

Tm, Ho双掺调Q激光系统理论与实验研究*

乔亮[†] 羊富贵 武永华 柯友刚 夏忠朝

(福建江夏学院, 电子信息与光电技术研究中心, 福州 350108)

(2014年4月20日收到; 2014年5月22日收到修改稿)

本文针对 Tm, Ho 双掺的激光系统, 利用速率方程理论, 得出了激光各能级的反转粒子数分布规律. 通过计算预测出了超过 1 ms 的时间有巨脉冲的光子输出, 脉冲能量为 88.4 mJ, 脉冲宽度为 426 ns. 实验采用环形腔声光调 Q, Tm, Ho:LuLF 为激光介质, 三向侧面抽运. 自由运转和调 Q 状态的斜率效率分别为 6.36% 和 2.9%. 注入能量 3.25 J 时, 自由运转激光能量 103.2 mJ, 调 Q 激光能量为 30.3 mJ, 对应光-光效率为 3.17%, 0.93%; 注入能量 3.5 J 时, 自由运转激光能量为 129.3 mJ, 调 Q 激光能量 35.9 mJ, 对应光-光效率为 3.69%, 1.02%. 最大的动静比为 32.8%. 激光脉冲宽度为 417.2 ns. 如果环形腔能够单向运转, 那么得到的激光能量和光-光转换效率都将增大一倍, 与预测结果更加一致.

关键词: Tm, Ho:LuLF, 速率方程, 能级, 调 Q 激光

PACS: 42.55.Ah, 42.55.Xi, 42.60.Gd, 42.68.Wt

DOI: 10.7498/aps.63.214205

1 引言

激光雷达(lidar)是激光(laser)技术与雷达(radar)技术相结合的产物, 是一种可以精确、快速地获取地面或大气三维空间信息的主动探测技术. 不同的激光雷达系统, 对光源的要求有所不同. 相干探测激光雷达期望人眼安全, 单频, 高脉冲能量的激光光源. 2 μm 波段激光以其人眼安全性和高的大气透过率特性, 逐渐地被应用在相干探测激光雷达中. 在固体激光器中, 直接获得 2 μm 波段的激光主要依赖固体激光材料本身具有的发射谱线. 具有这种特性的最常见的激光掺杂粒子有铽离子(holmium, Ho^{3+}), 它的发射谱在 2.1 μm 附近; 铥离子(thulium, Tm^{3+})有 1.9 μm 和 2.3 μm 附近的发射谱^[1]. Tm, Ho 双掺的激光介质既可以利用 Tm 离子对抽运波长吸收面积大的优点, 又可以利用 Ho 离子激光发射面积大的优势. 此后, Mulugeta Petros^[2] 和 Walsh^[3] 等分别于 2003 年和

2004 年报道了关于 Tm, Ho 共掺氟化镧铈(LuLiF₄, LuLF)和其他基质的对比实验结果: 在低重复频率下, Tm, Ho:LuLF 的斜率效率高, 抽运阈值低, 在实验温度上具有 20 K 的优势. 除此之外, 也有很多研究人员进行 Tm, Ho 双掺激光的理论和实验研究^[4-6].

本文利用速率方程理论, 得出 Tm, Ho 激光各能级的反转粒子数分布规律, 预测获得激光的能量和脉冲形状, 并应用于侧面抽运 Tm, Ho:LuLF 声光调 Q 激光器中; 实验上获得与理论预见较为一致的实验结果, 对实验起到指导与预测趋势的作用.

2 理论模型

2.1 速率方程的建立

我们这里的模型就是一个速率方程组, 它是由一套描述能级粒子数随时间变化的微分方程组成. 在 Tm 和 Ho 共掺的系统中, 需要考虑的能级数可

* 福建省自然科学基金(批准号: 2012J05109)、福建省教育厅科技项目(批准号: JA12333, JA12332, JK2012058)、福建江夏学院科研项目(批准号: 2011C036)和福建省公共基础课实验教学平台项目(物理综合创新实验中心)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: liangliangqiao@126.com

