

文章编号: 0253-2239(2010)s100208

纳秒脉冲在高非线性光子晶体光纤中产生超连续谱的实验研究

王泽锋 侯 静 黄值河 靳爱军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 超连续谱的产生是光子晶体光纤的重要应用之一。将脉宽小于 1 ns、重复频率约为 6.85 kHz、平均输出功率小于 100 mW、中心波长约为 1064.5 nm 的脉冲激光注入一段长度约为 15 m, 结构参数为: 空气孔直径 $d = 2.205 \mu\text{m}$, 孔间距 $\Lambda = 3.359 \mu\text{m}$, 纤芯直径约为 $4.5 \mu\text{m}$, 零色散波长 $\lambda_{\text{ZDW}} = 1016 \text{ nm}$ 的高非线性光子晶体光纤中, 获得了频谱宽度超过 1100 nm 的超连续谱。该超连续谱也为脉冲激光, 其重复频率与抽运脉冲激光相同, 单个脉冲宽度由于色散作用有所展宽。除残余抽运光在 1064.5 nm 处产生一个高峰, 在测量频段 600~1700 nm 内超连续谱的光谱强度非常平坦, 变化在 10 dB 以内, 是一个较好的超连续谱白光光源。

关键词 光子晶体光纤; 纳秒脉冲; 高非线性; 超连续谱

中图分类号 TN25; O43 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100208

Experimental Research of Supercontinuum Generation in Highly Nonlinear Photonic Crystal Fiber with Nanosecond Pulses

Wang Zefeng Hou Jing Huang Zhihe Jin Aijun

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

Abstract Supercontinuum generation is one of the most important applications of photonic crystal fibers. An optical pulsed laser, of pulse width smaller than 1 ns, repetition rate about 6.85 kHz, average output optical power lower than 100 mW, and central wavelength near 1064.5 nm, is used to pump a segment of highly nonlinear photonic crystal fibers with length about 15 m, air hole diameter $2.205 \mu\text{m}$, hole-hole space $3.359 \mu\text{m}$, average core diameter $4.5 \mu\text{m}$, zero dispersion wavelength 1016 nm. Then a flat supercontinuum of spectrum span over 1100 nm is obtained. The supercontinuum is also a series of optical pulses, whose repetition rate is the same as the pumping pulse, and each single pulse is broaden due to the dispersive effect. Except the peak at 1064.5 nm, which is generated by the residual pumping optical power, the power fluctuation is within 10 dB over the whole measuring range of 600~1700 nm. Therefore, an excellent supercontinuum, of low optical power and flat spectrum response, is obtained. It is very useful in various optical measurements, such as ultra-broadband super-width dispersion measurement of fibers.

Key words photonic crystal fibers; nanosecond pulse; high nonlinearity; supercontinuum

OCIS codes 060.4370; 140.3510; 060.5295

1 引 言

超连续谱(SC)一般指强度极大的短脉冲通过

非线性介质材料后, 出射光谱中产生许多新的频率成分, 光谱宽度远远大于入射光脉冲的谱宽^[1]。由

收稿日期: 2010-05-30; **收到修改稿日期**: 2010-07-06

基金项目: 国家 863 计划(2010AAJ111)、国家自然科学基金(11004247)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0142)和国防科学技术大学科研计划项目(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

本文彩色效果详见中国期刊网(<http://optics.journal.net>)相关文章!

于超连续谱在光通信、光学仪器特性分析、光学相干层析、光谱分析、色散测量和光学器件研发等方面具有广泛的应用前景,获得了极大的关注。1970年 Alfano 等^[2]利用倍频锁模铷玻璃皮秒脉冲抽运 BK47 光学玻璃,首次获得 400~700 nm 的超连续谱。1978年 Stolen 等^[3]首次在传统光纤中观察到超连续谱。随着 1996 年了第一根光子晶体光纤(PCF)的诞生^[4],超连续谱的研究进入了一个崭新的阶段。PCF 不仅具有传统光纤的所有优点,结构设计的灵敏性还使它具有许多传统光纤无法比拟的优异特性,其中与超连续谱密切相关的主要有高非线性、可见光波段的反常色散及色散灵活可控、无截止单模和高双折射等特性^[4~8]。这些特性使得 PCF 中极易产生性能良好、光谱很宽的超连续谱,而且可以获得全波段的单模输出。1999年 Ranka 等^[9]将中心波长为 790 nm 的 100 fs 超短脉冲注入到一段 75 cm 长的 PCF 中,首次观察到了 400~1600 nm 的超连续谱,其光谱宽度远远超过了以往所有光纤和其它介质。随着 PCF 技术的飞速发展,由于其色散和高非线性方面的优势,使得利用皮秒、纳秒脉冲甚至连续激光抽运也能获得超连续谱^[10~16]。2003年 Schreiber 等^[10]将掺镱光纤放大器产生的皮秒脉冲注入到 PCF 中,获得了频谱宽度超过 1300 nm 的超连续谱。2008年,英国帝国理工大学的 Femtosecond 光学组^[16]采用掺 Yb 光纤激光器产生 50 W 的连续激光对 PCF 抽运产生了 1060~1670 nm 的超连续谱。近年来,关于 PCF 中超连续谱产生的理论和实验研究报道成指数递增,是国内外研究的热点。

