

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0184-04

折射率引导型光子晶体光纤中反斯托克斯线的研究

梁丹华¹ 侯蓝田^{1, 2} 高 飞¹ 王 伟¹ 王福增¹

(¹ 燕山大学红外光纤与传感研究所, 河北 秦皇岛 066004
² 燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 设计并拉制了零色散波长在 800 nm 附近的折射率引导型光子晶体光纤, 仿真结果表明光子晶体光纤的基模零色散波长在 825 nm 处, 并能在基模下产生四波混频现象(FWM)。使用中心波长为 810 nm 的 200-fs Ti 宝石激光器抽运, 在短波段 610 nm 处出现了显著的反斯托克斯效应, 输出信号光为高斯形, 这表明在光子晶体光纤的基模下产生了反斯托克斯光。产生的反斯托克斯信号的能量远远高于剩余抽运激光的能量, 输出的反斯托克斯光和抽运光的频谱之比超过了 1.2, 其转化效率超过了 50%, 很好的实现了波长转换。

关键词 光子晶体光纤; 反斯托克斯; 四波混频; 零色散波长; 基模

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0184

The Investigation of anti-Stokes lines in the Index-guiding photonic crystal fiber

Liang Danhua¹ Hou Lantian^{1, 2} Gao Fei¹ Wang Wei¹ Wang Fuzeng¹

(¹ Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China
² Key Laboratory of Metastable Materials Science & Technology, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract A photonic crystal fiber(PCF) with zero dispersion wavelength around 800 nm is designed and fabricated. The simulated results show that the zero dispersion wavelength of fundamental mode of the PCF is at 825 nm and FMW is possible in fundamental mode. Anti-Stokes line around 610 nm can be generated efficiently with 810nm 200 fs Ti : Sapphire laser used as pump. The output signal has a Gauss like field, which indicates that anti-Stokes signal is in the fundamental mode of PCF. The output energy of anti-Stokes signal is much more than the energy of residual pump laser. The maximum ratio of the anti-Stokes signal energy to the pump component in the output spectrum is estimated as 1.2 and the conversion efficiency is above 50%, wavelength conversion is achieved commendably.

Key words photonic crystal fiber; anti-Stokes; four wave mixing; zero-dispersion wavelength; fundamental mode

1 引 言

光子晶体光纤^[1] (PCF) 由于它的高非线性特性^[2,3] 和色散可调性^[4,5], 使其产生一系列的非线性效应, 如自相位调制 (SPM)、交叉相位调制 (XPM), 受激拉曼散射 (SRS) 和参量四波混频 (FWM) 等^[6~8]。因此, 光子晶体光纤的四波混频过程中由抽运光、斯托克斯光, 产生反斯托克斯光。通过调节 PCF 的色散来实现较好的相位匹配, 从

而产生反斯托克斯效应。目前, 人们在利用飞秒脉冲抽运 PCF 产生反斯托克斯效应方面, 已经做了一些研究。如 L Provino 等人利用倍频 Q 开关 Nd : YAG 微芯片激光器, 用 532 nm 抽运光抽运微结构光纤, 当抽运脉冲的中心波长转移到在第一高阶模的零色散波长处, 出现了反斯托克斯光^[9]。J. M. Dudley 等的研究表明当参量抽运光子在高阶模的零色散波长附近时, 可以产生宽带四波混频增

基金项目: 国家 973 计划(2003CB314905)和国家自然科学基金(60637010)资助课题。

作者简介: 梁丹华(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事光子晶体光纤的制备与理论方面的研究。

E-mail: danhuaysu@163.com

导师简介: 侯蓝田(1939—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事红外光纤和光子晶体光纤理论和应用方面的研究。

