

# 光子晶体光纤环偏振耦合强度温度特性实验研究

李彦 孙彦凤 宋镜明 王旭

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 以光子晶体光纤环为研究对象,利用白光干涉仪测试了不同温度下保偏光子晶体光纤环和普通保偏光纤环内部的偏振交叉耦合强度分布,分析了光纤环中固定耦合点不同温度下的偏振耦合强度变化。结果表明,在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度条件下,保偏光子晶体光纤环偏振耦合强度最大变化率为0.97%;普通保偏光纤环偏振耦合强度的变化率为4.71%,约为保偏光子晶体光纤环的5倍。实验研究证明,光子晶体光纤环的偏振交叉耦合强度温度稳定性高于普通保偏光纤环的偏振交叉耦合强度的温度稳定性。

**关键词** 相干光学;温度特性;白光干涉法;偏振耦合强度;光子晶体光纤环

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.040601

## Experimental Study of Temperature Characteristics of Polarization Coupling Intensity of Photonic Crystal Fiber Coil

Li Yan Sun Yanfeng Song Jingming Wang Xu

School of Instrumentation Science & Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** Photonic crystal fibers (PCFs) are investigated. The polarization cross-coupled distributions of both polarization-maintaining photonic crystal fiber coil and ordinary polarization-maintaining fiber coil are tested at various temperatures utilizing white light interferometers. Changes of polarization coupling intensities of fixed polarization cross-coupled points in fiber coils at different temperatures are also analyzed. The obtained results show that, in the temperature range between  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the maximum change rate of polarization coupling intensity of photonic crystal fiber coil is 0.97%, while that of ordinary polarization maintaining fiber coil is 4.71%, which is almost five times as the former one. Thus it can be concluded that the coupling intensity of photonic crystal polarization maintaining fiber coil possesses better stability against temperature changes than that of ordinary polarization-maintaining fiber coil.

**Key words** coherence optics; temperature characteristics; white light interferometry; polarization coupling intensity; photonic crystal fiber coil

**OCIS codes** 030.1670; 070.4790; 260.2030

### 1 引言

近年来,由于光子晶体光纤(PCF)具有高双折射、温度稳定性好、抗辐射能力强等<sup>[1]</sup>诸多优于传统光纤的优点,其在光纤传感领域尤其是光纤陀螺上的应用已经逐步成为研究热点,并引起了国内外众多研究机构的高度重视。

偏振误差是陀螺中主要的非互易相位误差,光纤环中的偏振交叉耦合情况是引起偏振误差的因素之一,其稳定性影响陀螺的精度和长期稳定性<sup>[2]</sup>。近几年,各研究单位分别对保偏光纤环偏振耦合强度的温度稳定性<sup>[3]</sup>、双折射色散对偏振耦合强度的影响<sup>[4]</sup>等进行了研究。在光子晶体光纤方面,北京航空航天大学<sup>[5]</sup>的Ma等<sup>[5]</sup>测试了全温条件下双折射的温度特性。目前,对于光子晶体光纤环内偏振交叉耦合强度的温度稳定

收稿日期: 2014-10-17; 收到修改稿日期: 2014-11-10; 网络出版日期: 2015-03-31

基金项目: 国家973计划(6132990203-2)

作者简介: 孙彦凤(1987—),女,硕士研究生,主要从事光纤陀螺方面的研究。E-mail: syf1119ha@163.com

导师简介: 李彦(1975—),女,博士,讲师,硕士生导师,主要从事光纤传感器、光纤陀螺等方面的研究。

E-mail: li\_yan@buaa.edu.cn

性研究尚未见报道。

本文利用白光干涉仪(OCDP)对采用四极对称绕法绕制的光子晶体光纤环和普通保偏光纤环在不同温度下的偏振交叉耦合分布进行了实验研究。

## 2 测量原理

基于白光干涉仪的白光干涉法(一种光学相干域的偏振测试技术)可实现光纤环对称性的分析、光纤环内部偏振交叉耦合的分布测量<sup>[6]</sup>。白光干涉仪(OCDP)采用白光干涉原理,其系统结构如图1所示。