本文使用纳秒脉冲激光器抽运一段长 15 m 的高非线性 PCF,获得了光谱宽度超过 1100 nm 的超连续谱,在频带 600~1700 nm 上除 1064 nm 处由于残余的抽运光出现了一个高峰,光谱强度变化在 10 dB 以内。同时还对比分析了抽运激光和产生的超连续谱的频谱、单脉冲宽度和脉冲重复频率等参数之间的关系。

2 基本原理与实验装置

与飞秒激光脉冲不同,纳秒激光脉冲在 PCF 中产生超连续谱不能简单地归结于自相位调制(SPM)或孤子分裂(SF),其物理机制和光谱演变过程要复杂得多。目前普遍认为,纳秒脉冲在 PCF 中产生超连续谱的初始阶段,频谱展宽主要来源于相位匹配条件下的四波混频(FWM)与调制不稳定

(MI);后期过程则相对复杂得多,涉及许多与调制不稳定引起脉冲分裂形成的光孤子相关的非线性效应,主要包括色散波的产生、孤子扰动、色散波与孤子之间的 FWM 等。

由非线性光纤光学原理可知,FWM/MI 的相位失配 κ 可以写成

$$\kappa = \Delta\beta + \Delta k_{\text{NL}},$$

式中 $\Delta\beta \approx \beta_2 \Omega^2$ 为色散引起的相位失配, β_2 为光纤的群速度(GVD)色散参量, $\Omega = \omega_1 - \omega_3 = \omega_4 - \omega_1$ 为频率为 ω_1 的强抽运光产生的频移, ω_3 和 ω_4 分别为两对称边带的频率,这里假设 $\omega_3 < \omega_4$; $\Delta k_{\text{NL}} = 2\gamma P_0$ 为非线性效应引起的相位失配, γ 为光子晶体光纤的非线性系数, P_0 为光脉冲的功率。

只有当相位失配几乎为零,即 $\kappa \approx 0$ 时才会发生显著的四波混频过程。由于 $\Delta k_{\text{NL}} > 0$,因此要求 $\Delta\beta < 0$,即 $\beta_2 < 0$,也就是说当抽运光波长位于 PCF 的反常色散区时,只要抽运光功率足够高即可实现相位匹配,从而发生有效的 FWM/MI,使得抽运光频谱展宽。

纳秒脉冲激光在高非线性 PCF 中产生超连续谱的实验装置如图 1 所示,脉冲光先后经过光隔离器、两个 1064 nm 高反射镜、显微物镜,耦合进高非线性 PCF 中,最后输入到光谱分析仪中检测。便于光路调节,实验中将激光器、光隔离器、反射镜和显微物镜光轴中心置于同一高度。实验所用的激光器是法国 Teem Photonics 公司的 1064 nm 微芯纳秒脉冲激光器,输出脉冲为高斯型,脉冲宽度约为 950 ps,半功率光谱带宽小于 0.5 nm,最大输出功率小于 100 mW,脉冲的重复频率约为 6.85 kHz。光隔离器用于阻止光路反射回来的激光进入激光器,起到保护作用。两个反射镜和安装在高精度三维调节架上的显微物镜所构成的耦合系统,能够将

