

文章编号: 0258-7025(2009)04-0895-06

# 光源的稳定性对拍信号在非线性光子晶体 光纤中演化的影响

张丽梅 王 智 余凯球 吴重庆

(北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所 发光和光信息教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要** 人们通常利用拍频光信号的传输光谱演化来测量光纤的非线性系数。通过数值模拟分析了光源输出光功率和中心频率的扰动以及光源谱线宽度对该测量方法的影响,并进行了实验验证。使用紧凑的超格子算法分析了一种光子晶体光纤(PCF)的传输特性。考虑自相位调制(SPM)、损耗和群速度色散,采用分步傅里叶方法分析了拍频光信号沿光子晶体光纤的传输过程,得到了信号频谱演化的数值仿真结果。结果表明光源输出功率的扰动基本不会影响非线性系数的测量结果,但输出波长的扰动和光源的谱宽对非线性系数的测量有一定影响。因此需要选择适当的参数条件才可得到较为精确的实验结果。

**关键词** 非线性光纤光学; 光子晶体光纤; 非线性系数; 拍信号; 自相位调制

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.0895

## Influence of Light Source Stability on Evolution of Beat Signal in Nonlinear Photonic Crystal Fibers

Zhang Limei Wang Zhi Yu Kuanglu Wu Chongqing

(*Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

**Abstract** At present, the spectrum evolution of the beat signal can be used to measure the fiber nonlinear coefficient. By theoretical simulations, the effect of the stability of the output power, the frequency and the linewidth of the laser on the measurement of the nonlinear coefficient were analyzed. The simulations agree well with the experiments. The propagation properties of a kind of photonic crystal fiber (PCF) are analyzed with the compact supercell method. Taking self-phase modulation (SPM), fiber loss and dispersion into account, the transmission process and the evolution spectra of the beat signal propagating along the PCF are analyzed by using the split-step Fourier method. The results show that the stability of the laser output power has little effect on the measurement of the nonlinear coefficient, but the linewidth and the stability of the central wavelength have more effects on it. Proper parameters should be established to get a more accurate measurement result, in order of the nonlinear coefficient.

**Key words** nonlinear fiber optics; photonic crystal fiber; nonlinear coefficient; beat signal; self-phase modulation

### 1 引 言

光子晶体光纤(PCF)的空气孔位置、形状、几何尺寸可灵活控制,设计不同结构的PCF能获得多种独特的传输特性,所以引起人们的广泛关注和深入

研究。具有特殊色散和非线性特性的PCF,在光通信和光信号处理领域得到广泛的应用<sup>[1~6]</sup>。目前,主要利用拍频光信号在光纤中传输时的光谱演化来测量光纤的非线性系数。存在固定的频率差的两束

收稿日期: 2008-05-22; 收到修改稿日期: 2008-07-18

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z270),教育部新世纪优秀人才支持计划和北京交通大学校基金(2005SZ001)资助课题。

作者简介: 张丽梅(1977—),女,博士研究生,讲师,主要从事光纤通信、全光信号处理等方面的研究。

E-mail: lmzhang@bjtu.edu.cn

导师简介: 王 智(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光纤传感、全光信号处理及全光网、特种光纤等方面的研究。E-mail: zhiwang@bjtu.edu.cn

光同时注入光纤,可产生拍频光信号,拍频光在光纤中传输时,由于色散和自相位调制(SPM)的作用,产生新的频谱分量。通过测量 0 阶和 1 阶频率分量的强度,可得到非线性相移的大小,从而可测得非线性系数<sup>[7~9]</sup>。

但由于两个光源存在随机性,实际工作中很难获得理想的拍信号。目前仍然没有关于光源稳定性对这种测量方法的影响的任何报道,因此,考虑自相位调制、损耗和色散,本文理论分析拍频光信号在一种非线性光子晶体光纤中的传输过程,对信号频谱进行数值计算和仿真,研究了光源输出光功率、中心频率的扰动和谱线宽度对这种常用的非线性系数测量方法的影响,并进行了实验验证。

