

基于二维结构薄膜的偏振选择相位光栅的研究*

厉以宇[†] 王媛媛 陈 浩 朱德喜 胡 川 瞿 佳

(温州医学院眼视光学院, 卫生部视觉科学研究重点实验室, 温州 325027)

(2009 年 9 月 29 日收到; 2009 年 11 月 16 日收到修改稿)

利用二维结构薄膜构建了具有偏振选择特性的新型相位光栅, 借助严格耦合波分析(RCWA)方法计算了光栅各级衍射强度随入射光波长及入射角的变化, 发现在垂直入射情况下, 波长 600—640 nm 范围内, 相位光栅对横向往电学(TE)模主要产生 0 级衍射, 而对横向往磁学(TM)模产生 ± 1 级衍射, 在波长 633 nm 处, 0 级衍射光的偏振消光比为 109.8, ± 1 级衍射光的偏振消光比为 334.6. 利用时域有限差分方法对这种相位光栅的偏振分束现象进行了模拟, 偏振分离角在玻璃基板内可以达到 10° 左右, 最后模拟了入射角为 23° 时光栅对不同偏振态入射光的衍射效果, 并与 RCWA 计算结果和光栅方程计算结果进行了对比.

关键词: 偏振, 结构薄膜, 相位光栅

PACC: 7865, 4280F

1. 引 言

相位光栅通过周期性改变基板的光学厚度(几何厚度或折射率), 对入射光产生相位调制作用^[1], 在二元光学和光纤布拉格光栅制备^[2]中具有广泛应用. 近年来相位光栅的偏振选择特性逐渐成为研究热点, Clausnitzer 等^[3,4]和 Zheng 等^[5,6]针对相位光栅偏振分束作用进行了大量的理论研究, 发现当光线以 Littrow 角入射亚波长介质光栅时, 根据经典的模式理论^[7]分析可知光栅内部只存在两种传播模, 由于等效折射率不同, 两种模式在经过光栅后各自产生的相位差也不同, 结果形成截然不同的衍射级次能量分布, 从而出现偏振分束效果^[8]. 但在垂直入射情况下, 相位光栅很难具备偏振分束效应, 除非光栅由双折射材料构成^[9], 并对横向往电学(TE)模和横向往磁学(TM)模具有不同的闪耀角. Hanaizumi 等^[10]率先在光栅基板上通过沉积多层周期性薄膜制作出一种新型的基于二维结构薄膜的相位光栅, 在垂直入射时 TE 模和 TM 模分别产生 2π 和 π 的相位差, TM 模能够通过 ± 1 级衍射从 TE 模的 0 级衍射中分离出来. 在光栅基板上沉积多层薄膜, 薄膜复制并保持光栅表面形貌形成二维周期性结构, 这方面的理论研究^[11-13]与工艺技术^[14-16]

目前已渐趋成熟. 基于二维结构薄膜的偏振选择相位光栅(PSPG)制备工艺简单, 材料成本低, 在短波辐射下稳定性好, 损伤阈值高, 但是因其结构复杂, 模式理论等常规分析方法在这里不再适用, 在其理论设计与性能分析方面一直缺乏有效手段.

本文将对基于二维结构薄膜的 PSPG 的工作原理作深入的理论分析, 首次用严格耦合波分析(RCWA)方法^[17]对 PSPG 的衍射现象作精确计算, 然后采用时域有限差分(FDTD)方法模拟 PSPG 对 TE 模和 TM 模的不同衍射效果.

