

文章编号: 1002-2082(2007)04-0439-06

# LD 泵浦掺铥( $Tm^{3+}$ )光纤激光器的数值分析

黎大军, 杜戈果, 闫培光

(深圳大学 工程技术学院, 深圳 518060)

**摘要:** 首先从掺铥光纤激光器的速率方程和光传输方程出发, 建立数学模型, 通过 Matlab 软件进行数值计算, 分析了泵浦光和激光沿光纤的分布以及各能级离子数的变化。在不同掺杂浓度下, 研究了小信号增益与入纤泵浦功率的关系以及泵浦光和激光功率与增益介质长度的关系。在不同泵浦功率下, 研究了输出功率与输出耦合镜反射率的关系。进一步对不同泵浦吸收系数, 研究了斜率效率和泵浦阈值与光纤长度的关系。分析结果表明: 存在最佳光纤长度和最佳耦合输出透过率, 使得激光输出功率达到最佳值。

**关键词:** 掺铥光纤激光器; 速率方程; Matlab 软件; 数值分析

中图分类号: TN248.1-34

文献标志码: A

## Numerical analysis of $Tm^{3+}$ -doped silica fiber lasers pumped by LD

LI Da-jun, DU Ge-guo, YAN Pei-guang

(College of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** The mathematic mode based on rate equations and power propagation equations of  $Tm^{3+}$ -doped silica fiber lasers is established and calculated by Matlab software. Output mirror reflectivities of the laser power, optimization of the fiber length and dopant concentrations may significantly improve the slope efficiency of fiber lasers. The evolution of small signal gain coefficient without upconversion and with upconversion is showed for different pump powers. The distributions of the pump light and laser along the fiber and the ion concentrations at every energy level are analyzed. The relation between the small signal gain and incident pumping power, as well as the relation between the pumping light and laser powers with gain medium length are investigated at different dopant concentrations. The relation between output powers and different output coupling mirror reflectivities is studied at different pumping powers. And the further research is also carried out on the relation of slope efficiency and pumping threshold versus fiber lengths for different pump absorption coefficient. The results indicate that there are optimal fiber length and optimal coupling output transmissivity for the maximum of laser output power.

**Key words:**  $Tm^{3+}$ -doped fiber laser; rate equation; Matlab software; numerical analysis

## 引言

感、医学、军事等领域的应用引起了人们的广泛关注<sup>[1-4]</sup>。与固体激光器相比, 包层泵浦光纤激光器具

$2 \mu m$  附近的高功率掺铥( $Tm^{3+}$ )激光器在遥

收稿日期: 2006-10-31; 修回日期: 2006-11-15

资助项目: 深圳市科技局项目(200617)

作者简介: 黎大军(1976—), 男, 江西吉水人, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器和放大器方面的研究工作。E-mail: blzldj@163.com

有功率和光束质量好等特点<sup>[5]</sup>。最近,采用包层和双向LD泵浦掺Tm<sup>3+</sup>光纤,得到了2 μm左右,输出功率近百瓦的激光器<sup>[4]</sup>。为了降低由于工作物质较长所带来的对激光波长再吸收、高阈值和低效率等影响,采用环形腔比平面腔更理想<sup>[6-7]</sup>。为了提高掺Tm<sup>3+</sup>光纤激光器的效率,可以采用纤芯高掺杂浓度的光纤,一方面缩短了光纤的长度,同时也减少了基质对激光的吸收,另一方面使Tm<sup>3+</sup>能级之间的交叉驰豫过程得到加强,从而提高了激光器的量子效率。但是,高掺杂浓度的光纤容易使Tm<sup>3+</sup>形成离子团簇,增加了上转换损耗从而降低了效率。为了解决这一矛盾,可以采用Tm<sup>3+</sup>与Al<sup>3+</sup>元素进行共掺的光纤。光纤中以一定的比例掺杂,可以有效地降低Tm<sup>3+</sup>团簇的形成,从而提高Tm<sup>3+</sup>的掺杂浓度,并在缩短掺杂光纤长度的同时,提高激光器的斜率效率<sup>[8-9]</sup>。能量上转换减弱了粒子的反转集居数,会对激光的产生带来一定的不利影响。因此,对于高功率运行的掺铥硅基光纤激光器,采用能量上转换低和交叉驰豫高的掺铥光纤就显得非常重要。如果问题得到解决,那么掺铥硅基光纤激光器的输出功率达到千瓦量级就可以实现。

