

空芯光子带隙光纤色散特性的实验研究

王鑫 娄淑琴 廉正刚 Eric Numkam Fokoua

Experimental research on the dispersion property of hollow core photonic bandgap fiber

Wang Xin Lou Shu-Qin Lian Zheng-Gang Eric Numkam Fokoua

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 194212 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.194212

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194212>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于飞秒激光抽运的石墨烯包裹微光纤波导结构的级联四波混频研究

Four-wave-mixing generated by femto-second laser pumping based on graphene coated microfiber structure

物理学报.2015, 64(18): 184214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184214>

一种高双折射高非线性多零色散波长光子晶体光纤

Photonic crystal fibers with high nonlinearity, large birefringence and multiple zero dispersion-wavelength
物理学报.2014, 63(13): 134210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134210>

中红外色散平坦硫系光子晶体光纤设计及性能研究

Design and performance of mid-IR dispersion in photonic crystal fiber prepared from a flattened chalcogenide glass

物理学报.2014, 63(1): 014210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.014210>

新型超宽带双芯光子晶体光纤偏振分束器的研究

Novel ultra-broadband polarization beam splitter based on dual-core photonic crystal fiber

物理学报.2013, 62(24): 244202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.244202>

新型三角芯抗弯曲大模场面积光子晶体光纤

Novel bend-resistant large-mode-area photonic crystal fiber with a triangular-core

物理学报.2013, 62(18): 184215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.184215>

空芯光子带隙光纤色散特性的实验研究*

王鑫¹⁾ 娄淑琴^{1)†} 廉正刚²⁾

1)(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

2)(武汉长盈通光电技术有限公司, 武汉 430074)

(2016年4月18日收到; 2016年7月12日收到修改稿)

针对空芯光子带隙光纤宽带宽、高效率、高精度的色散测量需求, 本文基于干涉法, 提出一种适用于测量空芯光子带隙光纤宽带色散的相位提取方法, 建立了基于 Mach-Zehnder 干涉仪的色散测量系统, 开展了空芯光子带隙光纤(HC-PBGF)色散特性的实验研究, 重点对研制的19 cell HC-PBGF的色散特性进行了系统的实验研究。实际测量得到19 cell HC-PBGF在1400—1630 nm带宽范围内的基模色散曲线, 开展了HC-PBGF的高阶模色散测量研究, 测量得到了19 cell HC-PBGF四条高阶模色散曲线。实验测量结果与理论仿真结果吻合, 研究成果为深入探究空芯光子带隙光纤的色散特性, 推进其在高功率激光脉冲传输、大容量数据通信、光纤非线性等领域的应用具有重要意义。

关键词: 光子带隙光纤, 空芯, 色散

PACS: 42.81.Qb, 42.81.Cn, 42.70.Qs, 42.81.-i

DOI: 10.7498/aps.65.194212

1 引言

空芯光子带隙光纤(hollow core photonic bandgap fiber, HC-PBGF)可以将位于光子带隙中的光有效地束缚在低折射率的空芯中传输, 从而打破了材料对光纤特性的限制, 不但有望获得超低的传输损耗, 而且摆脱了材料光损伤阈值对传输功率的限制, 大大提高了功率传输水平。此外, 低非线性特性、高效耦合特性、传输窗口可控以及色散可控等优良特性, 使得HC-PBGF在高功率激光传输^[1,2]、高速率大容量通信^[3,4]、光纤传感^[5,6]、非线性光学等^[7,8]领域均具有广阔的应用前景。

受制作工艺的限制, HC-PBGF的研究起步较晚, 迄今为止, HC-PBGF的研究重点主要围绕着光纤损耗进一步降低、带宽拓展及表面模抑制等方面展开^[9–11], 而一些光纤基本特性, 例如光纤色散、光纤可传导的模式内容等方面的研究尚未全

面深入开展。随着HC-PBGF的光纤损耗由最初的dB/cm的量级^[12]降低到1.2 dB/km^[9], HC-PBGF在高功率脉冲传输、大容量通信等领域的应用逐渐开展。光纤色散作为光纤的基本传输特性之一, 会使得光脉冲在传输过程中发生展宽, 从而对高功率脉冲传输系统、高速率光通信系统产生非常不利的影响, 因此, 开展HC-PBGF色散特性的研究对推进其在高功率脉冲传输、高速率通信等领域的应用具有重要的指导意义。由于HC-PBGF的色散特性受结构参数影响较大, 并且受制作工艺的影响, 实际光纤的结构参数通常与理论值存在一定的偏差, 因此通过理论仿真的方法很难准确评估实际拉制光纤的色散特性, 而通过实验的方法直接测量HC-PBGF的光纤色散也存在一定难度。一方面, HC-PBGF独特的色散曲线在传输带宽内变化比较平坦, 但在带隙边缘变化幅度却很大($-1000\text{--}1000 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$), 另一方面, HC-PBGF的传输窗口受结构影响较大, 并且传输带

