

文章编号: 0253-2239(2007)09-1663-5

高功率宽调谐范围掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤激光器 *

刘胜利^{1,2} 李乙钢^{1,2} 高艳丽^{1,2} 丁 镭^{1,2} 王 华^{1,2} 陈胜平^{1,2} 吕可诚^{1,2}

(¹南开大学物理科学学院, 天津 300071
²天津市信息光子材料与技术重点实验室, 天津 300071)

摘要: 采用闪耀光栅作为色散元件, 构建了前向、后向输出两种结构的可调谐掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤激光器, 并对其输出特性进行了分析研究。在抽运功率 5.75 W 时, 前向输出结构实现了 1050.6~1110.2 nm 的连续调谐输出, 光谱线宽约 0.1 nm, 边模抑制比大于 44 dB。在调谐激光波长为 1085 nm 时, 得到最高输出功率 677 mW。结构改进的后向输出结构的可调谐输出结构在抽运功率 4.43 W, 调谐波长 1075 nm, 实现了 2.21 W 的功率输出, 斜率效率为 73%; 调谐范围 50.9 nm(1042.1~1093 nm), 光谱线宽小于 0.08 nm, 边模抑制比大于 50 dB。两种结构的可调谐激光器输出均为线偏振光, 偏振度大于 89.5%。

关键词: 光纤激光器; 调谐光纤激光器; 闪耀光栅; 掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤

中图分类号: TN253 文献标识码: A

High-Power Widely Tunable Yb-Doped Photonic Crystal Fiber Laser

Liu Shengli^{1,2} Li Yigang^{1,2} Gao Yanli^{1,2} Ding Lei^{1,2} Wang Hua^{1,2}

Chen Shengping^{1,2} Lü Kecheng^{1,2}

(¹ Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071
² Tianjin Key Lab of Photonics Material and Technology for Information Science, Tianjin 300071)

Abstract: A forward output and a backward output tunable Yb-doped photonic crystal fiber laser (PCFL) with a blazing grating as a tuning element are demonstrated. For the forward output tunable PCFL, when the absorbed pump power is 5.75 W, a tuning range of 59.6 nm from 1050.6~1110.2 nm is obtained. The 3 dB bandwidth is around 0.1 nm. Side-mode extinction is more than 44 dB. A maximum output power of 677 mW is obtained with a slope efficiency of 14% for a tuning wavelength of 1085 nm. Over the whole tuning range, the variety of output power is less than ± 0.34 dB. For the backward output configuration, it is tunable over 50.9 nm when the absorbed pump power is 4.43 W. For all tuning wavelengths, the 3 dB bandwidth is less than 0.08 nm, side-mode extinction is better than 50 dB. When the tuning wavelength is 1075 nm, a maximum output power of 2.21 W is obtained with a slope efficiency of 73%. For the two configurations tunable PCFL, output of both two lasers are linearly polarized and the polarization extinction ratio is more than 89.5%. The effect of re-absorption in ytterbium doped active fiber on the tuning range is also discussed.

Key words: fiber laser; tunable fiber laser; blazing grating; Yb-doped photonic crystal fiber

1 引 言

由于 Yb³⁺ 离子在 SiO₂ 玻璃基质中能级结构简单, 不存在激发态吸收和浓度淬灭效应, 具有很高的量子效率和光光转换效率。且利用闪耀光栅作为色散元件的光纤激光器具有输出功率高、调谐范围宽、

线宽窄、偏振度高、调节方便等优点, 因此高功率可调谐掺 Yb³⁺ 光纤激光器得到了广泛的研究^[1~5]。与光纤端面作为谐振腔自由运转的光纤激光器相比, 可调谐激光器的斜率效率较低, 一般小于 35%^[3], 2001 年, J. K. Sahu 等^[4] 采用后向输出的

* 国家自然科学基金(60377010)和高等学校博士学科点专项研究基金(20030055016)资助课题。

作者简介: 刘胜利(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事稀土掺杂光纤激光器、放大器等方面的研究。

E-mail: liuvic6@163.com

导师简介: 李乙钢(1962-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事光电子、激光技术、非线性光纤光学等方面的研究。

