

埋入式光栅双通道特性及其应用研究

叶 燕 陈林森

(苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要 利用严格耦合波理论分析了埋入式光栅在 45° 入射时, 垂直和平行于光栅栅线的两个不同观察平面的零级共振反射衍射特性。在垂直于光栅栅线的平面内, TE、TM 偏振下零级反射共振波长分别为 432 nm 和 420 nm, 在平行于光栅栅线的平面内, TE、TM 偏振下零级反射共振主峰波长分别为 623 nm 和 620 nm, 在两个平面内, 零级共振衍射光的共振波长差别较大, 观察到的衍射光颜色差别明显, 定义为双通道特性并用实验进行证明, 制作了相应的光变色器件。

关键词 衍射与光栅; 双通道特性; 严格耦合波理论; 埋入式光栅

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082812.2255

Dual-Channel Characteristic and Application of the Embedded Grating

Ye Yan Chen Linsen

(Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou Jiangsu 215006, China)

Abstract The 0th resonant diffraction characteristic of the embedded grating with incident angle of 45° is analyzed by the rigorous coupled-wave theory. The resonant wavelengths of 0th reflection light are 432 nm and 420 nm for the TE and TM polarization respectively in the plane parallel to the grating vector. The resonant wavelengths of 0th reflection light are 623 nm and 620 nm for the TE and TM polarization respectively in the plane perpendicular to the grating vector. The resonant wavelength of 0th reflection light is far different between these two planes and shows different color. That phenomenon is denoted as dual-channel characteristic and is proved in experiment. The metachromatic device with dual-channel characteristic is made.

Key words diffraction and gratings; dual channel characteristic; rigorous coupled-wave theory; embedded grating

1 引 言

光栅元件在偏振分束器^[1]、1/4 波片^[2, 3]、窄带滤波^[4, 5]、光栅编码^[6, 7]、光波分复用器^[8]等方面得到了广泛的运用, 但这些应用只考虑了光栅在垂直于光栅栅线平面内的衍射特性。

定义在亚微米光栅表面镀一层高折射率介质膜的光栅为埋入式光栅, 此类光栅的零级反射窄带、高反的共振特点及其原理^[9]得到了深入的分析。

这里利用严格耦合波理论分析了平面波以相同倾角入射时, 埋入式光栅在垂直于光栅栅线的平面和平行于光栅栅线的平面内的零级反射共振, 在这两个不同平面内零级反射衍射的共振峰出现的波长

位置不同, 呈现出不同的颜色效果, 即“双通道”特性。并根据其原理制作了光变色器件, 给出了相应的实验结果。

2 理论分析

光栅面形为矩形时, 偏振方向为 δ 的平面波从任意平面内入射, 如图 1 所示, 分别定义入射面与 x 轴和 z 轴的夹角为 φ 和 θ 。空气折射率为 n_1 , 基底折射率为 n_2 , 光栅周期为 T , 槽深为 D , 光栅区的折射率分别 n_3, n_4 , 覆盖层厚度为 h , 折射率为 n_5 。

则 1 区(入射区)的电场矢量可以表示:

收稿日期: 2008-03-25; **收到修改稿日期**: 2008-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(60777039)课题资助。

作者简介: 叶 燕(1979—), 女, 博士, 主要从事微纳米结构与器件研究。E-mail: yeyan_sz@yahoo.com.cn

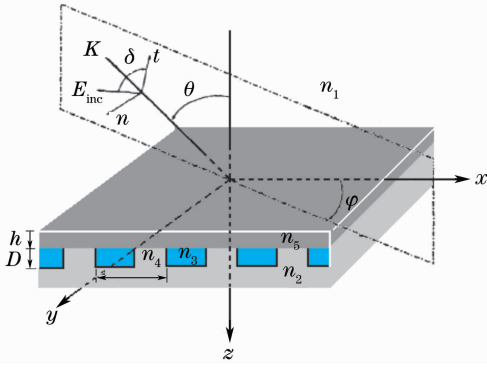


图 1 埋入式光栅入射平面示意图

Fig. 1 Sketch of the incident plane of the embedded grating

$$E_1 = u \exp\{-j[k_x x + k_y y + k_{1z}(z+h)]\} + \sum_i R_{1i} \exp\{-j[k_{xi} x + k_y y - k_{1,zi}(z+h)]\}, \quad (1)$$