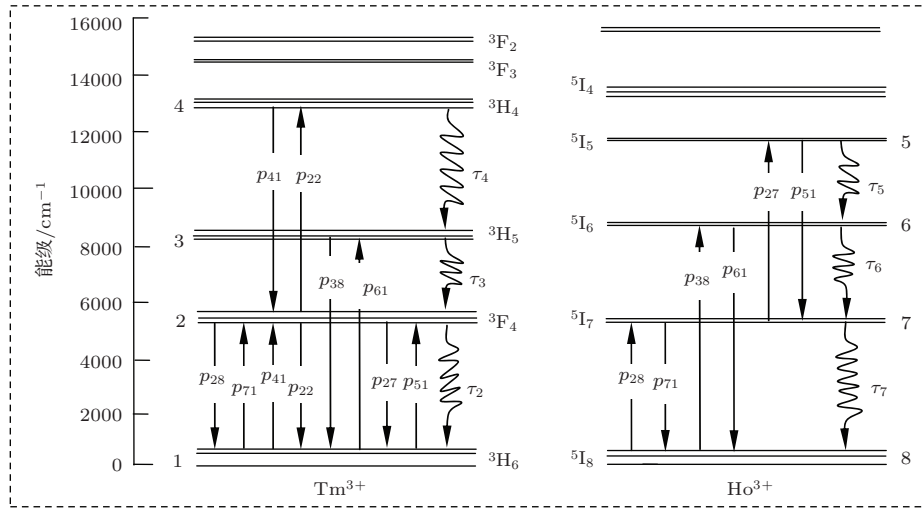


图1 Tm, Ho 双掺激光介质的能量传递和衰变过程

达10个甚至更多. 我们分别对Tm, Ho只考虑了各自四个最低的能够影响激光系统的能级, 如图1所示^[7]. Tm^{3+} 的四个能级分别是 ${}^3\text{H}_6$, ${}^3\text{F}_4$, ${}^3\text{H}_5$, ${}^3\text{H}_4$, 我们分别用1, 2, 3, 4来代表, Ho^{3+} 的四个能级是 ${}^5\text{I}_5$, ${}^5\text{I}_6$, ${}^5\text{I}_7$, ${}^5\text{I}_8$, 用5, 6, 7, 8来代表, 产生激光的能级是 Ho^{3+} 的 ${}^5\text{I}_7$ 和 ${}^5\text{I}_8$. 速率方程如下:

$$\begin{aligned}
 \frac{dn_1}{dt} = & -R_p[1 - \exp(-\sigma_a l_p n_1)] \\
 & + \frac{n_2}{\tau_2} + \frac{\beta_{41}}{\tau_4} n_4 + n_2 n_8 p_{28} - n_7 n_1 p_{71} \\
 & - n_4 n_1 p_{41} + n_2^2 p_{22} + n_2 n_7 p_{27} \\
 & - n_5 n_1 p_{51} - n_6 n_1 p_{61} + n_3 n_8 p_{38}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dn_2}{dt} = & -\frac{n_2}{\tau_2} + \frac{\beta_{32}}{\tau_3} n_3 - n_2 n_8 p_{28} + n_7 n_1 p_{71} \\
 & + 2n_4 n_1 p_{41} - 2n_2^2 p_{22} - n_2 n_7 p_{27} \\
 & + n_5 n_1 p_{51}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\frac{dn_3}{dt} = -\frac{n_3}{\tau_3} + \frac{\beta_{43}}{\tau_4} n_4 + n_6 n_1 p_{61} - n_3 n_8 p_{38}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dn_4}{dt} = & R_p[1 - \exp(-\sigma_a l_p n_1)] - \frac{n_4}{\tau_4} \\
 & - n_4 n_1 p_{41} + n_2^2 p_{22}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\frac{dn_5}{dt} = -\frac{n_5}{\tau_5} + n_2 n_7 p_{27} - n_5 n_1 p_{51}, \quad (5)$$

$$\frac{dn_6}{dt} = -\frac{n_6}{\tau_6} + \frac{\beta_{56}}{\tau_5} n_5 - n_6 n_1 p_{61} + n_3 n_8 p_{38}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dn_7}{dt} = & -\frac{n_7}{\tau_7} + \frac{\beta_{67}}{\tau_6} n_6 + n_2 n_8 p_{28} - n_7 n_1 p_{71} \\
 & - n_2 n_7 p_{27} + n_5 n_1 p_{51} \\
 & - \sigma_{se}(f_7 n_7 - f_8 n_8) \phi, \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dn_8}{dt} = & \frac{n_7}{\tau_7} - n_2 n_8 p_{28} + n_7 n_1 p_{71} \\
 & + \sigma_{se}(f_7 n_7 - f_8 n_8) \phi, \quad (8)
 \end{aligned}$$

