

光纤环偏振耦合分布及绕环光纤拍长测试技术

王学勤*, 张彤, 梁兰菊, 郑艳彬

枣庄学院光电工程学院 山东 枣庄 277160

摘要 为了测试保偏光纤环的偏振耦合分布及绕环光纤拍长,采用白光干涉仪对光纤环进行测试。一方面,通过测试获得了光纤环的偏振耦合分布,有利于研究影响光纤环保偏能力的主要外部因素。另一方面,通过识别光纤环两端尾纤与白光干涉仪两个熔点产生的偏振耦合干涉峰,获得了沿绕环光纤两正交偏振主轴传输的光信号的光程差,进而计算出了绕环光纤的拍长。实验表明,0.13°以上的角度对轴误差均可被有效识别。证明了采用白光干涉仪通过一次测量同时测得光纤环偏振耦合分布和绕环光纤拍长的可行性。该研究为保偏光纤环偏振特性的全面表征提供了一种简单有效的方法。

关键词 光纤光学; 保偏光纤环; 白光干涉仪; 偏振耦合分布; 拍长

中图分类号 TN29 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.230602

Testing Technique of Polarization-Coupling Distribution of Fiber Coil and Beat Length of Used Fiber

Wang Xueqin*, Zhang Tong, Liang Lanju, Zheng Yanbin

College of Opto-Electronic Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang, Shandong, 277160, China

Abstract The polarization-coupling distribution in fiber coil and beat length of used fiber are achieved by testing polarization-maintaining fiber coils using white light interferometry. The polarization-coupling distribution of the fiber coil is obtained through this test, which is helpful in identifying the principal external factors affecting the polarization-maintaining ability of the fiber coil. By identifying the polarization-coupling peak produced by the two fusion splice points at both ends of the fiber coil and the white light interferometer, the optical path difference of the optical signal transmitted by the two orthogonal polarization axes of the fiber coil is obtained, and the beat length of the fiber coil is calculated. The experiment shows that the angle error can be recognized effectively when the angle is 0.13°. The results show that the polarization-coupling distribution and beat length of the fiber coil can be measured simultaneously using a white light interferometer, providing a simple and effective method for characterizing the polarization characteristics of the polarization-maintaining fiber coil.

Key words fiber optics; polarization-maintaining fiber coil; white light interferometry; polarization-coupling distribution; beat length

OCIS codes 060.2420; 060.2300; 120.4530

1 引言

光纤陀螺因具有体积小、质量小、结构灵活、无转动部件等优点,在航空、航天、航海等领域获得了广泛的应用,成为了目前惯性技术的主流仪表之一^[1-4]。光纤陀螺光路主要采用的是全保偏

方案和混合偏振方案,这两种方案都需要采用高双折射保偏光纤绕制光纤环,以抑制光纤陀螺的偏振非互易性噪声^[5-7]。光纤环作为光纤陀螺的敏感元件,其性能很大程度上决定了光纤陀螺的性能^[4,8]。保偏光纤环的偏振保持能力是影响陀螺性能的一项重要参数^[9]。为了获得光纤环沿光

收稿日期: 2020-03-12; 修回日期: 2020-04-10; 录用日期: 2020-04-23

基金项目: 山东省高等学校“青创科技计划”(2019KJN001)、枣庄学院博士启动项目(1020710)

* E-mail: wangxueqin@buaa.edu.cn

纤长度的分布式偏振特性,通常采用白光干涉仪(WLI)对保偏光纤环进行测试^[10]。保偏光纤环是由保偏光纤绕制而成的,保偏光纤本身的保偏能力也是影响光纤环及光纤陀螺性能的重要指标,保偏光纤本身的保偏能力可以用拍长进行表征。通常光纤环偏振耦合分布和绕环光纤拍长的测试采用不同的测试设备和方法^[11-12],本文提出了一种采用白光干涉仪同时测试光纤环偏振耦合分布和绕环光纤拍长的方法,目的是为保偏光纤环偏振特性的全面表征提供一种简单有效的方法。

2 测量原理及方法

采用基于宽谱光信号干涉原理的白光干涉仪来测试光纤环的偏振耦合分布,测量原理如图1所示。仪器采用超辐射发光二极管(SLD)光源,发出的光信号具有一定的谱宽,因此具有短的相干长度。当光信号被分成两束后,只有当两束光的光程差(OPD)小于光源的相干长度时才能发生干涉,因此白光干涉仪是一种可实现绝对测量的干涉测量技术,可用于保偏光纤和光纤环的偏振耦合测量^[13]。

