

低偏振相关损耗塑料矩形相位光栅的实验研究

林宝卿 翟云 庄其仁

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要 塑料矩形相位光栅波分复用器可有效利用塑料光纤的带宽资源,提高城域接入网的有效接入带宽。推导了在最佳入射角下,基于矢量衍射理论求解的矩形相位光栅-1级衍射效率公式,数值模拟了TE/TM偏振的有效模指数与光栅常数的关系。模拟结果表明,折射率为1.58、占空比为0.5的矩形相位光栅在入射波长为 $1.5\ \mu\text{m}$ 的入射光波照射下,TE/TM偏振能够同时达到最高衍射效率所对应的最佳光栅常数为 $0.82\ \mu\text{m}$,刻槽深度为 $1.8\ \mu\text{m}$ 。实际测量了不同入射角下,塑料矩形相位光栅的归一化衍射光强与入射角的关系,研究结果表明,在最佳入射角条件下,塑料矩形相位光栅的偏振相关损耗可低于0.5 dB。

关键词 光学制造;塑料矩形相位光栅;波分复用;有效模指数;衍射效率;偏振相关损耗

中图分类号 TN 929.11; O043.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.032202

Experimental Research on Low Polarization-Dependent Loss Plastic Rectangular Phase Grating

Lin Baoqing Zhai Yun Zhuang Qiren

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract Plastic rectangular phase grating wavelength division multiplexing (WDM) device can effectively use plastic optical fiber bandwidth resources and improve the effective bandwidth of metro access network. The formula of the negative first-order diffraction efficiency is derived by using rigorous coupled-wave analysis in the optimum incident angle and the grating effective modal index varying with grating period is numerically simulated. Simulation results indicate that when the rectangular phase grating with refractive index of 1.58 and duty cycle of 0.5 is illuminated by $1.5\ \mu\text{m}$ light, the negative first-order diffraction efficiencies for both TE and TM polarized waves can reach the maximum simultaneously under the conditions of the optimum grating period of $0.82\ \mu\text{m}$ and the minimum groove depth of $1.47\ \mu\text{m}$. The normalized diffraction optical intensity is measured for different incident angles. The experiment result shows that, with the optimum incidence, the polarization dependence loss of the plastic rectangular phase grating can be lower than 0.5 dB.

Key words optical fabrications; plastic rectangular phase grating; wavelength division multiplexing; effective modal index; diffraction efficiency; polarization-dependent loss

OCIS codes 220.4610; 050.2770

1 引言

相位光栅是一种重要的光学元件,已广泛应用于激光光学^[1~3]、光谱学、光纤传感^[4]以及光纤通信^[5~7]等领域。随着网络连接技术的迅猛发展,塑料光纤网络已成为研究的热点,但目前已达到应用阶段的塑料光纤网络基本上采用单波长的工作方式,传输速率较低,这在很大程度上限制了塑料光纤网络的通信带宽。因此,将波分复用(WDM)技术引入塑料光纤网络中被视为突破网络带宽限制、提高通信容量的有效途径。近年来,随着波分复用技术的不断发展,用于实现波分复用功能的核心器件波分复用/解复用器的形式也呈现出多样性。根据波长选择激励和器件结构的不同,波分复用器可以分成以下几类:角色散型波分复用器^[8]、介质薄膜滤波器型波分复用器、熔拉双锥耦合型波分复用器^[9]、集成光波导型波分复用器。其中,作为应用

收稿日期: 2012-11-20; 收到修改稿日期: 2012-12-10; 网络出版日期: 2012-12-27

基金项目: 福建省自然科学基金(2011J01353)资助课题。

作者简介: 林宝卿(1982—),女,硕士,助理实验师,主要从事新型光电子器件方面的研究。

E-mail: linbaoqing@hqu.edu.cn

比较广泛的角色散型波分复用器的衍射相位光栅具有成本低、易实现的特点,可批量制作并用于光通信中。但相位光栅本身具有偏振敏感性,这在很大程度上限制了其在波分复用技术中的广泛应用。因此,对相位光栅的偏振特性进行研究,找出影响其偏振敏感性的光栅特征参数具有重要意义。

