

# 高双折射光子晶体光纤偏振模色散测量\*

杨广强<sup>1,2</sup> 张 霞<sup>1</sup> 林健飞<sup>1</sup> 宋继恩<sup>1</sup> 黄永清<sup>1</sup> 任晓敏<sup>1</sup>

(1 北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室,北京 100876)

(2 信息产业部电信研究院规划设计研究所,北京 100037)

**摘 要** 对一种高双折射光子晶体光纤的偏振模色散进行了测量. 实验用 26 m 长光子晶体光纤使皮秒光脉冲的两个正交偏振模产生了 108 ps 时延. 运用脉冲时延法和固定分析法对这种高双折射光子晶体光纤的偏振模色散进行了实验测量, 测量得到其偏振模色散参量可达 4154 ps/km, 对应的模式双折射度为  $1.25 \times 10^{-3}$ . 这种新型的高双折射光纤可用于补偿光纤通信系统中的偏振模色散.

**关键词** 光子晶体光纤; 高双折射; 光纤通信系统; 偏振模色散

**中图分类号** TN929; TN253 **文献标识码** A

## 0 引言

随着人们对通信容量要求的日益增加, 光纤通信正向着更高速率、更大容量、更长无电中继距离的方向发展. 在光纤通信网的不断发展中, 光纤衰减、非线性及色散成为限制高速率信号长距离传输的主要因素, 但掺铒光纤放大器(EDFA)、非零色散位移光纤(NZDSF)、Raman 放大器、色散补偿光纤(DCF)以及光纤光栅(FBG)的使用, 使得衰减、非线性和色度色散补偿问题都得到较好的解决. 但随着单信道传输速率的提高, 原来不太被注意的偏振模色散(PMD; Polarization Mode Dispersion)对光纤通信系统产生了不可忽视的影响<sup>[1,2]</sup>.

近年来, 光子晶体光纤(PCF; Photonic Crystal Fiber)由于其独特的特性受到了人们广泛的关注, 并成为国际学术界研究的热点<sup>[3~9]</sup>. 本文报道了采用脉冲法和固定分析法测量具有高双折射特性光子晶体光纤 PMD 的实验. 实验结果表明这种 PCF 的双折射度可达普通保偏光纤(PMF)的 10 倍以上. 这种新型光纤的研制为光纤通信系统中的 PMD 补偿开辟了新的途径.

## 1 偏振模色散的产生

在单模光纤中传输的光波可以看成是基模  $HE_{11}$  的两个正交偏振模的简并, 因为理想的单模光纤横截面是圆形, 且具有均匀分布的折射率, 这时两个偏振模具有相同的传输速度. 然而, 当光纤在横截面上呈现各向异性, 并有一定的椭圆度时, 就会导致光纤的双折射<sup>[10]</sup>, 使两偏振模具有不同的群速度.

这种色散称为偏振模色散(PMD).

产生 PMD 的原因有很多, 概括起来主要有以下几方面因素: 光纤固有的双折射, 即光纤在生产过程中的几何尺寸不规则和在光纤中残留应力导致的折射率分布各向异性; 在光纤的生产、成缆、敷设过程中, 受到外界的挤压、弯曲、扭转和温度变化的影响使光纤沿不同的方向有不同的折射率分布, 从而产生 PMD; 另外, 当光信号通过一些光通信器件诸如隔离器、耦合器和滤波器等时, 也会由于器件结构和材料本身的不完整性导致双折射, 也会产生 PMD.

## 2 高双折射光子晶体光纤

与普通保偏光纤类似, 通过改变 PCF 的结构参数可以制作具有超高双折射效应的 PCF, 其双折射度可达到  $10^{-3}$  数量级<sup>[11]</sup>, 是传统 PMF 的 10 倍. 相对于传统 PMF, PCF 的保偏设计更容易实现, 比如制作中在  $x$  和  $y$  轴方向采用不同孔径的排列设计. 图 1(a)为一种典型高双折射 PCF 的截面扫描电镜图, 其中在纤芯旁设计制作了两个较大的空气孔, 从而破坏了原有气孔的周期性排列, 使得 PCF 表现出较高的双折射特性. 通过数值模拟可以得到 PCF 双折射度与波长的关系, 如图 1(b) (其中  $d_x$  为中间两个大气孔直径, 包层小孔直径  $d_c = 1.6 \mu\text{m}$ , 孔间距  $\Delta = 3.8 \mu\text{m}$ ). 这里双折射度的定义为

