

文章编号: 0258-7025(2004)02-0177-04

# 周期性扰动对多模光纤传输性能的影响

汪洪海, 童维军

(长飞光纤光缆有限公司研发部, 湖北 武汉 430073)

**摘要** 介绍了通过在多模光纤中引入周期性的扰动以改善多模光纤的传输特性。这种周期性的扰动是在光纤拉制过程中, 通过相对于预制棒的光纤转动而实现的。对光纤进行的差分模式延迟(DMD)测试表明, 扰动在一定程度上可以改善光纤中脉冲的分裂。

**关键词** 光电子学; 多模光纤; 周期性扰动; 色散; 手性结构; 差分模式延迟

**中图分类号** TN 012 **文献标识码** A

## Effect of Periodic Scrambling on the Transmitting Characteristic of Multimode Fibers

WANG Hong-hai, TONG Wei-jun

(R&D Department of Yangtze Optical Fiber and Cable Co. Ltd, Wuhan, Hubei 430073, China)

**Abstract** In this paper, the transmitting characteristic of multimode fiber is improved by introducing the periodic scramble during the fiber's drawing process. The scramble is some periodic and continuous left- or right-turning, so-called handedness structure, by turning the fibers relative to the preform during the course of drawing process. The differential mode delay (DMD) test shows that this scrambling can reduce the split of optical pulse and improve the transmitting characteristic of multimode fiber.

**Key words** optoelectronics; multimode fiber; periodic scramble; dispersion; handedness structure; differential mode delay (DMD)

### 1 引言

通信用的多模光纤和单模光纤的主要区别在于多模光纤中可以激发出多个稳定的光学传导模,而在单模光纤中,只有一个稳定的传导模式,因此影响多模光纤色散特性的不仅有材料色散和波导色散,最主要的是模间色散的影响。模间色散即由于不同的光学传导模式在光纤中传输时因光径不同而导致的脉冲扩展。这种脉冲扩展是限制多模光纤带宽的主要原因。通过差分模式延迟(DMD)测试<sup>[1]</sup>,可以较好地了解多模光纤的这种模间色散。根据多模光纤的波导理论,对于一个理想的光学波导,不同的传输模式可以稳定地在波导中沿不同的路径传输,而相互不发生模式的转换。但是如果在波导中引入某种

扰动,即结构的不均匀性将发生不同模式群组,或组内模式的转换,导致模式能量的转换。这种模式的转换会产生两种结果:一是改善波导的色散特性,二是增加波导的损耗。

对如何在多模光纤内引入这种扰动,曾经提出许多设想:交替沉积掺杂和无掺杂玻璃的方法引入折射率的多相性增加模转换;在光纤预制棒中蚀刻出槽形结构引入光纤的芯径波动以加强模式的转换等,但这些方法基本上存在着下列缺陷:

1) 可操作性差:无论是预制棒的蚀刻,或不同折射率材料的沉积,在缺少专用设备的情况下,其重复性和成品率都是相当低的。而且这种复杂的制造过程将极大地增加光纤的制造成本,在生产上难以实现。

收稿日期: 2002-09-19; 收到修改稿日期: 2002-11-20

作者简介: 汪洪海(1970—),男,浙江省人,副教授,博士,现主要从事多模光纤的研发以及光纤的测试工作。E-mail:

hhw1970@163.com

2) 兼容性差 这种几何或折射率分布异于常规的多模光纤, 无法兼容现有的传输系统, 需要特别开发的光学器件配套使用。因此事实上不可能使用。

3) 附加损耗大 这种在结构上明显引入的不均匀性, 会显著增加波导的附加损耗, 这对通信光纤而言, 是不能容忍的。

另一种在光纤中引入不均匀性的方法, 是在光纤的拉制过程中引入“手性结构”。从理论上说, 在多模光纤中引入这种“手性结构”, 可以加强多模光纤中不同模式和模式群的能量转换, 减少光纤的色散大小。而且这种方法的显著优点在于, 它通过在光纤的拉制过程中周期性搓动光纤引入“手性结构”, 具有可操作性; 同时没有改变光纤的几何和光学结构, 和普通多模光纤完全兼容; 而且这种微扰过程不会明显增加光纤的损耗特性。本文讨论了这种“手性结构”, 即周期性的左螺旋或右螺旋扰动对多模光纤的影响。