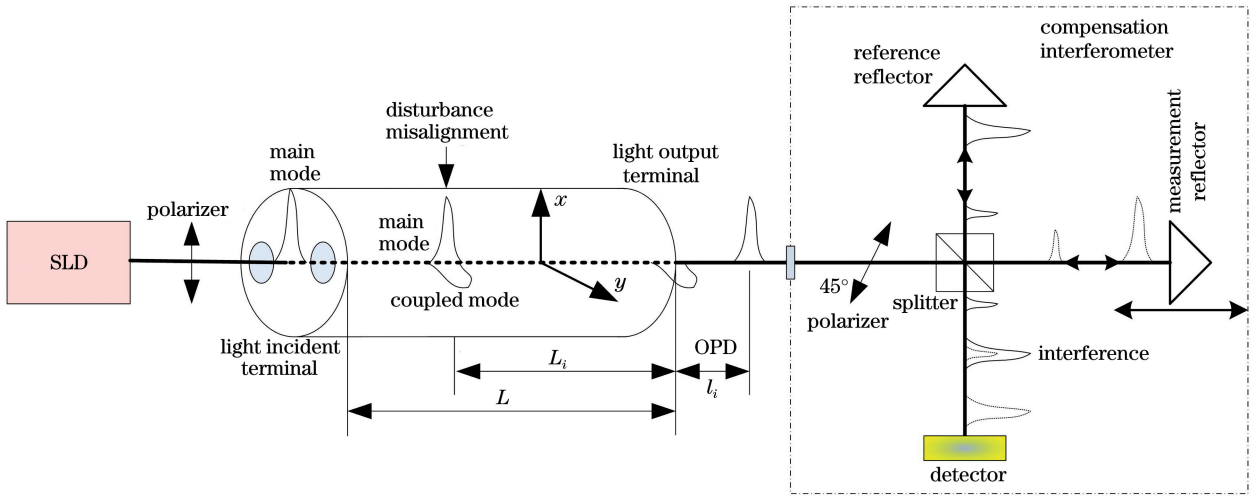


图1 光纤环偏振耦合分布及绕环光纤拍长测量光路图

Fig. 1 Optical path diagram measuring the polarization-coupling distribution of fiber coil and beat length of used fiber

SLD光源输出光信号为高斯谱型,功率谱密度可表示为

$$P(k) = \frac{L_c}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{L_c^2(k - k_0)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为光波波长, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为光谱的中心波长, σ 表征高斯光谱宽度, L_c 为相干长度。要使两束光波发生干涉,要求两束光波的频率相同,故宽谱光源的干涉信号可看作是多个单色光干涉信号的叠加,则白光干涉仪探测器接收的干涉光强可表示为

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} P(k) I(k) dk, \quad (2)$$

式中 $I(k)$ 为探测器接收到的波数为 k 的干涉信号的相对光强。为简化计算,首先分析单色光在白光干涉仪中信号的演化情况。

光源发出的光信号经光纤起偏器起偏后变为线偏振光,将待测光纤环一端与光纤起偏器尾纤 0° 对轴熔接后,注入待测光纤环的线偏振光会激发一种

偏振模式,满足

$$E_x(0) = E_0 \exp(i\phi_0), \quad (3)$$

式中 E_0 为线偏振光在光纤中激发的主模光信号的振幅, ϕ_0 为初始相位。

若光纤中某点存在来自外部的应力、扭转、弯曲,或是光纤内部存在缺陷,或是光纤熔接时存在对轴误差时,一部分光将会耦合至正交的偏振态上,形成另一种偏振模式。设距离光纤出射端为 L_i 的位置产生了一个偏振耦合点,主模光信号将部分耦合至正交偏振主轴上,形成耦合模,振幅耦合比为 ϵ ,此时主模光信号和耦合模光信号可以分别表示为

$$\begin{cases} E_{x_c} = \sqrt{1 - \epsilon^2} E_0 \exp(i\phi_c) \\ E_{y_c} = \epsilon E_0 \exp(i\phi_c) \end{cases}, \quad (4)$$

式中 ϕ_c 为在耦合点主模光信号和耦合模光信号的相位。在耦合点之前,光信号在相同的主轴上传输,故具有相同的相位;但在耦合点之后,主模光信号和耦合模光信号分别在光纤的快轴和慢轴传输,两偏

