

文章编号: 1001-3806(2014)03-0347-05

## 透镜组耦合 793nm LD 抽运掺 $\text{Tm}^{3+}$ 光纤激光器

张 茂,任 钢\*,刘文兵,夏惠军,刘全喜,钟 鸣  
(西南技术物理研究所,成都 610041)

**摘要:** 为了实现  $2\mu\text{m}$  激光高效输出,采用 793nm 激光二极管端面抽运掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器的方法设计了抽运光耦合系统,分析了掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器的交叉弛豫效应及热效应,并进行了相关的实验研究。结果表明,获得耦合系统的耦合效率为 84%;当入纤抽运光功率为 70W 时,获得 34W 激光输出,斜率效率为 59%,中心波长为 2001.2nm,光束质量  $M^2 \leq 1.2$ 。该研究结果对掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器的设计具有指导意义。

**关键词:** 激光器;掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器;半导体激光器;透镜组耦合系统;热效应

**中图分类号:** TN242;TN253 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.03.013

## $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber lasers pumped by double lens coupling 793nm LD

ZHANG Mao, REN Gang, LIU Wenbing, XIA Huijun, LIU Quanxi, ZHONG Ming  
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** To achieve  $2\mu\text{m}$  laser output, 793nm LD face-pumping  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber laser was adopted. Double lens coupling system was designed. Cross relaxation of  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber laser and thermal effect were analyzed, and then the related experiments were carried out. The results show that coupling efficiency of coupling system is 84%. When the pump power is 70W, the output power is 34W with slop efficiency of 59%, central wavelength of 2001.2nm and  $M^2$  of less than 1.2. The results are helpful to design  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber lasers.

**Key words:** lasers;  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber laser; laser diode; double lens coupling system; thermal effect

### 引 言

掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器能输出  $2\mu\text{m}$  左右的激光,工作在入眼安全的波段(大于  $1.4\mu\text{m}$ ),且处于大气窗口内,还存在几个窄的水吸收峰,在遥感、探测、测距、雷达、空间光通信、医疗、军事等方面有着广泛的应用,近年来成为国内外研究的热点<sup>[1-3]</sup>。793nm 激光抽运掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器是获得高功率  $2\mu\text{m}$  激光的有效途径。2009 年,MOULTON 等人报道了输出 885W 的多模掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器<sup>[4]</sup>。目前,掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器的最高输出功率是 Q-Peak 公司在 2010 年 Photonics West 会议上报道的超过 1kW 的输出<sup>[5]</sup>。2009 年,哈尔滨工业大学的 ZHANG 等人实现了全光纤掺  $\text{Tm}^{3+}$  连续激光 39.4W 输出<sup>[6]</sup>。本文中采用透镜组耦合 793nm 激光二极管(laser diode,

LD)抽运掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤,最终获得了抽运光耦合系统的耦合效率为 84% 左右;基于光纤光栅和光纤输出垂直端面构成谐振腔,掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器最大输出激光 34W,斜率效率为 59%,中心波长 2001.2nm,光束质量  $M^2 \leq 1.2$ 。

### 1 理论分析

#### 1.1 抽运方案

$2\mu\text{m}$  掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器的抽运方案有: $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_4$ ,  $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_5$ ,  $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ , 793nm 抽运光所对应的能级跃迁为  $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_4$ , 在较高掺杂浓度时,相邻粒子间存在交叉弛豫效应( $^3\text{H}_4$ ,  $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ ,  $^3\text{F}_4$ ),如图 1 所示,吸收一个 793nm 抽运光子,可以产生两个  $2\mu\text{m}$  激光光子,理论最高量子效率为 200%<sup>[7]</sup>。

图 2 是在不计算交叉弛豫和计算交叉弛豫效应时抽运光沿光纤的分布。交叉弛豫效应对抽运光的吸收有重要的影响,计算交叉弛豫时的最佳光纤长度远远短于不计算交叉弛豫时的情况。较短的光纤