n_1, n_2, n_3, n_4 分别对应 Tm^{3+} 的 ${}^3\text{H}_6, {}^3\text{F}_4, {}^3\text{H}_5, {}^3\text{H}_4$ 能级粒子数密度, n_5, n_6, n_7, n_8 分别对应 Ho^{3+} 的 ${}^5\text{I}_5, {}^5\text{I}_6, {}^5\text{I}_7, {}^5\text{I}_8$ 能级粒子数密度. 涉及了较多的能级间能量传递参数(能级参数), 比如 p_{28} 是Tm离子 ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$, Ho离子 ${}^5\text{I}_8 \rightarrow {}^5\text{I}_7$ 的能级参数; p_{71} 是Ho离子 ${}^5\text{I}_7 \rightarrow {}^5\text{I}_8$, Tm离子 ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ 的能级参数; p_{41}, p_{22} 是Tm离子 ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_4, {}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ 的能级参数; p_{61} 是Ho离子 ${}^5\text{I}_6 \rightarrow {}^5\text{I}_8$, Tm离子 ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_5$ 的能级参数; p_{38} 是Tm离子 ${}^3\text{H}_5 \rightarrow {}^3\text{H}_6$, Ho离子 ${}^5\text{I}_8 \rightarrow {}^5\text{I}_6$ 的能级参数; p_{51} 是Ho离子 ${}^5\text{I}_5 \rightarrow {}^5\text{I}_7$, Tm离子 ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ 的能级参数; p_{27} 是Tm离子 ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$, Ho离子 ${}^5\text{I}_7 \rightarrow {}^5\text{I}_5$ 的能级参数. τ_i 是第*i*能级的能级寿命($i = 2, 3, 4, 5, 6, 7$); β_{ij} 是一个电子从第*i*能级到*j*能级的分支比($ij = 43, 56, 67$); ϕ 为激光光子数密度.

$$\begin{aligned}
 \frac{d\phi}{dt} = & -\frac{\phi}{\tau_c} + c \frac{l}{L_{opt}} \sigma_{se}(f_7 n_7 - f_8 n_8) \phi \\
 & + c \frac{l}{L_{opt}} \frac{n_7}{\tau_c} B, \quad (9)
 \end{aligned}$$

f_7 是Ho离子 ${}^5\text{I}_7$ 上激光能级的波尔兹曼因子, f_8 是Ho离子 ${}^5\text{I}_8$ 下激光能级的波尔兹曼因子, 这两个因子是造成Tm, Ho共掺激光增益介质与其他增益介质有重要区别的主要因素, 同时这两个因子与温度有关, 也决定了Tm, Ho共掺激光增益介质的准三能级特性^[8]. σ_a 是抽运激光波段的吸收截面, σ_e 是发射激光波段光谱发射截面, σ_{se} 是发射激光

波段受激发射截面, 其中 $\sigma_{se} = \sigma_e/f_7$; B 是自发发射因子, 这个自发发射因子的考虑是基于激光谐振腔内自发发射光子的概率.

$$\frac{1}{\tau_c} = \frac{l}{\varepsilon L_{opt}} [\ln(R_m R_L) + 2\varepsilon^2(1 - T_s)], \quad (10)$$

$$R_p = \frac{\eta_p \lambda_p E_p}{hc \pi w_r^2 l t_p}, \quad (11)$$

τ_c 和 R_p 分别代表了谐振腔往返时间和抽运速率. 激光器的能量 E_{LO} , 与光子数密度 ϕ 的计算关系式是

$$E_{LO} = \frac{hc}{\lambda_e} \pi w_1^2 L_{opt} \phi, \quad (12)$$

ε 是谐振腔往返系数, 对于直线腔来说等于 2, 对于环形腔来说等于 1; T_s 是激光棒表面透过率; R_m 是输出镜的反射率, R_L 代表被动损耗; η_p 是抽运激光分布效率; λ_p 是抽运激光波长, λ_e 是发射激光波长; E_p 是抽运激光能量; t_p 是抽运脉冲长度; w_r 是激光棒半径, w_1 是激光模式半径; l 是激光棒长度, l_p 是激光棒受抽运长度; L_c 是激光谐振腔总长度, L_{opt} 是激光谐振腔光学长度, 表达式是 $(n - 1)l + L_c$.