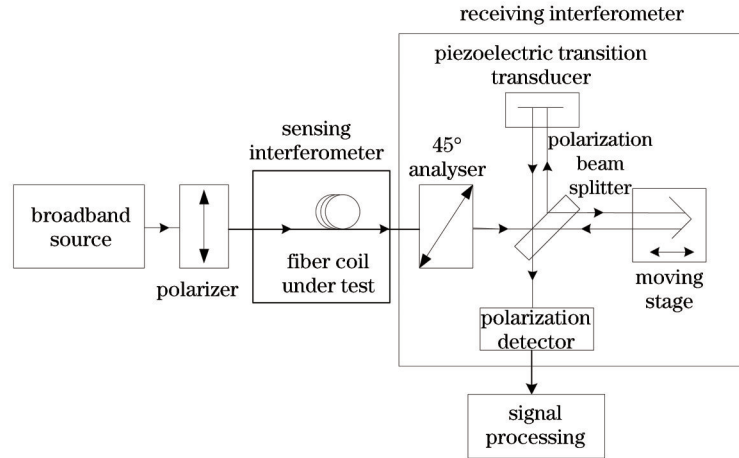


图1 OCDP系统结构图

Fig.1 System structure of OCDP

OCDP一般由传感干涉仪和参考干涉仪串联组成,在其内部,传感干涉仪的光程差被参考干涉仪补偿,来自传感干涉仪互不干涉的光信号,经参考干涉仪中的检偏器检偏、移动反射镜补偿相位后,变为干涉光产生干涉。

光线在测试系统中的传输原理如图2所示。光源发出的非偏振光经起偏器起偏进入待测保偏光纤(PMF)环中,其中调节起偏器透光光轴方向与保偏光纤快轴方向一致。若光纤环中存在一个耦合点,光束在测试系统中传输,线偏振光在耦合点处会有一部分能量耦合进入与其正交的偏振态上去,变成相互正交的两束线偏振光,记为 $X_0$ 、 $Y_0$ 。由于保偏光纤快慢轴折射率不同,经待测光纤环后输出两互相正交的线偏振光,且两线偏振光的光程差为 $\Delta Z_1$ 。两线偏振光经过透光轴与相互正交的两束线偏振光的偏振方向的夹角均为 $45^\circ$ 的检偏器,变成偏振方向相同的两束线偏振光,记为 $X$ 、 $Y$ 。

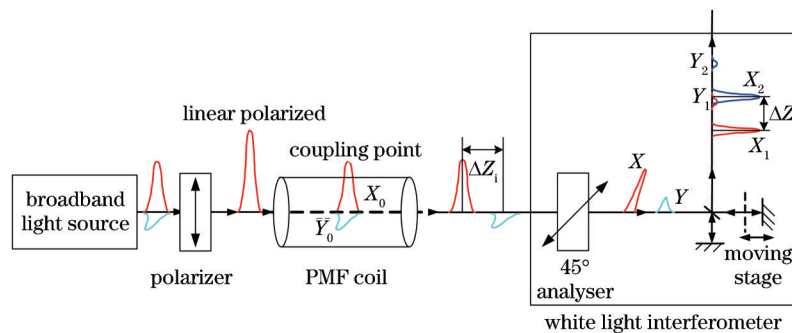


图2 测试系统中光路图

Fig.2 Experimental layout of the test system

经过分光棱镜(PBS)后,线偏光 $X$ 、 $Y$ 均被分成两束线偏光。由于两束线偏光传输路径不同,线偏光 $X_1$ 和 $X_2$ ( $Y_1$ 和 $Y_2$ )会产生光程差 $\Delta Z_a$ 。通过调节动反射镜的位置,可改变 $\Delta Z_a$ 的大小。由于白光干涉仪采用宽谱光源,相干长度仅在几十微米左右,在光纤中积累的双折射 $\Delta Z$ 将远大于相干长度,两波列不发生干涉。干涉仪的动反射壁进行扫描,当 $\Delta Z_a = \Delta Z_1$ 时,补偿光程差 $\Delta Z_1$ , $X_2$ 与 $Y_1$ 发生干涉产生干涉条纹。

干涉条纹如图3所示,若耦合点包络峰值和主极大峰值的光强分别记为  $I_{\text{coupling}}$  和  $I_{\text{main}}$ , 则偏振耦合强度  $h$  可表示为<sup>[7]</sup>

$$h = 20 \lg \left( \frac{I_{\text{coupling}}}{I_{\text{main}}} \right)^2. \quad (1)$$

白光干涉仪的探测器(PD)探测到干涉信号后,经信号处理部分处理得到偏振耦合点的偏振交叉耦合强度。光纤环内部存在很多偏振交叉耦合点,通过移动白光干涉仪的动反射镜,可依次找出光纤环内部的偏振交叉耦合点,得到光纤环的偏振耦合强度分布。

