

能量传递上转换对 $Tm, Ho:YLF$ 调 Q 激光器 上能级寿命的影响

张新陆^{1)†} 王月珠¹⁾

1) 哈尔滨工业大学光电技术研究所可调谐激光国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

2) 哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001)

(2005 年 5 月 10 日收到, 2005 年 7 月 25 日收到修改稿)

根据激光二极管纵向抽运 $Tm, Ho:YLF$ 激光器的能级跃迁和能量传递过程, 在考虑能量传递上转换(ETU)的情况下, 建立了 $Tm, Ho:YLF$ 主动调 Q 激光器的准三能级速率方程, 得出了激光单脉冲能量的解析表达式. 在理论上指出, 能量传递上转换不但减小了输出单脉冲能量, 而且严重减小了激光上能级寿命. 实验上给出了在固定抽运功率下, 单脉冲能量随重复频率的变化关系, 验证了理论所指出的能量传递上转换减小了激光上能级寿命.

关键词: 二极管抽运, $Tm, Ho:YLF$ 晶体, 能量传递上转换, 速率方程

PACC: 4255B, 4260

1. 引 言

激光二极管抽运的固体激光器具有结构紧凑、效率高、稳定、长寿命以及光束质量好等优点^[1,2]. 而激光二极管抽运的 $Tm, Ho:YLF$ 激光器除了具有上述优点外, 由于输出波长为 $2 \mu m$, 处于人眼安全波段, 并且大气传输透过性好, 因而成为激光测距机、相干多普勒雷达、差分吸收雷达等的理想光源^[3-6]. 同时, 它还是获得 $3-5 \mu m$ 波段光学参量振荡器的理想抽运源. $2 \mu m$ 激光器具有长的荧光寿命, 其荧光寿命为 $12 ms$, 因此 $2 \mu m$ 激光器更适合于调 Q 方式运行. 激光二极管抽运 $2 \mu m$ 固体激光器的增益晶体在激发的过程中存在着能量传递上转换效应, 能量传递上转换效应减小了激光上能级的有效寿命, 因此减小了激光晶体存储能量的能力. 但是即便如此, 它的上能级寿命也要比其他激光器长得多, 它更具有实现高能调 Q 激光器的潜力. 在国际上, 已经有许多科研小组进行 $2 \mu m$ 调 Q 激光器的理论^[7,8]和实验研究^[9,10], 值得提出的是, 在理论研究上, 对双掺杂 $Tm, Ho:YLF$ 主动调 Q 激光器, 在考虑能量传递上转换时都没能给出解析解, 结果不十分明确. 本文建立了 $Tm, Ho:YLF$ 主动调 Q 激光器的速率方程理

论模型, 此模型考虑了能量传递上转换的影响, 得到了激光单脉冲能量的解析表达式, 分析了能量传递上转换对单脉冲能量和激光上能级寿命的影响. 实验上验证了理论所预见的, 能量传递上转换严重减小了激光上能级的寿命.

2. 理论分析

图 1 给出了 $Tm, Ho:YLF$ 晶体中 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 能量的传递过程. 当波长为 $792nm$ 的抽运光被 ${}^3H_6Tm^{3+}$ 吸收跃迁到 3H_4 能级, 一个 ${}^3H_4Tm^{3+}$ 通过与其周围的 Tm^{3+} 横向弛豫产生了两个 ${}^3F_4Tm^{3+}$, 这个过程大约有 75% 的能量效率, 而另 25% 的能量被转化为晶体热量, 同时伴随着 ${}^3F_4Tm^{3+}$ 向 ${}^5L_7Ho^{3+}$ 的一系列能量传递过程, 设前向能量传递参数为 k_f , 后向能量传递参数为 k_r . 当 ${}^5L_7Ho^{3+}$ 数增到一定值时又将发生 ${}^5L_7Ho^{3+}$ 向更高能级的上转换过程, 发生上转换的离子其中一部分将经过无辐射弛豫及能量传递而返回原来的能级, 但总的来说上反转过程限制了 ${}^5L_7Ho^{3+}$ 的增加, 设上转换系数为 Q . ${}^3F_4Tm^{3+}$ 向 ${}^5L_7Ho^{3+}$ 有效的能量转移使 Ho^{3+} 在 5L_7 能级有显著的集居, 当 Q 开关打开时, 导致 5L_7 向 5I_8 跃迁产生了 2

