

文章编号: 0253-2239(2004)05-655-4

塑料光纤微分模延迟的频域相移法研究*

郑史烈 章献民 陈抗生

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

戴新华 艾希成 韩布兴 徐 坚

(中国科学院化学研究所, 北京 100080)

摘要: 塑料光纤的微分模延迟数据对研究塑料光纤的色散特性具有非常重要的意义。采用频域相移法测量了不同长度的两种折射率分布塑料光纤: 阶跃型塑料光纤(SI-POF)和渐变型塑料光纤(GI-POF)的微分模延迟曲线。实验结果表明, 由于短光纤可以忽略模式耦合和模式损耗, 1 m 塑料光纤的微分模延迟测量值与理论计算值吻合得非常好。因此, 频域相移法可以简单、方便、精确地测量塑料光纤的微分模延迟。此外, 通过比较不同长度塑料光纤的微分模延迟曲线的变化, 可在一定程度上分析光纤中存在的模式耦合。

关键词: 光纤通信技术; 光纤测量; 塑料光纤; 微分模延迟; 模式耦合; 频域相移法

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A

Differential Mode Delay in POF Measured by Frequency-Domain Phase-Shift Technique

Zheng Shilie Zhang Xianmin Chen Kangsheng

(Department of Information & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Dai Xinhua Ai Xicheng Han Buxing Xu Jian

(Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(Received 10 March 2003; revised 13 May 2003)

Abstract: Knowledge of differential mode delay data of polymer optical fiber plays an important role in studying the dispersion characteristic of the fiber. Differential mode delay of step index-polymer optical fiber (SI-POF) and gradient index-polymer optical fiber (GI-POF) with various lengths is measured by the frequency-domain phase-shift technique. Due to the fact that the mode coupling and the mode-dependent loss can be neglected for short fibers, the measured values of the differential mode delay for the 1 m fibers agree well with the theoretical ones. Therefore, the frequency-domain phase-shift technique provides a simple, convenient way to determine the differential mode delay of the polymer fibers with high accuracy. In addition, the mode coupling of POF can be analyzed to some extent by comparing the differential mode delay curves of the fibers with various lengths.

Key words: fiber communication technology; fiber measurement; polymer optical fiber; differential mode delay; mode coupling; frequency-domain phase-shift technique

* 中国教育部高等学校博士点基金(20010335037)资助课题。

E-mail: zhengsl@zju.edu.cn

收稿日期: 2003-03-10; 收到修改稿日期: 2003-05-13

1 引 言

塑料光纤(POF)由于制造简单、价格便宜、接续方便快捷等优点, 已成为短距离宽带通信网的最理想选择^[1,2]。在数据高速传输过程中, 带宽是影响

塑料光纤应用的主要因素之一^[3]。因此塑料光纤的色散特性吸引了众多学者的关注。塑料光纤的大芯径决定了它的带宽主要由模间色散引起。微分模延迟(DMD)表征的是不同模群在没有发生模式耦合的情况下,在光纤中传输时到达接收端的相对时间延迟,这种到达接收端的时间差就是模间色散。

目前为了提高塑料光纤的带宽,主要采用两种方法:一是通过合理构建塑料光纤的折射率以满足最优化的抛物线型分布^[4];另一种是通过选择激励,即在光纤输入端选择激励小部分模式,以降低光纤的模间色散^[5,6]。实验发现,测量微分模延迟比测量折射率分布更容易看出光纤对最佳折射率分布的偏移,是生产厂家合理改进工艺,优化光纤性能的诊断工具之一^[7]。在第二种提高塑料光纤带宽的方法中,知道了光纤的微分模延迟将有助于更好地选择要激励的模群,使得激励模群的模间色散最小。因此,微分模延迟的测量对研究塑料光纤的色散特性具有非常重要的意义。

石英光纤的微分模延迟测量分时域法和频域法两种。时域法通过在输入端选择激励不同模群,利用脉冲调制信号和取样示波器,直接确定脉冲峰值的相对延迟分布。这种方法的测量精度受限于窄光脉冲的周期以及系统的灵敏度,一般只能达到 ± 10 ps^[8]。频域法利用正弦调制信号,测量不同模群经过光纤传输后的相位差,得到光纤的微分模延迟^[9]。相比较而言,频域法测量光纤的微分模延迟比时域法具有更高的精度,可达到 0.2 ps^[10]。要精确测量光纤微分模式延迟,必须保证光纤没有发生显著的模式耦合。与石英光纤相比,塑料光纤的模式耦合长度要短得多,一般模式耦合在光纤长度仅为几米的时候就发生。在这么短的光纤中测量微分模延迟对系统的时间精度有很高的要求。

