

文章编号: 1001-3806(2011)06-0761-04

Cr, Tm, Ho:YAG 激光器温度特性的数值分析

郭嘉伟¹, 李彤¹, 牛瑞华^{1,2*}, 薛亮平¹, 李燕凌¹, 王宏元¹

(1. 西南技术物理研究所, 成都 610041; 2. 四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘要: 为了分析 Cr:YAG 激光器在受激跃迁时的温度特性, 从速率方程中腔内光子数密度出发, 考虑 Cr:YAG 的准三能级特性以及 Tm-Ho 准热平衡体系的影响, 定义了相对振荡效能参量。采用数值模拟的方法, 分析了相对振荡效能的温度特性, 得到了其温度变化曲线。结果表明, Cr:YAG 的相对振荡效能是温度的非线性减函数, 且存在截止温度使腔内振荡无法产生; 截止温度与 Tm-Ho 准热平衡体系的储能成正比, 相对振荡效能也随 Tm-Ho 准热平衡体系的储能的增大而增大。这一结果为 Cr:YAG 激光器受激跃迁的温度特性提供了理论依据, 对改善其工作特性和优化输出结果具有指导性意义。

关键词: 激光器; 温度; 数值模拟; Cr:YAG; 速率方程; 准三能级; Tm-Ho 准热平衡体系

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.06.010

Analysis of the temperature characteristics of a Cr, Tm, Ho:YAG laser

GUO Jia-wei¹, LI Tong¹, NIU Rui-hua^{1,2}, XUE Liang-ping¹, LI Yan-ling¹, WANG Hong-yuan¹

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 2. College of Electronics and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: In order to analyze the temperature characteristics in the stimulated emission of a Cr:YAG laser, taking the quasi-three-level characteristics of Cr:YAG and the influence of Tm-Ho quasi-thermal equilibrium system into account, a so-called relative oscillation efficiency parameter was defined based on the photon density in the rate equation. The numerical simulation results show that relative oscillation efficiency is a nonlinear decreasing function of temperature, and there is a stop temperature at which the stimulated emission can not happen. The stop temperature is in direct proportion to the energy stored by Tm-Ho quasi-thermal equilibrium system, and relative oscillation efficiency also augments with the stored energy rising. The analysis provides a theoretical evidence of the temperature characteristics of Cr:YAG, and is useful for optimizing the output pulse.

Key words: lasers; temperature; numerical simulation; Cr:YAG; rate equation; quasi-three-level; Tm-Ho quasi-thermal equilibrium system

引言

掺 Cr³⁺, Tm³⁺, Ho³⁺ 3 种离子的 Cr:YAG 激光器输出中心波长为 2.09 μm, 该波段处于水的吸收峰, 又处在大气窗口, 且属于人眼安全波段, 所以在军事、医疗、通信等领域具有广泛的应用前景^[1]。Cr:YAG 激光器可以稳定工作于室温环境, 有很高的斜率效率, 能够输出焦耳级的脉冲^[2], Ho³⁺ 上能级长寿命的特点使其还具有调 Q 输出的潜力^[3-5], 国内外学者对该激光器都有广泛的研究。但由于 Cr:YAG 为准三能级激光器, 其输出性能受温度影响严重, 在很大程度上限制

了其应用^[2,6-9]。

作者从速率方程出发, 针对 Cr:YAG 激光器准三能级的特点以及 Tm-Ho 准热平衡体系的影响, 数值模拟了 Cr:YAG 的受激辐射效能随制冷温度的变化, 分析了其温度特性。

1 Cr:YAG 的受激跃迁温度特性

如图 1 所示, 在 Cr:YAG 中, Cr³⁺ 吸收抽运光的能量后跃迁至 ⁴T₁ 和 ⁴T₂ 能级, 很快无辐射弛豫到 ²E 能级, 然后将能量转移到 Tm³⁺ 的 ³F₂ 和 ³F₃ 能级, 再经无辐射弛豫到 ³H₄ 能级。Tm³⁺ 的 ³H₄ 能级和 ³H₆ 能级通过量子效率为 2 的交叉弛豫过程将能量转移至 ³F₄ 能级, 再通过 Tm-Ho 准热平衡体系的作用使基态 Ho³⁺ 跃迁至 ⁵I₇ 能级, 最后 ⁵I₇ 能级的 Ho³⁺ 跃迁回 ⁵I₈ 能级产生 2.09 μm 受激辐射^[5,7-8]。