## 2 一种非线性 PCF

研究的光子晶体光纤是一种大空气孔全内反射型(TIR)的光子晶体光纤,其扫描电子显微镜(SEM)照片如图 1 所示。该光纤包层直径 125  $\mu\text{m}$ ,空气孔直径  $d=4.4 \mu\text{m}$ ,节距  $\Lambda=4.8 \mu\text{m}$ 。利用紧凑超格子算法<sup>[10,11]</sup>对其传输特性进行分析,图 2 是基模的群速度色散(GVD),1550 nm 处色散  $D$  约 80 ps/(nm·km)。图 3 是 1550 nm 处基模场分布的等高线图,从图中可看出,基模的模场半径  $R$  约为 1.23  $\mu\text{m}$ ,因而模场面积  $A_{\text{eff}}$  约 4.75  $\mu\text{m}^2$ ,由  $\gamma = \omega n_2 / c A_{\text{eff}}$ ,可计算出 1550 nm 处非线性系数  $\gamma$  约 18.8/(W·km) (1550 nm 处石英材料的  $n_2$  约  $2.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ),约为常用的非线性 PCF<sup>[12]</sup>的 2 倍。因此研究这种光纤的非线性 SPM 和色散、损耗等相互作用对拍信号传输的影响,并利用拍信号传输之后的光谱测量该光纤的非线性系数。

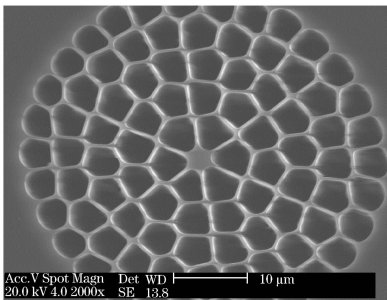


图 1 PCF 的电子显微镜图

Fig. 1 SEM image of the PCF

## 3 拍信号的 SPM 过程及结果

形成拍信号的两光频电场可写为

$$\begin{aligned} E_1(t) &= \sqrt{p_0/2} \cos(\omega_1 t), \\ E_2(t) &= \sqrt{p_0/2} \cos(\omega_2 t), \end{aligned} \quad (1)$$

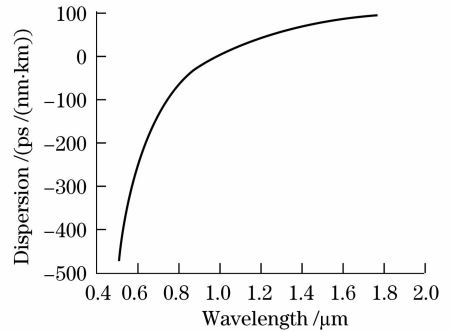


图 2 PCF 的群速度色散曲线

Fig. 2 GVD of the PCF

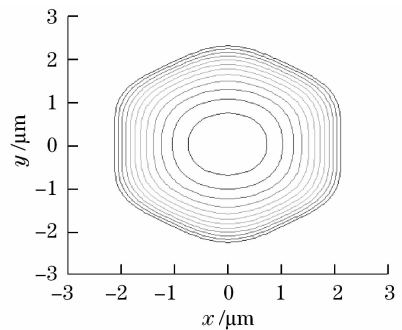


图 3 1550 nm 基模场分布等高线图

Fig. 3 Contour plot at 1550 nm

其中  $p_0/2$  是每束光的光功率,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  ( $\omega_1 > \omega_2$ ) 分别为两束光的角频率。拍信号电场为

$$\begin{aligned} E(t) &= E_1(t) + E_2(t) = \\ &= \sqrt{2p_0} \cos(\omega_{\text{avg}} t) \cos(\Delta\omega t / 2), \end{aligned} \quad (2)$$

其中平均光频率  $\omega_{\text{avg}} = (\omega_1 + \omega_2) / 2$ , 拍频  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ 。

光信号在光纤中传输和演化满足非线性 Schrodinger 方程<sup>[13]</sup>

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i}{2} \alpha A + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \gamma |A|^2 A, \quad (3)$$

