

双折射波导偏振耦合的短相干干涉测量

周柯江¹, 胡科可¹, 王涛²

- (1. 浙江大学 信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027;
2. 上海鸿申信息技术有限公司, 上海 201206)

摘要: 保偏光纤内部具有的高双折射,使其在内部传播的主模和耦合模之间存在一定的光程差。研究了高双折射波导中连续偏振耦合分布和分立点耦合的白光干涉测量法,推导出一种简明使用的公式,求出双折射波导的保偏参数,并且根据调制解调相关原理精确测量耦合点的强度和位置。实验测量了国产类矩形保偏光纤以及光纤偏振器。该方法最突出的优点是采用非破坏性方法测出保偏波导的每个局部的保偏参数,可用于检测集成波导器件和保偏光纤的质量、双折射波导之间的主轴对准、分布式光纤应变传感器等领域,并且可作为保偏光纤生产和使用的一种有效检测方法,大大提高集成波导器件及相关传感器的性能。

关键词: 白光干涉; 双折射; 保偏光纤

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-2992-04

Short coherent interferometry of polarize coupling in birefringent waveguide

Zhou Kejiang¹, Hu Keke¹, Wang Tao²

- (1. Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Shanghai Hong Shen Information Technology Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: The main polarization mode and coupling mode in polarization-maintaining fiber (PMF) have some optical path difference because of the internal birefringence. White-light interferometry for testing continuum polarized coupling distributing and discreting polarized coupling distributing in high birefringent waveguide was investigated. The polarization-maintaining parameter was obtained and a concise formula was derived. It can be used to measure the intensity and position of the coupling point accurately according to the relevant theory of modulation and demodulation. PMF and the optical fiber polarizer were measured as examples. The new approach can be utilized to test integrated waveguide elements, PMF, the axis alignment between birefringent waveguide, distributed optical fiber sensors, etc. The most prominent advantage of this method is to measure the polarization-maintaining parameter without any destruction to PMF. It can be used as an effective testing tool in PMF manufacture and application. With

收稿日期: 2014-01-19; 修订日期: 2014-02-23

基金项目: 数字式光纤传感器的研制(111406-I21101)

作者简介: 周柯江(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光纤陀螺, 白光干涉仪, 无线电电子学, 物理学等方面的研究。

Email: ekjzhou@zju.edu.cn

the help of this detection method, the performance of optical fiber polarization devices and optical fiber sensors is improved significantly.

Key words: white-light interferometry; birefringent; polarization-maintaining fiber

0 引言

集成光学波导器件和保偏光纤广泛地应用于光纤传感和光纤通信领域^[1-5]。由于光纤内部应力区缺陷,横向应力、弯曲、扭转等,在保偏光纤内部会发生偏振耦合现象,降低光纤的偏振保持能力,导致系统偏振消光比降低^[6-8]。除了光损耗指标,沿波导分布的偏振耦合也是关键技术指标之一,需要检测保偏光纤中的偏振耦合情况^[9-10]。此外,许多双折射波导之间需要主轴精确对接,如 LiNbO₃ 波导器件与保偏光纤的主轴对准。

普通的强度测量法往往精度低,易受环境光影响^[11-14],并且强度法只能测量总的偏振耦合力,而不能测量耦合发生的准确位置。注意到这些器件通常是线性双折射波动,利用短相干长度光源的白光扫描干涉法和调制解调相关原理,可以精确测量耦合点的强度和位置。该原理也可以用于分布式应变光纤传感器。

1 白光干涉测量基本原理

1.1 偏振耦合

设双折射波导的偏振耦合是弱耦合,沿主轴 x 方向和 y 方向振动的线偏光的传输损耗相等。如图 1 所

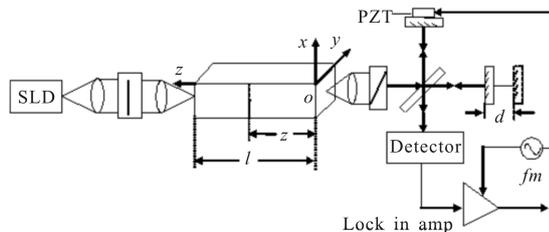


图 1 白光干涉测量系统原理

Fig.1 Basic principle of white light interferometer system

示,短相干光经起偏器后沿波导 x 方向偏振入射,经 l 长的波导传播后的电场振幅可以用公式表示为:

$$E_x(l, t) = e^{j(\omega_0 t - \beta_{x0} l)} f\left(t - \frac{l}{v_x}\right) \quad (1)$$