E-mail: liyigang@nankai.edu.cn

收稿日期: 2006-11-14; 收到修改稿日期: 2007-03-12

利特罗(Littrow)腔结构的可调谐光纤激光器,调谐激光由光纤抽运输入端输出,实现了 $1.06 \mu\text{m}$ 波段调谐输出调谐范围为 110 nm ,最大输出功率约 900 mW ,斜率效率 67% 。

与常规双包层光纤相比,折射率引导型光子晶体光纤(PCF),可以实现大模面积设计^[6],同时纤芯的高浓度稀土掺杂为采用较短长度的光纤构建高功率激光器提供了可能,同时抑制了各种非线性效应的影响。大内包层数值孔径(N. A.)设计可以允许更大发散角的抽运光耦合进入光纤的内包层^[7],提高激光器的耦合效率^[8,9]。全硅结构保证光纤可以承受更高的温度,使激光器的稳定性得到改善。另外光子晶体光纤基于周期排列空气孔间的布拉格散射使光纤不必进行非圆形内包层设计或者特殊盘绕方式,就可以保证更高的抽运吸收效率。从而为构建高光束质量、大功率、稳定运转光纤激光器提供了一个新的选择。

本文采用掺 Yb^{3+} 光子晶体光纤作为增益介质,通过前向和后向输出的可调谐光子晶体光纤激光器(PCFL)的对比实验研究,对两种结构实现的调谐范围和光光转化效率的差异给出了理论分析。前向输出结构实现了 1060 nm 波段 59.6 nm 的调谐激光输出,调谐波长 1085 nm 处实现最大激光输出功率 677 mW ;采用后向输出结构获得了 50.9 nm 的调谐输出,调谐波长 1075 nm 处得到最大调谐输出功率 2.21 W 。两种结构的可调谐光子晶体光纤激光器输出均为线偏振光,偏振度大于 89.5% 。

2 实验装置

实验采用的前向、后向输出光栅外腔可调谐掺 Yb^{3+} 光子晶体光纤激光器结构如图 1 所示。

实验采用美国相干公司生产的半导体激光器作为抽运源,中心波长 975 nm ,对于前向输出可调谐光子晶体光纤激光器,抽运光经透镜耦合系统耦合入光纤内包层,光纤抽运输入端紧贴二色镜(DM) DM_1 (976 nm ,高透; $1020 \sim 1120 \text{ nm}$,高反)作为谐振腔的前腔镜,另一端输出光经透镜准直后,入射至闪耀光栅(1200 线/mm)上,闪耀光栅按照利特罗角度放置,即零级衍射光输出,一级衍射光沿入射光反方向反馈回激光谐振腔中,光栅与光纤抽运端二色镜的反射形成激光振荡。实验采用的增益光纤为丹麦 Crystal Fiber A/S 公司生产的空气包层大模面积掺 Yb^{3+} 光子晶体光纤,其纤芯直径 $23 \mu\text{m}$,

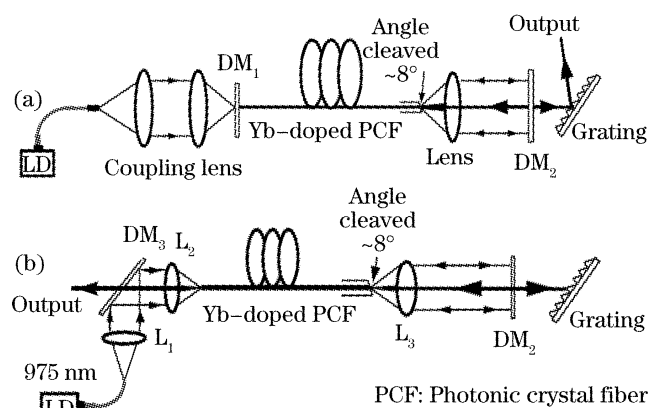


图 1 前向输出(a),后向输出(b)可调谐掺 Yb^{3+} 光子晶体光纤激光器

Fig. 1 Forward output (a), backward output (b) tunable Yb^{3+} photonic crystal fiber laser