(3)式只考虑光纤损耗、色散和自相位调制效应,其中  $A(0, T) = \sqrt{2p_0} \cos(\Delta\omega T / 2)$  为慢变振幅,  $\alpha$  为衰减系数,  $\gamma$  为非线性系数,  $\beta_2 = d^2 \beta / d\omega^2$  为二阶色散系数。利用分步傅里叶法<sup>[13]</sup>对方程(3)进行数值求解,可以得到拍信号在光纤中的演化情况。

图 4 是波长分别为 1552.42 nm 和 1552.54 nm 的两束光的拍频信号经过 200 m 光纤后的光谱,计算时取  $p_0 = 0.5 \text{ W}$ ,非线性系数和色散均取前文的数值计算结果,损耗取 45 dB/km。可见,拍频光沿着光纤传播时,除了最初的两个初始频率  $\omega_1$  和  $\omega_2$ ,

又产生了大量新的频率  $\omega_1 + m\Delta\omega$  和  $\omega_2 - m\Delta\omega$ 。由于持续的 SPM 过程,在一定长度范围内随着光纤长度的增加,不断产生新的频率分量,最终导致光谱展宽和信号光功率下降。

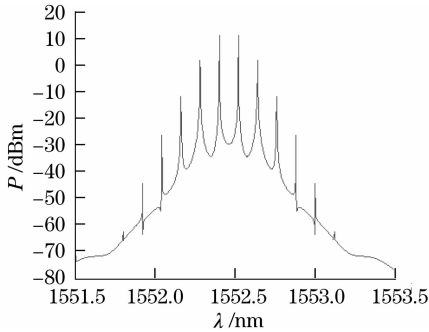


图 4 拍频光经过 200 m 光纤后的光谱

Fig. 4 Spectrum of the beat signal after propagating along the 200 m PCF

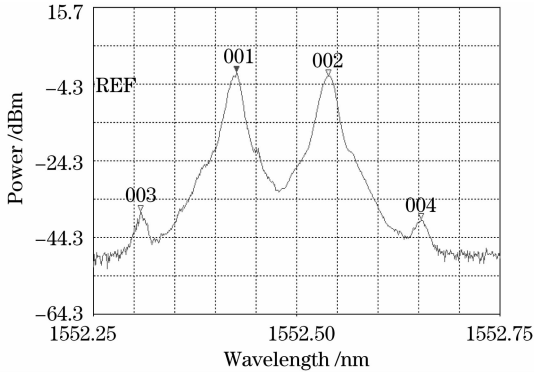


图 5 拍信号传输的实验结果

Fig. 5 Experimental spectrum of the beat signal

很明显,拍信号经 SPM 后的频谱展宽结果也可以从四波混频的角度解释:两个频率为  $\omega_1$  和  $\omega_2$  的光子湮灭,产生两个频率为  $\omega_1 + \Delta\omega$  和  $\omega_2 - \Delta\omega$  的光子,这两个新产生的光子继续参与四波混频过程,于是又有更多新频率的光子产生。

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{J_0^2\left(\frac{\varphi_{\text{SPM}}}{2}\right) + J_1^2\left(\frac{\varphi_{\text{SPM}}}{2}\right)}{J_1^2\left(\frac{\varphi_{\text{SPM}}}{2}\right) + J_2^2\left(\frac{\varphi_{\text{SPM}}}{2}\right)}, \quad (4)$$

从图 4 测量频率为  $\omega_1$  与  $\omega_1 + \Delta\omega$  或者  $\omega_2$  与  $\omega_2 - \Delta\omega$  处的光功率  $I_0$  与  $I_1$ ,由(4)式所示的关系<sup>[7]</sup>可求得 SPM 引起的非线性相移  $\varphi_{\text{SPM}}$ ,  $J_n$  是  $n$  阶 Bessel 函数。进而根据关系  $\varphi_{\text{SPM}} = 2\gamma L_{\text{eff}} P_0$ , 可得光纤的非线性系数  $\gamma$ 。其中  $P_0$  是信号光平均功率,  $L_{\text{eff}}$  是光纤的有效长度。由图 4 计算得  $\gamma = 19.60/(\text{W} \cdot \text{km})$ 。这个结果与我们理论计算时所用的数值  $18.8/(\text{W} \cdot \text{km})$  有一定的差别,这是由于选用的光纤色散较大。如果计算时不考虑光纤的色散,可得  $\gamma = 18.79/$

