

文章编号: 0253-2239(2003)07-0887-5

Tb, Tm: YVO₄ 晶体的激光性能分析*

黄莉蕾 邬良能 付晏彬

(中国计量学院光电子研究所, 杭州 310034)

摘要: Tm: YVO₄ 和 Tb, Tm: YVO₄ 晶体中激活离子之间或激活离子与敏化离子间的交叉弛豫、与无辐射跃迁及激光上能级的辐射跃迁的几率是相近的, 对这种双掺离子晶体的激光阈值理论估算式中必须同时考虑离子间交叉弛豫。从激活离子能级跃迁速率方程和激光、抽运光传输方程推导出端面抽运的包含交叉弛豫几率等光学参量的激光阈值的理论估算式。用这些方程讨论了 Tm: YVO₄ 和 Tb, Tm: YVO₄ 的 1.5 μm 和 1.9 μm 波长的激光性能, 并论述了 Tb³⁺ 离子的作用。结果表明 Tb³⁺ 离子的掺入, 增加 1.5 μm 波段激光的强度, 降低阈值能量, 但对 1.9 μm 波长激光有负面作用。

关键词: Tb, Tm: YVO₄ 晶体; 阈值能量; 交叉弛豫
中图分类号: O734⁺.3; O433 文献标识码: A

1 引 言

Tm³⁺ 离子在各种晶体中的光谱性能已有很多研究。在 2.3 μm 和 1.9 μm 波段实现了激光输出^[1,2]。近年来 Tm³⁺ 离子^{3H₄→^{3F₄} 跃迁的 1.5 μm 波段激光引起人们重视。因为它是四能级激光系统, 其激光阈值比 Er³⁺ 的波长相近激光的阈值低许多^[3]。1.5 μm 波段是人眼安全波段, 在医疗、军事、通讯等领域有巨大的应用潜力。Tm³⁺ 离子 1.5 μm 波段激光的不足是有自终止现象。因为激光下能级 ^{3F₄} 比激光上能级 ^{3H₄} 的辐射寿命长一个数量级。Ermenoux 等^[4] 的实验研究指出, 在 Tm: YVO₄ 中加入 Tb³⁺ 离子, 激光自终止现象将得到遏止。作者通过理论计算^[5], 证实 Tm³⁺ 和 Tb³⁺ 之间相互作用导致 ^{3F₄} 荧光寿命明显缩短, 并得出 Tb³⁺ 对 Tm³⁺ 光谱性能影响的规律^[5]。}

Tb³⁺ 离子的掺入, 明显改善了 Tm³⁺ 离子在 1.5 μm 波段的激光性能, 因此引起人们深入研究的兴趣。作者利用能级跃迁速率方程和已推导出的表征激光性能的阈值表达式研究了 Tb³⁺ 和 Tm³⁺ 共掺的 YVO₄ 晶体的 1.9 μm 和 1.5 μm 波长的激光性能。

2 能级跃迁速率方程

图 1 为 Tb³⁺ 和 Tm³⁺ 的能级图。

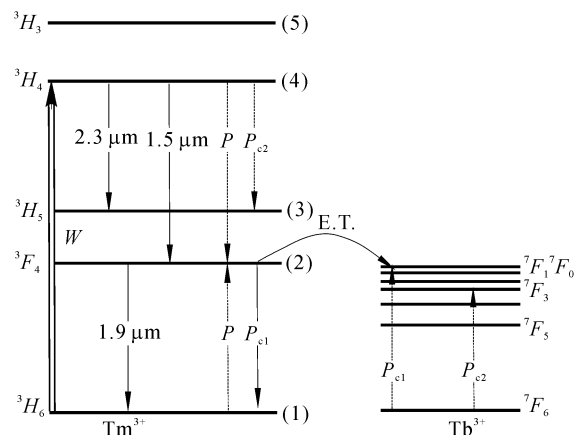


Fig. 1 The interplay between Tm³⁺ and Tb³⁺ ions

由此导出能级跃迁速率方程:

$$\frac{dN_4}{dt} = -(P + P_{c2} + Q_4)N_4 + \nu\sigma_{ap}\rho_p(z)N_1 = Q'_4N_4 + WN_1, \quad (1)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = (Q_{43} + P_{c2})N_4 - Q_3N_3 = Q'_{43}N_4 - Q_3N_3, \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = (P + Q_{42})N_4 + Q_{32}N_3 - (Q_2 + P_{c1})N_2 + PN_1 = Q'_{42}N_4 + Q_{32}N_3 - Q'_2N_2 + PN_1, \quad (3)$$

$$N_1 + N_2 + N_3 + N_4 = N_0, \quad (4)$$

式中 ν 为晶体中光速, W 为激励速率, N_0 为 Tm³⁺ 掺

* 浙江省自然科学基金(600078)和浙江大学现代光学国家重点实验室开放课题(LM01-013)资助课题。

E-mail: hll.2002cn@yahoo.com.cn

收稿日期: 2002-07-04; 收到修改稿日期: 2002-07-29

杂浓度, N_i 为第 i 能级集居数密度, $N_0 = 0.01xN$, N 为单位体积的 Y^{3+} 离子数, 对 YVO_4 晶体是 $1.25 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$; x 为掺杂的 Tm^{3+} 相对 Y^{3+} 离子的原子百分数; Q_{ij} 为 Tm^{3+} 第 $i \rightarrow j$ 能级的辐射和无辐射跃迁几率之和, 而 $Q_i = \sum_j Q_{ij}$, 表示由第 i 能级向所有下能级跃迁的几率之和。 P 为 Tm^{3+} 离子之间的 ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ 与 ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$ 跃迁之间的交叉弛豫几率; P_{cl} 为 Tm^{3+} 离子的 ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ 和 Tb^{3+} 离子

的 ${}^7F_6 \rightarrow {}^7F_0 + {}^7F_1$ 跃迁之间的交叉弛豫几率; P_{c2} 为 Tm^{3+} 离子的 ${}^3H_4 \rightarrow {}^3H_5$ 和 Tb^{3+} 离子的 ${}^7F_6 \rightarrow {}^7F_3$ 跃迁之间的交叉弛豫几率。 Q_i 、 Q_{ij} 和共振式能量转移交叉弛豫几率 P 、 P_{cl} 、 P_{c2} 可根据 J-O 理论和 Dexter 理论计算。 P 、 P_{cl} 、 P_{c2} 为由下式表征的电偶极矩耦合交叉弛豫几率 P_{dd}^{AB} 和电偶极矩与电四极矩耦合交叉弛豫几率 P_{dq}^{AB} 之和:

$$P_{dd}^{AB} = \frac{8\pi^2 e^4}{3R^6 h^2 c (2J_A + 1)(2J_B + 1)} \left(\frac{n_0^2 + 2}{3n_0} \right)^4 S \left(\sum_i \Omega_i \|U_i\|^2 \right)_A \left(\sum_i \Omega_i \|U_i\|^2 \right)_B, \quad (5)$$

$$P_{dq}^{AB} = \frac{9 \times 1.266\pi^2 e^4}{R^8 h^2 c (2J_A + 1)(2J_B + 1)} \left(\frac{n_0^2 + 2}{3n_0} \right)^4 S \left(\sum_i \Omega_i \|U_i\|^2 \right)_A \left\{ \frac{4}{9} [\langle f \| C^2 \| f \rangle \langle r^2 \rangle \langle \phi \| U^2 \| \phi \rangle]^2 \right\}_B, \quad (6)$$