振主轴具有不同的折射率,故在光纤出射端具有不同的相位。因此在光纤出射端主模和耦合模光信号可分别表示为

$$\begin{cases} E_{x_out} = \sqrt{1-\epsilon^2} E_0 \exp[i(\phi_c - kn_i L_i)] \\ E_{y_out} = \epsilon E_0 \exp[i(\phi_c - kn_1 L_i)] \end{cases}, \quad (5)$$

式中 n_t, n_1 分别为保偏光纤快轴和慢轴的折射率, λ 为测试光信号波长, k 为真空中波数。在光纤出射端,两正交偏振主轴的光信号经 45° 检偏器投影至同一偏振轴,其主模和耦合模光信号可表示为

$$\begin{cases} E_1 = \sqrt{\frac{1-\epsilon^2}{2}} \cdot \frac{E_0}{2} \exp[i(\phi_c - kn_t L_i)] + \frac{\epsilon E_0}{2\sqrt{2}} \exp[i(\phi_c - kn_1 L_i)] \\ E_2 = \sqrt{\frac{1-\epsilon^2}{2}} \cdot \frac{E_0}{2} \exp[i(\phi_c - kn_t L_i - kl)] + \frac{\epsilon E_0}{2\sqrt{2}} \exp[i(\phi_c - kn_1 L_i - kl)] \end{cases}, \quad (7)$$

两束光信号叠加后,干涉仪探测器接收到的波数为 k 的信号光强为

$$\begin{aligned} I(k) = (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2)^* = & \left\{ \frac{1}{4} E_0^2 + \frac{\epsilon \sqrt{1-\epsilon^2}}{4} E_0^2 \cos[k(\Delta n L_i + l)] + \right. \\ & \left. \frac{\epsilon \sqrt{1-\epsilon^2}}{2} E_0^2 \cos(k \Delta n L_i) + \frac{1}{4} E_0^2 \cos(kl) + \frac{\epsilon \sqrt{1-\epsilon^2}}{4} E_0^2 \cos[k(l - \Delta n L_i)] \right\}, \quad (8) \end{aligned}$$

式中 $\Delta n = n_1 - n_t$, 为保偏光纤线性双折射。将(8)式和(1)式代入(2)式,得到干涉仪探测器接收到的总的信号光强为

$$\begin{aligned} I = & \left\{ \frac{1}{4} E_0^2 + \frac{\epsilon \sqrt{1-\epsilon^2}}{4} E_0^2 \gamma(\Delta n L_i + l) \cdot \cos[k(\Delta n L_i + l)] + \frac{\epsilon \sqrt{1-\epsilon^2}}{2} E_0^2 \gamma(\Delta n L_i) \cdot \right. \\ & \left. \cos(k \Delta n L_i) + \frac{1}{4} E_0^2 \gamma(l) \cos(kl) + \frac{\epsilon \sqrt{1-\epsilon^2}}{4} E_0^2 \gamma(l - \Delta n L_i) \cos[k(l - \Delta n L_i)] \right\}, \quad (9) \end{aligned}$$

式中 $\gamma(x)$ 为宽谱光源关于光程差 x 的自相干函数。因 $\Delta n L_i \gg l_{dc}$, 所以 $\gamma(\Delta n L_i) = 0$, 即第三项为 0, 且第一项为直流项, 可通过隔直滤波器滤除, 其中 l_{dc} 为光源去相干长度。通过分析剩余三项, 则可获得探测器接收干涉信号的条件和强度。主模光信号和耦合模光信号的强度可表示为

$$\begin{cases} I_{main} = \frac{E_0^2}{4}, & l = 0 \\ I_{couple} = \frac{\epsilon \sqrt{1-\epsilon^2}}{4} E_0^2 \approx \frac{\epsilon}{4} E_0^2, & l = \pm \Delta n L \end{cases}. \quad (10)$$

根据(10)式,可知:当干涉仪两臂光程差相等时,光信号产生主干涉峰;当干涉仪光程差等于保偏光纤中两正交偏振主轴产生的光程差时,光信号产生次级耦合干涉峰。上述结果如图 2 所示。根据耦合次级干涉峰与主干涉峰间的光程差,可对耦合点进行定位,根据耦合次级干涉峰强度和主干涉峰强度可

$$\begin{cases} E_{x_p} = \sqrt{\frac{1-\epsilon^2}{2}} E_0 \exp[i(\phi_c - kn_t L_i)] \\ E_{y_p} = \frac{\epsilon E_0}{\sqrt{2}} \exp[i(\phi_c - kn_1 L_i)] \end{cases}. \quad (6)$$

