

双包层七芯光子晶体光纤超连续谱的产生及模式分析

黄诗盛¹ 张格霖¹ 韦会峰² 李会权¹ 林荣勇¹ 罗杰² 陈抗抗³ 闫培光¹

¹ 深圳大学电子科学与技术学院, 深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060
² 长飞光纤光缆有限公司研发中心, 湖北 武汉 430073
³ 武汉安扬激光技术有限责任公司, 湖北 武汉 430073

摘要 报道了一种双包层七芯光子晶体光纤, 其零色散点在 1036 nm, 在波长 1060 nm 处非线性系数为 $2.43 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。采用中心波长为 1060 nm、脉冲宽度为 160 ps、重复频率为 1 MHz、光束质量 $M^2 < 1.3$ 、最大输出功率为 4.5 W 的增益开关皮秒脉冲全保偏光纤激光器抽运 35 m 的七芯光子晶体光纤, 得到最大输出功率为 2.443 W、谱宽范围 500~1700 nm 的全光纤化超连续谱输出。实验所测的超连续谱输出远场与模拟的同相位超模远场分布非常吻合, 故对高功率超连续谱产生具有参考价值。

关键词 光纤光学; 七芯; 光子晶体光纤; 全光纤化; 超连续谱; 模式

中图分类号 TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1105002

Supercontinuum Generation and Mode Analysis for Double Cladding Seven-Core Photonic Crystal Fiber

Huang Shisheng¹ Zhang Gelin¹ Wei Huifeng² Li Huiquan¹ Lin Rongyong¹
Luo Jie² Chen Kangkang³ Yan Peiguang¹

¹ College of Electronic Science and Technology, Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China
² Yangtze Optical Fiber and Cable-Company, Wuhan, Hubei 430073, China
³ Wuhan YSL Photonics Co, Wuhan, Hubei 430073, China

Abstract A double cladding seven-core photonic crystal fiber (PCF) is reported with zero dispersion wavelength (ZDW) at 1036 nm and the nonlinear coefficient of $2.43 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ at 1060 nm. A gain-switched all polarization-maintaining fiber laser system with central wavelength of 1060 nm, pulse width of 160 ps, repetition rate of 1 MHz, beam quality $M^2 < 1.3$ and average power of 4.5 W is utilized to pump a 35 m-long seven-core PCF, allowing the supercontinuum generation (SCG) with output power of 2.443 W covering wavelength from 500 nm to 1700 nm. The far field of seven-core PCF is measured, the pattern of which is in agreement with the calculated far field of in-phase supermode. The experiment can be a useful reference for the high power supercontinuum source.

Key words fiber optics; seven-core; photonic crystal fiber; all fiber; supercontinuum; mode

OCIS codes 060.5295; 060.2280; 320.6629

收稿日期: 2013-05-24; 收到修改稿日期: 2013-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(61007054, 61275144)、深圳市重点实验室提升与发展项目(CXB201005240014A, ZDSY20120612094924467)、高校博士点专项科研基金(20104408110002)、高性能复杂制造国家重点实验室开放课题基金项目(HPCM-2013-10)

作者简介: 黄诗盛(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤非线性效应、光纤激光器等方面的研究。

E-mail: HSSSZU@163.com

导师简介: 闫培光(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事特种光纤特性、光纤激光器和光纤传感等方面的研究。