$(\text{W} \cdot \text{km})$ ,与计算时所用的数据十分吻合。产生此结果的原因是:非线性 Schrodinger 方程(3)中同时包含了 SPM,损耗和色散。而在推导(4)式时,仅考虑了 SPM 和损耗,而忽略了色散。如果考虑色散,则(4)式将发生改变。所以用(4)式测量非线性系数时,光纤的色散越小,结果越准确。

图 5 是实验测得的拍信号在 200 m 光子晶体光纤中传输后的光谱。实验中两信号光的中心波长差为 0.12 nm,显然 0 阶和 1 阶谐波的光功率均可清晰测到,计算得到该光纤的非线性系数约  $16.98/(\text{W} \cdot \text{km})$ 。

## 4 光源不稳定对光谱演化的影响

比较图 4 和图 5,实验得到的光谱中新的频率数量明显少于理论结果,并且实验谱线的形状也同理论谱线形状不太一样。为此,分析了光源输出功率、光源频率和光源线宽等主要因素对拍信号在光纤中演化过程的影响。

### 4.1 光功率不稳定

当输入信号功率增大时,由于非线性效应而产生的新的频率分量明显增多,整个频谱范围明显加宽。光纤的非线性系数越大,频谱范围的展宽也越明显。如果改变  $P_0$  和  $\gamma$ ,但保持其乘积  $\gamma P_0$  不变,则频谱范围保持不变,也就是说频谱范围与光纤的非线性长度有关。当光纤长度比较短时,随着光纤长度的增加,频谱范围不断加宽;当光纤超过一定长度之后,随着光纤变长,由于光纤存在损耗,频谱范围开始缩小。如果不考虑光纤的损耗,在 SPM 作用下,新的频率成分随着光纤长度增加而越来越多。图 6(a)为 GVD 的色散  $D$  分别为  $40 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ,  $80 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  和  $160 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  时,输出光谱范围随光纤长度的变化关系。由图可见,色散较小时,频谱范围展宽较慢;色散较大时,频谱范围展宽较快,但最大光谱范围基本相同,与色散无关。

图 6(b)为输入光功率不同时,频谱范围随光纤长度的变化关系。显然,随着光功率增大,最大频谱范围增加得很快,表明光纤中非线性作用很强,产生了大量新的频率成分。

为了研究光功率不稳定对拍信号在非线性光纤中传输的影响,在数值分析中对入射光功率加上随机扰动,扰动满足正态分布,其平均值为 0,标准差为  $S$ 。标准差  $S$  与光功率  $P$  之比  $S/P$  表明了功率扰动的大小。结果发现,光功率随机扰动的大小对产生的新频率的位置没有影响,但是,对可观测的新频率的阶数有明显的影 响,扰动越大,可测量到的新

频率分量越少。图 7 为  $S/P$  为  $\pm 1\%$  和  $\pm 10\%$  的数值仿真结果。当扰动达到  $\pm 10\%$  时,一阶新频率仍很明显。更重要的是,对于两种不同幅度的扰动,0 阶和 1 阶信号的幅度变化很小,即  $I_0/I_1$  的大小基本不变。计算得到了  $0, \pm 1\%$  和  $\pm 10\%$  扰动时非线性系数的大小分别为:  $19.60/(\text{W} \cdot \text{km})$ 、 $19.49/(\text{W} \cdot \text{km})$  和  $19.57/(\text{W} \cdot \text{km})$ 。因此光源输出功率的扰动对非线性系数测量结果的影响很小。

