

文章编号: 1000-5013(2012)02-0153-04

塑料相位光栅型波分复用/解复用器的设计

戴文海, 赵良春, 陈唐荣, 庄其仁

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 采用模压成型的塑料相位光栅作为波分复用/解复用器的分光元件, 根据矩形相位光栅衍射公式, 理论分析和仿真其衍射效率和信道分离情况. 研究结果表明: 对于一定刻槽深度的塑料相位光栅, +1 级衍射效率和入射角的关系与理论分析结果一致, 即对于采用的波长分别为 575, 625, 675 nm 的入射光, 当刻槽深度为 200 nm 时, +1 级衍射效率最大值所对应的入射角为 25°左右, 此时衍射效率理论值最大可达 0.79; 信道间隔为 50 nm 时, 从探测器观察其光斑间隔为 230 μm 左右, 大于光纤直径(200 μm), 能有效实现光波分离, 可应用于塑料光纤波分复用系统.

关键词: 塑料相位光栅; 波分复用器; 光纤到户; 塑料光纤; 衍射效率

中图分类号: TN 929.11; TN 253

文献标志码: A

目前, 光纤到户(FTTH)被认为是最理想的入户方式, 因为它不但能提供更大的带宽^[1-2], 而且增强了网络对数据格式、速率、波长和协议的透明性, 放宽了对环境条件和供电等方面的要求, 简化了维护和安装. 但在实际运用当中, 石英光纤芯径非常细(SM 型光纤直径为 5~10 μm), 端面处理困难, 难以进行频繁的连接, 且连接成本昂贵. 塑料光纤由于其价格便宜、接续快捷、柔韧性好、抗辐射等优点, 成为短距离宽带通信网的理想选择, 并有望取代金属电缆而成为短距离高速率的传输介质的核心^[3-6]. 塑料光纤网络作为解决最后 100/1 000 m 问题的建设方案虽然才刚刚起步, 但是其未来发展空间极大. 高速大容量塑料光纤波分复用(WDM)网络系统^[7-8]是一种全新的思路, 而廉价的波分复用/解复用器是塑料光纤波分复用系统中的关键元件之一. 基于此, 本文提出采用塑料相位光栅来实现光波分复用技术.

1 基本原理

塑料相位光栅式 WDM 器件由准直透镜、塑料相位光栅、聚焦透镜构成, 如图 1 所示. 当器件用作分光器件时, 输入端位于准直透镜焦点处, 多波长的光信号通过透镜准直后, 进入塑料相位光栅, 多波长发生衍射色散.

中心波长衍射角为 α_B (等同于入射角), 其他波长衍射角与 α_B 相差一个对应小量. 于中心波长 λ_B 为对称中心向上或向下数, 第 n 波长($\lambda_B + n\Delta\lambda$)的衍射角为

$$\beta_n = \alpha_B + \Delta\beta_n.$$

根据光栅衍射方程有

$$m(\lambda_B + n\Delta\lambda) = d[\sin \alpha_B + \sin(\alpha_B + \Delta\beta_n)], \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \cdots. \tag{1}$$

式(1)中: $\Delta\lambda$ 为 DWDM 器件信道波长间隔. 这里规定大于 λ_B 的信道波长, 其 $n, \Delta\lambda$ 的值取正; 否则取负. 为计算方便, 以下计算时, $n, \Delta\lambda$ 均取正. $\Delta\beta_n$ 为第 n 波长衍射角与 α_B 的偏差, 也只取正值. 在光纤通信中一般采用光栅的一级衍射, 即 $m=1$.

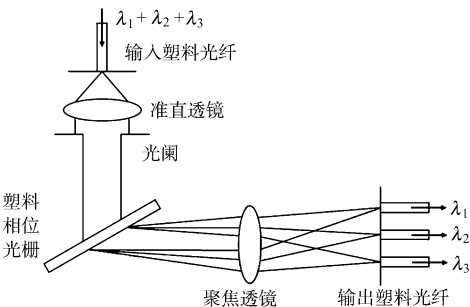


图 1 塑料相位光栅解复用器原理图
Fig. 1 Principle diagram of wavelength division demultiplexer based on plastic phase grating

由于 $\lambda_B = 2d \sin \alpha_B$, 代入式(1)化简后得到

$$d \cdot \sin \alpha_B + n \Delta \lambda = \sin(\alpha_B + \Delta \beta_n), \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \tag{2}$$

把 $\sin(\alpha_B + \Delta \beta_n)$ 按泰勒展式展开, 只取展式的前 3 项, 并代入式(2), 经整理可得

$$\frac{\sin \alpha_B}{2} \Delta \beta_n^2 - \cos \alpha_B \Delta \beta_n + \frac{n \Delta \lambda}{d} = 0. \tag{3}$$