本文采用耦合波理论,在充分考虑电磁场的矢量特性的情况下,通过在一定的边界条件上严格地求解麦克斯韦方程来分析光栅特征参数对光栅偏振特性的影响,并根据理论分析的结果制作出具有低偏振相关损耗(PDL)的矩形相位光栅。

2 理论分析

图1为矩形相位光栅的截面示意图。设光栅周期为 d ,脊宽为 b ,占空比为 $\rho = \frac{b}{d}$,刻槽深度为 h ,基底的折射率为 n_b ,TE/TM光入射到光栅上的入射角为 θ_{in} ,TE/TM光的-1级衍射角为 θ_{diff} 。

2.1 入射角的确定

假设入射光以入射角 θ 斜入射到光栅上,根据光栅的衍射理论,当光程差 $\delta = d(\sin \theta + \sin \theta_k) = k\lambda$ 时,出现干涉极大值,由此可得第 k 级的衍射角 $\theta_k = \arcsin(k\lambda/d - \sin \theta)$ 。因此,第 k 级明纹的衍射角 θ_k 随入射角 θ 变化。设 φ 为 k 级明纹的衍射光偏离入射光的角度,则 $\varphi = \theta + \arcsin\left(\frac{k\lambda}{d} - \sin \theta\right)$ 。对 θ 求一阶导数,

$$\frac{d\varphi}{d\theta} = 1 - \frac{\cos \theta}{\sqrt{1 - \left(\frac{k\lambda}{d} - \sin \theta\right)^2}}$$

令 $\frac{d\varphi}{d\theta} = 0$,得

$$\frac{\cos \theta}{\sqrt{1 - \left(\frac{k\lambda}{d} - \sin \theta\right)^2}} = 1.$$

整理得

$$\theta = \arcsin \frac{k\lambda}{2d}.$$

由此可知,当 $\theta = \arcsin \frac{k\lambda}{2d}$ 时, φ 存在极值。因此,对于相位光栅的-1级衍射而言,当 $\theta_{in} = \theta = \arcsin \frac{\lambda}{2d}$ 时, φ 可出现极大值,即此时为最佳入射角。

2.2 矩形相位光栅-1级衍射效率公式

由电磁场理论可知,在矩形相位光栅的上下界面都满足电磁场切向量的连续性原理时,可得到基于矢量衍射理论求解的矩形相位光栅-1级衍射效率公式

$$\eta_{-1} = \sin^2 \left(\pi \frac{h}{\lambda} |n_{eff0} - n_{eff1}| \right), \quad (1)$$

式中 n_{eff0} 和 n_{eff1} 分别为在矩形相位光栅中能自由传输的有效模指数。

根据参考文献[10],通过解矩形光栅入射平面的电场矢量切向分量的本征方程得到能透过矩形相位光栅的TE/TM偏振的有效模指数。对于TE偏振有

$$\cos[k_1(1-\rho)d] \cos(k_2 \rho d) - \frac{k_1^2 + k_2^2}{2k_1 k_2} \sin[k_1(1-\rho)d] \sin(k_2 \rho d) = \cos \alpha d, \quad (2)$$

式中 $k_i = k_0 \sqrt{n_i^2 - n_{eff}^2}$, $\alpha = k_0 \sin \theta_{in}$, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。

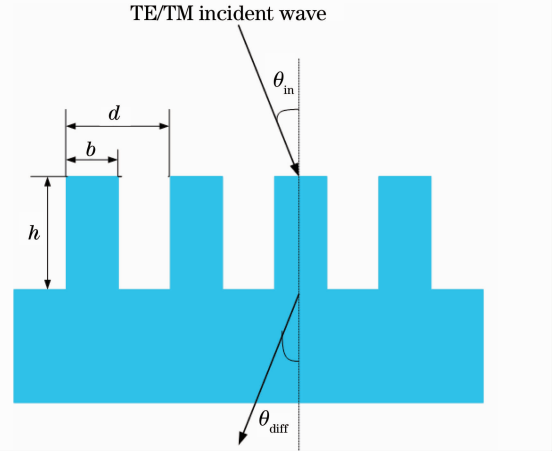


图1 矩形相位光栅的截面示意图

Fig. 1 Geometry of the rectangular phase grating

对于矩形相位光栅的-1级衍射而言,入射角 $\theta_m = \theta = \arcsin \frac{\lambda}{2d}$ 时, $\cos \alpha d = -1$ 。