式中 S 为归一化吸收线型函数 $g(\nu)$ 和归一化发射线型函数 $h(\nu)$ 的重叠积分

$$S = \int_0^\infty g(\nu)h(\nu) d\nu,$$

对 Tm^{3+} 来说, $\langle r^2 \rangle = 0.761$ 原子单位; n_0 为 YVO_4 晶体的折射率; e 、 h 、 c 分别为电子电荷、普朗克常量和真空中光速; J_A 、 J_B 分别为交叉弛豫的两对跃迁的起始能级的简并数;

$$|\langle 4f^n(S, l, J) \| U_i \| 4f^n(S', l', J') \rangle|$$

Table 1 The optic parameters Tm^{3+} ions and the cross relaxation probabilities between Tm^{3+} and Tm^{3+} , and between Tm^{3+} and Tb^{3+} [5] in $Tb, Tm: YVO_4$

Upper	3H_4			3H_5		3F_4
Lower	3H_5	3F_4	3H_6	3F_4	3H_6	3H_6
$\Delta E / \text{cm}^{-1}$	4330	6909	12720	2579	8390	5811
$A_{i,j} / \text{s}^{-1}$	20.7	241.2	3179	21	605.6	449.0
$\omega_{i,j-1} / \text{s}^{-1}$	182.6			34910		2.2
$Q_{i,j} / \text{s}^{-1}$	203.3	241.2	3179	34931.3	605.6	451.2
Q_i / s^{-1}		3623.5			35536.9	451.2
τ / ms		0.28			0.03	2.2
P / s^{-1}	$23.58(x)^2 + 11.59(x)^{8/3}$					
P_{cl} / s^{-1}	$934(xy) + 4.13[(x+y)^{8/3} - (x)^{8/3} - (y)^{8/3}]$					
P_{c2} / s^{-1}	$96(xy) + 0.0725[(x+y)^{8/3} - (x)^{8/3} - (y)^{8/3}]$					

激光发射的必要条件是增益

$$G = \int_0^L (\sigma_{es} N_j - \sigma_{as} N_k) dx$$

大于零^[6]。 σ_{es} 和 σ_{as} 为能级 j 和 k 之间对激光的发射和吸收截面(表 1 和表 2 列出了相应的数值)。

所以可以根据(7)式和(8)式讨论 Tb^{3+} 离子对 Tm^{3+} 离子的 $1.5 \mu\text{m}$ 和 $1.9 \mu\text{m}$ 波长的激光发射的影响。

为约化矩阵元, Ω 为唯象强度参量, R 为掺杂离子间距, 在 $Tm: YVO_4$ 中晶体中, $R = R_0 (0.01x)^{-1/3}$ 。 $R_0 = 3.81 \times 10^{-8} \text{ cm}$, 为 Y^{3+} 离子间距。对于 Tm^{3+} 和 Tb^{3+} 离子之间的交叉弛豫, 应去除 Tm^{3+} 离子本身之间和 Tb^{3+} 离子本身之间的交叉弛豫, 即(5)式的 $1/R^6 = 0.0001[(x+y)^2 - (x^2 + y^2)]/R_0^6$, (6)式的 $1/R^8 = 0.01^{8/3}[(x+y)^{8/3} - (x^{8/3} + y^{8/3})]/R_0^8$, y 是 Tb^{3+} 离子占据 Y^{3+} 离子格位的原子百分比。计算结果列于表 1。

$$G^{(4)} \propto \sigma_{es}^{(4)} N_4 - \sigma_{as}^{(4)} N_2, \quad (7)$$

$$G^{(3)} \propto \sigma_{es}^{(3)} N_2 - \sigma_{as}^{(3)} N_1, \quad (8)$$

式中 σ_{es} 和 σ_{as} 分别表示激光发射截面和激光吸收截面。其上标“4”和“3”分别表示对应四能级和三能级系统的激光波长。将求解速率方程(1)式得出的 N_i 与 x 的关系代入(7)式和(8)式, 就得出 $G^{(3)}$ 、 $G^{(4)}$ 与 x 的关系。对应 $G^{(3)}$ 、 $G^{(4)}$ 等于零的 x 值, 是可能发射激光的 Tm^{3+} 离子的极值。图 2 中的实线和虚线分别是在激发生率 $W = 10^5 \text{ s}^{-1}$ 条件下, 单掺 Tm^{3+} 和

