

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0334-05

高功率双包层光纤激光器温度分布的有限元分析

陈子伦, 侯 静, 肖 瑞, 姜宗福

(国防科学技术大学光电科学与工程学院 定向能技术研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要 高功率双包层光纤激光器的热效应严重制约光纤激光器的输出功率和光束质量。首先通过求解热传导方程得到简化情况下的温度解析解;然后,利用有限元方法对不同情况下的温度分布进行模拟计算。通过模拟计算得到:外包层聚合物材料的热传导系数对光纤的温度分布影响较小,因而在近似计算时可以认为纤芯及内、外包层热传导系数相等;外包层表面的对流换热系数对温度分布影响较大,增大对流换热系数,可以有效地降低光纤激光器的热效应;外包层光纤半径的大小对光纤激光器的温度分布也有影响。所得的结果为设计实现千瓦级光纤激光器提供了参考。

关键词 激光器; 双包层光纤激光器; 温度分布; 有限元方法; 对流换热系数

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A

Finite Element Analysis of Temperature Distribution of High Power Double-Cladding Fiber Laser

CHEN Zi-lun, HOU Jing, XIAO Rui, JIANG Zong-fu

(*Institute of Directed Energy Technology, Photoelectric Science and Engineering School, National University of Defence Technology, Changsha, Hunan 410073, China*)

Abstract Thermal effects of high power double-cladding fiber laser severely limit the output power and beam quality. Firstly, temperature distribution in high power double-cladding fiber laser was analyzed by thermal conductive equation. Secondly, temperature distribution was simulated by finite element methods, at different conditions. Results indicate that temperature distribution was hardly affected by thermal conductivity of polymer cladding materials, so, when calculating the heat transfer coefficient of the core, the first and the second cladding can be seen as identical; the temperature distribution was great affected by heat transfer coefficient of cladding surface, increasing the heat transfer coefficient can reduce the thermal effects of fiber laser; the cladding's radius also can affect the temperature distribution. Conclusions are useful for designing kW level fiber laser.

Key words lasers; double-cladding fiber laser; temperature distribution; finite element methods; heat transfer coefficient

1 引 言

光纤激光器由于其高功率密度、高光束质量、高转换效率、工作物质的热负荷小、致冷要求低、体积小、重量轻、结构简单、使用方便等优点和特点而得以迅速发展。应用也从光通信扩展到激光加工、切割、焊接、激光打标、图像显示、生物工程、医疗卫生等领域^[1]。目前,千瓦级的光纤激光器已经研制成功^[2,3],当光纤激光器工作在低功率时能有效散失抽运光所沉积的热量,但是随着输出功率的不断提

高,热效应严重制约着光纤激光器的输出功率和光束质量,因此热效应是高功率光纤激光器必须考虑的因素之一^[4~9]。

目前研究高功率光纤激光器热效应常用的方法是简化后的解析计算^[3~7]或者数值计算^[8,9]。在这些文献中,都假定光纤纤芯和内、外包层的热传导系数相同,而实际上纤芯和内包层的基质都是二氧化硅材料,可以认为热传导系数相同,而外包层的材料一般为聚合物材料,热传导系数要比二氧化硅的小。

作者简介: 陈子伦(1978—),男,山东潍坊人,博士研究生,主要从事高功率光纤激光器和放大器的研究。

E-mail: zilun2003@hotmail.com

导师简介: 姜宗福(1963—),男,湖南岳阳人,教授,博士生导师,主要从事高功率固体激光器和气动光学方面的研究。

E-mail: jiangzongfu@yahoo.com.cn

用有限元分析软件可以模拟计算实际情况下的光纤温度分布。

本文首先对光纤激光器的温度分布进行简单的理论分析,通过有限元方法,对不同包层材料的热传导系数、不同表面对流换热系数、不同包层直径情况下的光纤激光器的温度分布进行了详细的模拟。

2 光纤激光器温度分布的理论分析

两端抽运下的光纤激光器结构示意图见图 1。其中 $P_p^+(0), P_p^-(L)$ 表示前后两端面的抽运光功率, R_1, R_2 是光纤两端光栅对信号光的反射率。为简化计算,取各种形状的内包层等效为圆形内包层,如图 2 所示, r_1, r_2, r_3 分别表示双包层光纤的纤芯和内、外包层半径。

