

文章编号: 0258-7025(2009)11-2822-05

# 掺镱大功率光子晶体光纤激光器热效应分析

韩晓明<sup>1</sup> 杨德兴<sup>1</sup> 赵建林<sup>1</sup> 侯建平<sup>1</sup> 段开棕<sup>2</sup> 王屹山<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072)  
<sup>2</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

**摘要** 数值模拟分析了大功率光子晶体光纤(PCF)激光器的温度场和热应力场。通过引入等效热传导率对光子晶体光纤结构进行简化,建立了光子晶体光纤激光器的三维温度场模型。利用有限元方法数值模拟得到了自然对流换热时光子晶体光纤中的温度场及光纤端面的热应力场,并对强制对流换热时光子晶体光纤的冷却效果进行了数值模拟分析。结果表明,对于选取的 PCF,通过采取强制对流换热措施可以承受 1000 W 的抽运功率而不会产生热效应损伤,如果需要通过提高抽运功率以获得更大功率的激光运转,则需要改变光纤的结构。

**关键词** 激光器; 光子晶体光纤激光器; 热效应; 有限元; 数值模拟

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2822

## Thermal Effect in High-Power Yb<sup>3+</sup>-Doped Photonic Crystal Fiber Lasers

Han Xiaoming<sup>1</sup> Yang Dexing<sup>1</sup> Zhao Jianlin<sup>1</sup> Hou Jianping<sup>1</sup>  
Duan Kailiang<sup>2</sup> Wang Yishan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China  
<sup>2</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

**Abstract** Temperature and thermal stress of high-power photonic crystal fiber (PCF) lasers were numerically simulated and analyzed. Equivalent thermal conductivity was introduced to simplify the structure of photonic crystal fiber, and then three dimensional temperature field model of photonic crystal fiber laser was established. By using the finite element method, the distributions of the temperature in fiber and the thermal stress in end-surface of fiber were numerically simulated and analyzed with natural and forced convection heat transfer, respectively. The results show that the selected PCF can support the pumped power of 1000 W under forced convection heat transfer, but improving the parameters of fiber is required to further enhance the output power by supporting higher pump power.

**Key words** lasers; photonic crystal fiber laser; thermal effect; finite element method; numerical simulation

## 1 引 言

包层由一系列排列规则的空气孔组成的实芯光子晶体光纤(PCF)具有许多优越的特性,如无截止单模特性、大模场面积、零色散波长可调<sup>[1,2]</sup>等。以其作为有源载体的 PCF 激光器已成为激光器研究领域的新热点<sup>[3~5]</sup>,它除了具有普通光纤激光器的所有优点<sup>[6,7]</sup>外,还具有传统双包层光纤激光器所不具备的一些优点,如大模场面积、色散可调等。

相比传统固体激光器系统,PCF 大的表面体积比具有更优异的散热性能,而 PCF 的大模场面积可以降低光纤中的光功率密度,具有产生高功率激光的特殊能力。包层抽运技术的出现对于大功率、高能量的 PCF 激光器的发展起到了极大的促进作用。近年来这一领域已报道了大量卓有成效的工作,如 2003 年 J. Limpert<sup>[3]</sup>使用包层抽运技术,在 2.3 m 长的双包层 PCF 中实现了 80 W 的功率输出,效率

收稿日期: 2008-11-26; 收到修改稿日期: 2009-03-25

基金项目: 瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 韩晓明(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: xmhan2008@gmail.com

导师简介: 赵建林(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事光信息技术及应用等方面的研究。

E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn(通信联系人)

