

文章编号: 0258-7025(2010)06-1496-05

基于超连续谱白光干涉仪的宽波段光子晶体 光纤色散测量

王泽锋 刘小明 侯 静

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 针对当前各种色散测量方法的不足,结合光子晶体光纤(PCF)易于产生超连续谱和白光干涉仪测量精度高的特点,设计并搭建了一套基于超连续谱马赫-曾德尔白光干涉仪的色散测量系统,实现了光子晶体光纤的高精度和宽波段色散测量。利用该系统对一种纤芯直径约为 $5\ \mu\text{m}$,空气孔直径为 $3.54\ \mu\text{m}$,孔间距为 $5.52\ \mu\text{m}$ 的全内反射型光子晶体光纤的色散特性进行了测量,实验结果与数值计算的结果基本一致,零色散点相差小于 $50\ \text{nm}$,较好地验证了测量方法和实验系统的有效性。

关键词 光纤光学;白光干涉仪;光子晶体光纤;色散测量;超连续谱

中图分类号 TN253;O436.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1496

Broadband Dispersion Measurement of Photonic Crystal Fiber Based on Supercontinuum White Light Interferometer

Wang Zefeng Liu Xiaoming Hou Jing

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A system based on Mach-Zehnder interferometer and supercontinuum white light, which is used for ultra-broadband and high precision dispersion measurement of photonic crystal fiber, is designed and constructed by considering the shortcomings of all the available methods. A photonic crystal fiber (PCF) with core diameter of $5\ \mu\text{m}$, hole diameter of $3.54\ \mu\text{m}$ and pitch of $5.52\ \mu\text{m}$, is measured respectively. The measured dispersion coefficients are well in agreement with the simulation results, and the difference between the zero dispersion wavelengths is smaller than $50\ \text{nm}$, which show good performance of the method and the experimental system.

Key words fiber optics; white light interferometer; photonic crystal fibers; dispersion measurement; supercontinuum

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)又称为多孔光纤或微结构光纤,其包层由在二维方向紧密排列的波长量级微孔构成^[1]。根据导光机制,PCF分为全内反射型和光子带隙型两种^[2~4]。PCF是当前国内外光学和光电子学领域研究的热点^[5~7]。由于包层中空气孔构成的微结构设计灵活,使得PCF呈现出许多优异特性,如无截止单模、大模场面积、极强的非线性效应、

高双折射效应、色散可控且在可见光和近红外波段具有反常色散等^[1~9]。PCF在色散补偿、超连续谱的产生、光纤传感、大功率激光传输、大功率光纤激光器等方面拥有巨大的应用前景^[9~11]。

色散是PCF最为重要的特性参数之一,目前还没有专门针对PCF色散测量的仪器设备,一般采用普通光纤色散测量的方法,如相移法、脉冲时延法、干涉法等^[12~18]。其中应用最多的是脉冲时延法和

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-04-20

基金项目: 国家 863 计划(2010AAG111)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0142)和国防科研计划(JC09-07-01)资助课题。

作者简介: 王泽锋(1980—),男,博士,讲师,主要从事光纤传感和光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: hotrosemaths@163.com

白光干涉法。脉冲时延法原理最简单,但一般需要价格昂贵的飞秒脉冲激光器和较长的待测光纤^[12,13],这不太适合目前 PCF 制作成本较高的现状,而且其测量精度在很大程度上受到探测器性能的影响,一般为 50~100 ps。白光干涉法利用低相干光源,测量精度可达 1 ps,比脉冲法要高出 1~2 个数量级,可以用来测量短至几个厘米的光纤色散,非常适合 PCF 的色散测量。但是,传统白光干涉仪受白光光源光谱特性的限制,难以实现宽波段的色散测量^[16,17]。

本文用 PCF 产生的超连续谱白光取代传统白光干涉仪的光源,实现了 PCF 的宽波段色散测量。搭建了基于 PCF 的马赫-曾德尔超连续谱白光干涉仪系统,编写了数据采集和处理程序,对某一 PCF 的色散特性进行了测量。在测量波段 470~1600 nm 上实验结果与采用仿真软件 CUDOS 数值计算的结果基本吻合。

2 测量原理

PCF 的色散与普通光纤的色散具有相同的概念,色散系数 D 的定义式为^[19]