作者简介: 郭嘉伟 (1986-), 男, 硕士研究生, 从事固体激光器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: 2008nrh@163.com

收稿日期: 2011-01-27; 收到修改稿日期: 2011-03-09

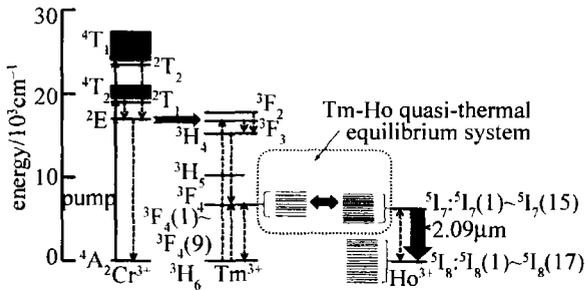


Fig. 1 The energy level diagram of CTH:YAG

在 YAG 晶体场中, Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 的每个 $2S+1L_J$ 能级 (J 为总角动量) 均分列为 $2J+1$ 个 Stark 分裂能级 (如图 1 所示)^[10], 能级布局数服从玻尔兹曼分布^[8]。表 1 中列出了 CTH:YAG 中 Tm^{3+} 的 3F_4 和 Ho^{3+} 的 5I_7 , 5I_8 能级的各 Stark 分裂能级的能量 (用波数 cm^{-1} 表示)^[10-11]。

Table 1 The energy of stark level in Tm^{3+} (3F_4) and Ho^{3+} (5I_7), Ho^{3+} (5I_8) manifold

sublevel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$^3F_4/\text{cm}^{-1}$	5556	5736	5832	5901	6041	6108	6170	6224	6233
$^5I_7/\text{cm}^{-1}$	5229	5232	5243	5250	5303	5312	5320	5341	5352
$^5I_8/\text{cm}^{-1}$	0	4	41	51	138	145	151	160	399
sublevel	10	11	12	13	14	15	16	17	—
$^3F_4/\text{cm}^{-1}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$^5I_7/\text{cm}^{-1}$	5375	5395	5404	5418	5455	5490	—	—	—
$^5I_8/\text{cm}^{-1}$	418	448	457	498	506	520	531	536	—

只考虑单一波长, 不失一般性地认为受激跃迁的上能级是 5I_7 中最下方的 Stark 分裂能级 $^5I_7(1)$, 下能级是 5I_8 (基态能级) 中较上方 Stark 分裂能级 $^5I_8(12)$ ^[7-8, 12]。则这两个 Stark 分裂能级的玻尔兹曼分数分别为:

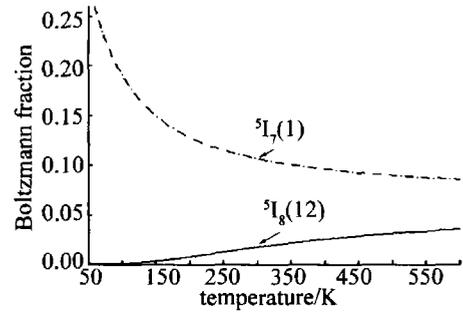
$$f_{\text{Ho}(^5I_7(1))} = \frac{\exp[-E_{\text{Ho}(^5I_7(1))}/(k_B T)]}{\sum_j^{15} \exp[-E_{\text{Ho}(^5I_7(j))}/(k_B T)]} \quad (1)$$

$$f_{\text{Ho}(^5I_8(12))} = \frac{\exp[-E_{\text{Ho}(^5I_8(12))}/(k_B T)]}{\sum_j^{17} \exp[-E_{\text{Ho}(^5I_8(j))}/(k_B T)]} \quad (2)$$

式中, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为热力学温度, $E_{\text{Tm}, \text{Ho}}$ 为对应能级的能量。将表 1 中的数值代入 (1) 式和 (2) 式, 得到 CTH:YAG 上下能级的布局数随温度变化的曲线。

如图 2 所示, $f_{\text{Ho}(^5I_7(1))}$ 是温度的减函数, $f_{\text{Ho}(^5I_8(12))}$ 是温度的增函数, 随着温度的升高, CTH:YAG 上能级的粒子数会减少, 下能级的粒子数会增加, 定性地说明了准 3 能级系统受激跃迁效率随温度的升高而降低。

根据反转粒子数的定义以及准 3 能级的特点^[13-14], CTH:YAG 的反转粒子数密度为:

Fig. 2 The Boltzmann fraction of $^5I_7(1)$ and $^5I_8(12)$

$$n_{\text{CTH}} = f_{\text{Ho}(^5I_7(1))} \cdot n_{\text{Ho}(^5I_7)} - f_{\text{Ho}(^5I_8(12))} \cdot n_{\text{Ho}(^5I_8)} \quad (3)$$

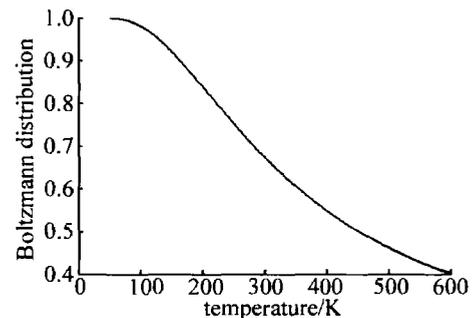
式中, $n_{\text{Ho}(^5I_7)}$ 和 $n_{\text{Ho}(^5I_8)}$ 分别为处于 5I_7 和 5I_8 能级的粒子数密度。由于 5I_7 能级寿命很长 (7.6ms)^[15-16], 5I_7 之上的能级寿命与之相比均很短^[17], n_{Tm} 和 n_{Ho} 为 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 的掺杂浓度, 可认为有 $n_{\text{Ho}(^5I_7)} + n_{\text{Ho}(^5I_8)} = n_{\text{Ho}}$ 。

在 CTH:YAG 中, Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 具有相同的点群对称结构以及相似的核外电子分布^[10], Tm^{3+} 的 3F_4 和 Ho^{3+} 的 5I_7 由于能级高度接近, 能级寿命均很长 (3F_4 : 10ms, 5I_7 : 7.6ms)^[15-16, 18], 但这两个能级间的能量传输时间却很短 (约 10 μs)^[3, 8, 11, 19]。所以可将 3F_4 和 5I_7 看作一个能级体系: Tm-Ho 准热平衡体系 (如图 1 所示)^[11, 19]。在这个体系中 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 被视为同一种粒子, 服从准玻尔兹曼分布, 体系中 Ho^{3+} 的布局数为:

$$f_{\text{Ho}(^5I_7)} = \frac{n_{\text{Ho}} \sum_j^{15} \exp[-E_{\text{Ho}(^5I_7(j))}/(k_B T)]}{n_{\text{Ho}} \sum_j^{15} \exp[-E_{\text{Ho}(^5I_7(j))}/(k_B T)] + n_{\text{Tm}} \sum_j^9 \exp[-E_{\text{Tm}(^3F_4(j))}/(k_B T)]} \quad (4)$$

且 $f_{\text{Tm}(^3F_4)} = 1 - f_{\text{Ho}(^5I_7)}$ 。此处假设 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 的相对掺杂原子数分数为典型值 (0.05, 0.005)^[1, 5, 8], 将表 1 中的数值代入 (4) 式, 得到 Tm-Ho 准热平衡体系中 Ho^{3+} 的布局数随温度变化的曲线。

如图 3 所示, $f_{\text{Ho}(^5I_7)}$ 是温度的减函数, 随着温度的升高, Tm-Ho 准热平衡体系中的能量将逐渐移动到 3F_4

Fig. 3 The Boltzmann distribution of 5I_7 in Tm-Ho quasi-thermal equilibrium system

能级上。在体系达到准热平衡时有 $\frac{n_{Ho(5I_7)}}{f_{Ho(5I_7)}} = \frac{n_{Tm(3F_4)}}{f_{Tm(3F_4)}}$, 定义无量纲参量 $b = \frac{n_{Tm(3F_4)} + n_{Ho(5I_7)}}{n_{Ho}}$, 则 $\frac{n_{Ho(5I_7)}}{n_{Ho}} = f_{Ho(5I_7)} b$, 代入(3)式得:

$$n_{CTH} = \left[(f_{Ho(5I_7(1))} + f_{Ho(5I_8(12))}) \cdot f_{Ho(5I_7)} b - f_{Ho(5I_8(12))} \right] n_{Ho} \quad (5)$$

在不考虑抽运和自发辐射时, 写出一一般性的激光速率方程^[13-14]为:

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = -\gamma c \sigma \phi n \\ \frac{d\phi}{dt} = c \sigma \phi n \frac{l}{l'} - \frac{\phi}{\tau_c} \end{cases} \quad (6)$$