达到 78% ;2006 年德国 Jena 大学应用物理研究所制作出了迄今为止获得的最高单位长度连续波激光输出功率的光纤激光器(抽运功率为 550 W/m,连续波输出激光 320 W<sup>[4]</sup>)。国内也有多所高校和科研单位加入了高功率 PCF 激光器的研究行列。研究表明,目前热效应始终是制约激光器功率进一步提高的重要因素之一。因此对 PCF 激光器热效应的分析也成为激光器研究的一个重要课题。早在 2003 年,J. Limpert 等<sup>[8]</sup>就将激光器中的 PCF 纤芯简化为一个均匀的受热体,对其二维截面温度场和热应力场进行了数值模拟。近年来,国内多所院校主要针对传统双包层光纤激光器热效应开展了较深入的研究<sup>[9~11]</sup>,针对 PCF 激光器热效应的研究则比较少。2006 年中国科学院上海光学精密机械研究所程小劲等<sup>[12]</sup>报道了他们在 PCF 激光器热效应方面的研究成果,其研究也采用 J. Limpert 的方法将 PCF 纤芯视为一个均匀的受热体,利用等效热传导率法把 PCF 结构简化成包层结构,获得了二维截面温度场分布解析表达式,并分析了不同结构参数对 PCF 温度场的影响。然而,由于 PCF 激光器特殊的抽运方式,PCF 的轴向热功率不可能为均匀分布,故上述关于 PCF 激光器的热分析不能完整地反映 PCF 中整体温度场分布。

本文通过求解稳态速率方程得到光纤激光器热载荷分布,进而借助热传导方程并通过数值模拟分析掺镱双包层 PCF 的三维温度场和端面热应力场,以及强制对流换热情况下 PCF 的冷却效果。

## 2 双端抽运光纤激光器中的光功率分布

分析 PCF 激光器中的热效应时,需要首先知道抽运光  $P_p$  功率在 PCF 中的分布,进而确定出热源分布。PCF 激光器中的功率分布可以采用文献<sup>[13]</sup>给出的增益介质稳态速率方程来计算。这里以

丹麦 Crystal Fibre A/S 公司生产的 DC-170-40-Yb 型 PCF 为例,选取表 1 所示参数,表中  $A$  为纤芯面积, $N$  为纤芯中增益介质  $\text{Yb}^{3+}$  的浓度, $\lambda_p, \lambda_s$  分别为抽运光和信号光波长, $\Gamma_p, \Gamma_s$  分别为抽运光和信号光与纤芯的重叠因子, $R_1, R_2$  分别为前后腔镜对激光的反射率, $L$  为光纤长度, $\alpha_p, \alpha_s$  分别为抽运光和信号光的损耗系数。相应的计算结果分别如图 1 和图 2 所示。其中图 1 为双端抽运功率均为 100 W 时光纤中的抽运光和信号光功率分布,图 2 为信号光功率随抽运光功率的变化曲线,由此拟合得到该激光器的斜率效率  $\eta=77.9\%$ 。

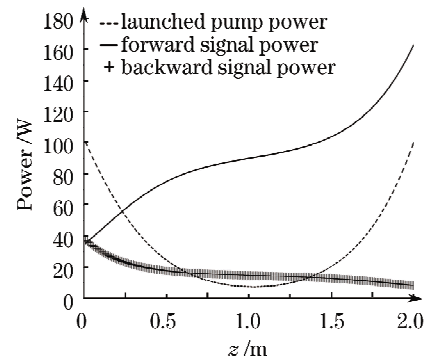


图 1 双端抽运功率均为 100 W 时光纤中的激光功率分布

Fig. 1 Laser power distributions in the fiber pumped from both ends with equal pump power of 100 W

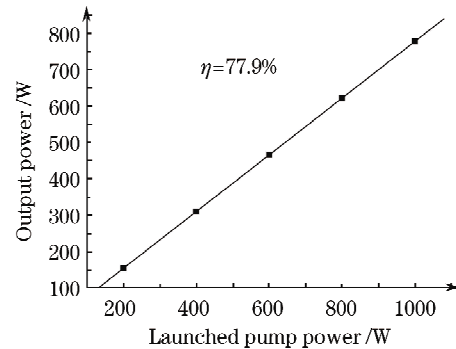


图 2 不同抽运功率时的输出功率

Fig. 2 Signal powers as a function of the pump power

表 1 求解稳态速率方程所用参数

Table 1 Parameters used for solving stationary rate equations

$A/\text{m}^2$	$N/\text{m}^{-3}$	$\lambda_p/\text{nm}$	$\lambda_s/\text{nm}$	$\Gamma_p$	$\Gamma_s$	$R_1$	$R_2$	$L/\text{m}$	$\alpha_p$	$\alpha_s$
$4 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{28}$	970	1100	0.01384	0.82	0.95	0.05	2	0.003	0.0004

