

文章编号: 0253-2239(2008)06-1031-06

间隔叠合式双层亚波长光栅

陈永利¹ 赵达尊¹ 张静方² 朱 军² 王晓利²

(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 中钞特种防伪科技有限公司, 北京 100070

摘要 提出了一种应用价值较高的防伪光栅结构-间隔叠合式双层亚波长光栅,可以展宽基本光栅的光谱峰值带宽、改善光谱线形和光变效果。分析了亚波长光栅光谱峰值带宽展宽和线形改善的原理,用矢量衍射理论验证了理论分析的合理性,并对特定防伪光变设计要求的双层光栅进行了参量优化和光变特性分析。结果表明,满足同相位条件的光谱线形与基本光栅相同,带宽为基本光栅的两倍;满足反相位条件的光谱线形为准矩形,带宽大于基本光栅;亚波长光栅在传统和非传统照明条件下倾斜均能产生彩色光变效果,且传统照明情况下的光变速率较大,利用这种光变速率差可以制作各向异性光变效果。

关键词 双层亚波长光栅; 光变图像; 线宽展宽; 线形改善

中图分类号 O436.3 **文献标识码**: A

Non-Contact Cascaded Dual-Layer Sub-Wavelength Gratings

Chen Yongli¹ Zhao Dazun¹ Zhang Jingfang² Zhu Jun² Wang Xiaoli²

(¹ National Laboratory of Color Science and Engineering, School of Information Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
² Zhongchao Special Security Technology Co. Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract A non-contact cascaded dual-layer sub-wavelength grating is presented. It can broaden the spectral peak linewidth, modify the spectral lineshape and improve the optical variable effect of basic sub-wavelength gratings. It is a kind of security grating configuration with potential for achieving application in industry. The mechanisms for the broadened linewidth and improved lineshape are analyzed and validated with the vector diffraction theory. The structural parameters of dual-layer gratings with special requirements of change in color are optimized and their optical variable characteristics are also studied. The results show the spectral lineshape of dual-layer gratings cascaded in phase is similar to that of basic gratings with a linewidth twice that of basic gratings; the out-of-phase arrangement yields lineshape exhibiting broadened peaks and narrower bases with a wider linewidth. Dual-layer gratings always show optical variable effect when tilted at traditional or nontraditional incident illumination and the optical variable velocity of the former is the quicker than that of the latter which can be used to design and fabricate anisotropic optical variable image devices.

Key words dual-layer sub-wavelength gratings; optical variable image; linewidth broadening; lineshape improvement

1 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光谱峰值带宽(半峰全宽)和峰值分裂特性,经优化设计能够在不同的照明

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,在光学防伪领域具有应用价值^[1,2]。但是,由于受到光栅材料和制作工艺的限制,这种基本光栅结构的光谱峰值带宽

收稿日期: 2007-10-19; **收到修改稿日期**: 2007-12-24

基金项目: 国家部委预研项目(2006.7.2.3)资助课题。

作者简介: 陈永利(1978-),男,博士研究生,主要从事信息光学和光学防伪技术等方面的研究。

E-mail: yongli_chen0@163.com

导师简介: 赵达尊(1939-),男,教授,博士生导师,主要从事颜色和自适应光学等方面的研究。

E-mail: zhdz@bit.edu.cn

通常较小,峰值分裂的同时往往也伴随着能量的降低,非常不利于可视彩色光变图像的获得^[3-5]。目前,虽有文献^[6-8]对亚波长光栅的衍射特性进行报道,但主要仅局限于窄带特性的研究,对光栅光谱峰值带宽展宽、线形改善和光栅结构优化方面,特别是在可见光范围内的探讨极少。为此,本文对双层光栅带宽展宽和线形改良的原理进行了研究,设计了一种防伪光栅结构-间隔叠合式双层亚波长光栅,并用矢量衍射理论对这种光栅进行了参量优化和光变特性分析。