2.2 数值计算结果

这个模型中包含的大量 Tm 和 Ho 的能级参数, 这些参数的确定是通过从头算法^[9]和适当经验值相结合的方法实现的. 即然过程中存在假设和一些试探性质的参数值, 那似乎建立这样的模型变得无法衡量. 但是一个模型的建立不需要它精确的预测可能观察到的行为, 而是能够预测所期望的趋势和复制可能发生的实验现象.

上述的激光速率方程用来预测 Tm, Ho:LuLF 激光器工作状态. 能级参数和能级寿命等数据列举在表 1 中. 实验中所用的是环形腔结构, ε 取值为 1, 输出镜反射率 R_m 取值 0.8, 抽运激光波长为 792 nm, 发射激光波长 2053 nm, Tm 和 Ho 的掺杂浓度分别为 5%, 0.5%, 激光棒的几何尺寸为 4 mm × 23 mm, 受抽运长度是 20 mm, 激光谐振腔长 2 m, 激光模半径为 2 mm. 这些参数是经过优化的, 对实验的开展具有指导作用.

需要指出的是, 所有的能级间跃迁过程都存在逆过程. 例如, Tm³F₄ → Ho⁵I₇ 的 p_{28} 跃迁过程的逆过程就是 p_{71} 表征的 Ho⁵I₇ → Tm³F₄ 过程; Tm 离子之间的自猝灭作用 p_{41} 的逆过程是 p_{22} . 另外

两个上转换过程 p_{61} 和 p_{27} 的逆过程分别是 p_{38} 和 p_{51} . p_{38} 和 p_{51} 这两个过程与 Tm³H₅ 和 Ho⁵I₅ 能级的无辐射衰减寿命相互竞争. 引入 p_{38} 和 p_{51} 过程, 是考虑到它们所表征的能级由于无辐射猝灭性质而具有非常短的能级寿命, 这就导致了它们与下一个更低虚能级之间存在小的能隙, 这些能级能够快速使经过的光子辐射无效. 这对于 Ho⁵I₇ 能级的无辐射衰减和 p_{51} 过程是真实存在的. 而经过 p_{27} 过程造成的上转换损耗正好可以看作是 p_{51} 过程和 Ho⁵I₇ 能级无辐射衰减的逆过程, 并且, 通过这一对互逆过程而实现平衡. 根据速率方程组式, 得到图 2 是八个能级的粒子数分布随时间的变化关系, 从图 3 可以看出, 在超过 1 ms 的时间有巨脉冲的光子输出. 这为实验中调 Q 开关的开启时间给出一定的参考. 并且由计算得出脉冲能量为 88.4 mJ, 脉冲宽度为 426 ns(见图 4).

表 1 速率方程计算所用数据

参数	表示式	数值
激光上能级波尔兹曼因子	f_7	0.0874
激光下能级波尔兹曼因子	f_8	0.0238
Ho 激光上能级发射截面	σ_{se}/cm^2	1.4×10^{-19}
Tm 对抽运光吸收截面	σ_a/cm^2	3.4×10^{-19}
能级参数	$p_{28}/(\text{cm}^3/\mu\text{s})$	1.68×10^{-22}
能级参数	$p_{71}/(\text{cm}^3/\mu\text{s})$	1.28×10^{-23}
能级参数	$p_{41}/(\text{cm}^3/\mu\text{s})$	3.13×10^{-24}
能级参数	$p_{22}/(\text{cm}^3/\mu\text{s})$	3.48×10^{-25}
能级参数	$p_{38}/(\text{cm}^3/\mu\text{s})$	7.64×10^{-23}
能级参数	$p_{61}/(\text{cm}^3/\mu\text{s})$	4.09×10^{-22}
能级参数	$p_{27}/(\text{cm}^3/\mu\text{s})$	1.47×10^{-22}
能级参数	$p_{51}/(\text{cm}^3/\mu\text{s})$	1.16×10^{-21}
跃迁分支比	$\beta_{43}, \beta_{56}, \beta_{67}$	~1.0
能级寿命	$\tau_2/\mu\text{s}$	15000
能级寿命	$\tau_3/\mu\text{s}$	1
能级寿命	$\tau_4/\mu\text{s}$	2000
能级寿命	$\tau_5/\mu\text{s}$	20
能级寿命	$\tau_6/\mu\text{s}$	2200
能级寿命	$\tau_7/\mu\text{s}$	16000