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau}{d\lambda} = -\frac{\omega^2}{2\pi Lc} \frac{d^2\beta_c}{d\omega^2}, \quad (1)$$

式中 L 为光纤长度, τ 为群时延, λ 为波长, ω 为角频率, c 为光速, β_c 为纵向传播常数。色散系数的单位为 ps/(km·nm),1 ps/(km·nm) 的含义是一个 1 nm 带宽的脉冲传播 1 km 之后,将会展宽 1 ps。

在采用白光干涉仪进行色散测量时,白光光源发出的光经干涉仪分束器被分为两束,分别进入测量臂和参考臂。测量臂的光束经过待测光纤时相位受到光纤色散的调整,而参考臂中光束直接在空气中传输,经合束器一起进入光电探测器。光电探测器接收到的光强为^[20]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}(l_{\text{ref}} - l_{\text{test}})\right]. \quad (2)$$

式中 I_1 和 I_2 分别为两臂到达探测器的光强; l_{ref} 和 l_{test} 分别表示参考臂和测量臂的光程,其中 l_{test} 与待测光纤的色散有关。

由于白光光源的相干长度非常短,因此只有在两臂光程基本相等的情况下才能看到明显的干涉现象。实验中,对每一个波长 λ_i ($i=0,1,\dots,n$),通过调节参考臂或信号臂的光程,一般是通过扫描安装在电控线性移动平台上的反射镜实现。每一个波长得到一组光强随时间(或随反射镜的位置)变化的干涉图样,当两臂光程相等时干涉光强最大,记录干涉最强时反射镜的位置 x_i ($i=0,1,\dots,n$)。则由色散的原始定义可得

$$D = \frac{1}{L} \frac{\Delta\tau_i}{\Delta\lambda_i} = \frac{2}{cL} \frac{\Delta x_i}{\Delta\lambda_i}, \quad (3)$$

写成微分形式为

$$D = \frac{2}{cL} \frac{dx}{d\lambda}. \quad (4)$$

实验得到 (x_i, λ_i) 的一组数据,利用经验公式^[21]

$$x = A + B\lambda^{-4} + C\lambda^{-2} + D\lambda^2 + E\lambda^4, \quad (5)$$

进行多项式拟合,得到 $x = x(\lambda)$ 的关系式,式中 A, B, C, D, E 为拟合多项式系数。由(4)式可知,对(5)式求导可得到色散曲线系数表达式 $D = D(\lambda)$ 。

3 实验

3.1 超连续谱白光光源

实验中,用纳秒脉冲激光器(型号为 SNP-08E-000, Teem Photonics 公司生产)抽运一段长约 15 m 的高非线性光子晶体光纤产生超连续谱白光。激光器的参数为中心波长 1064 nm,脉宽小于 1 ns,重复频率约为 7.5 kHz,平均输出功率小于 100 mW;高非线性光子晶体光纤的结构参数为纤芯直径约为 3.5 μm ,空气孔直径 $d = 2.205 \mu\text{m}$,孔间距 $\Lambda = 3.359 \mu\text{m}$,如图 1 所示。实验测得的光子晶体光纤

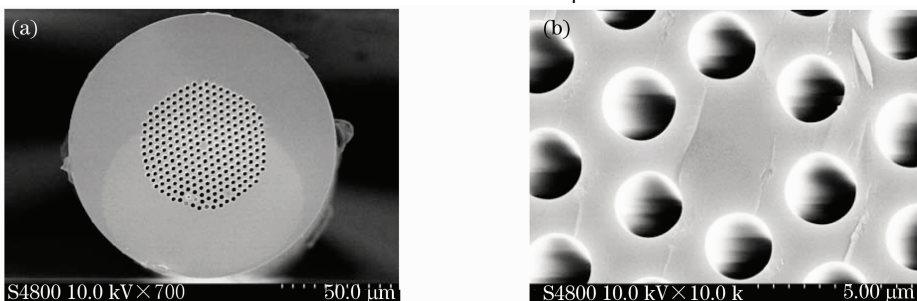


图 1 用于产生超连续谱光源的 PCF 的电镜扫描图。(a)PCF 横截面图;(b)纤芯区域近景图

Fig. 1 SEM image of the PCF for supercontinuum. (a)cross section of the PCF; (b) a close up of the core region