2 带宽展宽、线形改善的原理

如图1所示,间隔叠合式双层亚波长光栅是由两个完全相同的亚波长光栅有间隔地叠合构成的, n_1 和 n_2 为光栅材料折射率, $n_1 > n_2$, d_g 为光栅深度, n_w 和 d_w 为透明间隔层的折射率和深度, $n_w = n_2$, n_c 和 n_s 分别为覆盖层和基底层折射率, Λ 为光栅周期, f 为填充因子。光栅的平均折射率为

$$n = \sqrt{fn_1^2 + (1-f)n_2^2},$$

且 $n > n_c$, $n > n_s$ 。一束平行单色光垂直入射到基本光栅上,只要 Λ 满足:仅有0和±1级衍射光能够在光栅内传播,其他衍射级均为倏逝波;仅0级衍射光能够在光栅上下区域内向前传播,那么这种光栅就能成为亚波长光栅,它的光谱峰值效率较高,但峰值带宽通常较小。为了改善基本光栅在可见光范围内的光谱分布的对称性,且使光谱峰值边频带响应较低,光栅深度 d_g 需满足减反射条件: $d_g = \lambda/(2n)$, λ 为入射光波长。此时,光栅的反射和透射系数分别为^[9]

$$E_r = \frac{\eta \exp(j\phi)}{1 - (1-\eta) \exp(j\phi)}, \quad (1)$$

$$E_t = \sqrt{1-\eta}(1-E_r),$$

式中 η 为光栅等效强度(耦合到光栅内一级衍射光的能量), ϕ 为耦合到光栅内一级衍射光在光栅波导(基本光栅在功能上可以等效为均匀波导)内传播一个周期后的相位变化。故可以将基本光栅看作具有

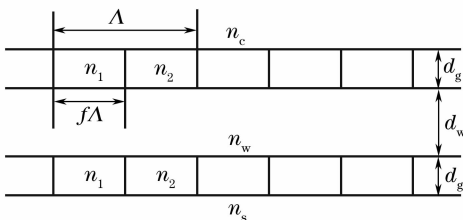


图1 间隔叠合式双层亚波长光栅

Fig. 1 Non-contact cascaded dual-layer sub-wavelength gratings

特定反射和透射系数的界面,任意多个基本光栅的叠合均可看作多层膜的层叠,然后利用薄膜多光束干涉理论分析这种叠合式光栅的光谱峰值、峰值带宽和线形改善等特性。间隔层深度 d_w 值的大小直接影响这种光栅的光谱峰值(共振)、光谱线形和峰值带宽等特性,是光栅设计中非常关键的一个参量。

依据薄膜多光束干涉理论,薄膜的总反射和透射系数分别为^[10]

$$R = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-j2\delta)}{1 + r_{12} r_{23} \exp(-j2\delta)}, \quad (2)$$

$$T = \frac{t_{12} t_{23} \exp(-j2\delta)}{1 + r_{12} r_{23} \exp(-j2\delta)},$$

式中 $\delta = 2\pi n_w d_w \cos \theta / \lambda$, θ 为入射光在薄膜内的折射角, r_{12} 、 r_{23} 和 t_{12} 、 t_{23} 分别为入射光在薄膜上下界面的反射系数和透射系数。假设间隔层深度 d_w 较大,那么两个基本光栅内传播的导波将不能相互耦合,它们的反射和透射系数完全由(1)式决定。此时,将(1)式代入(2)式,得到双层光栅(入射光垂直入射)的总反射系数为

$$E_{d,r} = \frac{E_r + E_r \exp(-j\phi)}{1 + E_r E_r \exp(-j\phi)}, \quad (3)$$

式中 $\phi = 2(\delta_g + \delta_w)$ 为入射光在等效薄膜内传播一个周期后的相位变化, δ_g (或 δ_w)为入射光一次透过光栅(或间隔层)时发生的相位变化, $\delta_i = 2\pi n_i d_i / \lambda$, $i = g, w$ 。