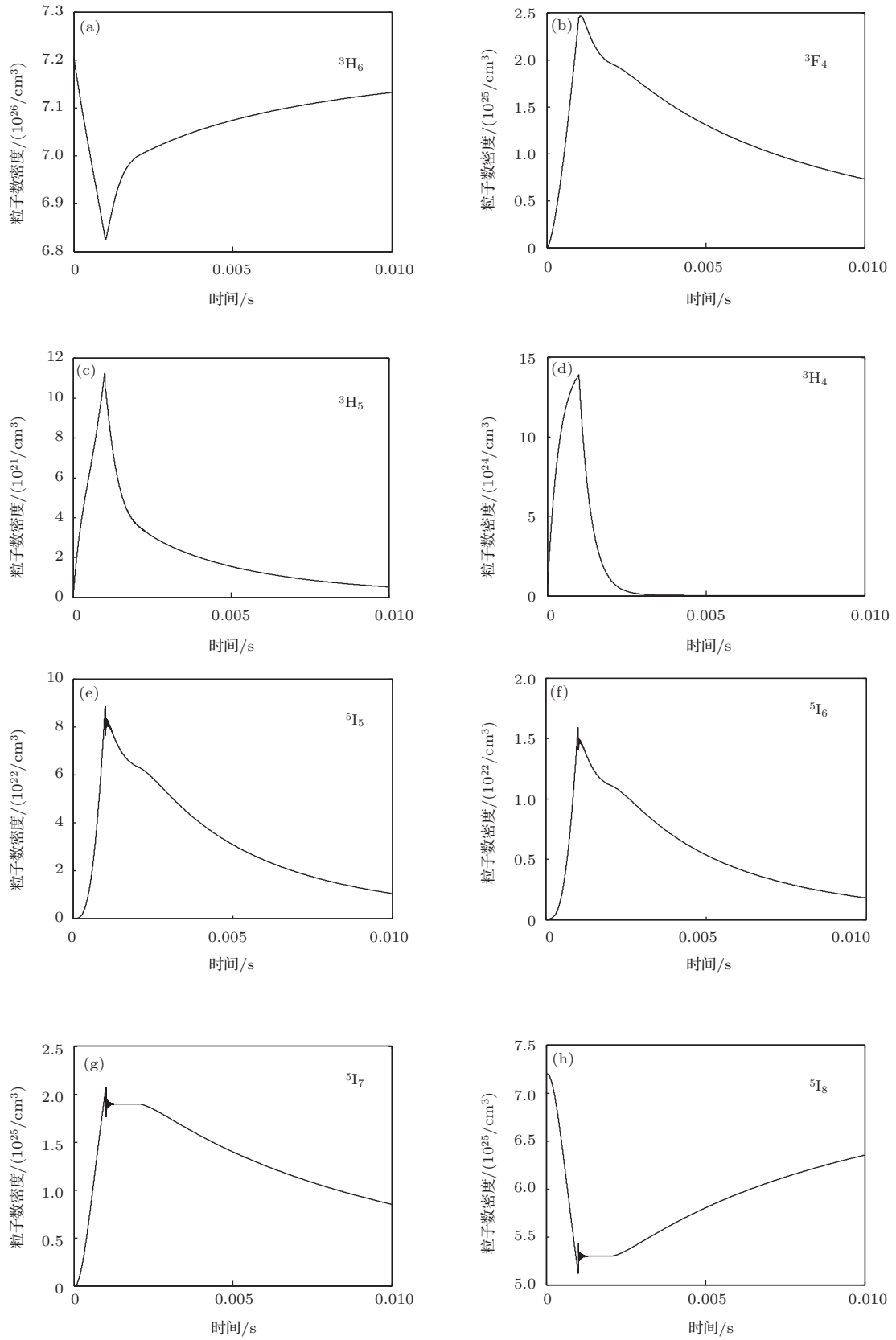


图2 各能级粒子数随时间变化关系 (a) ${}^3\text{H}_6$; (b) ${}^3\text{F}_4$; (c) ${}^3\text{H}_5$; (d) ${}^3\text{H}_4$; (e) ${}^5\text{I}_5$; (f) ${}^5\text{I}_6$; (g) ${}^5\text{I}_7$; (h) ${}^5\text{I}_8$

