

利用自发四波混频测量光子晶体光纤色散

崔 亮 李小英 赵宁波

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 使用脉宽为 1.6 ps 的脉冲光抽运 0.6 m 长的光子晶体光纤, 测量由光纤中自发四波混频过程所产生光子对的频谱, 并利用所获得的相位匹配数据确定了待测光纤的色散。当抽运光的中心波长以 1 nm 的步长, 在 1037 ~ 1047 nm 的范围内变化时, 通过可调谐滤波器和单光子探测器测量光子晶体光纤产生的信号和闲频光子对的频谱, 从而获得 11 组四波混频相位匹配数据。然后使用阶跃有效折射率模型对所获得的相位匹配数据进行拟合, 得出待测光子晶体光纤的纤芯半径和包层空气比的有效值分别为 0.949 μm 和 29.52%, 并在此基础上计算了光纤的色散及全频谱范围内的四波混频相位匹配曲线。实验结果显示, 曲线预测值与实测值之间误差小于 0.1%。

关键词 非线性光学; 光子晶体光纤; 自发四波混频; 色散测量; 量子光学

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0119002

Dispersion Property Measurement of Photonic Crystal Fiber by Using Spontaneous Four Wave Mixing

Cui Liang Li Xiaoying Zhao Ningbo

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology, Ministry of Education,

College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract The dispersion property of a 0.6 m-long photonic crystal fiber (PCF) is deduced by characterizing its phase matching condition of spontaneous four wave mixing (SFWM) through pumping the PCF with a pulse train having a pulse duration of 1.6 ps. When the central wavelength of the pump is varied from 1037 to 1047 nm with a step of 1 nm, the spectra of signal and idler photons via SFWM are measured by using tunable filters and single-photon detectors. Using the step effective index model, and fitting the 11 sets of experimentally obtained data of SFWM phase matching, the effective core radius and air fraction of the PCF are found to be 0.949 μm and 29.52%, respectively. Accordingly, the dispersion property and the SFWM phase matching curve of the PCF in the whole spectral range are then calculated. Experimental results show that the predicted wavelengths of phase matching agree with the measured values, and the differences are less than 0.1%.

Key words nonlinear optics; photonic crystal fiber; spontaneous four wave mixing; dispersion measurement; quantum optics

OCIS codes 190.4370; 190.4380; 060.2270

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)作为一种新型光纤, 由于其独特的色散特性及较高的非线性系数, 很快被应用于非线性光学及量子光学领域^[1,2], 如超连续谱的产生、光学频率变换以及基于光纤中四波混频过程的量子关联光源等^[3~6]。在上述应用中, 光脉冲

的演化、参变过程的相位匹配条件等都与 PCF 的色散特性紧密相关, 因此, 准确获知所使用 PCF 的色散信息是这些研究的一个重要前提。常见的 PCF 一般由材质为纯二氧化硅的实心纤芯和具有周期性空气孔结构的包层组成; 其微结构的参数, 包括纤芯尺寸、空气孔大小和间距等, 决定着它的色散性质。

收稿日期: 2011-06-24; **收到修改稿日期:** 2011-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(11074186)、国家 973 计划(2010CB923101)和教育部留学回国基金(2009D4-0003)资助课题。

作者简介: 崔 亮(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事量子光学方面的研究。E-mail: lcui@tju.edu.cn

导师简介: 李小英(1968—), 女, 教授, 主要从事量子光学、量子信息和非线性光学等方面的研究。

E-mail: xiaoyingli@tju.edu.cn(通信联系人)

对于控制好的 PCF,人们可以通过扫描电镜(SEM)获取其光纤结构数据,然后利用一些数值方法,如有限元法、时域有限差分法等^[7~9],计算出光波的传输常数,进而得到实验中需要的各项光纤色散数值。但是在实际应用中,由于 PCF 的不均匀性以及 SEM 在角度、比例等方面的误差,计算出的数据往往与实验结果之间有一定差别^[10]。