图2给出了(1)式所示的基本亚波长光栅反射和透射系数的振幅和相位随 ϕ 的变化趋势, ϕ_r 、 ϕ_t 分别为反射和透射相位。可见当波长 λ 满足条件使 $\phi = 2m\pi$ ($m = 0, 1, 2, \dots$)时, $|E_r| = 1$, $|E_t| = 0$;当波长 λ 的取值使 ϕ 偏离 $2m\pi$ 时, $|E_r|$ 迅速减小, $|E_t|$ 迅速增大;反射和透射系数相位(ϕ_r 、 ϕ_t)在峰值波长附近变化迅速,且两侧的值符号相反。于是根据(3)式可得到,当波长 λ 满足条件使 $\phi = 2m\pi$ 时,无论 ϕ 满足同相位($\phi = 2m\pi$)条件,还是反相位 $[\phi = (2m+1)\pi]$ 条件,总反射系数总能达到1, $E_{d,r} = 1$;当波长 λ 的取值使 ϕ 偏离 $2m\pi$ 时, $E_{d,r} \approx E_r + E_r \exp(-j\phi)$,此时若 ϕ 满足同相位条件,则其光栅反射系数接近基本光栅的两倍, $E_{d,r} \approx 2E_r$,用于展宽光栅光谱峰值带宽,若 ϕ 满足反相位条件,光栅反射系数约为零, $E_{d,r} \approx 0$,用于改善光栅光谱分布线形,抑制边频带响应。故对这种双层光栅结构进行参量(Λ , d_g , d_t)优化,能够增加光谱峰值带宽($\phi = 2m\pi$)和改善光谱线形 $[\phi = (2m+1)\pi]$,从而能够改善光栅结构的防伪彩色光变效果。

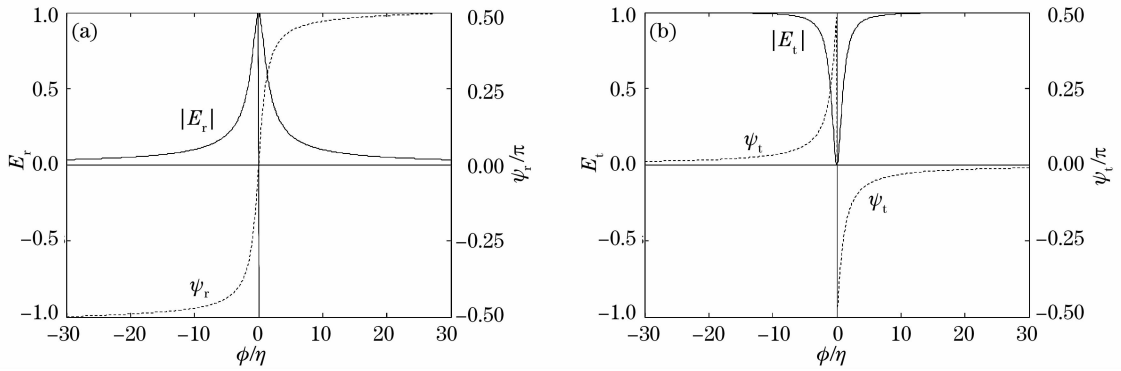


图 2 反射系数(a)和透射系数(b)的振幅和相位

Fig. 2 Amplitude and phases of reflection coefficient (a) and transmission coefficients (b)

3 双层光栅参量优化和特性分析

为了展现双层光栅在可见光范围内的光谱分布(带宽展宽、线形改善)变化规律,改善基本光栅结构的彩色光变效果,本文拟以一个特定的光变设计要求为例,根据矢量衍射理论^[11],利用矢量衍射算法软件 PCGrate,对双层光栅的 Λ 、 d_g 、 d_w 等参量进行优化,并对该光栅的光变特性进行分析。选择 SiO_2 ($n_2 = 1.46$) 和 Ta_2O_5 ($n_1 = 2.09$) 为光栅材料, SiO_2 ($n_w = n_2$) 为间隔层材料, $f = 0.5$, $n_c = n_s = 1.46$ 。要求的光变效果为入射角 θ 为 $0^\circ, 10^\circ$ 时的光谱峰值处的效率几乎达 100%, $\theta = 0^\circ$ 时为红色, $\theta = 10^\circ$ 时为绿色, $\theta = 10^\circ$ 时,光栅旋转 90° 后产生彩色光变效果,由原来的绿色变为红色。