作者简介:张 茂(1987-),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器的研究。

\* 通讯联系人。E-mail:rgxws4@126.com

收稿日期:2013-07-15;收到修改稿日期:2013-08-14

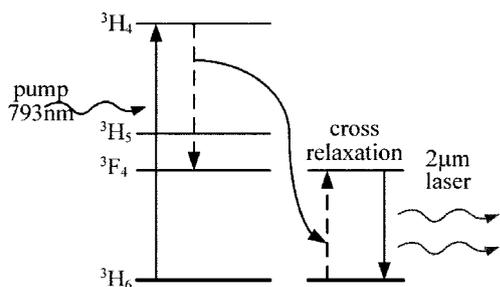


Fig. 1 Cross relaxation process (<sup>3</sup>H<sub>4</sub>, <sup>3</sup>H<sub>6</sub> → <sup>3</sup>F<sub>4</sub>, <sup>3</sup>F<sub>4</sub>) of Tm<sup>3+</sup>-doped fiber laser

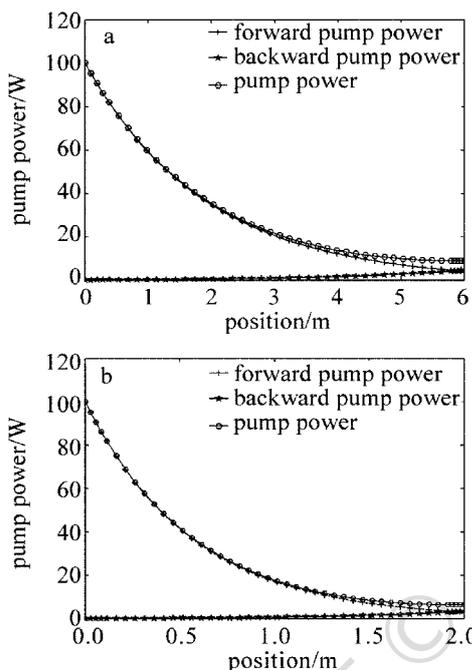


Fig. 2 The distribution of pump power along fiber  
a—ignoring cross relaxation b—accounting for cross relaxation

可以有效减小光纤激光器的非线性效应,因此优化 Tm<sup>3+</sup> 浓度,提高 Tm<sup>3+</sup> 之间的交叉弛豫过程,可以有效实现掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤激光器的高功率、高效率运转。

793nm 抽运光沿光纤长度方向被铽光纤吸收,使 Tm<sup>3+</sup> 的 <sup>3</sup>H<sub>6</sub> 与 <sup>3</sup>F<sub>4</sub> 能级之间发生粒子数反转,然

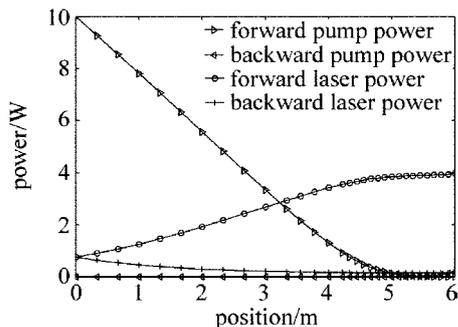


Fig. 3 The distribution of pump power and signal power along fiber with 6m of fiber length

后通过受激发射,产生 2 μm 激光。图 3 为光纤长为 6m 时,光纤中抽运光和产生的激光沿光纤分布。随着抽运光功率的减小,2 μm 激光功率逐渐增加,在 6m 左右时,输出激光功率达到最大,当继续增加光纤长度,输出激光并不随着增加,甚至减小,这是由于此时的增益小于损耗。影响光纤最佳长度的因素较多,实际工程应用中应根据具体参量,结合实验研究确定光纤的最佳长度。

### 1.2 抽运光耦合系统

高功率掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤激光器关键技术之一是抽运光的高效耦合。抽运方式有端面抽运和侧面抽运两种,按抽运光具体耦合方式端面抽运又分为透镜组耦合、直接熔接耦合和锥导管耦合,其中透镜组耦合是实验室常用的耦合方式之一,特点是结构简单、器件分离、容易实现等<sup>[8]</sup>。