式中, n 为反转粒子数密度, γ 为反转减少因子, ϕ 为腔内光子数密度, c 为介质中的光速, σ 为受激发射截面 (Ho^{3+} 对应 $2.09\mu m$ 辐射的受激发射截面为 $7.8 \times 10^{-20} cm^2$), l 为增益介质长度, l' 为谐振腔等效光学长度, $\tau_c = \frac{t_r}{L + \ln(\frac{1}{R_1})}$ 为腔内光子平均寿命, $t_r = \frac{2l'}{c}$ 为腔内

光子往返时间, L 为腔内无用损耗, R_1 为输出镜反射率^[12-14, 16]。准三能级系统的反转减少因子是温度的非线性增函数, 其取值通常在 $1 \sim 1.5$ 之间^[12]。 ϕ 与瞬时腔内振荡功率成正比^[14], $\frac{d\phi}{dt}$ 代表了腔内振荡功率的变化。将(5)式和 τ_c 代入(6)式, 得:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{c\phi}{2l'} \left\{ 2l\sigma n_{Ho} \left[(f_{Ho(5I_7(1))} + f_{Ho(5I_8(12))}) \cdot f_{Ho(5I_7)} b - f_{Ho(5I_8(12))} \right] - L - \ln\left(\frac{1}{R_1}\right) \right\} \quad (7)$$

2 数值模拟及结果分析

在(7)式中, $\frac{c\phi}{2l'}$ 不随温度变化, 定义一个无量纲的参量 E 为相对振荡效能, 它反映了腔内振荡功率变化趋势和相对变化速率, $\frac{d\phi}{dt} = \frac{c\phi}{2l'} E$, 则:

$$E = 2l\sigma n_{Ho} \left[(f_{Ho(5I_7(1))} + f_{Ho(5I_8(12))}) \cdot f_{Ho(5I_7)} b - f_{Ho(5I_8(12))} \right] - L - \ln\left(\frac{1}{R_1}\right) \quad (8)$$

由前面的分析可知, E 是热力学温度 T 的函数。参量 b 反映了 Tm-Ho 准热平衡体系的总储能, 其值随时间变化, 但不随温度变化。选择整个脉冲期间 b 的最大值 $b_{max} = \max[b(t)]$, b_{max} 可由 CTH:YAG 的速率方程模型求得, 具体值依赖于抽运参量(功率、脉宽、效率等)和增益介质参量(长度、截面半径、掺杂浓度等), 其典型值的范围为 $0 < b_{max} < 1$ 。 l, L 和 R_1 是谐振腔的

参量, 不随温度变化, 不参与受激辐射之前的能量转移过程, 其值改变也不会影响 Tm-Ho 准热平衡体系的储能。由(8)式的数学特性分析, L 和 R_1 的取值不会影响 E 温度曲线的形状, 只会使曲线平移; l 的取值对 E 温度曲线的整体形状有一定影响, 但不影响变化趋势, 所以, 这几个参量的取值不会影响 E 温度曲线的性质。此处不失一般性取 $l = 12cm, R_1 = 0.95, L$ 取为腔内无用损耗的典型值 0.15 ^[13], 并将(1)式、(2)式和(4)式代入(8)式, 令 b_{max} 分别为 $0.3, 0.5, 0.7$, 得到 E 随 T 变化的曲线。如图4所示, 相对振荡效能 E 是温度 T 的非线性减函数。当温度足够高时, E 为负值, 腔内振荡功率始终趋于衰减, 无法产生激光。随着 b_{max} 值的增加, E 曲线的高度上升, 但曲线形状基本不变。将图4中的3条曲线分别对 T 求导, 得到如图5所示的 E 的温度导数曲线。