2. 相位光栅结构分析

当光线垂直入射普通的一维相位光栅(结构如图 1 所示)时, 远场夫琅禾费衍射强度随衍射角 θ 的分布可以表示成

$$I = \frac{1}{2} I_0 \left(\frac{\sin\beta}{\beta} \right)^2 \left[\frac{\sin(N\delta/2)}{\sin(\delta/2)} \right]^2 \left[1 + \cos\left(\psi + \frac{\delta}{2}\right) \right], \quad (1)$$

其中, $\beta = \frac{\pi d \sin\theta}{2\lambda}$, $\delta = \frac{2\pi d \sin\theta}{\lambda}$, $\psi = \frac{2\pi}{\lambda} t(n-1)$, N 为光栅周期数, ψ 是由光栅凹槽引入的相位差. 当 ψ 为 2π 整数倍时, 零级衍射最强; ψ 为 π 的奇数倍时, 零级衍射被抑制, ± 1 级衍射占优. 垂直入射时, 入

* 浙江省科技计划(批准号:2009C31136, 2007C11083)和温州市科技计划(批准号:G20070082)资助的课题.

[†] E-mail: liyiyuu@263.net

射光不管是 TE 模 (磁场方向垂直于图 1 中的光栅剖面) 还是 TM 模, 光栅所产生的相位差 ψ 是相同的, 所以传统相位光栅在垂直入射情况下不具备偏振分束效应.

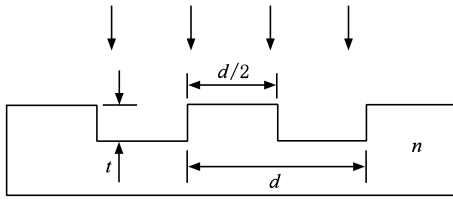


图 1 相位光栅剖面结构

Hanaizumi 等^[10]提出的 PSPG (结构见图 2) 是用周期较小的一维齿状光栅替代图 1 光栅中的矩形突起部分形成新的光栅基板, 再沉积多层周期性薄膜, 薄膜复制基板表面形貌, 形成波状结构薄膜区域与一维薄膜区域周期性交替分布结构. 当光线垂直入射时, 一维薄膜区域对 TE 模和 TM 模的相位延迟是相同的, 但波状结构薄膜区域对 TE 模和 TM 模具有不同的相位延迟作用. 最终, TE 模获得的相位差 ψ_{TE} 和 TM 模的相位差 ψ_{TM} 不相等, 因而产生不同的远场衍射分布形式, 即出现偏振分束现象.

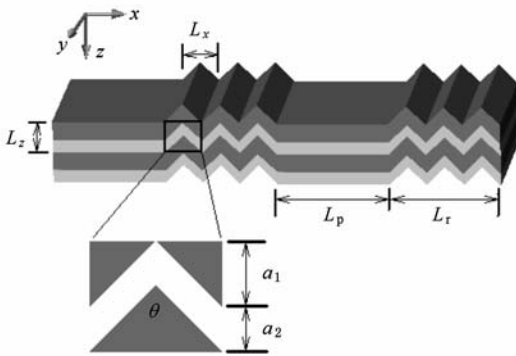


图 2 PSPG 的结构

对图 2 中 PSPG 的结构参数作如下定义: 光栅周期为 $\Lambda = L_p + L_r$, 且 $L_p = L_r$, 即占空比为 1:1, 其中 $L_r = N_r L_x$, L_x 是齿状光栅的周期, N_r 是齿状光栅的周期数, 光栅基板为玻璃. 薄膜的周期为 $L_z = a_1 + a_2$, 其中 a_1 和 a_2 分别代表介质材料 TiO_2 ($n = 2.341$) 和 SiO_2 ($n = 1.45$) 的物理厚度, 波状膜层倾角 θ 为 45° . 取 $a_1 = 120$ nm, $a_2 = 80$ nm, $L_x = 240$ nm, 以 xz 为入射面, 光波沿 z 轴垂直入射.