为了提高色散测量精确度,文献^[10]利用光谱分析仪测量 PCF 中自发四波混频(SFWM)过程的增益谱,获得部分相位匹配波长数据;然后使用阶跃光纤模型对这些数据进行拟合,从而确定待测 PCF 的纤芯半径 a 和包层空气比 f 的有效值并得到待测 PCF 的色散。由于阶跃光纤模型对于 f 值为 10%~90% 的 PCF 都具有较高的精确度^[10],而且所得出的有效参数值直接来源于对实验测量数据的拟合,因此使用该方法得到的色散数据与实验结果符合较好^[11,12]。然而,该方法的前提条件是 SFWM 的增益很强并可以被光谱分析仪观测到,所以该测量不仅要求抽运源平均功率高、脉冲宽度长,而且要求光纤长度长。当待测光纤较短或抽运光为低平均功率的超短脉冲时,由于增益很小,则 SFWM 的频谱特性无法在光谱分析仪上观测到。虽然加大平均功率是提高增益峰的一个途径,但由于短脉冲的高峰值功率会导致抽运光光谱在光纤中传输时很快展宽,从而影响 SFWM 相位匹配的实验测量结果。

本文使用平均功率为 1 mW,脉宽为 1.6 ps 的脉冲光抽运长度为 0.6 m 的待测 PCF,当信号和闲频光子的带宽约为 1 nm 时,PCF 中 SFWM 过程平均每个脉冲所产生的信号和闲频光子对的亮度小于 0.1 对。若按照本文中的实验条件,抽运脉冲重复频率为 54 MHz 时,闲频光的功率将小于 -90 dBm,远超出光谱分析仪 -60 dBm 的测量灵敏度。因此,本文使用单光子探测器和可调谐滤波器测量这些光子对的频谱,并使抽运光的中心波长以 1 nm 的步长在 1037~1047 nm 的范围内变化,从而得到了 11 组相位匹配数据。然后,再采用上述方法拟合实验数据,得到待测 PCF 的纤芯半径和包层空气比的有效值,并在此基础上计算出 PCF 的色散以及全频谱范围内的四波混频相位匹配曲线。实验结果显示,所预测出的 SFWM 相位匹配波长与实测值之间的误差很小,说明所推测的色散具有较高的准确度。

2 实验原理

PCF 中的 SFWM 是一种基于三阶非线性效应

的包含了四个光波之间相互作用的参变过程。从量子力学光子湮没和产生的角度来描述,该过程即为两个频率为 ω_p 的来源于强抽运光波的光子通过克尔非线性效应同时散射成一对频率分别是 ω_i 和 ω_s 的闲频光子和信号光子。此过程中能量是守恒的,即满足

$$2\omega_p = \omega_i + \omega_s. \quad (1)$$

而且 SFWM 过程的进行需要满足相位匹配条件^[9]:

$$k(\omega_i) + k(\omega_s) - 2k(\omega_p) + 2\gamma P_p = 0, \quad (2)$$

式中 $k(\omega_j)$ ($j = p, i, s$) 为相应波长光波的传播常数, γ 为光纤非线性系数, P_p 为抽运光峰值功率。最后一项很小,一般计算时将其略去。从(2)式可以看出,PCF 的传播常数,即其色散性质决定了 SFWM 相位匹配情况。

PCF 的传播常数可使用阶跃折射率等效模型得到。计算时,PCF 的纤芯折射率取熔融二氧化硅的折射率 n_s , n_s 可由相应的 Sellmeier 多项式表示^[13];包层的折射率则取空气孔结构的平均折射率,即 $n_{\text{cladding}} = fn_a + (1-f)n_s$,其中 n_a 为光波在空气中的折射率,取值为 1。由于 PCF 具有无限单模特性,即在可见光至红外通信波段都支持单模传输,因此代入纤芯半径 a 和 f 求解阶跃光纤传输的本征方程^[14],计算出的基模传输常数即为光波在 PCF 中的传播常数。之后,联立(1)式和(2)式即可确定每个抽运波长下通过 SFWM 产生的闲频和信号光子波长,并画出相应的相位匹配曲线。

由此可见,阶跃折射率等效模型中的参数值 a 和 f 两者决定着 PCF 中 SFWM 相位匹配曲线。可以通过测量一定范围内不同抽运光波长下对应的信号和闲频光子的中心波长,得到待测 PCF 的一部分相位匹配数据点,并变换参数 a 和 f ,利用计算得到的相位匹配曲线拟合这些数据点,拟合结果即为这两个参数的有效值。确定了 PCF 两个参数的有效值之后,其色散性质以及完整的相位匹配曲线就随之确定。