输出的超连续光谱如图 2 所示。从图 2 可见,光子晶体光纤产生的白光光谱非常宽,为 450~1700 nm;除 1064 nm 附近受抽运激光器注入光的影响起伏较大外,在整个输出光谱范围内功率谱较为平坦,能够很好地满足光子晶体光纤宽波段色散测量的需要。

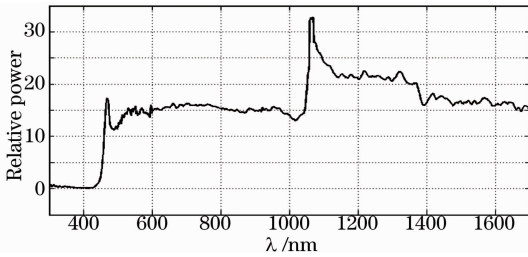


图 2 15 m 长 PCF 产生的超连续谱光源谱线图
Fig. 2 Spectrogram generated by a 15 m PCF

3.2 马赫-曾德尔白光干涉仪系统

根据实验原理设计了如图 3 所示的宽波段色散

测量系统,白光干涉仪采用光路调节相对简单的马赫-曾德尔结构。纳秒脉冲激光器输出的 1064 nm 红外光经显微物镜耦合进一段 15 m 长的高非线性 PCF 产生超连续谱。超连续谱白光经分束棱镜分成两束光,分别进入参考臂和含待测 PCF 的测量臂。进入测量臂的光束经另一个显微物镜耦合进入待测 PCF,待测 PCF 输出的光束又经一显微物镜进入自由空间。而进入参考臂的光束经过与测量臂中完全相同的两个显微物镜(用于色散补偿)入射到安装在高精度电控移动平台(型号为 M-126. DG1,德国 PI 公司生产)上的两个反射镜上,与测量臂的光束一起经另一个分束棱镜合成一束光。合成的光束经偏振片和窄带滤波片进入光电探测器转换成电信号,经采集卡输入到计算机进行数据处理。电控移动平台由计算机控制在等光程附近进行左右扫描,可以得到干涉图样,进而得到干涉最强对应的位置。

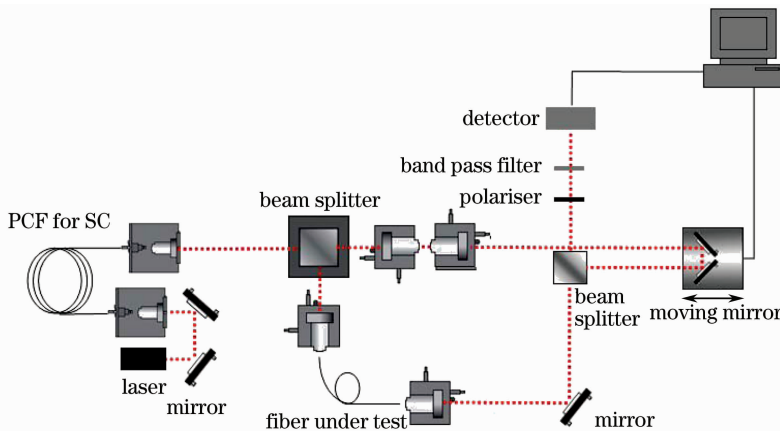


图 3 基于超连续谱的马赫-曾德尔白光干涉仪色散测量实验原理

Fig. 3 Experiment setup for dispersion measurement based on Mach-Zehnder white light interferometer and the supercontinuum