E-mail: hlt8068853@163.com

益^[10]。Wang Wei 等使用第一高阶模具有双零色散点的光子晶体光纤，利用 200 fs Ti 宝石激光器在两个零色散点之间的反常色散区产生了反斯托克斯光^[11]。这些研究都是利用 PCF 的高阶模，由飞秒激光脉冲抽运产生斯托克斯光。而本文研究的 PCF 中斯托克斯光的产生是在基模下激发的，它的优越之处就在于由于基模是高斯形，这不仅可以使抽运光更容易耦合到 PCF 中，而且输出的高斯形光束的应用价值更大。

本文展示了利用光子晶体光纤中高斯型基模来产生四波混频和反斯托克斯现象，文中使用的光子晶体光纤是利用堆积法自行拉制的。目前，由于光子晶体光纤基模的相位匹配条件很难达到，PCF 基模下产生的四波混频和反斯托克斯现象方面的报道几乎没有。

2 理论研究

2.1 四波混频和相位匹配

四波混频是一种非线性过程，即两个抽运光子通过三阶极化率产生斯托克斯波和反斯托克斯波的过程；在量子力学中，一个或几个光波的光子被湮灭，同时产生了几个不同频率的新光子，且在此参变作用过程中，净能量和动量是守恒的，这个过程就被称为四波混频过程。此过程中转换效率与相位匹配条件密切相关，而相位匹配的实现取决于光纤的色散特性。当相位匹配时，FWM 达到最大增益，并且是受激拉曼的两倍；只有当相位失配几乎为零时，才会发生显著的四波混频过程。因此，这就需要频率以及波矢之间的匹配，后者通常被称为相位匹配^[12]。

四波混频就是对应频率 ω_1 、 ω_2 的两个光子的湮灭，同时产生两个频率为 ω_3 和 ω_4 的新光子，即

$$\omega_3 + \omega_4 = \omega_1 + \omega_2 \quad (1)$$

实现这个过程就需要满足相位匹配条件 $\Delta k = 0$ ，即

$$\begin{aligned} \Delta k &= k_3 + k_4 - k_1 - k_2 \\ &= (n_3\omega_3 + n_4\omega_4 - n_1\omega_1 - n_2\omega_2)/c = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

在 $\omega_1 = \omega_2$ 的特定条件下，满足 $\Delta k = 0$ 相对要容易一些，光纤中的 FWM 大多数属于这种部分简并情形。频率为 ω_1 的强抽运波产生两对称的边带，频率分别为 ω_3 和 ω_4 ，其频移为

$$\Omega = \omega_1 - \omega_3 = \omega_4 - \omega_1 \quad (3)$$

对于光纤中的包含反斯托克斯波的受激拉曼散射可以由简并四波混频过程处理，在(3)式中，不

妨假设 $\omega_3 < \omega_4$ 。事实上， ω_3 处的低频边带和 ω_4 处的高频边带分别称为斯托克斯带和反斯托克斯带。在整个过程中通过四波混频把抽运波的能量传输给相对于抽运频率 ω_1 发生上下频移的两个波，其频移量 Ω 由(3)式给出。而在受激拉曼过程中，只要抽运波进入光纤并且满足相位匹配条件，斯托克斯波和反斯托克斯波就能从噪声中形成。

于是对于抽运 ω_p 、斯托克斯 ω_s 和反斯托克斯 ω_a ，它们的频率应该满足如下关系

$$\omega_a + \omega_s = 2\omega_p \quad (4)$$

同时，考虑到输入功率并不强，实际上相位匹配主要由色散引起的，因此相位匹配可以近似的用下面的公式^[7]来描述

$$\delta\beta = 2\beta_p - \beta_s - \beta_a \quad (5)$$

2.2 数值模拟

实验中所用光纤端面结构如图 1 所示，这是课题组采用堆积法拉制的。由端面图可以看出，外层空气孔有一些变形，内 5 层结构完整，孔间距 $\Lambda \approx 1.94 \mu\text{m}$ ，包层空气孔直径 $d_{\text{clad}} \approx 1.36 \mu\text{m}$ ，由于空气填充率较大，由 5 层空气孔就能很好的将光限制在纤芯，外层变形的空气孔对 PCF 特性影响不大。在此只需考虑内四层结构的情况下，PCF 的损耗在 1550 nm 处仅为几 dB/km。因此数值模拟四层 PCF，即可准确表述模式有效折射率和色散的变化情况。