* 国家自然基金(批准号: 61475016, U1431119)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn

宽较宽,因此,HC-PBGF对色散测量方法不仅要求较高的测量精度,还要求具有超宽的带宽以满足宽带HC-PBGF多样性的需求,而现有的光纤色散测量方法还不能满足HC-PBGF宽带宽、高精度、高效率的色散测量需求,因此,探索一种适用于HC-PBGF的快速、准确的宽带色散测量方法,对加速HC-PBGF特性研究,推进HC-PBGF在高功率激光脉冲传输、大容量数据通信中的应用具有重要意义。

本文提出了一种适用于测量HC-PBGF宽带色散的相位提取方法,突破了现有相位提取方法精度低、耗时长的限制;结合所提出的相位提取方法,建立了基于Mach-Zehnder干涉仪的色散测量系统,实验测量得到了19 cell HC-PBGF在1400—1630 nm带宽范围内的基模色散曲线。在此基础上,开展了HC-PBGF的高阶模色散测量研究,测量得到了19 cell HC-PBGF四条高阶模色散曲线。研究结果为评估HC-PBGF的传输特性、推动其在高功率激光传输领域的应用研究具有重要意义。

2 实验原理与方法

目前,比较成熟的光纤色散测量方法主要有脉冲时延法^[13]、相移法^[14]和干涉法^[15]。其中,脉冲时延法结构简单、实验装置成本较低,但测量精度不高;相移法虽然测量精度较高,但是需要采用高精度的光源,测量成本高,并且测量范围无法覆盖整个通信波段。干涉法作为一种低成本测量方法,

其原理简单、测量精度高、测量范围宽,并且所需待测光纤长度较短(小于5 m),相比于前两种方法需要1 km以上的待测光纤,干涉法更适用于制作成本较高的HC-PBGF的色散测量。因此,本文基于干涉法搭建了HC-PBGF的色散测量系统。

图1所示为基于Mach-Zehnder干涉仪的干涉法色散测量系统。实验中,输出功率2 W,输出波长范围400—2000 nm的超连续谱激光经起偏器后被分束器分成两路光,一路光在自由空间中传输,通过两个反射镜,另一路通过空间耦合的方法耦合入待测光纤,最终两路光通过耦合器合束,耦合入光谱仪中。其中,一个反射镜安装在2 m长的可移动轨道平台上,可以快速移动,粗略调节参考臂时延,另一个反射镜安装在分辨率5 μm线性测微平台上,可以对参考臂时延进行微调。同时,为了观测和识别光纤中的模式,在光路合束的输出端引入了一个4%的光学拾取器,将部分光束引入CCD相机进行实时成像。

采用图1所示的干涉法色散测量系统,调节参考臂时延,可以从光谱仪中观测到干涉光谱,干涉光谱可以表示为

$$I(\lambda) = I_R(\lambda) + I_F(\lambda) + 2\sqrt{I_R(\lambda)I_F(\lambda)} \cos[\phi(\lambda)], \quad (1)$$

其中, $I_R(\lambda) = E_R^2(\lambda)$ 和 $I_F(\lambda) = E_F^2(\lambda)$ 分别表示参考臂和光纤臂的光强度。相位 $\phi(\lambda)$ 为两束光在传输过程中产生的相位差,可以表示为

$$\phi(\lambda) = \beta_F(\lambda)L - \frac{2\pi}{\lambda}d = \frac{2\pi}{\lambda}[n_F(\lambda)L - d], \quad (2)$$

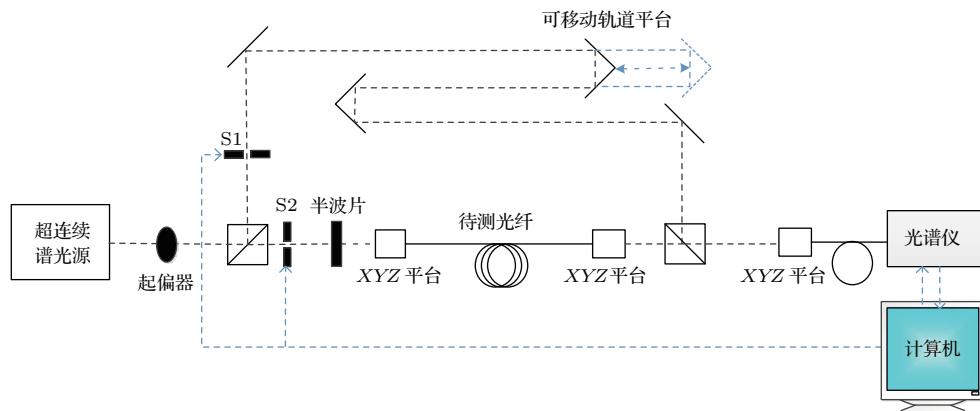


图1 基于Mach-Zehnder干涉仪的色散测量系统示意图

Fig. 1. Dispersion measurement setup based on Mach-Zehnder interferometer.