† E-mail: zhangxinlu1@sohu.com

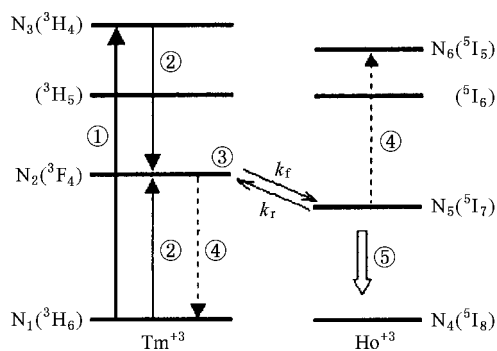


图 1 Tm, Ho 系统的基本能级谱图

μm 的激光。

${}^3\text{F}_4\text{Tm}^{3+}$ 与 ${}^5\text{I}_7\text{Ho}^{3+}$ 之间的能量传递时间小于 20 μs ^[11-14], 而 N_2 和 N_5 的能级寿命 τ_2 和 τ_5 约为 10ms, 并且 Ho^{3+} 的 ${}^5\text{I}_7$ 能级和 Tm^{3+} 的 ${}^3\text{F}_4$ 能级十分接近, 因此在 Q 开关打开前, 可以将 N_2 和 N_5 能级当作一个耦合能级来处理。设 N_u 为 Tm^{3+} 的 ${}^3\text{F}_4$ 能级与 Ho^{3+} 的 ${}^5\text{I}_7$ 能级组成的耦合能级的粒子数密度, 为了分析 Q 开关打开之前的反转粒子的积累过程, 在考虑了能级传递上转换的前提下, 建立了以下速率方程:

$$\frac{dN_u}{dt} = R_p - \frac{N_u}{\tau} - QN_u^2, \quad (1)$$

其中 R_p 为平均抽运强度, 可以表示为

$$R_p = \frac{\eta_p \eta_a P_{in}}{h\nu_p} \frac{1}{\pi\omega_p^2 l}, \quad (2)$$

式中, η_p 为抽运量子效率, h 为普朗克常数, ν_p 为抽运光的频率, $\eta_a = 1 - \exp(-\alpha l)$ 为抽运光吸收效率, α 为激光晶体对抽运光的吸收系数, l 为激光晶体的长度, P_{in} 为抽运光功率, ω_p 为抽运光斑半径。 τ 为耦合能级寿命, $\frac{1}{\tau} = \frac{f_{Tm}}{\tau_2} + \frac{f_{Ho}}{\tau_5}$, f_{Tm} 、 f_{Ho} 分别为 N_2 和 N_5 能级粒子占耦合能级粒子的比例分数, 可以写为^[15]

$$f_{Ho} = \frac{N_{Ho} \sum_{i \in {}^5\text{I}_7} g_i \exp(-E_i/kT)}{N_{Ho} \sum_{i \in {}^5\text{I}_7} g_i \exp(-E_i/kT) + N_{Tm} \sum_{j \in {}^3\text{F}_4} g_j \exp(-E_j/kT)}, \quad (3)$$

$$f_{Tm} = \frac{N_{Tm} \sum_{j \in {}^3\text{F}_4} g_j \exp(-E_j/kT)}{N_{Ho} \sum_{i \in {}^5\text{I}_7} g_i \exp(-E_i/kT) + N_{Tm} \sum_{j \in {}^3\text{F}_4} g_j \exp(-E_j/kT)}, \quad (4)$$

其中, N_{Ho} 和 N_{Tm} 是 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 的浓度, E_i 和 E_j 是 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 的斯塔克能级的能量, g_i 和 g_j 分别是第 i 和 j 能级的简并度, k 是玻尔兹曼常数, T 是晶体温度。

