



亚微米光栅微结构光学特性研究

陈永利, 刘文霞

(天津科技大学包装与印刷工程学院, 天津 300222)

摘要: 提出了一种新型的亚微米光栅微结构,研究了其光谱共振特性. 给出了该结构的反射光谱及光谱带宽表达式,用矢量衍射的方法对比分析了该结构与亚波长光栅的共振、光谱带宽及线形改良的规律. 研究表明:微结构的共振及光谱带宽由等效光栅强度和导波的位相光谱移相速率决定,前者的物理意义为耦合到微结构内一级衍射光的能量;提出的微结构与亚波长光栅有相似的共振特性,但带宽明显增大;微结构的光栅调制并不影响其有无共振特性,但光谱带宽及共振面积却随着调制度的增加而增大;经设计微结构将有优良的窄带及宽带滤波功能,而后者可使之呈现肉眼可见的新型彩色光变效果,可以应用于防伪领域.

关键词: 光栅; 光学; 光谱; 防伪

中图分类号: O436.3 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2010)02-0049-04

Study on Some Optical Characteristics of Submicron Grating Microstructures

CHEN Yong-li, LIU Wen-xia

(College of Packaging and Printing Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: A novel submicron grating microstructure was provided and its spectral resonance property was studied. Expresses on reflective spectra and spectral bandwidth of microstructures were derived. Rules on resonance, spectral bandwidth and line-shape improving of provided microstructures and submicron gratings were analyzed using the vector diffraction method. Study results indicate that resonance and spectral bandwidth of microstructures are decided only by its effective grating strength and the rate of spectra phase changes, and the former has a physical meaning of first-order light power diffracted into microstructures. The resonance characteristic of microstructures is similar to that of submicron gratings, but the former has a more wide spectral width. Whether the resonant property of provided microstructures exist or not is not affected by its grating modulation, but its spectral bandwidth and resonant area increase with strengthen of grating modulations. The submicron grating microstructure has better narrow-band and wide-band filtering functions when designed correctly and the latter with better potential of application in security field can show a novel color change effect seen by the vision system.

Keywords: gratings; optics; spectra; security

随着精细加工技术的发展,现在已能加工亚微米数量级的微结构,设计后这类结构有独特的光学特性,在防伪领域有广泛的应用前景^[1-2]. 亚微米光栅是其中结构简单的可人为控制的微结构,它的周期和工作波长相近. 当可见白光入射到光栅上时,经光栅的调制,周围介质内仅有反射和透射光传播,且其光

谱有尖锐的峰,峰又会随着观察角度的改变向短波和长波方向分裂平移,该特性可用于设计新型的防伪产品^[3-4]. 但是,由于上述特性对光栅参数极其敏感,又受到光栅材料和制作工艺的限制,使得反射光谱的带宽太小,并且光谱峰分裂的同时伴随着峰值效率的严重降低,很难获得可见的彩色效果^[5-6]. 况且,目前虽

收稿日期: 2009-11-18; 修回日期: 2009-12-30

基金项目: 天津科技大学引进人才科研启动基金资助项目(20080432)

作者简介: 陈永利(1978—),男,山东人,讲师,博士,chenyongli@tust.edu.cn.

有文献研究亚微米光栅的衍射特性^[7-8],但主要限于窄带滤波,对光谱带宽及线形改善方面的研究很少,尤其是工作于可见光波段的微结构.本文研究了一种光栅微结构,它可以在不影响共振的前提下展宽反射光谱带宽,使之反射光呈现出肉眼可见的颜色,且颜色会随观察角度的变化而改变.并分析了影响光谱带宽的因素,用矢量衍射方法^[9-10]对比研究了提出的微结构和亚波长光栅反射光谱的变化规律.

1 微结构的共振带宽

欲研究的亚微米光栅微结构如图 1 所示,其中, Λ 是光栅的周期, n_H (n_{H1} 或 n_{H2})和 n_L (n_{L1} 或 n_{L2})分别是脊背(n_H 处)和沟槽(n_L 处)的折射率, f 是填充因数, d_1 和 d_2 是光栅层的深度, n_f 和 d_f 是间隔介质层的折射率和深度, n_c 和 n_s 分别是覆盖层和基底层的折射率, n_f 大于 n_c 、 n_s 及光栅的平均折射率. 对于覆盖层中垂直于栅线方向、入射角为 θ 、波长为 λ 的入射光,只要 n_f 、 Λ 和 d_f 满足特定条件^[11-12],入射光的衍射波与微结构支持导波位相匹配,覆盖层和基底区域内仅有 0 级光波传播,介质层内仅有 0 级和 +1 级光波传播.