Table 2 The optic parameters of Tb³⁺ and Tm³⁺ ions in YVO₄ and value of parameters in Eqs. (19) and (22)

Crystal	Frequency / ($\times 10^3 \text{ cm}^{-1}$)			Cross section of absorption or emission/ ($\times 10^{-20} \text{ cm}^2$) ^[3]					Reflectivity of input or output mirror	
	ν_p	$\nu_s^{(3)}$	$\nu_s^{(4)}$	σ_{ap}	$\sigma_{es}^{(3)}$	$\sigma_{as}^{(3)}$	$\sigma_{es}^{(4)}$	$\sigma_{as}^{(4)}$	R_1	R_2
Tb, Tm: YVO ₄	12.5	6.7	5.3	1.7	2.4	2.2	0.7	0.28	0.99	0.94

双掺粒子数分数为 0.01 的 Tb³⁺、Tm³⁺ 离子的 ³F₄ (2 能级) 向 ³H₆ (1 能级) 跃迁的增益 ($\sigma_{es}^{(3)} N_2 - \sigma_{as}^{(3)} N_1$) 与 Tm³⁺ 离子浓度的函数关系。

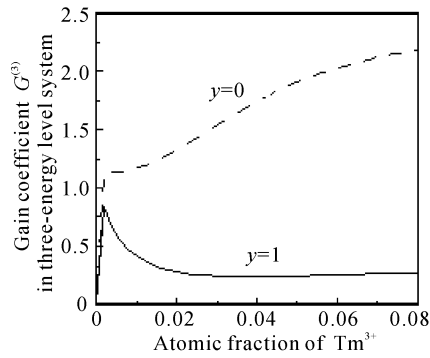


Fig. 2 The gain coefficient versus atomic fraction of Tm³⁺ in 0.01 Tb, Tm: YVO₄ and Tm: YVO₄ for $W = 10^5 \text{ s}^{-1}$

图 3 是在激发速率 $W = 10^4 \text{ s}^{-1}$ 条件下, 单掺 Tm³⁺ 和双掺粒子数分数为 0.01 的 Tb³⁺、Tm³⁺ 离子的 ³H₄ (4 能级) 向 ³F₄ (2 能级) 跃迁的增益 ($\sigma_{es}^{(4)} N_4 - \sigma_{as}^{(4)} N_2$) 与 Tm³⁺ 离子浓度的函数关系。由于 1.9 μm 波长的激光比 1.5 μm 波长的激光阈值大, 所以计算 $G^{(3)}$ 、 $G^{(4)}$ 时, 分别令 $W = 10^5 \text{ s}^{-1}$ 和 $W = 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。结果得出: Tb³⁺ 离子的掺入, 使增益系数 $G^{(3)}$ 减小, 1.9 μm 波长的激光受损, 见图 2。而 1.5 μm 波长的激光将大受裨益, 增益系数 $G^{(4)}$ 明显增大。然而在 Tm³⁺ 粒子数分数小于 0.02 以前, 激光强度随掺杂浓度增强, Tm³⁺ 粒子数分数大于 0.02 以后, 激

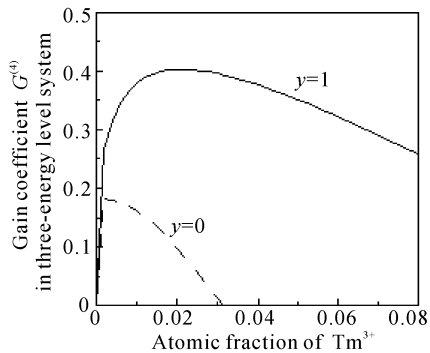


Fig. 3 The gain coefficient versus atomic fraction of Tm³⁺ in 0.01 Tb, Tm: YVO₄ and Tm: YVO₄ for $W = 10^4 \text{ s}^{-1}$