2 区(膜层区)的电场矢量表示为

$$E_2 = \sum_i R_{2i} \exp[-j(k_{xi} x + k_y y - k_{2,zi} z)] + \sum_i T_{2i} \exp[-j(k_{xi} x + k_y y + k_{2,zi} z)], \quad (2)$$

3 区(透射区)的电场矢量表示为

$$E_3 = \sum_i T_{3i} \exp\{-j[k_{xi} x + k_y y + k_{3,zi}(z-D)]\}. \quad (3)$$

光栅区电场、磁场的分布可分别表示为空间谐波的傅里叶级数展开:

$$E_g = E_{gx} + E_{gy} = \sum_i [S_{xi}(z)x + S_{yi}(z)y] \exp[-j(k_{xi} x + k_y y)], \quad (4)$$

$$H_g = H_{gx} + H_{gy} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \sum_i [U_{xi}(z)x + U_{yi}(z)y] \exp[-j(k_{xi} x + k_y y)]. \quad (5)$$

其中 $k_0 = k = 2\pi/\lambda$, k 和 λ 分别为真空中的波数和波长。 R_{1i} 、 R_{2i} 和 T_{1i} 、 T_{3i} 分别为归一化的反射振幅和透射振幅, ϵ_0 和 μ_0 分别为真空中的介电常数和磁导率。根据位相匹配和 Floquet 定理, (4)式和(5)式中:

$$k_{xi} = k_0 \sin \theta \cos \varphi - i2\pi/T, \quad (6)$$

$$k_y = k_l \sin \theta \sin \varphi, \quad (7)$$

$$k_{l,zi} = (k_l^2 - k_y^2 - k_{xi}^2)^{1/2}, \quad l = 1, 2, 3. \quad (8)$$

根据 Maxwell 方程, 得到一阶耦合波方程:

$$\begin{cases} d_z S_{xi}(z) = -j \frac{k_{xi}}{k} \sum_p \epsilon_{i-p}^{-1} [k_y U_{xp}(z) - k_{xp} U_{yp}(z)] - j k U_{yi}(z), \\ d_z S_{yi}(z) = j k U_{xi}(z) - j \frac{k_y}{k} \sum_p \epsilon_{i-p}^{-1} [k_y U_{xp}(z) - k_{xp} U_{yp}(z)], \\ d_z U_{xi}(z) = j \frac{k_x}{k} [k_y S_{xi}(z) - k_{xi} S_{yi}(z)] + j k \sum_p \epsilon_{i-p} S_{yp}(z), \\ d_z U_{yi}(z) = -j k \sum_p \epsilon_{i-p} S_{xp}(z) + j \frac{k_y}{k} [k_y S_{xi}(z) - k_{xi} S_{yi}(z)]. \end{cases} \quad (9)$$

其中 ϵ^{-1} 为光栅区介电常数倒数的傅里叶展开数。经过整理, 上述一阶耦合波方程可以写成一种简单的矩阵形式, 即

$$[dS_{xi}, dS_{yi}, dU_{xi}, dU_{yi}]' = \mathbf{A}_n [S_{xi}, S_{yi}, U_{xi}, U_{yi}]', \quad (10)$$

式中 \mathbf{A}_n 是一个 $2N \times 2N$ 的矩阵, 此方程的解可以表示为

$$S_{xi}(z) = \sum_m C_m \omega_{1,i,m} \exp(\lambda_m z), \quad (11)$$

$$S_{yi}(z) = \sum_m C_m \omega_{2,i,m} \exp(\lambda_m z), \quad (12)$$

$$U_{xi}(z) = \sum_m C_m \omega_{3,i,m} \exp(\lambda_m z), \quad (13)$$

$$U_{yi}(z) = \sum_m C_m \omega_{4,i,m} \exp(\lambda_m z), \quad (14)$$

$\lambda_{m,n}$ 为系数矩阵 \mathbf{A}_n 的第 m 个特征值, $\omega_{l,i,m,n}$ 代表与第 n 层的第 m 个特征值对应的特征向量中的第 i 个衍射级次对应的元素。边界条件要求电场矢量在切向、磁场矢量在法向上连续, 未知量 $C_{m,n}$ 、 R_{1i} 、 T_{3i} 由此求得。

