

文章编号: 0258-7025(2006)09-1234-05

聚合物光纤中的模式耦合及其对带宽的提高

张永生, 谢志国, 郑荣升, 林开群, 王建东, 姚功民, 杨绩文, 明海

(中国科学技术大学物理系, 安徽合肥 230026)

摘要 光在聚合物光纤(POF)中传输时存在较强的模式耦合, 由于模式耦合的影响, 聚合物光纤的传输带宽得以提高。根据能流方程对阶跃型聚合物光纤传输中的模式耦合进行了研究, 从实验上测量了聚合物光纤的模式耦合系数, 测量得到的模式耦合系数为 $7.61 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$ 。用测得的模式耦合系数对聚合物光纤中的模式耦合进行数值模拟, 得到聚合物光纤的模式耦合长度约为20 m。由模式耦合长度可以得到聚合物光纤的真正带宽, 其在150 m传输距离的带宽约为130 Mbit/s。为了验证这一结论, 进行了125 Mbit/s · 150 m的局域网(LAN)通信实验, 通过对发射、接收波形及通信眼图的分析表明, 由于模式耦合提高了聚合物光纤的传输带宽, 使其可以在150 m的距离上进行千兆速率的通信传输。

关键词 光通信; 模式耦合; 能流方程; 聚合物光纤

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Mode Coupling in Polymer Optical Fiber and Its Enhancement to Transmission Bandwidth

ZHANG Yong-sheng, XIE Zhi-guo, ZHENG Rong-sheng, LIN Kai-qun,
WANG Jian-dong, YAO Gong-min, YANG Ji-wen, MING Hai

(Physics Department, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract There existed strong mode coupling when light traveling in the polymer optical fiber (POF). Due to the mode coupling, the transmission bandwidth of POF was enhanced. The mode coupling of POF was studied based on the power-flow equation. The mode coupling coefficient of POF was measured experimentally, the measured coupling coefficient was $7.61 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$. The mode coupling process in POF was simulated numerically using measured coupling coefficient; a coupling length of 20 m was obtained. The real bandwidth of POF was revealed from the coupling length. The transmission bandwidth of POF was about 130 Mbit/s over 150 m. To testify the result, a 125 Mbit/s · 150 m local area network (LAN) POF communication experiment was carried out, the transmission waveform and communication eye diagram were analyzed. The experiment results showed that the transmission bandwidth of POF was enhanced by mode coupling, the transmission distance of POF could reach 150 m at data rate 125 Mbit/s.

Key words optical communication; mode coupling; power-flow equation; polymer optical fiber

1 引言

聚合物光纤(又名塑料光纤, POF)由于其较粗的芯径(0.3~3 mm)和良好的柔韧性, 所以连接方便, 耦合效率高, 光耦合不需微调, 不需昂贵的光纤

连接器等外围器件, 同时还具有耐震动、抗辐射、价格便宜、施工方便等优点, 适合作短距离光通信的传输材料。近年来将聚合物光纤用于短距离通信网络, 正在引起人们的重视^[1~3], 聚合物光纤将成为未

收稿日期: 2006-02-13; 收到修改稿日期: 2006-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(90201013)和安徽省自然科学基金(03042402)资助项目。

作者简介: 张永生(1977—), 男, 安徽淮北人, 中国科学技术大学博士研究生, 主要从事聚合物光纤特性及其应用方面的研究。E-mail: zys124@ustc.edu

导师简介: 明海(1947—), 男, 江苏人, 中国科学技术大学物理系教授, 博士生导师, 主要从事光学与光电子技术领域的研究和教学工作。E-mail: minghai@ustc.edu.cn

来光纤入户工程中的首选材料之一。聚合物光纤作为通信介质,传输带宽是其重要的参数,而聚合物光纤作为一种多模光纤,模式耦合是影响其带宽的主要因素之一。模式耦合是由于光纤内部的不连续性引起光的散射,或者由芯层和包层界面上的微弯造成的。模式耦合一方面造成了光纤损耗的增加,另一方面也会提高光纤的带宽。

聚合物光纤是一种大芯径的多模光纤,其中传输的模式可以达到 10^6 量级,如此多的传输模式造成光纤的模式色散十分严重,限制了聚合物光纤的带宽。然而,由于模式耦合的影响,起初分布在不同模式的能量并不会一成不变地传输下去,而是会在各模式间来回转换,最后造成的效果就是不同模式携带的能量以一个基本一致的平均速度传到光纤末端,因此大大提高了光纤的带宽。描述多模光纤模式耦合特性的参数有模式耦合系数 D 和耦合长度 L_c (光纤中模式达到均衡分布时的长度)。

