

高双折射光纤中模式耦合空间分布 的干涉测量法*

骆 飞

(南京航空航天大学学院测试工程系, 南京 210016)

黄尚廉

(重庆大学光电精密仪器研究所, 重庆 630044)

提 要

本文应用干涉技术测量高双折射偏振保持光纤中模式耦合点的空间分布. 测量系统由采用宽带半导体激光器作为光源的调制迈克尔逊干涉仪组成, 通过光程扫描方法探测沿高双折射光纤分布的模式耦合点.

关键词 干涉法, 模式耦合, 测量.

1 引 言

高双折射偏振保持光纤由于具有传输线偏振模的能力而具有重要的特殊应用价值^[1]. 当高双折射光纤受到外界扰动作用(如: 弯曲、压力等)或光纤本身内部波导缺陷等因素的影响时, 光纤中传输的线偏振模 HE_{11} 模和 HE_{11} 模在光纤受扰点将产生模式耦合^[2], 使传导模的偏振特性变化并影响光纤的消光比, 降低了光纤的保偏能力. 而在另一方面, 光纤的这种特性却可用于传感技术中, 对引起光纤中模式耦合的外界扰动参量进行传感^[3]. 因此, 探测光纤中的模式耦合对于高双折射光纤的制造和应用是十分有用的. 目前已相继研究采用偏振光时域反射技术(POTDR)和外差干涉技术进行测量^[4~6]. 本文研究采用经交流调制的迈克尔逊干涉技术探测沿高双折射光纤分布的模式耦合点, 这种方法具有空间分辨率高、测量系统和信号处理十分简便的特点.

2 测量原理

图1为测量系统原理简图. 以一宽带低相干度的半导体光源激励高双折射光纤中的一个线偏振模, 设为 HE_{11} 模. 当光纤的某处 z 受到各种扰动因素影响而产生模式耦合时, 在受扰点 HE_{11} 模部分耦合到 HE_{11} 模. 考虑由 HE_{11} 模耦合到 HE_{11} 模的功率转换关系, 这里以 k^2 表示耦合模与激励模的功率之比. 若设光纤中传输光的时变解析信号为 $F(t)$, 则在受扰光纤中光纤输出的激励模和耦合模的电场分量可简略表示为:

收稿日期: 1992年9月10日; 收到修改稿日期: 1992年10月30日

* 本课题获国家自然科学基金资助

$$\left. \begin{aligned} E_x(z,t) &= \sqrt{1-h^2}F(t) \\ E_y(z,t) &= hF\left[t - \left(\frac{d\beta_x}{d\omega} - \frac{d\beta_y}{d\omega}\right)z\right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： β_x 和 β_y 分别是 HE_{11} 模和 HE_{11} 模的传播常数， ω 为光的角频率， z 为光纤上的模式耦合点到光纤输出端的长度。

若激励光源的功率谱密度函数为高斯分布：

$$P(\omega - \omega_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta\omega} \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\Delta\omega^2}\right] \quad (2)$$

式中： ω_0 为光源中心角频率， $\Delta\omega$ 为光源光谱半宽。则根据部分相干理论^[7]，从光纤输出的 HE_{11} 模和 HE_{11} 模经后面迈克尔逊干涉系统扫描臂 M_2 相对时延后的互相干项可表示为(设检偏器 A 与两个模的偏振方向夹角为 45°)：

$$I(z,L) \propto h \sqrt{1-h^2} \exp\left(-\frac{\Delta\omega^2 \tau}{2}\right) \cos(\omega_0 \tau) \quad (3)$$

其中：

$$\tau = \left(\frac{d\beta_x}{d\omega} - \frac{d\beta_y}{d\omega}\right)z \pm \frac{2L}{c}$$

式中： L 为干涉仪扫描臂 M_2 的扫描位移，并设 $L = 0$ 时干涉仪是等臂的， c 为光在真空中的速度。式中的“+、-”号分别对应于扫描臂 M_2 在零点左右位移对称的两个位置。

当 M_2 的扫描位移满足 $\tau < \tau_c$ (τ_c 为光源的相干时间) 时，激励模和耦合模之间产生相互干涉，而在 $\tau = 0$ 时，有最大相干度，这个条件近似对应于：

$$2L = \pm Bz \quad (4)$$

B 为光纤的归一化双折射率。从(3)、(4)式可见： $\tau = 0$ 时，干涉信号的幅值与模式耦合强度有一定的关系，而此时 M_2 的位置 L 直接对应于模式耦合点在光纤上的位置 z 。

当沿光纤分布有 n 个模式耦合点时，如图 2 所示，设所有的耦合均为弱耦合， $h^2 \ll 1$ ，由于激励模 HE_{11} 的功率远大于耦合模 HE_{11} 的功率，可忽略由 HE_{11} 模对 HE_{11} 模的耦合贡献，则两个模在光纤输出端的电场分量可近似表示为：

$$\left\{ \begin{aligned} E_x &= \prod_{i=1}^n \sqrt{1-h_i^2} F(t) \\ E_y &= \sum_{i=1}^n \left\{ h_i \prod_{j=1}^{i-1} \sqrt{1-h_j^2} F\left[t - \left(\frac{d\beta_x}{d\omega} - \frac{d\beta_y}{d\omega}\right)z_i\right] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