## 2 理论基础

当光脉冲在多模光纤中传输时, 其脉冲宽度将发生变化, 这种脉冲宽度的畸变正是由于光纤的色散造成的。因此在理论上可以用脉冲响应宽度  $\tau_Q$  来表征多模光纤的色散状况。根据多模光纤的波动理论, 如果光纤的波导结构是理想的, 其脉冲响应宽度的大小将和脉冲的传输距离  $z$  成正比, 在这种状况下, 波导中没有模式的转换。但实际上, 光纤的脉冲响应宽度正比于  $z^{1/2}$ 。分析表明, 这是因脉冲在波导中传输时, 由于各种不均匀性的存在, 包括光纤径向和轴向的不均匀性, 发生了模式间的相互转换, 这种模转换具有统计性。研究表明, 脉冲响应宽度  $\tau_Q$  和传输距离  $z$  之间的关系可表述为<sup>[2]</sup>

$$\tau_Q = \frac{T}{2} \left[ \gamma_\infty \left( 1 - 2e^{-2\gamma_\infty z} \right) + \frac{3}{4} - e^{-2\gamma_\infty z} + \frac{1}{4} e^{-4\gamma_\infty z} \right]^{1/2} \quad (1)$$

其中

$$T = \frac{n_1}{2cA}, \quad \gamma_\infty = \frac{\lambda}{2an_1} (d_{mn}A)^{1/2} \quad (2)$$

(2) 式中  $n_1$  为多模光纤的中心折射率,  $c$  为真空中的光速,  $A$  为光纤的芯半径,  $\lambda$  为光的中心波长,  $A$  为与波导不均匀性相关的衰减系数,  $d_{mn}$  为模间的耦合系数。

对(1)式的分析表明, 当  $z \ll 1/\gamma_\infty$  时,  $\tau_Q/T$  逐渐

趋近于  $\gamma_\infty z$ , 与传输距离成正比, 表示了短光纤没有模变换影响的情况。相反, 在超过  $z_c = 1/(4\gamma_\infty)$  的区域, 它逐渐趋近于  $\tau_Q = (T/2)(\gamma_\infty z)^{1/2}$ , 这是因模变换的统计性, 导致脉冲宽度和  $z^{1/2}$  成正比。因此, 为改善光纤的色散特性, 最好让  $z_c$  小一些, 为此, 必须增大  $\gamma_\infty$ 。

分析(2)式, 为增大  $\gamma_\infty$ , 可以减少  $a$  和  $n_1$ , 表明小的光纤芯径或小的光纤数值孔径是改善多模光纤色散的有效措施; 或者增加  $A$  值, 而  $A$  值的增加也增加了光纤的本征衰减, 所以这些措施对标准光纤而言都是不可取的。因此只有增加波导的模间耦合系数  $d_{mn}$ 。

根据波导理论, 模间耦合系数为<sup>[3]</sup>

$$d_{mn} = - \frac{\iint (n^2 - n_r^2) e_n^* \cdot e_m ds}{\iint |e_n|^2 ds} \quad (3)$$

其中  $n_r^2(x, y)$  为正规光波导的折射率分布, 而  $n^2(x, y, z)$  为非正规光波导的折射率分布。

(3) 式表明, 当实际波导的折射率分布  $n^2(x, y, z)$  等于正规波导的折射率分布  $n_r^2(x, y)$  时,  $d_{mn}$  为 0, 不存在模间转换, 波导中不同的模式可以稳定地、互不影响地传播。而当  $n^2(x, y, z) \neq n_r^2(x, y)$  时, 不同模式发生耦合和能量的相互转换, 且越相近的模式间耦合的可能性越大。因此, 在光纤波导中以某种形式引入折射率变化, 将会增加模式的耦合, 进而改善多模光纤的色散特性。