E-mail: yanpg@szu.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

超连续谱(SC)在众多领域有着广泛而重要的应用^[1-2],如何获得高平均输出功率和高光谱密度的SC仍是目前的研究方向之一^[3-7],传统的方法主要是运用1 μm 波段高功率掺镱光纤激光器抽运单芯高非线性光子晶体光纤(HNPCF)来获取^[8]。为了满足高功率掺镱光纤激光器的脉冲输出,其尾纤直径一般大于10 μm ,有的甚至达到30 μm ,与模场直径仅为5 μm 左右的单芯HNPCF熔接时存在非常大的模场不匹配,导致熔接效率不高、熔接点易烧断,这使得抽运光耦合进入单芯HNPCF变得十分困难。即便使用光纤后处理技术^[9]可以在一定程度上增加单芯HNPCF的纤芯直径,使得熔接问题得到改善,但其热效应和激光损伤的问题仍然存在,再加上单纯的增加纤芯大小会导致非线性系数减弱和零色散点波长(ZDW)红移,不利于利用孤子机制产生SC。这些因素都从根本上限制了单芯HNPCF输出高功率的SC。多芯光子晶体光纤(MCPCF)具有大的有效模场面积,而且各纤芯之间离散分布,热应力^[10]等问题可以得到有效缓解。MCPCF输出的模式为各芯之间相互耦合形成的超模,当输出的模式为同相位超模时,SC可以形成高质量的光斑,远场则具有准高斯分布。除此之外,MCPCF同相位超模的色散特性与具有同样占空比的单芯HNPCF的色散特性差别较小。所以,MCPCF在实现高功率的SC输出方面具有巨大的潜力。2011年,Modotto等^[11]报道了利用中心波长为1064 nm的亚纳秒量级Nd:YAG调Q微芯片激光器抽运掺Ge的双折射MCPCF的SC输出实验,各纤芯之间没有耦合作用。2012年,Fang等^[12]利用飞秒光纤激光器抽运七芯PCF,实现了5.4 W的

高功率SC输出。文献[6-7]中抽运光采用的是空间耦合方式,其方法复杂又不稳定,且光纤的耦合输入端面极容易被聚焦后的高能量激光损坏,因此空间耦合的方式在一定程度上限制了SC输出功率的上升空间。2012年,Wei等^[13]利用中心波长为1064 nm的半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模掺镱光纤激光器抽运七芯PCF,实现了谱宽超过1000 nm、功率为42.3 W的全光纤化SC输出。但此七芯PCF存在ZDW(1115 nm)与抽运光源不合适、非线性系数小、气孔层数少的问题,且抽运光源本身具有不稳定性,这些都限制了SC的展宽和输出功率的进一步提高。

本文报道了一种双包层七芯PCF,ZDW位于1036 nm处,利用中心波长为1060 nm的极其稳定的增益开关皮秒脉冲光纤激光器抽运35 m长的此PCF,得到谱宽为500~1700 nm、功率为2.443 W的全光纤化SC输出,模拟的同相位超模远场与实验中记录的远场分布相吻合,最后对输出的远场光斑做了分析。

2 实验装置

产生SC的实验装置如图1所示,抽运源采用的是中心波长为1060 nm的增益开关皮秒脉冲光纤激光器(武汉安扬激光技术有限公司研发),脉冲宽度为160 ps,重复频率为1 MHz,最大输出功率为4.5 W,系统采用全保偏(PM)光纤以提高激光器稳定性,其输出尾纤是芯径为20 μm 的20/125熊猫型保偏光纤。将此尾纤与35 m长的双包层七芯PCF熔接,再由普通单模光纤(SMF)隔空对准双包层七芯PCF的SC输出端接入光谱分析仪(YOKOGAWA,OSA)记录。

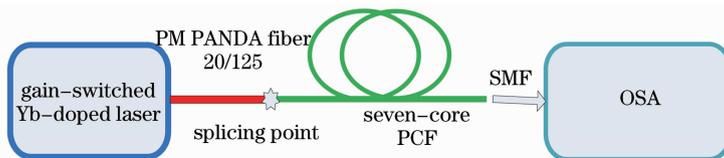


图1 实验装置图

Fig.1 Experimental setup

实验所用七芯PCF由武汉长飞光纤光缆有限公司研制,端面扫描电镜图(SEM)如图2所示,对比文献[8]中所用的七芯PCF,此光纤为双包层七芯PCF,其内包层含有四层空气孔,外部为更高空气占空比的外包层,虽然在成纤后外包层有些变形,但仍紧密排列,而内包层内靠近纤芯的3层气孔仍非常规则,故

模场和色散特性仍可准确计算。此双包层七芯PCF具有下列优点:1)内包层具有四层空气孔,较多层数的空气孔更利于在光纤后处理技术中采用空气孔塌缩方法增大纤芯直径,从而减小与20/125熊猫型保偏光纤的熔接损耗外,还可有效提高光纤的弯曲特性;2)此光纤的外包层在拉制时虽有变形,但外包层