本文主要从速率方程和功率传输方程出发,考虑到交叉驰豫率、上转换率、掺杂浓度、腔镜反射率等因素对激光器输出特性的影响,对掺Tm<sup>3+</sup>光纤激光器进行了数值模拟和分析。

### 1 速率方程

图1给出了掺Tm<sup>3+</sup>石英光纤中Tm<sup>3+</sup>的4个低能级结构,在考虑离子间的交叉驰豫过程和基态猝灭的情况下,用泵浦波长为790 nm的LD泵浦Tm<sup>3+</sup>的<sup>3</sup>F<sub>4</sub>能级,产生2 μm左右的激光输出。设<sup>3</sup>F<sub>4</sub>,<sup>3</sup>H<sub>5</sub>,<sup>3</sup>H<sub>4</sub>,<sup>3</sup>H<sub>6</sub>的能级粒子数分别为N<sub>3</sub>,N<sub>2</sub>,N<sub>1</sub>,N<sub>0</sub>,由于能级<sup>3</sup>H<sub>5</sub>的寿命短,仅有0.007 μs<sup>[10]</sup>,

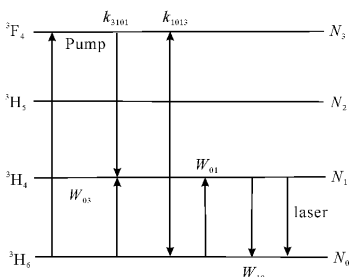


图1 铥离子的4个低能级结构

Fig. 1 The four lowest energy levels of Tm<sup>3+</sup> ion

因此,忽略了该能级上的粒子数,即N<sub>2</sub>≈0。在以上情形下,掺Tm<sup>3+</sup>光纤激光器的速率方程<sup>[7,10-12]</sup>为

$$\frac{dN_3}{dt} = W_{03}N_0 - \frac{N_3}{\tau_3} - k_{3101}N_3N_0 + k_{1013}N_1^2 \quad (1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = 2k_{3101}N_3N_0 - 2k_{1013}N_1^2 - \frac{N_1}{\tau_1} + \beta_{31} \frac{N_3}{\tau_3} - W_{10}N_1 + W_{01}N_0 \quad (2)$$

$$\frac{dN_0}{dt} = -W_{03}N_0 + k_{1013}N_1^2 - k_{3101}N_3N_0 + \frac{N_1}{\tau_1} + \beta_{30} \frac{N_3}{\tau_3} + W_{10}N_1 - W_{01}N_0 \quad (3)$$

$$N \approx N_0 + N_1 + N_3 \quad (4)$$

式中: N为Tm<sup>3+</sup>的掺杂浓度; τ<sub>i</sub>为能级i的寿命; β<sub>ij</sub>为能级i到能级j的自发辐射分支比; k<sub>ijkl</sub>表示能级i到能级j和能级k到能级l的能量转移过程; W<sub>03</sub>为泵浦吸收系数; W<sub>10</sub>为激光受激发射系数; W<sub>01</sub>为激光受激吸收系数,分别等于<sup>[12]</sup>:

$$W_{03} = \frac{\lambda_p \Gamma_p}{hcA} \sigma_a(\lambda_p) [P_p^+(z) + P_p^-(z)] \quad (5a)$$

$$W_{10} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA} \sigma_e(\lambda_s) [P_s^+(z) + P_s^-(z)] \quad (5b)$$

$$W_{01} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA} \sigma_a(\lambda_s) [P_s^+(z) + P_s^-(z)] \quad (5c)$$