## 3 热传导方程和等效热传导率法

高功率光纤激光器工作时产生的热效应可用经典的热传导方程来描述。稳态热传导方程及边界条件可表示为

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = q_v(r, z), \quad (0 < r < r_1) \quad (1)$$

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0, \quad (r_1 < r < R) \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T(0)}{\partial r} &= 0 \\ \frac{\partial T_1(r_1)}{\partial r} &= \frac{\partial T_2(r_2)}{\partial r} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{h}{k}(T_E - T) + \frac{\epsilon\sigma}{k}(T_{amb}^4 - T^4), \quad (4)$$

式中  $k$  为介质热传导率,  $h$  为光纤外表面对流换热系数,  $\epsilon$  为光纤表面发射率,  $T_E$  和  $T_{amb}$  分别为外界空气温度和周围辐射体温度。纤芯热源可写为

$$q_c(r, z) = \frac{\alpha [P^+(r, z) + P^-(r, z)]}{\pi r^2}, \quad (5)$$

式中  $\alpha$  是光纤对抽运光的吸收系数,  $\tau$  是光热转换系数。

掺镱的 DC-170-40-Yb 型 PCF 的结构如图 3 所示, 该 PCF 结构参数为: 纤芯直径  $40 \mu\text{m}$ ; 内包层直径  $170 \mu\text{m}$ , 空气孔直径与空气孔间距比为  $0.182$ ; 空气包层共有  $100$  个熔融石英桥, 其宽度为  $30 \mu\text{m}$ , 石英桥宽度与相邻石英桥之间的距离之比为  $0.1$ ; 外包层直径  $620 \mu\text{m}$ ; 涂覆层直径  $770 \mu\text{m}$ 。由于光纤内包层和空气包层结构很复杂, 模拟过程中计算量较大, 本文引入等效热传导率法对 PCF 结构进行简化处理。等效热传导率法的原理是: PCF 中内包层和空气包层都有空气和熔融石英, 将这两个区域等效为两种均匀介质, 其等效热传导率按照它们各自所占面积加权平均计算得到, 达到简化结构、减小计算复杂程度的目的。等效热传导率可表示为

$$k_{\text{eff}} = \frac{S_{\text{SiO}_2} k_{\text{SiO}_2} + S_{\text{air}} k_{\text{air}}}{S_{\text{SiO}_2} + S_{\text{air}}}, \quad (6)$$

式中  $k_{\text{air}}, k_{\text{SiO}_2}$  分别表示为对应空气、二氧化硅热传导率,  $S_{\text{air}}, S_{\text{SiO}_2}$  分别表示空气和二氧化硅在包层中所占的面积。

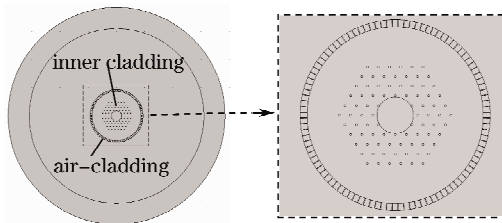


图 3 掺镱 PCF 结构

Fig. 3 Structure of Yb-doped PCF

为验证方法的准确性, 在抽运功率  $P_p = 400 \text{ W}$  时, 分别对二维(忽略轴向温度梯度影响)真实结构和简化结构进行数值模拟分析, 结果如图 4 所示。计算中所选用的参数为: 熔融石英、涂覆层和空气的导热系数分别为  $1.37 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}), 0.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  和

$0.0258 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}), \epsilon = 0.95, T_E = T_{amb} = 20 \text{ }^\circ\text{C}, h = 10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}), \alpha = 13 \text{ dB}/\text{m}$ 。从图 4 中可以看出, 真实结构和简化结构中沿径向的最大温度差为  $0.6 \text{ K}$  左右, 几乎没有差别, 表明等效的简化结构可以很好地反映真实结构的温度分布。在此基础上, 将这种方法从二维结构推广到三维结构, 可以得到光子晶体光纤的三维温度场分布。