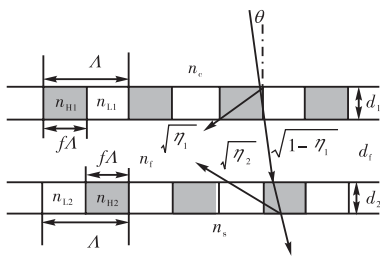


图 1 亚微米光栅微结构
Fig.1 Submicron grating microstructures

当微结构的两个光栅满足减反射条件时,以 θ 角入射的 TE 模光耦合到介质层内,并在其内形成两个同向传播的振幅分别为 $\sqrt{\eta_1}$ 及 $\sqrt{\eta_2}$ 的衍射光,见图 1, η_1 及 η_2 分别是微结构上、下两个光栅的等效光栅强度,物理意义为由光栅耦合到介质层内一级衍射光的能量.可见,该微结构内光波的传播方式和共振机理与 $d_2 = 0$ 时微结构(称之为亚微米单光栅结构)相同^[13-14],它们在入射介质内“反射光”的衍射效率 $I_R = E_R \cdot E_R^*$ (E_R 是复振幅)和共振光谱带宽 $\Delta\lambda_{FWHM}$ 的形式相同,为

$$\begin{cases} I_R = \frac{\eta^2}{\eta^2 + 4(1-\eta)\sin^2(\varphi/2)} \\ \Delta\lambda_{FWHM} = 4\arcsin\left[\frac{\eta}{2(1-\eta)^{1/2}}\right] \cdot \frac{1}{|d\varphi/d\lambda|} \end{cases} \quad (1)$$

式中: η 是微结构的等效光栅强度,为耦合到微结构内一级衍射光的能量; φ 是微结构内的导波传播一个周期后的位相变化; $|d\varphi/d\lambda|$ 是微结构内导波的位相光谱移相速率,随着 d_f 的增加而增大,但与 η 无关.

由图 1 可知,微结构内传播的两个衍射光在传播过程中相互耦合,导波的复振幅 $\sqrt{\eta}$ 为

$$\sqrt{\eta} = \sqrt{\eta_1} + \sqrt{1-\eta_1} \cdot \sqrt{\eta_2} \cdot \exp[j(\delta_f + \pi/2)] \quad (2)$$

式中: $\delta_f + \pi/2$ 为两个衍射光的位相差, $\pi/2$ 和 $\delta_f = 2\pi d_f(n_f^2 - n_c^2 \sin^2\theta)^{1/2}/\lambda$ 分别是光线经过第一个光栅层及介质层引起的位相变化.所以,当 $\varphi = 2m\pi$, m 为整数时,亚微米微结构发生共振,入射光全部反射回介质; $\Delta\lambda_{FWHM}$ 由 η 和 $|d\varphi/d\lambda|$ 决定,随着 η 的增大而增大,随着 $|d\varphi/d\lambda|$ 的增大而减小;优化 η (δ_f 或 d_f) 参数可以改善 $\Delta\lambda_{FWHM}$,使之反射光呈现出视觉易感知的彩色光变效果.

2 微结构的等效光栅强度

亚微米微结构的 η 是与 $\Delta\lambda_{FWHM}$ 、光谱线形及共振相关的关键设计参数,物理意义为耦合到微结构内一级衍射光的能量,由光栅结构参数、周围介质的折射率及入射光偏振态决定,对 η 随光栅参数变化规律的研究非常有价值.由于光栅周期接近入射光的波长,标量衍射公式虽可对微结构的共振及共振机理提供思路,但很难给出准确的 η 预测值,该值的精确计算必须借助于矢量衍射理论^[15-16].