光强度随掺杂浓度的增加反而下降。表明存在最佳 Tm³⁺ 离子掺杂浓度。这可能是由于随着 Tm³⁺ 离子浓度的增加, Tm³⁺ 离子之间的交叉弛豫几率 P 增加, 而使 ³F₄ 能级 (1.5 μm 波长的激光的下能级) 集居数增加, 从而增益减少。

3 激光输出特性

基于如图 1 的激发动力学过程, 分别写出对应 ³F₄ → ³H₆ 跃迁 (三能级激光系统) 和 ³H₄ → ³F₄ 跃迁 (四能级激光系统) 的激光和抽运光的能级跃迁方程:

三能级系统:

$$\frac{dN_4}{dt} = -Q'_4 N_4 + v \sigma_{ap} \rho_p(z) N_1, \quad (9)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = Q'_{43} N_4 - Q_3 N_3, \quad (10)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = Q'_{42} N_4 + Q_{32} N_3 - Q'_2 N_2 + P N_1 + v [\sigma_{as}^{(3)} N_1 - \sigma_{es}^{(3)} N_2] [\rho_s^+(z) + \rho_s^-(z)], \quad (11)$$

四能级系统:

$$\frac{dN_4}{dt} = -Q'_4 N_4 + v \sigma_{ap} \rho_p(z) N_1 + v [\sigma_{as}^{(4)} N_2 - \sigma_{es}^{(4)} N_4] [\rho_s^+(z) + \rho_s^-(z)], \quad (12)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = Q'_{43} N_4 - Q_3 N_3, \quad (13)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = Q'_{42} N_4 + Q_{32} N_3 - Q'_2 N_2 + P N_1. \quad (14)$$

式中 ρ_s 和 ρ_p 分别为激光和抽运光光子数, 其上标 “+” 和 “-” 分别表示与抽运光同方向和反方向; σ_{ap} 表示对抽运光的吸收截面。

抽运光在谐振腔中的传输方程为

$$d\rho_p(z)/dz = -\sigma_{ap} \rho_p(z) N_1, \quad (15)$$

1.5 μm 波长的激光在谐振腔中的传输方程为

$$d\rho_s^\pm(z)/dz = \pm (\sigma_{es} N_4 - \sigma_{as} N_2) \cdot \rho_s^\pm(z), \quad (16)$$

1.9 μm 波长激光传输方程为

$$d\rho_s^\pm(z)/dz = \pm (\sigma_{es} N_2 - \sigma_{as} N_1) \cdot \rho_s^\pm(z). \quad (17)$$

用 R_1 和 R_2 表示入射和出射反射镜的有效反射系数 (包含光在腔内传播的单程损耗), 则谐振腔中激光光场的边界条件为

$\rho_s^+(0) = R_1 \rho_s^-(0)$, $\rho_s^-(L) = R_2 \rho_s^+(L)$, (18)
其中入射端面处 $z=0$, 输出端面处 $z=L$, L 为晶棒
长度。并令 $R = \sqrt{R_1 R_2}$ 。参考文献[3, 7, 8]可推导出

对应 ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ 与 ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ 跃迁的波长为 $1.9 \mu\text{m}$
和 $1.5 \mu\text{m}$ 的激光阈值功率表达式分别是

$$E_{\text{th}}^{(3)} = A\nu h\nu_p \rho_p(0) = A\nu h\nu_p \left[N_0 L - \frac{\Psi^{(3)}(\lambda)}{\sigma_{\text{ap}}} \left(1 + \frac{P}{Q_2'} \right) \right] / \{ [1 - e^{-\Psi^{(3)}(\lambda)}] \cdot \beta \}, \quad (19)$$

$$\eta_s^{(3)} = \frac{\nu_s^{(3)}}{\nu_p} \frac{(1-R_2) \sqrt{R_1}}{(1-R) \cdot (\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})} [1 - e^{-\Psi^{(3)}(\lambda)}] \beta, \quad (20)$$