本文采用频域相移法测量了阶跃型塑料光纤(SI-POF)和渐变型塑料光纤(GI-POF)的微分模式延迟。利用频域相移法测量塑料光纤的微分模延迟,方法简单、操作容易、精度高。通过比较不同长度塑料光纤的微分模延迟,还可在一定程度上分析光纤中的模式耦合,为进一步研究塑料光纤的色散特性提供相关的依据。

2 实 验

实验中采用的阶跃型塑料光纤(Agilent Co. Ltd.),其纤芯折射率 $n_1 = 1.492$,包层折射率 $n_2 =$

1.417,数值孔径NA为0.467。渐变型塑料光纤为中国科学院化学研究所研制,折射率近似符合抛物线分布。光纤中激励的模群与注入条件及光线的折射率分布满足如下条件^[11]:

$$\frac{m}{M} = \left[\left(\frac{r}{a} \right)^\alpha + \left(\frac{\sin \theta}{\sin \theta_c} \right)^2 \right]^{(\alpha+2)/2\alpha}, \quad (1)$$

其中 M 为光纤中传输的总模数, m 为光纤中传播常数相等的模群的模号, r 为偏离光纤中心的距离, a 为光纤的半径, θ 为注入光与光纤轴线的夹角, θ_c 为光纤的数值孔径, α 为折射率分布拟合为指数分布的幂指数。

对阶跃型塑料光纤, $\alpha = \infty$, (1)式变为

$$\frac{m}{M} = \frac{\sin \theta}{\sin \theta_c}. \quad (2)$$

对折射率分布近似满足抛物线分布的渐变型塑料光纤, $\alpha = 2$, (1)式变为

$$\frac{m}{M} = \left(\frac{r}{a} \right)^2 + \left(\frac{\sin \theta}{\sin \theta_c} \right)^2. \quad (3)$$

所以,在实验中,为激励不同的光模,对不同类型的光纤须采用不同的输入端选模。对阶跃型塑料光纤,我们采用改变注入光的入射角度 θ 来激励不同模号的光模;而对渐变型塑料光纤,选择注入光的入射角 $\theta = 0$,然后通过改变注入光斑离开纤芯距离 r 的变化来激励不同模号的光模。

图1是测量塑料光纤微分模延迟的实验装置示意图。测量阶跃型塑料光纤时,半导体激光器MDL300发出的波长650 nm的红光经射频调制,通过数值孔径NA为0.1的透镜直接聚焦入射到塑料光纤端面上。对渐变型塑料光纤,激光器发出的红光先聚焦到单模石英光纤上,然后通过石英光纤耦合到塑料光纤端面。石英光纤和塑料光纤的两端均固定在可三维调节的支架上。转动塑料光纤的输入端可控制入射光的方向。用CCD摄像头观察控制石英光纤端面到塑料光纤纤芯的距离。塑料光纤输出端接光探测器(S7861,日本滨松公司)。为了适应网络分析仪的测量范围,探测器尾端接宽带放大器,然后输入到矢量网络分析仪(Agilent 8722ES)。