仍然能防止熔接耦合效率不高所导致的抽运光外漏,对熔接点具有保护作用,同时也可以减少限制损耗。双包层七芯 PCF 具体结构参数如下:内包层空气孔直径 $d_1=1.60 \mu\text{m}$,空气孔间距 $\Lambda=3.02 \mu\text{m}$,纤芯直径 $D=13.5 \mu\text{m}$,外径为 $160 \mu\text{m}$ 。空气占空比 $d_1/\Lambda=0.53$ 。图 3 为双包层七芯 PCF 的色散系数 D 与非线性系数 γ 随波长变化的关系曲线(由 COMSOL Multiphysics 软件计算所得),不同波长的色散值由色散分析系统(CD400)所测,这些测量值(红色点)与理论计算的色散曲线吻合得很好,其 ZDW 位于 1036 nm 处,在抽运源中心波长 1060 nm 处的非线性系数 $\gamma=2.43 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。测得双包层七芯 PCF $500\sim 1700 \text{ nm}$ 的损耗谱如图 4 所示,在 1630 nm 处具有最低的损耗,为 4.8 dB/km 。在 1380 nm 处对应的是 OH^{-1} 吸收峰,其损耗为 104 dB/km 。抽运源中心波长 1060 nm 对应的损耗是 8.3 dB/km 。

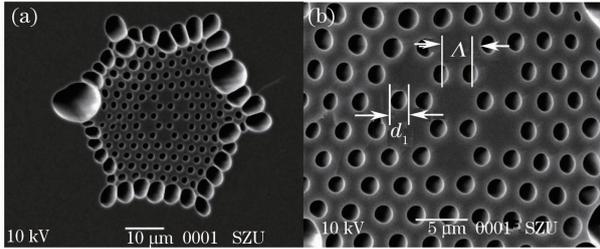


图 2 七芯光子晶体光纤扫描电镜图。

(a) 端面图; (b) 纤芯图

Fig. 2 SEM of seven-core PCF. (a) End cross section; (b) core region

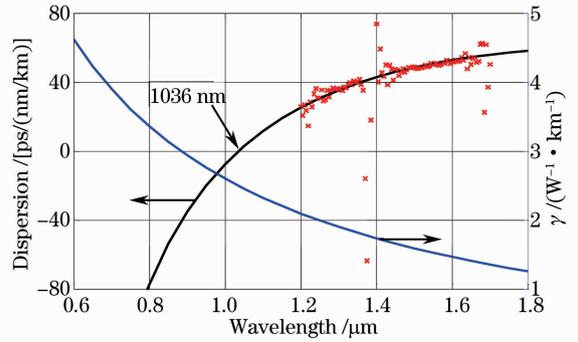


图 3 七芯光子晶体光纤的色散和非线性曲线

Fig. 3 Dispersion and nonlinear curves of seven-core PCF

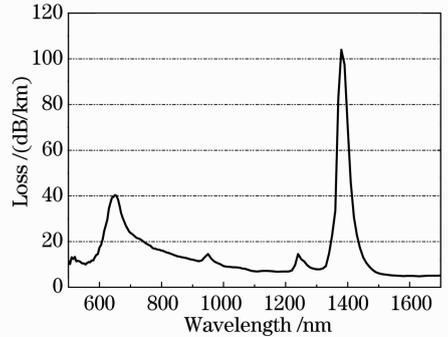


图 4 双包层七芯 PCF 的损耗谱线

Fig. 4 Attenuation spectrum of seven-core PCF

对于多芯 PCF,每个纤芯之间的模式耦合将产生超模^[14],而每颗芯的传输模之间的相位差为零时则会产生具有准高斯分布的同相位超模远场^[15],模拟的双包层七芯 PCF 的 7 个本征超模近场分布如图 5 所示,其中图 5(g)为具有最大传播常数的同相位超模。