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{k_0} = |n_x - n_y| \quad (1)$$

从图中可以看出, 随着波长的增加, 双折射度也在增加, 而且如果增大中心处两个大气孔的直径, 也会使 PCF 的双折射效应增加. 这样的设计很容易使 PCF 的双折射度达到  $10^{-3}$  以上. 为了实际测量得到高双折射 PCF 的双折射度, 分别在时域和频域对这种光纤的 PMD 进行了实验测量.

\* 国家 973 计划(2003CB314906)、国家 863 计划(2003AA311010)资助项目, 教育部重大资助项目(104046)  
Tel: 010-62284004 Email: gq\_yang@sohu.com  
收稿日期: 2004-06-28

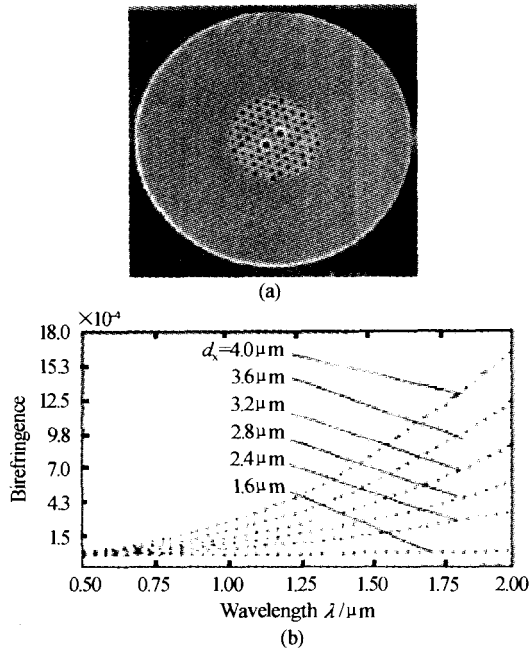


图1 (a)高双折射PCF横截面扫描电镜图,(b)高双折射PCF双折射度随波长变化曲线  
 Fig.1 (a)The SEM of cross section of highly birefringent PCF,(b)The degree of birefringence versus wavelength

### 3 实验测试及结果分析

由于实验所测PCF具有很大的偏振模色散,所以采用了比较简单的脉冲法和固定分析法就可以得到比较准确的结果.对于高双折射光纤,这两种方法具有实验结构简单、容易理解以及还能保持一定的精确度等优点.

#### 3.1 脉冲时延法测量PCF的PMD

脉冲时延法(Pulse-Delay Method)是将短光脉冲注入光纤中,并在相应的输出主偏振态中测量这些脉冲到达时延差,这个时延差即为待测光纤的差分群时延(DGD: Differential Group Delay)或PMD时延.对于长距离光纤或高双折射光纤的检测又能保持一定的精度.对于所要测量的高双折射PCF,脉冲时延法是切实可行的.

图2为采用脉冲时延法测量高双折射PCF的PMD实验装置.图中2.5GHz微波源调制DFB激光器输出中心波长为1550nm的皮秒脉冲,其经过可变衰减器及偏振控制器(PC)后进入PCF,再由EDFA放大,在最后通过高速示波器观察脉冲波形.由于PCF的模场直径非常小,为避免光纤中的非线性

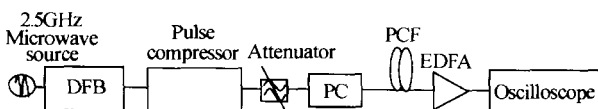


图2 脉冲时延法测量光子晶体光纤PMD的实验装置  
 Fig.2 Experimental set-up for measuring the PMD of PCF by Pulse-Delay Method

性效应采用小信号注入的办法,利用可变衰减器使入射到PCF的光功率减小到200μW. PC用来控制输入光偏振态,使其与PCF快轴和慢轴夹角均成45°.实验中所用PCF的长度为26m.