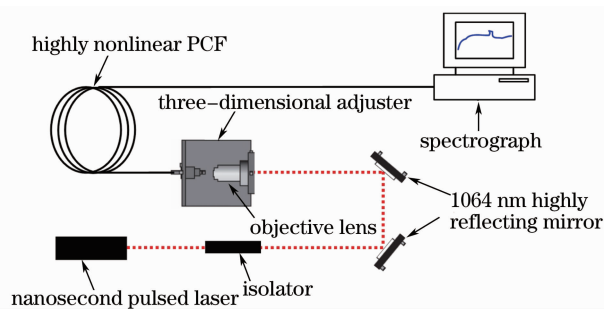
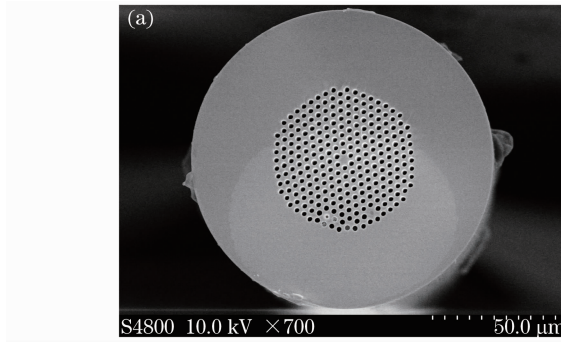


图 1 用高非线性光子晶体光纤产生超连续谱的实验原理图

Fig. 1 Experimental setup for supercontinuum generation using highly nonlinear photonic crystal fibers

激光有效地耦合进 PCF。为了达到最好的耦合效果,显微物镜放大倍数和数值孔径必须与后端的 PCF 匹配。实验中用于产生超连续谱的高非线性 PCF 由武汉烽火通信科技公司拉制,长度约为 15 m,其结构参数为:空气孔直径 $d=2.205 \mu\text{m}$,孔间距 $\Lambda=3.359 \mu\text{m}$,纤芯直径约为 $4.5 \mu\text{m}$,如图 2(a)所示。图 2(b)为数值计算得到的色散曲线,



零色散波长(ZDW)约为 1016 nm。可见,实验所用的纳秒脉冲激光中心波长位于此高非线性 PCF 的反常色散区的零色散波长附近,容易满足相位匹配条件,非常有利于超连续谱的产生。实验中使用的光谱分析仪是 Agilent 86142B,测量范围为 600~1700 nm,测量精度最高可达 0.06 nm。

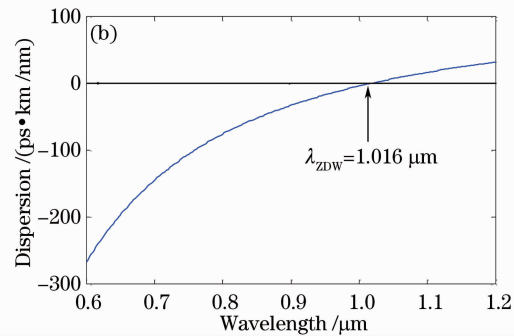


图 2 用于产生超连续谱光源的 PCF。(a)横截面 SEM 图,(b)色散曲线

Fig. 2 PCF for generation of supercontinuum. (a) SEM image of cross section, (b) dispersion curve

3 实验结果与分析

实验中,测得激光源平均功率约为 70 mW,15 m光子晶体光纤输出平均功率约为 12.8 mW,整体转换效率约为 18.3%。图 3 为超连续谱的实物照片,由于高阶模从光纤包层泄漏出来,因此在暗环境下可以清楚地看到缠绕在光纤盘上的光子晶体光纤。图 3 中五边形光斑为超连续谱的出射光斑,光斑中心较白,边缘呈橙色,其四周有规则排布的六个黄绿色小光斑,与数值仿真的结果一致。

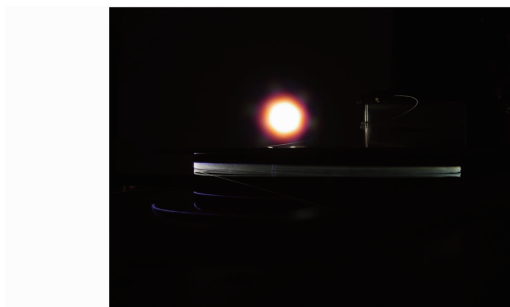


图 3 实验中产生的超连续谱实物图

Fig. 3 Photo of supercontinuum generated in experiments

图 4 为纳秒脉冲激光和产生的超连续谱的光谱对比。从图 4(a)可见,纳秒脉冲激光有两个波峰,其中心波长分别为 1064.5 nm 和 1064.6 nm,半功率脉冲谱宽约为 0.4 nm。受光谱仪测量范围的限制,实验中只测量了 600~1700 nm 的超连续谱,如图 4(b)所示。从图中可见,除 1064.5 nm 附近有一

较高波峰,这由残余抽运光引起,在整个测量光谱范围内,光谱强度变化小于 10 dB,600~1050 nm 和 1150~1700 nm 两个分段区域则更为平坦,光强变化小于 5 dB。在 1380 nm 附近出现一个明显的波谷,这与传统光纤一致,是由 OH^- 根的吸收损耗造成的。