3.3 实验结果与分析

实验测量了长飞公司控制的一段长为 309 mm

的光子晶体光纤,其纤芯直径约为 5 μm,空气孔直径为 3.54 μm,孔间距为 5.52 μm,如图 4 所示。

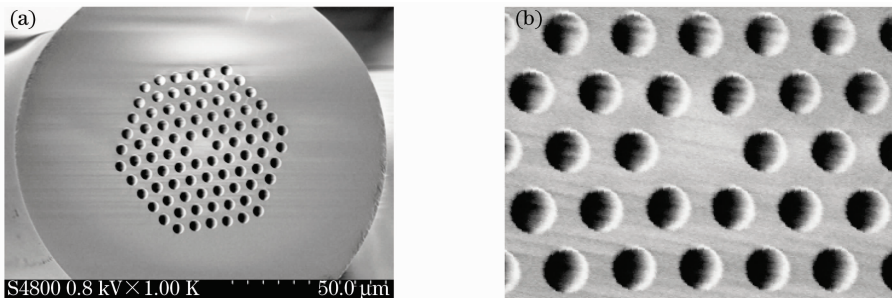


图 4 待测光纤电镜扫描图。(a)光纤截面图;(b)纤芯区域近景图

Fig. 4 SEM image of the PCF under test. (a)cross section of the PCF; (b) a close up of the core region

实验中,利用窄带滤波片选取 470~1600 nm 的 23 个波长进行了测量。对应每一个波长,通过控制电动移动平台对参考臂光程进行扫描,从而可以

得到一组干涉图样,如图 5 所示。由图 5 可知,超连续谱白光光源的相干长度小于 0.1 mm。从各干涉图中可以找到干涉最大的位置,即为两臂光程相等

处,分别记录相应的电控移动平台位置,如表 1 所示。图 6(a)是由表 1 的数据按(5)式拟合得到的干涉最强位置 x 随波长 λ 的变化关系曲线。图 6(b)为光子晶体光纤的色散系数曲线,其中虚线是实验测量结果,根据(4)式对图 6(a)中的拟合曲线求导给出,实线是用 CUDOS 数值计算的结果。从图 6(b)可见,实验结果与理论计算结果在测量波段上基本吻合,零色散点相差小于 50 nm。

实验结果与理论结果的差异,主要由于理论计算中选取的是理想光纤,而实际的光纤会存在一定的差异。数值计算时,认为光子晶体光纤为理想的圆对称结构,空气孔为理想的圆形且分布均匀,基质的折射率为纯二氧化硅折射率。而实际控制的光子晶体光纤总会存在一定的椭圆度,小孔不可能为绝

对的圆形,分布也存在一定的不均匀性,这些都会引入误差。此外,光源功率的波动、杂散光干扰等因素,也会对实验结果带来一定的误差。

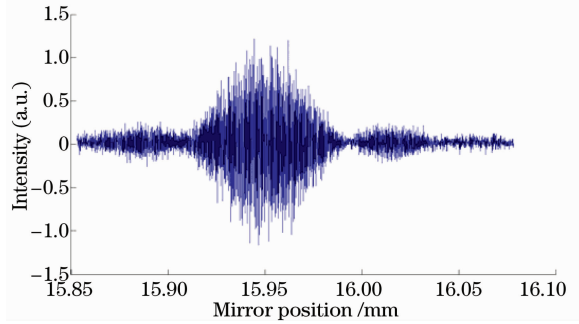


图 5 测量得到的波长 850 nm 处的干涉图样
Fig. 5 Interference fringe measured at the wavelength of 850 nm

表 1 干涉最强时各波长对应的相移镜位置

Table 1 Position of the mirror against wavelength while interfering strongest

$\lambda / \mu\text{m}$	x / mm	$\lambda / \mu\text{m}$	x / mm	$\lambda / \mu\text{m}$	x / mm
0.47	12.118	0.66	15.31525	1	16.08
0.492	12.708	0.7	15.668	1.1	16.025
0.505	13.028	0.766	15.685	1.2	15.8695
0.53	13.5695	0.78	15.7445	1.3	15.67725
0.546	13.879	0.808	15.8245	1.4	15.387
0.578	14.15	0.85	15.95	1.5	15.3055
0.61	14.8095	0.87	15.9775	1.6	15.075
0.632	15.0325	0.9	16.024		