图 2 是采用矢量衍射方法得到的 η 随光栅深度 $d_g = d_1$ 或 d_2 及 $n_H = n_{H1}$ 或 n_{H2} 的变化图,TE 和 TM 模光入射,默认参数: $n_{L1} = n_{L2} = 1.5$, $n_f = 2.0$, Λ/λ 取值满足光栅的共振要求.由图可知,TE 和 TM 模一级光的衍射特性明显不同.当 $\Lambda/\lambda = 0.5$ 时,所有图形中的 η 均趋于 0,此时的 Λ 正是光栅共振要求的最小值;通常,深沟槽光栅的 η 比浅沟槽光栅的大,但当栅槽较深,如 $d_g/\lambda > 0.5$ 时,却总存在几个特殊的 Λ/λ 点或区域不符合上述规律,如图 2(a) 和图 2(b) 中当 $\Lambda/\lambda \in [0.65, 0.75]$ 时;同样,通常,光栅调制度 $M = |(n_H - n_L)/(n_H + n_L)|$ 越大, η 越大,但当栅槽较深如 $d_g/\lambda > 0.5$ 时,却总存在几个特殊的 Λ/λ 区域不符合上述规律,如图 2(b) 中当 $d_g/\lambda = 0.5$ 、 $\Lambda/\lambda \in [0.55, 0.65]$ 时和图 2(c) 中当 $d_g/\lambda = 0.1$ 、 $\Lambda/\lambda \in [0.5, 1.0]$ 时等.总之,当栅槽较浅时, η 随栅槽深度及光栅调制度的增加而增大;但当栅槽变深时,却总有几个特殊 Λ/λ 区域不符合上述规律,所以 η 随光栅参数的变化没有固定的规

律, 其与栅槽深度有关, 该值的精确计算及相关规律

的研究必须用严格的矢量衍射方法.

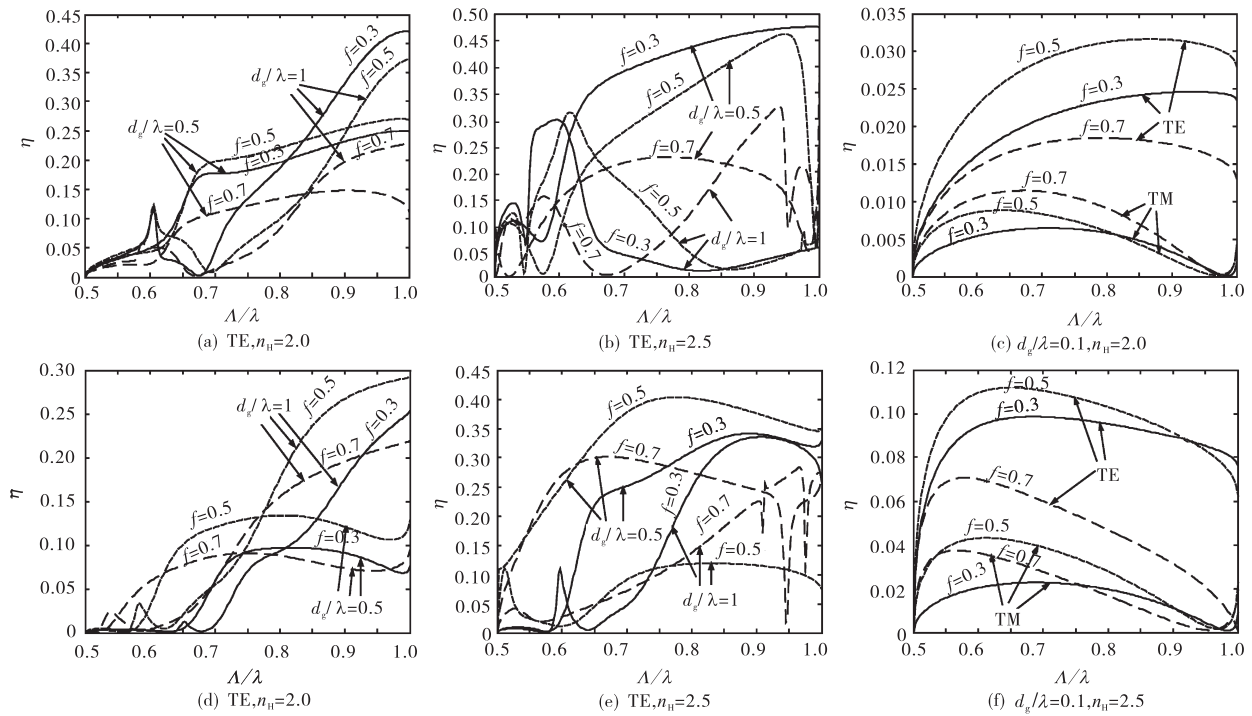


图 2 亚微米光栅的 η 随 A/λ 的变化情况

Fig.2 Effective grating strengths of submicron gratings η as a function of A/λ

3 微结构光学特性的检验

亚微米单光栅有性能优良的共振特性, 但当材料确定后 η 为常数, $\Delta\lambda_{FWHM}$ 也很小, 很难用其得到可见的彩色效果. 与之相比, 亚微米光栅微结构增加了一个光栅层, 用 d_f 可进一步改善其 η 、 $\Delta\lambda_{FWHM}$ 及光谱线形, 设计出满足特定要求的窄带或宽带滤波器, 用于光变色防伪领域. 下面, 基于矢量衍射理论^[9-10] 的数

