

文章编号 1004-924X(2007)06-0807-05

高精度保偏光纤拍长测试

杨远洪, 李 莉, 蒋大钢, 贾 岩

(北京航空航天大学 光电技术研究所, 北京 100083)

摘要: 基于光相干域偏光测试技术, 提出了一种高精度的保偏光纤拍长测试方法, 实现了不同结构、不同尺寸保偏光纤的拍长测试。阐述了光相干域偏光测试技术原理并推导出测量方程; 以迈克尔逊干涉仪为基础建立了测试系统并采用调制解调技术实现了信号的高精度检测。实验结果表明, 系统的测量精度为 0.01 mm。在此系统上进行了测试精度和重复性研究并对不同结构和尺寸的八种保偏光纤进行了实际测量, 拍长测量精度和重复性均优于 0.01 mm。

关键词: 光相干域偏光测试技术; 保偏光纤; 拍长测试

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Precision measurement scheme for beat-length of polarization maintain optical fiber

YANG Yuan-hong, LI Li, JIANG Da-gang, JIA Yan

(*Institute of Opto-electronics Technology, Beihang University, Beijing 100083, China*)

Abstract: A precision measurement scheme for beat-length of polarization maintain optical fiber was proposed based on optical coherence domain polarimetry, and the beat-length of polarization maintain optical fiber with different structures and sizes was measured. The principle of optical coherence domain polarimetry was demonstrated and the beat-length measurement equation was derived. A measurement system was setup by modifying the Michelson interferometer and precision measurement was achieved with the modulation and demodulation technology. The error analysis shows that the measuring error is less than 0.01 mm. The performance including accuracy and repetition was investigated with this system, the beat-lengths of 8 types of polarization maintain optical fibers with different structures and sizes were measured, the result shows that the accuracy and repetition of beat-length measurement are both better than 0.01 mm.

Key words: optical coherence domain polarimetry; polarization maintain optical fiber; beat-length measurement

收稿日期: 2006-07-03; 修订日期: 2007-01-07.

基金项目: 新世纪优秀人才计划资助项目 (No. NECT-05-0183); 国家自然科学基金资助项目 (No. 60207012)

1 引言

保偏光纤能保持在光纤中传输的光的偏振状态。在光纤通信技术领域,采用保偏光纤可大大提高光传输系统的稳定性和通信容量;在光纤传感系统中,采用保偏光纤可明显降低光路中由偏振耦合和其它与偏振有关的因素引起的误差。近年来,随着保偏光纤的设计理论、制造工艺和参数测量技术的日臻完善,保偏光纤已得到非常广泛的应用。拍长是衡量保偏光纤双折射的一个重要参数,在光纤研制、生产和应用环节,都需要精确测量^[1,2]。拍长 L_B 定义为:耦合进保偏光纤并沿正交的偏振主轴传输的两个模式的相位差变化 2π 时,光在光纤中传播的距离^[3]。

目前,保偏光纤拍长的测量方法主要有:1. 瑞利散射法,该方法是将大功率激光器发出的光耦合进被测光纤,通过观察被测光纤上周期变化的亮、暗条纹的间距测出拍长。这种方法简单易行,但只能利用可见光进行测试,再通过经验公式转化为工作波长下的拍长,空间分辨率低,精度和重复性都较差;2. 动态压力法^[4],该方法在被测光纤上加以周期性外力,令外力沿光纤轴移动使输出光偏振态周期性变化,从而测出光纤拍长。此方法所需设备简单,但是调整复杂,测量结果与光纤放置状态有关,故测量精度和重复性也不高;3. 磁光调制法^[5],该方法是将交变磁场沿光纤轴移动,由于光纤材料的法拉第效应使输出光的偏振态呈周期性变化,此变化的一个周期即为光纤的拍长。磁光法可实现逐点测量,且可测拍长沿光纤的分布,不破坏光纤。现在,保偏光纤的种类和制作方法较多,其结构及尺寸的多样,都给拍长的测量带来较大困难。白光干涉技术具有精度高,技术成熟的特点,这种技术与数字扫描技术和光纤技术相结合,在精度和稳定性等方面都得到了很大提高,已应用于多种测量和检测场合^[6-8]。本文基于光相干域偏光测试技术(Optical Coherence Domain Polarimetry, OCDP),提出了一种保偏光纤拍长的高精度测量方法,进行了理论和实验研究,为保偏光纤拍长的测试提供了一种通用且方便的测试方法。