图 5,6 分别为抽运纳秒脉冲激光与它在 PCF 中产生的超连续谱时域波形比较。图 5(a)为抽运光脉冲,重复频率为 6.845 kHz,图 5(b)为超连续谱脉冲,重复频率为 6.861 kHz,可见脉冲激光在 PCF 中产生的超连续谱也是脉冲光,而且去除测量误差后重复频率也相同。图 6 为抽运光和超连续谱单个脉冲的比较。从图中可见,抽运激光的脉冲宽度为 958.5 ps,产生的超连续谱脉冲宽度为 1238 ps,光脉冲经过这段 15 m 长的高非线性 PCF 后被展宽了 279.5 ps。

4 结 论

本文使用中心波长为 1064 nm 的纳秒脉冲激光器抽运一段长 15 m、零色散波长为 1016 nm 的高非线性光子晶体光纤,获得了频谱宽度大于 1100 nm 的超连续谱。产生的超连续谱也为纳秒脉冲,其重复频率与抽运光脉冲相同。除抽运光 1064 nm 处有一个高峰,在频带 600~1700 nm 范围

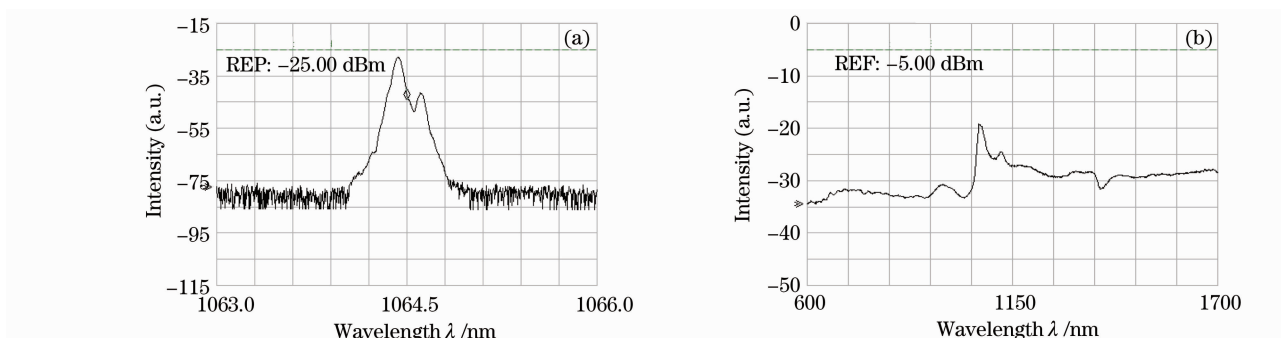


图 4 纳秒光脉冲与超连续谱的光谱对比。(a)纳秒脉冲的光谱,(b)超连续谱的光谱

Fig. 4 Spectrum comparison of nanosecond optical pulse and supercontinuum. (a) spectrum of nanosecond optical pulse, (b) spectrum of Supercontinuum

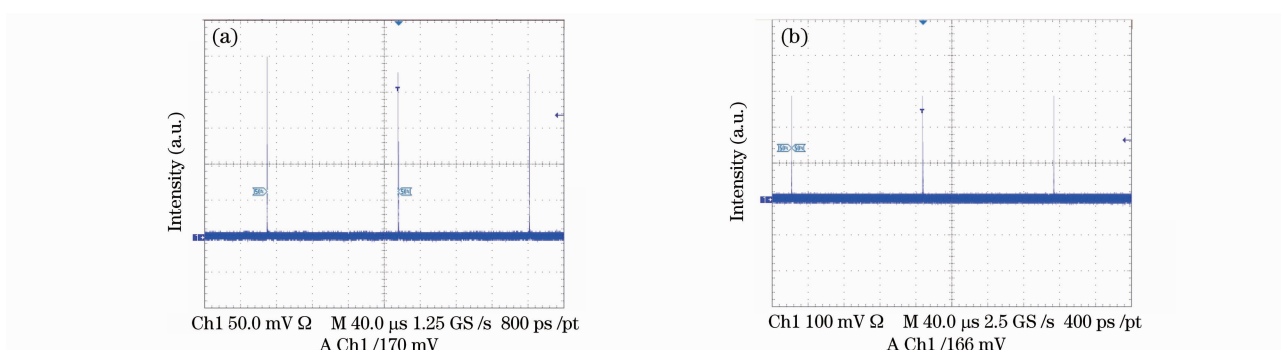


图 5 抽运光和超连续谱的脉冲重复频率比较。(a)抽运光脉冲,(b)超连续谱脉冲

Fig. 5 Pulse repetition rate comparison of pumping laser and supercontinuum. (a) pumping laser pulse, (b) supercontinuum pulse