其中 $\Psi^{(3)}(\lambda)$ 满足

$$\frac{\Psi^{(3)}(\lambda)}{\sigma_{\text{ap}}} \left[\sigma_{\text{es}}^{(3)} + \sigma_{\text{as}}^{(3)} - \sigma_{\text{es}}^{(3)} \frac{(Q_3 + Q_{43}') Q_2'}{Q_4' Q_3 \beta} \left(1 + \frac{P}{Q_2'} \right) \right] = \sigma_{\text{es}}^{(3)} N_0 L \left[1 - \frac{(Q_3 + Q_{43}') Q_2'}{Q_4' Q_3 \beta} \right] + \ln R, \quad (21)$$

和 $E_{\text{th}}^{(4)}(L) = A\nu h\nu_p Q_2' Q_3 \left\{ \left[1 - \left(1 + \frac{P}{Q_2'} \right) \frac{A}{B} \right] \alpha^{-1} N_0 L - \left(1 + \frac{P}{Q_2'} \right) \frac{\ln R}{B} \right\} \{ 1 - \exp[-\Psi^{(4)}(\lambda)] \}^{-1}$, (22)

$$\eta_s^{(4)} = \frac{\nu_s^{(4)}}{\nu_p} \frac{(1-R_2) \sqrt{R_1}}{(1-R) \cdot (\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})} \{ 1 - \exp[-\Psi^{(4)}(\lambda)] \}, \quad (23)$$

其中 $\Psi^{(4)}(\lambda)$ 满足

$$\Psi^{(4)}(\lambda) = \sigma_{\text{ap}} \left(\frac{\alpha}{B} \ln R + N_0 L \frac{A}{B} \right), \quad (24)$$

其他符号为

$$\beta = [Q_3 Q_{42}' + Q_{32} Q_{43}' + Q_2' (Q_3 + Q_{43}')] / (Q_4' Q_3), \quad (25)$$

$$A = \sigma_{\text{es}}^{(4)} Q_2' Q_3 - \sigma_{\text{as}}^{(4)} (Q_{42}' Q_3 + Q_{43}' Q_{32}'), \quad (26)$$

$$B = \sigma_{\text{es}}^{(4)} Q_3 (Q_2' + P) - \sigma_{\text{as}}^{(4)} [Q_{42}' Q_3 + Q_{43}' Q_{32}' - P (Q_3 + Q_{43}')], \quad (27)$$

$$\alpha = Q_2' (Q_3 + Q_{43}') + Q_3 Q_{42}' + Q_{32} Q_{43}', \quad (28)$$

式中 A 为抽运光焦斑面积(设晶棒截面大于抽运光
焦斑面积), ν_s 为激光频率, ν 为激光在晶体中传输速
率。表 2 列出 Tb, Tm: YVO₄ 晶体的光学参量和
(19)式及(22)式中的参量的数值。将表 1、表 2 中
所列的光学参量代入阈值能量表达式, 得出 E_{th} 与
Tm³⁺ 含量的关系, 见图 4 和图 5。

图 4 和图 5 的结果表明掺入粒子数分数 0.01
的 Tb³⁺ 后, 对 Tm³⁺ 离子的 $1.9 \mu\text{m}$ 波长和 $1.5 \mu\text{m}$
波长激光阈值性能都有影响。

1) 当 Tm³⁺ 含量较小时(粒子数分数 $x < 0.02$), 掺入 Tb³⁺ 以后, $1.9 \mu\text{m}$ 波长激光阈值能量 $E_{\text{th}}^{(3)}$ 略有降低。但随 Tm³⁺ 离子含量的增加, Tb³⁺ 离子对 $E_{\text{th}}^{(3)}$ 的负面作用明显呈现, 见图 4。