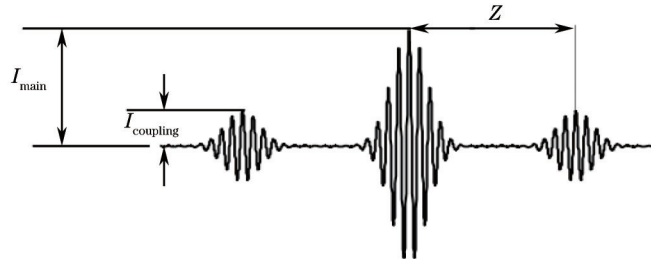


图3 单耦合点干涉光强

Fig.3 Interferometer intensity of one coupling point

### 3 实验研究

实验中所用光源为超辐射发光二极管(SLD)。为了与普通保偏光纤环的偏振交叉耦合强度的温度稳定性进行对比,所用光纤环为长度均为 540 m 左右的保偏光子晶体光纤环和普通保偏光纤环,保偏光子晶体光纤和普通保偏光纤的波长均为 1550 nm。光纤环制作工艺相同,即:1)四极对称绕法绕制;2)绕环所用张力相同;3)绕制层数相同;4)填充和固化工艺相同。为了消除结构件的热胀冷缩造成的光纤环内部应力变化对偏振耦合强度的影响<sup>[3]</sup>,将光纤环全脱骨架后在不同温度下进行测量。

由于光子晶体光纤受双折射色散<sup>[8]</sup>影响较大,双折射色散会引起耦合点干涉包络的展宽,且展宽程度随着光纤长度累积。为降低双折射色散对光子晶体光纤环偏振耦合强度的影响,实验时对光子晶体光纤环进行了正反两次测量,取两次测量结果的前半段的实验数据进行分析。而普通保偏光纤环受双折射色散影响很小,可忽略不计<sup>[8]</sup>。

将图1中的待测光纤环放入温箱中。实验温度设置为  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 每个温度点保温 30 min, 保证光纤环内部温度均匀。最后,每个温度点保温结束后采用 OCPD 测量一组光纤环的偏振交叉耦合强度分布。

### 4 实验结果分析

图4给出了常温( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )时光子晶体光纤环的偏振耦合强度分布。由于偏振交叉耦合点较多,仅选取如图4所示的4个耦合点,4个耦合点均为绕环的换层点,其偏振耦合强度较强且两组耦合点关于光纤中点基

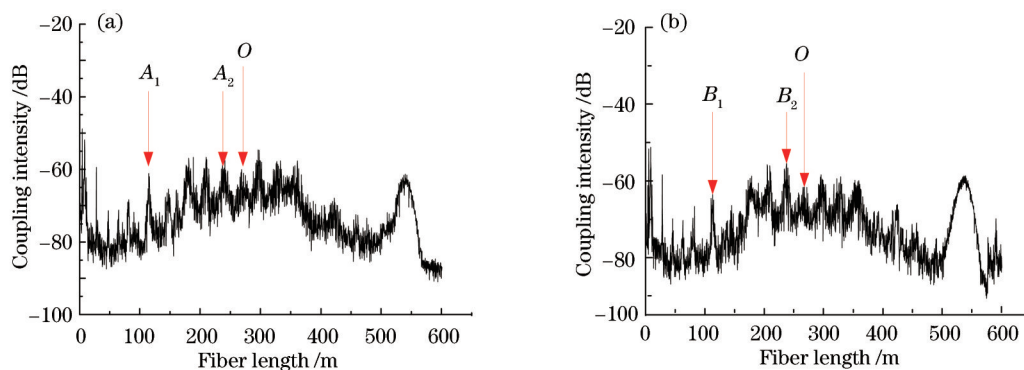


图4 光子晶体光纤环测量结果及耦合点选择。(a)正向测量;(b)反向测量

Fig.4 Measured results and the coupling points of photonic crystal fiber coil. (a) Measurement in the positive direction;

(b) measurement in the opposite direction

本对称。由图4可见,由于双折射色散的影响,光子晶体光纤环正向测量和反向测量中实验数据的后半段无法区分相邻的耦合点,从正向测量数据的前半段选取耦合点 $A_1$ 、 $A_2$ ,从反向测量的数据的前半段选取耦合点 $B_1$ 、 $B_2$ 。其中, $A_1$ 与 $B_1$ 、 $A_2$ 与 $B_2$ 基本关于光纤环的中点对称。

以光纤环长度的中点 $O$ 为参考点, $A_1$ 、 $B_1$ 、 $A_2$ 、 $B_2$ 距 $O$ 点的光纤长度分别为154.96、155.17、33.04、32.97 m。光子晶体光纤环选取的4个耦合点位置分别标注在图4(a)和图4(b)中。