本文中抽运光耦合系统采用双平凸透镜组,具有较小的系统球差,图 4 为耦合效率测试示意图。

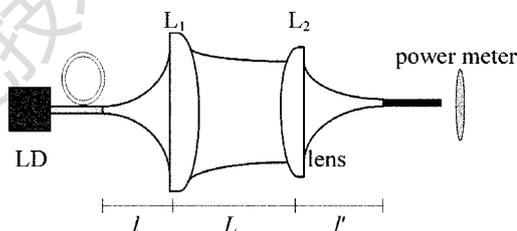


Fig. 4 Schematic diagram of double lens coupling efficiency measurement

不考虑透镜厚度和像差时,高斯光束经耦合透镜组的 ABCD 变换矩阵  $M$  为<sup>[9]</sup>:

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $f_1, f_2$  分别为平凸透镜 L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> 的焦距;透镜 L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> 之间的距离为 L;  $l$  是尾纤输出端到 L<sub>1</sub> 距离,  $l'$  为 L<sub>2</sub> 到耦合光纤输入端的距离。设光束束腰  $w_0$  位于抽运源输出尾纤端面处,可以由传输矩阵  $M$  得到经过耦合透镜组的出射光束束腰半径  $w_0'$  和束腰位置  $l'$ :

$$w_0' = w_0 \cdot \left[ \left( \frac{\varphi \pi w_0^2}{\lambda} \right)^2 + \left( 1 - \frac{L}{f_2} - \varphi \cdot l \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (2)$$

$$l' = \frac{\varphi \cdot \left(1 - \frac{L}{f_1}\right) \cdot \left[l^2 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda}\right)^2\right] + l \cdot (2L\varphi - 1) - L \cdot \left(1 - \frac{L}{f_2}\right)}{\left[\left(1 - \frac{L}{f_2}\right) - \varphi \cdot l\right]^2 + \varphi^2 \cdot \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda}\right)^2} \quad (3)$$

式中,  $\varphi = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2}$ 。

要使抽运光通过透镜组系统后能够高效地耦合进光纤,需要满足激光束腰直径小于掺杂光纤内包层直径( $d_{\text{laser}} < d_{\text{clad}}$ );而且激光束的发散角也要小于光纤内包层的孔径角( $\theta_{\text{laser}} < 2\text{arcsin}d_{\text{NA}}$ ,其中, $d_{\text{NA}}$ 是数值孔径),满足激光在光纤中传输的全反射条件。

设定抽运源采用 Nlight 公司的 NL-P4S100-0793 型半导体激光器,带尾纤输出。耦合透镜由西格玛公司提供,型号为 SLB-05-08P 和 SLB-06-10P 的 BK7-平凸透镜。在 ZEMAX 软件里采用物理光学方法仿真,优化透镜间的距离,可以得到该耦合系统的耦合效率为 94.8%,图 5 是 ZEMAX 仿真结果。

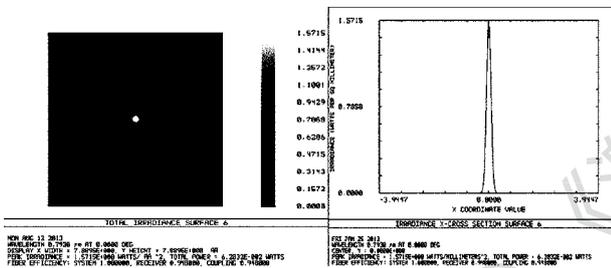


Fig. 5 The simulation results of coupling system using ZEMAX

### 1.3 热效应分析

掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤激光器属于准二、三能级系统,热效应会严重影响输出激光功率、斜率效率等。抽运光输入端热效应最集中,图 6 是取 Nufem 公司型号为 LMA-TDF-25/400 的铥光纤,将内包层等效为圆形,抽运光功率为 100W 时,光纤输入端横截面的温度分布。纤芯温度最高,与外包层温度相差几个开尔文,但是外包层可承受的温度较低(423K ~ 473K),长期稳定工作,应低于 353K,在较高功率运

