

# 使用超连续谱 $M^2$ 因子评价超连续谱光源光束质量

靳爱军 侯静\* 姜宗福

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要** 由于超连续谱(SC)光源具有宽谱特性,针对传统方法无法对其光束质量进行全局评价的缺陷,提出  $SC-M^2$  因子这一参数。使用分步傅里叶法求解广义非线性薛定谔方程,获得超连续谱光源的光谱分布,根据光谱二阶矩方法可得到光谱重心。应用有限元方法获得超连续谱光源的近场空间分布,经自由空间传输之后获得其远场分布。由超连续谱光源的近场、远场分布以及光谱重心,定义  $SC-M^2$  因子对其光束质量进行全局评价。使用这一方法可对超连续谱光源的光束质量进行全面分析,并且适用于不同超连续谱光源之间的比较。

**关键词** 光谱学;光束质量;超连续谱光源;光谱重心;光场分布

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0502006

## Evaluation of the Beam Quality of Supercontinuum Source Using Supercontinuum $M^2$ Factor

Jin Aijun Hou Jing Jiang Zongfu

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

**Abstract** Due to the wide spectra, the conventional methods can not evaluate the beam quality of the whole supercontinuum (SC). A new factor  $SC-M^2$  is introduced. The spectra of supercontinuum is obtained by solving the generalized nonlinear Schrödinger equation by the using of split-step Fourier method. The spectral centroid is calculated based on second-moment method. The near field optical power distribution of the supercontinuum source is obtained by the using of finite element method. After free space propagation, the far field distribution is obtained. Founded on the near field, far field and spectral centroid, the  $SC-M^2$  factor is defined to evaluate the beam quality of supercontinuum source as a whole. With this factor, the beam quality of supercontinuum source can be evaluated comprehensively and comparison among different supercontinuum sources can be made.

**Key words** spectroscopy; beam quality; supercontinuum source; spectral centroid; optical field distribution

**OCIS codes** 060.5295; 140.3295; 320.6629;

## 1 引言

超连续谱(SC)光源在医学、频谱学、光通信和国防等领域拥有广泛的应用前景,因此在最近十年得到了广泛的研究,并取得了显著的进展<sup>[1~3]</sup>。近年来随着激光技术的发展和实际应用需求的变化,近红外以及中红外波段的高功率超连续谱光源都已

经有了许多相关报道<sup>[4~11]</sup>。2009年密歇根大学的研究小组使用氟化物 ZBLAN 光纤,获得了平均功率 10.5 W、光谱宽度 0.8~4.0  $\mu\text{m}$  的超连续谱光源<sup>[4]</sup>。2011年国防科技大学的研究小组实现了 70 W 的全光纤近红外超连续谱光源<sup>[5]</sup>,2012年该小组又报道了 177.6 W 的全光纤近红外超连续谱光

收稿日期: 2012-11-15; 收到修改稿日期: 2013-01-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61235008),国家自然科学基金面上项目(61077076),科技部国际科技合作专项项目(2012DFG11470)和湖南省杰出青年基金项目(12JJ1010)资助课题。

作者简介: 靳爱军(1987—),男,博士研究生,主要从事光子晶体光纤和光纤激光器等方面的研究。

E-mail: jin. aijun. nudt@gmail. com

导师简介: 姜宗福(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术、光束控制和气动光学等方面的研究。

E-mail: jiangzongfu@yahoo. com. cn

\* 通信联系人。E-mail: houjing25@sina. com

源<sup>[6]</sup>。随着超连续谱光源输出功率的不断增加,超连续谱光源在很多领域都将进入实用化阶段,如何评价超连续谱光源的光束质量就成为一个重要的研究内容。

目前已经有很多的方法对激光的光束质量进行评价,如  $M^2$  因子、桶中功率、斯特列尔比等<sup>[12,13]</sup>,但是由于超连续谱光源本身所具有的宽谱特性,同时兼具传统激光的优点,因此直接将这些评价方法应用于超连续谱光束质量的评价并不合适。目前关于超连续谱光源光束质量的文献非常少,且这些文献中所采取的主要方法是将超连续谱光源中的光谱成分滤出,对其  $M^2$  因子进行测量<sup>[4,14~16]</sup>,并没有对超连续谱光源的整体光束质量进行评价。这样就不能反映整个光源的特性,失去其整体作为新型的宽光谱光源的价值。除此之外,研究人员也对产生超连续谱的重要非线性介质——光子晶体光纤的光束质量进行了研究<sup>[17]</sup>。但这一研究方法同样也是针对单一波长进行的,并不能反映通过光子晶体光纤产

生的超连续谱光源的光束质量的特性。尚没有文献对超连续谱光源光束质量进行理论研的主要原因在于超连续谱的理论分析与数值模拟是基于时域与频域的广义非线性薛定谔方程进行的,在推导广义非线性薛定谔方程的过程中进行了时空分离,因此最终结果无法获得超连续谱的空间光场分布<sup>[18]</sup>。

本文对广义非线性薛定谔方程进行求解,得到激光抽运光子晶体光纤产生的超连续谱光源的谱分布。应用有限元方法计算不同波长的光束在光子晶体光纤中传输的基模场分布,基于光子晶体光纤的无截止单模特性,将各波长处的光场分布进行叠加获得超连续谱光源的近场光场分布。从而根据光谱分布与空间光场分布,提出使用  $SC-M^2$  因子对超连续谱光源的光束质量进行整体评价。

## 2 超连续谱光谱分布及谱重心

描述光脉冲在光子晶体光纤中传输演化的方程为广义非线性薛定谔方程为<sup>[18]</sup>

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \sum_{k \geq 2} \frac{i^{k+1}}{k!} \beta_k \frac{\partial^k A}{\partial T^k} + i\gamma \left( 1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} \right) \left[ A(z, T) \int_{-\infty}^{+\infty} R(t') |A(z, T-t')|^2 dt' \right], \quad (1)$$

式中  $A$  表示复电场包络,  $\beta_k$  表征光纤的色散效应,由传播常数  $\beta$  在中心频率  $\omega_0$  处的泰勒展开得到,  $T = t - \beta_1 z$  表示延时系。  $\gamma = n_2 \omega_0 / c A_{\text{eff}}$  为非线性系数,其中  $n_2 \approx 3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$  是非线性折射率,  $A_{\text{eff}}$  为有效模场面积。  $R(t)$  为非线性介质的响应函数,包括电子贡献和原子核贡献,表示为  $R(t) = (1 - f_R) \delta(t) + f_R h_R(t)$ , 其中  $f_R$  为延时拉曼响应的贡献,对于石英材料  $f_R = 0.18$ 。

用于产生超连续谱的光子晶体光纤参数为空气孔直径为  $d = 2.205 \mu\text{m}$ , 孔间距为  $\Lambda = 3.359 \mu\text{m}$ , 该

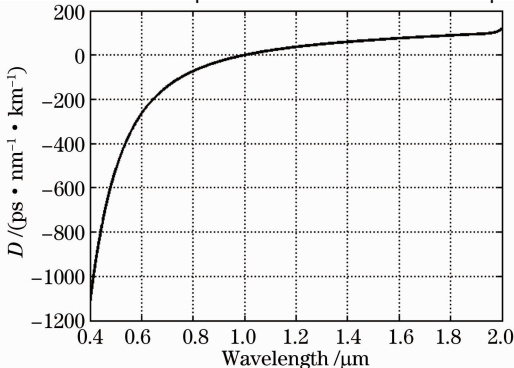


图1 光子晶体光纤色散曲线

Fig. 1 Dispersion curve of the photonic crystal fiber

光纤的色散曲线如图 1 所示,零色散波长位于  $1.001 \mu\text{m}$ 。计算超连续谱时,使用十阶色散系数,  $1064 \text{ nm}$  处光纤的各阶色散系数为  $\beta_2 = -8.191 \times 10^{-27} \text{ s}^2/\text{m}$ ,  $\beta_3 = 8.079 \times 10^{-41} \text{ s}^3/\text{m}$ ,  $\beta_4 = -1.342 \times 10^{-55} \text{ s}^4/\text{m}$ ,  $\beta_5 = 3.636 \times 10^{-70} \text{ s}^5/\text{m}$ ,  $\beta_6 = -9.089 \times 10^{-85} \text{ s}^6/\text{m}$ ,  $\beta_7 = 3.362 \times 10^{-99} \text{ s}^7/\text{m}$ ,  $\beta_8 = -3.677 \times 10^{-113} \text{ s}^8/\text{m}$ ,  $\beta_9 = 2.388 \times 10^{-127} \text{ s}^9/\text{m}$ ,  $\beta_{10} = 2.337 \times 10^{-142} \text{ s}^{10}/\text{m}$ 。光纤长度为  $1 \text{ m}$ 。抽运脉冲激光中心

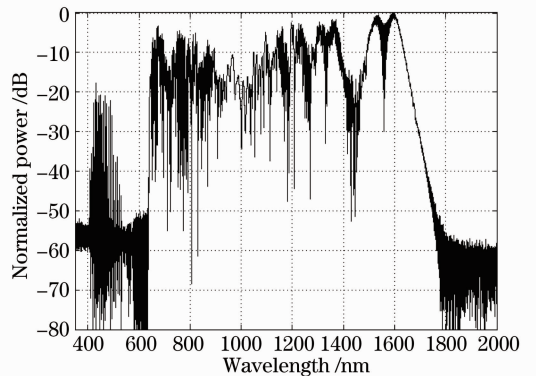


图2  $\tau = 150 \text{ fs}$ 、 $P_p = 5000 \text{ W}$  的激光抽运产生的超连续谱光谱

Fig. 2 Spectra of the supercontinuum generated by laser pumping with  $\tau = 150 \text{ fs}$  and  $P_p = 5000 \text{ W}$

波长  $\lambda_0 = 1064 \text{ nm}$ ，脉宽  $\tau = 150 \text{ fs}$ ，峰值功率  $P_p = 5000 \text{ W}$ 。使用分步傅里叶法数值求解(1)式，计算得到的超连续谱光谱分布如图2所示。

通过计算超连续谱光谱的一阶矩，求得其光谱重心

$$\lambda_{\text{centroid}} = \frac{\int P(\lambda)\lambda d\lambda}{\int P(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

式中  $P(\lambda)$  为超连续谱光源中  $\lambda$  处的光强， $\lambda_{\text{centroid}}$  即为超连续谱光谱分布的重心，计算结果为  $1.3266 \mu\text{m}$ 。

### 3 超连续谱光源空间光场分布

对超连续谱进行理论计算中通常使用的广义非线性薛定谔方程是在麦克斯韦方程组的基础上进行时空分离之后获得的，不能用来实现对超连续谱空间光场分布的数值求解<sup>[18]</sup>。在推导广义非线性薛定谔方程的过程中，假定光场的解的形式为<sup>[18]</sup>

$$\tilde{E}(r, \omega - \omega_0) = F(x, y)\tilde{A}(z, \omega - \omega_0)\exp(i\beta_0 z), \quad (3)$$

式中  $F(x, y)$  表征光场横向分布， $\tilde{A}(z, \omega - \omega_0)$  表征复振幅，此处为超连续谱光源中相应波长处的光强。因此，根据光纤结构计算每一波长处的光场分布，结合计算所得的超连续谱对应波长处的光强，将之进行叠加，即可获得超连续谱光源的空间光场分布。

使用 COMSOL 软件计算  $0.4 \sim 2.0 \mu\text{m}$  范围内间隔  $5 \text{ nm}$  的每一波长处光子晶体光纤中传输光束的基模光场分布。1065 nm 处的光场分布如图3所示。将各波长处的光场分布乘以超连续谱光源中该波长处的光强之后进行叠加，得到超连续谱光源近场处的光场分布，如图4所示。将超连续谱光束进行准直扩束之后传输  $150 \text{ m}$ ，获得超连续谱光源远场光场分布，如图5所示。

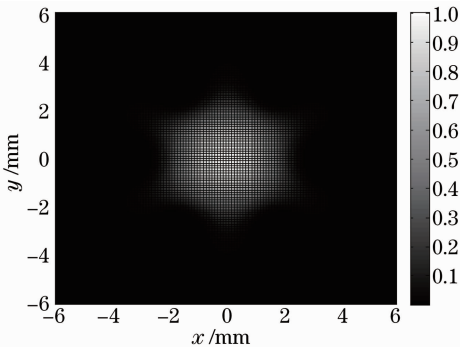


图3 1065 nm 处光子晶体光纤中传输基模光束的光场分布  
Fig. 3 Optical field of the fundamental mode beam propagating in the photonic crystal fiber at 1065 nm

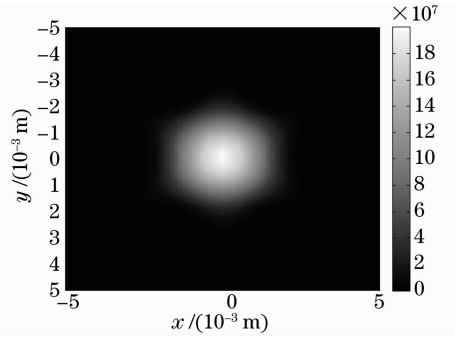


图4 光子晶体光纤输出的超连续谱光源的近场分布  
Fig. 4 Near optical field of the supercontinuum source output from the photonic crystal fiber

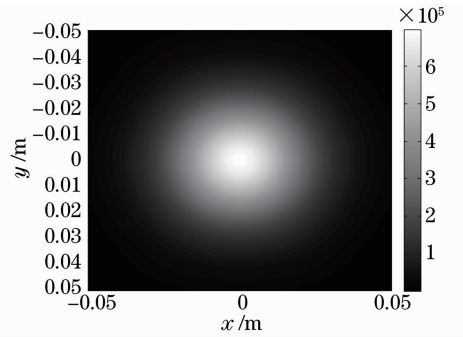


图5 光子晶体光纤输出的超连续谱光源的远场分布  
Fig. 5 Far optical field of the supercontinuum source output from the photonic crystal fiber

### 4 使用 $SC-M^2$ 因子评价超连续谱光源光束质量

根据光场分布以及二阶矩方法，可以计算光束空间重心以及光束宽度<sup>[12]</sup>。光束强度在空间坐标中的二阶矩为

$$\sigma_x^2 = \frac{\iint (x - \bar{x})^2 P(x, y) dx dy}{\iint P(x, y) dx dy}, \quad (4)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\iint (y - \bar{y})^2 P(x, y) dx dy}{\iint P(x, y) dx dy}$$

式中  $P(x, y)$  为光束强度横向空间分布， $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  为强度的空间重心：

$$\bar{x} = \frac{\iint x P(x, y) dx dy}{\iint P(x, y) dx dy}$$

$$\bar{y} = \frac{\iint y P(x, y) dx dy}{\iint P(x, y) dx dy} \quad (5)$$

由二阶矩方法定义得到光束宽度为

$$\begin{aligned} w_x &= 4\sigma_x \\ w_y &= 4\sigma_y \end{aligned} \quad (6)$$

根据计算得到的超连续谱光源近场与远场光场分布,可通过二阶矩方法得到光源近场与远场光束宽度,进而可知光束发散角

$$\begin{aligned} \theta_x &= \frac{w_x}{z} \\ \theta_y &= \frac{w_y}{z} \end{aligned} \quad (7)$$

光纤输出基模光束可近似为高斯光束,因此可将高斯光束选为参考光,作为评价超连续谱光源光束质量的基准。由于超连续谱光源为宽谱光源,因此参考高斯光束的波长选择是对其光束质量进行评价的关键。选择超连续谱的光谱重心作为参考高斯光束的波长,并将这一方法应用于不同的超连续谱光源中,以实现不同的超连续谱光源的光束质量进行比较。将选取光谱重心波长为参考高斯光束波长所定义的  $M^2$  因子成为  $SC-M^2$  因子,定义式为

$$M_x^2 = \frac{\pi}{4} \frac{w_x \theta_x}{\lambda_{\text{centroid}}}$$

$$M_y^2 = \frac{\pi}{4} \frac{w_y \theta_y}{\lambda_{\text{centroid}}}, \quad (8)$$

经计算,可得到第 2 节使用的抽运与光纤参数的条件下产生的超连续谱光源的  $SC-M^2$  因子值为  $M_x^2 = 1.11, M_y^2 = 1.08$ , 很接近 1。这表示该光源的光束质量很好。由于计算过程中认为光子晶体光纤支持全波长范围内的单模传输,因此每一波长处的光场均为基模,故而整个光源的光束质量也非常好。

为了说明  $SC-M^2$  因子对超连续谱光源的光束质量进行评价的合理性,下面应用  $SC-M^2$  因子评价其他抽运条件下获得的超连续谱光源的光束质量。如图 6 所示为不同抽运条件下得到的超连续谱光源的光谱分布。表 1 为不同超连续谱光源的光谱重心及  $SC-M^2$  因子值。表征光束质量的各值之间差别很小,并均接近 1,这是由于四种情况下得到超连续谱光源中各波长成分处均为基模,因此光束质量都接近参考高斯光束。可知使用  $SC-M^2$  因子可对不同超连续谱光源的光束质量进行评价与比较。

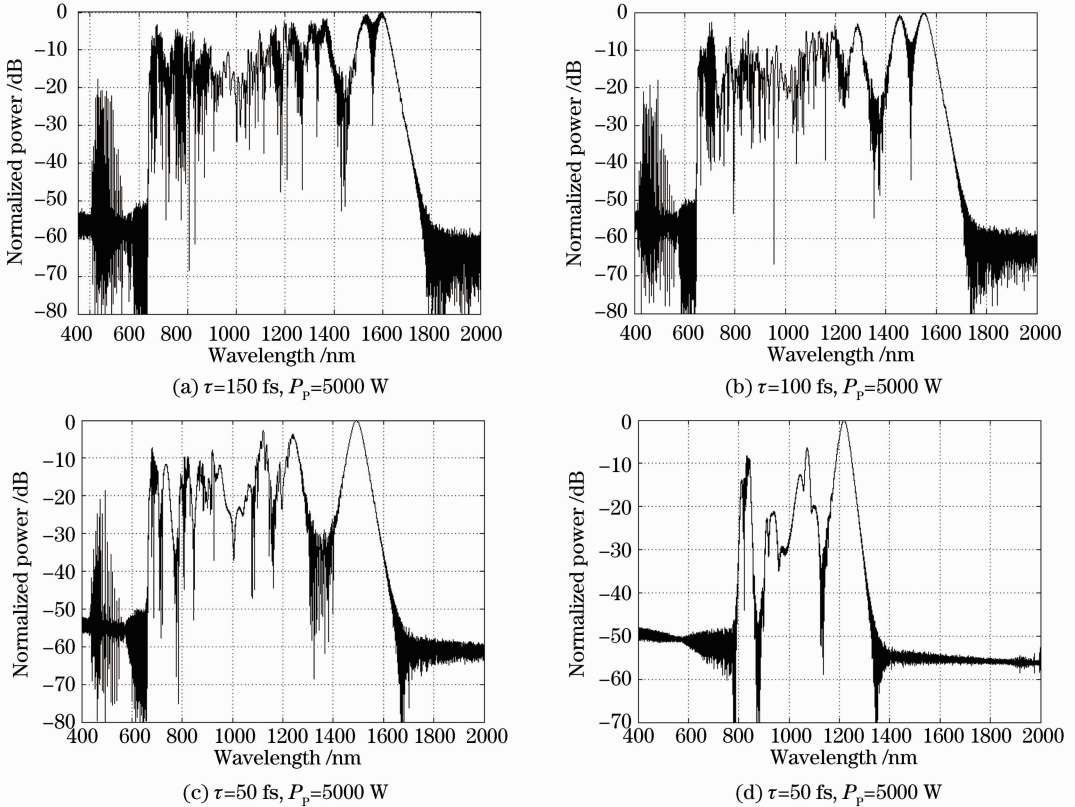


图 6 不同抽运条件下产生的超连续谱光谱

Fig. 6 Spectra of the supercontinuum generated under different pump conditions

表 1 不同超连续谱光源的光谱重心及  $SC-M^2$  值

Table 1 Spectral centroids and  $SC-M^2$  values of different SC sources

| Pump condition | Spectral centroid<br>$\lambda_{\text{centroid}}/\mu\text{m}$ | $M_x^2$ | $M_y^2$ |
|----------------|--|---------|---------|
| Fig. 6 (a)     | 1.3266   | 1.11    | 1.084   |
| Fig. 6 (b)     | 1.3523   | 1.102   | 1.077   |
| Fig. 6 (c)     | 1.3142   | 1.102   | 1.076   |
| Fig. 6 (d)     | 1.1797   | 1.096   | 1.073   |

现有的文献<sup>[4,14~16]</sup>中对超连续谱光源光束质量的评价方法是使用带通滤波片将超连续谱光源中的光谱成分滤出,然后使用  $M^2$  因子测量仪对其光束质量进行测量。如文献[4]中在 0.8~4  $\mu\text{m}$  的宽光谱中只选取了 1550、2555、3275 nm 三个中心波长处的窄带光谱进行光束质量的测量。这一方法只是对超连续谱光源部分光谱成分处的光束质量进行了分析,并不能对超连续谱光源整体的光束质量进行评价。而根据计算结果与讨论可知  $SC-M^2$  因子则可以对超连续谱光源的整体光束质量进行评价。当实际应用时,若只需要超连续谱光源中某一窄带光谱时可以使用窄带滤波测量光束质量的方法,当需要应用的是整个超连续谱光源时,则需要使用  $SC-M^2$  因子对其整体光束质量进行评价。

## 5 结 论

针对超连续谱光源的光束质量评价,选取以超连续谱光谱重心为波长的高斯基模光束作为参考光,计算得到可用于不同超连续谱光源光束质量评价的  $SC-M^2$  因子。经过对不同抽运条件下产生的不同光谱分布的超连续谱光源的  $SC-M^2$  因子进行计算,可知该因子对于不同的超连续谱的光束质量可以进行可靠评价与比较,弥补了现有的方法只能使用窄带滤光片将超连续谱光源的窄带光谱成分滤出对其光束质量进行评价的缺点。当实际应用中需要利用超连续谱光源的宽光谱特性时,可以使用该因子对光源的整体光束质量进行评价。

## 参 考 文 献

- 1 J. K. Ranka, R. S. Windeler, A. J. Stentz. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm[J]. *Opt Lett.*, 2000, **25**(1): 25~27
- 2 J. M. Dudley, G. Genty, S. Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, **78**(4): 1135~1184
- 3 G. Genty, S. Coen, J. M. Dudley. Fiber supercontinuum sources (invited)[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1771~1785

- 4 C. Xia, Z. Xu, M. N. Islam *et al.*. 10.5 W time-averaged power mid-IR supercontinuum generation extending beyond 4  $\mu\text{m}$  with direct pulse pattern modulation[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, **15**(2): 422~434
- 5 Song Rui, Chen Shengping, Hou Jing *et al.*. All fiber 70 W supercontinuum[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3): 569~570  
宋 锐, 陈胜平, 侯 静等. 70 W 全光纤超连续谱光源[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(3): 569~570
- 6 Song Rui, Hou Jing, Chen Shengping *et al.*. All-fiber 177.6 W supercontinuum source[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, **61**(5): 054217  
宋 锐, 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
- 7 Zhao Wei, Hu Xiaohong, Wang Yishan *et al.*. High power all-fiber supercontinuum technical development [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1107002  
赵 卫, 胡晓鸿, 王屹山等. 高功率全光纤超连续谱激光技术进展[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1107002
- 8 Zhang Bin, Yang Weiqiang, Hou Jing *et al.*. 1.9~4.3  $\mu\text{m}$  all-fiber mid-infrared supercontinuum source firstly realized in china [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(12): 1202001  
张 斌, 杨未强, 侯 静等. 国内首次实现 1.9~4.3  $\mu\text{m}$  全光纤中红外超连续谱光源[J]. *中国激光*, 2012, **39**(12): 1202001
- 9 Hao Zhijian, Lei Dajun, Zhao Chujun *et al.*. Generation of mid-infrared supercontinuum in two cascaded fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0105009  
郝志坚, 雷大军, 赵楚军等. 两级光纤中的中红外超连续谱产生[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0105009
- 10 Liu Chu, Rees Eric, Laurila Toni *et al.*. Experimental research on supercontinuum generation from nanosecond pulse and conventional single mode fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0705003  
刘 楚, Rees Eric, Laurila Toni等. 纳秒脉冲在普通单模光纤中产生超连续谱的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0705003
- 11 Xi Xiaoming, Chen Zilun, Sun Guilin *et al.*. Dual-wavelength pumped supercontinuum generation in tapered photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0206001  
奚小明, 陈子伦, 孙桂林等. 双波长抽运拉锥光子晶体光纤产生超连续谱研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0206001
- 12 A. E. Siegman. How to (maybe) measure laser beam quality [J]. *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 1998, **17**(2): 184~199
- 13 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1643~1653  
冯国英, 周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1643~1653
- 14 Y. Vidne, M. Rosenbluh. Spatial modes in a PCF fiber generated continuum[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(24): 9721~9728
- 15 E. Esposito, J. Harris, D. Burns *et al.*. Measurement of white-light supercontinuum beam properties from a photonic crystal fiber using a laser scanning confocal microscope[J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, **18**(8): 2609~2615
- 16 X. H. Hu, W. Zhang, Z. Yang *et al.*. High average power, strictly all-fiber supercontinuum source with good beam quality [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(14): 2659~2661
- 17 A. Mafi, J. V. Moloney. Beam quality of photonic-crystal fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(7): 2267~2270
- 18 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. New York: Academic, 2010