对(1)式求解, 可以得出耦合上能级粒子数密度随时间的变化关系^[16]

$$N_u(t) = \frac{1}{B} \left[A \frac{(1 + BN_f + A) + (1 + BN_f - A) \exp(-At/\tau)}{(1 + BN_f + A) - (1 + BN_f - A) \exp(-At/\tau)} - 1 \right], \quad (5)$$

$$A = \sqrt{1 + 4\tau^2 QR_p}, \quad (6)$$

$$B = 2\tau Q. \quad (7)$$

(5) 式中, N_f 为脉冲形成之后耦合上能级剩余的粒子数密度。对重复频率为 f 的调 Q 激光器而言, 在 Q 开关打开前其耦合上能级的最大反转粒子数密度可以写为

$$N_{max} = \frac{1}{B} \left[A \frac{(1 + BN_f + A) + (1 + BN_f - A) \exp(-At/\tau f)}{(1 + BN_f + A) - (1 + BN_f - A) \exp(-At/\tau f)} - 1 \right]. \quad (8)$$

设 f_u 、 f_l 分别为 Ho^{3+} 的 ${}^5\text{I}_7$ 和 ${}^5\text{I}_8$ 能级中对激光起作用的粒子数比例分数。与 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 之间的能量传递时间相比, 脉冲形成时间短得多, 可以认为耦合上能级中只有 Ho^{3+} 对脉冲的形成起作用, 因此可以得到频率为 f 时 Tm, Ho :YLF 调 Q 激光器的初始反转粒子数密度 Δn_i 为

$$\Delta n_i = \frac{f_{Ho} \gamma}{B} \left[A \frac{(1 + BN_f + A) + (1 + BN_f - A) \exp(-At/\tau f)}{(1 + BN_f + A) - (1 + BN_f - A) \exp(-At/\tau f)} - 1 \right] - f_l N_{Ho}, \quad (9)$$

其中, N_{Ho} 为 Tm, Ho :YLF 晶体中 Ho 离子的掺杂浓度, $\gamma = f_l + f_u$ 为准三能级粒子数反转因子。令 $\Delta n_i = \frac{L}{2\sigma_e l}$ 为末态反转粒子数密度, σ_e 为 Ho^{3+} 的受激发射截面, R 为输出耦合镜的反射率, L 为输出损耗以外的其他损耗。由此(5)式中的 N_f 可以写为

$$N_f = \frac{\Delta n_i + f_l N_{Ho}}{\gamma f_{Ho}}. \quad (10)$$

由(9)式可以看出, 声光 Q 开关的调制频率越高, 激光器的初始反转粒子数越小; 而能量传递上转换对激光器的影响随声光 Q 开关调制频率的降低而增加。能量传递上转换的加剧, 不但使上能级的有效寿命减小, 还导致激光器热损耗的增加, 严重影响了激

光器的效率,因此,在相同的抽运功率下,若要得到较高单脉冲能量,必然存在一个最佳的 Q 开关调制频率.

主动调 Q 激光器的输出单脉冲能量为^[17]

$$E = \frac{S h \nu_1}{\gamma} (\Delta n_i - \Delta n_f) \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right)}{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + L}, \quad (11)$$

式中 $h\nu_1$ 是激光光子的能量; $S = \pi\omega_1^2$ 为光束截面, ω_1 为激光光腰半径,设光束截面沿谐振腔均匀分布.将 $\Delta n_f = \frac{L}{2\sigma_e l}$, $\gamma = f_i + f_u$ 以及(9)式带入(11)式即可得到连续光抽运 T_m, H_o :YLF 声光调 Q 激光器单脉冲能量的解析表达式,此解析表达式明确地给出了能量传递上转换和声光 Q 开关的调制频率对单脉冲能量的影响.

晶体温度为 19℃ 时,计算过程中所用的主要参数为^[5,15] $f_u = 0.095$, $f_i = 0.024$, $\lambda_p = 792\text{nm}$, $\lambda_l = 2.066\mu\text{m}$, $\alpha = 3.88\text{cm}^{-1}$, $l = 2.5\text{mm}$, $\sigma_e = 15 \times 10^{-20}\text{cm}^2$, $R = 10\text{cm}$, $\eta_p = 1.57$, $N_{Ho} = 5.59 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$, $\omega_p = \omega_1 = 100\mu\text{m}$.