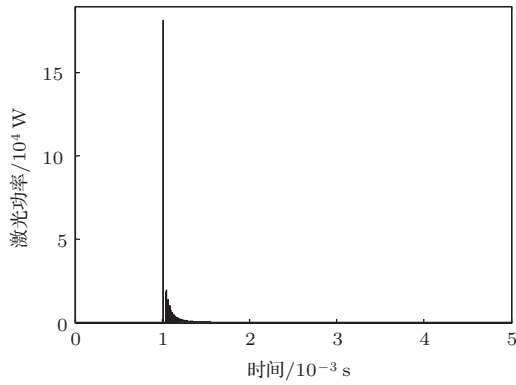


图3 输出调Q激光功率

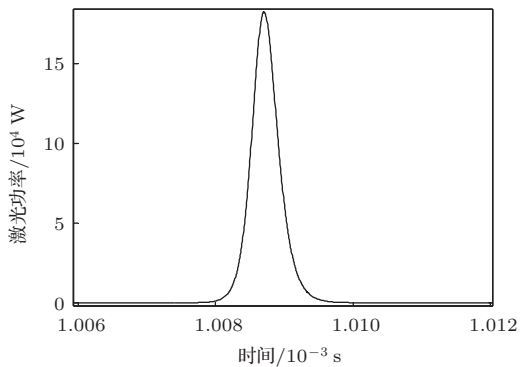


图4 调Q激光脉冲形状

3 实验

实验装置如图5所示, 标号1, 2为平面镜, 其中输出镜的透过损耗为20%, 3, 4是大曲率半径的曲面镜; 标号5为抽运头, 采用三向侧面抽运的水循环冷却结构, LD抽运源选用的是美国Nlight公司的垂直叠层半导体激光器, 中心波长为792 nm; Q开关为古奇-休斯古公司QS027-4H-AP1型声光Q开关器件 [10-12].

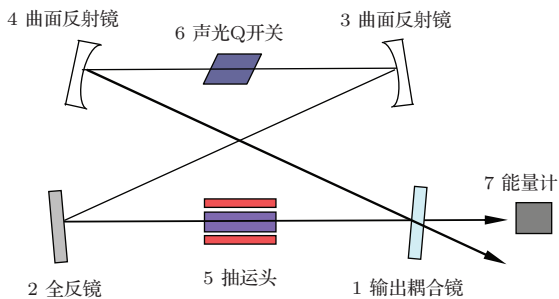


图5 (网刊彩色) 声光调Q环形腔激光器实验装

抽运源以1 ms占空长度, 重复频率1 Hz下工作. 在一个抽运循环中, Q开关打开一次. 由于抽

运源是以低重频状态工作, 因此, 控制Q开关打开重频与抽运重频一致, 较为关键. 我们采用的实现方式是, 由抽运源给出的脉冲信号, 通过延迟时间的调整, 来施加到Q开关的射频驱动器上. 我们控制施加在射频驱动器上的信号始于抽运脉冲信号刚结束的时候, 信号宽度为4 μs, 见图6. 这样Q开关在射频驱动器接收到这个信号的时候开始工作, 此时Q开关是输出打开状态, 实现激光输出. 通过这样的方式, 实现了一个抽运循环中, Q开关工作一次.