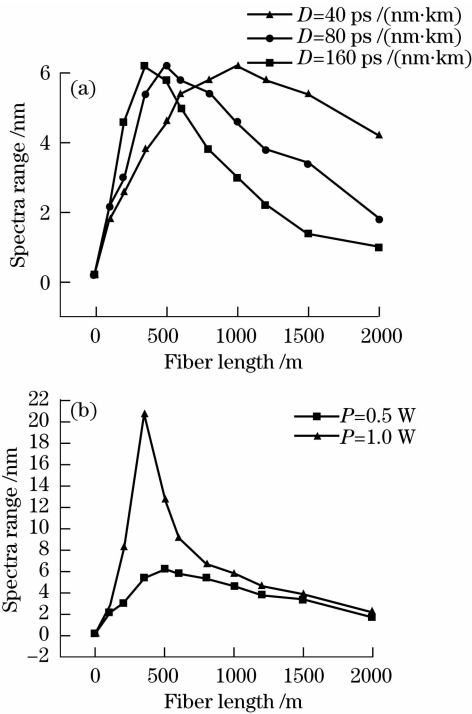


图 6 不同色散(a)和不同光功率(b)时光谱范围与光纤长度的关系

Fig. 6 Relationship between the spectra range and the fiber length at different dispersion (a) and different input power (b)

#### 4.2 波长不稳定

光源输出波长不稳定导致两信号光的拍频(频率差)不稳定,同时产生随机变化的相位差。理论分析中,我们对拍频信号的  $\Delta\omega$  加上随机扰动,扰动仍为正态分布,其平均值为 0,标准差为  $S$ 。 $S/\Delta\omega$  的大小表明了频率扰动的大小。结果发现,频率的随机扰动大小对产生的新频率位置没有影响,仍在  $\omega_1 + m\Delta\omega$  和  $\omega_2 - m\Delta\omega$  处。但是,对可观测的新频率的阶数有明显的影响,扰动越强,可测量到的新频率越少。图 8 是  $S/\Delta\omega$  为  $\pm 1\%$  和  $\pm 10\%$  时拍信号输出光谱的仿真结果。显然,即使扰动达到  $\pm 10\%$ ,一阶新频率仍很明显,足以用于测量非线性系数。但 0 阶和 1 阶谐波的强度均发生了一定的变化,即  $I_0/I_1$  发生了变化,经计算得到了  $\pm 1\%$  和  $\pm 10\%$  扰动时非线性系数的大小分别为:  $19.61/(\text{W} \cdot \text{km})$  和  $15.47/(\text{W} \cdot \text{km})$ 。可

见,频率扰动越大对非线性系数测量结果的影响越大。因此实验时应选用输出波长较稳定的光源。

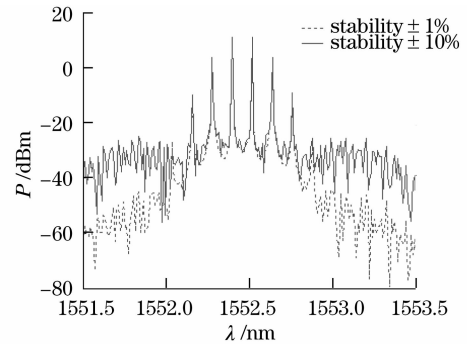


图 7 光功率扰动为  $\pm 1\%$  和  $\pm 10\%$  时拍信号的输出光谱  
Fig. 7 Output spectra of the beat signal with the power disturbance of  $\pm 1\%$  and  $\pm 10\%$

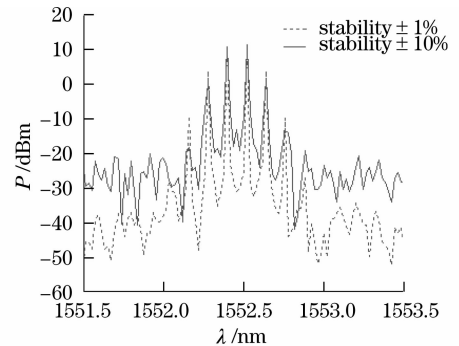


图 8 频率扰动为  $\pm 1\%$  和  $\pm 10\%$  时拍信号的输出光谱  
Fig. 8 Output spectra of the beat signal with the frequency disturbance of  $\pm 1\%$  and  $\pm 10\%$