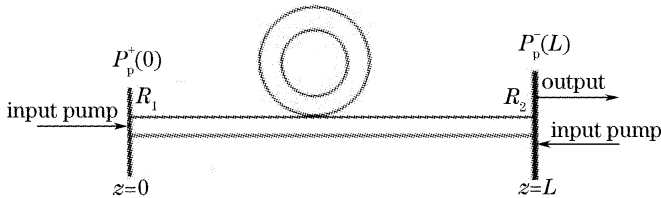


图 1 双端抽运下光纤激光器的结构示意图

Fig 1 Schematic illustration of fiber laser under two-end pump

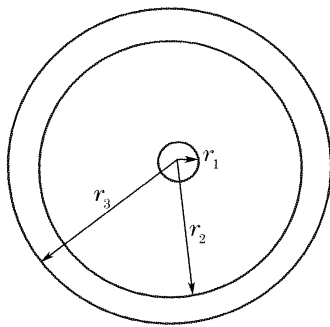


图 2 双包层光纤的截面图

Fig. 2 Section cross of double cladding fiber

高功率光纤激光器工作产生的热效应可用经典的热传导方程来描述。在纤芯内由于掺杂离子吸收抽运能量而受到热源函数 $Q(r, z)$ 的作用,在内、外包层区域中没有热源,可以把内外包层等效为一个包层,又因为纵向的热传导只对激光介质中受抽运端面附近很小的区域有影响,因此在稳态下可将热传导方程简化成如下形式^[4,5]:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T_1(r, z)}{\partial r} \right] = -\frac{Q(r, z)}{\kappa}, & 0 \leq r \leq r_1 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T_2(r, z)}{\partial r} \right] = 0, & r_1 \leq r \leq r_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中 r 表示光纤内任一点与中心轴 z 的距离; κ 是热导率; T_1 和 T_2 分别是纤芯和包层区域的温度。边界条件满足^[4,5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \\ T_1 \Big|_{r=r_1} = T_2 \Big|_{r=r_1}, \\ \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_1}, \\ \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_3} = \frac{h}{\kappa} [T_0 - T_2(r=r_3)], \end{cases} \quad (2)$$

式中 h 是对流传热系数, T_0 表示室温。

由于抽运源是半导体激光器,因此纤芯的热源函数是高斯型的,在双向抽运的情况下, $Q(r, z)$ 可表示为^[5]

$$Q(r, z) = \frac{2\alpha \eta_h P_p(z)}{\pi \omega_p^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_p^2}\right), \quad (3)$$

其中

$$P_p(z) = P_p^+(z) + P_p^-(z) = P_p^+(0) \exp(-\alpha z) + P_p^-(L) \exp[-\alpha(L-z)], \quad (4)$$

表示正向传输的抽运光和反向传输的抽运光在光纤 z 处抽运功率之和。 α 表示抽运光的总损耗,其中包括吸收损耗和散射损耗, η_h 为热转换系数, ω_p 为抽运高斯半径, L 为光纤长度,假使抽运光全部耦合入纤芯中, ω_p 近似等于纤芯半径。

将(3)式代入上面的热传导公式(1)和边界条件公式(2),得到双包层光纤激光器温度分布的解析表达式:

$$\begin{cases} T_1 = T_h + \frac{\alpha_a \eta_h P_p(z)}{4\pi\kappa} \times \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m 2^m}{m!} \times \left[\frac{(r/r_1)^{2m} - 1}{m} + 2\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) - \frac{2\kappa}{hr_2} \right], & (0 \leq r \leq r_1) \\ T_2 = T_h + \frac{\alpha_a \eta_h P_p(z)}{2\pi\kappa} \times \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m 2^m}{m!} \times \left[\ln\left(\frac{r}{r_2}\right) - \frac{\kappa}{hr_2} \right], & (r_1 \leq r \leq r_3) \end{cases} \quad (5)$$

其中解析计算所用的参数如下^[5,8]: $P_p^+(0) = 500 \text{ W}$, $P_p^-(L) = 500 \text{ W}$, $\lambda_s = 1086 \text{ nm}$, $\lambda_p = 976 \text{ nm}$, $L = 20 \text{ m}$, $r_1 = 10 \text{ }\mu\text{m}$, $r_2 = 200 \text{ }\mu\text{m}$, $r_3 = 280 \text{ }\mu\text{m}$, $\eta_h = 1 - \lambda_p/\lambda_s$, $\alpha = 1.4 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$, 光纤表面与空气的自由对流传热系数为 $h = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 光纤的热传导系数 $k = 1.38 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。解析计算的结果如图 3, 图 4 所示,从图中可以看出轴向温度变化范围较大,而径向温度变化较小。