$\text{N. A.} = 0.05$;内包层直径 $420 \mu\text{m}$, $\text{N. A.} = 0.55$,光纤端面图和文献[10]中所示相同。掺 Yb^{3+} 光子晶体光纤纤芯对 976 nm 抽运光的吸收系数为 0.9 dB/m ,光纤长度为 7.5 m ,单程吸收为 6.7 dB ,经透镜准直后的光中含有部分未被完全吸收的抽运光,为此在准直透镜与光栅之间插入一片二色镜 DM_2 (976 nm ,高反; $1020 \sim 1120 \text{ nm}$,高透)使残留的抽运光沿原路反射回光纤内包层使其再次被吸收,从而提高光子晶体光纤激光器的转换效率和输出功率。为了提高抽运光和信号光的耦合效率、避免光纤端面损伤、污染、磨制斜角,采用热塌陷方法使距离光纤两端面约 $120 \mu\text{m}$ 的空气孔区塌陷,然后对光纤的抽运输入端做垂直抛光;另一端以 8° 斜角抛光以避免端面反馈影响调谐激光器的性能。光纤端面热封装、切割、抛光工作由 Crystal Fiber A/S 公司加工。与前向输出可调谐光子晶体光纤激光器不同的是,后向输出可调谐光子晶体光纤激光器的抽运光经二色镜 DM_3 (DM_3 镜面法线方向与抽运光方向呈 45° 时, 976 nm ,高反; $1020 \sim 1200 \text{ nm}$,高透)反射、透镜 L_2 聚焦后,耦合进入光纤内包层,激光器谐振腔由光纤抽运输入端(3.5% 的非涅耳反射)和光栅组成,调谐输出激光由光纤抽运输入端出射后经 L_2 准直输出。

3 结果与讨论

3.1 输出光谱特性

前向输出的可调谐掺 Yb^{3+} 光子晶体光纤激光器,当没有闪耀光栅对信号光进行反馈时,此结构即为双程前向超荧光光纤光源(SFS)。当抽运功率较低、光纤中的瑞利散射光比较弱时,输出信号光为宽

带超荧光。此掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤的荧光谱覆盖 1030~1120 nm 约 90 nm 的范围^[10]。

在不同的抽运功率下,调节光栅相对与光纤的偏转角度,在抽运功率 1.27 W 时得到了 74.4 nm 的调谐激光输出,但整个调谐范围内输出激光功率的平坦度较差,随着抽运功率的逐渐增加,调谐范围逐渐变窄并趋于稳定值,在最大抽运功率 5.75 W 时,前向输出可调谐掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤激光器实现了 59.6 nm (1050.6~1110.2 nm)范围内的连续调谐输出,图 2 给出了此时五个不同波长的调谐光谱,典型的激光线宽 0.1 nm,边模抑制比大于 44 dB,最小调谐步长小于 0.08 nm。

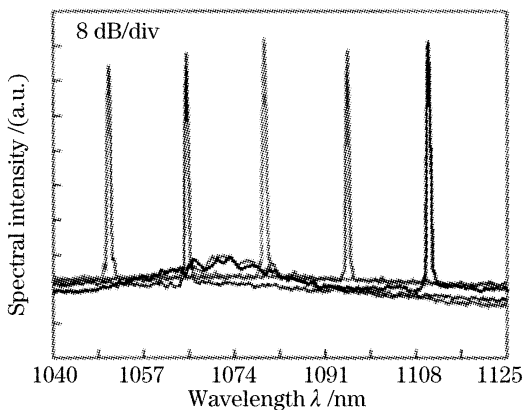


图 2 前向输出可调谐掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤激光器的激光光谱

Fig. 2 Spectra of the forward output Yb-doped tunable photonic crystal fiber laser