图 3 为一维周期性薄膜和波状结构薄膜的能带图. 图 3 中实线与虚线分别代表波状结构薄膜的 TM

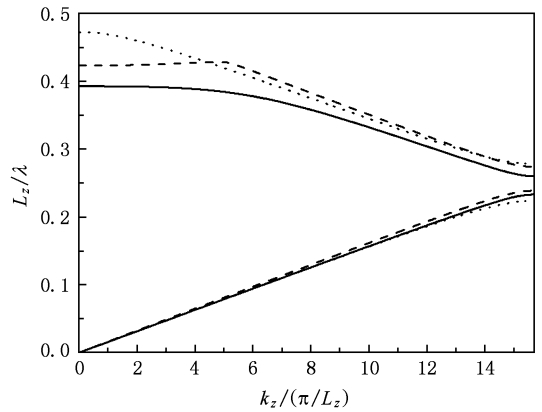


图 3 一维周期性薄膜和波状结构薄膜的能带图

模和 TE 模能带, 点线代表一维周期性薄膜的能带. 在频率 $L_z/\lambda = 0.28 - 0.33$ 范围内, 即波长 605—715 nm 范围内, 一维周期性薄膜的能带与波状结构薄膜的 TE 模能带非常接近, 与 TM 模则存在一定差异, 例如在频率 $L_z/\lambda = 0.3$, TM 模对应的波矢小于 TE 模和一维周期性薄膜的波矢, 从等效折射率的角度理解, 波状结构薄膜中 TM 模的等效折射率小于 TE 模, 同时也小于一维周期性薄膜的等效折射率, TE 模的等效折射率与一维周期性薄膜的等效折射率几乎相同. 所以图 2 中的光栅结构会引入入射光中的 TE 模和 TM 模不同的相位差, 通过调整膜层周期数 N_z , 使相位差 $\psi_{TE} = 2m\pi$ 和 $\psi_{TM} = (2n-1)\pi$ 同时得到满足, 就能够利用 ± 1 级衍射将 TM 模从 TE 模的 0 级衍射中分离出来.

3. 严格耦合波分析

PCWA 方法可以精确计算任意外形的周期性结构的衍射情况. 图 4 利用该方法计算了 PSPG 的 0 级与 ± 1 级衍射光的透过率谱线, PSPG 结构参数采用 $N_z = 13$, $N_r = 5$, 其余参数同上文. TE 模是 0 级衍射占优, 尤其是在波长 600—640 nm 范围内, 透射光能量几乎全部集中在 0 级衍射中. 同样是在该波长区域, TM 的 0 级衍射几乎为零, ± 1 级衍射则最强, 因此 TE 模和 TM 模能够通过不同的衍射级次实现偏振分离. 以波长 633 nm 为例, 0 级衍射光的偏振消光比为 $I_{0,TE}/I_{0,TM} = 109.8$, ± 1 级衍射光的偏振消光比为 $I_{\pm 1,TM}/I_{\pm 1,TE} = 334.6$. 图 4 中的点划线是利用一维薄膜传输矩阵法计算的相同膜系的一维薄膜的透过率谱线, 它只与 PSPG 的 TE 模 0 级透射谱相接近, 从另一个侧面反映出 PSPG 对 TE 模的

相位调制作用较弱,而对 TM 模的调制作用较强.图 5 针对波长 633 nm 计算了在不同入射角情况下, PSPG 各级衍射强度的变化过程,TE 模始终是 0 级

衍射占优,随着入射角度的增大,TE 模和 TM 模的透射光能量整体上都呈逐步衰减趋势,表明反射在逐渐增强.

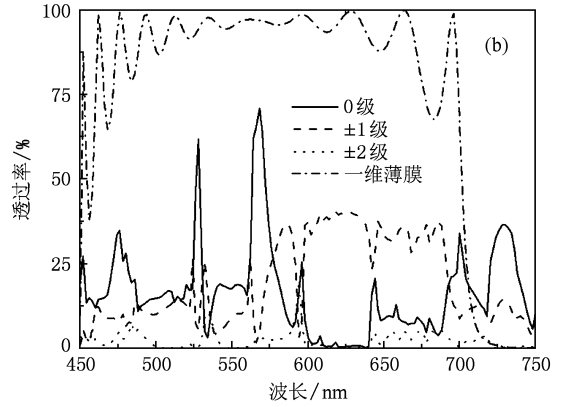
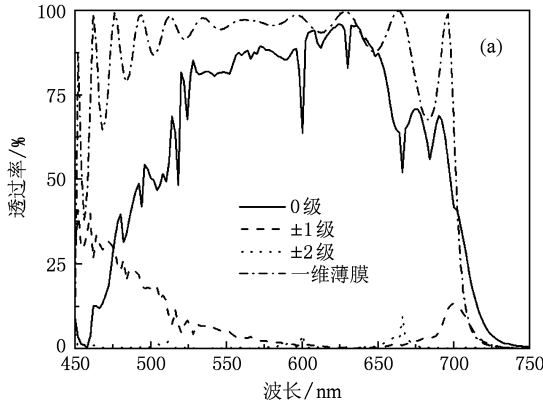


