 层光栅脊背填充因数互补的缘故。故该光栅结构也可以应用于对共振位置要求较严格的器件, 且光栅又易于加工制作。

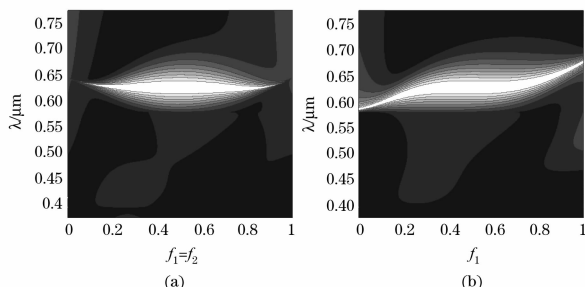


Fig. 6 Influence of fill on the resonance

(a); $f_1 = f_2$; (b); f_1

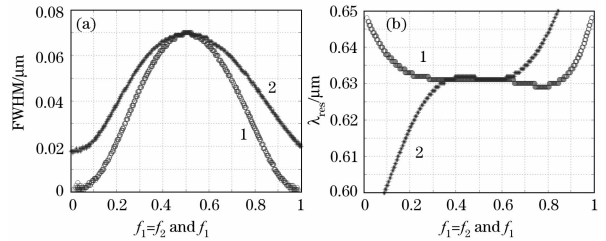


Fig. 7 FWHM (a) and resonant wavelength (b)

vs. duty cycle

1: $f_1 = f_2$; 2: f_1

3.2 涂层栅槽深度误差

涂层栅槽深度变化对共振线形、位置和半峰全宽的影响, 见图 8。其中, (a)图表示光栅 0 级反射光能量随可见光波长 λ 和涂层深度 d_1 的变化, (b)图反映共振半峰全宽随涂层深度 d_1 的变化趋势。当 d_1 从 0 逐步增加到 $0.1 \mu\text{m}$ 时, 共振光谱曲线的对称性得到改善(由非标准的 Lorentz 线型变为标准的 Lorentz 线型), 共振位置略微红移, 见图 8(a)图。FWHM 在 $d_1 = 0.02 \mu\text{m}$ 时降到最低值, 然后沿斜率为 0.75 的准直线线性增加, 见图 8(b)图。当 $d_1 = 0 \mu\text{m}$ 时的光栅结构为基本光栅结构(见图 1), 此时的 FWHM 约为 $0.18 \mu\text{m}$ 。与单层基本光栅结构相比, 这种双层光栅结构明显优于单层结构, 它能够在较大范围内增加半峰全宽值, 而共振位置几乎不受影响, 非常有利于彩色效果的再现。当光栅母版栅槽深度达到设计要求时, 它对其他光栅制作工艺(镀膜)误差不是很敏感。

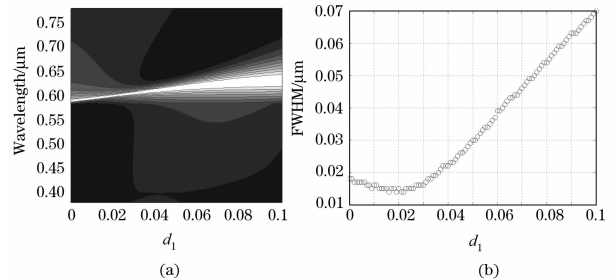


Fig. 8 Reflection efficiency (a) and

full width at half maximum (b)

4 结 语

提出了一种可增加光栅共振带宽的光栅结构。与基本光栅结构相比, 优化设计的双层交叉叠合式光栅结构, 能够增加耦合到光栅波导层内谐波的能量, 从而引起共振半峰全宽明显展宽。误差分析表明, 它的共振特性对填充因数和涂层深度不敏感, 而对光栅母版蚀刻栅槽深度比较敏感。为了获得清晰的光变效果, 必须严格控制蚀刻深度值, 而对其他制作工艺的要求相对较宽松。这种光栅结构可以用于宽波段滤波器和光变图像防伪等领域, 能够产生清晰的可见光变效果。随着观察角度的改变, 共振峰值效率基本保持不变, 半峰全宽也没有显著的减小, 再现色较纯。

参 考 文 献

- [1] Gale M T, Knop K, Morf R. Proc. of SPIE, 1990, 1210: 83.
- [2] CHEN Yong-li, ZHAO Da-zun, ZHANG Jing-fang, et al(陈永利, 赵达尊, 张静方, 等). Transactions of Beijing Institute of Technology (北京理工大学学报), 2007, 27(6): 527.
- [3] Tompkin W R, Staub B R. U. S. Patent, 6870678, 2005.
- [4] Souparis H. U. S. Patent, 6943952, 2005.
- [5] Thurman S T, Morris G M. Appl. Opt. , 2003, 42(16): 3225.
- [6] Lenaerts C, Moreau V, Lion Y F et al. Opt. Eng. , 2004, 43(11): 2631.
- [7] Selle C K A, Bader M A, Marowsky G. J. Opt. Soc. Am. B, 2004, 21(6): 1127.
- [8] Jacob E K, Dunn S T, Moharam M G. Appl. Opt. , 2002, 41(7): 1241.
- [9] Jacob D K, Dunn S T, Moharam M G. J. Opt. Soc. Am. 2000, 17(7): 1241.
- [10] Jacob D K, Dunn S C, Moharam M G. J. Opt. Soc. Am. A, 2001, 18(9): 2109.
- [11] Gaylord T K, Moharam M G. Proc. of the IEEE, 1985, 73: 894.
- [12] QIN Xi-yun, LI Jun-hui, YANG Yu-hong, et al(秦西云, 李军会, 杨宇虹, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2007, 27(2): 411.
- [13] Tayeb G, Gralak B, Enoch S. Optics & Photonics News, 2003, 2: 40.

Intercross Cascaded Dual-Layer Resonant Sub-Wavelength Gratings

CHEN Yong-li^{1,2}, ZHAO Da-zun¹

1. National Lab of Color Science and Engineering, School of Information Science and Technology Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. College of Packing & Printing Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China

Abstract A security grating structure, intercross cascaded dual-layer resonant sub-wavelength grating structure, is presented. It can broaden the resonant wavelength width of resonant sub-wavelength gratings and obtain the better optical variable effect. The full-width-at-half-maximum(FWHM) broadening mechanism of security grating structures is analyzed. The FWHM is dependent on the energy coupled into the grating waveguide layer. The grating structure parameters are optimized and designed. The resonance performance and grating fabrication tolerances are also studied numerically using the vector diffraction theory (the rigorous coupled wave theory). Simulation results indicate that the value of the spectral resonant peak for the security grating structure is not decreased as the incident angle increases or decreases and the maximum FWHM of different depth of grating grooves is about seven times that of the basic resonant grating structure. The resonant dual grating waveguide structure is a kind of security grating configuration with the potential to achieve higher industry application value and its resonance performance is not sensitive to manufacture errors.

Keywords Resonant sub-wavelength gratings; Full-width-half-maximum broadening; Cascaded gratings; Optical variable image devices security

(Received Nov. 18, 2007; accepted Feb. 26, 2008)