设泵浦光功率P<sub>p</sub>(z)和信号光功率P<sub>s</sub>(z)分布沿光纤不发生变化,则沿着z方向传播的正向泵浦光P<sub>p</sub><sup>+</sup>(z)、负向泵浦光P<sub>p</sub><sup>-</sup>(z)、正向激光P<sub>s</sub><sup>+</sup>(z)和负向激光P<sub>s</sub><sup>-</sup>(z)可以表示为<sup>[10,12]</sup>

$$\frac{dP_p^+(z)}{dz} = -[\Gamma_p(\sigma_a(\lambda_p)N_0 + \sigma_e(\lambda_p)N_1) + \delta_p]P_p^+(z) \quad (6)$$

$$\frac{dP_p^-(z)}{dz} = [\Gamma_p(\sigma_a(\lambda_p)N_0 + \sigma_e(\lambda_p)N_1) + \delta_p]P_p^-(z) \quad (7)$$

$$\frac{dP_s^+(z)}{dz} = [\Gamma_s(\sigma_e(\lambda_s)N_1 - \sigma_a(\lambda_s)N_0) - \delta_s]P_s^+(z) \quad (8)$$

$$\frac{dP_s^-(z)}{dz} = -[\Gamma_s(\sigma_e(\lambda_s)N_1 - \sigma_a(\lambda_s)N_0) - \delta_s]P_s^-(z) \quad (9)$$

式中: Γ<sub>p</sub>和Γ<sub>s</sub>分别为泵浦光场与激光光场的重叠系数; σ<sub>a</sub>(λ<sub>p</sub>)和σ<sub>e</sub>(λ<sub>p</sub>)分别为泵浦光的吸收截面和受激发射截面; σ<sub>a</sub>(λ<sub>s</sub>)和σ<sub>e</sub>(λ<sub>s</sub>)分别为激光的吸收截面和受激发射截面; δ<sub>p</sub>和δ<sub>s</sub>分别为泵浦光和激光在光纤基质中的本征吸收。在边界条件中,考虑到了光纤端面与输出耦合腔镜之间的损耗<sup>[7,13]</sup>,其边界条件为

$$P_p^+(0) = P_{\text{launched}} + (R_1(\lambda_p) - \eta_p)P_p^-(0) \quad (10a)$$

$$P_p^-(L) = (R_2(\lambda_p) - \eta_p)P_p^+(L) \quad (10b)$$

$$P_s^+(0) = (R_3(\lambda_s) - \eta_s)P_s^-(0) \quad (10c)$$

$$P_s^-(L) = (R_4(\lambda_s) - \eta_s)P_s^+(L) \quad (10d)$$

式中:  $P_{\text{launched}}$  为入纤泵浦光功率;  $R_1(\lambda_p)$  和  $R_2(\lambda_p)$  分别为前腔镜和后腔镜对泵浦光的反射率;  $R_3(\lambda_s)$  和  $R_4(\lambda_s)$  分别为前腔镜和后腔镜对激光的反射率;  $\eta_p$  和  $\eta_s$  分别为谐振腔对泵浦光和激光的损耗;  $L$  为光纤长度。为了求解方程(6)~(9), 首先求出  $N_0, N_1, N_3$ , 再利用边界条件(10)式, 采用龙格-库塔法和Matlab 软件进行求解。计算中所用到的各参数选取为:  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ;  $A = 1.39 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ ;  $N = 5.51 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ;  $R_1 = 0.05$ ;  $R_2 = 0.97$ ;  $R_3 = 1$ ;  $R_4 = 0.97$ 。以下数据引自文献[7]:  $\Gamma_p = 0.8964$ ;  $\Gamma_s = 0.7520$ ;  $\sigma_a(\lambda_p) = 5.0 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ;  $\sigma_a(\lambda_s) = 0.1 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ;  $\sigma_e(\lambda_s) = 2.5 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ;  $\beta_{31} = 0.72$ ;  $\beta_{30} = 0.14$ ;  $\tau_3 = 14.2 \mu\text{s}$ ;  $\tau_1 = 340 \mu\text{s}$ ;  $k_{3101} = 3.0 \times 10^{-23} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ;  $k_{1013} = 2.4 \times 10^{-24} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ;  $\eta_p = \eta_s = 0.04$ 。

## 2 结果与分析

在稳态情况下, 根据  $dN_i/dt = 0$ , 可解出  $N_0, N_1, N_3$ 。图2和图3分别为激光输出为0 W和50 mW时, 各能级上粒子数随泵浦功率的变化。能级  $N_0$  上粒子数逐渐减少, 能级  $N_1$  上粒子数逐渐增