2 测量原理

2.1 OCDP 技术

OCDP 技术是基于光程匹配的白光(即光谱较宽的光源)干涉技术的一种偏振光测试和分析技术。在双光束干涉的白光干涉仪中,当两束光的位相差很大,即其光程差远大于相干长度时,输出光将失去对比度。如果让这两束光进入另一干涉仪(一般为迈克尔逊干涉仪),可通过调整干涉臂的长度,使这两束光的位相差为零,恢复它们的干涉对比度。如果将光的干涉看作光波列的叠加,白光的匹配干涉过程可用一个波列在图 1 所示的两个干涉仪中的叠加情况来示意。入射波列进入干涉仪 1 后被分为两部分,分别沿两光路(位相变化分别为 ϕ_1 和 ϕ_2) 传输。由于两束光经历的光程不同,而且光程差远大于波列的半宽(可近似认为是相干长度),干涉仪 1 输出的两波列没有重合,因此没有干涉对比度。这两个波列分别进入干涉仪 2,假设干涉仪 2 的光路参数与干涉仪 1 相近(即 $\phi_1 \approx \phi_1'$, $\phi_2 \approx \phi_2'$),干涉仪 2 将输出四个波列,其中将有两个波列经历的光程相同而发生干涉,使在干涉仪 1 中失去的对比度得到恢复。在 OCDP 技术中,干涉仪 1 一般为偏光干涉仪,干涉仪 2 为用于匹配位相的迈克尔逊干涉仪,也被称为读出干涉仪。通过调整迈克尔逊干涉仪的干涉臂位相差和测量干涉信号的强度,可以得到偏光干涉仪中偏振态的变化和发生变化的位置,从而实现分布的偏振特性测量。现在,OCDP 技术已成为分析保偏光纤中的偏振光的传输和耦合的重要方法^[9]。

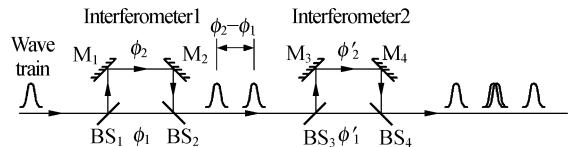


图 1 光程匹配的白光干涉仪示意图

(M 为反射镜,BS 为分光镜)

Fig. 1 White light interferometer with optical path match

(M is mirror, BS is beam splitter)

2.2 拍长测量方程

如图 2 所示,保偏光纤、偏振器 A 和 B 组成

偏光干涉仪,其输出为迈克尔逊干涉仪的输入,这两个干涉仪组成了一个 OCDP 系统。

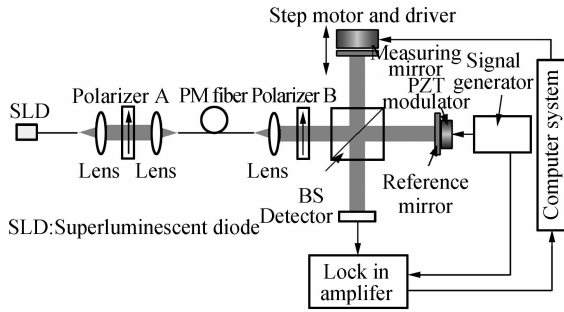


图 2 保偏光纤拍长测试系统

Fig. 2 Beat length measuring system for PM fiber

图 2 中,设保偏光纤应力轴与偏振器 A 和 B 的夹角分别为 α, β , 入射光穿过偏振器 A 的振幅为 E_A , 偏振光通过保偏光纤后的分量为:

$$\begin{cases} E_S = E_A \cos \alpha \\ E_F = E_A \sin \alpha \cdot e^{j\delta_f} \end{cases}$$