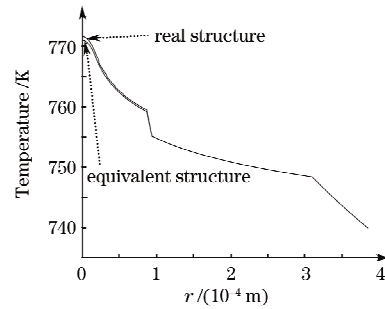


图 4 光纤真实结构和等效后结构 PCF 中沿径向的温度分布

Fig. 4 Temperature distributions along radial of the PCF with the real structure and the equivalent structure

#### 4 温度场和热应力场模拟结果及分析

不同抽运功率下 PCF 中温度场的数值模拟结果如图 5 所示。从图 5(a)中可以看出, 越靠近抽运端面

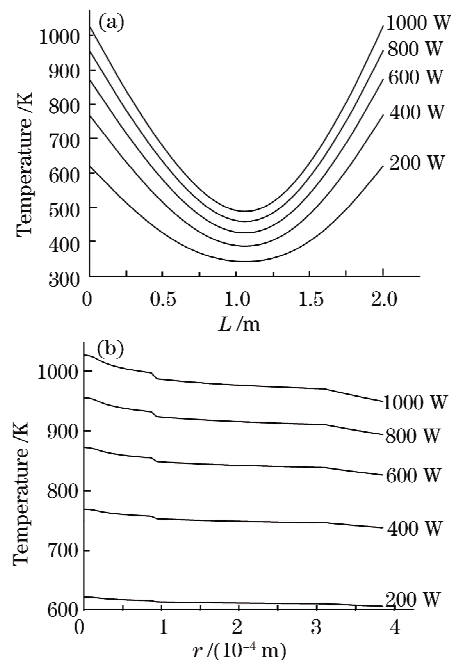


图 5 不同抽运功率下光纤中心轴向温度分布(a)和光纤端面径向温度分布(b)

Fig. 5 Temperature distributions along longitudinal at the fiber center (a) and along radial at the end-surface of the fiber (b) under different pump powers

处,温度越高。抽运功率为 1000 W 时,抽运端面温度达到 1028 K。从图 5(b) 可以看出,光纤端面处的温度高、径向温差小,在抽运功率为 400 W 时涂覆层表面的温度已经达到 738 K。可见,在端面抽运大功率 PCF 激光器的运转过程中,热效应已经成为很严重的问题。

PCF 中不均匀的温度分布,将导致光纤内外包层不均匀的热膨胀,从而产生热应力。从图 4 可以看出,在空气包层处的温度梯度最大,因此该处的热应力也最大,光纤的热应力损伤将首先在空气包层处出现。

由于光纤轴向长度远远大于径向尺寸,因此可以简化成平面应变问题,即认为光纤轴向应变为 0。当  $P_p=1000$  W 时,采用有限元方法数值模拟得到的 PCF 端面温度场及端面空气包层局部的径向热应力场分别如图 6 和图 7 所示。

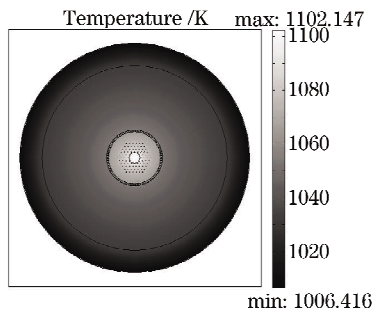


图 6 PCF 端面的温度场分布

Fig. 6 Temperature profile at the PCF end-surface

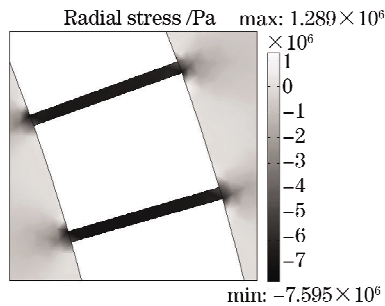


图 7 PCF 端面空气包层的径向应力场

Fig. 7 Radial stress field at the air-cladding of the PCF end-surface

模拟结果显示,在 PCF 截面上应力主要集中在空气包层的石英桥上,其径向和轴向应力最大值分别达到 7.6 MPa 和 33 MPa。轴向应力已经远远高于熔融石英的临界拉伸应力 10 MPa,表明此时 PCF 已经由弹性状态进入塑性状态。在此情况下,要保证 PCF 的长时间工作需要,必须降低其热应力。因此,避免 PCF 端面热损伤和降低其内外包层温度差产生的热应力,成为大功率 PCF 激光器研究中的关键问题之一。