在不同注入条件下测量矢量网络分析仪 S_{21} 参量的相位角的差异,可以计算光纤的微分模式延迟。

$$\phi_i = 2\pi f_0 \tau_i, \quad (4)$$

ϕ_i 为测量的微分相位, f_0 为调制频率, τ_i 为第 i 个模式群相对于某个给定的模式群(假定其 $\tau = 0$)的相对延迟。

Agilent 8722ES 矢量网络分析仪可以调制40 GHz的信号,只要系统的配套设备许可,该方法

测量的精度非常高。实验中选择调制频率为 1 G, 可以达到 0.027 ps 的精度。网络分析仪测量的相位角最小精度为 0.01° , 这样

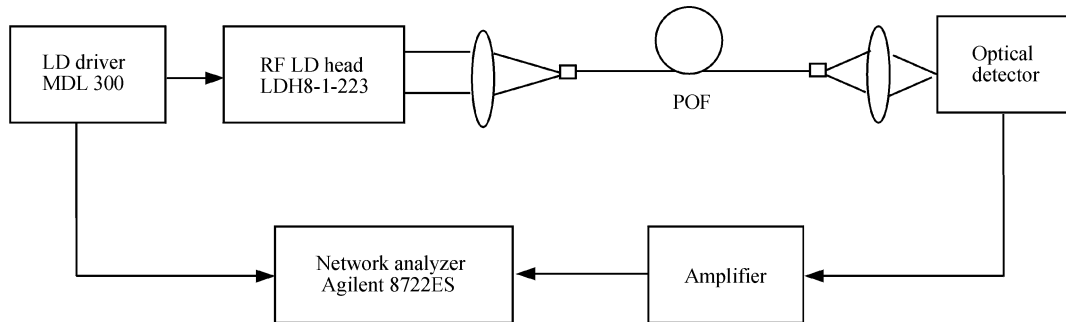


Fig. 1 The schematic experiment setup for measuring the DMD of POFs

3 结果和讨论

图 2 是 1 m、5 m、15 m 的阶跃型塑料光纤的微分模式延迟曲线,横坐标对应于阶跃型塑料光纤中传输的模阶,纵坐标表示各阶模与 0 阶模的相对延迟(假定 0 阶光模对应于 0 延迟)。正值表示高阶模比 0 阶模晚到的时间,负值则表示高阶模比 0 阶模早到的时间。图中还给出了应用射线理论^[12]计算的该阶跃型塑料光纤的理论微分模延迟曲线。

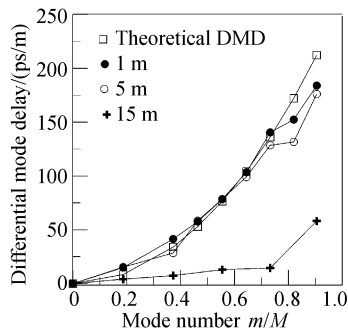


Fig. 2 Differential mode delay of SI-POF at different lengths

由图 2 可见,1 m、5 m 阶跃型塑料光纤的微分模延迟曲线与理论计算的曲线吻合得比较好,尤其是模号 m/M 在 $0 \sim 0.7$ 的范围内。超过这个范围,测量得到的微分模延迟小于理论值。5 m 的微分模延迟比 1 m 的更小。

应用射线理论计算阶跃型塑料光纤微分模延迟的理论值时,没有考虑光纤的模式耦合和模式衰减。事实上,阶跃型塑料光纤中不可避免地存在模式耦合和模式损耗。用光纤的远场辐射图分析阶跃型塑料光纤的模式耦合时发现^[13],1 m 和 5 m 的阶跃型塑料光纤的远场辐射图均呈现功率峰值对应于入射角的圆环型,表明阶跃型塑料光纤在 1 m 到 5 m 的

过程中还没有发生模式耦合。此外,阶跃型塑料光纤高阶模的损耗比低阶模的损耗要大得多,尤其是靠近临界入射角时的光模,即 m/M 超过 0.8 的范围内,光纤的微分模损耗很大^[13]。因此,入射角度越大,光纤长度越长,激励的高阶模的损耗也越大,实验中测得高阶模的几率减小。所以,考虑微分模损耗时,对模号 m/M 大于 0.7 的高阶模,实验测量值小于理论计算值,5 m 光纤的微分模延迟比 1 m 的更小。上述结果表明,用频域相移法测量阶跃型塑料光纤的微分模延迟曲线是可行的。

图 2 中还可见,不管是 1 m、5 m 还是 15 m 的阶跃型塑料光纤,高阶模都延迟于 0 阶模。模阶越高,延迟的时间越长。与 1 m 和 5 m 光纤相比,15 m 的光纤对应的微分模延迟曲线的变化明显比前二者要慢。不仅各高阶模与 0 阶模的相对延迟差减小,而且相邻模之间的延迟差也减小。这种微分模延迟随光纤长度的变化趋势在一定程度上反映了阶跃型塑料光纤中存在的模式耦合:当光斑以不同的入射角注入到光纤的输入端时,尽管开始都只激励起一种模号的光模,但是在光传播的过程中,由于光纤内部存在各种小缺陷及外在的压力、弯曲等,光功率会分配到其它模式中去,同时光纤能量在这些模式之间相互传递,这就是模式耦合。如果光纤的长度足以使模式耦合发生,那么测得的结果是模式之间能量耦合的平均的结果。由于模式耦合的存在,光功率在各模式间分布达到平衡,因此相邻注入模间的延迟差将减小;当模式耦合完成时,相邻模间的延迟差将非常小。我们在用远场辐射图分析阶跃型塑料光纤的模式耦合时发现^[13],光在阶跃型塑料光纤中传输 15 m 时,光纤的远场辐射图呈现圆盘形状,与入射角度无关。表明光在阶跃型塑料光纤中传播 15 m 时模式耦合基本完成,达到平衡模式状态分

布。因此,15 m 阶跃型塑料光纤的微分模延迟曲线的变化明显比 1 m 和 5 m 的要缓,相邻模的延时差也减小。可见,不同长度阶跃型塑料光纤的微分模延迟曲线的变化趋势在一定程度上反映了光纤中的模式耦合。