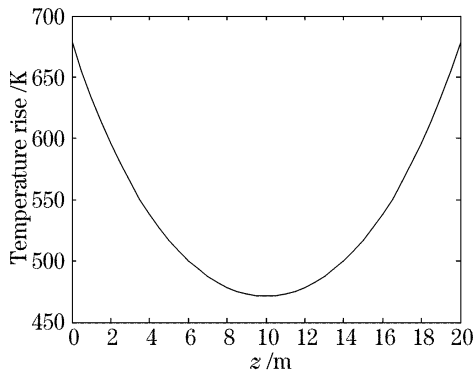


图 3 沿轴线方向上的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution along the fiber

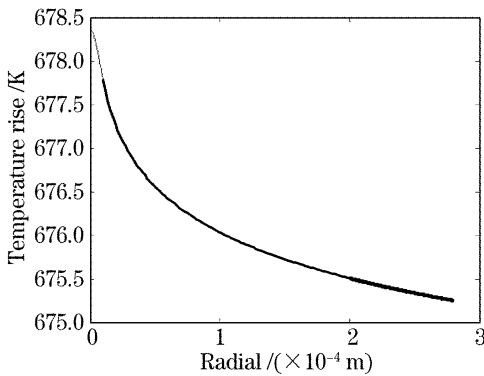


图 4 沿径向的端面温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in end-surface as a function of radial coordinate

3 光纤激光器温度分布的有限元分析

在有限元分析中,我们认为热量只在光纤纤芯中存在,且在径向的分布为高斯分布;在包层区域中没有热源,又因为纤芯和内包层的基质材料都是二氧化硅,可认为纤芯和内包层的热传导系数相等,外包层的材料是聚合物材料,其热传导系数比二氧化硅的小。下面将对高功率光纤激光器的温度分布进行详细的有限元分析。

3.1 相同参数下的温度对比

在与理论计算相同的近似条件下(即纤芯、内外包层热传导系数相同),有限元模拟分析结果如

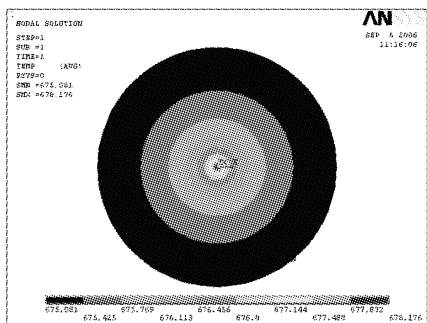


图 5 抽运端面的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution in end-surface

图 5~图 7 所示,从图中可以看出,在相同的近似条件下,有限元模拟的结果和解析解的结果相同,可以认为有限元的编程是正确的。

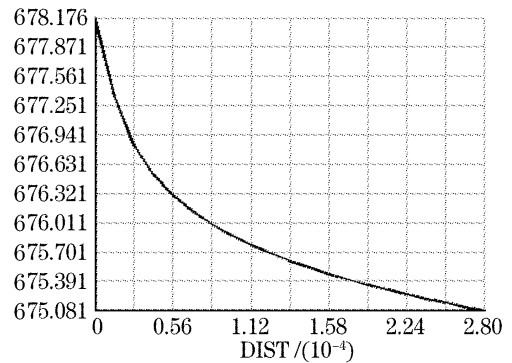


图 6 ANSYS 模拟沿径向的端面温度分布

Fig. 6 Temperature distribution in end-surface as a function of radial coordinate by ANSYS

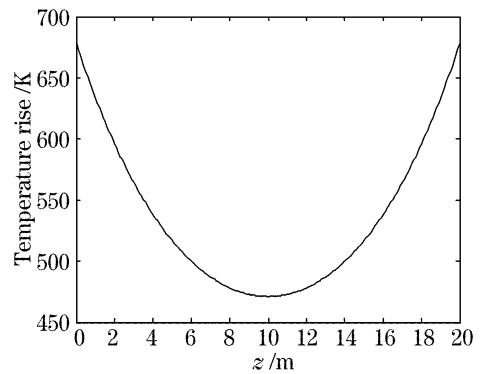


图 7 ANSYS 模拟的沿轴线方向上的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution along the fiber by ANSYS

3.2 外包层热传导系数对温度分布的影响

当光纤外包层的热传导系数取 $k_3 = 0.138 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $k_3 = 0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时,其他参数与理论计算时的相同。有限元模拟的结果如图 8~图 10 所示,从图 10 中可以看出随着包层热传导系数的减小,光纤的整体温度有所上升,但是上升的幅度不大,因此在近似计算的情况下,可以认为纤芯、内外包层的热传导系数相同。