值计算, 研究亚微米光栅微结构的光学特性, 包括共振带宽展宽和线形改善特性以及调制度 M 与共振的关系, 考虑到实际可用的光栅材料, 分析时使用的参数为: $n_c = n_s = 1.5$, $n_f = 2.3$ (ZnS), $f = 0.5$, $d_1 = d_2 = 0.1\mu\text{m}$, $n_{L1} = n_{L2} = 1.5$ (薄膜), $A/\lambda = 0.38$.

图 3 给出了亚微米光栅微结构 ($n_{H1} = n_{H2} = 2.3$) 和亚微米单光栅结构 ($d_2 = 0\mu\text{m}$) 在入射光垂直照射 ($\theta = 0^\circ$) 时的反射光效率等值线图.

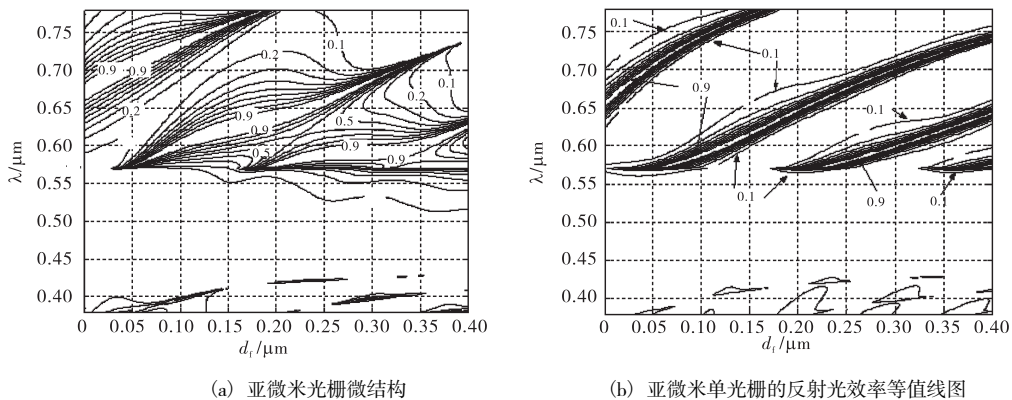


图 3 亚微米光栅微结构与亚微米单光栅的反射光效率等值线图

Fig.3 Reflection efficiency contours of submicron grating microstructures and submicron single gratings

由图 3 可知: 微结构和单光栅在二维空间内的共振 (效率不小于 80%) 情况 (共振位置和个数) 相近, 但

同一 d_f 对应的共振线形、共振带宽不同, 满足共振时 d_f 所允许的容差也不相同微结构的共振带宽明显大

于单光栅的带宽,这与前文的理论分析一致;与单光栅结构相比,图 1 所示微结构有更佳的宽带滤波特性,用于防伪时可增强反射光颜色的亮度,制作出有人眼易感知彩色效果的防伪微结构。

图 4 给出了调制度 M 不同时微结构的反射光效率等值线图,入射光斜入射时($5^\circ < \theta < 16^\circ$),图 4(a): $n_{H1} = n_{H2} = 2.3$,图 4(b): $n_{H1} = 2.0, n_{H2} = 2.3$,图 4(c): $n_{H1} = n_{H2} = 2.0$,即由左至右,微结构的调制度 M 及 η 逐渐减小。由图可知, M 或 η 的变化,并不影响设计微结构的有无共振特性,三个图中的共振位置及共振区域的个数相似;随着调制度 M 或 η 的增大,同一 d_f 处微结构的共振带宽越大,共振区域的面积也越大:“左图” > “中图” > “右图”;在每个等值线图中,随着 d_f 的增大,微结构的共振区域均出现了“准周期