图 4 PSPG 的 0 级、±1 级和 ±2 级衍射的透射率谱线与一维周期性薄膜透射率谱线的对比 (a) TE 模, (b) TM 模

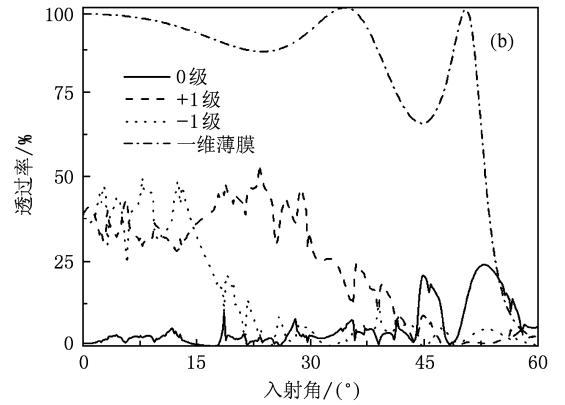
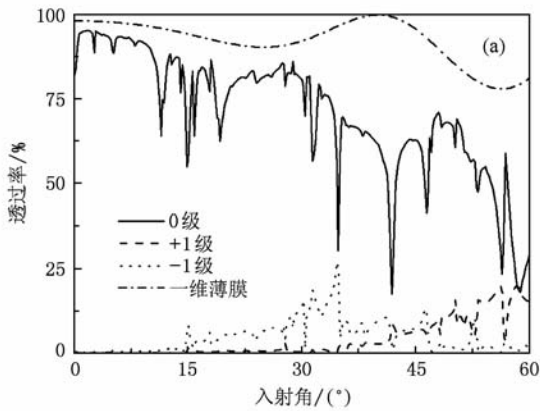


图 5 PSPG 各级衍射强度随入射角的变化 波长为 633 nm. (a) TE 模, (b) TM 模

4. FDTD 模拟计算

采用 FDTD 方法对上述 PSPG 的衍射现象进行模拟,结构参数取 $a_1 = 120 \text{ nm}$, $a_2 = 80 \text{ nm}$, $L_x = 240 \text{ nm}$, $N_x = 13$, $N_y = 5$, 波长选用 633 nm. 图 6(a), (b) 中靠近顶部的第一条虚线代表结构薄膜与入射介质空气的界面,第二条虚线代表结构薄膜与下方玻璃基板的界面,灰度值对应光强大小. 高斯光束垂直入射,束腰宽度为 $3L_x$. TE 模的透射光能量几乎全部集中在 0 级衍射上, ±1 级衍射非常微弱; TM 模透射光则全部集中于 ±1 级衍射,衍射角在玻璃基板内为 10° 左右,模拟结果与图 4 中利用 RCWA 计算得到的结果相符. 图 6(c) 截取 $z = 44.8 \text{ }\mu\text{m}$ 处的衍射光强进行对比,偏振消光比不如 RCWA 的计算

结果理想,这主要是由于 FDTD 方法采用了网格划分技术,由于计算机的运算能力有限,空间结构的网格化不可能太精细,因而模拟结果和理想情况之间会有差距. 结构参数 N_x 和 N_y 对衍射光强分布的影响分别见图 7 和图 8,当 $N_x = 13$, $N_y = 5$ 时, PSPG 的偏振分束效果较为理想.