在 $z = -h$ 的边界条件为

$$u \omega_{i0} \exp(-jk_{1,zi} h) + R_{1i} \exp(jk_{1,zi} h) = R_{2i} + T_{2i}, \quad (15)$$

$$j[n_1 \cos \theta u \delta_{i0} \exp(-jk_{1,zi}h) - Y_1 R_{1i} \exp(jk_{1,zi}h)] = j(-Y_2 R_{2i} + Y_2 T_{2i}). \quad (16)$$

在 $z = 0$ 的边界条件为:

$$\sum_m C_m \tau_{1,i,m} = R_{2xi} + T_{2xi}, \quad (17)$$

$$\sum_m C_m \tau_{2,i,m} - R_{2yi} = R_{1yi}, \quad (18)$$

$$\sum_m k C_m \tau_{3,i,m} - k_{z,1,i} R_{2yi} - k_y R_{2xi} = k_y T_{2xi} - k_{z1} T_{2y}, \quad (19)$$

$$\sum_m k C_m \tau_{4,i,m} + k_{z,2,i} R_{2xi} + k_{xi} R_{2xi} = k_{z2} T_{2x} - k_{x0} T_{2z}. \quad (20)$$

在 $z = D$ 的边界条件为

$$\sum_m C_m \tau_{1,i,m} \exp(\lambda_m D) \exp(-jk_{z,3,i} D) - T_{3xi} = 0, \quad (21)$$

$$\sum_m C_m \tau_{2,i,m} \exp(\lambda_m D) \exp(-jk_{z,3,i} D) - T_{3yi} = 0, \quad (22)$$

$$\sum_m k C_m \tau_{3,i,m} \exp(\lambda_m D) \exp(-jk_{z,3,i} D) = k_y T_{3xi} - k_{z,3,i} T_{3yi}, \quad (23)$$

$$\sum_m k C_m \tau_{4,i,m} \exp(\lambda_m D) \exp(-jk_{z,3,i} D) = k_{z,3,i} T_{3xi} - k_{xi} T_{3zi}. \quad (24)$$

入射区和透射区为均匀介质, 始终有 $k_{1i} \cdot R_{1i} = 0$ 和 $k_{3i} \cdot T_{3i} = 0$, 因此,

$$k_{xi} R_{1xi} + k_y R_{1yi} - k_{z,1,i} R_{1zi} = 0, \quad (25)$$

$$k_{xi} T_{3xi} + k_y T_{3yi} + k_{z,3,i} T_{3zi} = 0. \quad (26)$$

将(25)、(26)式与边界条件联立, 得到线性方程, 可解得 R_{1i} 和 T_{3i} , 从而得到其衍射效率:

$$DE_{1i} = -\operatorname{Re}[k_{1,zi}/(k_1 \cos \theta)] |R_{1i}|^2, \quad (27)$$

$$DE_{3i} = \operatorname{Re}[k_{3,zi}/(k_1 \cos \theta)] |T_{3i}|^2. \quad (28)$$

DE_{1i} 和 DE_{3i} 分别为第 i 个反射、透射(衍射)级次的衍射效率。

3 埋入式光栅的双通道特性

光栅周期为 $0.4 \mu\text{m}$, 占空比为 0.5 。 $n_1 = 1$, $n_2 = 1.52$, $n_3 = 1.65$, $n_4 = n_5 = 2$ 。折射率为 n_5 的膜层厚度为 $0.1 \mu\text{m}$, 光栅槽深为 $0.1 \mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$ 。