#### 4.3 光源的谱线宽度

由于激光器存在一定的谱宽,这将对信号的频谱演化有一定的影响。假定激光器输出光谱线型函数为 Gauss 型,且两个光源的线宽均为  $\Delta\lambda$ 。当  $\Delta\lambda$  分别为  $0.015 \text{ nm}$  和  $0.03 \text{ nm}$  时,中心波长差为  $0.2 \text{ nm}$  的拍信号经  $200 \text{ m}$  光纤传输后的光谱如图 9 所示。这时的拍信号经光纤的 SPM 作用产生的新频率位置仍然不变,但新的频率分量也有一定的线宽,其宽度由光源的谱宽决定。同时,  $I_1/I_0$  也发生变化,光源谱宽越大,变化越大。经计算,光源线宽为  $0.015 \text{ nm}$  和  $0.03 \text{ nm}$  时,非线性系数的大小分别为:  $19.19/(\text{W} \cdot \text{km})$  和  $18.69/(\text{W} \cdot \text{km})$ 。由于光源线宽改变了拍信号的频域特性,从而对非线性作用的效应产生明显影响,因此在非线性系数测量中应选择谱宽较窄的光源。

#### 4.4 综合因素影响下的输出光谱

实际应用的光源,一般都会同时出现上述三方面的因素,因此,综合分析这些因素,得到如图 10 所示的拍信号输出光谱。分析时,功率不稳定性为

$\pm 5\%$ , 波长不稳定性为  $\pm 5\%$ , 光源线宽为  $0.02$  nm。计算得到非线性系数为  $19.22/(\text{W} \cdot \text{km})$ 。

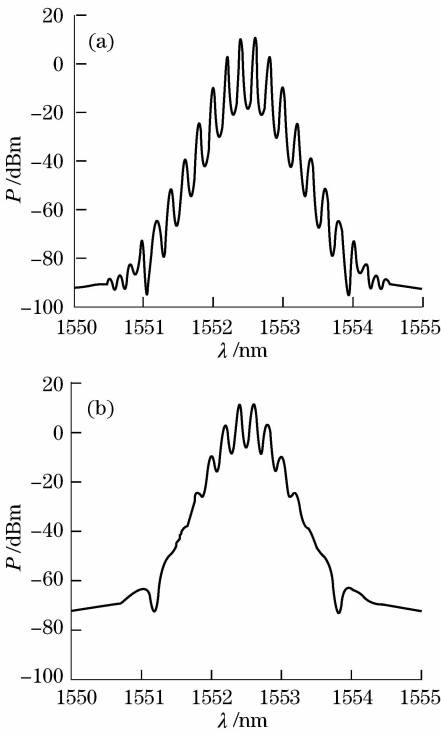


图9 光源存在一定的谱宽  $\Delta\lambda=0.015$  nm (a)和  $\Delta\lambda=0.03$  nm(b)时的输出光谱

Fig. 9 Output spectra with the laser's linewidth of  $0.015$  nm (a) and  $0.03$  nm (b)

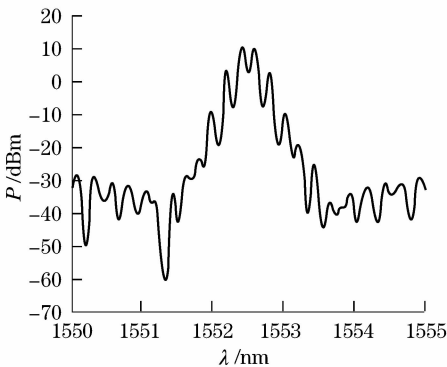


图10 光源同时存在功率扰动、频率扰动和线宽时拍信号的输出光谱

Fig. 10 Output spectrum considering laser's linewidth and disturbance of power and frequency

为了使拍信号经非线性光纤的 SPM 作用之后的光谱清晰,便于测量相关数据,应选用功率和波长都具有高稳定性的窄带光源,并可适当增大信号光功率,使实验结果更精确。

实际上,得到图5的实验系统中,光源的输出功率约  $20$  mW,功率扰动约为  $\pm 3\%$ ,波长扰动约为  $\pm 3\%$ ,光源线宽约  $0.017$  nm。