3 实验过程和结果

使用上述方法,测量了一根 0.6 m 长的 PCF (NL-1050-ZERO-2, Crystal Fibre) 的色散,实验装置如图 1(a) 所示。实验中的光源是一台基于掺镱 PCF 的飞秒锁模激光器^[15],输出的线偏振脉冲光重复频率为 54.4 MHz,平均功率为 500 mW,其光谱中心波长为 1042 nm,半峰全宽(FWHM)为 8 nm。光栅 G(VPH Grating, 600 line/mm) 的作用是控制

进入 PCF 的抽运光的中心波长及带宽；半波片 HWP1 以及偏振分束器 PBS 的作用是调节抽运功率。半波片 HWP2 的作用是控制抽运光进入 PCF 的偏振方向,使其沿着光纤的快轴或者慢轴,从而可以分别测量相应轴上的色散。由于两个轴上的测量方法并无不同,因此在本实验中,固定抽运光的偏振沿着待测 PCF 的快轴。而在 PCF 的输出端,色散棱镜 P 的作用是将产生的信号光子、闲频光子以及剩余的抽运光分离开。

由于信号和闲频光子的亮度较低,使用一台工作于门模盖革模式下的基于 InGaAs 雪崩二极管的单光子探测器 (SPD1) 探测信号光子,其 3.4 MHz 的触发信号来源于对激光重复频率信号的 1/16 分频,探测效率约为 15%。而用于闲频光子探测的是

一台基于 Si 雪崩二极管的单光子探测器 (SPD2),工作于主动抑制模式下,其探测效率约为 50%。两台探测器的探测信号输入至光子计数系统进行处理和记录。信号光和闲频光通道加入的可调窄带滤波器 (NBF) 的作用是对相应波段的光子频谱进行精细扫描并提高对抽运光子的隔离度。两个通道的 NBF 均由单光栅构成,其 FWHM 分别为 0.8 和 0.4 nm。滤波系统对信号(闲频)光子的透射率约为 25%(20%)。

实验待测 PCF 的横截面如图 1(b) 所示,从中提取到的纤芯半径 a 和空气比 f 分别约为 $1 \mu\text{m}$ 和 28%。利用这两个数值估算出当抽运光中心波长 λ_p 为 1038 nm 时,光纤产生的信号光子和闲频光子的中心波长(λ_s 和 λ_i)分别约为 1483 和 798 nm。

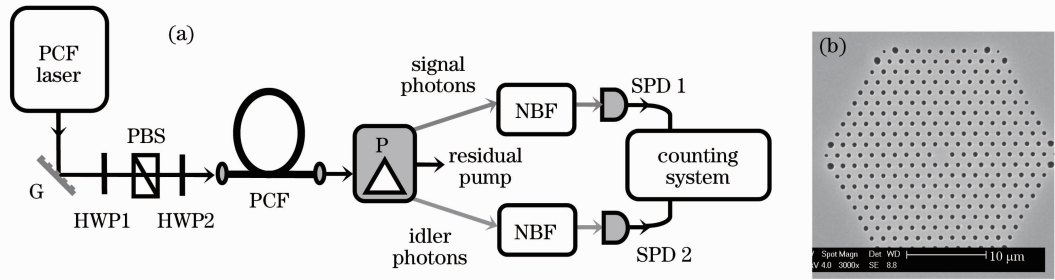


图 1 (a) 实验装置图;(b) PCF 截面图

Fig. 1 (a) Experimental setup; (b) cross section photograph of the PCF

为了验证估算结果的准确度,将输入 PCF 的抽运光中心波长设为 1038 nm,其平均功率以及脉宽分别设为 1 mW 和 1.6 ps。实验测量显示经过光栅滤波后的抽运脉冲光满足变换极限,对应的谱宽 FWHM 约为 1 nm。通过变换信号(闲频)通道 NBF 的中心波长 λ_{sF} (λ_{iF}),扫描 PCF 中通过 SFWM 产生信号和闲频光子的频谱,得到光子计数与 λ_{sF} (λ_{iF}) 的关系,结果如图 2 所示。我们注意到图中闲频光子计数率远高于信号光子计数率,除了探测效率的差别,其主要原因是由于闲频和信号光探测器

具有不同的工作模式;如前所述,信号光探测器的触发频率为激光器重复频率的 1/16,因此在不考虑效率的理想情况下,其光子计数率也将仅为闲频光探测器的 1/16。然而,本实验关注的是信号光和闲频光的中心波长,计数率的差别并不影响从图中提取相关信息,从图 2 中可以确定当 $\lambda_p = 1038 \text{ nm}$ 时,相应的 $\lambda_s = 1397 \text{ nm}$ 以及 $\lambda_i = 826 \text{ nm}$ 。显然,实验测量结果与上文利用 PCF 截面图中提取的参数所计算出的结果之间较大的差别,误差大于 5%,表明从截面图中提取的参数所计算出的 PCF 色散准确