式中: ω_0 为光的中心角频率; β_{x0} 为 $\omega = \omega_0$ 时的传播常数; v_x 为 x 振动方向光的群速度。

令光源的自相关函数为:

$$R(\tau) = \langle f(t) f^*(t + \tau) \rangle \quad (2)$$

及归一化 $R(0) = 1$ 。

设波导在 z 处的耦合系数为 $\Gamma(z)$,从 x 轴振动的光耦合至 y 轴的光振幅正比与 $\Gamma(z)E_x(z, t)$,则波导终端在 y 轴振动的光振幅为:

$$E_y(l, t) = -j \int_0^l \Gamma(z) E_x(z, t) dz \quad (3)$$

这里忽略了从 y 轴再耦合回 y 轴的光场,因为这已经是高阶小量。

将 $E_x(l, t)$ 和 $E_y(l, t)$ 两经与它们轴成 45° 的检偏器后,入射到迈克尔逊干涉仪中(也可以用其他类型的干涉仪),设干涉仪测量臂与参考臂之差为 d ,则干涉仪检测端的两个电场量正比于:

$$E_M = E_x\left(l - \frac{2d}{c}, t\right) + E_y\left(l - \frac{2d}{c}, t\right) \quad (4)$$

$$E_R = E_x(l, t) + E_y(l, t) \quad (5)$$

当 $d \neq 0$ 时,光强的干涉项正比于

$$I(d) = \langle E_M \cdot E_R^* \rangle + \langle E_M^* \cdot E_R \rangle \quad (6)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 表示时间平均。

为了将干涉强度的包络与待测双折射波导保偏参数 h 联系起来,假设光源自相关函数的模是矩形,

$$\langle f(t) \cdot f^*(t + \tau) \rangle = \begin{cases} 1 & |\tau| < l_c / c \\ 0 & |\tau| > l_c / c \end{cases} \quad (7)$$

式中: l_c 为相干长度; τ 为相干时间,即光源的谱分布用 sinc/x 函数近似。则干涉的包络:

$$S(d) = \left\langle \left| \int_0^l \Gamma(z) e^{j(\beta_{x0} - \beta_{y0})z} R\left[D(l-z) - \frac{2d}{c}\right] dz \right|^2 \right\rangle \quad (8)$$

将公式(7)代入,令 $\Delta z_m = \frac{l_c}{Dc}$,其中 $D = \frac{1}{v_x} - \frac{1}{v_y}$, c

为光速, v_y 为 y 振动方向光的群速度。只有 $2d \leq \Delta z_m$ 时,公式(8)不为零,则由定义

$$h \cdot \Delta z_m = \left\langle \left| \int_{\Delta z_m} \Gamma(z) e^{j(\beta_{x0} - \beta_{y0})z} dz \right|^2 \right\rangle \quad (9)$$

并将公式(8)代入公式(9),则:

$$h = S^2(d) l \left(\frac{l_c}{Dc} \right) \quad (10)$$

1.2 分立点耦合与调制解调方法

如果有多个单耦合点,其间隔大于光的相干长度,则可以表述为各个干涉光强之和,通过使扫描耦合臂的 d 值不同可以分辨各点之间耦合强度。其干涉峰值正比于振幅耦合,这种方法显然可以应用于分布式光纤传感,令 $\Gamma(z)=i\Gamma_0\delta(z-z_0)$,则可求出 $z_0=\frac{2d}{Dc}-l$ 处,由公式(6)求出:

$$|\Gamma_0| \approx \left| \frac{I_p(0)}{I_p\left(\frac{2d}{Dc}\right)} \right| \quad (11)$$

式中:下标 p 表示干涉峰值。

如果只考虑一个耦合点,为了消除环境光和振动干扰,采取对干涉仪参考臂的反射面(参考镜)做正弦振动调制,并用锁相放大器检测调制基频分量,可以得出信号正比于宗量为调制深度的一阶第一类贝塞尔函数。设参考镜的平移变化量为 $2a$,则参考镜反射的光波长为:

$$E_R = \sqrt{1-\varepsilon^2} E_0(t-\tau_0) + \varepsilon E_0[t-\tau_0-DL'] \quad (12)$$

式中: $\tau_0=[a\cos(\omega t)]/c$; ε 为耦合强度; L' 为耦合点到干涉入口的保偏光纤长度。是由于参考镜反射光由于调制而产生的时差,这一光束与测试镜反射的光束发生干涉,干涉场的强度为:

$$\begin{aligned} I = & \langle E_0(t-\tau_0)E_0^*(t-\tau_0) \rangle + \langle E_0\left(t-\frac{2d}{c}\right)E_0^*\left(t-\frac{2d}{c}\right) \rangle + \\ & 2\varepsilon\sqrt{1-\varepsilon^2} \langle E_0(t-\tau_0)E_0^*(t-\tau_0-DL') \rangle + \\ & 2\varepsilon\sqrt{1-\varepsilon^2} \langle E_0\left(t-\frac{2d}{c}\right)E_0^*\left(t-DL'-\frac{2d}{c}\right) \rangle + \\ & 2\langle E_0\left(t-\frac{2d}{c}\right)E_0^*\left(t-\frac{2d}{c}\right) \rangle + 2\varepsilon\sqrt{1-\varepsilon^2} [\langle E_0(t-\tau_0) \cdot \\ & E_0^*\left(t-DL'-\frac{2d}{c}\right) \rangle + \langle E_0(t-\tau_0-DL') \cdot E_0^*\left(t-\frac{2d}{c}\right) \rangle] \end{aligned} \quad (13)$$