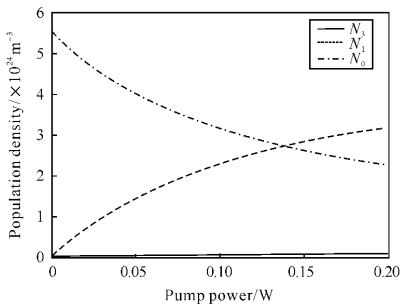


图2 激光输出为0, 各能级粒子数随泵浦功率的变化  
Fig. 2 Variation of population density at every energy level with pump power when laser output power is 0 W

加, 在泵浦功率大约为130 mW之前, 产生激光的上下2个能级未达到粒子数反转, 这时不会有激光产生。随着泵浦功率不断增加, 激光下能级  $N_0$  上的粒子吸收更多的泵浦光功率被激发到高能级  $N_3$  上, 该能级上的粒子数很快又以自发辐射和无辐射等形式, 跃迁到能级  $N_1$  上, 这样使得能级  $N_0$  粒子

数逐渐减少, 能级  $N_1$  粒子数不断增加。当能级  $N_1$  和能级  $N_0$  的粒子数达到反转时, 激光就会产生, 这时各能级上粒子数变化如图3所示。

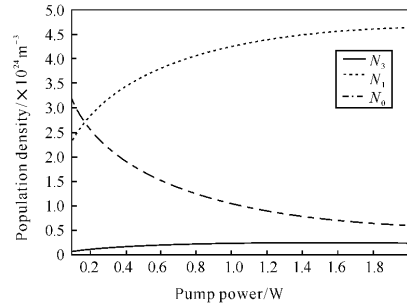


图3 激光输出为50 mW, 各能级粒子数随泵浦功率的变化

Fig. 3 Variation of population density at every energy level with pump power when laser output power is 50 mW

设  $\Delta\alpha = \Gamma_s(\sigma_e(\lambda_s)N_1 - \sigma_a(\lambda_s)N_0)$  为激光器的增益因子, 只有当  $\Delta\alpha > 0$  时, 才会有激光产生, 而且, 只有在增益大于损耗时, 激光才会输出。对于连续运行的激光器, 在不考虑交叉弛豫和上转换过程的情况下, 即  $k_{3101}$  和  $k_{1013} \rightarrow 0$  时, 这时增益因子为

$$\Delta\alpha = \frac{\Gamma_s \left[ \beta_{31} \sigma_e(\lambda_s) W_{03} - \frac{\sigma_a(\lambda_s)}{\tau_1} \right]}{W_{01} + \beta_{31} W_{03} + \left( \frac{1}{\tau_1} + W_{10} \right) (1 + W_{03} \tau_3)} N \quad (11)$$

图4为泵浦功率对小信号增益因子的影响。由图可知, 无论是否考虑到上转换效应, 小信号增益都随着泵浦功率的增加而增大, 上转换效应降低了小信号增益, 而且还会随着泵浦功率的增加, 上转换效应对小信号增益的影响也越来越大, 是因为上转换效应对激光上下能级间形成粒子数反转是不利的。图5是在不同掺杂浓度下, 小信号增益与入