## 5 强制对流换热的效果

大功率光纤激光器中,为了降低光纤温度,通常需对光纤采取一定的冷却措施,如常用的强制风冷或水冷换热技术。根据描述湍流强制对流传热关联的笛图斯—贝尔特(Dittus-Boelter)公式,针对光纤采取的轴流换热方式,风冷和水冷措施的传热系数  $h$  均可达到  $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。采用有限元方法,在换热系数  $h$  为  $10 \sim 1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  时,数值模拟了强制对流换热冷却措施下 PCF 中心轴向上的温度分布。图 8 给出了总抽运功率为 1000 W 且取不同对流换热系数时的模拟计算结果。可以看出,随着对流换热系数  $h$  的增大,PCF 的温度明显下降。但当  $h$  增大到一定程度[本文为  $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]后,单纯通过增大对流换热系数来降低 PCF 温度的效果变得不明显。图 9 为  $h=500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  时 PCF 端面的径向温度分布,此时 PCF 纤芯和涂覆层表面的最大温度分别为 505 K 和 409 K。

图 10 为  $h=500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  时光纤端面空气包层石英桥附近的热应力场,其径向和轴向应力最大值分别为 9.2 MPa 和 7.6 MPa,在熔融石英的弹性

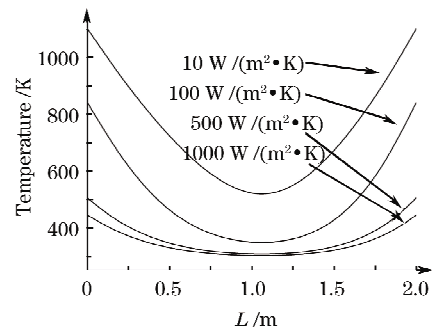


图 8 不同  $h$  时的 PCF 轴向温度分布 ( $P_p=1000$  W)

Fig. 8 Longitudinal temperature distributions at the fiber center with different heat transfer coefficients when  $P_p=1000$  W

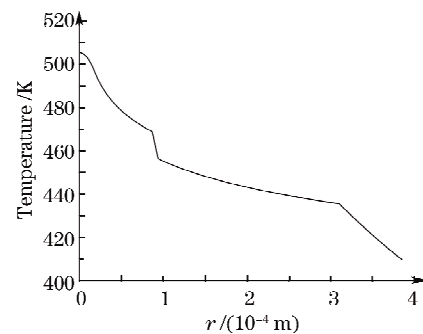


图 9 PCF 端面径向温度分布 [ $P_p=1000$  W,  $h=500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]

Fig. 9 Radial temperature distribution at the PCF end-surface when  $P_p=1000$  W and  $h=500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

工作范围内。由图中还可以看出光纤的径向和轴向应力均集中在石英桥处,因此对石英桥结构的优化设计有利于降低光纤热应力极值。可以看出,采取

一定强制对流换热措施后,光纤的温度和热应力明显降低,有效地克服了光纤端面热损伤和应力损伤等热问题。

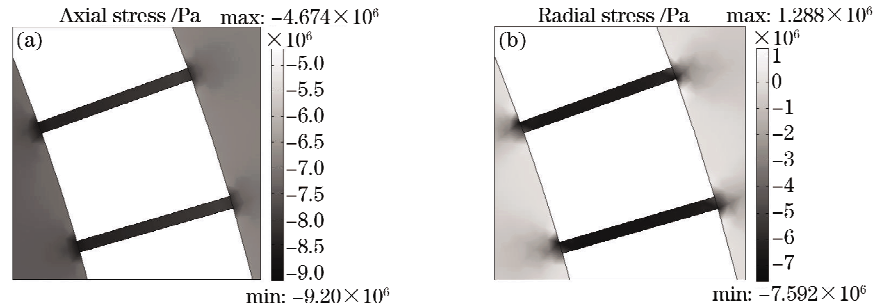


图 10 PCF 端面空气包层轴向应力场(a)和径向应力场(b)[ $P_p=1000\text{ W}$ ,  $h=500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]