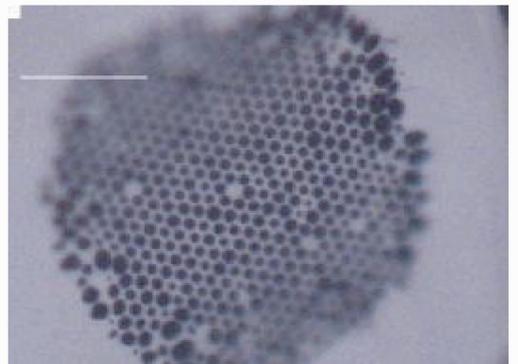


图 1 光子晶体光纤的截面图

Fig. 1 Cross-section of the PCF

数值模拟是采用多极法(MPM)^[13,14]对折射率引导型光子晶体光纤的色散特性进行了数值模拟，模拟结果如图 2。其中，图 2(b)是数值模拟时采用的模拟模型，图 2(c)是模拟得到的近场模场图，图 2(d)是测量得到的近场模场图。从图 2 中的色散曲线可以看出，这根折射率引导型的光子晶体光纤基模的零色散点在 825 nm 处。

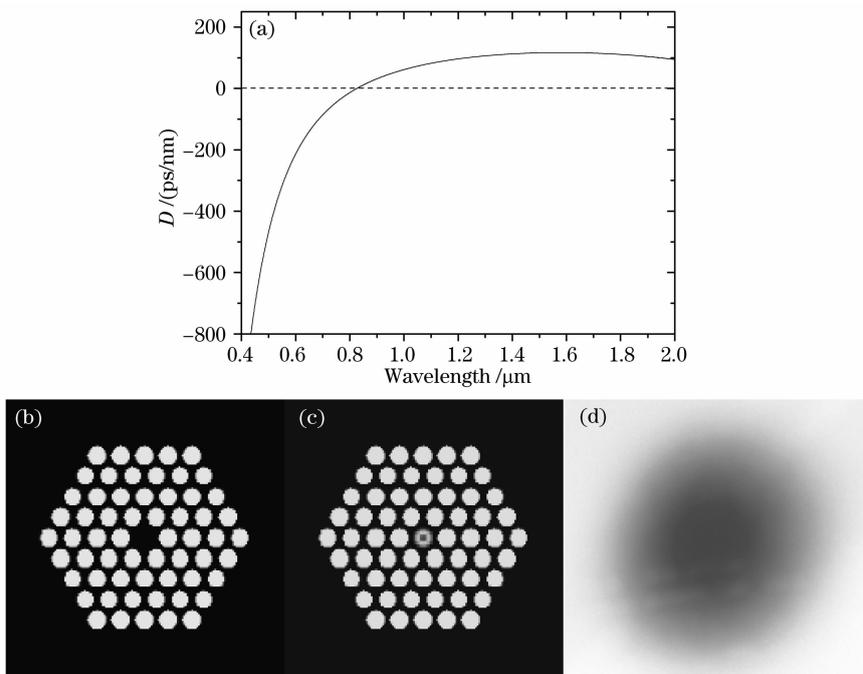


图 2 光子晶体光纤的色散曲线图(a); (b) 模拟模型的截面图; (c) 模拟得到的光子晶体光纤的模场图; (d) 实验得到的模场图

Fig. 2 Dispersion calculated as a function of the wavelength for the fundamental mode of the photonic crystal fiber (a); (b) the cross section of the simulated model; (c) the field profiles for the fundamental mode in stimulation; (d) the field profiles for the fundamental mode in the experiment

随后就是对相位匹配条件的模拟, 使用(5)式, 其中 β_p 、 β_a 、 β_s 分别是抽运, 反斯托克斯和斯托克斯波的传输常数, 模拟结果如图 3 所示。从图 3 中就可看出, 反斯托克斯可能出现在短波段的 610 nm 附近。