3.1 基本光栅周期 Λ

共振位置主要由光栅周期决定,共振产生的颜色直接受周期影响,故在光变图像优化设计中,光栅材料确定后必须首先优化该参量。考虑到人眼红和绿锥体感光细胞分别对波长为 $0.63 \mu\text{m}$ 和 $0.55 \mu\text{m}$ 附近可见光的灵敏度较高;材料折射率和光栅制作误差会引起共振波长轻微平移;当 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 10^\circ$ 时基本光栅分别存在一个(垂直入射)和两个(倾斜入射,峰值分裂)共振峰值,前者峰值带宽为后者两个峰值带宽之和,即垂直入射共振峰值带宽大于倾斜入射任一峰值的带宽,故将倾斜入射时($\theta = 10^\circ$)的颜色要求作为周期优化的标准,它的共振波长为 $\lambda_{\text{res}} = 0.55 \mu\text{m}$,峰值效率不小于 90%。图 3 给出了不同光栅深度 d_g 和周期 Λ 的效率图。不难发现,整个优化图中存在多个峰值分布,这意味着光栅深度的最佳取值呈准周期分布,又考虑到高频光栅的实际制作条件限制,最终确定 d_g 的范围在 $0.05 \sim 0.10 \mu\text{m}$ 内和 Λ 在 $0.422 \sim 0.440 \mu\text{m}$ 范围内,优化周期值为

$0.43 \mu\text{m}$ 。此时,它对光栅加工误差有一定的宽容度。对 d_g 的优化还应考虑峰值带宽和效率的大小,此时还不能确定,但它应处于上述范围内,其最小值为 $d_g = 0.05 \mu\text{m}$ 。

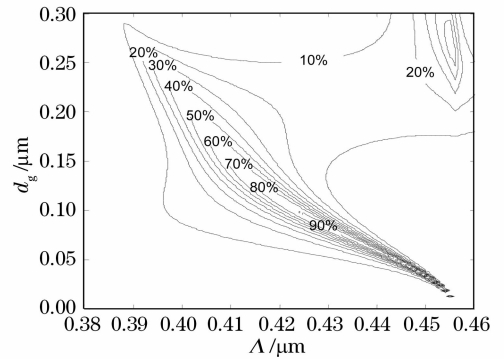


图 3 反射光效率随光栅深度 d_g 和周期 Λ 的变化

Fig. 3 Reflection energy as a function of grating depth and period

3.2 基本光栅深度 d_g

为使基本光栅在倾斜入射($\theta = 10^\circ$)时能够产生肉眼易察觉的彩色效果,它应具有较大的光谱峰值效率(如大于 90%),峰值带宽也应有一定的宽度。图 4 给出了基本光栅在不同光栅深度条件下的反射

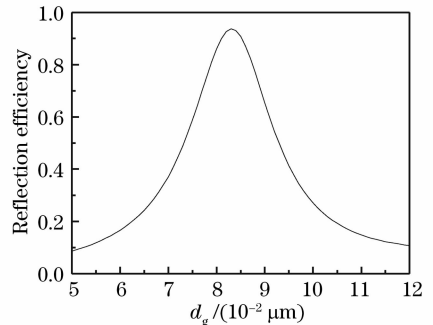


图 4 反射光效率随光栅深度 d_g 的变化

Fig. 4 Reflection efficiency as a function of grating depth

光效率变化曲线。可见,当 d_g 在 $0.05 \sim 0.12 \mu\text{m}$ 范围时,反射光效率曲线具有唯一峰值,且只要 d_g 在 $0.081 \sim 0.085 \mu\text{m}$ 之间,反射光效率均大于 90% 。选择最大效率(95%)所对应的 $d_g = 0.083 \mu\text{m}$ 作为设计最优深度值。根据所选的 Δ 和 d_g 值可以算得,基本光栅在垂直入射($\theta = 0^\circ$)和倾斜入射($\theta = 10^\circ$)时的光谱峰值波长和带宽分别为 $0.64 \mu\text{m}$ 、 $0.016 \mu\text{m}$ 和 $0.55 \mu\text{m}$ 、 $0.012 \mu\text{m}$ 。