Fig. 10 Distribution of axial stress (a) and radial stress (b) at the air-cladding of the PCF end-surface when  $P_p=1000\text{ W}$  and  $h=500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

在本文模拟条件下,PCF 中的最大热应力已达到 9.2 MPa,已非常接近石英光纤的弹性工作阈值 10 MPa,表明所选 PCF 已难以承受更大的抽运功率。因此,如要通过提高激光抽运功率以获得更大功率的激光运转,就必须减小 PCF 的热效应。一种可行的方法是减小 PCF 材料的掺杂浓度,同时增加其长度,将抽运过程中产生的热分散在更长的光纤中,从而降低光纤发热带来的热损伤问题。当然随着 PCF 长度的增加和抽运功率的提升,PCF 中的非线性效应也会逐渐增强。因此,在设计 PCF 激光器时,需要综合考虑 PCF 中的热效应和非线性效应,对其参数进行优化设计。

## 6 结 论

通过数值求解稳态速率方程得到了双端面对称抽运时 PCF 激光器的功率分布。用等效热传导率法建立了 PCF 简化热传导模型,并采用有限元方法数值模拟了 PCF 温度场和端面热应力场。分析了强制对流换热情况下光子晶体光纤的冷却效果。模拟结果显示,针对本文选取的 PCF,当抽运功率为 1000 W,对流换热系数为  $500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  时,PCF 纤芯和涂覆层表面的最大温度分别为 505 K 和 409 K,温度分布不均匀产生的光纤热应力极值为 9.2 MPa,接近熔融石英的抗张强度 10 MPa。通过继续增大对流换热系数的方法将很难降低 PCF 温度从而减小光纤热应力极值。

## 参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 J. C. Knight, T. A. Birks, R. F. Cregan *et al.*. Large mode

- area photonic crystal fibre[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(13): 1347~1348
- 3 T. Schreiber, S. Nolte, H. Zellmer *et al.*. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(7): 818~823
- 4 J. Limpert, O. Schmidt, J. Rothhardt *et al.*. Extended single-mode photonic crystal fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2715~2720
- 5 Liu Shengli, Li Yigang, Gao Yanli *et al.*. High-power widely tunable  $\text{Yb}^{3+}$ -doped photonic crystal fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1663~1667
- 刘胜利,李乙钢,高艳丽等.高功率宽调谐范围掺  $\text{Yb}^{3+}$  光子晶体光纤激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1663~1667
- 6 Shang Liang, Song Zhiqiang, Mao Qinghe. Experimental research on output characteristics of high power  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double clad fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 755~758
- 尚亮,宋志强,毛庆和.高功率掺镱光纤激光器输出特性的实验研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 755~758
- 7 Libo Li, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. Transverse-mode controlling of a large-mode-area multimode fiber laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9): 524~526
- 8 J. Limpert, T. Schreiber, A. Liem *et al.*. Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber laser in high power operation[J]. *Opt. Express*, 2003, **22**(11): 2982~2990
- 9 Xiong Yue, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Thermal effects in  $\text{Yb}$ -doped double-clad high power fiber lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(4): 495~499
- 熊悦,潘伟,罗斌等.掺镱双包层高功率光纤激光器热效应的理论研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(4): 495~499
- 10 Chen Zilun, Hou Jing, Jiang Zongfu *et al.*. Theoretical study on thermal effect in  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad high power fiber laser [J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(5): 544~547
- 陈子伦,侯静,姜宗福等.高功率掺镱双包层光纤激光器热效应理论研究[J]. *激光技术*, 2007, **31**(5): 544~547
- 11 Chen Jixin, Sui Zhan, Chen Fushen *et al.*. Thermal effect of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double clad fiber laser[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(3): 268~270
- 陈吉欣,隋展,陈福深等.掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器的热效应分析[J]. *激光技术*, 2006, **30**(3): 268~270
- 12 Cheng Xiaojin, Xu Jianqiu. Thermal and thermo-optical effects in high-power photonic crystal fiber lasers [J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(12): 124204-1~4
- 13 I. Kelson, A. Hardy. Optimization of strongly pumped fiber lasers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5): 891~897