根据上面同样的分析，此时，激励模与耦合模经干涉仪输出的互相干项为：

$$I(z,L) \propto \prod_{i=1}^n \sqrt{1-h_i^2} \cdot \sum_{i=1}^n \left[h_i \prod_{j=1}^{i-1} \sqrt{1-h_j^2} \exp\left(-\frac{\Delta\omega^2 \tau_i^2}{2}\right) \cos(\omega_0 \tau_i) \right] \quad (6)$$

其中：

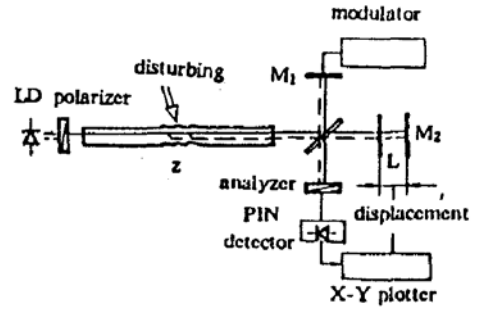


Fig. 1 Schematic diagram for measuring spatial distribution of mode coupling points by interferometry

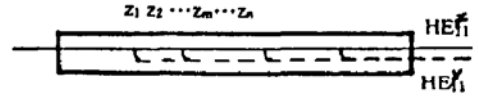


Fig. 2 N mode coupling points along the high-birefringent fiber

$$\tau_i = \left(\frac{d\beta_x}{d\omega} - \frac{d\beta_y}{d\omega} \right) z_i \pm \frac{2L}{c}$$

若光纤中的各个模式耦合点相距足够远,使得不产生干涉时的相互影响^[7],考虑由第 m 个模式耦合点产生的干涉信号.当干涉仪的 M_2 臂扫描位移量使 $\tau_m < \tau_c$ 时,则探测到由第 m 点模式耦合产生的干涉信号为:

$$I_m(z_m, L_m) \propto h_m \left(h_i \prod_{i=1}^n \sqrt{1 - h_i^2} \prod_{j=1}^{m-1} \sqrt{1 - h_j^2} \right) \exp \left(\frac{-\Lambda \omega^2 \tau_m^2}{2} \right) \cos(\omega_0 \tau_m) \quad (7)$$

在最大相干度位置 $\tau_m = 0$ 时, $2L_m = Bz_m$, M_2 的扫描位移量 L_m 对应于该耦合点在光纤上的位置 z_m .因此,随着 M_2 的扫描位移就可以把沿光纤分布的各模式耦合点一一探测出来.

为了探测两个模的干涉信号与信号处理和记录的方便,在干涉仪的参考臂 M_1 上加以正弦调制信号对干涉仪进行交流调制,组成了一种简单的外差干涉系统.此时,在 $\tau_m = 0$ 时,由光电器件接收到的干涉信号为:

$$I_m(t) \propto h_m \left(\prod_{i=1}^n \sqrt{1 - h_i^2} \prod_{j=1}^{m-1} \sqrt{1 - h_j^2} \right) \cos [2k_0 M \cos(2\pi f_M t)] \quad (8)$$

式中, k_0 为光在真空中的波数, M 为调制信号的调制度, f_M 为调制频率.此信号经放大和检波处理后与 M_2 的扫描位移信号一起输入 X-Y 记录仪就可记录出高双折射光纤中各模式耦合点的空间分布状态.

3 实验结果与讨论

试验光纤是长约 50 m 的 Bow-Tie 型高双折射光纤.光纤的双折射率 $B = 4.38 \times 10^{-4}$,截止波长: $\lambda_c < 800$ nm.采用多纵模半导体激光器作为光源(中心波长 $\lambda_c = 850$ nm).实验中,通过对光纤施加外力作用,使光纤中产生多个模式耦合点.

图 3 为光纤未受扰动而没有模式耦合点的情况.图 4 为对沿光纤分布的 5 个因外力扰动而引起的模式耦合点的测试结果.图 3 和图 4 中在 $L = 0$ 附近的几个大峰值以及图 4 中在模式耦合点峰值附近出现的小峰值是由激光器的多纵模效应引起,这可能会引起测量中的误判断,选用 LED 光源或降低激光器的驱动电流(甚至到阈值以下)可以避免或降低这种效应对测量的影响.图 5 表示了使激光器在阈值下工作时对模式耦合点分布的测量结果,此时测量的灵敏度将会受到影响.