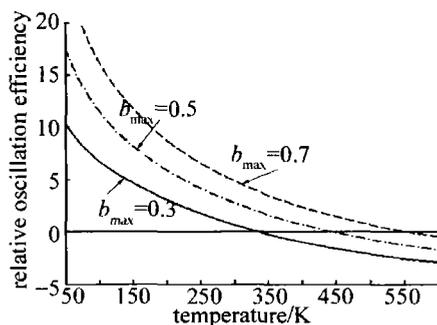


Fig. 4 The relative oscillation efficiency of CTH:YAG

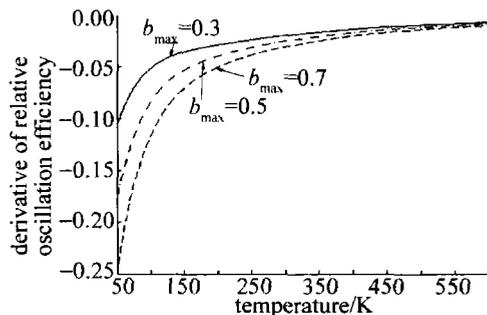


Fig. 5 The derivative of relative oscillation efficiency of CTH:YAG

图5中, E 的导数始终为负, 温度越低时, E 的导数越小, 且 b_{max} 值越高, E 的导数也越小。所以, 温度的降低和 b_{max} 值的升高都导致 E 受温度影响更加剧烈。而图5表明, 温度的降低和 b_{max} 值的升高都会使 E 值增加, 所以相对振荡效能越大, 其受温度的影响就越大。

定义当 $E(T_0, b_{max}) = 0$ 时的温度 T_0 为截止温度, 当温度超过此值时, 相对振荡效能为负值, 腔内振荡功率始终趋于衰减, 不可能有腔内振荡产生, 受激跃迁被截止。画出 T_0 随 b_{max} 的变化曲线。如图6所示, 截止温度是 b_{max} 的增函数, 且当 $b_{max} > 0.1$ 时, 基本呈线性变化。受激辐射可以被温度截止, Tm-Ho 准热平衡体系的储能越大, 截止就越难。

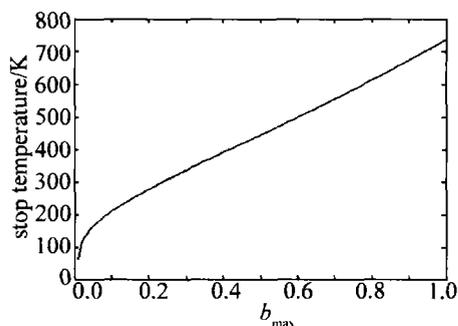


Fig. 6 Stop temperature of change with b_{\max} of CTH:YAG

这里需要特别指出,对应于截止温度 T_0 的 b_{\max} 是在动态封锁下得到的值。当抽运参量相同时,由于静态下弛豫振荡的存在, b 值较低,一直在起振阈值附近振荡。动态下,由于封锁时的能量积累,在 Q 开关打开的瞬间(假设选取最佳 Q 延时), b 达到其最大,其值远高于静态。所以,静态下的 b_{\max} 对应的 T_0 比动态下的低。当温度高于此值时静态运行,腔内振荡无法立刻形成,可以看作被温度封锁。此时, Tm-Ho 准热平衡体系的能量将进一步积累,随着能量的积累, b_{\max} 值也在同步上升,对应 b_{\max} 的 T_0 也在上升。当 T_0 上升到超过当前温度时,出现 $E > 0$, 受激跃迁不再被截止,腔内振荡产生。

动态封锁下得到的 b_{\max} 值随温度存在微小变化,这是由于 Tm-Ho 准热平衡体系的寿命^[19]为:

$$\tau_{\text{Tm-Ho}} = \frac{\tau_{\text{Ho}(^5\text{I}_7)} \tau_{\text{Tm}(^3\text{F}_4)}}{\tau_{\text{Tm}(^3\text{F}_4)} f_{\text{Ho}(^5\text{I}_7)} + \tau_{\text{Ho}(^5\text{I}_7)} f_{\text{Tm}(^3\text{F}_4)}} \quad (9)$$

$^3\text{F}_4$ 和 $^5\text{I}_7$ 能级寿命不同 ($^3\text{F}_4$: 10ms, $^5\text{I}_7$: 7.6ms), 所以温度的改变会影响, 从而影响 Tm-Ho 准热平衡体系的储能效果。但 $^3\text{F}_4$ 和 $^5\text{I}_7$ 的能级寿命均很长, 且相差不大, 所以 Tm-Ho 准热平衡体系的自发损耗相对很小, 温度对其储能效果的影响也很小。根据速率方程模型的计算, 温度相差 100K 时, 对应 T_0 的差异小于 1K, 可以忽略不计。

3 结论

通过速率方程和准三能级特性以及 Tm-Ho 准热平衡体系, 分析了 CTH:YAG 激光器的受激辐射效能随制冷温度的变化。CTH:YAG 的相对振荡效能是温度的非线性减函数, 相对振荡效能越大, 其受温度的影响也越大。且当温度足够高时, 腔内振荡将被温度所截止。Tm-Ho 准热平衡体系的储能越大, 相对振荡效能就越大, 截止温度也越高。为 CTH:YAG 激光器受激跃迁的温度特性提供了理论依据, 对改善其工作特性和优化输出结果具有指导性意义。

参考文献

[1] YE H B, ZHU Ch J, LI Zh J. Present development of Cr, Tm, Ho:YAG

laser at 2.1 μm wavelength[J]. Laser Technology, 1996, 20(4): 253-256 (in Chinese).