图3和图4分别为入射和出射PCF的光脉冲形状.从两图的对比可以明显看出入射光脉冲分裂为两个独立的脉冲.通过测量两脉冲之间的时延差即可得到PMD时延约为108ps(多次测量取平均).由式

$$B = |n_x - n_y| = \frac{\Delta\tau c}{L} \tag{2}$$

其中 $\Delta\tau = 108ps$ 为PMD时延, $c$ 为真空中光速, $L = 26m$ 为PCF的长度,可以计算出双折射度 $B = 1.25 \times 10^{-3}$ ,而PMF的模式双折射度一般为 $10^{-4}$ 量级.进一步推算得对应的PMD为4154ps/km,这预示着用更短的PCF就可以补偿相当长的常规光纤的PMD.

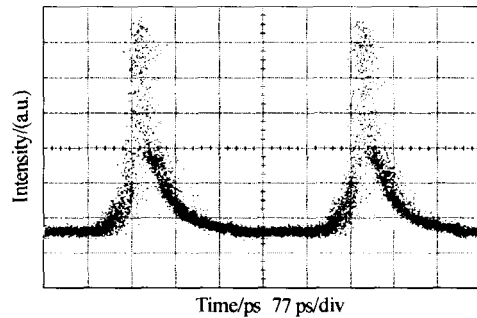


图3 初始脉冲形状  
 Fig.3 Initial pulse shape

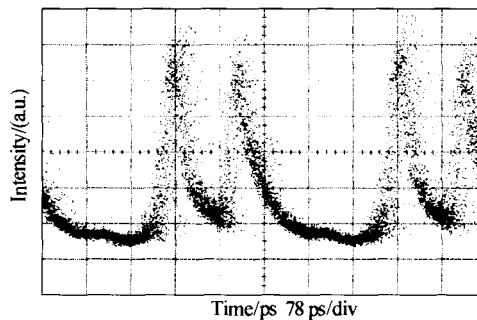


图4 经过26m长PCF后脉冲形状  
 Fig.4 The shape of output pulse through PCF

#### 3.2 固定分析法测量PCF的PMD

固定分析法(Fixed Analyzer Method)<sup>[12]</sup>的基本原理是在发送端以单偏振光激发出光纤的两个以不同速率传输的偏振态,在接收端用一个检偏器强制使两个偏振光在一个偏振方向上产生干涉,而两偏振光的光程差会因光波波长的变化而改变,因而在光功率谱线中会出现周期性的变化,找出峰值的个数就可以计算出光纤的PMD时延.

图5为测量高双折射PCF的PMD的实验装置.图中用低输出功率的EDFA做宽光源,再经一个

EDFA 放大进入起偏器, 从被测 PCF 出射的输出光经过检偏器入射到光谱仪, 得到一定波长范围的频谱.

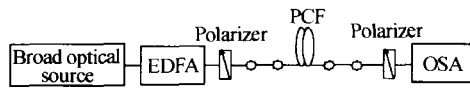


图 5 固定分析仪法测量光子晶体光纤 PMD

Fig. 5 Experimental set-up for measuring the PMD of PCF by Fixed-Analyzer Method

图 6 为波长扫描光功率谱. 从图中可以看出谱线具有明显的上下波动, 数出谱线极值点的个数  $N$ , 就可以从式(3)计算出 PMD 时延

$$\Delta\tau = \frac{N\lambda_1\lambda_2}{2c(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (3)$$

式中  $N$  为光功率谱中极值点的个数,  $\lambda_1$  为波长扫描起始波长,  $\lambda_2$  为截止波长,  $c$  为真空中光速.