分析平面波分别在 $\varphi = 0$ (垂直于光栅栅线的平面, 即 xz 平面) 和 $\varphi = 90^\circ$ (平行于光栅栅线的平面, 即 yz 平面) 平面内入射时的零级反射共振特性如图 2 所示。

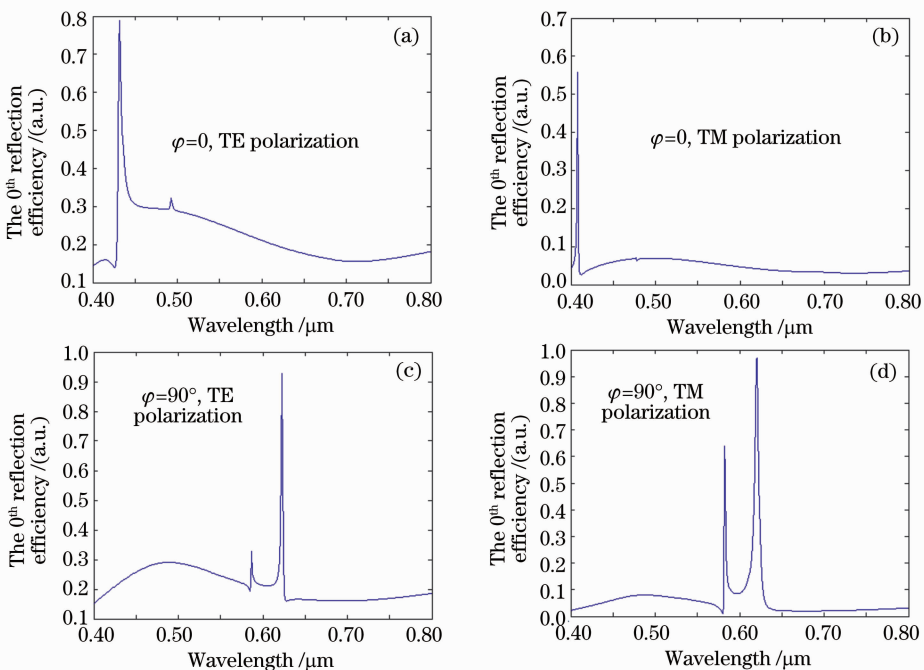


图 2 $\varphi = 0$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 的平面内的零级反射衍射

Fig. 2 The 0^{th} reflection-diffraction curve in the plane of $\varphi = 0$ and $\varphi = 90^\circ$

由图 2 可知, 当 θ (入射光与 z 轴夹角) 相等时, 两个互相垂直的平面内在相应的零级光衍射角上光栅的衍射光谱不同, 在 $\varphi = 0$ 的平面内的相应零级反射衍射光产生共振的波长比 $\varphi = 90^\circ$ 的平面内波长短, 因此在沿光栅栅线方向的平面内表现出长波长特性(红光), 在垂直于光栅栅线方向的平面内表现出短波长特性(蓝光), 且两种平面内表现出的共振波长之间的间隔较大, 表现出明显的“双通道”现象。这种独特的光学现象可用于制作视读防伪的光变色器件。

4 实 验

为验证理论计算的准确性, 制作了平面镀膜光栅, 并测量了其在 TE、TM 偏振下的零级透射衍射效率。首先, 以全息方法制作得周期为 $0.4 \mu\text{m}$, 光栅槽深为 $0.1 \mu\text{m}$ 的光栅。然后在本底真空 $8.8 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, 工作气压 2.25 Pa , 气流量 $20 \text{ cm}^3/\text{s}$ 的条件下, 以溅射镀膜的方法镀 ZnS 三分钟。得到膜厚为 $0.1 \mu\text{m}$ 的镀膜光栅, 其电镜扫描图如图 3 所示。