图 9 模拟了入射角为 23° 时 PSPG 的衍射现象. 首先利用光栅方程计算各级衍射的角度,以此验证模拟计算的准确性,光栅方程表示如下:

$$n_0 \sin \theta_0 = n_s \sin \theta_{sm} + \frac{m\lambda}{\Lambda} \quad (m = 0, \pm 1, \dots), \quad (2)$$

其中 n_0 和 n_s 分别代表入射介质空气和出射介质玻璃的折射率, θ_0 为入射角, θ_{sm} 为第 m 级衍射光的出射角. 由图 5 可知入射角为 23° 时 TE 模主要是 0 级衍射, TM 模是 1 级衍射,将已知量代入(2)式,计算

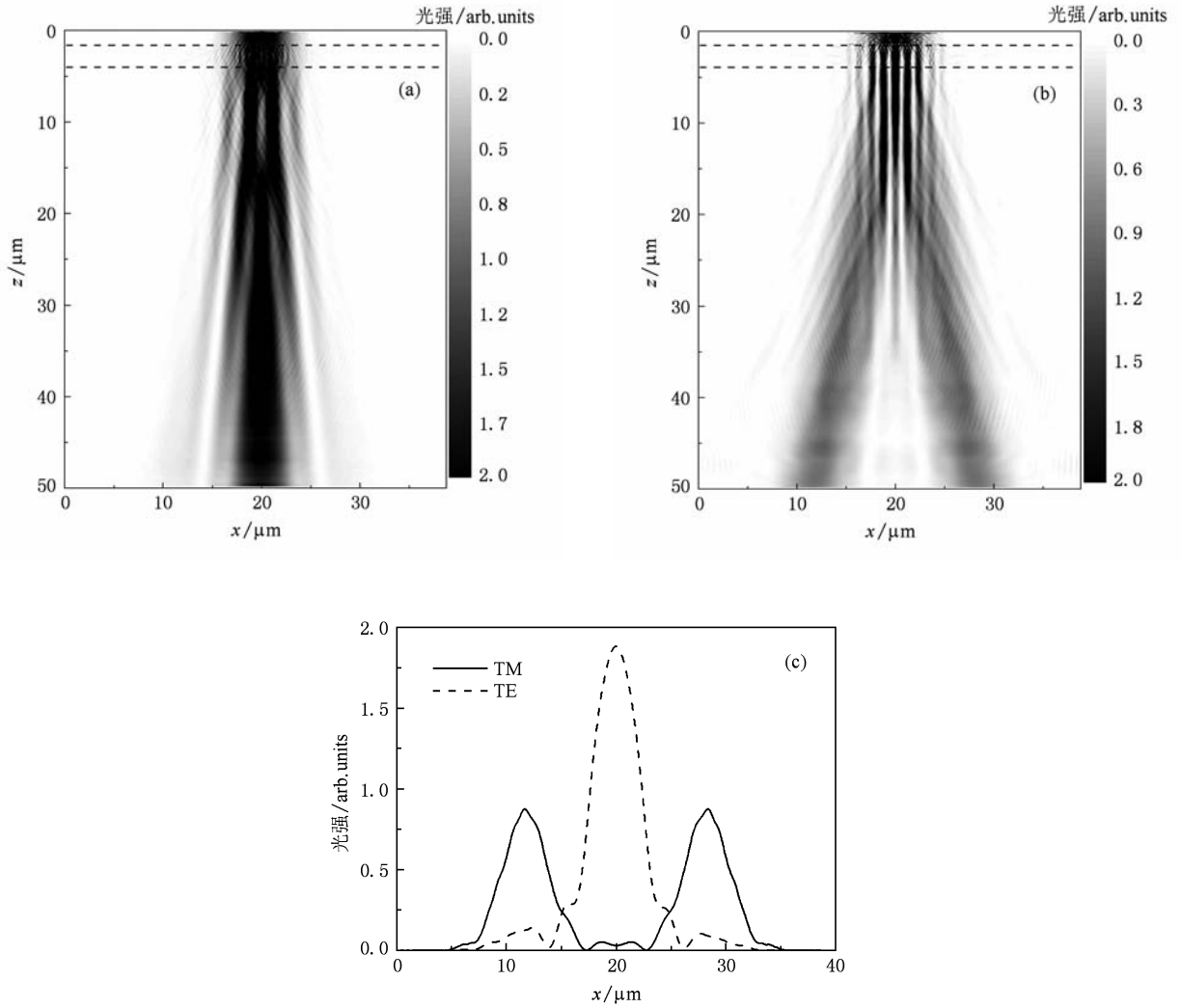