同理,对于 TM 偏振有

$$\cos[k_1(1-\rho)d]\cos(k_2\alpha d) - \frac{n_b^4 k_1^2 + k_2^2}{2n_b^2 k_1 k_2} \sin[k_1(1-\rho)d]\sin(k_2\alpha d) = \cos \alpha d. \quad (3)$$

3 数值模拟

图2模拟了折射率 $n=1.58$ 、占空比 $\rho=0.5$ 和入射光波长 $\lambda=1.5 \mu\text{m}$ 时,矩形相位光栅-1级衍射的有效传播模的有效模指数与光栅常数的关系。

从图中可以看出,在光栅常数 $d=0.82 \mu\text{m}$ 时,矩形相位光栅 TM 偏振的有效传播模的有效模指数相等,即 $n_{\text{eff}0} = n_{\text{eff}1} = 0.86$ 。因此,当光栅常数 $d=0.82 \mu\text{m}$ 时,波长为 $\lambda=1.5 \mu\text{m}$ 的入射光的 TM 偏振的有效传播模之间没有累积相位差,即 $\Delta\varphi = \frac{\pi h}{\lambda} |n_{\text{eff}0} - n_{\text{eff}1}| = 0$,矩形相位光栅 TM 偏振的-1级衍射的衍射效率不受刻槽深度的影响。

图3模拟了光栅常数 $d=0.82 \mu\text{m}$ 、折射率 $n=1.58$ 、占空比 $\rho=0.5$ 和入射光波长 $\lambda=1.5 \mu\text{m}$ 时,矩形相位光栅 TE 偏振-1级衍射效率与刻槽深度的关系。从图中可以看出,当刻槽深度 $h=1.8 \mu\text{m}$ 时,矩形相位光栅 TE 偏振的两个有效传播模的衍射效率可同时达到84%以上。由此可见,在占空比 $\rho=0.5$ 时,TE 偏振和 TM 偏振的-1级衍射效率能达到最大值,其刻槽深度与光栅常数的比值在2.2左右。

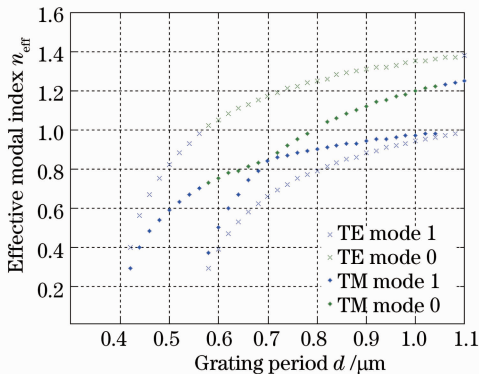


图2 TE/TM 偏振的有效模指数与光栅常数的关系图
Fig. 2 Relationship between the effective modal indices of TE/TM polarization modes and the grating period

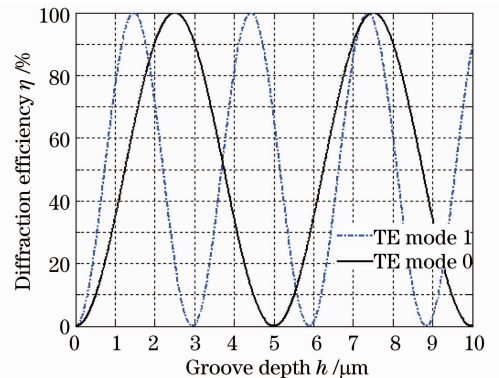


图3 TE 偏振-1级衍射效率与刻槽深度的关系图
Fig. 3 Relationship between the diffraction efficiency in the -1 order of TE polarization mode and the groove depth