式中,下标 S 和 F 分别表示保偏光纤的慢轴和快轴, $\delta_f = 2\pi L_f / L_B$ 为光通过保偏光纤后,沿快慢轴传输光的位相差, L_f 为保偏光纤长度。通过偏振器 B 后,两分量在偏振器 B 的透过方向的投影的和为:

$$E_B = (\sin \alpha \sin \beta \cdot e^{j\delta_f} + \cos \alpha \cos \beta) \cdot E_A, \quad (2)$$

设定 $\alpha = \beta = 45^\circ$, 则上式为:

$$E_B = \frac{1}{2}(e^{j\delta_f} + 1) \cdot E_A$$

输出光经过分光镜,分别射入迈克尔逊干涉仪的测量镜和参考镜。设参考臂与测量臂的长度差为 Z , 则投射到迈克尔逊干涉仪探测器上的干涉场的电场为:

$$E_D = \frac{1}{2}(E_B + E_B \cdot e^{j\delta_m}) =$$

$$\frac{E_A}{4} \cdot (1 + e^{j\delta_f} + e^{j\delta_m} + e^{j(\delta_f + \delta_m)}), \quad (3)$$

其中 $\delta_m = 4\pi Z / \lambda$, 为迈克尔逊干涉仪两臂长度差产生的位相差。干涉光强为:

$$I = \frac{E_A^2}{8} \cdot (2 + 2\cos(\delta_f) + 2\cos(\delta_m) + \cos(\delta_f + \delta_m) + \cos(\delta_f - \delta_m)), \quad (4)$$

上述推导中,没有考虑光源谱宽的影响,在这个系统中,采用了宽谱的 SLD 光源,设其相干函数为 $\gamma(\delta)$, 则上式可改写为:

$$I = \frac{E_A^2}{8} \cdot (2 + 2\gamma(\delta_f) \cdot \cos(\delta_f) + 2\gamma(\delta_m) \cdot \cos(\delta_m) + \gamma(\delta_f + \delta_m) \cdot \cos(\delta_f + \delta_m) + \gamma(\delta_f - \delta_m) \cdot \cos(\delta_f - \delta_m)), \quad (5)$$

一般情况下, $L_f \gg L_B$, 宽谱光通过保偏光纤后,两偏振模式不发生干涉,因此 $\gamma(\delta_f) = 0$, 则上式可改写为:

$$I = \frac{E_A^2}{8} \cdot (2 + 2\gamma(\delta_m) \cdot \cos(\delta_m) + \gamma(\delta_f + \delta_m) \cdot \cos(\delta_f + \delta_m) + \gamma(\delta_f - \delta_m) \cdot \cos(\delta_f - \delta_m)), \quad (6)$$

移动迈克尔逊测量镜,在不同位置将有不同的输出:

$$\delta_m = 0 \text{ 时: } I = \frac{E_A^2}{4} \gamma(\delta_m), \quad (7)$$

$$\delta_m \approx -\delta_f \text{ 时: } I = \frac{E_A^2}{8} \gamma(\delta_f + \delta_m), \quad (8)$$

$$\delta_m \approx \delta_f \text{ 时: } I = \frac{E_A^2}{8} \gamma(\delta_f - \delta_m), \quad (9)$$

即 $\delta_m = 0$ 对应主干涉峰, $|\delta_m| = |\delta_f|$ 对应在主峰的两侧对称出现的两个次干涉峰。图 3 所示为测量镜移动时,探测器的实际输出,与上述吻合。找

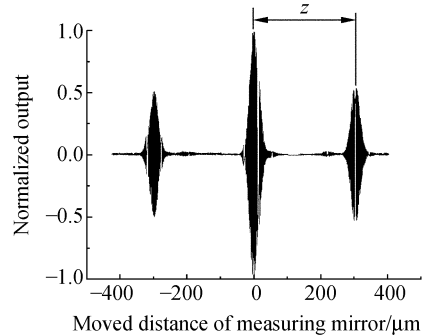


图 3 拍长实验的干涉信号

Fig. 3 Interference curve in beat length measuring experiment

出干涉信号峰值对应的测量镜位置差 Z , 即位相完全匹配的位置,由式(8)或(9),可有如下方程:

$$2\pi L_f / L_B = 4\pi Z / \lambda, \quad (10)$$

由此得出待测光纤拍长的计算公式为:

$$L_B = \frac{\lambda L_f}{2Z}, \quad (11)$$

2.3 信号检测

为了消除环境影响和实现高精度检测,采用了一种调制解调的信号检测方法。如图 2 所示,参考镜粘附在 PZT 调制器上,当在 PZT 调制器

上加正弦信号时, PZT 带动参考镜振动, 可得调制位相:

$$\phi_m = \phi_0 \sin(\omega_m t), \quad (12)$$

ϕ_0 为位相调制幅度, ω_m 为调制频率。当 $\delta_m \approx 0$ 时, 探测器的输出为:

$$I = \frac{E_A^2}{4} \cdot (1 + \gamma(\delta_m) \cos(\delta_m + \phi_0 \sin(\omega_m t))), \quad (13)$$

用锁相放大器提取信号的一次谐波分量, 输出为:

$$V_1 = \frac{KE_A^2}{4} \cdot \gamma(\delta_m). \quad (14)$$

式中 K 为与锁相放大器及调制参数有关的常数。显然, 只有当 $\delta_m = 0$ 时, 上式才能得到最大值, 当 $|\delta_m| \approx |\delta_f|$ 时, 可以得到相同的结果。 $|\delta_m| = |\delta_f|$ 时对应次峰的峰值位置, 即为位相完全匹配的位置。图 3 为用此技术测得的输出信号曲线。

2.4 实验系统及数据处理

图 2 所示系统所用 SLD 光源的中心波长为 $1.312 \mu\text{m}$, 由光谱仪测得其准确度可达 0.06 nm , 谱宽为 35 nm , 输出功率约 $700 \mu\text{W}$; 采用精密导轨, 测量镜移动距离用光栅尺测量, 测量分辨率为 $0.01 \mu\text{m}$; PZT 调制频率为 35 kHz ; 锁相放大器为 SR830; 实测时, 驱动控制和信号采集由计算机系统承担。待测保偏光纤长度利用直尺通过目测得到, 精度为 1 mm 。

式(11)中的 Z 值为主干涉峰与次干涉峰对应的测量镜位置距离差。为了确定峰值位置, 本文采用了移动搜索矩形法对峰值进行自动拾取。这种方法简单易行、效率高, 数学工具软件 Origin 中的峰值拾取工具就是基于该算法。该方法通过设定矩形宽度 W 和判定高度 H , 在矩形宽度 W 的范围内搜索数据最大值, 当该最大值都大于矩形两端对应的数据值, 且大于判定高度 H 时, 认为该值为数据局部峰值。然后, 通过不断移动该矩形, 就可以检测出不同数据段的局部峰值。本文结合拍长测量的特点, 实现了峰值的自动确定, Z 值的精度为 $1 \mu\text{m}$ 。

由式(11)可知, 引起拍长测量误差的因素有三个: 待测光纤的长度 L_f , 测量镜补偿光程差所移动的距离 Z , 光源光谱的中心波长 λ 。根据误差估计理论, 系统的测量误差可由下式估计:

$$\Delta L_B = \sqrt{\left(\frac{\lambda \Delta L_f}{2Z}\right)^2 + \left(\frac{L_f \Delta \lambda}{2Z}\right)^2 + \left(\frac{\lambda L_f \Delta Z}{2Z^2}\right)^2}, \quad (15)$$

图 3 所示为一种典型的情况, Z 为 $251.2 \mu\text{m}$, L_f 为 600 mm , 由式(15)可估算出测量误差为 0.01 mm 。干涉仪中的其它因素, 如偏振轴的调整精度和光功率的耦合效率只会影响主干涉峰和次干涉峰的强度和信号检测的信噪比, 不会影响光程匹配的位置, 因此不会对测量造成影响, 从而大大降低了光路调试的要求, 使得测试过程简单方便。