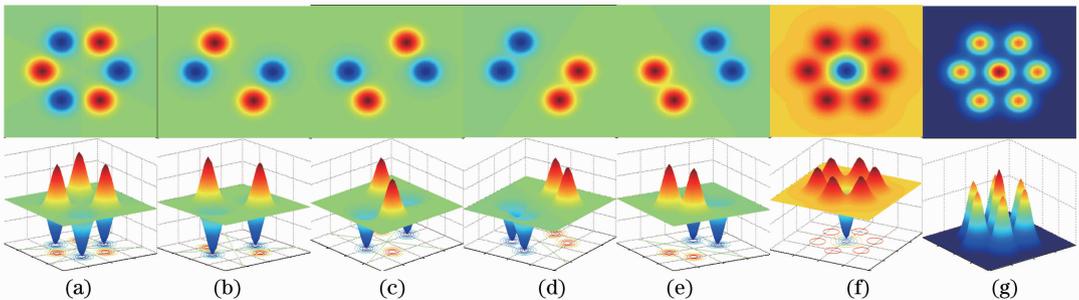


图 5 七芯光子晶体光纤 7 个超模模拟图

Fig. 5 Calculated mode profiles of seven supermodes in seven-core PCF

3 实验结果及分析

在对 20/125 熊猫型保偏光纤与双包层七芯 PCF 进行熔接时,使用光纤后处理技术对双包层七芯 PCF 的气孔进行塌缩,增加其纤芯直径,从而减少熔接时由于模场失配带来的损耗。SC 的输出功率随抽运功率增加的变化曲线如图 6 所示,当输入

的功率为最大的 4.5 W 时,输出的功率达到 2.443 W ,光-光转换效率为 54.3% ,功率曲线仍具有良好的线性增长趋势,没有出现饱和迹象,可见只要增大抽运源功率,SC 的输出功率将会继续增加。利用夫琅禾费衍射公式,可由七芯 PCF 的近场分布求得光束的远场特性,从而分析 SC 输出的光束质

量。图 7(a)为图 5(g)所对应的同相位超模模拟的远场分布图,具有很好的高斯型。实验中记录的远场三维图和高功率下的远场光斑如图 7(b)、(c)所示,远场三维图具有较好的高斯分布,与模拟的同相位超模远场三维图十分吻合;而光斑则与模拟的同相位超模远场平面图吻合得非常好,说明七芯 PCF 中传输的是以同相位超模为主,异相位超模得到了有效截止。这可以解释为:多芯 PCF 模式的激发由信号光光斑的大小与多芯 PCF 本征超模的匹配情况决定,由于抽运源的高斯信号光光斑较大,绝大部分能量将耦合到同相位超模中,只有极少部分能量与异相位超模发生耦合,故同相位超模占据主导地位。从高功率下远场光斑可以看出,除了集中了绝大部分能量的中心光斑外,旁边还有小部分的低能量的杂散次级光斑,这是因为能量的分布与多芯 PCF 的纤芯数目有关,随着纤芯数目的增加,能量会逐渐聚集到中心光斑^[16],本实验中所用的七芯 PCF,其输出光斑除了中心光斑外还有些许杂散次级光斑的存在,次级光斑的分布符合各纤芯排布为

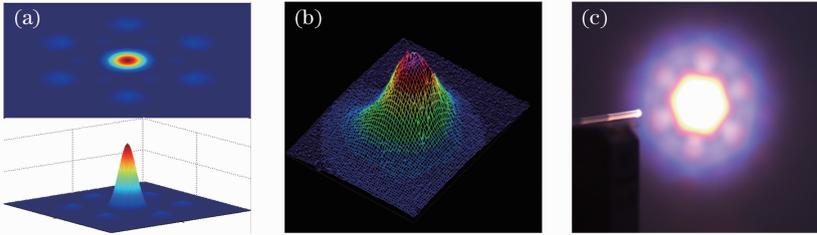


图 7 (a) 七芯光子晶体光纤同相位超模远场模拟图; (b) SC 输出的远场三维图; (c) 高功率下输出的远场光斑
Fig. 7 (a) Calculated far-field mode profile of in-phase supermode in seven-core PCF; (b) far field 3D profile of the generated supercontinuum; (c) far field profile of output beam at high power