3.3 双层光栅间隔层深度 d_w

图 5 给出了由基本光栅构成的双层光栅的反射光效率随 d_w 和 λ 的变化。可见,这种光栅结构的光谱效率峰值区域(图中白色区域)具有“周期”性,每个峰值区域的中心和边缘位置处的 d_w 分别满足同相位和反相位条件,且在 $d_w > 2\lambda$ 时这种周期性更加明显;随着 d_w 不断增大,相邻峰值区域相互连接;不同 d_w 对应的峰值波长基本一致,但第一个峰值区域的峰值波长红移,这是由于 d_w 较小导致两个光栅间的能量耦合。

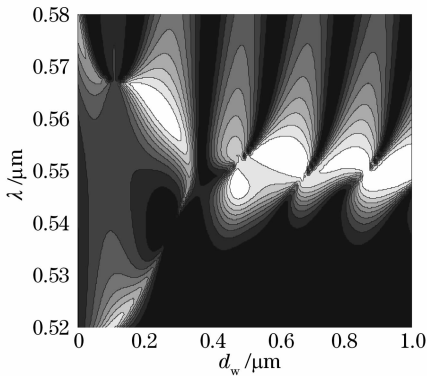


图 5 反射光效率随间隔层深度 d_w 和波长 λ 的变化
Fig. 5 Reflection efficiency as a function of the depth of grating separation layer and wavelength

图 6 以实线给出了双层光栅在 d_w 满足同相位

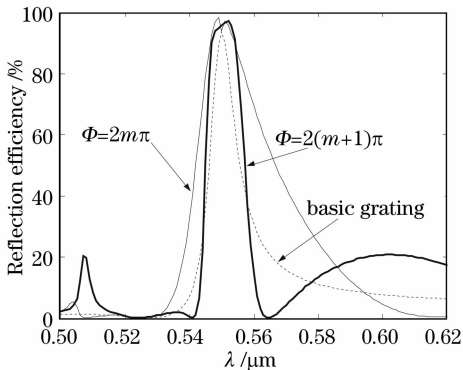


图 6 同相位和反相位条件下的共振光谱分布
Fig. 6 Resonant spectral responses under the condition of in phase and out of phase

和反相位条件下的光谱分布,虚线为基本光栅的光谱分布。可见,双层光栅与基本光栅结构的峰值位置和峰值效率均基本相同,但峰值线宽和线形与基本光栅不同。当 $\phi = 2m\pi$ 时,峰值带宽明显大于基本光栅结构,约为它的两倍,光谱线形与基本光栅结构相似,均为洛伦兹线型;当 $\phi = (2m+1)\pi$ 时,峰值带宽略大于基本光栅结构,光谱线形明显不同于基本光栅结构,为准矩形线型。这些特性与理论分析结果相吻合,也从数值上验证了理论分析的合理有效性。然而,这些曲线的对称性有待改善,这主要是由于设计的基本光栅深度并不满足减反射条件的缘故。与基本光栅相比,双层光栅的光谱峰值边带响应出现了周期性的振荡,周期约为 $\Delta_f = \lambda^2 / (2n_w d_w)$,此时两个光栅与间隔层形成了法布里-珀罗干涉结构。从彩色光变效果分析,这种光栅能够展宽光谱峰值带宽(同相位条件),也能改善光谱线形(反相位条件),对颜色再现几乎没有负面影响。层叠光栅在同相位和反相位条件下角谱分布与光谱分布相似。