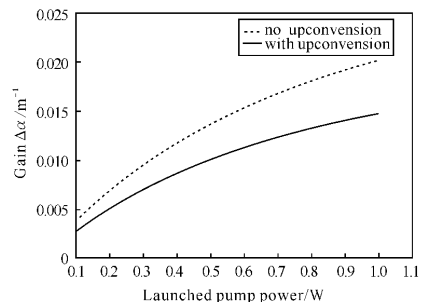


图4 小信号增益与入纤泵浦功率的关系  
Fig. 4 Gain versus pump power

纤泵浦功率的关系,从图中可以看出,在相同入纤泵浦功率下,小信号增益随掺杂浓度增加而增大,这是由于掺杂浓度增加时粒子间的交叉弛豫增强而使得总量子效率增大。

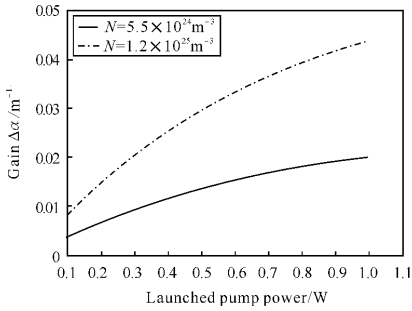


图5 不同掺杂浓度下小信号增益与入纤泵浦功率的关系

Fig. 5 Gain versus pump power at different dopant concentration

从图6可以看出,在输出端有将近0.8W的泵浦光功率未被吸收;在泵浦端附近,泵浦光强很大,对于横截面小的光纤,其光功率密度很大,容易造成光纤的损坏。随着对泵浦光的不断吸收,前后向传播的泵浦光强沿光纤逐渐减弱。如果后腔镜不对泵浦光反射,则总的泵浦光就是前向传播的泵浦光;如果后腔镜对泵浦光反射,则总的泵浦光就是前后向泵浦光之和。从图中也可看出,考虑后腔镜对泵浦光的反射时,总的泵浦光强沿光纤分布要比不考虑时的均匀性更佳。因此,为了更充分地利用泵浦光以及考虑均匀泵浦,可以在光纤输出端采用对泵浦光高反的腔镜或采用双向泵浦方式,同时也可以采用环行谐振腔,让更多的泵浦光被增益介质所吸收,提高泵浦光的利用率,从而增加输出激光功率。根据上面所述,对于高功率光纤激光器,采用双向泵浦方式更佳。前后向沿光纤传播的总泵浦光要比单向泵浦光在光纤中的分布均匀些,可认为单向泵浦会造成泵浦端附近比远离泵浦端光强要强得多,这样易造成工作物质的损坏。双向泵浦会使得泵浦光在光纤中的分布均匀性比单向泵浦时要好,不易造成泵浦光强因局部过大而导致光纤的损坏。从图7可以看出,大约有50%的泵浦光被吸收,产生的激光功率约为1W,光-光转换效率为37.5%。在泵浦端附近,泵浦光逐渐被吸收减弱,前向传播的激光场得到更多的泵浦能量,因此,后向传播的激光场从泵浦光

场中得到泵浦光能量少,所以沿光纤后向传播的激光比前向传播的激光弱。

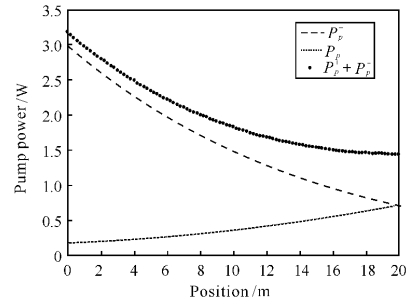


图6 泵浦光功率沿光纤的分布

Fig. 6 Pump power distribution as a function of the position along the fiber

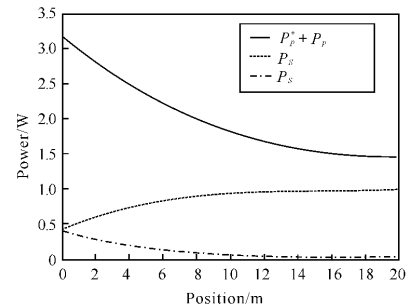
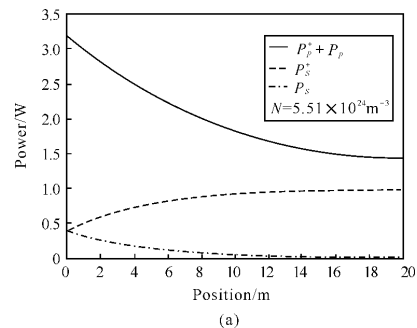


图7 泵浦光和激光功率沿光纤的分布

Fig. 7 Distribution of pump and laser powers as a function of the position along the fiber

图8反映了不同掺杂浓度下,泵浦光、激光功率与光纤长度的关系。在其他相同条件下,当增加掺杂浓度时,达到激光输出功率相同,所需的光纤长度要短的多(近似为1/4),可见高掺杂浓度的光纤可以有效地缩短激光器的掺杂光纤长度,这也同时减弱了因长光纤基质对激光的损耗。



(a)

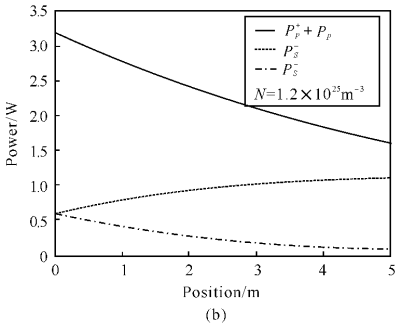


图8 不同掺杂浓度时,泵浦光、激光功率与光纤长度的关系

Fig. 8 Pump and laser powers as a function of fiber length at different dopant concentrations