其中, β_F 和 n_F 分别为待测光纤的传输常数和模式有效折射率, λ 为波长, L 为待测光纤长度, d 为参考臂与光纤臂中自由空间传输距离的差值. 将(2)式中光纤的传输常数 β_F 进行泰勒级数展开, 则在任意波长 λ_0 处, 相位可以表示为

$$\begin{aligned}\phi(\lambda) = \phi_0 + \phi_1(\lambda - \lambda_0) + \phi_2(\lambda - \lambda_0)^2 \\ + \phi_3(\lambda - \lambda_0)^3 + \dots\end{aligned}\quad (3)$$

(3) 式中, 泰勒展开的前三项系数分别对应待测光纤的折射率 $n_F(\lambda_0)$ 、群时延 $\tau_g(\lambda_0)$ 和色散 $D(\lambda_0)$, 可以表示为

$$\phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} [n_F(\lambda_0)L - d], \quad (4)$$

$$\phi_1 = \left. \frac{d\phi}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} = \frac{2\pi c}{\lambda_0^2} \left[\tau_g(\lambda_0) - \frac{d}{c} \right], \quad (5)$$

$$\phi_2 = \left. \frac{d^2\phi}{d\lambda^2} \right|_{\lambda=\lambda_0} = -\pi c L \frac{D(\lambda_0)}{\lambda_0^2}. \quad (6)$$

其中, 光纤色散与相位的关系可以表示为

$$D(\lambda) = \frac{1}{2\pi c} \frac{1}{L} \left[2\lambda \frac{d\phi}{d\lambda} + \lambda^2 \frac{d^2\phi}{d\lambda^2} \right]. \quad (7)$$

由此可知, 采用干涉法测量光纤色散的关键是从干涉谱中提取相位信息. 目前, 从干涉谱中提取相位最简单常用的方法是根据两个相邻峰值点(最大值/最小值)之间相位差为 2π [16,17], 得到峰值点对应的相位值, 并通过非线性拟合得到整个测量范围内的相位值, 这种方法仅提取了少量的极值点信息, 因此测量误差较大, 对于色散值变化比较大的 HC-PBGF 来说, 该方法远远不能满足对测量精度的要求. 另一种拟合的方法则是采用非线性最小二乘法最小化算法 [18,19], 优化传输常数 β_F 的泰勒展开系数, 该方法利用了干涉谱上所有数据点, 理论上测量精度大大提高, 但是使用了非线性拟合, 需要准确设置初始条件并通过大量的计算来获得准确的拟合结果, 不仅非常耗时, 而且测量带宽较窄, 仅局限在泰勒展开的中心波长附近, 不能满足 HC-PBGF 宽带色散的测量需求.

为了满足 HC-PBGFs 宽带宽、高精度的色散测量需求, 本文提出了一种从干涉谱中直接提取相位信息的方法, 该方法结合了以上两种方法的优势, 利用了干涉谱中所有的数据信息直接进行相位提取, 不仅有高的测量精度和准确性, 也大大提高了测量效率, 并且可以实现宽带的色散测量. 其相位提取的主要步骤如下:

1) 从归一化干涉谱中提取峰值点, 得到干涉谱包络, 通过提取干涉谱的包络计算得到相位信息的余弦函数 $\cos[\phi(\lambda)]$;

2) 从短波长起始, 判断第一个峰值点是极大值还是极小值, 定义其相位值为 0(极大值) 或 π (极小值);

3) 自定义初始相位符号 S 为 -1 或 1 , 扫描整个干涉谱范围内数据点, 根据上一个峰值点的相位值 ϕ_0 , 计算下一个峰值点到来之前所有数据点对应的相位 ϕ_i , 若上一个峰值点为最大值, 则下一个峰值点到来之前, 每个数据点对应的相位为

$$\phi_i = \phi_0 + S \times [\pi - \arccos(I_i)],$$

若上一个峰值点为最大值, 则下一个峰值点到来之前, 每个数据点对应的相位为

$$\phi_i = \phi_0 + S \times \arccos(I_i);$$

4) 扫描整个干涉谱数据, 逐点计算每个波长对应相位值, 当经过中心对称点时, 由于中心对称点的对称性, 相位符号 S 发生反转, 即 -1 变为 1 (或 1 变为 -1), 继续 3) 中的步骤, 直至下一个中心对称点到来, 相位符号再次发生反转.