两波列叠加后 $E_p = E_{x_p} + E_{y_p}$ 。叠加后的光信号经迈克耳孙干涉仪的分光镜分成两束后分别进入测试臂和参考臂传输,随后经反射镜反射后又经分光镜合为一束。设两臂光程差为 l , 则到达探测器的两束光信号分别为

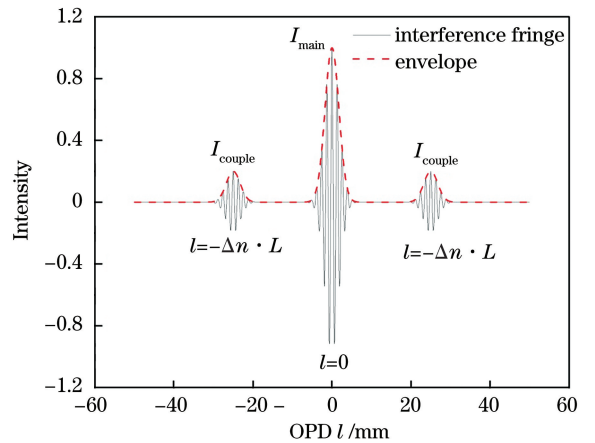


图 2 保偏光纤偏振耦合测试干涉特性示意图

Fig. 2 Interference characteristic for polarization-coupling tests of PM fiber

测试耦合强度。为了增加白光干涉仪测试结果的可读性,采用包络提取算法提取耦合点包络^[14],将一个耦合点由一组干涉条纹变为一个干涉峰,如图 2

中虚线所示。

第 i 个耦合点产生的耦合波列与主波列之间的光程差可表示为^[15]

$$l_i = \Delta n \cdot L_i \quad (11)$$

该式给出了干涉仪补偿光程差 l 与保偏光纤长度 L 及线性双折射 Δn 间的关系。将 (10) 式中的两个式子相除,即通过将次级偏振耦合峰的最大干涉光强除以主干涉峰的最大干涉光强,可获得该耦合点的振幅耦合比,表达式为

$$\epsilon = I_{\text{couple}} / I_{\text{main}} \quad (12)$$

偏振耦合强度 η 为振幅耦合比的平方,即

$$\eta = \epsilon^2 = I_{\text{couple}}^2 / I_{\text{main}}^2 \quad (13)$$

根据 (11) 式和 (13) 式,通过连续改变补偿干涉仪测量镜的位置,调整补偿干涉仪的光程差,即可获得光纤环的偏振耦合分布^[16]。

在采用白光干涉仪测试光纤环偏振耦合分布时,要求光纤环两端尾纤均采用 0° 对轴熔接。但实际操作时,难以实现精确的 0° 对轴,通常存在一定的对轴角度误差。由熔点对轴角度误差产生的偏振耦合峰强度可表示为

$$\eta_{\text{splice}} = 20 \cdot \log \tan \theta, \quad (14)$$

式中 θ 为对轴角度误差。以日本藤仓 FSM-100P+ 型保偏光纤熔接机为例,熔点对轴角度误差的典型值为 0.6° ,对应的偏振耦合强度约为 -40 dB。通

常,光纤的偏振耦合强度远小于 -40 dB,故可利用光纤环两端尾纤与白光干涉仪尾纤熔点对轴角度误差产生的偏振耦合峰对应的补偿光程差计算保偏光纤环两正交偏振主轴的光程差:

$$l_{\text{coil}} = l_{\text{ru}} - l_{\text{chu}}, \quad (15)$$

式中 l_{ru} 和 l_{chu} 分别为被测保偏光纤环在采用白光干涉仪进行测试时入光端及出光端熔点偏振耦合峰对应的补偿干涉仪两臂光程差。只要能够从光纤环偏振耦合分布图中获得 l_{ru} 和 l_{chu} ,即可计算得到光纤环两正交偏振主轴间的光程差。