2) Tb³⁺ 的掺入, 使 $1.5 \mu\text{m}$ 波长激光阈值能量 $E_{\text{th}}^{(4)}$ 明显下降。而且随 Tm³⁺ 含量的增加, $E_{\text{th}}^{(4)}$ 下降的幅度很快增加, 见图 5。

3) 从图 5 还可以看出, 单掺 Tm³⁺: YVO₄ 晶
体, 当 Tm³⁺ 含量较小时(粒子数分数 $x < 0.02$), 才
有可能激发出 $1.5 \mu\text{m}$ 波长激光, 但掺入粒子数分
数 0.01 的 Tb³⁺ 以后, Tm³⁺ 含量可以扩大到粒子数
分数 0.04 左右仍可激发出 $1.5 \mu\text{m}$ 波长, 激光阈值

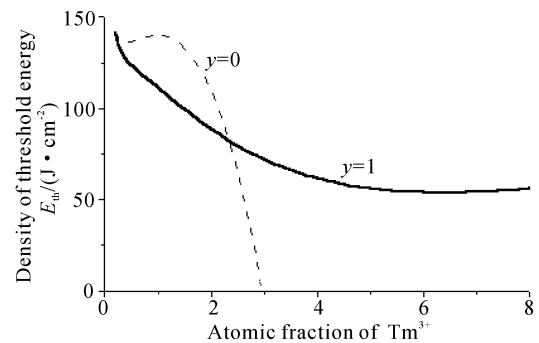


Fig. 4 The threshold energy density versus atomic
fraction of Tm³⁺ in atomic fraction 0.01 Tb, Tm:
YVO₄ and Tm: YVO₄ if rod length $L = 1 \text{ cm}$ at
 $1.9 \mu\text{m}$ lasing wavelength

低的最佳 Tm³⁺ 掺杂范围为粒子数分数 0.01~0.02
左右, 这与图 3 在粒子数分数 0.01~0.02 的 Tm³⁺
左右有较高的增益是一致的。

4) 从图 4 和图 5 的比较可以看出 $1.5 \mu\text{m}$ 波
长激光阈值能量 $E_{\text{th}}^{(4)}$ 比 $1.9 \mu\text{m}$ 波长激光阈值能量
 $E_{\text{th}}^{(3)}$ 小约一个数量级。这显示出 $1.5 \mu\text{m}$ 波长四能
级激光系统的优越性。

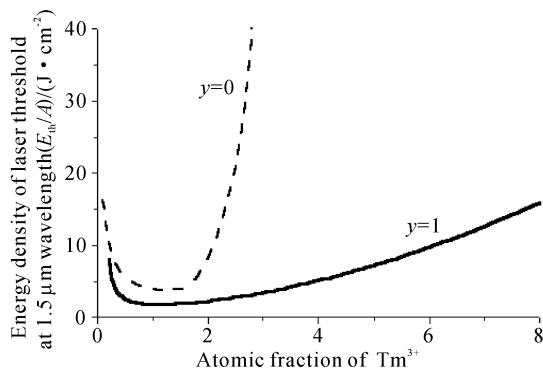


Fig. 5 The energy density of laser threshold versus the atomic fraction of Tm^{3+} in atomic fraction 0.01 Tb, atomic fraction 0.01x $Tm: YVO_4$ (solid line) and atomic fraction 0.01x $Tm: YVO_4$ (dash line) for laser rod $L = 1$ cm, pump rate $W = 10^4$ at 1.5 μm laser wavelength