其中, 中心对称点 (center of symmetry, CoS) 的位置如图 2 所示. 在中心对称点处, 条纹间距最大, 光纤臂与参考臂的时延相同, 如果改变参考臂的长度, 则与之匹配的光纤臂时延也会发生改变, 即中心对称点的位置会发生移动, 如图 2 所示为测量 2.3 m 长单模光纤得到的不同中心对称点位置的干涉谱, d_1 , d_2 和 d_3 代表参考臂长度分别为 d_1 , d_2 和 d_3 时对应的时延, 其与光纤臂中群时延交点的位置和个数决定了干涉谱中心对称点的位置和个数. 对于标准单模光纤来说, 其群时延曲线呈抛物线分布, 因此, 在足够宽的干涉谱中存在两个中心对称点. 调节参考臂的长度, 中心对称点的位置会随之移动, 当参考臂的时延逐渐趋近与单模光纤的最小群时延时, 两个中心对称点彼此靠近, 当参考臂的时延等于单模光纤的最小群时延时, 两个中心对称点会完全重叠, 该点处即对应光纤的零色散点.

为了提高测量效率, 我们引入了 LabVIEW 工作环境, 通过计算机程序控制光谱仪以及两束光路中的开关 ($S1$, $S2$), 自动获取光纤臂、参考臂及干涉谱数据并处理得到色散曲线, 当光谱仪分辨率设

置为2 nm时, 测量1400—1700 nm的带宽范围, 从扫描数据到得到色散曲线, 整个过程仅需30 s左右的时间, 测量效率大大提高。

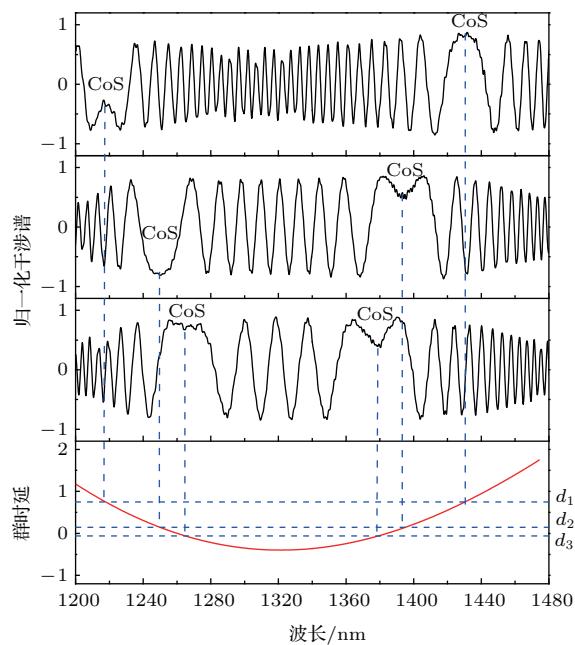


图2 不同群时延对应中心对称点位置

Fig. 2. The position of Center of Symmetry according to different group delay.

图3所示为测量标准单模光纤的得到的色散曲线。实验中所用光纤为康宁公司生产的标准单模光纤Corning SMF28, 光纤长度为2.3 m, 光谱仪分辨率为1 nm。

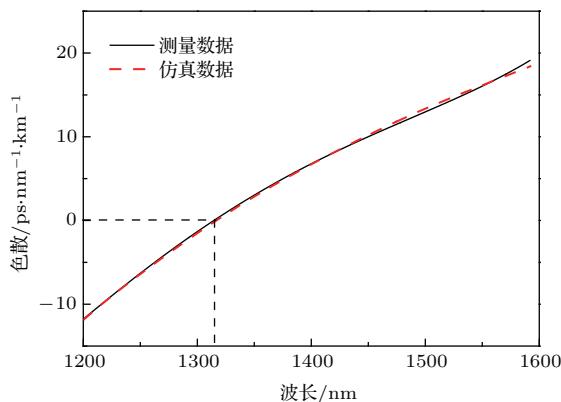


图3 (网刊彩色) 单模光纤色散曲线

Fig. 3. (color online) Dispersion curves for a single mode fiber.