图9是在不同泵浦功率下,激光输出功率与输出耦合镜反射率的关系。从图中可以看出,随着泵浦功率不断增大,输出功率达到最佳时的反射率越来越小,同时对于一定的光纤长度和泵浦功率,存在一个最佳反射率使得输出激光功率达到最大。图10反映的是不同泵浦吸收系数下,斜率效率与光

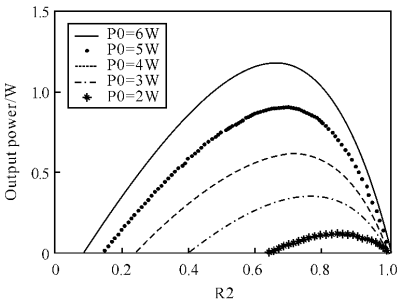


图9 输出功率与输出耦合镜反射率的关系

Fig. 9 Output power versus reflectivity of output coupler

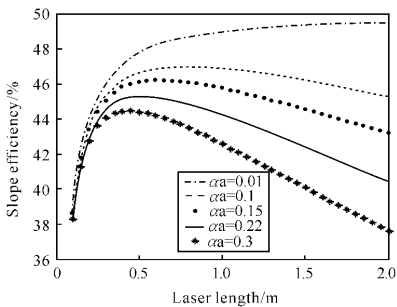


图10 不同泵浦吸收系数下斜率效率与光纤长度的关系

Fig. 10 Slope efficiency versus fiber length at different pump absorption coefficient

纤长度的关系曲线。对于一定的泵浦吸收系数和泵浦功率,激光器的斜率效率存在一个最大值,并且随着光纤长度的增加,其对激光的损耗也越大,从而使斜率效率变小;同时达到最大效率时的光纤长度随泵浦吸收系数增加而变得越短,这是由于光纤对泵浦光的吸收充分,从而使得增益介质缩短。从图11中可以看出,对于不同的泵浦吸收系数,都存在一个最佳泵浦阈值,并且最佳泵浦阈值随着泵浦吸收增大而增大,同时,达到最佳泵浦阈值时的激光长度也逐渐缩短。这主要是由于分布损耗和不均匀泵浦共同作用的结果。

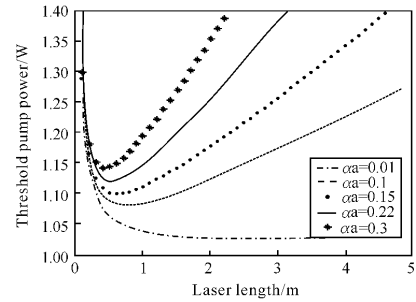


图11 不同泵浦吸收系数下泵浦阈值与光纤长度的关系

Fig. 11 Pump threshold versus fiber length at different pump absorption coefficient

### 3 结束语

本文从激光器速率方程和功率传输方程出发,建立理论模型。通过数值计算,分析了泵浦光和激光在光纤中的分布情况,在考虑上转化和忽略上转化以及不同掺杂浓度下,得出小信号增益随泵浦功率的变化关系,无论是否考虑上转换,都会减小小信号增益,而且随着泵浦功率的增加,其影响越来越明显。在相同泵浦功率下,小信号增益随着掺杂浓度的增大而增大。泵浦光在泵浦端附近的分布很强,对于横截面小的光纤极易产生损坏,而双向泵浦方式,泵浦光在光纤中的分布要更均匀,对光纤损坏的可能性相比之下要小。在其他条件都相同的情况下,增加掺杂浓度,达到相同激光输出所需的光纤长度要短,同时也减小了光纤对激光的吸收。对于一定的泵浦功率,输出功率达到最大时,耦合输出腔镜存在一个最佳透射率。对于不同的泵浦吸收系数,激光器的斜率效率存在一个最大值,同时也存在一个最佳泵浦阈值,而且达到最大效率或者达到最佳泵浦阈值时,增益介质长度都有缩短的趋

势。对于输出要求不同的掺 $\text{Tm}^{3+}$ 光纤激光器,增益介质的长度、光纤掺杂浓度以及输出耦合器的反射率等因素为进一步改善光纤激光器的输出特性和优化器件参数提供了理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 杨昆,任秋实,魏石刚,等.  $2\ \mu\text{m}$  铥( $\text{Tm}$ )激光器在生物学中的应用[J]. 激光与光电子学进展,2005,42(9):52-56.  
YANG Kun, REN Qiu-shi, WEI Shi-gang, et al. Application of  $2\ \mu\text{m}$  Tm laser on biomedicine [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005,42(9):52-56. (in Chinese)
- [2] 周建民. 眼睛安全激光器及军事应用[J]. 应用光学,1993,14(2):48-53.  
ZHOU Jian-min. Eyesafe laser and their application in military [J]. Journal of Applied Optics, 1993,14(2):48-53. (in Chinese)
- [3] HONEA E C, BEACH R J, SUTTON S B, et al. 115W  $\text{Tm}:\text{YAG}$  diode pumped solid-state laser [J]. IEEE J. Quantum Electronics, 1997,33(9):1592-1600.
- [4] FRITH G, LANCASTER D G, JACKSON S D. 85W  $\text{Tm}^{3+}$ -doped silica fibre laser [J]. Electronics Letters,2005,41(12):687-688.
- [5] ZENTENO L. High-power double-clad fiber lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993,29(8):1435-1446.
- [6] KELSON I, HARDY A. Optimization of strongly pumped fiber lasers [J]. Journal of Lightwave Technology,1999,17(5):891-897.
- [7] XU J Q, PRABHU M, LU J R, et al. Efficient double-clad thulium-doped fiber laser with a ring cavity [J]. Applied Optics, 2001, 40(12):1983-1988.
- [8] JACKSON S D, MOSSMAN S. Efficiency dependence on the  $\text{Tm}^{3+}$  and  $\text{Al}^{3+}$  concentrations for  $\text{Tm}^{3+}$ -doped silica double-clad fiber lasers [J]. Applied Optics, 2003,42(15):2702-2707.
- [9] JACKSON S D. Power scaling method for  $2\ \mu\text{m}$  diode-cladding-pumped  $\text{Tm}^{3+}$ -doped silica fiber lasers that uses  $\text{Yb}^{3+}$  codoping [J]. Optics Letters, 2003,28(22):2192-2194.
- [10] JACKSON S D, KING T A. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999,17(5):948-956.
- [11] JACKSON S D, KING T A. CW operation of a  $1.064\ \mu\text{m}$  pumped Tm-Ho-doped silica fiber laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998,34(9):1578-1587.
- [12] 董淑福,陈国夫,赵尚弘,等.  $1180\ \text{nm}$  激光抽运 Tm, Ho 石英光纤激光器理论研究 [J]. 激光技术, 2006,30(2):138-141.  
DONG Shu-fu, CHEN Guo-fu, ZHAO Shang-hong, et al. Theoretical study on the  $1180\text{nm}$  laser pumped Tm, Ho co-doped silica fiber laser [J]. Laser Technology, 2006, 30(2):138-141. (in Chinese)
- [13] 杨选,唐惠荣. 非均匀加宽单模激光器的最佳透射率 [J]. 应用光学,2004,25(1):34-35.  
YANG Xuan, TANG Hui-rong. The optimal transmissivity of inhomogeneously broadened single mode laser [J]. Journal of Applied Optics,2004,25(1):34-35. (in Chinese)

#### (上接第 438 页)

- [8] PLAZA J A, LLOBERA A, DOMINGUEZ C, et al. BESOI-based integrated optical silicon accelerometer [J]. J. Microelectromech. Sys., 2004,13(2):355-364.
- [9] PETER K, MICHAEL W. Novel fiber optic Bragg grating acceleration sensor detection scheme [J]. SPIE,2000,4185:58-61.
- [10] 梁宏军,张兴社. MEMS 与 MEMS 光开关 [J]. 应用光学, 2005,26(1):60-62.  
LIANG Hong-jun, ZHANG Xing-she. MEMS and MEMS optical switch [J]. Journal of Applied Optics, 2005,26(1):60-62. (in Chinese)