## 3 实验过程

本实验使用长飞公司用等离子体气相沉积法 (Plasma-activated Chemical Vapor Deposition, PCVD) 沉积融缩而成的 62.5/125  $\mu\text{m}$  Concept 梯度折射率多模光纤预制棒。该预制棒使用 600 m/min 高速拉丝, 其中一半光纤正常拉丝, 一半光纤在拉丝时开动偏振模色散 (PMD) 搓动装置, 使得控制的光纤相对于预制棒进行反复的左螺旋或右螺旋运动, 其旋转周期大约每米光纤长度 60 ~ 80 转。所控制的光纤被切成 8 km 或 4 km 段长, 进行正常的几何、衰减、带宽测试, 每段光纤均使用 PK2500 多模光纤带宽测试仪进行 DMD 测试。

## 4 实验结果和分析

图 1 和图 2 分别是波长为 850 nm 和 1300 nm

时沿长度方向光纤的相对衰减和带宽分布情况。其中分隔线左边是施加了周期性扰动的光纤,右边没有施加周期性扰动。由图 1 可以发现,光纤的 850 nm 和 1300 nm 波长的衰减没有明显的区别,表明这种 PMD 搓动装置所施加的扰动并没有对光纤的衰减特性有明显的影 响。这种结果是可以预期的,因为 PMD 扰动装置是用于降低单模光纤的 PMD 特性的。分析图 2 的带宽分布曲线,也不能表明扰动对光纤带宽的影响,说明这种周期性的扰动也不能对多模光纤的满注入(Over Filled Launch,OFL)带宽产生明显的改善。可以说使用 PMD 扰动装置对多模光纤的影响是有限的。由于正常的多模光纤也存在着许多结构上的不均匀性,比如轴向的几何波动和径向的折射率偏离。因此使得实验中所施加的“手性结构”对多模光纤的影响在带宽特性上无法明显地反映出来。

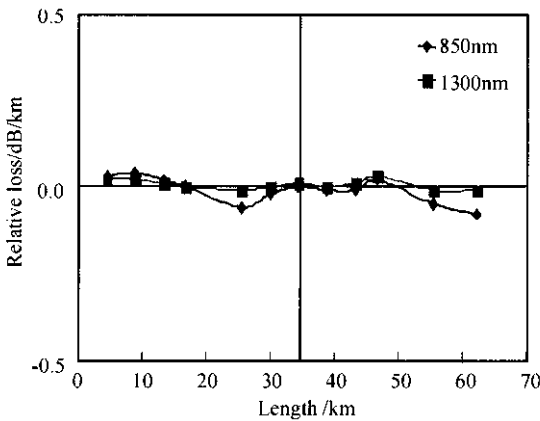


图 1 光纤的相对衰减分布曲线

Fig. 1 Distribution of relative attenuation of fiber

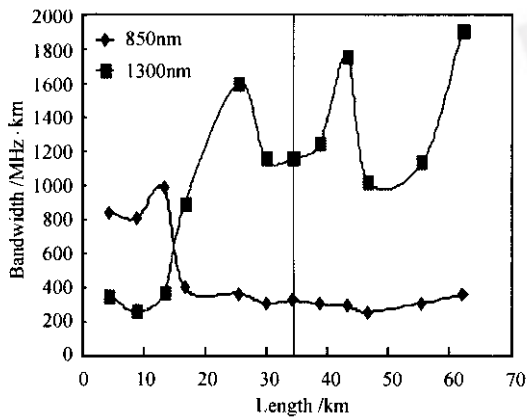


图 2 光纤的带宽分布曲线

Fig. 2 Bandwidth distribution of fiber

位置注入激光脉冲,激发出多模光纤不同的传导模式群,在光纤的另一端用光学示波器测试脉冲的展宽、分裂以及不同位置的相对延迟,了解多模光纤的结构和折射率分布状况。

实验中测试比较了相邻两段光纤的 DMD 分布,其中一段光纤被施加了周期性扰动,另一段光纤未被施加周期性扰动。由于这两段光纤是相邻的,因此它们的几何、衰减和 OFL 带宽均相似。图 3 是它们的 DMD 测试曲线的比较图。图中实线表示被扰动光纤的 DMD 测试结果,虚线表示未扰动光纤的 DMD 测试结果。测试用多模光纤的长度均为