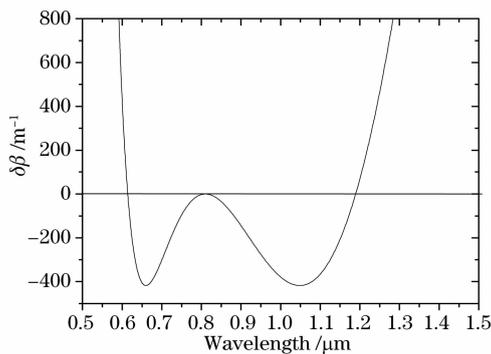


图 3 抽运光为 810nm Ti : Sapphire 激光时的对相位失配 $\Delta\beta = 2\beta_p - \beta_a - \beta_s$

Fig. 3 The mismatch $\Delta\beta = 2\beta_p - \beta_a - \beta_s$ of the propagation with 810 nm Ti : Sapphire laser used as pump

3 实验结果及讨论

实验装置原理图如图 4 所示。在实验当中, 使

用了 Ti:sapphire(Coherent)激光器作为抽运源, 这种激光器的可调谐范围是 700~980 nm, 重复率是 76 MHz, 脉冲宽度为 200 fs。飞秒脉冲从激光器输出后经过几个衰减器来降低光纤的输入功率, 接下来就通过 40 倍的物镜(数值孔径为 0.65)耦合进长度为 70 cm 的 PCF 当中, 光纤输出的光束再经过一个相同的物镜校准, 最后进入光谱分析仪。需要说明的是, 由于没有使用隔离器, 为了不破坏飞秒激光器的锁模, 输入光纤的功率不会很高, 也就是说耦合效率不会很高。

理论上讲, 在输入功率不高, 抽运在反常色散区的时候不会发生自相位调制、交叉相位调制等非线性效应。因此, 在这个时候受激拉曼散射就会起到主要作用。实际上, 如果抽运飞秒激光脉冲的中心波长位于光子晶体光纤的反常色散区, 传输过程中基于非线性效应产生的拉曼孤子成份会相应的在短波波段通过相位匹配效应产生相应的非孤子辐射, 同时, 这个光谱成份的中心波长受到相位匹配条件的控制。

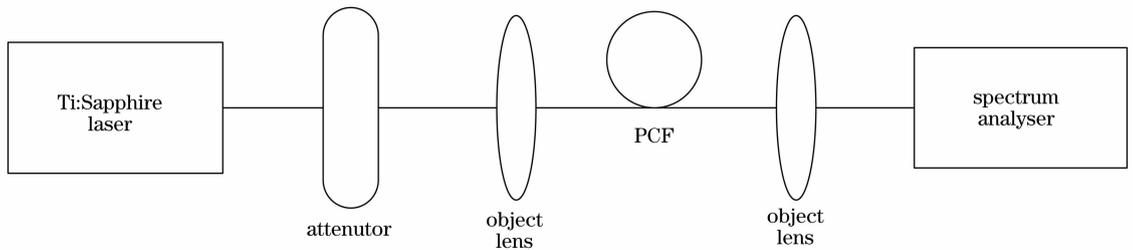


图 4 实验装置图

Fig.4 The figure of experiment setup

在实验中，通过不断调谐抽运的中心波长和输入功率的大小，再经过输出频谱的筛选，就可以得到图 5。从图 5 中，可以看到再短波段出现了一个峰值，这个峰值出现在 610 nm 附近，这就是在 2.2 中数值模拟出来，相位匹配接近的时候出现的反斯托克斯光束，可见，理论模拟和实验结果符合的很好。同时，由图可以看到，超过 50% 的抽运的能量通过四波混频转移到了短波段，反斯托克斯和抽运的频谱成份之比超过了 1.2，因此在抽运光为 810 nm 处的波长转换效率是相当高的。