我们计算了能量传递上转换系数取不同值时,输出脉冲能量随重复频率的变化关系曲线,如图 2 所示.计算中抽运功率为 $P_{in} = 3\text{W}$,损耗为 $L = 0.03$.由图 2 可见,能量传递上转换系数越大,能量

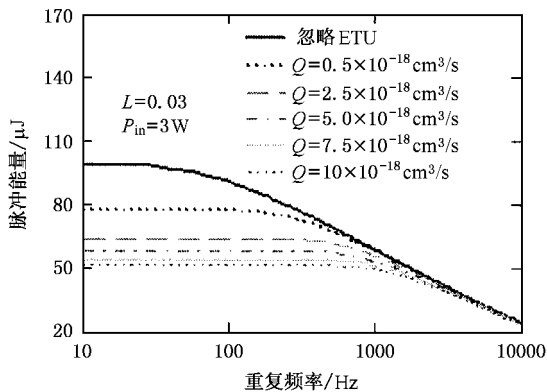


图 2 输出脉冲能量随重复频率的变化关系

传递上转换对输出脉冲能量的影响越严重,导致输出脉冲能量的降低也越发明显,同时还可以看出,随着能量传递上转换系数的增加,输出脉冲能量开始出现明显下降所对应的重复频率也增大,而此处重复频率的倒数即为激光上能级的有效寿命,因此理论上也就预见能量传递上转换效应减小了激光上

能级的有效寿命.

取能量传递上转换系数 $Q = 10 \times 10^{-18}\text{cm}^3/\text{s}$,抽运功率 $P_{in} = 3\text{W}$,我们计算了腔内损耗分别为 0.01 和 0.06 时,脉冲能量随重复频率的变化关系,如图 3 和图 4 所示.可见,腔内损耗的增加只是减小了激光的输出脉冲能量,而没有改变脉冲能量开始出现明显下降时所对应的重复频率值.也就是说,腔内损耗只是减小了激光的输出脉冲能量,而未改变激光上能级的寿命.

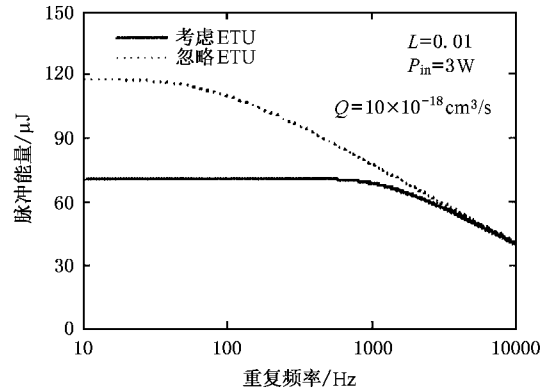


图 3 输出脉冲能量随重复频率的变化关系($L = 0.01$)

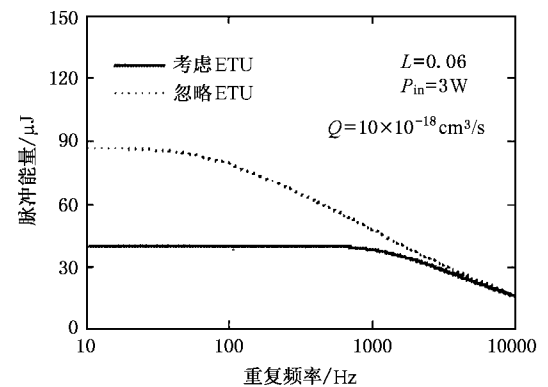


图 4 输出脉冲能量随重复频率的变化关系($L = 0.06$)

3. 实 验

实验装置如图 5 所示.谐振腔采用平-凹腔结构,输出耦合镜的曲率半径为 100mm,激光腔的长度约为 100mm.抽运源是美国相干公司的输出功率为 3W 的激光二极管,其型号为 S-79-3000C-200-H/L,其中心发射波长为 792nm.利用温控系统将发射波长调到 T_m, H_o :YLF 晶体的最强吸收峰 792nm 处,从而最大限度地利用抽运光.抽运光首先经焦距为