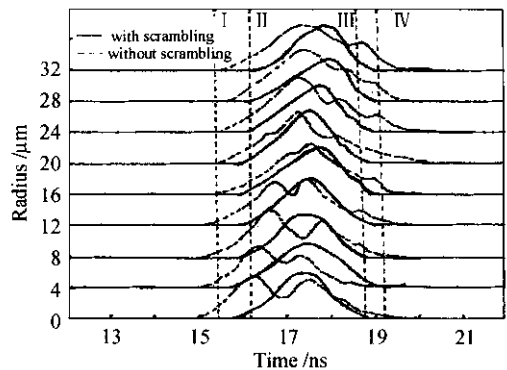


图 3 多模光纤的 DMD 测试图

Fig. 3 Comparison of result of DMD tests

4.4 km。测试使用的是 PK2500 多模光纤分析仪,1300 nm 波长的激光光源,脉冲宽度为 14 ps,谱宽为 10 nm,光斑半径约为 10 μm。由图可知,未扰动光纤的传输光脉冲在中心部分明显有分裂现象,形成了两个波包。出现这种情况的主要原因是当管内法制造光纤时,由于在融缩过程中的高温过程导致沉积管内壁材料的挥发,使得制备光纤的中心部分折射率下降。这种中心折射率下降即是光纤制造中的“中心凹陷”现象。“中心凹陷”使得在中心部分传输的低阶模传输快于其他模式,最终导致光脉冲的分裂。由于 PCVD 法制造的多模光纤可以较好地控制折射率和“中心凹陷”的大小,因此脉冲分裂情况也并不严重。图中被扰动光纤的输出脉冲是一个完整的波包,没有出现分裂,说明经过 PMD 装置的搓动,光纤中所固化的结构不均匀性使得光纤中所传输的模式转换更为彻底,低阶模和高阶模在传输过程中能够很好地相互转化,因此输出的脉冲为一完整的波形。

这种脉冲的轻微分裂对于使用发光二极管(LED)光源的低速通信系统的影响很小。但对于使

差分模延迟能够精确测试多模光纤的结构特征,它的基本原理是:在多模光纤的一个端面的不同

用激光光源的高速系统,影响将是相当严重的。分裂的光脉冲在高速系统中可能被认为两个脉冲信号而导致误码,使系统性能下降<sup>[4]</sup>。同时,一般而言,脉冲分裂会使脉冲展宽更为严重。从图3也可看出这一点。图中,直线II,III是被扰动光纤的脉冲宽度,而直线I,IV是未扰动光纤的脉冲宽度。脉冲宽度以上升沿和下降沿的25%计算。

在多模光纤的制备过程中加以扰动,是为了开发具有更高性能的多模光纤。使用这种方法已经成功地制造了可用于1 Gbit/s或10 Gbit/s传输速率的多模光纤。

## 5 结 论

在多模光纤中引入“手性结构”的方法,即在光纤的控制过程中,使用搓动装置,使光纤相对于预制棒作反复的左螺旋或右螺旋运动,在光纤中形成周期性的不均匀性并研究了这种不均匀性对光纤传输性能的影响。这种光纤的优点包括:

1) 实用可操作:对光纤的结构不用做任何的改

变,无需特别的工艺方法和设备,仅利用已有的拉丝塔装置,就能够在生产中实现。

2) 附加衰减少:由于这种扰动相当于对光纤的一个微扰,因此没有发现明显的附加衰减,对光纤的衰减性能也没有影响。

3) 减少了脉冲的分裂情况,这种改善可能对高速传输系统用多模光纤有一定的积极意义。

## 参 考 文 献

- 1 Differential mode delay measurement of multimode fiber in the time domain [ S ]. USA TIA/EIA-455-220, FOTP-220
- 2 Translated by Liu Shihong, Liang Minji. Optical Fiber Basis [ M ]. Beijing: People's Post Press, 1980. 186  
大越孝敬 编,刘时衡,梁民基 译. 光学纤维基础 [ M ]. 北京:人民邮电出版社,1980. 186
- 3 Wu Chongqing. Optical Wave-guide Theory [ M ]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 100  
吴重庆. 光波导理论 [ M ]. 北京:清华大学出版社,2000. 100
- 4 Wang Honghai, He Zhenbao, Wang Song *et al.*. Development of ethernet multi-mode fiber [ J ]. *Commun. World*, 2002, ( 14 ) : 74 ~ 75  
汪洪海,何珍宝,汪松等. Gigabit以太网多模光纤的发展 [ J ]. 通信世界, 2002, ( 14 ) : 74 ~ 75