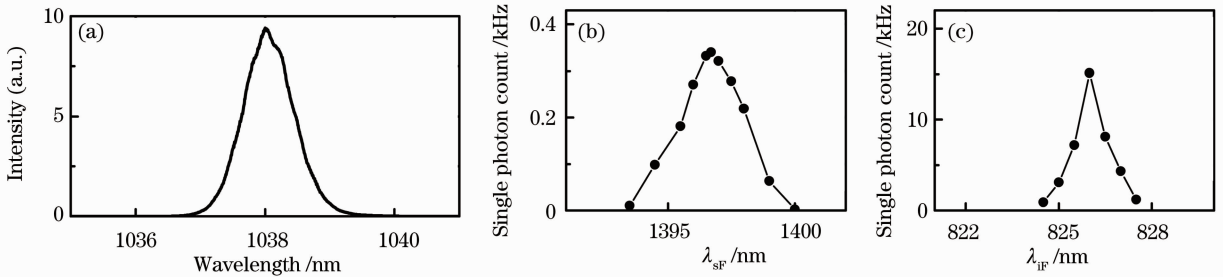


图 2 (a) 抽运光谱;(b) 信号光子计数与滤波器中心波长 λ_{sF} 的关系;(c) 闲频光子计数与滤波器中心波长 λ_{iF} 的关系
Fig. 2 (a) Intensity spectrum of the pump; (b) signal photon counts as a function of the central wavelength of the NBF λ_{sF} ; (c) idler photon counts as a function of the central wavelength of the NBF λ_{iF}

度较低。

为了更准确地确定待测 PCF 的色散,使用实验原理部分所描述的方法对其进行了测量。基于所使用激光器的输出频谱,在 1037~1047 nm 之间选择了 11 个波长作为抽运光中心波长(间隔 1 nm)。在每个中心波长下,重复上述对信号和闲频光子频谱的扫描测量,抽运光的平均功率以及脉宽分别设定为 1 mW 和 1.6 ps。最终获得了待测 PCF 的 11 组 SFWM 相位匹配数据,每组数据都包括抽运光中心波长 λ_p 以及相应的增益光子波长 λ_s 和 λ_i ,结果如图 3 中的空心圆形数据点所示。然后将纤芯半径 a 和空气比 f 作为两个可变值,并利用这两个值计算出相应的 SFWM 相位匹配曲线去拟合所得到的 11 组数据点。图 3 中的实线即为最佳拟合结果,其对应的 a 和 f 分别为 0.949 μm 和 29.52%。这两个值即为待测 PCF 快轴的有效纤芯半径和空气比。为了使数据点更加清晰,图中仅画出了抽运波长在 1000~1075 nm 之间的结果。

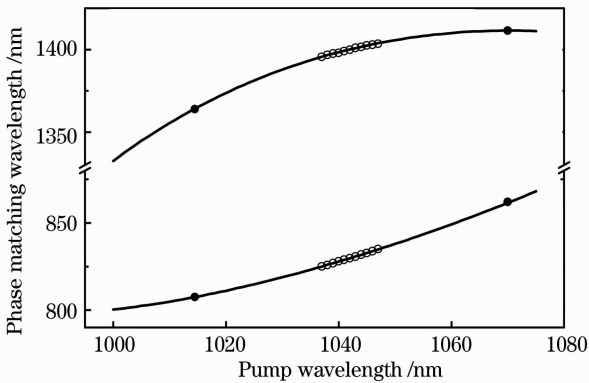


图 3 实测 SFWM 相位匹配波长(空心和实心点)以及拟合曲线

Fig. 3 Measured SFWM phase matching wavelengths (hollow and solid points) and the fitting curve

为了验证两个结构参数有效值的准确度,对得到的相位匹配曲线进行了实验检验。首先使激光器的输出光在经过光栅滤波之前,先通过一段 60 cm 的单模光纤,将其光谱宽度展至 70 nm,这样就增大了可选抽运中心波长的范围。然后测量了抽运中心波长 λ_p 分别为 1014.5 nm 和 1070 nm 时信号和闲频光子的中心波长,结果如图 3 中的实心数据点所示。表 1 中列出了实际测量值与相位匹配曲线的预测值,从实验结果可以看到两者符合得很好,误差小于波长值本身的 0.1%,显示了与从 SEM 图中直接提取的参数相比,利用上述方法得到的有效参数具有更高的准确度。