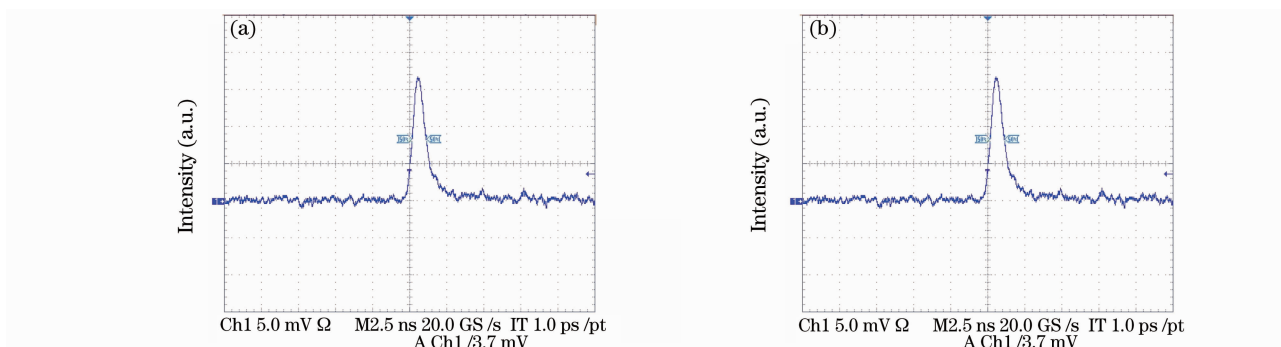


图 6 抽运光和超连续谱的脉冲宽度比较。(a)抽运光脉冲,(b)超连续谱脉冲

Fig. 6 Pulse width comparison of pumping laser and supercontinuum. (a) pumping laser pulse, (b) supercontinuum pulse

内超连续谱的光谱强度非常平坦,变化小于 10 dB。本文获得了一个较好的超连续谱白光光源,在光学测量,如光纤的超宽光谱色散测量中具有广泛的应用价值。

参 考 文 献

- 1 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. Boston: Academic Press, 2007. 15~25
- 2 R. R. Alfano, S. L. Shapiro. Observation of self-phase modulation and small-scale filaments in crystals and glasses [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, **24**(11): 592~596
- 3 R. H. Stolen, C. Lin. Self-phase-modulation in silica optical fibers [J]. *Phy. Rev. A*, 1978, **17**(4): 1448~1450
- 4 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
- 5 J. C. Knight. Photonic crystal fibers [J]. *Nature*, 2003, **424**(4): 847~851
- 6 P. J. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 7 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
- 8 P. St. J. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *J. Lightwave*

- Technol., 2006, **24**(12): 4729~4749
- 9 G. A. Nowak, K. Jaeyoun, N. L. Mohammed. Stable supercontinuum generation in short lengths of conventional dispersion-shifted fiber [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(36): 7364~7369
- 10 T. Schreiber, J. Lipert, H. Zeller *et al.*. High average power supercontinuum generation in photonic crystal fibers [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **228**(1-3): 71~78
- 11 T. Hori, N. Nishizawa, T. Goto. Experimental and numerical analysis of widely broadened supercontinuum generation in highly nonlinear dispersion-shifted fiber with a femtosecond pulse [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(11): 1969~1980
- 12 J. M. Dudley, G. Genty, S. Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, **78**(4): 1136~1185
- 13 Li Xiaoqing, Zhang Shumin, Li Dan *et al.*. Experimental and numerical study of supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1805~1810
李晓青, 张书敏, 李丹等. 光子晶体光纤中超连续谱产生的理论与实验研究 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(9): 1805~1810
- 14 A. V. Avdokhin, S. V. Popov, J. R. Taylor. Continuous-wave, high-power, Raman continuum generation in holey fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**: 1353~1355
- 15 B. A. Cumberland, J. C. Travers, S. V. Popov *et al.*. 29 W High power CW supercontinuum source [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(8): 5954~5962
- 16 J. C. Travers, A. B. Rulkov, B. A. Cumberland *et al.*. Visible supercontinuum generation in photonic crystal fibers with a 400 W continuous wave fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(19): 14435~14447