图6 FDTD模拟PSPG的衍射现象 波长为633 nm,垂直入射。(a)TE模,(b)TM模,(c) $z=44.8 \mu\text{m}$ 处的截面光强比对

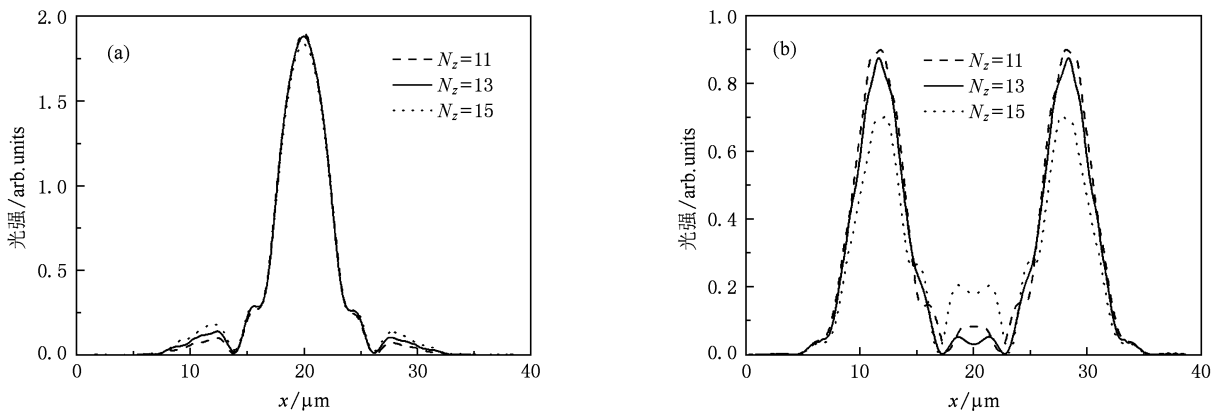


图7 结构参数 N_z 对PSPG衍射光强分布的影响 截面光强取自距离PSPG后表面 $40 \mu\text{m}$ 处。(a)TE模,(b)TM模

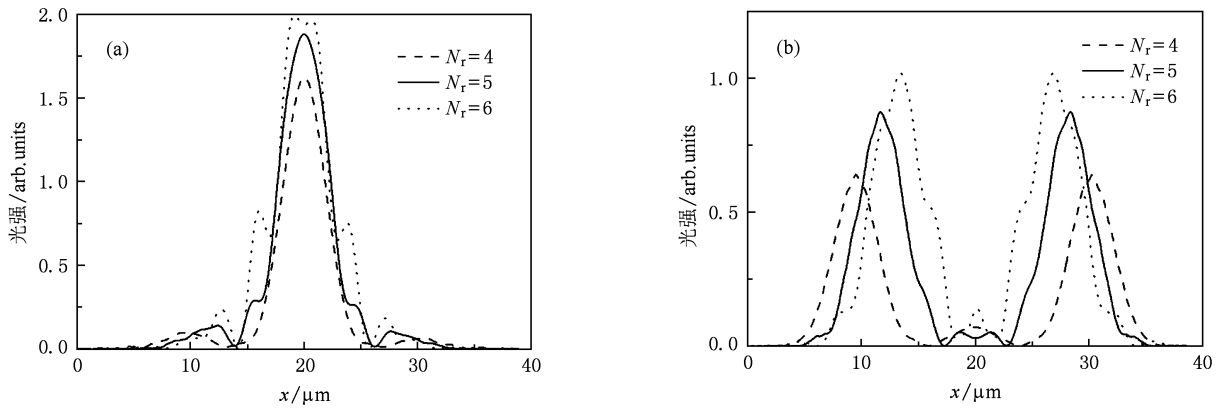


图8 结构参数 N_r 对 PSPG 衍射光强分布的影响 截面光强取自距离 PSPG 后表面 $40 \mu\text{m}$ 处. (a) TE 模, (b) TM 模