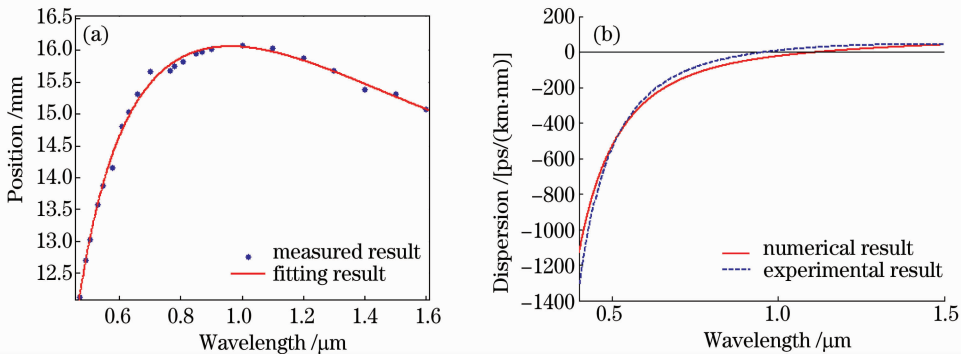


图 6 (a)干涉最强时相移镜位置对于波长的拟合曲线;(b)色散曲线测量值与数值计算结果的对比
Fig. 6 (a)Fitting curve of the position of the mirror with wavelength while interfering strongest;
(b)comparison of dispersion of PCF under test and numerical result

4 结 论

将光子晶体光纤易于产生超连续谱和白光干涉仪测量精度高的特点结合起来,提出了一种基于超连续谱白光干涉仪的光子晶体光纤色散测量方法。设计并搭建了马赫-曾德尔白光干涉仪实验系统,实现了从 470~1700 nm 的超宽波段、高精度色散测量,非常适合光子晶体光纤。基于超连续谱白光干

涉仪的色散测量方法有可能成为未来商用光子晶体光纤色散测量系统的方案之一。本文的研究工作对于全光纤化光子晶体光纤色散测量系统的研制具有一定的参考价值。

参 考 文 献

1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. J. Russell *et al.*, All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt.*

- Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 T. A. Birks, J. C. Knight, P. J. Russell *et al.*. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
 - 3 J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks *et al.*. Photonic band gap guidance in optical fibers [J]. *Science*, 1998, **282** (5393): 1476~1478
 - 4 R. F Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight *et al.*. Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. *Science*, 1999, **285**(5433): 1537~1539
 - 5 J. C. Knight, P. J. Russell. New ways to guide light [J]. *Science*, 2002, **296**(5566): 276~277
 - 6 J. C. Knight. Photonic crystal fibers[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 847~851
 - 7 P. J. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
 - 8 J. C. Knight, J. Arriaga, T. A. Birks *et al.*. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(7): 807~809
 - 9 P. St. J. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4729~4749
 - 10 Rao Yunjiang, Li Hong, Zhu Tao *et al.*. High temperature strain sensor based on in-line Fabry-Perot interferometer formed by hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1484~1492
饶云江, 黎宏, 朱涛等. 基于空芯光子晶体光纤的法-珀干涉式高温应变传感器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1484~1492
 - 11 Yu Xianlun, Zhao Weiwei, Cheng Wei. Research of high-pressure photonic crystal fibers sensors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2057~2063
余先伦, 赵威威, 程伟. 高压光子晶体光纤传感器系统的研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2057~2063
 - 12 L. G. Cohen. Comparison of single-mode fiber dispersion measurement techniques [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **3**(5): 958~966
 - 13 D. Ouzounova, D. Homoellea, W. Zipfela *et al.*. Dispersion measurements of microstructured fibers using femtosecond laser pulses and two-photon detector [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **192**(3-6): 219~223
 - 14 G. Stobrawag, M. Hackerm, R. Netzr *et al.*. Novel technique for the measurement of fiber dispersion properties [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **76**(8): 333~336
 - 15 G. Genty, H. Ludvigsen. Measurement of anomalous dispersion in microstructured fiber using spectral modulation [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(5): 929~934
 - 16 J. Y. Lee, D. Y. Kim. Versatile chromatic dispersion measurement of a single mode fiber using spectral white light interferometry [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24): 11608~11615
 - 17 J. Hult, R. S. Watt, C. F. Kaminski. Dispersion measurement in optical fibers using supercontinuum pulses [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(3): 820~824
 - 18 B. Szafraniec, R. Mastle, D. M. Baney. Polarization mode dispersion measurement based on continuous polarization modulation [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(8): 1109~1116
 - 19 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. New York: Academic Press, 2007. 7~9
 - 20 M. Born, E. Wolf. *Principle of Optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 287~289
 - 21 Liao Yanbiao. *Fiber Optics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 223~224
廖延彪. *光纤光学* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 223~224