式中:光源的功率谱密度函数为高斯分布。

$$\begin{aligned} I = & 2I_0 + 4\varepsilon\sqrt{1-\varepsilon^2} I_0 \exp[-2(\pi\Delta\nu DL')^2] \exp(-j2\pi\nu_0 DL') + \\ & 2I_0 \exp\left[-2\left[\pi\Delta\nu\left(\frac{2d}{c}-\tau_0\right)\right]^2\right] \exp\left[j2\pi\nu_0\left(\frac{2d}{c}-\tau_0\right)\right] + \\ & 2\varepsilon\sqrt{1-\varepsilon^2} I_0 \exp\left[-2\left[\pi\Delta\nu\left(\frac{2d}{c}+DL'-\tau_0\right)\right]^2\right] \cdot \\ & \exp\left[j2\pi\nu_0\left(\frac{2d}{c}+DL'-\tau_0\right)\right] + 2\varepsilon\sqrt{1-\varepsilon^2} I_0 \cdot \\ & \exp\left[-2\left[\pi\Delta\nu\left(\frac{2d}{c}-DL'-\tau_0\right)\right]^2\right] \cdot \end{aligned}$$

$$\exp\left[j2\pi\nu_0\left(\frac{2d}{c}-DL'-\tau_0\right)\right] \quad (14)$$

式中: $\Delta\nu$ 为光源的光谱半谱宽; ν_0 为光谱的中心波长。

锁相测试是一种选频测试,只测试频率等于参考分量频率的信号分量。选取锁相放大器的参考分量的频率作为参考镜的调制频率,由于直流信号、噪声信号的频率不是参考镜的频率,则锁相放大器的输出就是干涉信号的基频分量:

$$\begin{aligned} I_{out} = & 4I_0 \exp\left[-2\left(\pi\Delta\nu\frac{2d}{c}\right)^2\right] \cos\left(2\pi\nu_0\frac{2d}{c}\right) J_1(2a\pi\nu_0/c) + \\ & 4\varepsilon\sqrt{1-\varepsilon^2} I_0 \exp\left[-2\left[\pi\Delta\nu\left(\frac{2d}{c}+DL'\right)\right]^2\right] \cdot \\ & \cos\left[2\pi\nu_0\left(\frac{2d}{c}+DL'\right)\right] J_1(2a\pi\nu_0/c) + \\ & 4\varepsilon\sqrt{1-\varepsilon^2} I_0 \exp\left[-2\left[\pi\Delta\nu\left(\frac{2d}{c}-DL'\right)\right]^2\right] \cdot \\ & \cos\left[2\pi\nu_0\left(\frac{2d}{c}-DL'\right)\right] J_1(2a\pi\nu_0/c) \end{aligned} \quad (15)$$

由此可知,调制基频分量正比于宗量为调制深度的一阶第一类贝塞尔函数。

2 保偏光纤扫描实验

为了证明公式(10)的有效性,测试样品采用国产的 0.95 m 长的矩形保偏光纤作为双折射波导,这种光纤色散系数 $D=2000$ ps/km,由于其应力矩截面积小,对称性好,具有温度应变响应小的优良特点,如图 2 所示。白光干涉源采用超辐射管,光波长 1300 nm,半功率谱宽 35 nm,相干长度约 48 μ m。经光纤起偏器起偏后与保偏光纤焊接,测试结果如图 3 所示,可知耦合系数约 -60 dB。由公式(10)计算:

$$h \leq 1.6 \times 10^{-5} / \text{m}$$

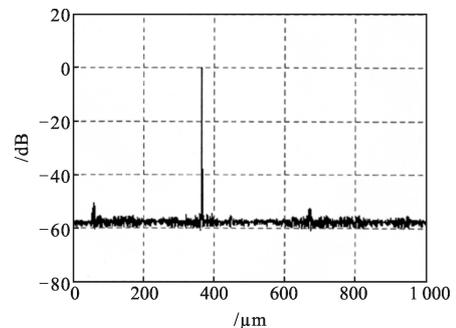


图 2 自然状态保偏光纤扫描测试

Fig.2 Natural state of PMF scanning testing

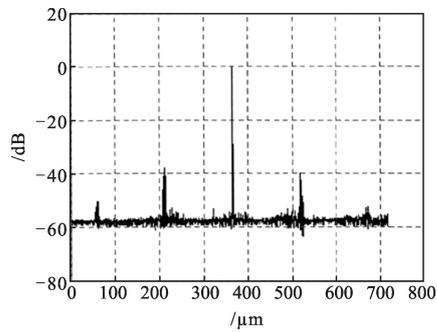


图3 加以应力点后的保偏光纤扫描测试

Fig.3 PMF with the addition of stress point scanning testing

上述不等号是因为锁相放大器的分辨率极限限制。由于入射光振动面并不完全与保偏光纤 x 轴对准,有 -51 dB 的耦合,即两主轴差 0.2° 。因采用短相干光源,只要不取干扰附近的值,就不会影响测量结果。显然这又提供了一种双折射波导之间的准确对轴方案。

光纤起偏器的测试结果如图4所示,只显示了等光程位置一侧的曲线。待测光纤起偏器的采用光的附加晶体偏振吸收方法,并用单模光纤制成。由于器件的尾纤是园对称的,没有双折射现象。因此,将光纤起偏器中附加晶体部位以后的光纤绕成光纤环后,再将光波入射到检偏器,通过光纤由于弯曲所引起的双折射,使从偏振部位出射的两个方向的光波具有不同的群延迟。测量结果显示此起偏器的偏振消光比为 -25 dB。

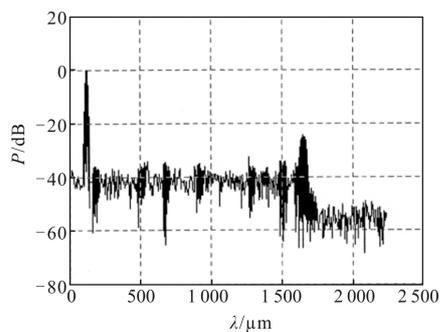


图4 光纤起偏器的扫描测试

Fig.4 Optical fiber polarizer scanning testing

3 结论

采用白光干涉检测系统,可以方便地测量保偏光纤、双折射集成光学波导等器件偏振耦合沿波导的分布情况,推导了一种简明使用的公式,求出保偏参数 h 。该方法的突出优点是采用非破坏性方法测出

保偏波导的每个局部的保偏参数 h 。这种方法也可以用于测量分立耦合位置和耦合振幅,可用于双折射器件之间的主轴对准、光纤应变传感器等领域。并且,采用调制解调方法可以大大减小环境因素的影响。

参考文献:

- [1] Culshaw B, Giles IP. Fiber optic gyroscopes [J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1983, 16(1): 183-195.
- [2] James N Blake. Magnetic field sensitivity of depolarized fiber optic gyros[C]//SPIE, 1990, 1367: 81-86.
- [3] Li Yan, Feng Lishuang, Xu Hongjie, et al. Light route research on optical fiber polarization characteristics test system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 430-433. (in Chinese)
- [4] Shinji Yamashita, Kazuo Hotate. Distributed pressure sensor with a mode-locked fiber-ring laser[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(9): 590-592.
- [5] Yuan Libo. Overview and forecast of fiber optic white-light interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 1-13. (in Chinese)
- [6] Zhang Hongxia, Zhang Yimo, Jia Dagong, et al. White light scanning interferometer used for inspecting position of polarization coupling in polarization maintaining fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 305-308. (in Chinese)
- [7] Toru Okugawa, Kazuo Hotate. Synthesis of arbitrary shapes of optical coherence function using phase modulation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(12): 1710-1712.
- [8] Shyagin M, Khomenko A, Tentori D. Remote measurement of mode-coupling coefficients in birefringent fiber[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(12): 913-915.
- [9] Zhou Xiaojun, Gong Junjie, Liu Yongzhi, et al. Analysis of white-light interference distributed optic fiber sensor by polarized modes coupling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(5): 605-608. (in Chinese)
- [10] Jing Wencai, Li Qiang, Tang Feng, et al. Design of a distributed stress sensor using birefringence optical fiber[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2005, 16(1): 1-4. (in Chinese)
- [11] Takada K, Node J, Okamoto K. Measurement of spatial distribution of mode coupling in birefringent polarization maintain fiber with new detection scheme[J]. *Optics Letters*, 1986, 11(10): 680-682.
- [12] Kemmler M W, Buschelberger H J. White light interferometry for test FOG components [C]//SPIE, 1992, 1585: 357-370.
- [13] Kazumasa Takada, Hiroaki Yamada, Yasunori Inone. Optical low coherence method for characterizing silica-based arrayed-waveguide grating multiplexers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(7): 1677-1689.
- [14] Wang Tao, Zhou Kejiang, Ye Wei, et al. Interferometric measurement of polarization mode distribution in fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(6): 737-740. (in Chinese)