由图3可知, 实际测量得到的光纤的零色散波长位于1312 nm处, 零色散波长处对应的色散斜率为 $0.083 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, 测量结果符合产品说明手册($1302 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1322 \text{ nm}$, 零色散点处色散斜

率 $\leq 0.092 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$)。此外, 对比实验测量结果和理论仿真结果(红色虚线), 色散曲线具有良好的一致性, 实际测量结果与理论仿真误差小于 $0.6 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 表明本文提出的相位提取方法具有高度的准确性, 适用于光纤色散的快速、精确测量。

3 实验结果与讨论

利用本文所提出的相位提取方法, 我们对研制的19 cell HC-PBGF的色散特性进行了实验测量。测试所用光纤截面如图4所示。光纤结构参数如下^[4]: 空气孔间距 $A = 4.4 \mu\text{m}$, 空气占空比 $d/A = 0.97$, 纤芯直径为 $26 \mu\text{m}$, 测量中光谱仪分辨率为1 nm, 测试光纤长度为3 m。

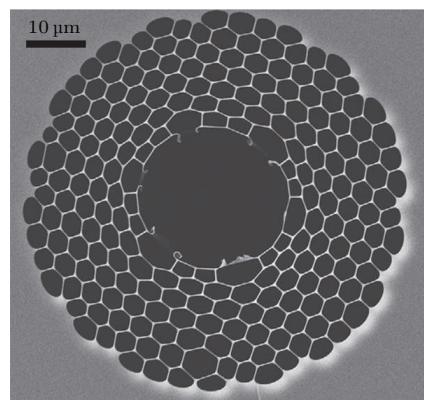


图4 19 cell HC-PBGF 的结构图

Fig. 4. Cross section of the 19 cell HC-PBGF.

3.1 基模色散测量

图5给出了通过调节参考臂时延测量得到的19 cell HC-PBGF的分段干涉谱及色散曲线。由图可知, 分段测量得到的色散曲线具有很好的连续性, 通过多项式拟合即可得到完整的宽带的色散曲线。在整个测量带宽内, 19 cell HC-PBGF光纤色散曲线呈典型的S形分布, 色散值在 $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 量级, 整个色散曲线的测量范围覆盖了1400—1630 nm, 零色散波长位于1450 nm, 在1450—1560 nm波长范围色散非常平坦, 色散值均小于 $20 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 在波长1570 nm处, 光纤色散开始迅速增大, 在1570—1630 nm范围内, 色散值从 $25 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 迅速增加到 $122 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

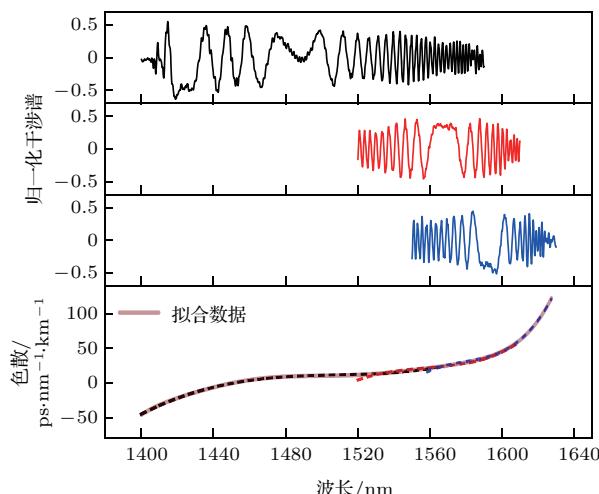


图5 (网刊彩色) 3 m长19 cell HC-PBGF的宽带色散测量

Fig. 5. (color online) Dispersion measurement of a 3 m-long 19 cell HC-PBGF.

为了对比实验结果, 我们对实际光纤截面进行提取建模, 采用有限元方法计算得到了19 cell HC-PBGF的色散曲线, 如图6中虚线所示。对比实验结果, 在平坦色散区域, 1450—1540 nm范围内, 理论值与测量值吻合度较好, 偏差小于 $10 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 但在短波长和长波长边缘, 色散值有一定的偏差, 主要原因是由于在带隙边缘, 潜在的表面模容易被激发, 受表面模的干扰, 干涉条纹对比度明显下降, 导致测量误差较大。图7所示为在激励基模过程中得到的表面模和基模的模场分布图。由图7(a)中可以发现纤芯能量明显地向包层耦合, 纤芯周围出现了表面模。在实验激励基模过程中, 图7(a)中所示的模式较图7(b)中的模式更容易出现, 并且图7(b)中所示的基模在测量过程中会逐渐演化为图7(a)中所示的模式, 同时观察到的干涉条纹对比度也会下降, 说明19 cell HC-PBGF中有较强的表面模干扰。

此外, 结合图8给出的实际测量和理论仿真得到的光纤传输损耗曲线, 可以更直观地看出, 实际光纤传输带隙的起始波长要大于理论值, 光纤的低损耗传输带宽范围小于理论值, 尤其在1390—1425 nm范围内, 光纤的实际传输损耗较大, 该损耗主要来源于表面模的存在。而在长波长边缘, 一方面受表面模的影响, 另一方面由于19 cell HC-PBGF为多模光纤, 高阶模式的影响也使得干涉谱的条纹对比度下降, 可用带宽减小, 同时光纤的色