性”变化,并且每个共振区域的带宽在 0 到特定数值之间变化,这表明经参数优化微结构有优良的窄带及宽带滤波特性。当 $d_2 = 0$ 时,图 4 涉及三类微结构变为与之对应的亚微米单光栅结构,其反射光效率等值线图与图 4 的变化规律相似,但共振带宽明显变窄,原先的微结构和与之对应的单光栅之间的共振及带宽变化规律与图 3 中的分析相同,限于篇幅,此处从略。

此外,由图 3 及图 4 不难发现,随着入射角度 θ 的增大,微结构反射光谱的形状虽相似,但光谱峰却发生了平移,其再现的颜色外貌由原先的红色向绿色变化。由于该颜色变化来源于光栅的衍射,与彩色光变薄膜的呈色机理明显不同,可将之用于防伪领域,制作出效果不同的新型光变色防伪产品。

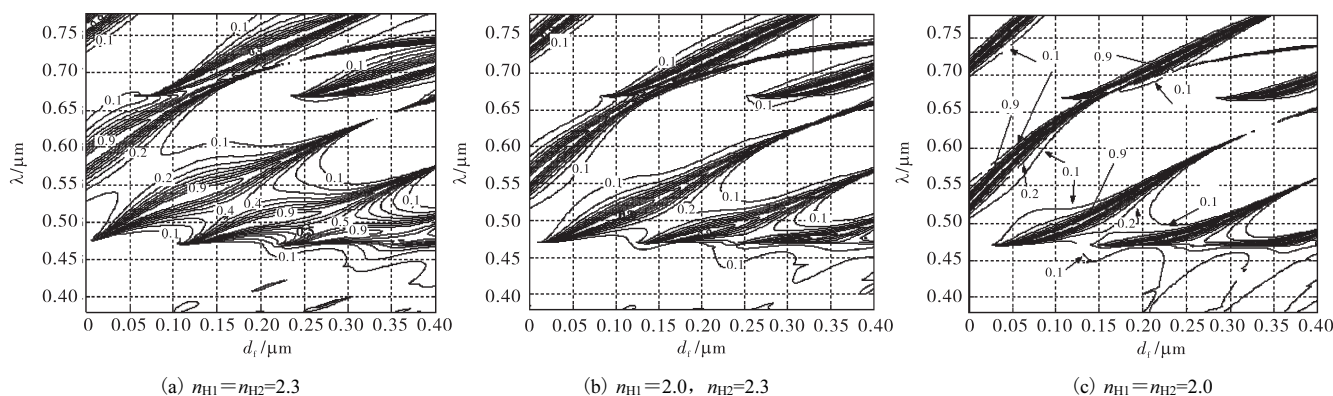


图 4 亚微米光栅微结构的反射光效率等值线图

Fig.4 Reflection light efficiency contours of submicron grating microstructures

4 结 论

亚微米光栅微结构是一种新型的光学元件,设计后它有独特的共振特性,在防伪领域有很好的应用价值。文中提出了一种可用于窄带及宽带滤波的光栅微结构,给出了它的反射光效率及光谱带宽表达式,并用矢量衍射方法对比研究了其与常见亚波长光栅的共振特性,检验了光谱带宽展宽及共振性能。

研究表明,研究的微结构有性能优良的窄带及宽带滤波特性,而后者可使之反射光呈现出肉眼可见的颜色,用于设计新型的光变色包装防伪产品;微结构的光谱带宽由其等效光栅强度和导波的位相光谱移相速率决定,前者的物理意义为耦合到微结构内一级衍射光的能量;研究的微结构与常见的亚微米光栅有相似的共振特性,但光谱带宽明显增大;微结构的光栅调制度不影响其有无共振特性,但当介质层深度一致时光谱带宽却随着调制度的增加而增大。

参考文献:

- [1] Gale M T,Knop K,Morf R. Zero-order diffractive microstructures for security applications[C]//Proceedings of SPIE. Bellingham:SPIE,1990,1210:83-89.
- [2] Tompkin W R,Schilling A,Weiteneder C,et al. Zero-order gratings for optically variable devices[C]// Proceedings of SPIE. Bellingham:SPIE,2002,4677:227-237.
- [3] Tompkin W R,Schilling A,Staub R. Color-shifting features for optically variable devices[C]//Proceedings of SPIE. Bellingham:SPIE,2004,5310:244-255.
- [4] Chen Y L,Zhao D Z,Zhang J F,et al. Experimental study on sub-wavelength security grating structures in the visible region[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology,2008,28(2):139-142.
- [5] Souparis H. Security protection of documents or products by affixing an optically active component for verification

(下转第 64 页)