本文根据 D. Gloge 的能流方程^[4],从实验上测得模式耦合系数 D ,采用这一参数数值模拟了能量传输过程中的模式耦合,得出聚合物光纤的耦合长度 L_c ,最后进行了 125 Mbit/s · 150 m 聚合物光纤通信实验以验证模式耦合对带宽的提高作用。

2 模式耦合系数的测量

D. Gloge 于 1972 年在基于两个假设的基础上推导出了适用于多模光纤的能流方程,这两个假设分别是:1) 能量耦合只发生在两个相邻的模之间;2) 光纤的归一化频率非常大,传输的模式非常多,模式间的差别很小,可以看成是连续的。推出的能流方程为^[4]

$$\frac{\partial^2 P(\theta, z)}{\partial z} = -A\theta^2 P + \frac{D}{\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\theta \frac{\partial^2 P}{\partial \theta} \right), \quad (1)$$

式中, $P(\theta, z)$ 为距入射端 z 处光强的角分布, θ 为光传输方向与光纤轴的夹角,如图 1 所示; $D = d_0[\lambda/(4an)]$ 为模式耦合系数,一般认为是常数, λ ,

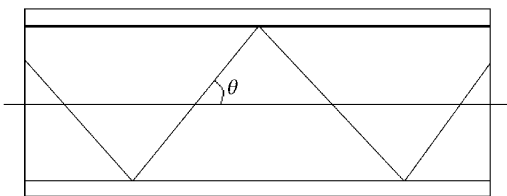


图 1 光在光纤中的传输

Fig. 1 Light transmitted in the optical fiber

a, n 分别为波长、芯径和折射率, d_0 为耦合系数展开式的零阶项, $d(\theta) = d_0 + a\theta^2 + \dots$; A 为模式损耗系数 $\alpha(\theta)$ 展开式的二阶项系数, $\alpha(\theta) = \alpha_0 + A\theta^2 + \dots$ 。由(1)式可以得到^[5]

$$\log \theta_t = \frac{1}{2} \log l + \log 2D^{1/2}, \quad (2)$$

式中 l 为光纤长度, θ_t 为光在光纤中传输的光束入射角,只要在实验上测得 θ_t 就能够求出聚合物光纤的模式耦合系数 D 。

根据以上分析,对待测聚合物光纤的 θ_t 进行了测试。相关参数:芯径为 1 mm,数值孔径为 0.5,损耗为 160 dB/km,纤芯折射率均为 1.492,光纤长度为 10 m。实验结果如图 2 所示。图中纵轴为归一化光强,横轴为出射角。从图 3 可以看出入射角为 10° 时远场图样为环状,但当入射角减少到 9.5° 时,远场图样变成圆盘状,因此可以认为待测聚合物光纤的转换角 θ_t 为 10° ,代入(2)式,并考虑到聚合物光纤的长度为 10 m,可以得出其耦合系数 D 为 $7.61 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$ 。这个数值比石英光纤中的模式耦合强度大一到两个数量级^[6],这是因为聚合物光纤本身材料的不同以及制造过程中产生了较多的缺陷。上述模式耦合系数的数值与文献^[7]报道的数值较为吻合。

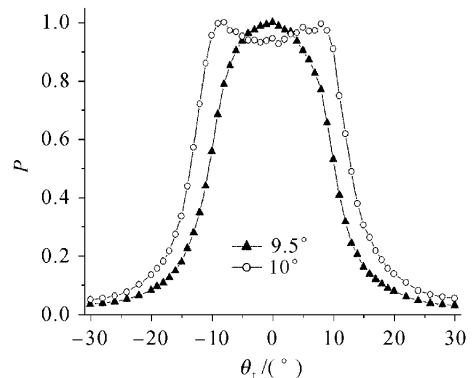


图 2 θ_t 的测定

Fig. 2 Measurement of θ_t

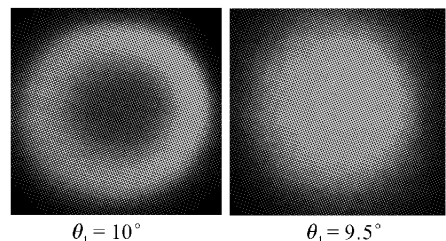


图 3 光纤出射端的远场图样

Fig. 3 Output far field pattern of the optical fiber

3 数值模拟

为了得到聚合物光纤耦合长度 L_c 的数值,采用实验测得的聚合物光纤耦合系数 D 对(1)式进行数值模拟,在进行数值模拟之前首先对(1)式进行一些必要的近似和变形以利于计算。除了在临界角附近, A 是一个很小的数值,可以忽略不计,这样(1)式可以写成^[8]

$$\frac{\partial P(\theta, z)}{\partial z} = \frac{D}{\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\theta \frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} \right), \quad (3)$$