散值在长波长边缘处的变化幅度也比较大, 因此导致了长波长边缘处色散测量值与理论值的偏差。由此也可以说明, HC-PBGF复杂的模式特性使得通过理论仿真的方法很难准确评估实际光纤的色散特性, 而开展HC-PBGF色散特性的实验研究对深入分析其光学特性更具指导意义。

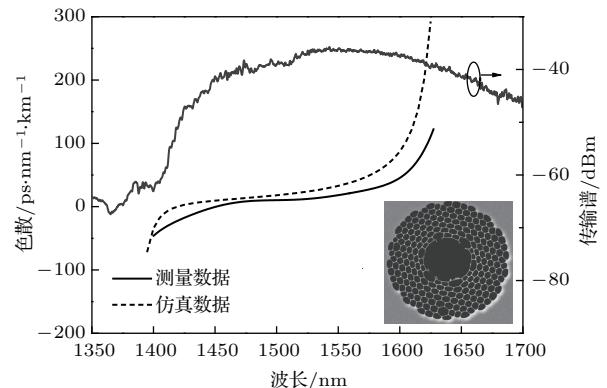


图6 19 cell PBGF色散曲线

Fig. 6. Dispersion curves for a 19 cell PBGF.

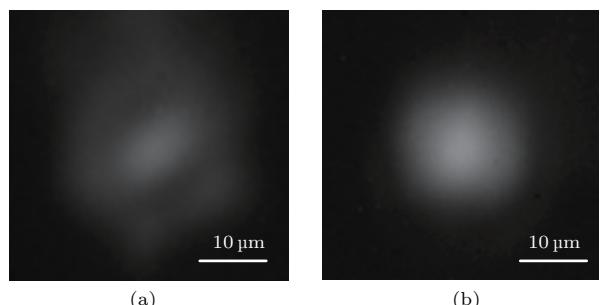


图7 测量得到的表面模(a)和基模(b)模场图

Fig. 7. Mode field distribution of surface mode (a) and fundamental mode (b).

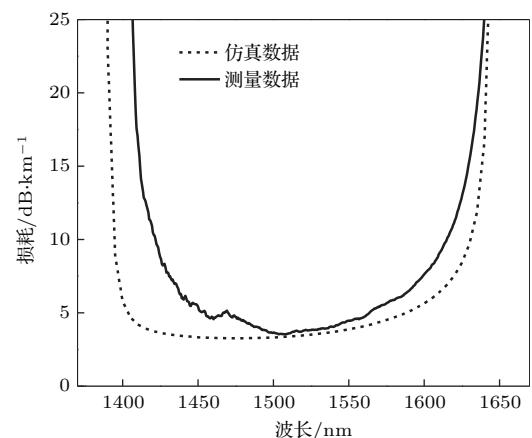


图8 19 cell HC-PBGF的损耗曲线

Fig. 8. Loss curves of the 19 cell HC-PBGF.

3.2 高阶模色散测量

由于19 cell HC-PBGF为多模运转,为了深入分析其色散特性,本文开展了19 cell HC-PBGF的高阶模色散测量研究。实验中,我们仅通过调节入射光耦合入19 cell HC-PBGF的位置以激励光纤中的不同高阶模式,结合输出端的CCD成像及干涉谱强度的变化,判断干涉谱所对应的光纤中的传输模式,得到了19 cell HC-PBGF的四条高阶模的色散曲线,如图9所示。图中实线和虚线分别表示实验测量结果和理论仿真结果。由图可知,实验测量得到的高阶模色散曲线在色散平坦区域,与理论仿真结果比较吻合,例如LP₁₁₋₁模在1460—1535 nm的波长范围内,实验测量结果与理论仿真结果的偏差小于20 ps·nm⁻¹·km⁻¹, LP₁₁₋₂模在

1515—1570 nm的波长范围内,实验测量结果与理论仿真结果的偏差小于30 ps·nm⁻¹·km⁻¹, LP₂₁₋₁模在1515—1590 nm的波长范围内,实验测量结果与理论仿真结果的偏差小于30 ps·nm⁻¹·km⁻¹。但是,测量得到的色散曲线范围以及色散曲线边缘与仿真结果存在很大的误差。该偏差是由于纤芯中传导的模式阶数越高,模式所对应的能量越弱,可获得的干涉谱条纹对比度越低,可利用的干涉带宽范围越窄,因此实际测量得到的高阶模色散曲线的波长范围明显小于理论仿真得到的色散曲线的波长范围。如图9中所示LP₂₁₋₂模的色散曲线,理论仿真得到的色散曲线范围覆盖了1430—1650 nm,但实际测量中,受噪声和其他模式干涉谱的干扰,超出1470—1590 nm波长范围的干涉谱已难以再有效地提取相位信息。

