

敏化离子 Ce^{3+} 对 $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ 的 $1.6\ \mu\text{m}$ 波长激光性能的影响^{*}

黄莉蕾

(中国计量学院光电子研究所, 杭州 310034)

(1998 年 5 月 19 日收到)

测定了 $\text{Ce}^{3+}, \text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ 中 Ce^{3+} 离子的吸收截面. 用从能级跃迁速率方程和激光传输方程推出的表达式计算了 $1.6\ \mu\text{m}$ 波长激光的阈值能量(功率)和斜率效率. 表明在 $\text{Ce}^{3+}, \text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ 中, Ce^{3+} 对 Er^{3+} 离子的激光性能影响与激活离子 Er^{3+} 的浓度、晶棒大小有关. 短晶棒或浓度低的晶体加入 Ce^{3+} 可降低 Er^{3+} 的激光阈值, 增加斜率效率. 而长晶棒、或 Er^{3+} 浓度高的晶体加入 Ce^{3+} 反而增加激光阈值, 减小斜率效率.

PACC: 4255F; 4260

1 引 言

Er^{3+} 离子波长约为 $1.6\ \mu\text{m}$ 的激光在通讯、测距、医疗等方面有很多应用价值. 它是在抽运光激励下, 亚稳态 $^4\text{I}_{13/2}$ 向基态 $^4\text{I}_{15/2}$ 较高的斯塔克能级跃迁的结果, 属三能级系统. 激光阈值能量(功率)较高, 影响推广和使用. 选择合适的基质晶体或共掺敏化离子能改善激光性能.

3d 过渡族离子 $\text{Cr}^{3+}, \text{V}^{3+}, \dots$ 和稀土族离子 $\text{Ce}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, \dots$ 对激活离子 $\text{Nd}^{3+}, \text{Ho}^{3+}, \text{Tm}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ 等有敏化作用. 它们的吸收系数大, 吸收谱带宽, 能有效地吸收抽运光能, 再通过共振或非共振方式把能量转移给激活离子, 从而影响激光性能. Johnson 等^[1] 早期报道过共掺敏化离子降低激光阈值的实验结果, 以后虽有多篇掺敏化离子的固体激光器报道^[2,3], 但均未与单掺激活离子的激光器性能作比较. 影响激光器性能的因素很多, 除了基质晶体品质、激活离子浓度外, 还有谐振腔参量、抽运光源特性等, 所以定量比较困难, 这或许是一个主要原因. 本文根据从速率方程推出的表达式从理论上比较掺 Ce^{3+} 对 $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ 激光性能的影响.

2 理论分析

根据能级跃迁速率方程和激光传输方程, 作者^[4] 导出了单掺激活离子的三能级系统

^{*} 浙江省自然科学基金(批准号: 694043)资助的课题.

适用的激光阈值能量 E_{th} 、阈值功率 P_{th} 和激光输出斜效率 η_s 的表达式

$$E_{th} = Ah\nu_p \left[N_0 L - \frac{\Psi(\lambda)}{\sigma_{ap}} \right] / [1 - \exp(-\Psi)], \quad (1)$$

$$P_{th} = Ah\nu_p \left[N_0 L - \frac{\Psi(\lambda)}{\sigma_{ap}} \right] / \tau_{21} [1 - \exp(-\Psi)], \quad (2)$$

$$\eta_s = \frac{\nu_s}{\nu_p} \frac{(1 - R_2) \sqrt{R_1}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})} [1 - \exp(-\Psi)], \quad (3)$$

其中 $\Psi(\lambda)$ 为

$$\Psi(\lambda) = \frac{\sigma_{ap}}{\sigma_{es} + \sigma_{as}} \left[\frac{1}{2} \ln(R_1 \cdot R_2) + \sigma_{es} N_0 L \right], \quad (4)$$

式中 ν_p , ν_s 是抽运光和激光频率; σ_{ap} , σ_{as} , σ_{es} 分别是对抽运光、激光的吸收截面和辐射截面, R_1 和 R_2 是线性谐振腔输入、输出射镜的反射率, τ_{21} 是亚稳态 $^4I_{13/2}$ 的荧光寿命; A 是抽运光焦斑面积(设晶棒截面大于抽运光焦斑面积); N_0 和 L 是晶体中激活离子掺杂浓度和晶棒长度; h 是普朗克常量. 敏化离子将从抽运光吸收的光能转移给激活离子, 当敏化离子的荧光带中心和激活离子吸收带中心之间隙 $\Delta\nu_1 < \frac{1}{2}(\Delta\nu_s + \Delta\nu_a)$ 时主要是共振式能量转移, 当该宽度 $\Delta\nu_2 > \frac{1}{2}(\Delta\nu_s + \Delta\nu_a)$ 时主要是非共振式能量转移. 其概率 W 分别用 W_c 和 W_{nc} 表示^[5],

$$W_c(\Delta\nu_1) \propto \int g_s(\nu) h_a(\nu) d\nu, \quad (5)$$

$$W_{nc}(\Delta\nu_2) \propto W_c(0) \exp(-\beta\Delta\nu_2), \quad (6)$$

式中 $\Delta\nu_s$ 和 $\Delta\nu_a$ 是荧光带和吸收带的半宽度, $g_s(\nu)$ 和 $h_a(\nu)$ 是敏化离子荧光带归一化线型函数和激活离子吸收带归一化线型函数. $\Delta\nu_2 = h\Delta\nu_1$.