## 4.5 讨 论

分析的光纤的非线性系数出现了几个不同数值:由模场半径计算出的非线性系数  $18.8/(\text{W} \cdot \text{km})$ ,考虑功率不稳定性、波长不稳定性和光源线宽,计算得到的非线性系数  $19.22/(\text{W} \cdot \text{km})$ ,以及由拍信号实验光谱计算得到的非线性系数  $16.98/(\text{W} \cdot \text{km})$ 。这些结果之间存在一定的差异,主要原因有两点:1) 利用超格子算法计算模场半径时对实际光纤进行了一些近似处理;2) 实验用的光纤存在色散,而(4)式则忽略了色散。所以导致理论和实验结果之间存在一些差别。考虑光源的稳定性后,非线性系数的数值也发生了变化,但研究表明,即使光源的扰动很大,拍信号仍可用于测量光纤的非线性系数。

## 5 结 论

用紧凑超格子算法对一种光子晶体光纤的传输特性进行理论分析,得到其色散曲线和模场分布曲线。研究了两个连续光信号形成的拍信号在这种光子晶体光纤中的传输过程,通过理论分析和数值计算得到了拍信号经光纤传输后的频谱特性。分析了光源的稳定性和谱宽对一种非线性系数测量方法的影响。发现光源输出功率的扰动基本不会影响非线性系数的测量结果,但输出波长的扰动和光源的谱宽对非线性系数的测量有一定的影响。因此需要选择适当的参数条件才可得到较为精确的实验结果。同时还分析了色散和光功率大小对拍信号非线性传输过程和结果的影响,色散越大,频谱展宽越快,光功率越大,频谱范围越大。

## 参 考 文 献

- 1 P. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**:358~362
- 2 W. Belardi, J. H. Lee, K. Furusawa *et al.*. A 10 Gbit/s tuneable wavelength converter based on four-wave mixing in highly nonlinear holey fiber [C]. *ECOC*, 2002, PD1.2
- 3 J. E. Sharping, M. Fiorentino, P. Kumar *et al.*. All-optical switching based on cross-phase modulation in microstructure fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(1):77~79
- 4 J. Y. Y. Leong, P. Petropoulos, J. H. V. Price *et al.*. High-nonlinearity dispersion-shifted lead-silicate holey fibers for efficient  $1 \mu\text{m}$  pumped supercontinuum generation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1):183~190
- 5 Masayuki Matsumoto, Yoshiyuki Shimada, Hironobu Sakaguchi. Wavelength-shift-free SPM-based 2R regeneration by bidirectional use of a highly nonlinear fiber [C]. *OFC*, 2007, OME5
- 6 Miguel Gonzalez Herraiez, Kwang Yong Song, Luc Thevenaz. Optically controlled slow and fast light in optical fibers using stimulated Brillouin scattering [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005,

- 87:081113-1~081113-3
- 7 A. Boskovic, S. V. Chernikov, J. R. Taylor. Direct continuous-wave measurement of  $n_2$  in various types of telecommunication fiber at 1.55  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24):1966~1968
- 8 S. V. Chernikov, J. R. Taylor. Measurement of normalization factor of  $n_2$  for random polarization in optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19):1559~1561
- 9 Li Yun, Wu Chongqing, Li Yajie *et al.*. Measurement of fiber nonlinear coefficient based on self-phase modulation [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(4):455~458  
李 贇, 吴重庆, 李亚捷 等. 基于自相位调制原理的光纤非线性系数测量[J]. 半导体光电, 2006, **27**(4):455~458
- 10 W. Zhi, R. Guobin, L. Shuqin *et al.*. Compact supercell method based on opposite parity for Bragg fibers [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**:3542~3549
- 11 Wang Zhi, Ren Guobin, Lou Shuqin *et al.*. Novel supercell lattice method for the photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):59~63  
王 智, 任国斌, 娄淑琴 等. 用于光子晶体光纤研究的超格子构造法[J]. 中国激光, 2005, **32**(1):59~63
- 12 Wang Zhaoxin, Lin Chinlon, Chow Kinkee *et al.*. Wavelength-tunable dispersion-imbalanced loop mirror based on dispersion-flattened high-nonlinearity photonic crystal fiber and its application in suppression of the incoherent interferometric crosstalk [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(9):1911~1913
- 13 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. Third Edition. San Diego: Academic Press, 2001