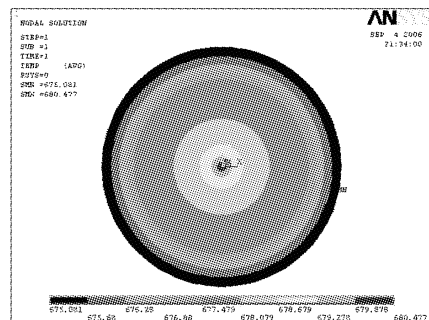


图 8 抽运端面的温度分布 $k_3 = 0.138 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Fig. 8 Temperature distribution in end-surface $k_3 = 0.138 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

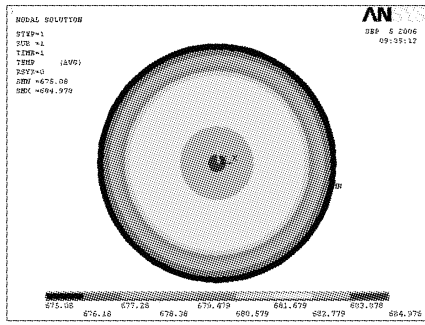


图 9 抽运端面的温度分布 $k_3=0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 Fig. 9 Temperature distribution in end-surface $k_3=0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

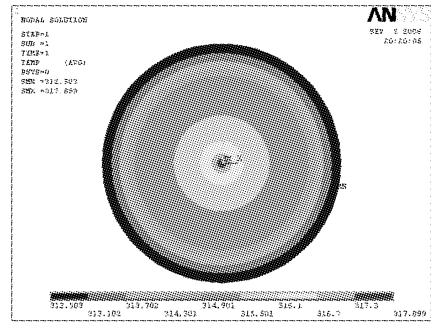


图 12 抽运端面的温度分布 $h=300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
 Fig. 12 Temperature distribution in end-surface $h=300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

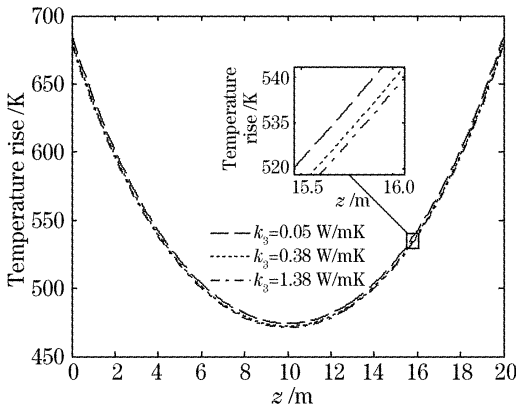


图 10 不同热传导系数下光纤沿轴线方向的温度分布
 Fig. 10 Temperature distribution along the fiber by ANSYS at different thermal conductivity

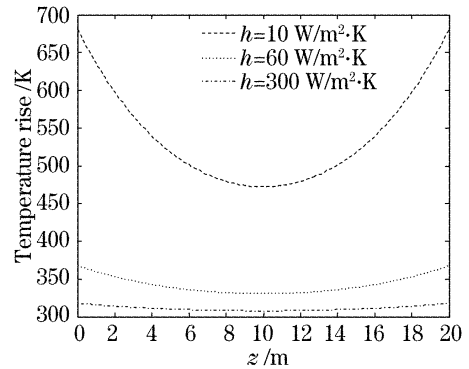


图 13 不同对流换热系数下光纤沿轴线方向的温度分布
 Fig. 13 Temperature distribution along the fiber by ANSYS at different heat transfer coefficient

3.3 不同对流换热系数对温度分布的影响

光纤表面与空气的自由对流换热系数为 $h=60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 和 $h=300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,其他参数与理论计算时相同。有限元分析的结果如图 11~图 13 所示。通过图中可以看出,光纤表面与空气的自由对流换热系数对光纤的温度影响很大,当对流换热系数由 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 增加到 $60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时光纤抽运端面的温度由 680 K 下降到 370 K 。在设计高功率光纤激光器时,适当的风冷和水冷可有效地降低光纤激光器的温度分布。

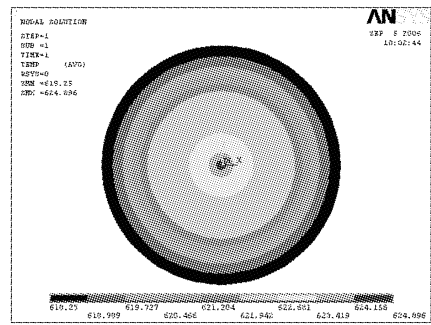


图 14 $r_3=330 \mu\text{m}$ 时抽运端面的温度分布
 Fig. 14 Temperature distribution in end-surface $r_3=330 \mu\text{m}$