敏化离子吸收抽运光能量并转移给激活离子的能力, 可以用 $\sigma'_{ap} W$ 来表征. 这里 σ'_{ap} 是敏化离子对抽运光的吸收截面, W 是能量转移概率. 所以计算敏化离子和激活离子共掺晶体的激光性能时, 只要在(1)–(4)式中以 $\sigma'_{ap} W$ 来代替 σ_{ap} 即可.

3 Ce, Er:YAG 晶体波长约为 $1.6 \mu\text{m}$ 的激光性能

Er:YAG 晶体波长约为 $1.6 \mu\text{m}$ 的激光性能, 作者已作分析^[4]. 为了论述敏化离子 Ce^{3+} 的作用, 令 Ce, Er:YAG 中 Er^{3+} 的浓度与 Er:YAG 晶体中的 Er^{3+} 的浓度相同, 仍为 2 at %, 谐振腔参量也不变, 即 $R_1 = 0.99$, $R_2 = 0.94$.

图 1 为 0.2 at % Ce, 2 at % Er:YAG 晶体的透过率谱, 中心波长为 $0.455 \mu\text{m}$ 处是 Ce^{3+} 离子的强吸收线, 根据图 1 求出该波长处 Ce^{3+} 离子的吸收截面 $\sigma'_{ap} = 2.0 \times 10^{-20} \text{cm}^2$. Ce^{3+} 离子向 Er^{3+} 离子能量转移概率 W 约为 85 %^[6], 将有关参量代入(1)–(4)式, 得出 E_{th} 和 η_s 与晶棒长度 L 和激活离子浓度 N_0 的关系. 图 2(a) 和图 2(b) 分别为设定 $L = 1 \text{cm}$ 时, E_{th} 和 η_s 与激活离子浓度 N_0 的关系和设定 $N_0 = 2 \text{at \%}$ ($2.76 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$) 时, E_{th} 和 η_s 与晶棒长度 L 的关系.

由图2可以看出:敏化离子 Ce^{3+} 对激光阈值有明显的影响,而且影响的大小还与激活离子浓度 N_0 和晶体长度 L 有关.在文献[4]中,作者曾指出激光阈值在晶体长度大于

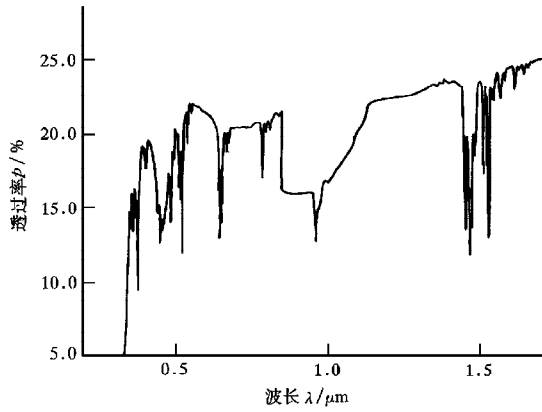


图1 0.2 at % Ce, 2 at % Er:YAG 晶体的透过率谱 ($L=0.78\text{ cm}$)

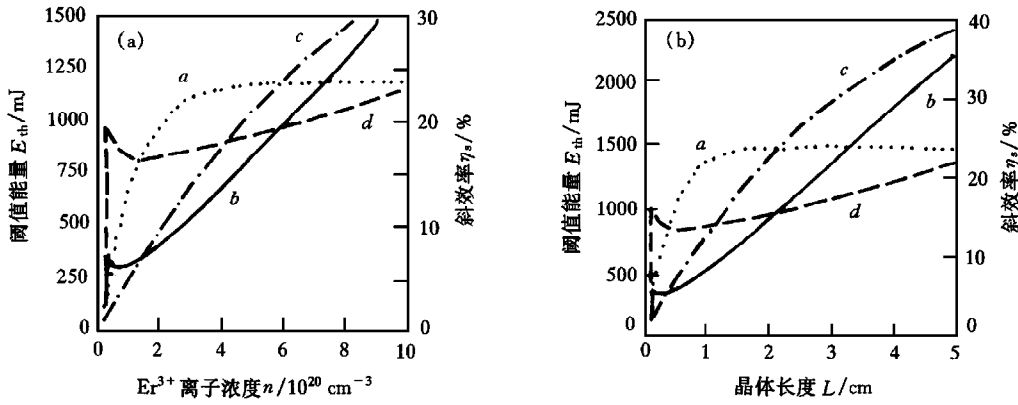


图2 当晶体长度为 $L=1\text{ cm}$, (a) Er^{3+} 浓度为 $N_0=2.76 \times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$ 时, (b) 阈值能量 E_{th} 和斜率效率 η_s 与晶体长度 (b) 和 Er^{3+} 浓度 (a) 的关系 a 为 Ce, Er:YAG 斜率效率; b 为 Ce, Er:YAG 阈值能量; c 为 Er:YAG 斜率效率; d 为 Er:YAG 阈值能量