上式方程有解. 但据分析, 方程中正项解不适合实际, 这样可得到了第 n 个信道经塑料相位光栅衍射后的角色散偏量为

$$\Delta \beta_n = \left[\cos \alpha_B - \sqrt{\cos^2 \alpha_B - 2 \sin \alpha_B \frac{n \Delta \lambda}{d}} \right] / \sin \alpha_B. \tag{4}$$

衍射光波经过焦距为 F 的聚焦透镜聚焦后, 形成各信道波长的焦面图. 第 n 波长的焦面与中心光轴的纵向高度为 y_n

$$y_n = F \Delta \beta_n = F \left(\cot \alpha_B - \sqrt{\cot^2 \alpha_B - \frac{2n \Delta \lambda}{d \sin \alpha_B}} \right), \tag{5}$$

焦面上相邻两信道高低间隔为

$$\Delta y_{n,n-1} = y_n - y_{n-1} = F \left[\sqrt{\cot^2 \alpha_B - \frac{2(n-1) \Delta \lambda}{d \cos \alpha_B}} - \sqrt{\cot^2 \alpha_B - \frac{2n \Delta \lambda}{d \cos \alpha_B}} \right] \tag{6}$$

根据对称性, $n, \Delta \lambda$ 取负数时, $y_n, \Delta y_{n,n-1}$ 相应中心光轴可取负值求出.

塑料相位光栅型波分复用器的工作原理为上述过程的逆过程.

2 塑料相位光栅的结构与制作

塑料相位光栅型波分复用器的核心为塑料相位光栅. 为了获得廉价的塑料相位光栅, 采用模压技术在塑料光学材料上压制光栅的方法^[9], 通过控制模压温度、压力大小和模压时间来获得光栅刻槽深度 (h). 塑料相位光栅材料采用聚碳酸脂 (Polycarbonate, 简称 PC). PC 材料在可见光和近红外线光谱区内有较高的透光率, 透明度可达到 90%, 折射率为 1.567, 机械性能较高, 熔融温度为 300 ℃ 左右, 耐温差性极好, 在 -40~+80 ℃ 的温度条件下几何尺寸变化极小, 因此适合用于制作成塑料相位光栅. 模板采用 ICP 技术刻蚀的熔融石英矩形光栅, 光栅栅距为 0.8~2.2 μm 规格.

波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光垂直入射栅距 2.2 μm 的石英模板光栅 (中国科学院上海光学精密机械研究所) 和塑料相位光栅的衍射图样比较, 如图 2 所示. 由图 2 可见, 所复制的塑料相位光栅和石英模板光栅具有一致的衍射角分布和衍射强度分布特性.

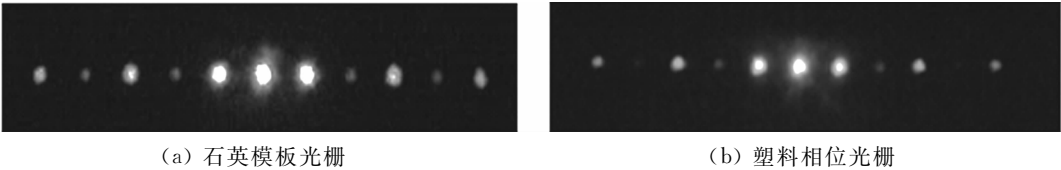


图 2 两种不同光栅的衍射图样比较

Fig. 2 Diffractive images of quartz template grating and plastic phase grating

图 3 为塑料相位光栅的结构. 图 3(b) 中: 光栅的周期为 Λ ; 脊宽为 τ ; 占空比为 $\rho = \tau / \Lambda$; 刻槽深度为 h ; 基底厚度为 H ; 材料折射率为 n . 设光线 a 和 b 以 θ 角入射到光栅上, ϵ 为折射角, 则光线 a 和 b 通过光栅时产生的相位差为

$$\Delta \phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{2\pi h}{\lambda} \left[\frac{n}{\cos \epsilon} - \frac{1}{\cos \theta} \right]. \tag{7}$$

其中: $\cos \epsilon = \frac{1}{n} \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}$.