其边界条件为 $P(\theta_c, z) = 0,$ (4)

$$D \frac{\partial P}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0} = 0, \quad (5)$$

(4)式表示传输角大于临界角的模式损耗无限大,其中 θ_c 为光纤的全反射临界角,(5)式表示模式耦合只发生在传输角大于零的那些模式。(3)式又可以写成

$$\frac{\partial P(\theta, z)}{\partial z} = \frac{D}{\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \frac{\partial P(\theta, z)}{\partial \theta} + D \frac{\partial^2 P(\theta, z)}{\partial \theta^2}, \quad (6)$$

可以用差分法对(6)式进行数值模拟,首先对其进行离散化,写成迭代的形式

$$P_{i,j+1} = \left(\frac{\Delta z D}{\Delta \theta^2} - \frac{\Delta z D}{2\theta_{i,j} \Delta \theta} \right) P_{i-1,j} + \left(1 - \frac{2\Delta z D}{\Delta \theta^2} \right) P_{i,j} + \left(\frac{\Delta z D}{2\theta_{i,j} \Delta \theta} + \frac{\Delta z D}{\Delta \theta^2} \right) P_{i+1,j}, \quad (7)$$

式中 i, j 分别为计算步长 $\Delta \theta, \Delta z$ 的序号,此时边界条件(4)式和(5)式变为

$$P_{N,j} = 0, \quad (8)$$

$$P_{0,j} = P_{1,j}, \quad (9)$$

式中 $N = \theta_c / \Delta \theta$ 为 θ 方向的格点数。入射光采用高斯光束近似

$$P(\theta, 0) = \exp \left[-\frac{(\theta - \theta_0)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (10)$$

θ_0 为入射高斯光束与光纤轴的夹角, σ 与高斯光束特性有关。 θ_0 取 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 和 15° , D 取 $7.61 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$ 。对聚合物光纤光传输的过程进行数值模拟的结果如图 4 所示。

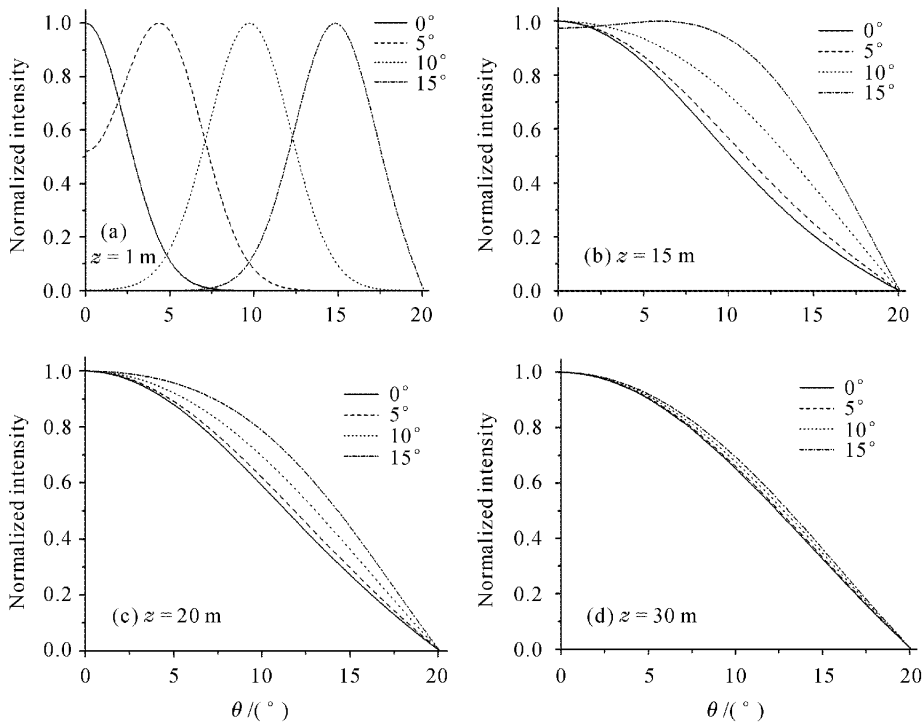


图 4 不同长度聚合物光纤在不同光入射角时出射光强的角分布

Fig. 4 Output angular power distribution at different POF lengths with different input angles