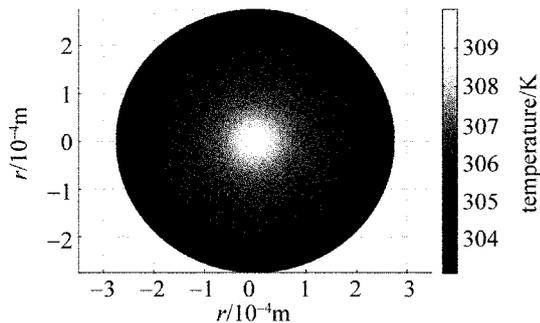


Fig. 6 The temperature distribution of the cross section of fiber

转时必须对光纤进行散热处理<sup>[10]</sup>。

在不同的冷却条件下,具有不同的换热系数。图 7 是换热系数  $h$  分别为  $200\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $1000\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $2000\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  和  $3000\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 、抽运光功率为 100W 时,光纤端面的温度分布。当采用水自然对流冷却时,换热系数  $h$  取值范围为  $200\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \sim 1000\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ <sup>[11]</sup>,因此能够满足对掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤的有效冷却。

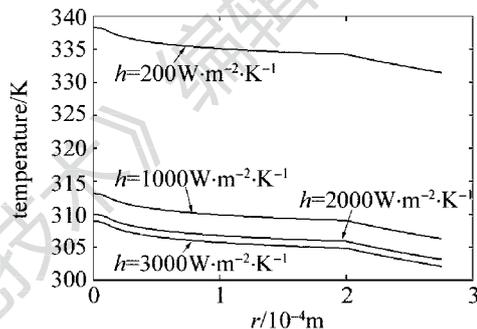


Fig. 7 Radial temperature distribution at input end with different heat transmission coefficient

## 2 实验结果与分析

### 2.1 抽运光耦合系统实验

实验中所用抽运源是 Nlight 公司的 NL-P4S100-0793 型半导体激光器,输出抽运光波长为 793nm,尾纤直径 400 $\mu\text{m}$ ,数值孔径  $d_{\text{NA}} = 0.22$ 。选用的耦合透镜是西格玛公司的 BK7-平凸透镜,型号为 SLB-05-08P 和 SLB-06-10P,焦距分别为 8mm 和 10mm。利用一段 22.4cm 无源光纤作为测试光纤,其参量与 Nufem 公司型号为 LMA-TDF-25/400 的铥光纤基本相同,内包层直径为 400 $\mu\text{m}$ 。

分别测量透过透镜组的激光功率  $P_i$ 、耦合光纤输出端激光功率  $P_o$ ,可以得到透过透镜组耦合效率为  $\eta = (P_o/P_i) \times 100\%$ 。图 8 为通过透镜组耦合输入与输出激光功率关系,利用最小二乘法拟合可以得到系统的耦合效率为 84%。由于透镜组耦合实验对调节装置精度要求比较高,耦合激光光斑与光纤输入端之间难以避免地存在横向、纵向和角度等误差,因此实验结果与仿真有一定的差距。如果改进调节装置的调节精度,可以获得更高的耦合效率。

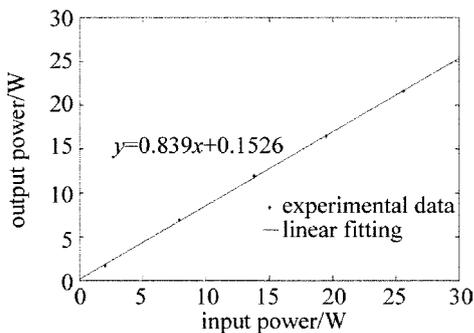


Fig. 8 Output power varying with the input laser power in the experiment of double lens coupling system

## 2.2 掺 $Tm^{3+}$ 光纤激光器实验

793nm 激光抽运掺  $Tm^{3+}$  光纤激光器, 对应的跃迁能级为  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_4$ , 当掺  $Tm^{3+}$  浓度较高时, 相邻粒子间存在交叉弛豫效应, 可以获得较高的量子转换效率。实验中所用铥光纤为 Nufern 公司提供的 LMA-TDF-25/400 型号的光纤, 内包层为八边形, 具体参量如表 1 所示。