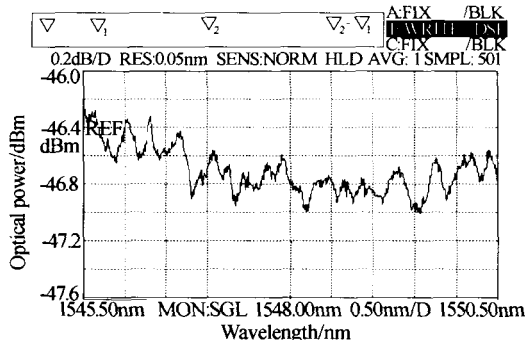


图 6 利用固定分析仪法得到的光功率谱

Fig. 6 The spectrum obtained by Fixed Analyzer Method

从图 6 中, 如果只数比较明显的谱线峰值个数, 则  $N \approx 30$ , 通过式(3)可计算得  $\Delta\tau \approx 40$  ps, 与上文结果相差较大, 但仍然得到 PCF 双折射度为  $B = 0.46 \times 10^{-3}$  (约为高保偏光纤双折射度的值). 分析其原因, 是由于 PCF 与普通光纤耦合较难, 焊接时会出现比较大的损耗(由于连接需要过渡光纤, 所以连接中有 4 处焊点, 测量结果显示损耗近 17 dB), 这样, 虽然用了 EDFA 进行放大, 但光谱仪中检测到的光功率仍然很低, 从而使曲线一些较小的峰会被噪声湮没. 如果将图 6 进行放大, 把相对较小的峰也计算在内, 可得  $N \approx 120$  (多次测量取平均), 此时得  $B = 1.11 \times 10^{-3}$ , 与脉冲时延法测量结果比较相近. 认为, 如果能够使得 PCF 与普通单模光纤的连接损耗大幅降低, 相信实验结果误差也会大大减小.

## 4 结论

分别用脉冲时延法和固定分析仪法对 PCF 的 PMD 特性进行了测量. 在采用脉冲时延法进行测量的实验中, 只用 26 m 长的 PCF 就得到了 108 ps 的 PMD 时延. 对于固定分析仪法, 指出 PCF 与普通单模光纤的连接损耗是导致实验产生较大误差的

主要原因. 最终的实验结果表明, 这种高双折射 PCF 的双折射度可达  $10^{-3}$  数量级, 远大于传统的 PMF. 这种新型的高双折射光纤的成功研制对于光通信系统中的 PMD 补偿提供了一种新的途径.

感谢清华大学电子工程系姜采云老师在实验上予以的热心帮助!

## 参考文献

- 1 周光涛, 张晓光, 沈昱, 等. 10 Gb/s 光通信传输系统中一阶 PMD 自适应补偿实验. 光子学报, 2004, **33**(4): 448~451  
Zhou G T, Zhang X G, Shen Y, et al. Acta Photonica Sinica, 2004, **33**(4): 448~451
- 2 陈烈辉, 高锦岳. 用于高阶偏振模色散补偿的高效动态补偿器. 光子学报, 2003, **32**(6): 702~705  
Chen L H, Gao J Y. Acta Photonica Sinica, 2003, **32**(6): 702~705
- 3 Knight J C, Birks T A, Russell P St J, et al. Allsilica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. Opt Lett, 1996, **21**(10): 1547~1549
- 4 Birks T A. Endlessly single mode photonic crystal fiber. Opt Lett, 1997, **22**(13): 961~963
- 5 Broderick N G R, Monro T M, Bennett P J, et al. Nonlinearity in holey fibers: measurement and future opportunities. Opt Lett, 1999, **24**(20): 1395~1397
- 6 Birks T A. Dispersion compensation using single material fibers. IEEE Photon Technol Lett, 1999, **11**(6): 674~676
- 7 Knight J C, Arriaga J, Birks T A, et al. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber. IEEE Photon Technol Lett, 2000, **12**(7): 807~809
- 8 Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Wadsworth W, et al. Highly birefringent photonic crystal fibers. Opt Lett, 2000, **25**(18): 1325~1327
- 9 Hansen T P, Broeng J, Jakobsen C, et al. Air-Guiding photonic bandgap fibers: spectral properties, macrobending loss, and practical handling. Journal of Lightwave Technology, 2004, **22**(1): 11~15
- 10 Rashleigh S C. Origins and control of polarization effects in single-mode fibers. J of Lightwave Technology, 1983, **LT-1**(2): 312~331
- 11 Stig Barkou Libori, Jes Broeng, Erik Knudsen, et al. Highly birefringent Photonic crystal fibers, Anaheim, USA, OFC2001, paper TuM2, pp. 1~3
- 12 Poole C D, Favin L David. Polarization-mode dispersion measurements based on transmission spectra through a polarizer. J of Lightwave Technology, 1994, **12**(6): 917~929