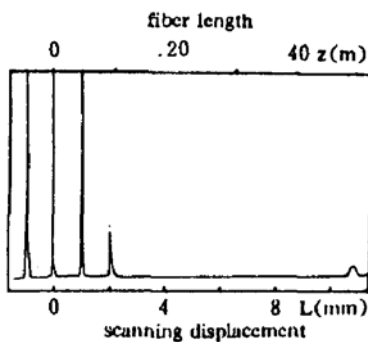


Fig. 3 Measured curve without mode coupling points in high-birefringent fiber

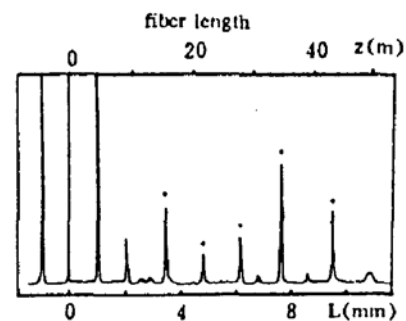


Fig. 4 Measured spatial distribution of five mode coupling points along high-birefringent fiber

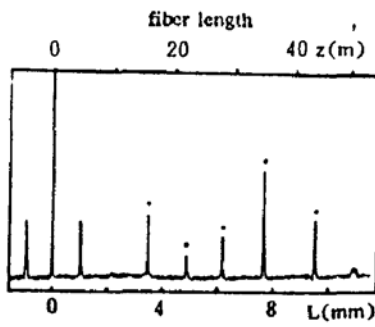


Fig. 5 Measured spatial distribution of mode coupling points in the same fiber. (Bias current of the laser diode is lowered below the threshold current)

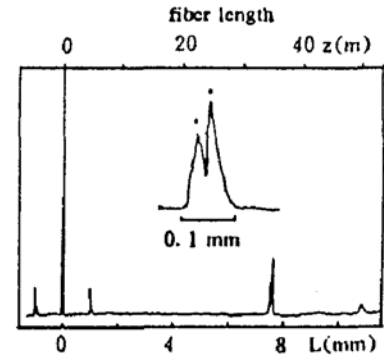


Fig. 6 Two separated mode coupling points. (Bias current of the laser diode is under the threshold current)

对于两个沿光纤相距为 Δz 的模式耦合点, 测量系统可探测出的最小可分辨距离 Δz_{min} 决定了测量的空间分辨率, 它与光源的相干长度 l_c 和光纤的双折射参数 B 有关, 表示为:

$$\Delta z_{min} \geq \frac{l_c}{B} \quad (9)$$

图 5 表示了二个相距 $\Delta z = 120 \text{ mm}$ 的可分辨的模式耦合点的测量情况. 对于弱模式耦合, 当沿光纤分布的多个模式耦合点的相互距离都大于最小分辨距离时, 各模式耦合点沿光纤的空间分布状况可被扫描探测出来. 使用低相干度的光源对提高测量系统的空间分辨率是有益的.

4 结 论

本文采用一种简单的交流干涉系统实现了对高双折射偏振保持光纤中模式耦合点的测量, 测量系统可以给出各模式耦合点光纤分布的信息. 此外, 这种技术也可用于某种分布式光纤传感技术的研究中^[8]. 通过对由于外界扰动因素作用而引起的光纤中模式耦合的测量而给出外界扰动场沿光纤分布的信息.

参 考 文 献

- [1] J. Noda, K. Okamoto, Y. Sasaki, Polarization-maintaining fibers and their applications. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1986, LT-4(8): 1071~1089
- [2] K. Okamoto, Y. Sasaki, N. Shibata, Mode coupling effects in stress-applied single polarization fibers. *IEEE J. Q. E.*, 1982, QE-18(11): 1890~1899
- [3] A. J. Rogers, Point and distributed polarimetric optical fiber sensors. *Proc. SPIE.*, 1986, 718: 28~35
- [4] M. Nakazawa, N. Shibata, M. Tokuda et al., Measurements of polarization mode couplings along polarization-maintaining single-mode optical fibers. *J. O. S. A. (A)*, 1984, 1(3): 285~292
- [5] M. Tsubokawa, T. Higashi, Y. Sasaki, Measurement of mode couplings and extinction ratios in polarization-maintaining fibers. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1989, 7(1): 45~50
- [6] K. Takada, J. Noda, K. Okamoto, Measurement of spatial distribution of mode coupling in birefringent polarization-maintaining fiber with new detection scheme. *Opt. Lett.*, 1986, 11(10): 680~682
- [7] 戚康男, 秦克诚, 程路编著, 统计光学导论, 天津, 南开大学出版社, 1987, 117~248
- [8] Luo Fei, Yan Muolin, Huang Shanglian, Distributed fiber optic pressure sensor. *Proc. SPIE.*, 1990, 1367: 221~224

Measurement of spatial distribution of mode coupling in high-birefringent fiber by interferometry

LUO Fei

*(Department of Measurement and Instrumentation Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)*

HUANG Shanglian

(Institute of Opto-Electronic Precision Instrument, Chongqing University, Chongqing 630044)

(Received 10 September 1992; revised 30 October 1992)

Abstract

A interferometric scheme for measuring the spatial distribution of mode coupling in high-birefringent polarization-maintaining fiber is presented. The measurement system is composed of the modulated Michelson interferometer with a low-coherent laser diode as light source. The distribution of mode coupling points in high-birefringent fiber is determined by using the method of optic path scanning

Key words interferometry, mode coupling, measurement