4 塑料矩形相位光栅的制作

根据模压原理^[11,12],实验采用热压成型试验机,将聚碳酸酯材料放在石英玻璃光栅模板凹凸面的下面,通过控制模压温度、模压压力和模压时间对聚碳酸酯材料进行模压成型^[13]。具体流程如图4所示。

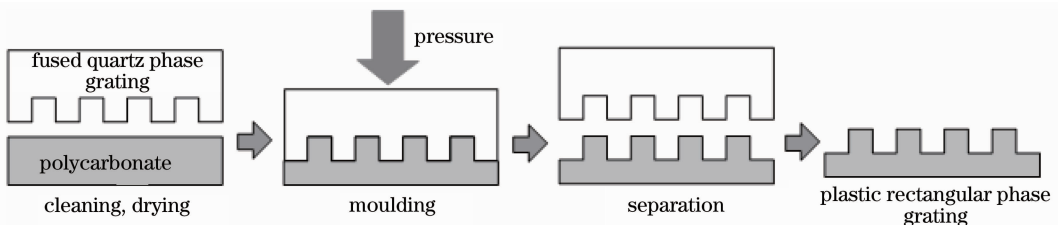


图4 塑料矩形相位光栅的制作流程
Fig. 4 Process flow diagram of plastic rectangular phase grating

5 塑料矩形相位光栅偏振特性的测试

为了进一步验证塑料矩形相位光栅的偏振特性,采用如图 5 所示的偏振特性测量装置对塑料矩形相位光栅的-1 级衍射在不同入射角下的 TE 偏振和 TM 偏振的衍射光强进行测量,其具体测量参数为光栅常数 $d=0.82 \mu\text{m}$,刻槽深度 $h=1.8 \mu\text{m}$,折射率 $n=1.58$,占空比 $\rho=0.5$ 和入射光波长 $\lambda=1.5 \mu\text{m}$ 。图 6(a)模拟了光栅常数 $d=0.82 \mu\text{m}$,刻槽深度 $h=1.8 \mu\text{m}$,折射率 $n=1.58$,占空比 $\rho=0.5$ 的塑料矩形相位光栅 TE 偏振和 TM 偏振的-1 级衍射效率随入射角变化的关系图,从图中可以看出,塑料矩形相位光栅 TE 偏振和 TM 偏振的-1 级衍射效率随着入射角的增加呈上升趋势,当入射角 $\theta_{\text{in}} = \theta = \arcsin \frac{\lambda}{2d} = 64^\circ$ 时,其-1 级衍射效率可达到极值。图 6(b)为实验测量得到的不同入射角下,塑料矩形相位光栅的-1 级衍射的 TE 偏振和 TM 偏振的归一化衍射光强。从图中可以看出,当入射角 $\theta=45^\circ$ 时,TE 偏振和 TM 偏振的归一化衍射光强达到最大值,该入射角小于 $\theta_{\text{in}} = \theta = \arcsin \frac{\lambda}{2d} = 64^\circ$,主要是受刻槽深度与光栅常数的影响。