分析光路中各段保偏光纤之间的关系,如图 3 所示。在光纤起偏器到 45° 光纤检偏器之间,共包含三段保偏光纤,分别为:光纤起偏器输出尾纤、被测保偏光纤环和光纤检偏器输入尾纤。两个光纤偏振器件的尾纤长度及产生的光程差可预先测得,从主干涉峰位置开始加上 45° 光纤检偏器尾纤光程差即可估计 l_{chu} 的值,将最外侧次级干涉峰位置向内扣除起偏器尾纤光程差即可估计 l_{ru} 的值,因存在光纤长度测量误差和尾纤双折射测量误差,该估计值与准确值可能存在一定偏差。考虑到熔点附近均为白光干涉仪与光纤环的尾纤,自由光纤受外界应力的影响较小,偏振耦合强度小,根据预估定位,容易在附近找到由熔接点偏振耦合引起的干涉峰,对干涉峰光程差进行定位即可获得 l_{chu} 和 l_{ru} 。

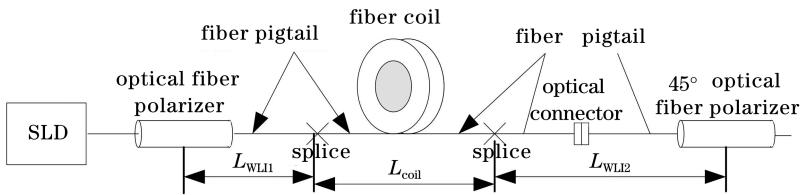


图 3 白光干涉仪各段保偏光纤间关系图

Fig. 3 Relationship of PM fibers in WLI

根据测得的光在保偏光纤环两正交偏振主轴传播产生的光程差可计算得到绕环光纤的拍长 B_L ^[17],表达式为

$$B_L = \frac{L_{\text{coil}} \cdot \lambda}{l_{\text{coil}}}, \quad (16)$$

式中 L_{coil} 为保偏光纤环长度, λ 为白光干涉仪测试波长。因此,采用白光干涉仪对光纤环进行偏振耦合测试,可以同时测得光纤环的偏振耦合分布及绕环光纤的拍长。

3 实验与讨论

选取一个保偏光纤环,光纤环采用四极对称绕

法绕制,绕环光纤长度为 770 m,绕制在铁镍合金环骨架上,共绕制 20 层。将光纤环尾纤按图 3 所示与白光干涉仪尾纤熔接后,测试光纤环的偏振耦合分布,测试结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,该光纤环的整体偏振耦合分布比较均匀,说明绕环过程中实现了比较稳定的应力控制。中间位置的光纤(即光纤环内侧光纤)偏振耦合强度略大于光纤环两端光纤(即光纤环外侧光纤),说明环骨架的存在对内侧光纤产生了附加的应力。有几个点的光纤偏振耦合强度相比于临近光纤显著增大,增大 5 dB 以上。产生大偏振耦合点的原因包括光纤换层点因光纤交叠产生较大的附加应