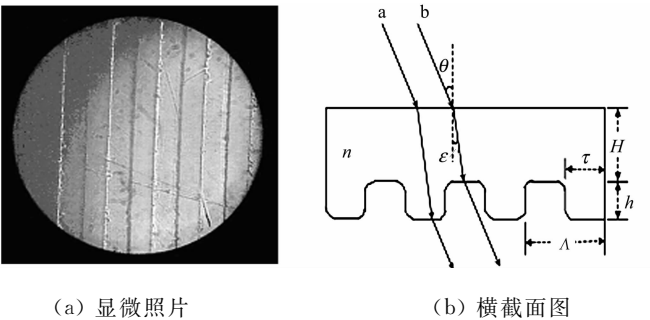


图 3 塑料相位光栅的截面

Fig. 3 Cross section of plastic phase grating

在标量衍射理论的基础上,采用透过率函数的 Fourier 级数展开和复振幅的 Fourier 变换方法,可以得出斜入射下塑料矩形光栅衍射效率的一般表达式^[10]为

$$\left. \begin{aligned} \eta_0 &= 1 - 2\rho(1 - \rho)(1 - \cos \Delta\phi), \\ \eta_{m \neq 0} &= \frac{1}{m^2 \pi^2} (1 - \cos 2m\pi\rho)(1 - \cos \Delta\phi), \quad m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)中: m 为衍射级次; η_0 为 0 级衍射效率; $\eta_{m \neq 0}$ 为非 0 级衍射效率。

为了减小波分复用器的插入损耗,当波分复用器工作在+1 级衍射时,参数的选择应使非+1 级衍射光强度最小,而+1 级衍射光强度最大。

3 仿真实验结果及分析

根据复用器/解复用器的构成,利用 Fcous Software Inc 公司的光学设计软件 ZEMAX 进行仿真分析,程序模式采用非共轴模式的仿真界面。模拟了波长分别为 575,625,675 nm 的 3 种不同光波在刻密度为 $1\,200\text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$,+1 级次衍射下的分离情况。从探测器可以观察其光斑间隔为 $230\text{ }\mu\text{m}$ 左右,大于光纤直径($200\text{ }\mu\text{m}$),能有效实现光波分离。

为了得到衍射光栅的最佳衍射效率,用 PCGrateMLT2000 软件对工作波长为 625 nm,刻线密度为 $1\,200\text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的矩形光栅在自准入射情况下衍射效率进行了仿真。塑料相位光栅在不同刻槽深度的各级次衍射效率,如图 4 所示。由图 4 可知:−4 级的衍射效率随着刻槽深度的增加而减小,+1 级衍射效率当刻槽深度小于 24 nm 时为零,大于 24 nm 时,随着刻槽深度的增加而增大;−1 级衍射效率当刻槽深度小于 28 nm 时为零,大于 28 nm 时随着刻槽深度的增加而增大。从理论效率曲线看,衍射效率对刻槽深度是敏感的。为了获得高的±1 级衍射效率,选取刻槽深度为 200 nm 的衍射光栅。

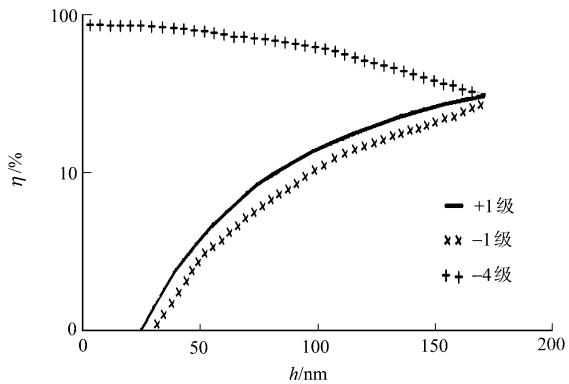


图 4 不同刻槽深度下的不同级次的衍射效率
Fig. 4 Diffraction efficiency of different grades under different groove depth

当工作波长 625 nm,刻线密度为 $1\,200\text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$,刻槽深度为 200 nm 的塑料相位光栅在自准直入射情况下的不同衍射级次在不同偏向角(θ)下的衍射效率,如图 5 所示。在 PCGrateMLT2000 软件中,偏向角即为入射角的 2 倍。由图 5 可知:入射角从 0° 到 15° 存在−1 级衍射效率,入射角从 32° 到 85° 存在 2 级衍射效率,入射角从 0° 到 85° 存在+1 级衍射效率,并且+1 级的衍射效率比其他级次的衍射效率都高,在偏向角为 50° 即入射角为 25° 左右达到最大。

在刻槽深度为 200 nm、刻线密度为 $1\,200\text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的塑料相位光栅,其入射角为 25° 的自准直入射情况下,+1 级衍射光衍射效率随波长(λ)变化的曲线,如图 6 所示。由图 6 可以看出:波长为 575,625