## The Measurement of Polarization Mode Dispersion in Highly Birefringent Photonic Crystal Fiber

Yang Guangqiang<sup>1,2</sup>, Zhang Xia<sup>1</sup>, Lin Jianfei<sup>1</sup>, Song Jien<sup>1</sup>, Huang Yongqing<sup>1</sup>, Ren Xiaomin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Center of Optical Communication, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

<sup>2</sup> Institute of Planning and Designing Research, Academy of Telecommunication Research of MII, Beijing 100037

Received date: 2004-06-28

**Abstract** The polarization mode dispersion in highly birefringent photonic crystal fiber is measured. In the experiment, the differential group delay of 108 ps was obtained by using a 26-meter-long PCF. Furthermore, PMD in this PCF has been measured by pulse delay method and fixed analyzer method. The result shows that the birefringence of the PCF is about  $1.25 \times 10^{-3}$ , and the high birefringent PCF can be used as dispersion compensation component in optical fiber communication system.

**Keywords** Photonic crystal fiber; Highly birefringent; Polarization mode dispersion; Optical fiber communication system



**Yang Guangqiang** was born on July 26, 1977. He received his B. S. degree from Department of Physics, Inner Mongolia University in 2002. Now he is pursuing his Ph. D. in the Optical Communication Center, Beijing University of Posts and Telecommunications. His research interest is the optical passive devices in optical fiber communication system.

(上接 1127 页)

●学位论文 作者. 论文题目[学位论文]. 地名: 授予单位, 年. 起止页码

●译著 作者. 书名. 译者(译). 出版地, 年. 起止页码

3.9 照片及英文简介 来稿需提供第一作者的照片(可用数码照)和不多于 100 个实词的英文简历(包括出生年月、出生地、职称、职务、熟悉的学科和课题)

4 投稿要求 1)2005 年 1 月 1 日起实行网上投稿, 网址: www.photon.ac.cn; 2)文章最后一页请注明以下内容: 创新点说明 100~300 字; 推荐同行审稿专家 2~4 位(给出他们从事研究的学科和课题不超过 3 个, 通讯地址和 E-mail).

### 5 稿件审理程序

5.1 收到电子投稿后, 对初审通过的稿件, 将收稿回执(含审理费收取通知)、稿件状态查询帐号、密码、作者承诺书发邮件给作者. 收到稿件审理费后, 分送两位同行专家评审. 自审理费收到之日起 3 个月内未收到本刊审稿意见和通知, 作者可自行改投它刊, 但需告知编辑部.

5.2 本刊将对下列稿件作自动退稿处理: a. 收稿回执发出 2 个月而投稿手续仍办理不全的稿件; b. 修改意见发出 2 个月仍未修回的稿件; c. 版面费通知发出 1 个月而汇款未到的稿件.

6 作者承诺书 作者承诺书在收稿后发邮件给作者, 请全体作者签名并附单位盖章后寄回编辑部.

7 收费标准 每篇文章收稿件审理费 100 元; 文章 4 页以内收版面费 800 元; 超过 4 页的部分, 每页加收 200 元. 文章出版后为每篇文章作者免费提供 1 份正刊、10 份单行本, 并酌付稿酬.

### 8 注意事项

1)本刊反对一稿两投. 在投本刊前后投他刊、或在内刊登载等, 务必来函说明. 2)本刊已入编《中国学术期刊(光盘版)》、“中国期刊网”、“万方数据(ChinaInfo)系统科技期刊群”、“维普数据库”和“中国光学期刊网”, 向本刊投稿并录用的文章, 将一律由编辑部统一纳入中国期刊网、万方数据(ChinaInfo)系统、维普数据库和中国光学期刊网, 进入因特网提供信息服务. 对版权有特殊要求者, 请事先声明. 3)本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务及收录光盘版报酬, 不再另付.