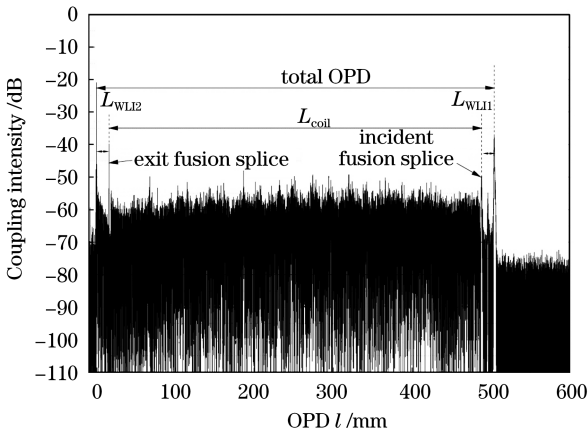


图4 光纤环1偏振耦合分布测试结果

Fig. 4 Polarization coupling distribution of fiber coil 1

力、光纤环两端尾纤并纤产生的小半径弯曲等。

从光纤环偏振耦合分布中识别光纤环两端尾纤与白光干涉仪熔点。在补偿干涉仪的输入端,因光纤环入光熔接点产生的耦合波列与主波列产生的光程差较大,故补偿干涉仪需要较大的补偿光程差才能使光纤环入光熔接点产生的耦合波列与主波列重新干涉。而光纤环出光熔接点产生的耦合波列与主波列产生的光程差较小,仅在白光干涉仪尾纤处产生较小的光程差,故补偿干涉仪需要很小的补偿光程差就能使光纤环出光熔接点产生的耦合波列与主波列重新干涉。从图4中可以看出,通过识别主干涉峰和最外侧的耦合次级干涉峰可获得测试系统所有保偏光纤两正交偏振主轴产生光程差的总和 $l_{\text{total}} = 504.64 \text{ mm}$,扣除根据尾纤长度和尾纤双折射估计得到的光纤起偏器尾纤两偏振主轴光程差 $l_{\text{WLI1}} = 16.04 \text{ mm}$,预估入光端熔点对轴误差产生的、由耦合波列与主波列发生干涉时补偿干涉仪的光程差 $l'_{\text{ru}} = l_{\text{total}} - l_{\text{WLI1}} = 504.64 \text{ mm} - 16.04 \text{ mm} = 488.6 \text{ mm}$,在该光程差附近寻找熔接点偏振耦合引起的干涉峰,定位干涉峰的光程差得到 l_{ru} 的值为 488.5996 mm 。根据 45° 检偏器保偏尾纤长度及双折射,计算其两正交偏振主轴间产生的光程差为 $l_{\text{WLI2}} = 15.93 \text{ mm}$,预估出光端熔点对轴误差对应的的光程差 $l'_{\text{chu}} = l_{\text{WLI1}} - l_{\text{main}} = 15.93 \text{ mm} - 0 \text{ mm} = 15.93 \text{ mm}$,在该光程差附近寻找熔接点偏振耦合引起的干涉峰,定位干涉峰的光程差,得到 l_{chu} 的值为 15.9712 mm 。则光纤环两正交偏振主轴传输光信号的光程差为

$$l = l_{\text{ru}} - l_{\text{chu}} = 488.5996 \text{ mm} - 15.9712 \text{ mm} = 472.6284 \text{ mm}. \quad (17)$$

白光干涉仪采用的 SLD 光源平均波长为 1300 nm ,

则根据(16)式计算可得光纤环绕环光纤拍长为

$$B_L = \frac{L_{\text{coil}} \cdot \lambda}{l} = \frac{770 \text{ m} \times 1300 \times 10^{-9} \text{ m}}{472.6284 \times 10^{-3} \text{ m}} \approx 2.12 \text{ mm}, \quad (18)$$

则通过采用白光干涉仪既测得了反映绕环光纤本身特征的拍长,也获得了光纤环受到外界应力等因素影响后表现出的光纤环偏振耦合分布。

在实际测试中,光纤长度 L_{coil} 采用计米器计长,通常计长误差小于 0.3% 。受外界温度变化及驱动电流不稳定的影响,波长 λ 产生波动,常温条件下波动不大于 0.1 nm 。白光干涉仪补偿光程差 l 通过内置精密定位系统反馈,定位误差约为 $0.2 \mu\text{m}$ 。计算拍长的可信值范围为

$$B_L = \frac{L_{\text{coil}} \cdot \lambda}{l} = \frac{770 \times (1 \pm 0.3\%) \times (1300 \pm 0.1) \times 10^{-9}}{(472.6284 \pm 0.0002) \times 10^{-6}}, \quad (19)$$

其最大值为 2.125 m ,最小值为 2.111 mm ,则测量精度在 0.02 mm 以内,优于传统测试方法 0.1 mm 的测试精度。

从图4给出的光纤环偏振耦合分布测试结果中还可以获得光纤环两端尾纤与白光干涉仪尾纤熔接点产生的偏振耦合峰的强度。测得入光点对轴角度误差产生的偏振耦合强度为 -49.5 dB ,出光点对轴角度误差产生的偏振耦合强度为 -39.8 dB 。根据(14)式偏振耦合强度与对轴角度误差的关系,可知两个熔点的对轴角度误差分别为 0.19° 和 0.59° 。这两个熔接点的偏振耦合强度均大于光纤环整体的偏振耦合强度,比较容易识别。虽然目前常用的保偏光纤熔接机对轴角度误差典型值为 0.6° ,但多次熔接中必然存在对轴角度误差很小的情况。为了验证熔接对轴角度误差很小的情况下,是否可以通过识别光纤环两端尾纤熔接点测试光纤拍长,本研究从一些光纤环白光干涉仪测试结果中选取了一个熔接对轴误差较小的结果,如图5所示。从图中可以看出光纤环两端没有明显的偏振耦合峰,这说明两个保偏光纤熔点的熔接对轴角度误差很小,熔接引起的偏振耦合峰强度甚至小于光纤环中一些较大应力导致的偏振耦合峰强度。