Table 1 Parameters of  $Tm^{3+}$ -doped fiber

core diameter	25 $\mu m$
clad diameter	400 $\mu m$
coating diameter	550 $\mu m$
$Tm^{3+}$ -doped mass fraction	0.02
length	$\approx 3m$
core $d_{NA}$	0.1
clad $d_{NA}$	0.46
absorption coefficients	1.8 dB/m

图 9a 为掺  $Tm^{3+}$  光纤激光器实验装置原理图, 图 9b 是实验系统实物图。抽运光由透镜组耦合进入光纤光栅的一端, 光纤光栅的另一端与掺  $Tm^{3+}$  光纤直接熔接, 光纤光栅对 793nm 抽运光高透,  $2\mu m$  激光高反; 掺  $Tm^{3+}$  光纤另一端面的菲涅耳反射作为输出耦合; 最后, 经滤波器滤除剩余的 793nm 抽运光, 得到  $2\mu m$  左右激光输出。其中, 光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 由加拿大 Teraxion 公司提供, 纤芯和外包层直径分别为 25  $\mu m$ , 400  $\mu m$ , 与掺  $Tm^{3+}$  光纤尺寸匹配。

实验的关键是要保证抽运光的高效耦合, 以及对掺杂光纤的冷却。采用透镜组耦合抽运光的方式, 采用了分离器件, 实验中对调节精度要求比较高。针对光纤端面热积累比较多, 容易烧毁, 实验过程中应避免光纤端面损伤、污染, 以免使光纤的毁伤阈值降低。图 10 是分别采用水冷和冰水混合物冷却掺  $Tm^{3+}$  光纤时, 输出激光随吸收的抽运光功率的

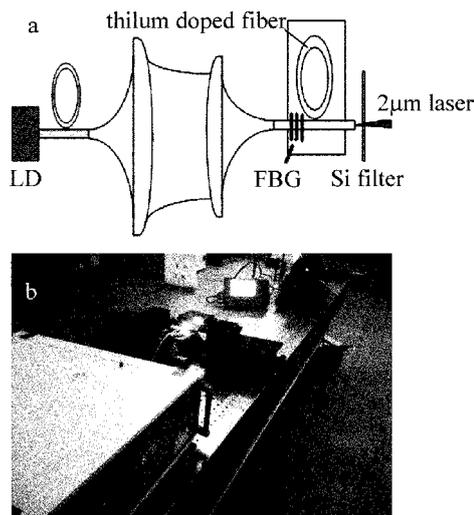


Fig. 9 Experiment setup of  $Tm^{3+}$ -doped fiber lasers of double lens coupling pump laser

a—schematics of the experimental setup b—experimental photo

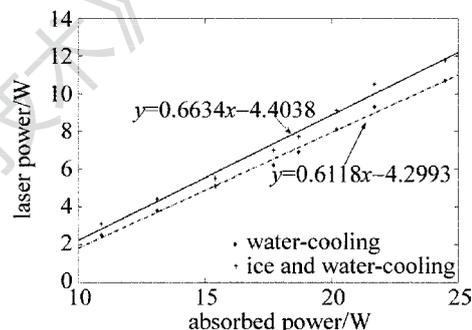


Fig. 10 Output power varying with the absorbed power with different cooling conditions

变化。当温度较低时, 输出的功率和斜率效率都获得了提高。

图 11 为输出的  $2\mu m$  激光功率随吸收的抽运光的变化关系。得到该掺  $Tm^{3+}$  光纤激光器的阈值功率约为 8.7W, 在入纤抽运光功率为 70W 时, 最高输出 34W、 $2\mu m$  左右激光, 同时也存在 8W 抽运光未被吸收。表明适当增加掺  $Tm^{3+}$  光纤长度, 抽运光功率吸收更充分, 可以获得更高功率的  $2\mu m$  激光输出。由图 10 可知, 相对吸收的抽运光功率, 该掺