SC 的展宽随输出功率的变化如图 8 所示。随着 SC 输出功率的增大,光谱逐渐展宽,最终得到最大功率为 2.443 W、谱宽范围为 500~1700 nm 的全光纤化 SC 输出,由于受光谱仪测量范围的限制,未

六边形阵列时的理论^[17];此外,光斑的能量分布还受多芯 PCF 每颗纤芯的芯径大小、纤芯间距、入射波长的影响^[18]。由于有微量的抽运光打在靠近纤芯的石英节点上,导致光斑的外围有一圈正六边形的紫色光环,所以在用光谱分析仪记录 SC 的展宽特性时,用一根 SMF 隔空对准双包层七芯 PCF 中心的大亮斑再接入光谱分析仪,从而避免由节点产生的紫光被光谱分析仪记录,确保测量的是纤芯模式的传输特性。

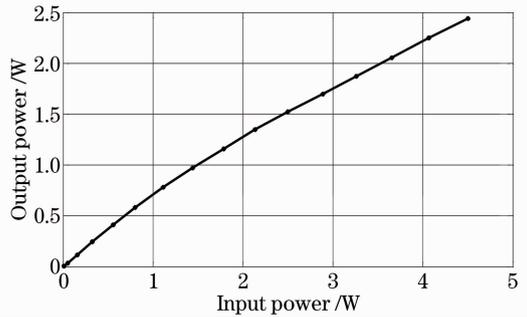


图 6 SC 输出功率特性

Fig. 6 Output power of the generated supercontinuum

能观察到 1700 nm 以后的光谱。抽运源左侧的短波方向光谱的平坦度优于 8 dB;抽运源右侧长波方向光谱的平坦度也优于 8 dB,而短波与长波之间则存在 10 dB 左右的强度差。由于抽运光源脉冲宽度为 160 ps,产生 SC 时调制不稳定性将会放大抽运脉冲自身所携带的随机噪声,进而引起 SC 相干性的下降^[1,19],所以本实验所获得的 SC 的相干性并不是非常好。由于水吸收峰的作用,光谱在 1380 nm 处出现了一个较大的凹陷。

4 结 论

报道了一种双包层七芯 PCF,并利用中心波长为 1060 nm、脉冲宽度为 160 ps、重复频率为 1 MHz、最大输出功率为 4.5 W 的增益开关皮秒脉冲光纤激光器抽运此 PCF,其 ZDW 位于 1036 nm,

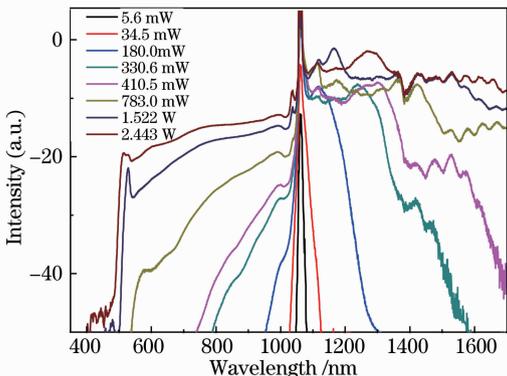


图 8 SC 在不同输出功率下的输出光谱

Fig. 8 Output spectra of the SC at different output powers

长度为 35 m, 得到最大输出功率为 2.443 W、谱宽超过 1200 nm 的全光纤化 SC 输出。实验所测的 SC 输出远场与同相位超模模拟的远场分布相吻合, 并分析了影响输出光斑的因素。本实验研究对高功率 SC 源的产生具有参考价值。

参 考 文 献

- 1 J M Dudley, G Genty, S Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Rev Mod Phys*, 2006, 78 (4): 1135-1184.
- 2 H Li, X Sang, J Yuan, *et al.*. Simulation investigation on supercontinuum generation and noise characteristics in the normal dispersion photonic crystal fiber with a flattened dispersion profile [J]. *Optoelectronics Letters*, 2010, 6(3): 172-175.
- 3 Chen Shengping, Chen Hongwei, Hou Jing, *et al.*. 30 W picosecond pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(8): 1943-1949.
陈胜平, 谌鸿伟, 侯 静, 等. 30 W 皮秒脉冲光纤激光器及高功率超连续谱的产生[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 1943-1949.
- 4 Fang Xiaohui, Wang Qingyue, Liu Junjie, *et al.*. Experimental research on the 3.95 W high power supercontinuum generation [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(6): 1585-1588.
方晓惠, 王清月, 刘俊杰, 等. 3.95 W 高功率超连续光谱产生的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1585-1588.
- 5 Chen Hongwei, Chen Shengping, Hou Jing. 4.6 W all-fiber supercontinuum generation using homemade photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2541-2543.
谌鸿伟, 陈胜平, 侯 静. 国产光子晶体光纤实现 4.6 W 全光纤超连续谱输出[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2541-2543.
- 6 葛廷武, 于 峰, 张文启, 等. 国产全光纤结构超连续谱激光输出突破 8 W[J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 0202003-6.
- 7 Song Rui, Hou Jing, Chen Shengping, *et al.*. All-fiber 177.6 W supercontinuum source[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(5): 054217.
宋 瑞, 侯 静, 陈胜平, 等. 177.6 W 全光纤超连续谱光源[J]. *物理学报*, 2012, 61(5): 054217.
- 8 K K Chen, S Alam, J H Price, *et al.*. Picosecond fiber MOPA pumped supercontinuum source with 39 W output power[J]. *Opt Express*, 2010, 18(6): 5426-5432.
- 9 Chen Zilun, Hou Jing, Jiang Zongfu. Rost-processing techniques of photonics crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(2): 020602.
- 10 陈子伦, 侯 静, 姜宗福. 光子晶体光纤的后处理技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(2): 020602.
- 10 Y Huo, P K Cheo. Analysis of transverse mode competition and selection in multicore fiber lasers[J]. *J Opt Soc Am B*, 2005, 22 (11): 2345-2349.
- 11 D Modotto, G Manili, U Minoni, *et al.*. Ge-doped microstructured multicore fiber for customizable supercontinuum generation[J]. *Photonics Journal*, 2011, 3(6): 1149-1156.
- 12 X Fang, M Hu, L Huang, *et al.*. Multiwatt octave-spanning supercontinuum generation in multicore photonic-crystal fiber[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(12): 2292-2294.
- 13 H F Wei, H W Chen, S P Chen, *et al.*. A compact seven-core photonic crystal fiber supercontinuum source with 42.3 W output power[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 10(4): 045101.
- 14 J A Besley, J D Love. Supermode analysis of fibre transmission [C]. *IEE Proceedings Optoelectronics*, 1997, 144 (6): 411-419.
- 15 L Michaille, C R Bennett, D M Taylor, *et al.*. Phase locking and supermode selection in multicore photonic crystal fiber lasers with a large doped area[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(13): 1668-1670.
- 16 Zhang Xiaolu, Lou Shuqin, Liu Yongwei. Coherent laser beam combination by use of dual-cladding multi-core optical fiber ring array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39 (2): 266-269.
张晓路, 娄淑琴, 刘永伟. 圆环阵列多芯双包层激光相干合束的研究[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(2): 266-269.
- 17 Zhang Xixia, Wang Huisheng, Zhu Mengzhen, *et al.*. Multiple beam laser far-field interference experiment research [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2011, 9(1): 5-8.
张曦霞, 王会升, 朱孟真, 等. 多光束激光远场干涉实验研究 [J]. *光学与光电技术*, 2011, 9(1): 5-8.
- 18 Wang Qinghua. The Research of a New Structure of Multicore Fiber Laser[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
王清华. 一种新型结构的多芯光纤激光器的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- 19 Jin Aijun, Wang Zefeng, Hou Jing, *et al.*. Coherence properties of the supercontinuum generated in anomalous dispersion region of photonic crystal fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(12): 124211.
靳爱军, 王泽锋, 侯 静, 等. 光子晶体光纤反常色散区抽运产生超连续谱的相干特性分析[J]. *物理学报*, 2012, 61(12): 124211.

栏目编辑: 王晓琰