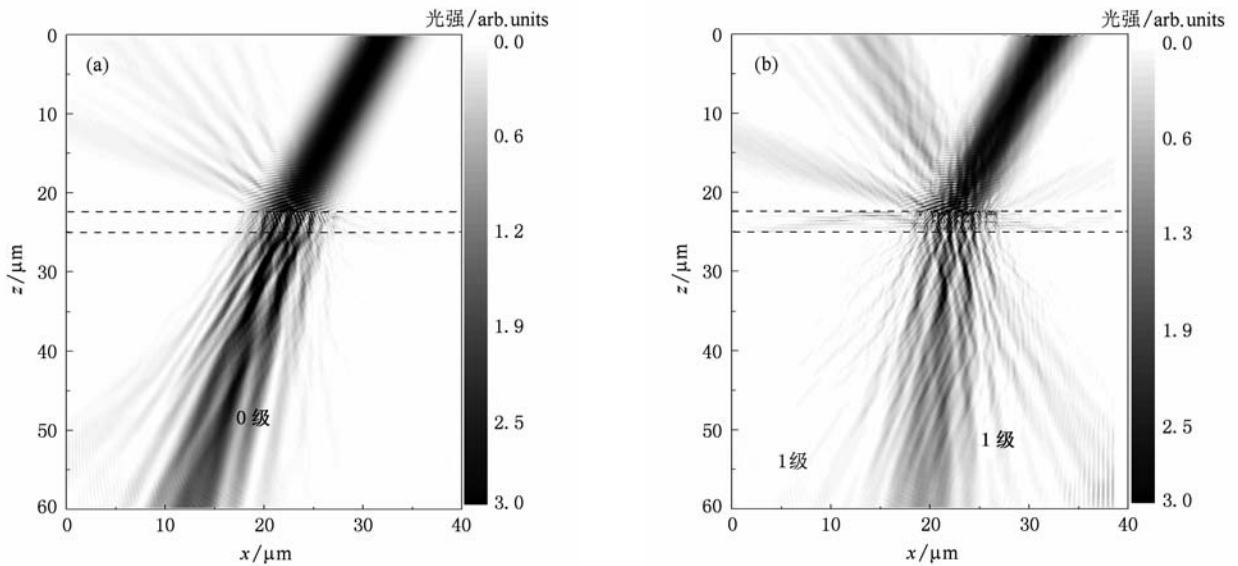


图9 FDTD 模拟 PSPG 的衍射现象 波长为 633 nm , 入射角为 23° . (a) TE 模, (b) TM 模

可得在玻璃基板内 TE 模 0 级衍射角为 14.9° , TM 模 1 级衍射角为 4.8° , 与图 9 的模拟结果相当符合.

5. 结 论

基于二维结构薄膜的相位光栅能够对入射光中的 TE 模和 TM 模产生不同的相位差, 通过选择合适的薄膜结构, 使 TE 模和 TM 模各自的相位差分别满足 2π 整数倍和 π 奇数倍的要求, 两种偏振态就可以通过不同的衍射级次实现完全分离. RCWA 方

法能够精确计算基于二维结构薄膜的 PSPG 的衍射现象, 而且 RCWA 计算结果、FDTD 模拟结果以及基于光栅方程的计算结果三者之间都能相互印证. 这类基于二维结构薄膜的新型相位光栅除了用传统的薄膜沉积技术进行制备外, 也可以通过现代半导体刻蚀工艺在平面基板上进行制备, 在未来的光子集成器件中具有一定的应用潜力. 本文讨论的结构薄膜仅限于由介质材料构成的二维周期性结构, 如果采用金属薄膜材料或者构筑非周期性的多维结构, 相信可以得到更多新颖的光学特性.