图 3 是 1 m 和 15 m 渐变型塑料光纤的微分模延迟曲线。图中还给出了利用 WKB 法^[14]得到的理论微分模延迟曲线。由图 3 可见,1 m 渐变型塑料光纤的实验测量微分模延迟值与理论值吻合得比较好。这是因为 1 m 渐变型塑料光纤可以忽略光纤中的模式耦合及模式损耗因素的影响。因此,利用频域相移法同样可以精确地测量渐变型塑料光纤的微分模延迟。

图 3 表明,不管是 1 m 还是 15 m 的渐变型塑料光纤,随着入射光斑离开纤芯的距离 r 的增大,激励的光模的延迟也越大。即高次模的延迟比低次模的要大。但是与 1 m 的测量值相比,15 m 渐变型塑料光纤的测量模延迟值与理论值相差比较大,各模阶之间的延迟差减小,与 0 阶模的相对延迟时间也减小。我们认为,这个实验现象可能是光纤中的模式耦合和微分模损耗共同作用引起的。到底是模式耦合还是微分模损耗对渐变型塑料光纤的模间色散起主要作用,尚存在争议^[15]。

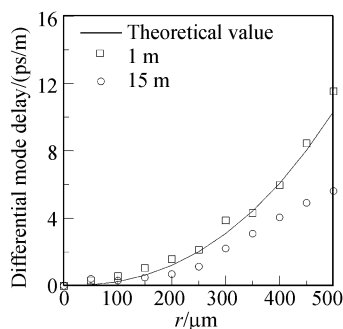


Fig. 3 Differential mode delay of GI-POF at different lengths

与图 2 中阶跃型塑料光纤的微分模延迟相比,渐变型塑料光纤的微分模延迟要小得多。可见,合理构建光纤的折射率分布,可以大大减小光纤的模间色散。

结论 利用频域相移法测量了不同长度阶跃型塑料光纤和渐变型塑料光纤的微分模延迟。1 m 光纤的实验测量值与不考虑模式耦合和模式损耗的理论值吻合得很好。通过比较不同长度阶跃型塑料光纤的微分模延迟曲线,可在一定程度上分析光纤中的模

式耦合现象。

参 考 文 献

- Xu Xingsheng, Wang Zhou, Ma Hui *et al.*. 100 Mb/s polymer optical fiber communication link system. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(1):38~40 (in Chinese)
- Yang Chun, Sun Xiaohan, Wang Yunming *et al.*. 1×7 cylindrical mixing-rod plastic optical fiber coupler. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(9):1116~1122 (in Chinese)
- Ren Jianhua, Yu Chongxiu, Wang Kuiru. Analytic resolution of waveguide dispersion in single mode fiber. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(11):1301~1304 (in Chinese)
- Takaaki Ishigure, Masataka Satoh, Osamu Takanashi *et al.*. Formation of the refractive index profile in the graded index polymer optical fiber for gigabit data transmission. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(11):2095~2100
- Haas Z, Santoro M A. A mode filtering scheme for improvement of the bandwidth-distance product in multimode filter system. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(7):1125~1131
- Raddatz L, White I H, Cunningham D G *et al.*. An experimental and theoretical study of the offset launch technique for the enhancement of the bandwidth of multimode fiber links. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(3):324~331
- Olahansky R, Oaks S M. Differential mode delay measurement. *Proc. Eur. Conf. Opt. Commun.*, 4th, 1978, Genova Italy, 128
- Bucker M J. Differential group delay measurement using single mode fiber excitation. *Proc. Conf. Precision Electromagnetic Measurement*, Braunschweig, Germany, 1980. 224~226
- Costa B, Mazzoni D, Puleo M *et al.*. Phase shift technique for the measurement of chromatic dispersion in optical fibers using LED's. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **18**(10):1509~1515
- Mechels S E, Schlager J B, Franzen D L. High-resolution differential-mode delay measurements in optical fibers using a frequency-domain phase-shift technique. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(6):794~796
- Olshansky R, Oaks S M. Differential mode attenuation measurements in graded-index fibers. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(11):1830~1835
- Keck D B. Spatial and temporal power transfer measurements on a low loss optical waveguide. *Appl. Opt.*, 1978, **13**(8):1882~1888
- Zheng Shilie, Zhang Xianmin, Chen Kangsheng. Far field pattern and differential mode attenuation of POF. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2003, **32**(12):1434~1437
- Li Zemin. *Fiber Communication (Principle and Technology)*[光纤通信(原理与技术)]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1991. 156~157 (in Chinese)
- Takaaki Ishigure, Mariko Kano, Yasuhiro Koike. Which is a more serious factor to the bandwidth of GI-POF: Differential mode attenuation or mode coupling. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(7):959~965