8mm 的球面透镜进行准直, 然后用焦距为 100mm 的柱透镜对发散角大的方向压缩光束的发散角, 再用焦距为 50mm 的消色差透镜将抽运光束聚焦于增益晶体内. 光学系统总的传输效率可达 91% 以上. 实验所用的晶体为 6% (摩尔比) Tm , 0.4% (摩尔比) $Ho: YLF$ 晶体. 晶体是沿 a 轴生长 $[100]$ 方向切割的, 晶体外形尺寸为 $5mm \times 5mm \times 2.5mm$. 激光二极管输出光的偏振方向与晶体的 c 轴平行, 这样抽运更加有效. 晶体的前后表面都经过抛光处理, 晶体前表面对 $2 \mu m$ 高反, 反射率大于 99.9%, 同时对

792nm 增透, 透射率在 85% 以上, 并把它作为激光谐振腔的一个后腔板. 晶体的侧边用铝箔片包裹, 嵌入热电制冷的铜质热沉中, 热电制冷器的控温精度为 $\pm 0.06^\circ C$. 所使用的 QSGSU-5/Q 型声光 Q 开关 (中国电子科技集团公司第二十六研究所) 的长度为 44mm, 两个通光面镀有 $2 \mu m$ 增透膜, 衍射损耗为 85%, 调制重复频率 80Hz—10kHz 可调, 中心频率为 27MHz, 驱动电功率为 50W, 电脉冲上升时间为 8ns, 下降时间小于 80ns. 为了减小插入损耗, 声光调 Q 器件紧靠 $Tm, Ho: YLF$ 晶体.

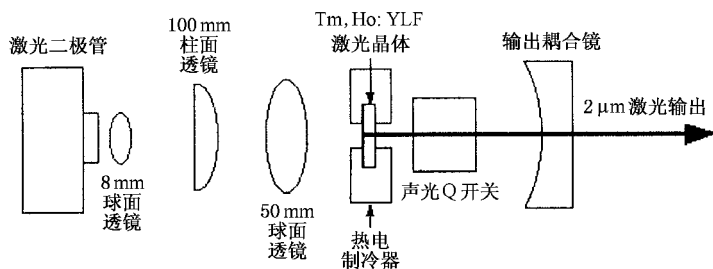


图 5 激光二极管抽运调 Q $Tm, Ho: YLF$ 激光器实验装置图

图 6 给出了抽运功率为 1.7W 时, 单脉冲能量随脉冲重复频率的变化关系. 由实验结果可以看出, 在 1kHz 附近单脉冲能量最大. 当重复频率大于 1kHz 时, 输出单脉冲能量开始快速下降. 重复频率较高时, 由于脉冲之间没有足够的时间使激光上能级的反转粒子数达到最大值, 使得净增益减小, 导致激光输出的单脉冲能量下降. 如果重复频率过低, 那么除了自发辐射跃迁耗费掉部分上能级反转粒子外, 能量传递上转换效应也比高重复频率运转时要

高, 同样也耗费掉了部分上能级反转粒子, 最终使得热损耗增加, 导致单脉冲输出能量的下降.

由于输出单脉冲能量开始出现明显下降时, 最大值所对应的重复频率的倒数即为激光上能级的有效寿命. 在我们的实验中, 单脉冲能量开始出现明显下降时, 最大单脉冲能量所对应的重复频率为 1kHz, 即激光上能级有效寿命约为 1ms, 而 $Tm, Ho: YLF$ 激光器的激光上能级荧光寿命约为 10ms, 因此, 正如理论所预见的那样, 能量传递上转换减小了激光上能级的寿命.

4. 结 论

在考虑能量传递上转换的前提下, 建立了 $Tm, Ho: YLF$ 脉冲激光器的速率方程, 得到了输出单脉冲能量的解析表达式, 分析了能量传递上转换效应对输出脉冲能量和激光上能级寿命的影响. 理论上指出, 能量传递上转换效应不但减小了输出单脉冲能量, 而且减小了激光上能级寿命. 实验上给出并分析了激光输出单脉冲能量随重复频率的变化关系, 验证了理论所预见的, 能量传递上转换减小了激光上能级寿命.