结论 $Tm^{3+}: YVO_4$ 晶体中掺入 Tb^{3+} 离子, 由于 Tm^{3+} 与 Tb^{3+} 交互作用使 3F_4 亚稳能级的荧光寿命明显减少, 达到与 3H_4 能态的相近^[7]。从而 1.5 μm 波长激光自终止现象得以消除之外, 还使 1.5 μm 波长激光阈值能量 $E_{th}^{(4)}$ 明显减小。但对 1.9 μm 波长激光性能有负面影响, 它使激光阈值能量增加。激光阈值功率增加, 则更显著, 因为 $P_{th}^{(3)} = (Q_2 + P_{cl})E_{th}^{(3)}$, 所以掺入 Tb^{3+} 离子后实际上很难激发出 1.9 μm 波长激光。

Tb^{3+}, Tm^{3+} 共掺的晶体的 1.5 μm 波长激光属四能级激光系统, 其激光阈值功率比 Er^{3+} 掺杂的晶体的 1.5 μm 波长激光阈值功率低许多^[3]。因此 Tb^{3+} 和 Tm^{3+} 共掺晶体的 1.5 μm 波长激光器将有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Caird J A, Deshazer L G, Nella J. Characteristics of room temperature 2.3 μm laser emission from Tm^{3+} in YAG and $YAlO_3$. *IEEE. J. Quant. Elect.*, 1975, **11**(11):874~881
- 2 Onta K, Saits H, Obora M *et al.*. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, **32**(4):1651~1657
- 3 Huang Lilei, Hong Zhi. Analyses for lasing threshold at 2 and 1.5 μm wavelengths in $Tm: YVO_4$ crystal. *Acta Physica Sinica* (Overseas Edition), 2000, **9**(1):31~36
- 4 Ermeneux E S, Goutaudier C, Moncorge R *et al.*. Growth and fluorescence properties of Tm^{3+} doped YVO_4 and Y_2O_3 single crystal. *Optical Materials*, 1997, **8**(1~2):83~90
- 5 Huang Lilei, Hong Zhi. The study on the interaction between Tm^{3+} and Tb^{3+} rare earth ions in YVO_4 crystal. *Chin. J. Lasers* (B), 2001, **B10**(6):450~454
- 6 Shen Ke. *Lasing Principle Course* (激光原理教程). Beijing: Beijing Industry Press, 1978. 97 (in Chinese)
- 7 Huang Lilei, Fang Dawei, Hong Zhi. Analyses of output characteristics for four-level system laser. *Acta Physica Sinica* (Overseas edition), 1999, **8**(6):449~454
- 8 Huang Lilei, Hong Zhi. Theoretical analysis of the laser output characteristics in $Er: YAG$ crystal at 1.6 μm wavelength. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1998, **47**(9):1504~1508 (in Chinese)

The Study on Lasing Performance of Tb, Tm: YVO₄ Crystal

Huang Lilei Wu Liangneng Fu Yanbin

(Optoelectronic Division, China Institute of Metrology, Hangzhou 310034)

(Received 4 July 2002; revised 29 July 2002)

Abstract: The order of magnitude of the cross relaxation propability between active ions and sensitive ions in Tb, Tm: YVO₄ crystal and the cross relaxation among active ions in Tm: YVO₄ are close with that of the non-radiating transition probability and the radiant transition probability of higher level to lower level. The formula to estimate the laser threshold in the crystal including two sort codoped ions must take into account the cross relaxation among the ions. The estimated formula of the laser threshold including the probability of the cross-relaxation among the ions is deduced from the transition rate equations and transmission-equations of lasing and pumping light for end-pumped laser. The lasing performance of Tm: YVO₄ and Tb, Tm: YVO₄ at 1.5 μm and 1.9 μm wavelengths is discussed with these threshold equations, the action of Tb^{3+} ions is also expounded. The results show that doping Tb^{3+} ions in Tm: YVO₄ increases intensity of lasing light and minifies the laser threshold at 1.5 μm wavelength. But it has a bad effect on the laser at 1.9 μm wavelength.

Key words: Tb, Tm: YVO₄ crystal; threshold energy; cross relaxation among the ions