- [1] Bayanheshig, Qi X D, Tang Y G 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1157 (in Chinese) [巴音贺希格、齐向东、唐玉国 2003 物理学报 **52** 1157]
- [2] Poulin J, Kashyap R 2005 *Opt. Express* **13** 4414
- [3] Clausnitzer T, Kämpfe T, Kley E B, Tünnermann A 2005 *Opt. Express* **13** 10448
- [4] Clausnitzer T, Kämpfe T, Kley E B 2007 *Appl. Opt.* **46** 819
- [5] Zheng J J, Zhou C H, Wang B 2008 *J. Opt. Soc. Am. A* **25** 1075
- [6] Zheng J J, Zhou C H, Feng J J 2009 *Opt. Commun.* **282** 3069
- [7] Botten L C, Craig M S, McPhedran R C 1981 *Opt. Acta* **28** 413
- [8] Liu J, Gao H, Zhou J 2008 *Opt. Laser Technol.* **41** 622
- [9] Liu S Q, Chen Y S 1995 *Opt. Lett.* **20** 1832
- [10] Hanaizumi O, Miura K, Saito M 2000 *IEICE Trans. Electron.* **E83-C** 912
- [11] Li Y Y, Gu P F, Li M Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3889 (in Chinese) [厉以宇、顾培夫、李明宇 2005 物理学报 **54** 3889]
- [12] Li Y Y, Gu P F, Li M Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2596 (in Chinese) [厉以宇、顾培夫、李明宇 2006 物理学报 **55** 2596]
- [13] Li Y Y, Li M Y, Gu P F 2008 *Appl. Opt.* **47** C70
- [14] Chang T H, Chen S H, Lee C C 2008 *Thin Solid Films* **516** 1051
- [15] Huang C Y, Ku H M, Chao S 2009 *Appl. Opt.* **48** 69
- [16] Yeh Y W, Chang T H, Chen S H 2009 *Opt. Rev.* **16** 222
- [17] Zhao H J, Yang S L, Zhang D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6236 (in Chinese) [赵华君、杨守良、张东 2009 物理学报 **58** 6236]

Polarization dependent phase grating based on two-dimensional structured thin films *

Li Yi-Yu[†] Wang Yuan-Yuan Chen Hao Zhu De-Xi Hu Chuan Qu Jia

(Key Laboratory of Vision Science Research, Ministry of Health of China, School of Optometry and Ophthalmology, Wenzhou Medical College, Wenzhou 325027, China)

(Received 29 September 2009; revised manuscript received 16 November 2009)

Abstract

The new phase grating based on two-dimensional structured thin films is reported. The rigorous coupled-wave analysis (RCWA) is employed to calculate the diffraction efficiency which varies with incident wavelength and angle. According to the result obtained by using RCWA, when the wavelength ranges from 600 to 640 nm, TE mode and TM mode can be diffracted in the transmitted 0th and ± 1 st orders, respectively, at normal incident angle. For example, at the wavelength of 633 nm, the polarization extinction ratio of 0th order is $I_{0,TE}/I_{0,TM} = 109.8$, and the polarization extinction ratio of ± 1 st order is $I_{\pm 1,TM}/I_{\pm 1,TE} = 334.6$. This polarizing beam splitting phenomenon is confirmed by theoretical simulation with finite-difference time-domain method, which shows that TE mode and TM mode can be separated by an angle of about 10° in glass substrate. The same simulation method is performed for the diffraction at incident angle of 23° in order to compare with the results from RCWA and grating equation calculation.

Keywords: polarization, structured thin films, phase grating

PACC: 7865, 4280F

* Project supported by the Science and Technology Program of Zhejiang Province, China (Grant Nos. 2009C31136, 2007C11083) and the Science and Technology Program of Wenzhou, China (Grant No. G20070082).

[†] E-mail: liyiyuu@263.net