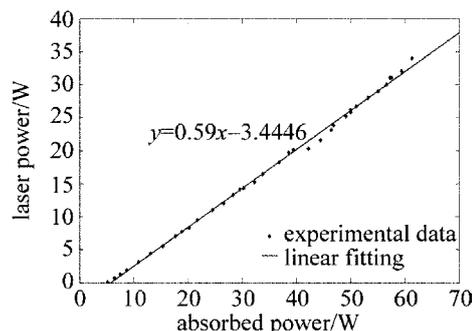


Fig. 11 Output power of  $2\mu m$  laser varying with the absorbed power

Tm<sup>3+</sup> 光纤激光器斜率效率为 59%，整个系统的光光转换效率为 34%。当输出激光功率达到最大时，效率并没有下降的趋势，如果进一步增加抽运光功率，能获得更高功率的 2μm 激光输出。输出激光的中心波长为 2001.2nm，光束质量为  $M^2 \leq 1.2$ 。该掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤激光器具有进一步优化的空间，掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤太短，抽运光未能充分吸收；掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤激光器的热效应对输出激光功率影响较大。另外，抽运光耦合系统也是限制输出功率的重要影响因素。

### 3 小 结

对透镜组耦合系统和掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤激光器进行了研究，并对平凸透镜组耦合抽运光的方式进行了分析，讨论了掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤激光器的交叉弛豫效应以及热效应。实验中测得耦合系统透过透镜组的耦合效率达到 84%，最终掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤激光器系统输出激光 34W，斜率效率为 59%，中心波长 2001.5nm，光束质量  $M^2 \leq 1.2$ 。实验研究表明，冷却温度较低时，输出激光功率和斜率效率都有所提高。可以从以下几个方面提高该掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤激光器的性能，即适当增加铈光纤长度；改进冷却系统；提高耦合系统效率。该掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤激光器输出功率仅受限于抽运光功率，如果增加抽运光功率，可以输出更高功率的 2μm 激光。

### 参 考 文 献

[1] HAN K, MA Y X, WANG X L, *et al.* Progress of high power tm-

doped fiber laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010 (10): 101406 (in Chinese).

- [2] WU J F, YAO Z D, ZONG J, *et al.* Highly efficient high-power thulium-doped germanate glass fiberlaser [J]. Optics Letters, 2007, 32 (6): 638-640.
- [3] CHEN L, LU P, ZHANG L, *et al.* Tm-Ho co-doped all fiber laser at 2μm [J]. Laser Technology, 2013, 37(2): 195-197 (in Chinese).
- [4] MOULTON P F, RINES G A, SLOBODTCHIKOV E V, *et al.* Tm-doped fiber lasers: fundamentals and power scaling [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(1): 85-92.
- [5] EHRENREICH T, LEVEILLE R, MAJID I, *et al.* 1kW, all-glass Tm: fiber laser [J]. SPIE, 2010, 7580: 16.
- [6] ZHANG Y J, SONG Sh F, TIAN Y, *et al.* LD-clad-pumped all-fiber Tm<sup>3+</sup>-doped silica fiber laser [J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(8): 084211.
- [7] JACKSON S D, KING T A. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(5): 948-956.
- [8] LI J, CHEN Z L, ZHOU H, *et al.* Status and development of pumping technology for high power fiber lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012(2): 020003 (in Chinese).
- [9] WANG Ch, SONG D F, FENG X Q, *et al.* Simulation of double Lens-coupling system using zemax and matlab [J]. Laser Journal, 2013, 31(2): 17-18 (in Chinese).
- [10] LAPOINTE M A, CHATIGNY S, PICHÉ M, *et al.* Thermal effects in high power CW fiber lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7195: 7195IU.
- [11] ZHANG M, REN G, JI Q, *et al.* Analysis on thermal effect in the Tm<sup>3+</sup>-doped fiber laser [J]. Optical Technique, 2012, 38(4): 465-469 (in Chinese).