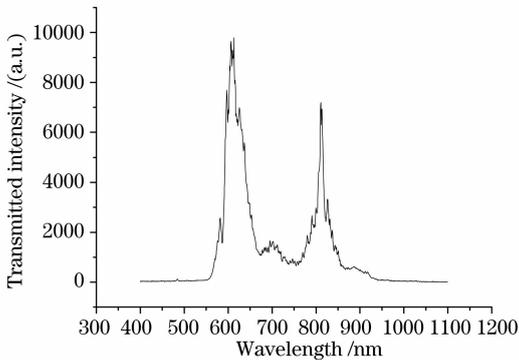


图 5 抽运光为 810 nm 时的输出频谱图

Fig.5 Spectra of output of PCF with 810 nm

Ti : Sapphire laser used as pump

4 结 论

本文利用光子晶体光纤中高斯型基模来产生了四波混频和反斯托克斯现象。为了满足相位匹配条件，根据 PCF 的色散可调性，设计并拉制了基模零色散波长在 800 nm 附近的折射率引导型 PCF。利用中心抽运中心波长为 810 nm 的 200 fs Ti 宝石激光器，可以看到在 PCF 基模下，波长 610 nm 附近出现了反斯托克斯效应。在达到相位匹配之后，输入功率在调节到适当的时候，反斯托克斯波的强度超过了抽运的强度。输出的反斯托克斯光的抽运光的频谱之比超过了 1.2，很好的实现了波长转换。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight T. A. Birks, P. St. J. Russeu *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 K. Saitoh, M. Koshiba. Highly nonlinear dispersion-flattened photonic crystal fibers for supercontinuum generation in a telecommunication window[J]. *Opt. Express.*, 2004, **12**(10): 2027~2032
- 3 A. B. Fedotov, E. E. Serebryannikov, A. A. Ivanov *et al.*. Highly nonlinear photonic-crystal fibers for the spectral transformation of Cr: forsterite laser pulses[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **267**(2): 505~510
- 4 B. Kuhlmeiy, G. Renversez, D. Maystre. Chromatic dispersion and losses of microstructured optical fibers[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(4): 634~639
- 5 F. Poli, A. Cucinotta, S. Selleri *et al.*. Tailoring of flattened dispersion in highly nonlinear photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1065~1067
- 6 N. I. Koroteev, S. A. Magnitskii, A. V. Tarasishin *et al.*. Compression of ultrashort light pulses in photonic crystals; when envelopes cease to be slow[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **159**(1): 191~202
- 7 R. Holzwarth, T. Udem, T. W. Hänsch *et al.*. Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(11): 2264~2267
- 8 D.J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka *et al.*. Carrier envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis[J]. *Science*, 2000, **288**(5466): 635~639
- 9 L. Provino, J. M. Dudley, H. Maillotte *et al.*. Compact broadband continuum source based on microchip laser pumped microstructured fibre[J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(9): 558~560
- 10 J. M. Dudley, L. Provino, N. Grossard *et al.*. Supercontinuum generation in air - silica microstructured fibers with nanosecond and femtosecond pulse pumping[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4): 765~771
- 11 Wang Wei, Gao Fei, Hou Lantian. Anti-Stokes line in an index-guiding photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths[J]. *Chinese Phys. Lett.*, 2008, **25**(6): 2055~2057
- 12 Liu Zhaolun, Li Shuguang, Ni Zhenghua *et al.*. Phase-matching in microstructure fiber [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(1): 68~72
- 刘兆伦, 李曙光, 倪正华 等. 微结构光纤中的相位匹配分析[J]. *半导体光电*, 2006, **27**(1): 68~72
- 13 T. P. White, B. T. Kuhlmeiy, R. C. McPhedran *et al.*. Multipole for microstructured optical fibers I: Formulation [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(10): 2322~2330
- 14 B. T. Kuhlmeiy, T. P. White, G. Renversez, McPhedran, et al. Multipole for microstructured optical fibers II: Implementation and results[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(10): 2331~2340