为了分析是否能识别出小角度对轴误差下光纤环尾纤熔接点,将光纤环出光点附近的偏振耦合分布测试结果进行放大,如图6所示,可见熔点引起的偏振耦合强度为 -52.7 dB ,相当于 0.13° 的对轴误

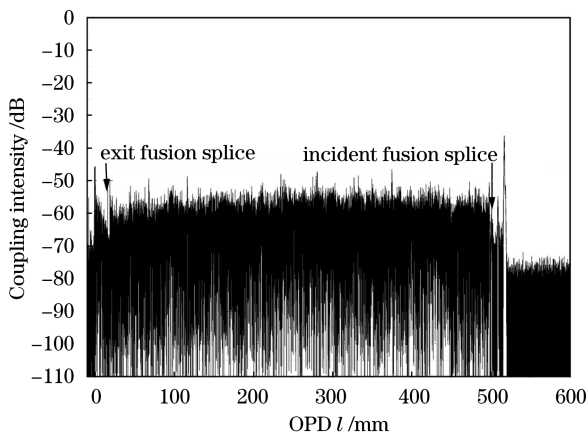


图5 光纤环2偏振耦合分布

Fig. 5 Polarization-coupling distribution of fiber coil 2

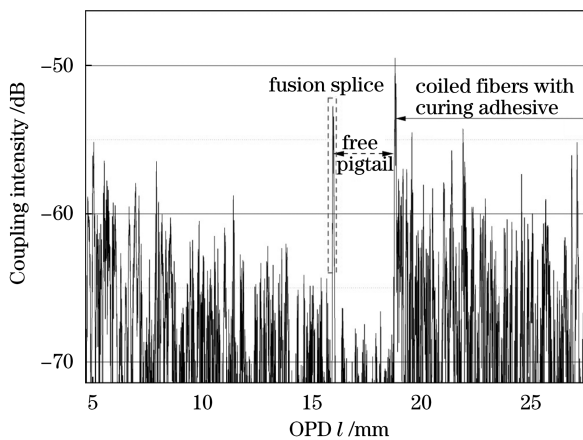


图6 光纤环2出光点附近偏振耦合分布测试结果

Fig. 6 Testing result of polarization-coupling distribution near the exit fusion splice of fiber coil 2

差。从图中还可以看出,光纤环胶化部分的偏振耦合强度明显高于光纤环自由尾纤,增大幅度约为10 dB,因此光纤环绕环过程中的刷胶固化对光纤施加的附加应力是引起光纤环保偏能力下降的重要因素。虽然该熔点引起的偏振耦合强度甚至低于光纤环中某些点受应力或弯曲影响产生的偏振耦合,但因熔接点位于光纤环的一段自由尾纤与白光干涉仪尾纤之间,其两侧附近的光纤为自由光纤,偏振耦合强度较小,所以该熔接点仍可以比较容易地识别出来,进而实现光纤环两端尾纤熔点间补偿光程差的测试,计算出光纤环两正交偏振主轴传输光信号的光程差及绕环光纤的拍长。测得光纤环2两端熔点对应的补偿干涉仪光程差分别为500.9248 mm和16.0160 mm,则光纤环两正交偏振主轴传输光信号产生的光程差为484.9088 mm,计算得到的绕环光纤拍长为2.06 mm,拍长略小于光纤环1的绕环光纤。

4 结 论

提出了一种利用白光干涉仪同时测量保偏光纤环偏振耦合分布和绕环光纤拍长的方法,并采用两个光纤环进行了验证。首先获得了光纤环的偏振耦合分布,观察可知光纤环内侧光纤的偏振耦合强度略大于外部光纤,且存在一些大偏振耦合点的特点,以及光纤环胶化的环体光纤偏振耦合强度明显高于两端的自由尾纤的偏振耦合强度。这些特征为分析光纤环保偏能力的外部影响因素提供了依据。此外,通过识别光纤环尾纤与白光干涉仪尾纤的两个光纤熔接点,测得了光纤环两正交偏振主轴传输光信号的光程差,进而计算得到了反映绕环光纤本身保偏能力的拍长。且光纤环两端熔接点易于识别,实验中可识别的对轴误差可低至 0.13° ,远小于目前保偏光纤熔接机对轴误差的典型值,进一步说明了该方法的适用性。