图5给出了常温(20℃)时普通保偏光纤环的偏振耦合强度分布。由于偏振交叉耦合点较多,仅标注与图4位置相同的4个耦合点,其测量结果如图5所示。

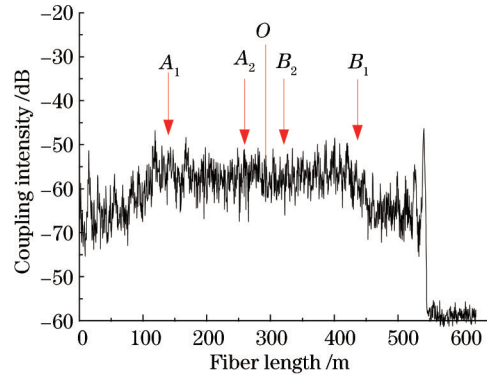


图5 传统保偏光纤环测量结果及耦合点选择

Fig.5 Measured results and the coupling points of ordinary polarization-maintaining fiber coil

表1和表2给出了光子晶体光纤环和普通保偏光纤环中4个耦合点在-40℃、-10℃、20℃、50℃时的耦合强度大小,表中 $T$ 为温度,单位为℃; $h_x$ 为 $x$ 点的偏振耦合强度,单位为dB。

表1 光子晶体光纤环各耦合点对应的偏振耦合强度

Table 1 Coupling points' polarization coupling intensities of PCF coil

$T/^\circ\text{C}$	$h_{A_1}/\text{dB}$	$h_{A_2}/\text{dB}$	$h_{B_2}/\text{dB}$	$h_{B_1}/\text{dB}$
-40	-61.17	-58.8	-55.43	-63.54
-10	-61.47	-58.96	-55.82	-63.76
20	-61.75	-59.34	-56.09	-63.83
50	-62.37	-59.64	-56.39	-64.44

表2 PMF环不同耦合点对应的偏振耦合强度

Table 2 Coupling points' polarization coupling intensity of PMF coil

$T/^\circ\text{C}$	$h_{A_1}/\text{dB}$	$h_{A_2}/\text{dB}$	$h_{B_2}/\text{dB}$	$h_{B_1}/\text{dB}$
-40	-46.83	-50.09	-50.95	-48.74
-10	-48.72	-51.58	-52.36	-49.59
20	-49.04	-53.35	-53.94	-50.62
50	-51.20	-55.04	-55.56	-52.68

从表1和表2可以看出,光子晶体光纤环的偏振交叉耦合强度比普通保偏光纤环的偏振交叉耦合强度小,说明光子晶体光纤的偏振交叉耦合受绕环工艺的影响较小。

光子晶体光纤环和普通保偏光纤环的4个耦合点偏振交叉耦合强度随温度的变化曲线,如图6所示。由图6可知,随着温度的升高,光子晶体光纤环和普通保偏光纤环各个耦合点的偏振耦合强度都呈减小趋势。但是温度从-40℃上升到50℃的过程中,光子晶体光纤环偏振耦合强度变化平缓,且各耦合点变化趋势基本相同;而普通保偏光纤环偏振耦合强度变化相对剧烈,变化趋势相对光子晶体光纤环不太稳定。

针对测试数据,可以计算两光纤环的不同耦合点从-40℃~50℃时耦合强度的变化量 $\Delta h$ 及变化率 $\eta$ ,计算值见表3、表4  $\Delta h$ 与 $\eta$ 的关系式可表示为。

$$\eta = \frac{\Delta h}{h_{\max} + h_{\min}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中  $\Delta h = h_{\max} - h_{\min}$ 。

由表3、表4可知,光子晶体光纤环中各耦合点偏振耦合强度最大减小值为1.2 dB,最大减小率为0.97%;而普通保偏光纤环偏振耦合强度有较大程度的下降,最大达到了4.95 dB,最大减小率达到了4.71%。普通保偏光纤环偏振耦合强度的变化量是光子晶体光纤环偏振耦合强度变化量的4.125倍,而变化率是光子晶体光纤环的4.86倍。因此,光子晶体光纤环的偏振交叉耦合强度温度稳定性高于普通保偏光纤环的偏振交叉耦合强度的温度稳定性。