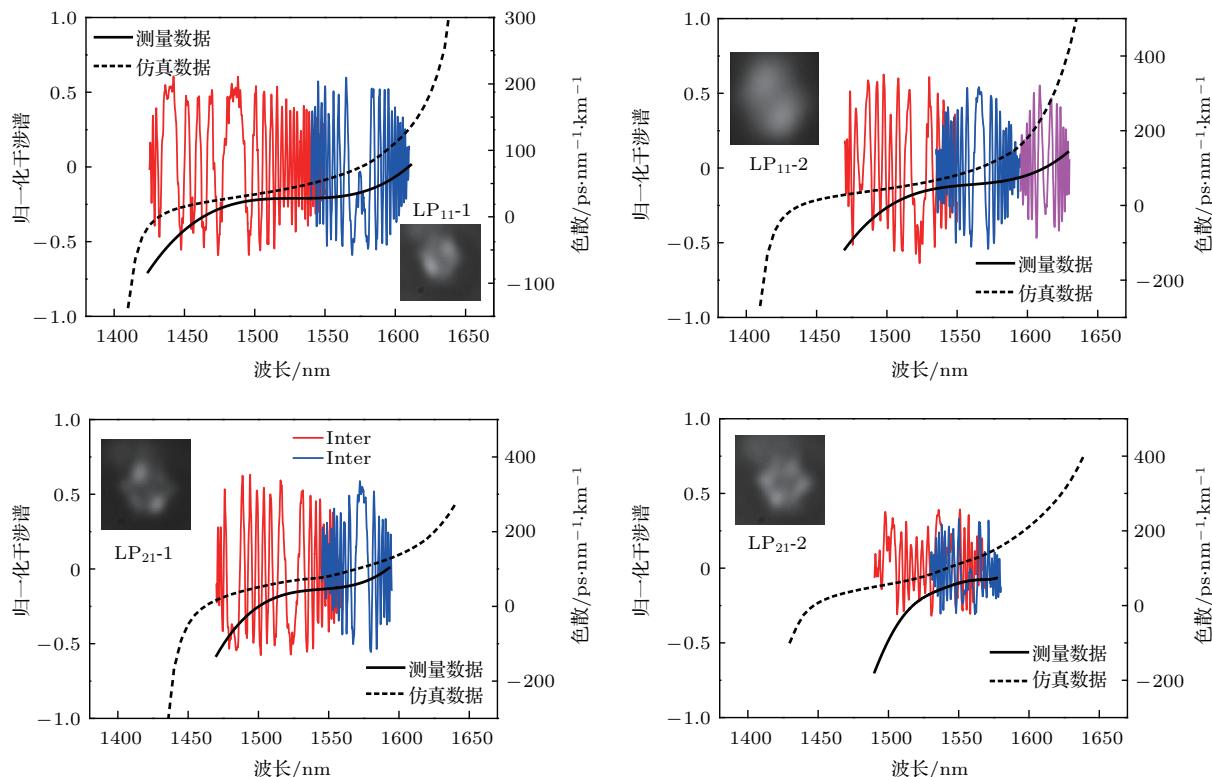


图9 (网刊彩色) 19 cell HC-PBGF的高阶模色散曲线

Fig. 9. (color online) Dispersion curves of higher order modes for the 19 cell HC-PBGF.

4 结 论

为了深入分析空芯光子带隙光纤的色散特性,推进其在高功率传输、数据通信领域的研究进程,本文开展了空芯光子带隙光纤色散特性的实验研

究,提出一种适用于测量空芯光子带隙光纤宽带色散的相位提取方法,并搭建起基于Mach-Zehnder干涉仪的色散测量系统。结合峰值点和中心对称点的判定,直接从干涉谱中提取相位信息。测量得到19 cell HC-PBGF的宽带色散曲线,在此基础上,实现了19 cell HC-PBGF高阶模色散测量,测量结

果在平坦色散区域内,与理论仿真结果吻合度较好.

感谢南安普顿光电研究中心(Optoelectronics Research Centre) Marco Petrovich 博士、Tom Bradley 博士和 Eric Numkam Fokoua 博士为本研究工作提供的支持和帮助.