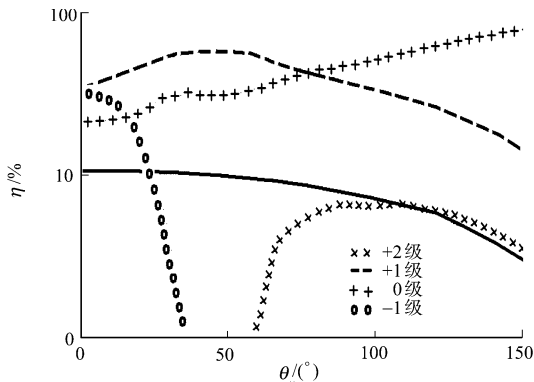


图 5 不同偏向角下不同级次的衍射效率
Fig. 5 Diffraction efficiency of different grades under different deflection angle

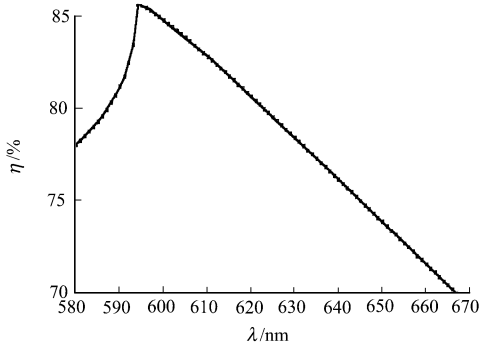


图 6 不同波长下的衍射效率
Fig. 6 Diffraction efficiency of different wavelengths

和 675 nm 衍射效率分别为 0.77, 0.79, 0.68, 衍射效率都很高, 基本能满足波分复用器件的要求。

4 结 束 语

研究一种塑料相位光栅型波分复用器, 介绍廉价塑料相位光栅的制作方法. 分析了衍射效率与光栅刻槽深度、衍射级次、刻槽深度和光束入射角的关系, 分别对波长为 575, 625, 675 nm 的衍射级次光线偏离路径进行仿真. 结果表明, 所设计的塑料相位光栅型波分复用/解复用器能满足实际应用的要求。

参考文献:

- [1] KEIL N, YAO H H, ZAWADZKI C, et al. Supercompact optical add-drop multiplexer for FTTH applications based on low-loss polymer waveguide materials[J]. Electronics Letters, 2005, 41(4): 186-188.
- [2] PARK S J, LEE C H, JEONG K T, et al. Fiber-to-the-home services based on wavelength-division-multiplexing passive optical network[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(11): 2582-2591.
- [3] LIU Hong-bo, LIU Hui-yong, PENG Gang-ding, et al. Tunable dispersion using linearly chirped polymer optical fiber Bragg gratings with fixed center wavelength[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(2): 411-413.
- [4] SUGITA T, ABE T, HIRANO K, et al. Bidirectional optical coupler for plastic optical fibers[J]. Applied Optics, 2005, 44(15): 2933-2942.
- [5] MAKINO K, NAKAMURA T, ISHIGURE T, et al. Analysis of graded index polymer optical fiber link performance under fiber bending[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(6): 2062-2072.
- [6] 桂玉屏, 徐震, 胡先志. 塑料光纤连接的智能家庭光纤通信系统[J]. 光通信研究, 2006(4): 44-46, 59.
- [7] BARTKIV L V, BOBITSKI Y V, POISEL H. Optical demultiplexer using a holographic concave grating for POF-WDM systems[J]. Optic Applicata, 2005, 35(1): 59-66.
- [8] HAUPT M, FISCHER U H P. WDM over POF: The inexpensive way to break through the limitation of bandwidth of standard POF communication[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6478: 1-10.
- [9] 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.
- [10] 巴音贺希格, 齐向东, 唐玉国. 矩形光栅衍射效率的一般表达式及其缺级现象[J]. 光电子·激光, 2003, 14(10): 1021-1024.

Design of the Plastic Phase Grating Wavelength Division Multiplexer/De-Multiplexer

DAI Wen-hai, ZHAO Yin-chun,
CHEN Tang-rong, ZHUANG Qi-ren

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

Abstract: Using a plastic molding phase grating as a light splitting element for wavelength division multiplexer/de-multiplexer, theoretical analysis and simulation of the diffraction efficiency and channel separation according to the rectangular phase grating diffraction formula have been given in this paper. The results show that a relationship between order +1 of diffraction efficiency and beam incident angle is consistent with the theoretical analysis for a certain groove depth of the plastic phase grating. Specifically, diffraction order of $m=+1$ efficiency of up to 0.79 corresponding to the angle of incidence of about 25° when using the wavelength of incident light, respectively 575, 625, 675 nm, and groove depth of 200 nm. If the channel interval is 50 nm, the spot interval of $230\ \mu\text{m}$ on the detector surface is greater than fiber diameter ($200\ \mu\text{m}$), so the wavelength division multiplexer/demultiplexer based on plastic grating is valid and feasible in actual application.

Keywords: plastic phase grating; wavelength division multiplexer; fiber to the home; plastic fiber; diffractive efficiency