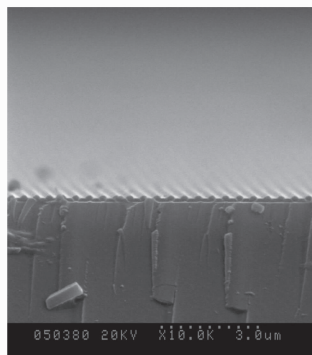


图 3 镀膜光栅的电镜扫描图

Fig. 3 SEM Photo of sub-micron grating with coating

测量样品的反射光谱, 则需在测量光路中安排标准片转折光路, 从而获得总入射光通量。该标准片需对可见光波段的反射率为一固定值, 是获得准确的测量曲线的前提之一。由于未购置到符合要求的标准片的, 同时, 衍射光场中只存在零级衍射光(零级透射与零级反射衍射效率之和为 1), 因此测量了样品的透射衍射效率。图 4 给出了相应的零级透射衍射效率曲线。

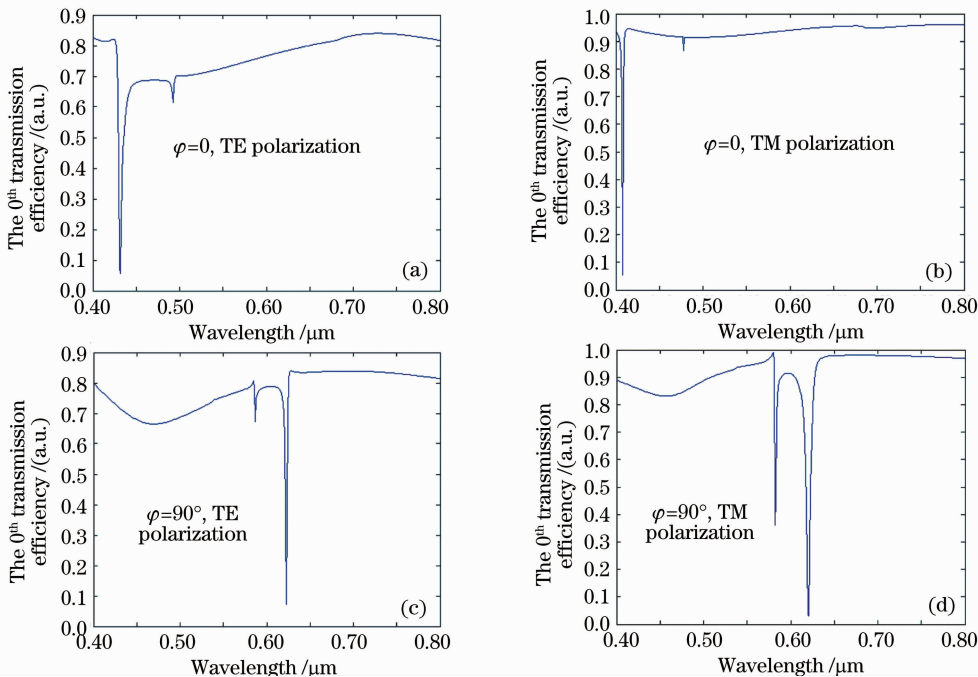


图 4 $\varphi = 0$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 的平面内的零级透射衍射

Fig. 4 The 0^{th} transmission-diffraction curve in the plane of $\varphi = 0$ and $\varphi = 90^\circ$

在暗室环境下, 利用单色仪, 采用连续扫描的方法测量了 $\theta = 45^\circ$ 时镀膜光栅在 $\varphi = 0$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 的两个平面内的零级透射衍射效率曲线。

图 5 为 $\varphi = 0$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 两个观察面内的 45° 检测角下的零级透射衍射效率。由图可知, 在 $\varphi = 0$ 观察面内, TE 偏振和 TM 偏振光的共振位置在蓝

光区域, 因此在 45° 反射角下观察时, 呈现蓝光; $\varphi = 90^\circ$ 平面内, TE 偏振和 TM 偏振光的共振位置在橙红光区域, 因此在 45° 反射角下观察时, 呈现红光。由于测量时, 埋入式光栅的光栅栅线方向定位的精度影响, 在 $\varphi = 90^\circ$ 观察面内得到了与平行光栅栅线方向有微小夹角的锥面衍射效率, 因此