从图 4(a)可以看出,在 1 m 的距离内聚合物光纤中的模式耦合不是很大;但当光纤长度为 15 m 时(图 4(b)),模式耦合已经非常可观了,高阶模和低阶模已经充分地相互耦合,很接近模式均衡分布了。当聚合物光纤的长度达到 20 m 时(图 4(c)),各不同

入射角的出射光强角分布相差基本不大,可以认为已经达到模式均衡分布了,即此聚合物光纤的耦合长度约为 20 m。当聚合物光纤的长度为 30 m 时(图 4(d)),出射光强的角分布基本与入射角无关,光纤内部的能量分布达到稳态。

4 通信实验

为了验证聚合物光纤中的模式耦合可以提高聚合物光纤的通信带宽,进行了长距离高速聚合物光纤的通信实验。

一般认为 SI 型聚合物光纤 100 Mbit/s 速率的传输距离在 100 m 以内,甚至 50 m 以内^[9,10],限制聚合物光纤传输距离的因素主要有两个:传输损耗和主要由模式色散引起的带宽减小。传输损耗可以由提高光源的发射功率解决。对于普通商用 SI 型聚合物光纤的带宽,可以由射线光学的方法估算出

$$B_{w0} = 2cn_2/L(NA)^2, \quad (11)$$

式中 B_{w0} 为没有模式耦合时多模光纤的带宽, c 为光速, n_2 为光纤芯层折射率, L 为传输距离, NA 为聚合物光纤的数值孔径。对于上面实验用的聚合物光纤, $n_2 = 1.492$, $NA = 0.5$, 可以计算其 150 m 的传输带宽约为 25 MHz 左右,显然不能满足百兆速率的传输要求。

上述估算带宽时没有考虑到模式耦合对聚合物光纤带宽的影响。事实上,聚合物光纤的带宽在有模式耦合和没有模式耦合的情况下,存在的关系为^[11]

$$B_{wc}/B_{w0} = (L/L_c)^{1/2}, \quad (12)$$

式中 B_{wc} 为存在模式耦合时的光纤带宽。把(11)式代入(12)式可以得到

$$B_{wc} = 2cn_2(LL_c)^{-1/2}/(NA)^2, \quad (13)$$

从(13)式可以看出,由于模式耦合的影响 SI 型聚合物光纤传输时带宽的减小不是与传输距离成反比关系,而是与传输距离的平方根成反比。把相关参数代入,可得上述聚合物光纤 150 m 传输距离的带宽约为 65 MHz,对于用两电平信号的传输系统,可达到的传输速度约为 130 Mbit/s,完全可以满足百兆系统的传输要求。

基于以上分析进行了基于快速以太网协议的 125 Mbit/s · 150 m 聚合物光纤局域网传输实验,图 5 为实验框图。

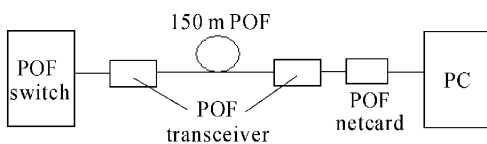


图 5 局域网传输实验框图

Fig. 5 LAN communication experimental setup

图 5 使用了自行研制的聚合物光纤交换机和聚

合物光纤网卡^[12,13]。聚合物光纤交换机是针对聚合物光纤作为传输介质的网络交换设备,由聚合物光纤传输的光信号连接到聚合物光纤交换机某端口的光收发模块,经过光电转换送到交换芯片进行处理,处理完毕后送到相应端口的光收发模块,通过光电转换发送到聚合物光纤。聚合物光纤网卡的原理是:聚合物光纤传输的信号由光电转换器转换成 100Base-FX 的射极耦合逻辑电路(ECL)电位信号,送入以太网控制芯片进行信号处理,然后通过外接设备连接总线(PCI)与计算机进行通信互连。其中的光收发模块的光源为半导体激光二极管,发射波长为 650 nm,发射功率为 7.1 dBm,探测由 PIN 管完成,探测灵敏度为 -27 dBm,150 m 聚合物光纤的一端接在聚合物光纤交换机的收发模块上,另一端接在聚合物光纤网卡的光收发模块上,交换机和计算机通过聚合物光纤实现信号连接,组成一个局域网系统。