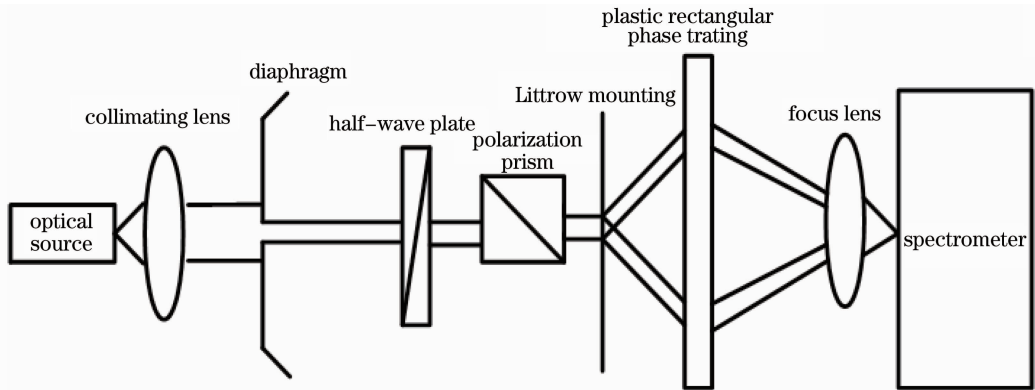


图 5 塑料矩形相位光栅偏振特性的测量装置

Fig. 5 Measurement setup for the polarization characteristics of the plastic rectangular phase grating

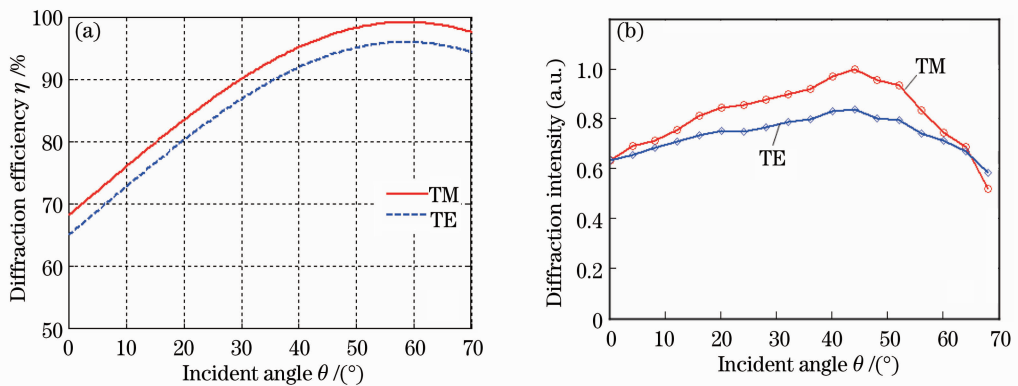


图 6 TE 偏振和 TM 偏振的衍射光强与入射角的关系图。(a)数值模拟图;(b)实际测量图

Fig. 6 Relationship between the diffraction efficiency of TE/TM polarization modes and the incident angle.

(a) Simulation; (b) experimental results

此外,塑料矩形相位光栅的-1 衍射级的 TE 和 TM 偏振特性还可以用偏振相关损耗来表征,具体可定义为 TE 偏振和 TM 偏振损耗的最大传输差值,其表达式为

$$L_{\text{PD}} = 10 \lg \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{min}}},$$

式中 P_{max} 和 P_{min} 分别为通过塑料光纤后,光谱仪接收到的最大和最小输出功率值。

图 7 中由数值计算拟合得到的偏振相关损耗与入射角的关系理论曲线表明塑料矩形相位光栅偏振相关

损耗的理论值低于 0.2 dB,图中两条曲线的计算波长分别为 $1.50 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 。图 7 中的实验测量曲线在 $\theta_{\text{in}} = 64^\circ$ 时偏振相关损耗低于 0.5 dB。由此可见,在合适的工艺条件和合理的光栅参数设置下,制得的塑料矩形相位光栅的-1 级衍射具有较低的偏振相关损耗,具有对偏振不敏感的特性,可用作波分复用器。

6 结 论

利用光栅的衍射理论,分析了矩形相位光栅-1 级衍射的最佳入射角,并根据电磁场理论和边界条件,得到基于矢量衍射理论求解的矩形相位光栅-1 级衍射效率公式。重点研究了 TE/TM 偏振有效模指数与矩形相位光栅的光栅常数的关系,得到 TE/TM 偏振达到较高衍射效率所需的刻槽深度。最后分析和实际测量了采用模压技术制作的塑料矩形相位光栅-1 级衍射级的 TE/TM 偏振归一化衍射光强与入射角的关系,并计算了不同入射角下的偏振相关损耗。结果表明,制作的塑料矩形相位光栅具有较低的偏振相关损耗,能满足实际要求,在降低波分复用器成本和增加网络带宽方面具有潜在的应用前景。