最佳长度 L_{op} 后随 L 增加,在浓度大于最佳浓度 N_{op} 后激光阈值随 N_0 增大而增加,而且增长的梯度由抽运光频率 ν_p 决定.当 N_0 和 L 适当大以后, (1) — (3) 式中的 $[1 - \exp(-\Psi(\lambda))] \rightarrow 1$, 将 (4) 式代入, 于是 (1) 式改为

$$E_{\text{th}} = Ah\nu_p \frac{1}{\sigma_{\text{es}} + \sigma_{\text{as}}} \left[\sigma_{\text{as}} N_0 L - \frac{1}{2} \ln R_1 R_2 \right], \quad (1')$$

将 (1') 式对 N_0 或 L 求导, 得到

$$\frac{\partial E_{\text{th}}}{\partial L(\text{或 } N_0)} = Ah\nu_p \frac{\sigma_{\text{as}}}{\sigma_{\text{es}} + \sigma_{\text{as}}} N_0(\text{或 } L). \quad (7)$$

Ce^{3+} 离子的抽运光波长为 $0.455\ \mu\text{m}$, Er^{3+} 离子的抽运光波长为 $0.97\ \mu\text{m}$, 所以 Ce , $\text{Er}:\text{YAG}$ 的 $E_{\text{th}}-L$ 和 $E_{\text{th}}-N_0$ 的曲线增长梯度大于 $\text{Er}:\text{YAG}$ 的. 两种晶体的 $E_{\text{th}}-L$ 和 $E_{\text{th}}-N_0$ 曲线有交点(见图 2). 即出现了当 Er^{3+} 离子浓度 N_0 低或晶棒短时, Ce^{3+} 离子的敏化作用是降低阈值, 当 Er^{3+} 浓度高或晶棒长时, Ce^{3+} 离子的敏化作用反而出现升高阈值的现象.

上述结果表明, 利用敏化作用改善激光性能时要考虑敏化离子的吸收截面和强吸收线的中心波长, 该波长越接近激光波长越好. 如果其强吸收线的中心波长比较短, 则还要考虑适当的晶体尺寸和激活离子浓度, 否则敏化作用相反.

- [1] L. F. Johnson, J. E. Geusie, L. G. Van Uitert, *Appl. Phys. Lett.*, **7**(5)(1965), 127.
- [2] G. J. Quales, A. Rosenlaus, I. D. Abella *et al.*, *Opt. and Quant. Elect.*, **22**(1990), 141.
- [3] Dan Bar-Joseph, *Proc.*, SPIE., **1410**(1991), 142.
- [4] Huang Li-lei, Hong Zhi, *Acta Physics Sinica*, **47**(1998), 1504(in Chinese).
- [5] F. E. Auzel, *Proc.*, IEEE., **61**(6)(1973), 758.
- [6] M. E. Doroshenko, M. A. Ivanov, V. B. Sigachev *et al.*, *Sov. J. Quantum Electron.*, **22**(7)(1992), 588.

EFFECTS OF Ce^{3+} ON PROPERTIES OF THE $\sim 1.6\ \mu\text{m}$ WAVELENGTH LASER FROM THE Er^{3+} DOPED YAG CRYSTAL*

HUANG LI-LEI

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

(Received 19 May 1998)

ABSTRACT

The absorption cross-section of Ce^{3+} ions in the $\text{Ce}^{3+}, \text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ crystal has been measured. The laser threshold energy (or power) and laser slope efficiency are calculated using a formula deduced from rate equations on the transitions of energy levels. It is shown that the effect of Ce^{3+} ions in $\text{Ce}^{3+}, \text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ on properties of the laser at $\sim 1.6\ \mu\text{m}$ wavelength depends upon the active ion concentration and the length of the crystal rod. The effect of Ce^{3+} ion is to reduce the laser threshold energy and increase the slope efficiency, when the crystal rod is shorter or the concentration of Er^{3+} ion is lower. But when the crystal rod is longer or the concentration of Er^{3+} ion is higher, the effect of Ce^{3+} ions is on the contrary.

PACC: 4255F; 4260

* Project supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (Grant No. 694043), China.