3.4 双层光栅的光变特性

防伪亚波长光栅利用了它在不同观测条件(观测角 θ 改变)下能够产生光谱共振峰值和峰值分裂而设计制作出光变图像。为了方便描述,将入射面平行于光栅平面法线与光栅矢量构成的平面的情况称为传统入射条件,将入射面垂直于上述平面(即光栅旋转 90°)的情况称为非传统入射条件。图 7 给出了双层光栅在传统入射条件下的反射光谱分布随入射角 θ 的变化情况。其中,横电(TE)模偏振光出现峰值,横磁(TM)模偏振光大部分透过光栅结构,故 TE 偏振光决定了这种入射条件的光变效果:随着光栅不断倾斜(θ 增大)峰值位置向短波方向迅速移动,在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 范围内能够展现彩色效果(红-绿-蓝),峰值带宽均比基本光栅的带宽大(见图 6),但当 $\theta > 30^\circ$ 时偏振光大部分透过光栅(没有峰值)。图 8 给出了光栅旋转 90° 后(光栅沟槽平行于入射面)的反射光谱分布变化情况。TE 和 TM 偏振光均出现峰值,但在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 范围内 TE 偏振光大部分透过光栅结构,仅 TM 偏振光存在峰值,且随着 θ 增大峰值均向短波方向缓慢移动,故在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 范围内的颜色(红色)由 TM 偏振光决定,在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 范围内的光变图像则由两个偏振光共同决定。

双层光栅在传统和非传统入射条件下倾斜均能产生彩色光变图像,但前者的光变速率较大,充分利用它们之间的光变速率差就能够设计多种各向异性光变效果(光栅旋转 90° 颜色改变),见表 1,这些光

变效果是光变油墨和薄膜光变图像等其他防伪光变图像所不具有的特征。应该指出,为了产生各向异性彩色光变效果,入射光需要是非偏振光,光栅旋转 90°才能产生表 1 所示的“彩色-彩色”光变效果,而如果入射光是 TE 或 TM 偏振光,则仅能在光栅倾斜时产生彩色光变效果,光栅旋转 90°虽也有光变

效果,但不是“彩色-彩色”的变化。此外,为了突出某种光变效果(如“绿变红”),对光栅进行特殊处理(如增加吸蓝光层)也是非常必要的。基本光栅其他参量,如填充因数和材料折射率等的微小波动,对优化设计双层光栅光变特性的影响较小,几乎可忽略。

表 1 双层光栅的各向异性光变效果

Table 1 Anisotropic optical variable effects of dual-layer gratings

θ	10°	20°	30°~40°	50°
Optical effects	Green-red	Blue-red	Gray-green	Gray-blue

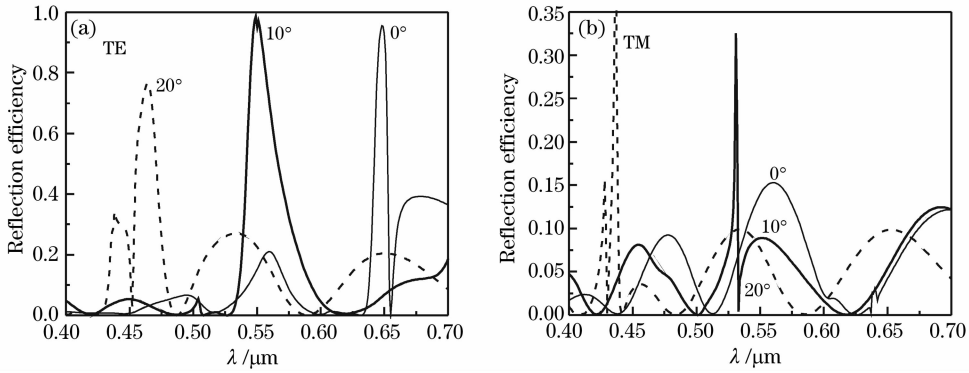


图 7 传统入射条件下反射光谱分布随观察角度的变化

Fig. 7 Reflection spectral response as a function of inspection angular at traditional incident illumination