对于前向可调谐光子晶体光纤激光器,虽然掺 Yb³⁺ 光纤 1080~1120 nm 波段的增益水平较低^[2],但实验仍然实现了此波段较高功率的调谐激光输出。而具有较高增益水平的短波段(1035~1050 nm),却没有实现调谐输出。这可以由掺 Yb³⁺ 光纤中的再吸收效应得到解释,SiO₂ 玻璃基质中 Yb³⁺ 离子的吸收谱长波端可以一直延伸到 1060 nm 左右,当采用 975 nm 激光二极管(LD)抽运掺 Yb³⁺ 光纤时,产生的波长小于 1060 nm 的信号光可以作为抽运光对掺 Yb³⁺ 光纤再次抽运,使得短波段信号光的增益水平降低,而长波段信号光的增益水平增加,从而实现波长大于 1060 nm 的调谐激光输出^[2]。

后向输出的可调谐掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤激光器,在最大抽运功率 4.43 W 时,实现了 50.9 nm (1042.1~1093 nm)的调谐输出,典型的激光线宽小于 0.08 nm,调谐步长小于 0.1 nm,边模抑制比大于 50 dB。与前向输出可调谐光子晶体光纤激光器相比,后向输出装置实现了较短波长的调谐激光输出,这是由于光纤中短波段的信号光主要产生于

光纤强抽运输入端,而后向输出结构中抽运输入端对信号的反馈水平较低(3.5%),使再吸收效应对光纤中短波段信号光影响较小,短波段信号光容易保持较高的增益水平,实现调谐激光输出。

3.2 调谐输出功率特性

对于双程前向输出超荧光光纤光源,随抽运功率逐渐增加,光纤中的瑞利散射光逐渐增强,由 DM₁ 和光纤中瑞利散射光形成的等效谐振腔会导致波长 1.07 μm 附近的激光输出。实验在抽运功率 5.75 W 时实现了最高输出功率 1.94 W,斜率效率 49%的激光输出。当放置闪耀光栅构成前向输出可调谐光子晶体光纤激光器,调节光栅的偏转角度,在抽运功率 5.75 W,调谐输出波长为 1085 nm 时得到了最高输出功率 677 mW,斜率效率为 14% (图 3);抽运功率 5.75 W 时调谐输出功率随调谐波长的变化如图 4 所示。后向输出可调谐掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤激光器,在最大抽运功率 4.43 W,调谐波长 1075 nm 时,得到最大的调谐激光输出功率 2.21 W,斜率效率高达 73% (图 3)。抽运功率 4.43 W 时不同调谐波长对应的输出功率变化关系如图 4 所示。两种结构获得的最大输出功率特性和在最大抽运功率下的调谐输出功率平坦度曲线对比如图 3、图 4 所示。由图 3 可以看出,两种结构的调谐光子晶体光纤激光器均未出现增益饱和现象,可以继续增加抽运功率,获得更高功率的调谐激光输出。

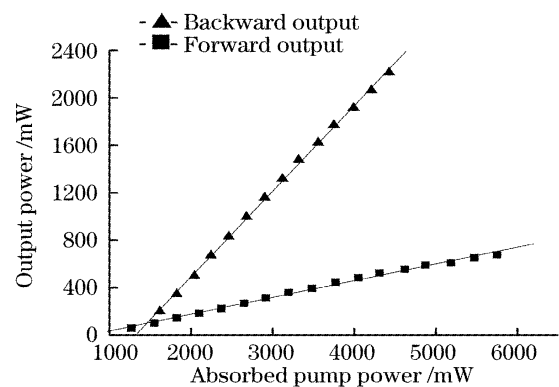


图 3 前向输出结构调谐波长为 1085 nm 和后向输出结构调谐波长为 1075 nm 的输出功率特性曲线

Fig. 3 Character of the output power when the tuning wavelength is 1085 nm for forward output configuration and 1075 nm for backward output configuration

闪耀光栅为偏振敏感元件,各种不同偏振方向的线偏振信号光入射到光栅上将只有一种线偏振光被衍射回谐振腔中,信号光在谐振腔中来回反射,最终输出的调谐激光将为线偏振光^[2],利特罗腔的调