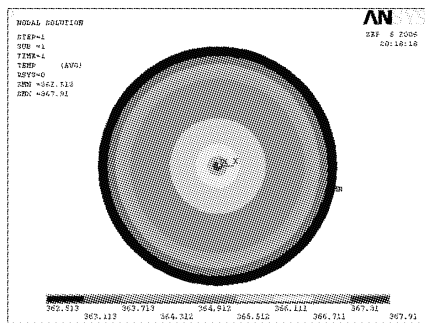


图 11 抽运端面的温度分布 $h=60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
 Fig. 11 Temperature distribution in end-surface $h=60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

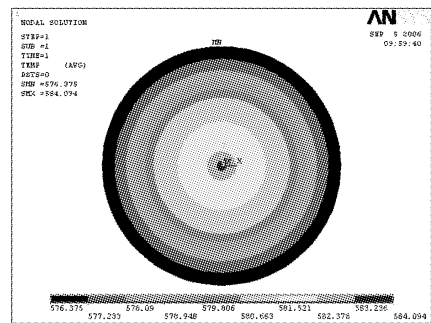


图 15 $r_3=380 \mu\text{m}$ 时抽运端面的温度分布
 Fig. 15 Temperature distribution in end-surface $r_3=380 \mu\text{m}$

3.4 不同光纤包层直径对温度分布的影响

其他参数不变,当光纤的包层直径为 $r_3=330\ \mu\text{m}$ 和 $r_3=380\ \mu\text{m}$ 时,通过有限元方法得到的光纤温度分布如图 14~图 16 所示。从图中可以看出不同包层直径对温度场也会产生影响,这是因为包层直径加大,也即增加了光纤的表面积,从而增加了光纤表面的热扩散。

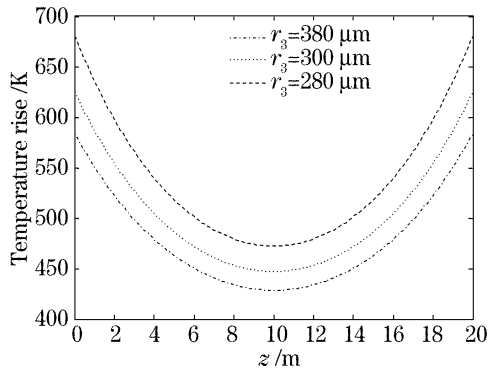


图 16 不同外包层直径下光纤沿轴线方向的温度分布

Fig. 16 Temperature distribution along the fiber by ANSYS at different cladding radius

4 结 论

首先在假定纤芯、内外包层热传导系数相同的情况下,得到光纤的温度分布解析解,然后利用有限元方法对不同情况下的温度分布进行了模拟。通过模拟得到:外包层聚合物材料的热传导系数对光纤的温度分布影响不是很大,在近似计算时可以认为纤芯、内外包层热传导系数相等;外包层表面的对流换热系数对温度分布影响很大,适当增大对流换热

系数,可以有效地降低光纤的热效应;外包层光纤的半径也会影响光纤的温度分布。

参 考 文 献

- 1 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang *et al.*. Recent progress of high-power fiber lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(2): 135~138
楼祺洪,周 军,朱健强等. 高功率光纤激光器研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(2): 135~138
- 2 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fibre laser with 1 kW of continuous wave output power [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(8): 470~471
- 3 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 4 D. C. Brown, H. J. Hoffman. Thermal, stress, and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(2): 207~217
- 5 Xiong Yue, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Thermal effects in Yb-doped double-clad high power fiber lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(4): 495~499
熊 悦,潘 炜,罗 斌等. 掺 Yb³⁺ 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
- 6 Chen Jixin, Sui Zhan, Chen Fushen *et al.*. Thermal effect of Yb³⁺-doped double clad fiber laser [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(3): 268~270
陈吉欣,隋 展,陈福深等. 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的热效应分析 [J]. *激光技术*, 2006, **30**(3): 268~270
- 7 Gao Xuesong, Gao Chunqing, Lin Zhifeng *et al.*. Numerical analysis of the temperature distribution of high power double cladding fiber laser [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2005, **25**(11): 998~1002
高雪松,高春清,林志锋等. 高功率双包层光纤激光器温度分布的数值分析 [J]. *北京理工大学学报*, 2005, **25**(11): 998~1002
- 8 Y. Wang, C. Q. Xu, H. Po. Thermal effects in kilowatt fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1): 63~65
- 9 Y. Wang. Heat dissipation in kilowatt fiber power amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(6): 731~740