400~495 nm 的范围内表现出垂直栅线方向入射的共振衍射特性；同时，镀膜后光栅表面不像模拟模型(如图 1 所示)表面一样平滑，因此埋入式光栅的双通道特性测量结果与理论计算结果相比，存在偏

差。考虑误差的影响，测量结果反映出了亚波长介质膜光栅实际的零级光透射特性，与理论计算结果具有相同的变化趋势，给定观察面内测量得到的颜色与理论计算结果相同。

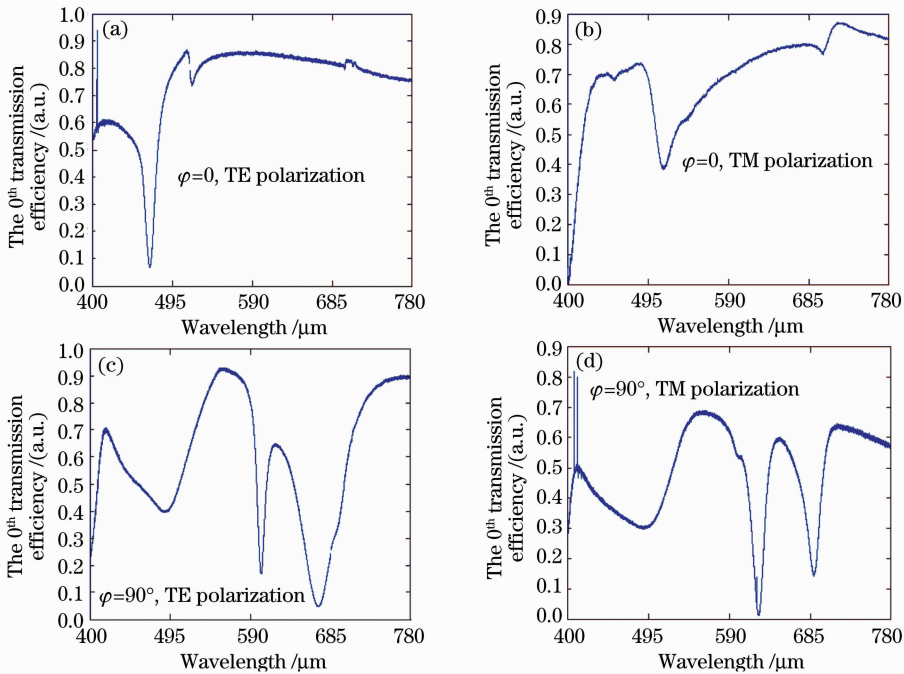


图 5 $\varphi = 0$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 平面内的零级透射衍射效率测量曲线

Fig. 5 Measurement curve of the 0th transmission-diffraction efficiency in the plane of $\varphi = 0$ and $\varphi = 90^\circ$

5 应 用

根据埋入式光栅的双通道衍射特性，制作了光变色器件。采用纳米压印设备，在聚合物(聚碳酸酯 PC-1.58, PMMA-1.48, 聚酯 PET 1.65, 聚丙烯酸酯-1.52 等材料，这里采用 PET 聚合物)上模压形成周期为 $0.35 \mu\text{m}$ 的光栅结构，然后，利用高真空镀膜设备，在槽型上蒸镀一薄层高折射率材料(折射率约 2.0)，再通过涂布的方式，将槽型用聚丙烯酸酯材料(折射率约 1.52)填平，形成埋入式光栅结构，最后热塑封得到光变色样品，如图 6 所示。

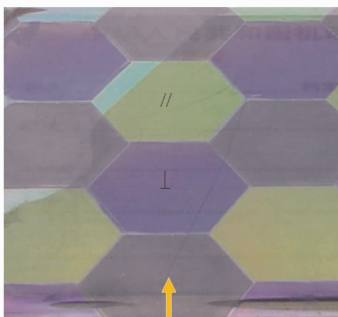


图 6 光变色器件

Fig. 6 Metachromatic device

由图 6 可知，光变色器件中的光栅结构完全相同，在箭头所示观察平面内，以接近 45° 倾角观察时，光栅分别呈现紫光和黄绿光，其中紫光区域为埋入式光栅垂直于光栅栅线平面内的衍射特性，黄绿光区域为埋入式光栅平行于光栅栅线内的衍射特性。由此可见，光栅在两个观察平面内的表现出的衍射光并不相同，且在垂直于光栅栅线的观察面内呈现的颜色与平行于光栅栅线的观察面内呈现的颜色相比，波长较短，呈现明显的双通道特性。箭头所在区域不存在光栅结构，因此两个观察面内没有颜色区别。