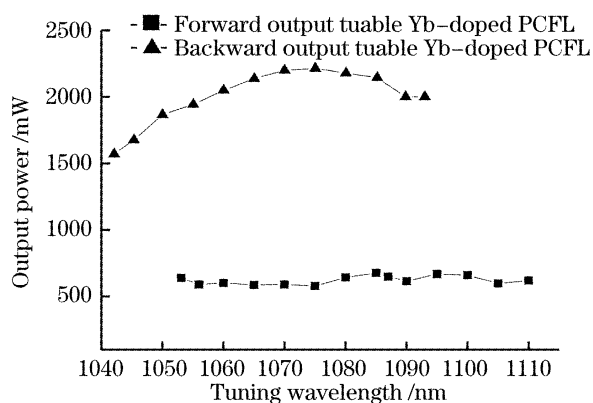


图4 抽运功率 5.75 W 时(前向输出结构)和 4.43 W (后向输出结构)输出功率随调谐波长的变化

Fig. 4 Output power versus tunable wavelength when the incident pump power is 5.75 W (forward output configuration) and 4.43 W (backward output configuration)

谐光子晶体光纤激光器,采用 1200 线/mm 的闪耀光栅时,信号光须以 40° 的入射角入射至光栅,此时一级衍射光的衍射效率约为 35%;实验使用的 DM_2 只有一侧镀有二相色介质膜,且光纤斜角端、准直透镜也未镀 $1.02\sim 1.12\ \mu\text{m}$ 波段的增透膜,这些都引入了一些反射损耗;实验中使用的准直透镜为普通的球面透镜,未进行专门的加工设计,当信号光重新耦合进入光纤纤芯时,准直的微小偏差就会导致聚焦的光斑直径比纤芯直径大,引入一定的耦合损耗^[2]。综合考虑所有外腔损耗因素,前向输出可调谐光子晶体光纤激光器,一级衍射光的总反馈水平约为 20%;另外,光栅零级光的衍射效率 50%,谐振腔的耦合输出比较低,这会导致较大的内腔损耗,限制了前向输出可调谐光子晶体光纤激光器输出功率和斜率效率的有效增加。

后向输出结构的调谐光子晶体光纤激光器,采用光纤端面(3.5%的菲涅耳反射)作为输出腔镜,与前向输出结构相比,更高的输出耦合比使内腔损耗降低^[3],同时折射率引导型光子晶体光纤基于周期排列空气孔间的布拉格散射,抑制了螺旋光的存在,使抽运光吸收更加充分,有效地增加了激光器的光光转化效率和斜率效率。虽然后向输出结构的最大抽运功率较前向最大抽运功率低,实验仍然实现了输出功率 2.21 W,斜率效率为 73%的激光输出。相对于常规双包层光纤激光器,光子晶体光纤激光器不必进行特殊的光纤盘绕和内包层设计就可以保证较高的抽运光吸收效率,有效地改善了激光器的稳定性和可重复性^[11]。另外,通过进一步优化后向输出结构的输出耦合比和减小外腔损耗有望得到更

高的斜率效率和输出功率。

3.3 调谐输出激光的偏振特性

图 5 中实点为前向输出可调谐光子晶体光纤激光器在抽运功率 3.48 W,调谐输出波长 1085 nm 激光经格兰-汤姆孙(Glan-Thomson)偏振分光棱镜后,透射光强 P_t 随分光棱镜旋转角度 θ 的变化曲线。由马吕斯定律(Malus Law)推导得

$$P_t = A \frac{1 + P \cos 2\theta}{2(1 - P)}, \quad (1)$$

其中 A 为振幅系数, P 为调谐输出激光的偏振度。采用(1)式对透过光强进行拟合,结果如图中实线所示,计算得偏振度为 96.4%。实验对两种结构的调谐光子晶体光纤激光器的不同的调谐波长偏振度研究发现,对于不同的调谐激光波长,前向输出结构的偏振度均大于 94.3%,后向输出结构的偏振度大于 89.5%。