3 实验研究

3.1 重复性研究

选取一种熊猫型保偏光纤, 进行了两种情况的重复性测试。

(1) 对同一根光纤进行了 10 次重复测试, 测试结果如表 1 所列, 测量拍长的最大偏差为 0.007 mm 。

表 1 对同根光纤的重复测试结果(光纤长度 566.4 mm)

Tab. 1 Repeated measuring results of the same fiber (fiber length is 566.3 mm)

number	Beat length(mm)
1	2.561
2	2.560
3	2.564
4	2.557
5	2.558
6	2.564
7	2.562
8	2.562
9	2.563
10	2.559

(2) 对这种保偏光纤, 分别选取不同的长度进行了多次测量, 测量结果如表 2 所示, 测量拍长的最大偏差为 0.008 mm 。

表 2 同根光纤不同长度的测试结果

Tab. 2 Measured results with different lengths of the same fiber

Fiber length(mm)	Beat length(mm)
566.4	2.562
371.2	2.564
257.8	2.570

以上测试结果表明,系统的拍长测量重复性优于 0.01 mm。

3.2 测量系统的通用性

在图 2 所示测试系统上,对现在已有的八种

保偏光纤的拍长进行了测量,测量结果如表 3 所列:生产厂家提供的拍长为用其它测试方法测得的值或设计值,采用本文的方法和系统都实现了准确和稳定的测量。

表 3 不同光纤的测试结果

Tab.3 Measured results of different fibers

number	fiber type	包层直径(μm)	光纤长度(mm)	厂家提供拍长值(mm)	测得拍长值(mm)
1	Panda	125	566.4	2.3—1.9	2.562
2		80	612.3	4.1	4.133
3	bow-tie	125	633.5	2.2	2.215
4		80	606.4	3.8	3.756
5	"—"shape	125	603.3	2.3—2.0	2.174
6	elliptical core	125	642.8	4.5	4.237
7	elliptical jacket	125	589.2	4.3	4.315
8	photonic crystal	125	553.5	4.5(设计值)	4.228

4 结 论

理论分析和实验研究表明,本文提出的基于光相干域偏光测试技术的保偏光纤拍长测试方法,具有精度高,重复性和适应性好的特点。可以

实现任意结构、不同尺寸保偏光纤的拍长测试。误差分析和实验结果都表明,测试系统的测量精度和重复性均优于 0.01 mm,为保偏光纤的拍长测试提供了一个很好的方法,为保偏光纤的研究和应用提供了精确的分析技术。

参考文献:

- [1] KAMINOW I P. Polarization in optical fibers[J]. *IEEE J Quantum Electronics*, 1981,17(1):150-220.
- [2] MICHIE A,CANNING J,PADDEN W, *et al.*. Temperature independent polarisation maintaining fiber for sensing and interferometry[C]. 17th *International Coherence on Optical Fiber Sensors, Bruges, Belgium*,2005.
- [3] PEYRILLOUX A, CHARTIER T, HIDEUR A, *et al.*. Theoretical and experimental study of the birefringence of a photonic crystal Fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003,21(2):536-539.
- [4] TAKADA K. Precision measurement of model Birefringence of highly birefringent fibers by periodic lateral Force [J]. *Appl. Opt.*, 1985,24(24):4387-4391.
- [5] 宁鼎. 偏振保持光纤拍长的磁光调制法测量[J]. *光通信技术*, 1996,21(1):22-25.
- [6] 张以谟,井文才,张红霞,等. 数字化白光扫描干涉仪的研究[J]. *光学精密工程*, 2004,12(6):560-565.
- [7] 毕卫红. 高分辨率迈克尔逊光纤应变传感器[J]. *光学精密工程*, 2000,8(1):83-86.
- [8] 刘国淦,张学军,王权陡,等. 光纤点衍射干涉仪的技术研究[J]. *光学精密工程*, 2001,9(2):142-145.
- [9] HERVE L. *The Fiber-Optic Gyroscope*[M]. Boston • London, Artech House,1993.

作者简介:杨远洪(1969—),男,湖北武汉人,教授,主要从事光纤传感及其相关技术研究。E-mail:yhyang@263.net.cn