表 1 相位匹配波长的预测值与实测值

Table 1 Predicted and measured values of the phase matching wavelengths

	$\lambda_p = 1014.5 \text{ nm}$		$\lambda_p = 1070 \text{ nm}$	
	λ_s/nm	λ_i/nm	λ_s/nm	λ_i/nm
Measured	1364.0	807.5	1410.5	862.0
Predicted	1364.3	807.5	1411.6	861.5

4 结 论

利用可调谐滤波器和单光子探测器测量 0.6 m PCF 中 SFWM 过程的增益谱,获得部分相位匹配波长数据;然后使用阶跃光纤模型对这些数据进行拟合,从而确定待测 PCF 的纤芯半径 a 和包层空气比 f 的有效值并得到待测 PCF 的色散。实验中抽运光平均功率和脉宽分别 1 mW 和 1.6 ps,当信号和闲频光子的带宽约为 1 nm 时,PCF 中 SFWM 过程所产生的信号和闲频光子对的亮度小于每个脉冲 0.1 对,远高于光谱分析仪可测量的光强。实验结果显示,与从 PCF 截面图中提取的结构参数相比,使用有效结构参数得出的光纤色散以及相位匹配曲线具有更高的准确度。实验中单光子探测器的应用使得该测量光纤色散的方法在 SFWM 增益光子极微弱时也适用,拓展了其应用范围。

参 考 文 献

- 1 J. M. Dudley, J. R. Taylor. Ten years of nonlinear optics in photonic crystal fibre [J]. *Nature Photon.*, 2009, **3**(2): 85~90
- 2 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66
王清月, 胡明列, 柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 57~66
- 3 A. Y. H. Chen, G. K. L. Wong, S. G. Murdoch *et al.*. Widely tunable optical parametric generation in a photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 762~764
- 4 Zhang Jun, Wei Zhiyi, Wang Zhaoehua *et al.*. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber by femtosecond pulses laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 511~512
张军, 魏志义, 王兆华等. 利用光子晶体光纤产生超连续飞秒激光光谱[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 511~512
- 5 Jay Sharping, Jun Chen, Xiaoying Li *et al.*. Quantum-correlated twin photons from microstructure fiber[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(14): 3086~3094
- 6 Cui Liang, Li Xiaoying, Fan Haiyang *et al.*. Photonic crystal fiber source of quantum correlated photon pairs in the 1550 nm telecom band [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(4): 044209
- 7 A. Cucinotta, S. Selleri, L. Vincetti *et al.*. Hole fiber analysis through the finite element method [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(11): 1530~1532
- 8 M. Qiu. Analysis of guided modes in photonic crystal fibers using the finite-difference time-domain method [J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2001, **30**(5): 327~330
- 9 Wang Zefeng, Jin Aijun, Liu Xiaoming. Numerical and

- experimental investigations on dispersion properties of photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): 100216
王泽锋, 靳爱军, 刘小明. 光子晶体光纤色散特性的数值计算与实验研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(s1): 100216
- 10 G. K. Wong, A. Y. Chen, S. Ha *et al.*. Characterization of chromatic dispersion in photonic crystal fibers using scalar modulation instability [J]. *Opt. Express*, 2005, **13** (21): 8662~8670
- 11 O. Alibart, J. Fulconis, G. K. L. Wong *et al.*. Photon pair generation using four-wave mixing in a microstructured fibre: theory versus experiment [J]. *New J. Phys.*, 2006, **8**:67
- 12 O. Cohen, J. S. Lundeen, B. J. Smith *et al.*. Tailored photon-pair generation in optical fibers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(12): 123603
- 13 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* (3rd ed.) [M]. San Diego: Academic Press, 2001. 7~9, 392~399
- 14 A. Yariv, P. Yeh. *Photonics: Optical Electronics in Modern Communications* (6th ed.) [M]. New York: Oxford University Press, 2007. 802~811
- 15 Song Youjian, Hu Minglie, Zhang Chi *et al.*. Stretched-pulse femtosecond photonic crystal fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 830~834
宋有建, 胡明列, 张 弛 等. 呼吸脉冲锁模的光子晶体光纤飞秒激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 830~834

栏目编辑:李文喆