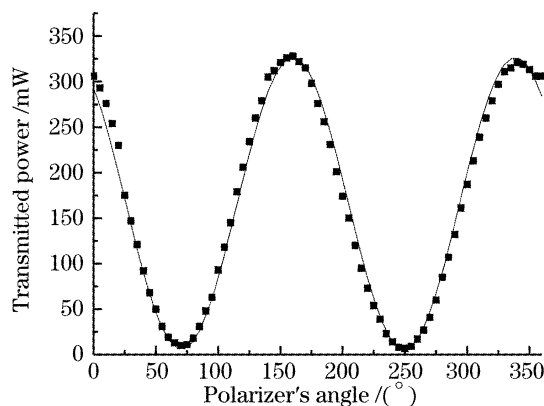


图5 调谐输出激光经偏振分光棱镜后透射光强随偏转角的变化。实线为根据(1)式对数据的拟合曲线

Fig. 5 Fiber laser power transmitted through a polarizer as a function of the polarizer's angle. Solid line is the fit curve according to the Eq. (1)

4 结 论

以掺 Yb^{3+} 空气包层大模面积光子晶体光纤作为增益介质,闪耀光栅作为调谐元件构建了前向输出和后向输出结构的可调谐掺 Yb^{3+} 光子晶体光纤激光器,分别得到最大输出功率为 677 mW 和 2.21 W 的激光输出,激光器的输出耦合比是影响输出功率差异的主要原因。光纤中的再吸收效应对可调谐掺 Yb^{3+} 光纤激光器的调谐范围具有较大的影响,前向输出结构在最大抽运功率 5.75 W 时实现了波长调谐范围为 59.6 nm,后向输出结构的可调谐光子晶体光纤激光器实现了 50.9 nm 的调谐激光输出。两种结构的可调谐掺 Yb^{3+} 光子晶体光纤激光器输出激光均为线偏振光,偏振度大于

89.5%。后向输出的可调谐掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤激光器在要求宽调谐范围、高功率激光输出方面具有更为广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Li Yigang, Hou Guofu, Lu Kecheng *et al.*. Tunable Yb³⁺-doped double-cladding fiber laser with a double-grating configuration [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(11): 969~972 (in Chinese)
李乙钢, 侯国付, 吕可诚 等. 双光栅外腔可调谐掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(11): 969~972
- 2 J. Nilsson, W. A. Clarkson, R. Selvas *et al.*. High-power wavelength-tunable cladding-pumped rare-earth-doped silica fiber lasers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2004, **10**(1): 5~30
- 3 M. Auerbach, D. Wandt, C. Fallnich *et al.*. High-power tunable narrow line width ytterbium-doped double-clad fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **195**(3): 437~441
- 4 J. K. Sahu, C. C. Renaud, K. Furusawa *et al.*. Jacketed air-clad cladding pumped ytterbium-doped fibre laser with wide tuning range[J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(18): 1116~1117
- 5 Li Lijun, Fan Wande, Fu Shenggui *et al.*. Yb³⁺-doped double-clad fiber laser with frequency selecting by double-clad fiber bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 55~58 (in Chinese)
- 李丽君, 范万德, 付圣贵 等. 双包层光纤光栅选频双包层光纤激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 55~58
- 6 Jes Broeng, Guillaume Vienne, Anders Petersson *et al.*. Air-clad photonic crystal fibers for high-power single-mode lasers [C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5335**: 192~201
- 7 W. J. Wadsworth, R. M. Percival, G. Bouwmans *et al.*. High power air-clad photonic crystal fibre laser[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(1): 48~53
- 8 www.crystallfiber.com
- 9 Sun Hongzhi, Liang Jianzhong, Hu Yimei *et al.*. A high efficient tunable Yb doped double cladding fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1372~1374 (in Chinese)
孙宏志, 梁建中, 胡谊梅 等. 高效率可调谐掺镱双包层光纤激光器研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11): 1372~1374
- 10 Liu Shengli, Li Yigang, Zhang Wei *et al.*. High-power Yb³⁺-doped double-cladding photonic crystal fiber superfluorescent source[J]. *Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(1): 14~16 (in Chinese)
刘胜利, 李乙钢, 张 炜 等. 高功率掺 Yb³⁺ 双包层光子晶体光纤超荧光光源[J]. *光电子 • 激光*, 2006, **17**(1): 14~16
- 11 Yan Peiguang, Ruan Shuangchen, Lin Haojia *et al.*. Supercontinuum generation in a photonic crystal fibre[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(6): 1093~1095