参考文献

- [1] Shephard J D, Jones J D C, Hand D P, Bouwmans G, Knight J C, Russell P S J, Mangan B J 2004 *Opt. Express* **12** 717
- [2] Jones D C, Bennett C R, Smith M A, Scott A M 2014 *Opt. Lett.* **39** 3122
- [3] Sleiffer V, Jung Y M, Baddela N K, Surof J, Kuschnerov M, Veljanovski V, Hayes J R, Wheeler N V, Fokoua E N, Wooler J P 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 854
- [4] Poletti F, Wheeler N V, Petrovich M N, Baddela N, Fokoua E N, Hayes J R, Gray D R, Li Z, Slavík R, Richardson D J 2013 *Nature Photon.* **7** 279
- [5] Petrovich M N, Wheeler N V, Heidt A M, Baddela N K, Sandoghchi S R, Chen Y, Poletti F, Richardson D J 2014 *16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Graz, Austria, July 6–10 2014 We. A6.2
- [6] Terrel M A, Digonnet M J F, Fan S H 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 931
- [7] Rothhardt J, Hädrich S, Carstens H, Herrick N, Demmler S, Limpert J, Tünnermann A 2011 *Opt. Lett.* **36** 4605
- [8] Joly N Y, Nold J, Chang W, Hölzer P, Nazarkin A, Wong G K, Biancalana F, Russell P S J 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 203901
- [9] Roberts P J, County F, Sabert H, Mangan B J, Williams D P, Farr L, Mason M W, Tomlinson A, Birks T A, Knight J C 2005 *Opt. Express* **13** 236
- [10] West J A, Smith C M, Borrelli N F, Allan D C, Koch K W 2004 *Opt. Express* **12** 1485
- [11] Petrovich M N, Poletti F, Wooler J P, Heidt A M, Baddela N K, Li Z, Gray D R, Slavík R, Parmigiani F, Wheeler N V 2013 *Opt. Express* **21** 28559
- [12] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, Birks T A, Russell P S J, Roberts P J, Allan D C 1999 *Science* **285** 1537
- [13] Cohen L G, Lin C 1977 *Appl. Opt.* **16** 3136
- [14] Costa B, Mazzoni D, Puleo M, Vezzoni E 1982 *IEEE J. Quantum Electron.* **18** 1509
- [15] Stone J, Marcuse D 1984 *Electron. Lett.* **20** 751
- [16] Chang C C, Weiner A M 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 1455
- [17] Koch E, Chernikov S V, Taylor J R 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 864
- [18] Merritt P, Tatam R P, Jackson D A 1989 *J. Lightwave Technol.* **7** 703
- [19] Lu P, Ding H M, Mihailov S J 2005 *Meas. Sci. Technol.* **16** 1631

Experimental research on the dispersion property of hollow core photonic bandgap fiber*

Wang Xin¹⁾ Lou Shu-Qin^{1)†} Lian Zheng-Gang²⁾

1) (School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

2) (Yangtze Optical Electronic Company, Wuhan 430074, China)

(Received 18 April 2016; revised manuscript received 12 July 2016)

Abstract

Due to the unique optical properties of low loss, low nonlinearity, high threshold and low latency, hollow core bandgap fibers are endowed with high expectations in the field of high power delivery, optical fiber communication, nonlinear optics, fiber sensors, etc. Fiber dispersion, as one of the basic transmission characteristics of optical fiber, makes the light pulse broadened during transmission, thus has adverse effects on high power pulse transmission system and high speed optical communication system. Therefore, it is significant to study the dispersion characteristics of the hollow core bandgap fiber for its applications in the field of high power pulse transmission and high speed communications. Because of the simple structure of measurement system, low cost, high accuracy and relatively short length of fiber (just needing a few meters long), interferometric technique is suitable for dispersion measurement of hollow core photonic bandgap fiber. The key to obtaining the dispersion results with interferometric technique is the phase extractiton from the interferogram. In order to meet the requirements of hollow core bandgap fiber for wide bandwidth, high efficiency and high accuracy dispersion measurement, a novel phase extraction method based on interferometry is proposed in this paper, by which the precision of dispersion measurement is improved through using the whole data-set in the interferogram. Combining with the determinations of the peak and center of symmetry points, the extraction of phase information can be implemented directly from the interferogram. The experimental results of measuring a standard single mode fiber indicate that the difference between the experimental measurement and theoretical simulation is just $0.6 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, which proves that this proposed method possesses high accuracy and is suitable for the measurement of hollow core bandgap fiber. Consequently, according to the proposed phase extraction method, the measurement system based on Mach-Zehnder interferometer is set up and the dispersion measurement of a 19 cell hollow core bandgap fiber with a core diameter of $26 \mu\text{m}$ is carried out. Experimental results indicate that the fundamental mode dispersion curve of the 19 cell hollow core photonic bandgap fiber in a wavelength range from 1400 nm to 1630 nm can be obtained. Moreover, four high order mode dispersion curves are obtained for the first time. The measurement results are in accordance with the simulation results. These findings are of significant importance for exploring the dispersion characteristics of hollow core photonic bandgap fibers, and also conducive to their applications in the fields of high power laser delivery, high capacity data communications, optical fiber nonlinear, etc.

Keywords: photonic bandgap fiber, hollow core, dispersion

PACS: 42.81.Qb, 42.81.Cn, 42.70.Qs, 42.81.-i

DOI: 10.7498/aps.65.194212

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61475016, U1431119).

† Corresponding author. E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn