

文章编号:1001-5078(2007)12-1265-05

1565nm 激光泵浦 Tm:Ho 共掺石英光纤激光器稳态特性

周俊¹,董淑福¹,周义建¹,李维民¹,陈国夫²

(1. 空军工程大学电讯工程学院,陕西 西安 710077;

2. 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:与 800nm 和 1180nm 泵浦带相比较,1565nm 泵浦有效削弱了多能级快速非辐射跃迁以及能量上转换损耗。建立了 1565nm 激光泵浦 Tm³⁺:Ho³⁺ 共掺石英光纤产生 2μm 激光的理论模型,给出系统完整的速率方程和功率传输方程,采用数值模拟的方法对理想条件下系统稳态特性进行分析。结果表明,采用 1565nm 激光作为泵浦源,能够获得高效率的激光输出。在泵浦功率为 3W、光纤长度 2.2m 时,输出功率高达 1.7W、量子效率 57%、斜效率 67%。这是目前此类光纤获得的较好转换效率。

关键词:光纤激光器;Tm³⁺:Ho³⁺ 共掺石英光纤;数值模拟;1565nm 激光泵浦

中图分类号:TN248.1

文献标识码:A

The Steady-state Behavior of 1565nm Laser Pumped Tm³⁺:Ho³⁺ Co-doped Silica Fiber Laser

ZHOU Jun¹, DONG Shu-fu¹, ZHOU Yi-jian¹, LI Wei-min¹, CHEN Guo-fu²

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, XIOPM, CAS, Xi'an 710119, China)

Abstract: As a pump source, 1565nm pumping band can efficiently diminish the loss of manifold fast non-radiative decay and upconversion losses compared to 800nm and 1180nm bands. Theoretical model of Tm³⁺:Ho³⁺ co-doped silica fiber for 2μm laser pumped at 1565nm laser is established. After the comprehensive rate equations and propagation equations are given, characteristics of the system in steady state at hypothesis situation are analyzed by using numerical simulation way. As high as 1.7W laser output power was achieved with a slope efficiency of 67% and quantum efficiency of 57% when the pump power is 3W and fiber length is 2.2m. Numerical simulation results indicate better capability of the fiber and higher conversion efficiency as far as we know.

Key words: optical fiber laser; Tm³⁺:Ho³⁺ co-doped silica fiber; numerical simulation; 1565nm laser pumping

1 引言

2μm 人眼安全激光在激光测距、遥感和光纤通信尤其外科手术方面有着广泛的应用。Tm³⁺:Ho³⁺ 共掺光纤由于 Tm³⁺ 具有较广泛的吸收谱,利用 Tm³⁺→Ho³⁺ 能量转移机制使其成为 2μm 激光器理想的增益介质。

目前,国内外对 Tm³⁺:Ho³⁺ 共掺光纤已经做了很多研究,主要采用 800nm 和 1200nm 波长激光泵浦石英或氟化物基质光纤,但尚未见 1565nm 激光泵浦 Tm³⁺:Ho³⁺ 共掺光纤的报道。S. D. Jackson 等

人利用经济的 800nm 半导体激光源泵浦 Tm³⁺:Ho³⁺ 共掺双包层氟化物和石英光纤,分别获得了 8.8W^[1] 和 5.2W^[2] 的激光输出。国内也在 Tm³⁺:Ho³⁺ 共掺光纤激光器取得一些成果,2006 年,报道了 1180nm 波带泵浦 Tm³⁺:Ho³⁺ 石英光纤获得 930mW 激光的

基金项目:陕西省自然科学基金(No. 2006F06);国家重点实验室开放基金资助项目(YAK200603)。

作者简介:周俊(1982-),男,硕士研究生,主要从事光纤激光技术研究。E-mail:zhoujungk@ yahoo. com. cn

收稿日期:2007-07-16

研究成果^[3]。从报道的结果来看,目前这类激光器转换效率还相对较低,光-光效率和斜效率都在50%以下。如果采用1565nm激光作为泵浦源,有望获得较好的量子效率和斜效率,将此类共掺光纤效能进一步提高。

本文对1565nm波带泵浦 $\text{Tm}^{3+}:\text{Ho}^{3+}$ 共掺石英光纤进行理论研究,分析产生 $2\mu\text{m}$ 激光的机理,建立了各能级粒子速率方程并对稳态时激光输出特性进行数值模拟,以期能为该光纤选择一个高效的泵浦波长。

2 基本原理

Tm^{3+} 在1565nm附近存在很强的吸收带,这相应于 $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_4$ 能级的受激吸收跃迁^[4]。 Tm^{3+} 吸收1565nm波长能量从 $^3\text{H}_6$ 直接跃迁到 $^3\text{H}_4$ 能级,由于 Tm^{3+} 的 $^3\text{H}_4$ 能级与 Ho^{3+} 的 $^5\text{I}_7$ 能级十分接近,当 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 相对位置靠得比较近时就能发生 $\text{Tm}^{3+} \rightarrow \text{Ho}^{3+}$ 能量转移,将 Ho^{3+} 激发到 $^5\text{I}_7$ 能级而自己返回到基态 $^3\text{H}_6$,从而使 Ho^{3+} 在 $^5\text{I}_7$ 激发态和 $^5\text{I}_8$ 基态之间实现集居数反转,通过 $^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{I}_8$ 的受激辐射产生 $2\mu\text{m}$ 激光。此过程中 Tm^{3+} 的 $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ 的受激辐射系数远小于 $\text{Tm}^{3+} \rightarrow \text{Ho}^{3+}$ 能量转移系数,受激辐射过程受到抑制;前向转移($^3\text{H}_4 \rightarrow ^5\text{I}_8$)系数是后向转移($^5\text{I}_7 \rightarrow ^3\text{H}_6$)系数的12倍^[5],成为能量转移主要机制。1565nm泵浦 $\text{Tm}^{3+}:\text{Ho}^{3+}$ 共掺石英光纤相对于其他波长作为泵浦源时在效率上将会有很大提高,这主要是避免了 Tm^{3+} 在 $^3\text{F}_4, ^3\text{H}_5$ 的快速自发辐射和无辐射跃迁、简化系统能级结构所致。考虑到泵浦光功率和粒子掺杂浓度对系统的影响,可能发生 $^3\text{H}_4, ^5\text{I}_7 \rightarrow ^3\text{H}_6, ^5\text{I}_5$ 能量上转换和 $^3\text{H}_6, ^5\text{I}_6 \rightarrow ^3\text{H}_5, ^5\text{I}_8$ 交叉弛豫,图1给出了系统比较完整能级结构。

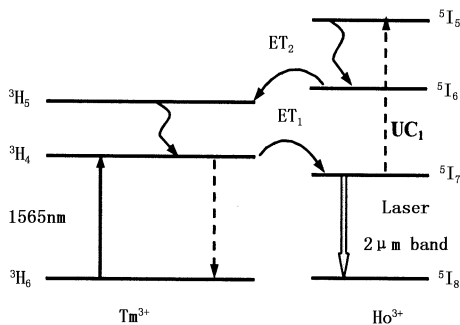


图1 1565nm带泵浦 $\text{Tm}^{3+}:\text{Ho}^{3+}$ 共掺石英光纤系统能级跃迁图

3 速率方程

速率方程给出工作物质各能级粒子数随时间变化的微分方程,表征激光产生过程中粒子在相关能

级的跃迁特性,成为光纤激光系统分析的基本理论。在泵浦波长确定的情况下,各能级粒子数是关于时间 t 和光纤长度 z 的函数。假设 Tm^{3+} 在 $^3\text{H}_6, ^3\text{H}_4$ 和 $^3\text{H}_5$ 能级的粒子数密度分别为 $N_0(z,t), N_1(z,t)$ 和 $N_2(z,t)$, Ho^{3+} 在 $^5\text{I}_8, ^5\text{I}_7, ^5\text{I}_6$ 和 $^5\text{I}_5$ 能级的粒子数密度分别为 $N_3(z,t), N_4(z,t), N_5(z,t)$ 和 $N_6(z,t)$,则对应 $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_4$ 基态吸收(GSA), Tm^{3+} 与 Ho^{3+} 的各能级的粒子数密度速率方程可表达如下^[5-8]:

对 Tm^{3+} :

$$\frac{dN_0}{dt} = \sum_{i=1}^2 A_{i0} N_i + NR_1 N_1 + W_{10} N_1 - W_{01} N_0 + ET_{\text{TH1}} - ET_{\text{TH2}} + UC_{\text{TH}} \quad (1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = A_{21} N_2 + NR_2 N_2 + W_{01} N_0 - (A_{10} + NR_1 + W_{10} N_1) N_1 - ET_{\text{TH1}} - UC_{\text{TH}} \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = - \left(\sum_{i=0}^1 A_{2i} + NR_2 \right) N_2 + ET_{\text{TH2}} \quad (3)$$

对 Ho^{3+} :

$$\frac{dN_3}{dt} = \sum_{j=4}^6 A_{j3} N_j + (W_{43} + NR_4) N_4 - W_{34} N_3 - ET_{\text{TH1}} + ET_{\text{TH2}} \quad (4)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = \sum_{j=5}^6 A_{j4} N_j + NR_5 N_5 + W_{34} N_3 - (W_{43} + A_{43} + NR_4) N_4 + ET_{\text{TH1}} - UC_{\text{TH}} \quad (5)$$

$$\frac{dN_5}{dt} = (A_{65} + NR_6) N_6 - \left(\sum_{j=3}^4 A_{5j} + NR_5 \right) N_5 - ET_{\text{TH2}} \quad (6)$$

$$\frac{dN_6}{dt} = - \left(\sum_{j=3}^5 A_{6j} + NR_6 \right) N_6 + UC_{\text{TH}} \quad (7)$$

式中, A_{ij}, NR_i 分别为自发辐射和非辐射跃迁几率,激光、泵浦光受激吸收和受激辐射跃迁几率 W_{ij} 由下列式子给出^[5-8]:

$$W_{01} = \frac{\lambda_p \Gamma_p}{hcA} \sigma_a(\lambda_p) (P_{\text{Pr}}(z,t) + P_{\text{Pr}}(z,t))$$

$$W_{10} = \frac{\lambda_p \Gamma_p}{hcA} \sigma_e(\lambda_p) (P_{\text{Pr}}(z,t) + P_{\text{Pr}}(z,t))$$

$$W_{34} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA} \sigma_a(\lambda_s) (P_{\text{Sf}}(z,t) + P_{\text{Sr}}(z,t))$$

$$W_{43} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA} \sigma_e(\lambda_s) (P_{\text{Sf}}(z,t) + P_{\text{Sr}}(z,t))$$

式中, λ_p 和 λ_s 分别为泵浦光和激光波长; Γ_p 和 Γ_s 分别为泵浦光和激光的功率填充因子; $\sigma_e(\lambda_s)$ 和 $\sigma_a(\lambda_s)$ 为激光波长 λ_s 处的受激辐射和吸收截面; A 是纤芯截面积; $\sigma_e(\lambda_p)$ 和 $\sigma_a(\lambda_p)$ 是泵浦波长 λ_p 的受激辐射和泵浦吸收截面; $P_{\text{Pr},r}(z,t)$ 和 $P_{\text{Sf},r}(z,t)$ 分

别为沿光纤传播的泵浦光和激光功率(下标 f, r 代表沿光纤正负方向)。

Tm³⁺:Ho³⁺ 共掺石英光纤中能量转移和上转换机理由以下参数给出^[5]:

$$ET_{TH1} = k_{1034}N_1N_3 - k_{0143}N_4N_0$$

(能量转移: ³H₄, ⁵I₈ → ³H₆, ⁵I₇)

$$ET_{TH2} = k_{5302}N_5N_0$$

(能量转移: ³H₆, ⁵I₆ → ³H₅, ⁵I₈)

$$UC_{TH} = k_{1046}N_1N_5$$

(能量上转换: ³H₄, ⁵I₇ → ³H₆, ⁵I₅)

对于泵浦光和激光的功率填充因子 Γ_p 和 Γ_s 定义及计算可参考文献[9]。

对于 F-P 激光腔,沿光纤前向及后向传输的泵浦场及激光场的功率方程为^[5]:

$$\frac{dP_{Pr,r}(z)}{dz} = \mp \Gamma_p [\sigma_p(\lambda_p)N_0(z) - \sigma_e(\lambda_p) \cdot N_1(z)] P_{Pr,r}(z) \mp \alpha_p(z) P_{Pr,r}(z) \quad (8)$$

$$\frac{dP_{Sf,r}(z)}{dz} = \pm \Gamma_s [\sigma_e(\lambda_s)N_4(z) - \sigma_a(\lambda_s) \cdot N_3(z)] P_{Sf,r}(z) + \Gamma_s \sigma_e(\lambda_s)N_4(z)P_0(\nu_s) \mp \alpha_s P_{Sf,r}(z) \quad (9)$$

腔内泵浦场和激光场分别满足下列边界条件:

$$\begin{aligned} P_{Pr}(L) &= R_2(\lambda_p)P_{Pr}(L) \\ P_{Pr}(0) &= R_1(\lambda_p)P_{Pr}(0) + P_{\text{Planchet}} \\ P_{Sr}(L) &= R_2(\lambda_s)P_{Sr}(L) \\ P_{Sr}(0) &= R_1(\lambda_s)P_{Sr}(0) \end{aligned}$$

式中, $P_0(\nu_s)$ 是自发辐射的贡献, $P_0(\nu_s) = 2hc^2/\lambda_s^3$ ^[10]; $R_1(\lambda_p)$ 和 $R_2(\lambda_p)$ 分别为输入、输出镜在泵浦波长 λ_p 的反射率; $R_1(\lambda_s)$ 和 $R_2(\lambda_s)$ 分别为输入、输出镜在激光波长 λ_s 的反射率; P_{Planchet} 为入纤泵浦功率; α_p 和 α_s 分别是泵浦光和激光的散射损耗系数; L 是光纤长度。

4 数值分析

4.1 方程简化

采用 1565nm 激光作为泵浦源,直接将 Tm³⁺ 从 ³H₆ 激发到 ³H₄ 能级,但在方程(1)~(7)中,由于考虑了强泵浦源和高浓度粒子掺杂对于系统的影响, ³H₅ 能级上可能存在少量的 Tm³⁺。石英光纤中 Tm³⁺ 在 ³H₅ 能级的寿命(0.007μs)相比 ³H₄ 能级的寿命(334.7μs)短得多^[7-8],该能级的粒子数将以快速自发辐射或非辐射形式传递给 ³H₄ 能级,因此, ³H₅ 能级只存在少量粒子数,系统中上转换和交叉弛豫相当微弱;另外,能量后向转移系数 k_{0143} ^[5] 和非辐射快速跃迁 NR_iN_i 带来的影响非常小,可作为

微量处理。忽略上述微量,可以将系统简化成准二能级结构,即只有 Tm³⁺ 的 ⁴H₆, ⁴H₄ 和 Ho³⁺ 的 ⁵I₈, ⁵I₇ 能级,则稳态时速率方程可改写为:

对 Tm³⁺:

$$\frac{dN_0}{dt} = A_{10}N_1 + W_{10}N_1 - W_{01}N_0 + K_{1034}N_1N_3 = 0 \quad (10)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = W_{01}N_0 - (A_{10} + W_{10})N_1 - K_{1034}N_1N_3 = 0 \quad (11)$$

对 Ho³⁺:

$$\frac{dN_3}{dt} = A_{43}N_4 + W_{43}N_4 - W_{34}N_3 - K_{1034}N_1N_3 = 0 \quad (12)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = W_{34}N_3 - A_{43}N_4 - W_{43}N_4 + K_{1034}N_1N_3 = 0 \quad (13)$$

假设 Tm³⁺ 与 Ho³⁺ 在光纤纤芯中均匀分布,掺杂浓度分别为 N_{Tm} 和 N_{Ho} ,则有:

$$N_{Tm} = N_0 + N_1 \quad (14)$$

$$N_{Ho} = N_3 + N_4 \quad (15)$$

4.2 数值模拟

结合到后期将要进行的实验研究,我们采用加拿大国家光学研究所(INO)制造的 TH520 Tm³⁺:Ho³⁺ 共掺石英单模光纤作为增益介质进行数值模拟, Tm³⁺ 和 Ho³⁺ 的浓度分别为 $6.18 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 和 $1.05 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$,纤芯直径和数值孔径分别为 8.5μm 和 0.15,有关其他参数如表 1 所示。

表 1 数值模拟参数值

parameters	values	parameters	values
λ_p	1565nm	τ_{N1}	334.7μm
λ_s	1960nm	τ_{N4}	567μm
Γ_p	0.8512	$R_1(\lambda_s)$	0.99
Γ_s	0.7520	$R_2(\lambda_s)$	0.04
$\sigma_a(\lambda_s)$	$2.0 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	$R_2(\lambda_p)$	0.04
$\sigma_e(\lambda_s)$	$3.0 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	σ_s	$3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$
$\sigma_a(\lambda_p)$	$0.7 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	σ_p	$3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$
$\sigma_e(\lambda_p)$	$0.3 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	K_{1034}	3.3×10^{-21}

利用光纤端面的菲涅耳反射作为输出耦合,即 $R_2(\lambda_p) = R_2(\lambda_s) = 0.04$ 。图 2 是光纤长度为 1.5m、泵浦功率为 3W 时信号光和泵浦光沿光纤长度的分布曲线。从图中可以看出,光纤长度为 1.5m 时,泵浦功率 96% 被吸收,产生的激光功率接近 1.6W,量子效率约 53%。由于光纤长度偏短,泵浦光还没有被充分吸收,接近 4% 的残留泵浦功率直

接通过光纤端面输出(少量反射回光纤)。

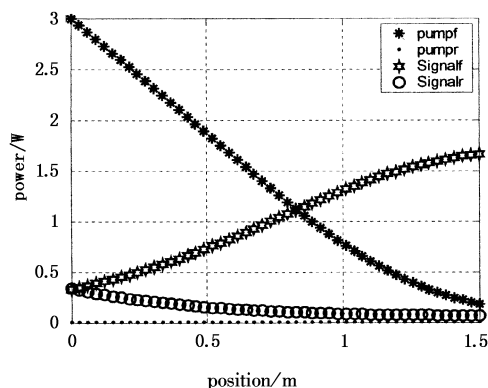


图2 光纤长度为1.5m、泵浦功率为3W时信号光和泵浦光沿光纤长度的分布曲线

将光纤长度取为2.2m,泵浦功率不变,得到图3的模拟结果。可以看出,输出激光达到1.7W,量子效率57%,泵浦功率在光纤长度为1.8m处就被完全吸收,此时信号光基本达到稳态,随着光纤长度的增加,输出激光功率略微增大,达到2.2m时,激光增益基本达到饱和,比1.5m时增加0.1W。

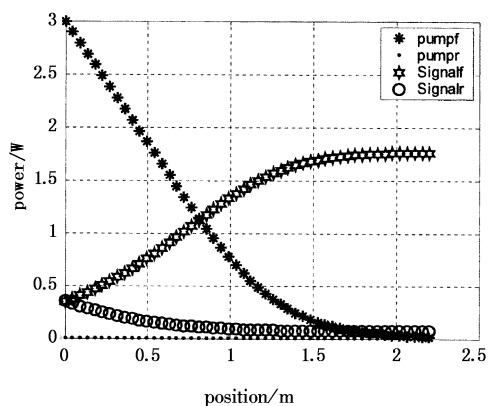


图3 光纤长度为2.2m、泵浦功率为3W时信号光和泵浦光沿光纤长度的分布曲线

随着光纤长度的继续增大,到达3m时,我们发现,信号光输出功率下降到1.66W,究其原因,主要是:①光纤长度增加,导致泵浦阈值功率升高,可供转移的能量减少;②泵浦光经过一定长度的光纤就被吸收完全,信号光通过剩余光纤自身损耗部分能量;③信号光在光纤中的受激吸收截面大,重吸收机制作用明显,所以选择合适的光纤长度对于功率输出非常重要。

图4对应光纤长度为2.2m时系统各能级粒子数沿光纤长度的变化曲线,从图中可以得出,稳态情况下, Tm^{3+} 把大部分能量转移到了 Ho^{3+} ,自身几乎不产生受激辐射过程,因为在光纤长度为0.4m时, $^3\text{H}_4$ 能级就不再具备粒子数反转条件,不能辐射激光,随着光纤长度的增大,处在 $^3\text{H}_4$ 能级 Tm^{3+} 继

续将能量转移到 Ho^{3+} 使得自身能级粒子数下降迅速,并在光纤的末端接近零, Tm^{3+} 基态粒子数接近光纤粒子数密度;在光纤输入端时 Ho^{3+} 的 $^5\text{I}_7$ 能级与 $^5\text{I}_8$ 就发生粒子数反转,受激辐射产生激光,到达1.5m时,受激辐射基本完成, $^5\text{I}_7$ 能级剩余粒子数通过自发辐射的形式回到基态,此后激光在光纤中属于一个自身整合过程,激光功率略有增大,如图3也能看出,在1.5m处输出激光基本达到极值;对比图3和图4我们还发现,前向激光输出与 $^5\text{I}_8$ 能级粒子数沿光纤长度变化具有相似的规律,前向泵浦与 $^3\text{H}_4$ 能级粒子数沿光纤长度变化具有相似的规律,正是这些能级粒子数相互作用的跃迁导致系统激光功率的变化。

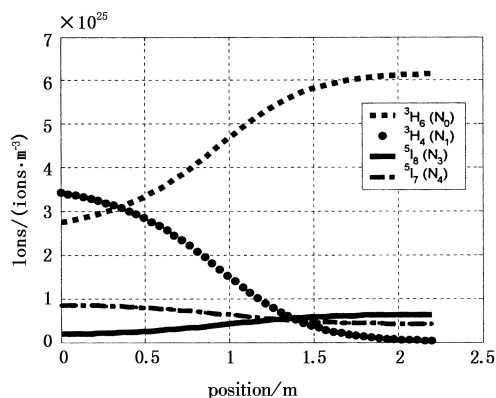


图4 纤长度为2.2m时各能级粒子数沿光纤长度的分布

图5给出光纤长度分别为1.5m、2.2m和3m时输出激光功率随泵浦功率的变化曲线。可以看出,二者之间服从很好的线性关系,光纤长度分别为1.5m、2.2m、3m时,激光泵浦阈值和斜效率为0.4W、0.6W、0.7W和59%、67%、67.8%,随着光纤长度的略微增大,阈值功率和斜效率都有变大。

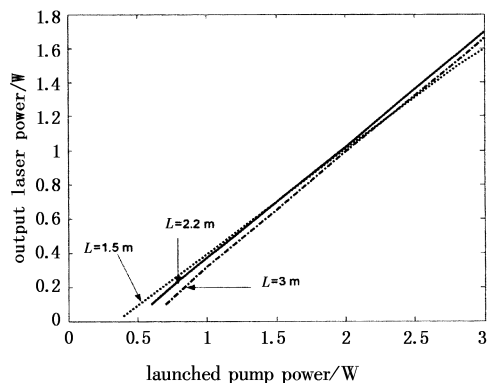


图5 输出功率随泵浦功率的变化曲线

5 结论

通过对1565nm激光泵浦 $\text{Tm}^{3+}:\text{Ho}^{3+}$ 共掺石英光纤进行原理分析和稳态数值模拟的结果来看,相对于已报道 $\text{Tm}^{3+}:\text{Ho}^{3+}$ 共掺石英光纤的研究,我们

在理论上获得更高效率的 2 μm 激光输出。

获得上述结果,我们分析主要有以下原因:①采用 1565nm 波带作为泵浦源,直接将 $^4\text{H}_6$ 能级上的 Tm^{3+} 泵浦到 $^4\text{H}_4$ 能级,相对 800nm 和 1120nm 波带泵浦源系统由准四能级结构简化为准二能级,减少了能量损失;② Tm^{3+} 在 1565nm 波带附近有较强的吸收界面,对泵浦光吸收能力强;③在数值模拟时,忽略了泵浦功率和粒子掺杂浓度对于整个系统的微量影响。

参考文献:

- [1] S D Jackson. 8.8W diode-cladding-pumped Tm^{3+} , Ho^{3+} -doped fluoride fibre laser [J]. Electron. Lett., 2001, 37 (13): 821 - 822.
- [2] S D Jackson, S Mossman. High-power diode-cladding-pumped Tm^{3+} , Ho^{3+} -doped silica fiber laser [J]. Appl. Phys. B, 2003, 77(5): 489 - 491.
- [3] 董淑福,陈国夫,赵尚弘,等. 1180nm 激光抽运 Tm^{3+} : Ho^{3+} 石英光纤激光器理论研究 [J]. 激光技术, 2006, 30(2): 138 - 141.
- [4] Shen D Y, Sahu J K, Clarkson W A. High-power widely

tunable Tm: fibre lasers pumped by an Er, Yb co-doped fibre laser at 1.6 μm [J]. Opt. Express, 2006, 14 (13): 261 - 267.

- [5] S D Jackson, T A King. CW operation of a 1.064 μm pumped Tm-Ho-doped silica fiber laser [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1998, 34(9): 1578 - 1587.
- [6] G Rustad, K Stenersen. Modeling of laser-pumped Tm and Ho lasers accounting for upconversion and ground-state depletion [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1996, 32(9): 1645 - 1655.
- [7] S D Jackson, T A King. Efficient gain-switched operation of a Tm-doped silica fiber laser [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1998, 34(5): 779 - 789.
- [8] S D Jackson, T A King. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers [J]. J. Lightwave Technology, 1999, 17(5): 948 - 956.
- [9] 董淑福. 稀土掺杂光纤激光器研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2004: 41.
- [10] 占生宝, 赵尚弘, 董淑福, 等. 双包层光纤放大器小信号放大时放大的自发辐射特性研究 [J]. 光电子·激光, 2005, 16(8): 930 - 934.

(上接第 1261 页)

- [3] Duan X F, Niu YX, Zhang C. Calculation of laser irradiation effect and analysis of laser-induced damage threshold in semiconductor [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8): 1057 - 1061.
- [4] Chen J B, Lu Q S, Zhong H R, et al. Damage threshold of CW coil to InSb (PV) Detector [J]. High Power Laser And Particle Beams., 1990, 2(2): 247 - 251.
- [5] Qiang X W, Liu F, Zhang J Q, et al. An numerical simulation of the melt-threshold of InSb induced by CW laser beams [J]. Chinese Journal of Laser, 2000, 27(4): 372 - 376.
- [6] Shu B H, Hou J, Lu Q S, et al. Experimental study of the interaction between laser and GaAs [J]. Infrared and Laser Engineering, 1999, 28(1): 40 - 42.
- [7] Wai-Fung Cheong, Scott A Prahl, Ashley J Welch, et al. A review of the optical properties of biological tissues [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1990, 26(12): 2166 - 2185.
- [8] Welch A J, Gemert J C. Optical thermal response of laser irradiated tissue [M]. New York: Plenum Press, 1995: 367 - 534.
- [9] Jin Zhen-ji, Ye Zhi-sheng The study of the thermal and acoustic injury to the tissue in double laser pulse therapy [J]. Journal of Optoelectronics' Lasers, 2002, 13(1): 98

- 101. (in Chinese)

- [10] Wu Xiu-shan, Hou Yu, Li Xi-jing. The research on thermal damage in biological induced by high-irradiance-laser [J]. Journal of China Institute of Metrology, 2002, 13(2): 135 - 138.
- [11] Tian Xiaoming, Chen Wugao. Research on theoretical model and calculation of heat 2 killing therapy of cancer with CW laser [J]. Laser & Optronics Progress, 1997, (8): 32 - 38. (in Chinese)
- [12] Liu Jing, Zhang Xuexue, Lu Wengqiang, et al. Investigation on temperature evolution in tumor hyperthermia under intervenient thermal probe heating [J]. Journal of Tsinghua University (Sci. & Tech.), 1998, 38(7): 86 - 89. (in Chinese)
- [13] Tian Xiaoming, Chen Wugao. The research on the theoretical models and calculation of vaporizing and heat 2 killing therapy of cancer with laser [J]. Laser Journal, 1998, 19(2): 51 - 57. (in Chinese)
- [14] Li Zhongming. Theoretical analysis of temperature elevation in tissue during laser irradiation [J]. Journal of Optoelectronics · Lasers, 2000, 11(4): 431 - 433. (in Chinese)
- [15] Markolf H Niemz. 激光与皮肤组织的相互作用原理及应用 [M]. 张镇西, 等译. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.