[2] YE H B, KUANG N J, ZHU Ch H, *et al.* Ho:YAG laser with 3J output operating at room temperature and 2.1 μm wavelength[J]. Laser Technology, 1996, 20(6): 352-355 (in Chinese).

[3] CHEN Ch Sh, WANG J, SONG Zh H, *et al.* Experimental study of Q-switched Cr, Tm, Ho:YAG laser[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15(6): 564-571 (in Chinese).

[4] JANI M C, BARNES N P, MURRAY K E. Flash-lamp-pumped Ho:Tm:Cr:YAG and Ho:Tm:Er:YLF lasers: experimental results of a single, long pulse length comparison[J]. Applied Optics, 1997, 36(15): 3357-3362.

[5] BOWMAN S R, WININGS M J, SEARLES S, *et al.* Short-pulsed 2.1 μm laser performance of Cr, Tm, Ho:YAG[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(5): 1129-1131.

[6] YAO Y Ch, LI Zh J, HUANG Ch Y, *et al.* Study of the medical Cr, Tm, Ho:YAG laser system[J]. Applied Laser, 2006, 26(4): 239-242 (in Chinese).

[7] YAO Y Ch, LI Zh J, HUANG Ch Y, *et al.* Theoretical simulation of Cr, Tm, Ho:YAG laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(7): 1351-1355 (in Chinese).

[8] BOWMAN S R, WININGS M J, AUYEUNG R C Y, *et al.* Laser and spectral properties of Cr, Tm, Ho:YAG at 2.1 μm [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(9): 2142-2149.

[9] LI Y L, ZENG Q Y, LI T, *et al.* Experimental study of Cr, Tm, Ho:YAG lasers[J]. Laser Technology, 2008, 32(6): 563-565 (in Chinese).

[10] GRUBER J B, HILLS M E, SELTZER M D, *et al.* Energy levels and crystal quantum states of trivalent holmium in yttrium aluminum garnet[J]. Journal of Applied Physics, 1991, 69(12): 8183-8204.

[11] SOUSA J M, SALCEDO J R, KUZMIN V V. Simulation of laser dynamics and active Q-switching in Tm, Ho:YAG and Tm:YAG lasers[J]. Applied Physics, 1997, B64(1): 25-36.

[12] GUO J W, LI T, NIU R H, *et al.* The analysis of the effective inversion reduction factor of Cr, Tm, Ho:YAG laser[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(12): 1310-1315 (in Chinese).

[13] KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 14-22, 79-80 (in Chinese).

[14] DEGNAN J J. Theory of the optimally coupled Q-switched laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(2): 214-220.

[15] HUANG L L, JI Y X, CHEN X Zh. Spectrum characteristic of YAG crystals doped Cr^{3+} , Tm^{3+} , Ho^{3+} ions[J]. Journal of Synthetic Crystals, 1997, 26(2): 112-116 (in Chinese).

[16] HUANG L L, CHEN X Zh, JI Y X. Optical parameters of Ho^{3+} ions in YAG and YLF crystals[J]. Optical Instrument, 1997, 19(4/5): 45-50 (in Chinese).

[17] BASIEV T T, ORLOVSKII Y V, PUKHOV K K, *et al.* Multiphonon relaxation rates measurements and theoretical calculations in the frame of non-linear and non-Coulomb model of a rare-earth ion-ligand interaction[J]. Journal of Luminescence, 1996, 68(5): 241-253.

[18] HUANG L L. Analysis for fluorescence characteristic of Tm^{3+} ions in YAG crystal[J]. Acta Photonica Sinica, 1996, 16(4): 420-425 (in Chinese).

[19] FAN T Y, HUBER G, BYER R L, *et al.* Spectroscopy and diode laser-pumped operation of Tm, Ho:YAG[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(6): 924-933.