采用 500 MHz 数字示波器对系统的通信性能进行分析,图 6 为光收发模块的发射、接收信号的波形以及系统的通信眼图。从图 6(a), (b) 中可以看出,信号没有太大的畸变,说明由于模式耦合的作用,光纤的模式色散未对信号造成严重的影响。图 6(c) 为通信眼图,可以定性地判断通信质量的好坏,从图中可以看出眼张开得较大,线条较清晰,图形稳定且对称,由此说明通信系统的通信质量较好。

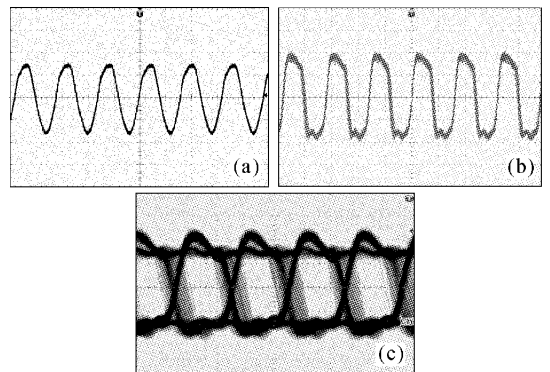


图 6 系统的发射(a),接收(b)信号波形和通信眼图(c)
Fig. 6 Emitted (a), received (b) signal waveforms and eye diagram (c) of the communication system

5 结论

从 D. Gloge 的能流方程^[4]出发,测量了聚合物光纤的模式耦合系数,测量结果与文献报道一致。模式耦合系数 D 为 $7.61 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{m}$,可见聚合物光纤具有较强的模式耦合,其模式耦合强度比石英

光纤大了一到两个数量级。模式耦合主要是由于聚合物光纤内部的缺陷造成的,这与聚合物光纤材料本身以及其制造过程有关。最后进行的通信实验表明聚合物光纤由于模式耦合的作用,带宽有明显提高,可以进行较长距离的高速传输,改变了一般认为的大数值孔径阶跃型聚合物光纤的百兆传输距离在100 m以内的观点,为聚合物光纤的通信应用提供了理论和实验基础。

参 考 文 献

- 1 M. A. Losada, J. Mateo, I. Garcés *et al.*. Analysis of strained plastic optical fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(6):1513~1515
- 2 T. Kibler, S. Pofnerl, G. Böck *et al.*. Optical data buses for automotive application [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(9):2184~2199
- 3 Yang Chun, Bi Xiaofeng, Guan Zhiqiang. Optical power distribution in multimode polymer optical fiber under offset launching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9):1259~1264
杨 春,毕晓峰,管志强. 偏心激励聚合物光纤横截面的光功率分布[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9):1259~1264
- 4 D. Gloge. Optical power flow in multimode fibers [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1972, **51**(8):1767~1783
- 5 W. A. Gambling, D. N. Payne, H. Matsumura. Mode conversion coefficients in optical fibers [J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(7):1538~1542
- 6 V. Ruddy, G. Shaw. Mode coupling in large-diameter polymer-clad silica fibers [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(6):1003~1006
- 7 J. Zubia, G. Durana, G. Aldabaldetrekú *et al.*. New method to calculate mode conversion coefficients in Si multimode optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(3):776~781
- 8 A. Djordjevich, S. Savovic. Investigation of mode coupling in step index plastic optical fibers using the power flow equation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(11):1489~1491
- 9 M. Loch. Plastic optical fibers: properties and practical applications [C]. *SPIE*, 2004, **5596**:299~308
- 10 S. Savovic, A. Djordjevich. Influence of numerical aperture on mode coupling in step-index plastic optical fibers [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(29):5542~5546
- 11 A. F. Gartio, J. Wang, R. Gao. Effects of random perturbations in plastic optical fibers [J]. *Science*, 1998, **281**(5379):962~967
- 12 Yongsheng Zhang, Hui Ma, Tao Zhang *et al.*. Technical study of visible light wavelength division multiplexing using polymer optical fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(10):577~578
- 13 Xu Xingsheng, Wang Zhuo, Ma Hui *et al.*. 100 Mb/s polymer optical fiber communication link system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1):38~40
许兴胜,王 茁,马 辉等. 100 Mb/s 聚合物光纤通信链路系统[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):38~40