在垂直于光栅栅线的平面内，研究表明光栅周期、折射率等参数的减小会导致零级衍射光的导膜共振位置向短波方向偏移^[10]，在平行于光栅栅线的平面内，零级衍射光的导膜共振位置也有此特性，因此可根据实际需要，设计不同颜色效果的光变色器件。

6 结 论

利用严格耦合波理论分别分析了埋入式光栅在

垂直、平行于光栅栅线的两个平面内的零级共振衍射, 得到其在两个互相垂直平面内的双通道衍射特性, 并在实验中得到验证, 从而利用纳米压印和真空镀膜设备加工了光变色器件, 拓宽了亚微米光栅的应用范围。

参 考 文 献

- 1 Yuan Hui, Zhou Jin, Wang Xiaowei *et al.*. Rigorous coupled-wave analysis of a new one-dimensional deep sub-wavelength grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **A29**(9): 795~800
袁 惠, 周 进, 王晓伟 等. 一维深亚波长光栅的耦合波分析及偏振特性的研究[J]. *中国激光*, **A29**(9): 795~800
- 2 Yi Deer, Yan Yingbai, Tan Qiaofeng *et al.*. Study on broadband achromatic quarter-wave plate by subwavelength gratings[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(5): 405~408
伊 德 尔, 严 瑛 白, 谭 峭 峰 等. 亚波长光栅用于实现宽光谱消色散 1/4 波片的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5): 405~408
- 3 Lu Xiangdong, Fu Kexiang, Wang Zhiheng. Design of quarter wave-plate using sinusoidal dielectric sub wavelength gratings [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(4): 368~370
卢 向 东, 傅 克 祥, 王 植 恒 等. 用亚波长正弦介质光栅设计 1/4 波片[J]. *激光技术*, 2003, **27**(4): 368~370
- 4 Tang Xiongwei, Du Chunlei. Analysis of nonpolarizing narrow-band filters based on resonant anomaly[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 668~672
唐 雄 贵, 杜 春 雷. 基于共振异常的消偏振型窄带滤波器分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 668~672
- 5 Fu Kexiang, Wang Zhiheng, Zhang Qizhi *et al.*. The resonance peak theory of reflection guided-mode resonance filters[J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, **B8**(4): 313~321
郝 继 贵, 薛 婷, 吴 斌 等. 液晶编码光栅编码设计与编码点匹配技术研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(2): 164~166
- 6 Zhu Jigui, Xue Ting, Wu Bin *et al.*. Study on the coding design and point matching of LCD coded raster[J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2005, **16**(2): 164~166
张 成 义, 陶 纯 堪. 一维亚波长周期结构物成像的光子学研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1651~1656
- 7 Zhang Chengyi, Tao Chunksan. Photonic study on imaging of one-dimensional periodic object with subwavelength structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1651~1656
张 成 义, 陶 纯 堪. 一维亚波长周期结构物成像的光子学研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1651~1656
- 8 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Jia Kemiao *et al.*. 2-D AWG-based optical multiplexers/ demultiplexers [J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2004, **15**(9): 1031~1034
杨 建 义, 江 晓 清, 贾 科 淼 等. 基于二维分布阵列波导光栅的光波分复用器/解复用器[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(9): 1031~1034
- 9 G. Bao, K. Huang. Optimal design of guided-mode grating resonance filters. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **1**(16): 141~143
- 10 Ye Yan. Research on Diffraction Characteristics and Applications of Sub-Micron Gratings[D]. Suzhou: Soochow University, 2007
叶 燕. 亚微米光栅的衍射特性及应用研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2007