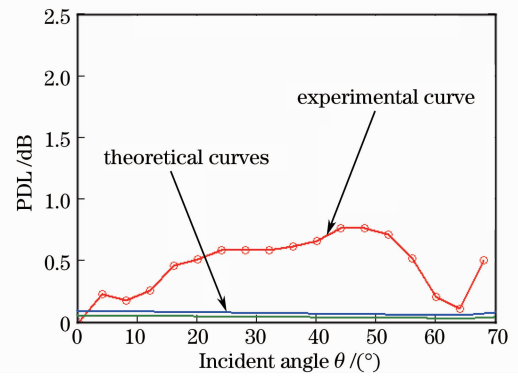


图 7 偏振相关损耗与入射角的关系

Fig. 7 Relationship between the PDL and the incident angle

参 考 文 献

- 1 D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3): 219~221
- 2 M. D. Perry, G. Mourou. Terawatt to petawatt subpicosecond lasers [J]. *Science*, 1994, **264**(5161): 917~924
- 3 E. Moon, H. Wang, S. Gillbertson *et al.*. Advances in carrier-envelope phase stabilization of grating-based chirped-pulse amplifiers [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2010, **4**(1): 160~177
- 4 Wang Jing, Feng Dejun, Sui Qingmei *et al.*. Study of optical fiber Bragg grating seepage pressure sensor based on draw-bar structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 686~691
- 王 静, 冯德军, 隋青美 等. 基于拉杆结构的光纤布拉格光栅渗压传感器研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 686~691
- 5 Hongchao Cao, Changhe Zhou, Jijun Feng. Design and fabrication of a polarization-independent wideband transmission fused-silica grating [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(21): 4108~4112
- 6 Cheng Lihua, Song Jun, Wang Jian. Design of wavelength division demultiplexers based on holographic gratings with a low polarization dependent loss [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11): 1667~1671
- 成丽华, 宋 军, 王 剑. 低偏振相关损耗全息光栅波分复用器的设计[J]. *光子学报*, 2006, **35**(11): 1667~1671
- 7 Wang Qiang, Shen Guotu, Yang Baocheng *et al.*. Design simulation of high efficiency and low polarization dependence loss infrared grating [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(6): 656~659
- 王 强, 沈国土, 杨宝成 等. 红外波段高效率低偏振相关损耗光栅的设计[J]. *光学技术*, 2004, **30**(6): 656~659
- 8 Li Yefang, Wang Xiaoxu, Liu Hua. The application of wavelength division multiplexer in fiber communication [J]. *Physics and Engineering*, 2007, **17**(5): 26~28
- 李叶芳, 王晓旭, 柳 华. 波分复用器在光纤通信中的应用[J]. *物理与工程*, 2007, **17**(5): 26~28
- 9 Lou Lifang, Sheng Zhongting. The implementation techniques of WDM devices in optical communication [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **24**(1): 12~18
- 娄丽芳, 盛钟廷. 光通信中波分复用器件的实现技术[J]. *半导体光电*, 2003, **24**(1): 12~18
- 10 L. C. Botten, M. S. craig, R. C. McPhedran *et al.*. The dielectric lamellar diffraction grating [J]. *Opt. Acta*, 1981, **28**: 413~428
- 11 R. Guan, B. Wang, D. Lu. Preparation of microcellular poly (ethylene terephthalate) and its properties [J]. *J. Applied Polymer Science*, 2003, **88**(8): 1956~1962
- 12 R. Guan, B. Wang, D. Lu *et al.*. Microcellular thin PET sheet foam preparation by compression molding [J]. *J. Applied Polymer Science*, 2004, **93**(4): 1698~1704
- 13 Yu Baiying, Zhuang Qiren, Ruan Sixu. Research on making the polymer rectangle grating with pressing technology [J]. *J. Huaqiao University (Natural Science)*, 2007, **28**(2): 151~154
- 于百英, 庄其仁, 阮思旭. 采用模压技术的聚合物矩形光栅制作[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2007, **28**(2): 151~154