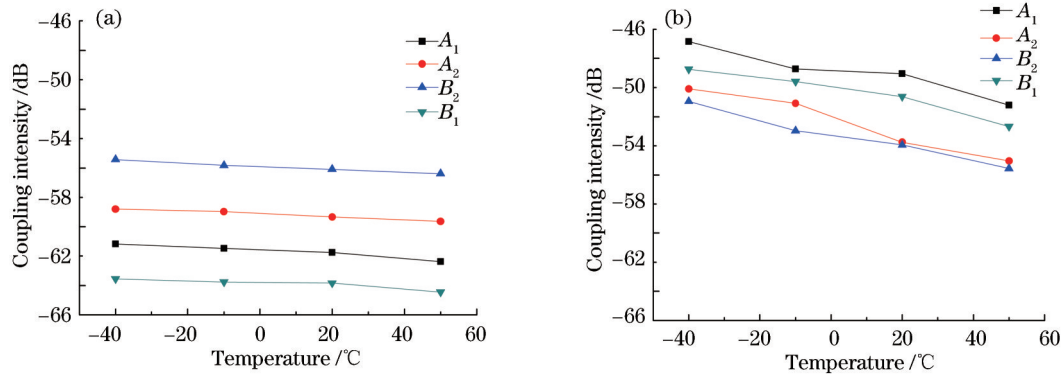


图6 光纤环各点耦合强度随温度变化趋势。(a)光子晶体光纤环;(b)普通保偏光纤环

Fig.6 Trend of the change of coupling points' polarization coupling intensity of fiber coil. (a) Photonic crystal fiber coil; (b) ordinary polarization-maintaining fiber coil

表3 PCF环耦合点耦合强度变化量及变化率(-40 °C~50 °C)

Table 3 Variation and rate of change of polarization coupling intensity of PCF coil's coupling points(from -40 °C to 50 °C)

Point	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>
$\Delta h$ /dB	1.2	0.84	0.96	0.90
$\eta$ /%	0.97	0.71	0.86	0.70

表4 PMF环耦合点耦合强度变化量及变化率(-40 °C~50 °C)

Table 4 Variation and rate of change of polarization coupling intensity of PMF coil's coupling points(from -40°C to 50 °C)

Point	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>
$\Delta h$ /dB	4.37	4.95	4.61	3.94
$\eta$ /%	4.45	4.71	4.33	3.88

## 5 结 论

对光子晶体光纤环内偏振耦合强度的温度稳定性进行了研究,并与普通保偏光纤环进行了对比。通过对光纤环内部的偏振交叉耦合强度分布的温度稳定性的研究可知,光子晶体光纤环较普通保偏光纤环的偏振耦合强度分布具有更好的温度稳定性。因此,光纤陀螺使用光子晶体光纤环相对使用普通保偏光纤环可以降低陀螺的偏振误差,提高光纤陀螺的测量精度。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Wei, Hou Lantian. Present situation and future development in photonic crystal fibers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(2): 43-52.  
王 伟,侯蓝田. 光子晶体光纤的现状和发展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(2): 43-52.
- 2 Mohr F, Schadt F. Bias error in fiber optic gyroscopes due to elatso optic interactions in the sensor fiber [C]. SPIE, 2004, 5502: 410-413.
- 3 Wang Xueqin, Wang Aimin, He Tao, *et al.*. Application of OCDP technology on the measurement of distributed polarization coupling in fiber coil [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(s2): 462-465.  
王学勤,王爱民,何 涛,等. OCDP技术在分布式偏振耦合测量中的应用[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(s2): 462-465.
- 4 Jing Jin, Shu Wang, Jingming Song, *et al.*. Novel dispersion compensation method for cross-coupling measurement in PM-PCF based on OCDP [J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(5): 495-500.
- 5 Ma P, Song N, Jin J, *et al.*. Birefringence sensitivity to temperature of polarization maintaining photonic crystal fibers

[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(6): 1829–1833.

6 Lin Huizu, Yao Qiong, Hu Yongming, *et al.*. Testing system of fiber polarization coupling based on polarization maintaining structure [J]. Chinese J 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.

7 Wang Shu. Research of Measurement Precision in Polarization Cross-Coupling Detection of Fiber Coil Based on White Light Interferometry [D]. Beijing: Beihang University, 2014: 17–22.

王曙. 基于白光干涉法的光纤环偏振耦合测量精度研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2014: 17–22.

8 Zhang Hongxia, Ren Yaguang, Ye Wenting, *et al.*. Dynamic dispersion compensation for the polarization coupling measurement system of polarization maintaining fiber [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0105001.

张红霞, 任亚光, 叶雯婷, 等. 保偏光纤偏振耦合系统的动态色散补偿 [J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0105001.

栏目编辑: 王晓琰