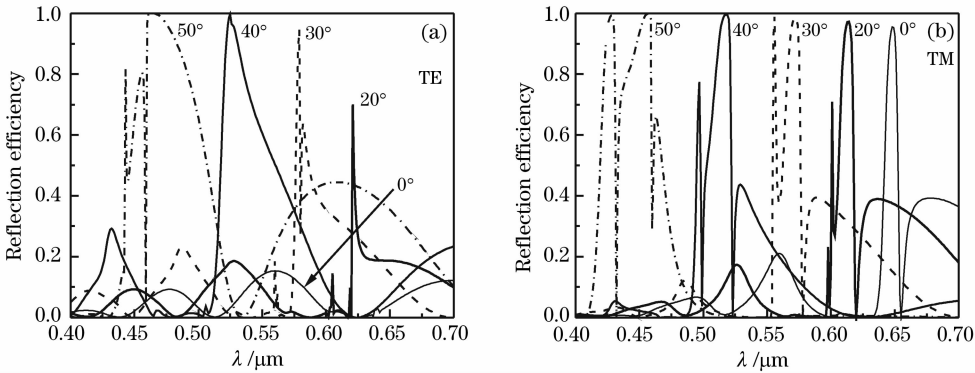


图 8 非传统入射条件下反射光谱分布随观察角度的变化

Fig. 8 Reflection spectral response as a function of viewing angle at nontraditional incident illumination

4 结 论

提出了一种光栅结构-间隔叠合式双层亚波长光栅,可以展宽基本光栅的光谱峰值带宽,改善光谱线形,改进基本光栅的彩色光变效果。分析了亚波长光栅的光谱峰值带宽展宽和线形改善的原理,用矢量衍射理论验证了理论分析的合理性。间隔层深度满足同相位条件的双层光栅的光谱线形与基本光栅相同,均为洛伦兹线型,光谱峰值带宽为基本光栅的两倍;间隔层深度满足反相位条件时的光谱线形为准矩形线型,峰值带宽大于基本光栅峰值带宽;间

隔层深度介于二者之间的光谱峰值线形和带宽均介于二者之间。双层光栅在传统和非传统入射条件下倾斜均能产生彩色光变效果,且前者的光变速率较大,充分利用这两种入射条件下的光变速率差就能够设计制作各向异性光变图像(光栅旋转 90°颜色改变),这是其他防伪光变图像(如光变油墨和薄膜光变图像等)所不具有的特征。

参 考 文 献

1 R. T. Wayne, S. Andreas, S. Rene. Color-shifting features for optically variable devices[C]. Proc. SPIE, 2004, 5310: 244~255

- 2 Chen Yongli, Zhao Dazun, Zhang Jingfang *et al.*. A study on resonance characteristics of sub-wavelength gratings in the visible region[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, **27**(6): 527~531
陈永利,赵达尊,张静方等. 亚波长光栅的可见光共振特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2007, **27**(6): 527~531
- 3 H. Spuparis, N. Sur Marne. Security protection of documents or products by affixing an optically active component for verification of authenticity[P]. US Patent 0164456 A1, 2002-12-07
- 4 W. R. Tompkin, R. Staub. Surface pattern[P]. US Patent 6870678 B2, 2005-03-22
- 5 H. Souparis, N. Sur Marne. Optical security component[P]. US Patent 6943952 B2, 2005-09-13
- 6 Zhang Liang, Li Chengfang, Liu Wen *et al.*. Development of broadband polarizing beam splitter/combiner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1048~1052
张亮,李承芳,刘文等. 一种亚波长偏振分波/合波器的研制[J]. 光学学报, 2006, **26**(7): 1048~1052
- 7 Wang Wei, Zhou Changhe. High fidelity replication technology of polymer microstructure diffraction gratings[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1363~1366
王维,周常河. 高精度微结构聚合物光栅的复制技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(10): 1363~1366
- 8 C. Lenaerts, V. Moreau, Y. F. Lion *et al.*. Narrow bandwidth wavelength filter by guided mode resonance[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(11): 2631~2639
- 9 D. K. Jacob, S. C. Dunn, M. G. Moharam. Normally incident resonant grating reflection filters for efficient narrow band spectral filtering of finite beams[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, **18**(9): 2109~2120
- 10 D. Rosenblatt, A. Sharon, A. A. Friesem. Resonant grating waveguide structures[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **33**(11): 2038~2059
- 11 T. K. Gaylord, M. G. Moharam. Analysis and applications of optical diffraction by gratings[C]. *Proc. IEEE*, 1985, **73**(5): 894~937