参 考 文 献

- [1] Yang Y H, Yang F L, Lu L, et al. Research on interferometer photonic crystal fiber optic gyroscope technology [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (3): 0328004.
杨远洪, 杨福铃, 陆林, 等. 干涉型光子晶体光纤陀螺技术研究 [J]. 光学学报, 2018, 38 (3): 0328004.
- [2] Xue L L, Shen Y P, Xu Y. Development and review of foreign inertial technology in 2019 [J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(1): 60-66.
薛连莉, 沈玉芄, 徐月. 2019年国外惯性技术发展及回顾 [J]. 导航定位与授时, 2020, 7(1): 60-66.
- [3] Chen H Y, Zheng Y, Wang X X, et al. Influence of mean wavelength on scale factor of fiber optic gyroscope [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46 (3): 0306002.
陈和宇, 郑月, 王夏霄, 等. 平均波长对光纤陀螺标度因数的影响 [J]. 中国激光, 2019, 46 (3): 0306002.
- [4] Song N F, Hu X Y, Xu X B, et al. Measurement and analysis of scattering in solid-core polarization-maintaining photonic crystal fibers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(1): 010601.
宋凝芳, 胡雪妍, 徐小斌, 等. 实芯保偏光子晶体光纤散射测量与分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(1): 010601.
- [5] Yang Y H, Yan H, Li S, et al. Estimation of gyro

- bias drift due to distributed polarization cross coupling in the fiber coil[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 10247-10257.
- [6] Xie Z, Yang Y H, Yan H, et al. Estimation of distributed polarization coupling error in optical fiber coil of fiber optic gyroscope[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1006004.
谢泽, 杨远洪, 闫晗, 等. 光纤陀螺光纤环分布偏振耦合误差预估[J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1006004.
- [7] Jiang X Y, Xiao Y Y. Temperature characteristics of birefringence of polarization-maintaining micro/nanofiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0806001.
蒋晓勇, 肖悦娱. 保偏微纳光纤双折射的温度特性[J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0806001.
- [8] Ge S C, Yang R F, Guo C X. Constant small tension control for fiber optic coil variable-velocity winding [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 172012-172020.
- [9] Li X Y, Liu P, Guang X X, et al. Temperature dependence of transverse magnetic error in a polarization maintaining fiber optic gyroscope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0106006.
李绪友, 刘攀, 光星星, 等. 保偏光纤陀螺横向磁场误差的温度依赖性[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0106006.
- [10] Li C, Yang J, Yu Z J, et al. High-order interference effect introduced by polarization mode coupling in polarization-maintaining fiber and its identification [J]. *Sensors*, 2016, 16(3): 419.
- [11] Lin H Z, Yao Q, Hu Y M. Testing system of fiber polarization coupling based on polarization maintaining structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(7): 1794-1799.
林惠祖, 姚琼, 胡永明. 全保偏结构的光纤偏振耦合测试系统[J]. *中国激光*, 2010, 37(7): 1794-1799.
- [12] Xiao Y Y, Wang Z Z, Shi Z D, et al. Beat-length measurement of polarization maintaining fibers based on broadband fiber circular polarizers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1206002.
肖悦娱, 王昭昭, 石志东, 等. 基于宽带光纤圆起偏器的保偏光纤拍长测量[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1206002.
- [13] Li C, Yang J, Yu Z, et al. Dynamic range beyond 100 dB for polarization mode coupling measurement based on white light interferometer [J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16247-16257.
- [14] Zhang H X, Zhang Y M, Jing W C, et al. White light interference envelope extract in polarization coupling analyzer[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2007, 18(4): 450-453.
张红霞, 张以谟, 井文才, 等. 偏振耦合测试仪中白光干涉包络的提取[J]. *光电子·激光*, 2007, 18(4): 450-453.
- [15] Yang J, Yuan Y G, Yu Z J, et al. Optical coherence domain polarimetry technology and its application in measurement for evaluating components of high precision fiber-optic gyroscopes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328007.
杨军, 苑勇贵, 喻张俊, 等. 光学相干域偏振测量技术及其在高精度光纤陀螺器件测量中的应用[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328007.
- [16] Li Y, Sun Y F, Song J M, et al. Experimental study of temperature characteristics of polarization coupling intensity of photonic crystal fiber coil [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 040601.
李彦, 孙彦凤, 宋镜明, 等. 光子晶体光纤环偏振耦合强度温度特性实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(4): 040601.
- [17] Yang Y H, Li L, Jiang D G, et al. Precision measurement scheme for beat-length of polarization maintain optical fiber [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(6): 807-811.
杨远洪, 李莉, 蒋大钢, 等. 高精度保偏光纤拍长测试[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6): 807-811.