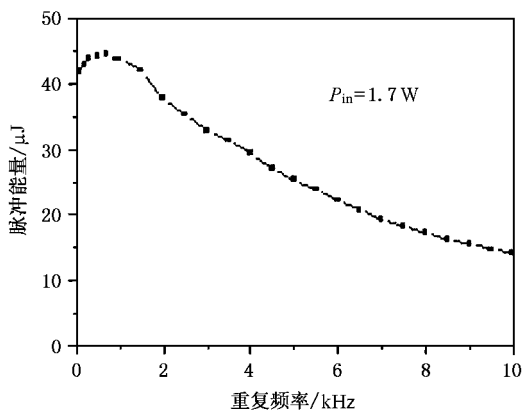


图 6 抽运功率为 1.7W 时, 单脉冲能量随重复频率的变化关系

- [1] Shang L J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1408 (in Chinese) [尚连聚 2003 物理学报 **52** 1408]
- [2] Wang S Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 355 (in Chinese) [王石语 2003 物理学报 **52** 355]
- [3] Yu J , Singh U N , Barnes N P , Petros M 1998 *Opt. Lett.* **23** 780
- [4] Taczak T M , Killinger 1998 *Appl. Opt.* **37** 8460
- [5] Zhang X L , Wang Y Z , Ju Y L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 117 (in Chinese) [张新陆、王月珠、鞠有伦 2005 物理学报 **54** 117]
- [6] Zhang X L , Wang Y Z , Yao B Q *et al* 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** 88 (in Chinese) [张新陆、王月珠、姚宝权 等 2004 光学学报 **24** 88]
- [7] Gunnar Rustad , Knut Stenersen 1996 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **32** 1645
- [8] Didier Berneau , Stéphane Delmonte , Jacques Pelon 1998 *Appl. Opt.* **37** 8406
- [9] McGuckin B T , Menzies R T , Hemmati H 1991 *Appl. Phys. Lett.* **59** 2926
- [10] Budni P A , Knights M G , Chicklis E P *et al* 1992 *IEEE. Journal of Quantum Electronics* **28** 1029
- [11] Walsh B M , Bame N P , Bartolo B D 1997 *Journal of Luminescence* **75** 89
- [12] Walsh B M , Barnes N P , Bartolo B D 2000 *Journal of luminescence* **90** 39
- [13] Yang W Q 2001 *Chinese Journal of Luminescence* **22** 175 (in Chinese) [杨文琴 2001 发光学报 **22** 175]
- [14] Minoru Doshida , Kazunari Teraguchi , Minoru Obara 1995 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **31** 910
- [15] Storm M E 1993 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **29** 440
- [16] Lan Y P , Chen Y F , Wang S C 2000 *Appl. Phys. B* **71** 27
- [17] Degnan J J 1989 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **25** 214

Influence of energy-transfer up-conversion on upper level lifetime of Tm ,Ho :YLF Q-switched laser

Zhang Xin-Lu^{1,2)†} Wang Yue-Zhu¹⁾

¹ *National Key Laboratory of Tunable Laser Technology , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 ,China)*

² *Science College , Harbin Engineering University , Harbin 150001 ,China)*

(Received 10 May 2005 ; revised manuscript received 25 July 2005)

Abstract

Based the energy transfer between energy levels and the transition between ions of diode-end-pumped Tm ,Ho :YLF laser , with consideration of energy transfer up-conversion , the rate equations of Tm ,Ho :YLF Q-switched laser are given , and the analytical formulas of single pulse energy is deduced from the rate-equations. It is shown theoretically that the energy transfer up-conversion reduces not only the single pulse energy but also the upper level lifetime of Tm ,Ho :YLF Q-switched laser. An experiment is carefully designed to verify these conclusions.

Keywords : diode-pumped , Tm , Ho :YLF crystal , energy transfer up-conversion , rate equation

PACC : 4255B , 4260

† E-mail : zhangxinlu1@sohu.com