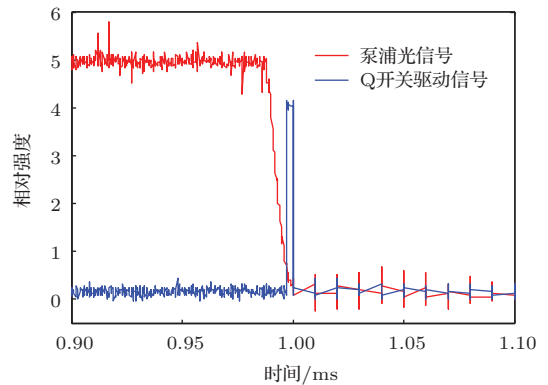


图6 (网刊彩色) Q开关驱动信号与抽运源脉冲信号时序关系

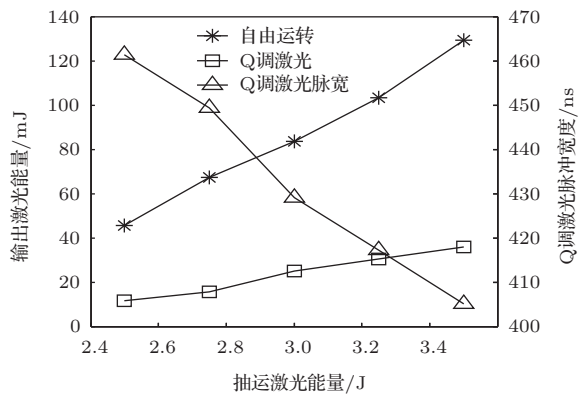


图7 自由运转和调Q激光能量以及Q激光脉冲宽度

没有对环形腔进行腔外的反射镜单向抑制, 或者种子注入, 因此是两个方向都有激光能量输出. 我们这里的实验数据, 仅是其中一个方向, 即图5中标号7放置能量计的方向的输出. 如果单向运转, 那么得到的激光能量和光-光转换效率都将增大一倍 [13-15]. 图7中自由运转和调Q状态的斜率效率分别为6.36%和2.9%. 注入能量3.25 J时, 自由运转激光能量103.2 mJ, 调Q激光能量为30.3 mJ; 注入能量3.5 J时, 自由运转激光能量为129.3 mJ, 调Q激光能量35.9 mJ. 图8中显示的自由运

转和调Q运转状态下的光-光转换效率以及动静转换效率. 在3.25 J注入能量时, 分别对应光-光效率为3.17%, 0.93%; 在3.5 J注入能量时, 分别对应光-光效率为3.69%, 1.02%; 最大的动静比是在3.5 J注入能量时获得的32.8%. 另外图7右侧的坐标是调Q激光脉冲宽度随着抽运能量的变化. 随着抽运能量的加大, 输出激光脉冲宽度逐渐变小. 图9显示的是, 在注入能量为3.25 J时, 调Q激光的脉冲形状, 脉宽为417.2 ns.

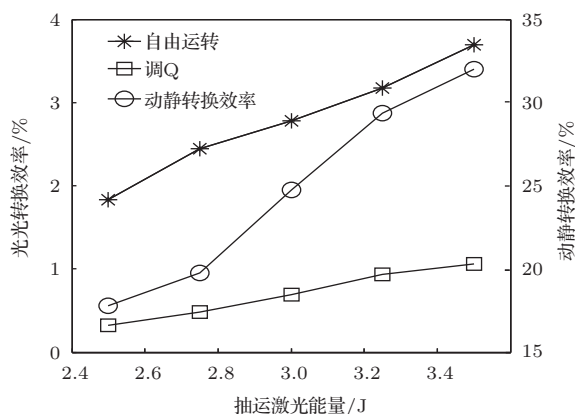


图8 光-光转换效率及动静比

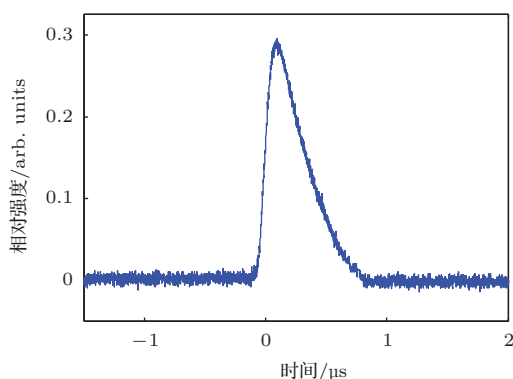


图9 调Q激光脉冲波形

实验结果基本上符合速率方程理论所预测的趋势. 但是与速率方程求解获得的结论88 mJ左右的调Q激光脉冲能量相比, 即使我们将3.5 J注入能量时, 所获得的环形腔输出能量35.9 mJ进行加倍, 也还是低于理论预测的结论, 可见实验系统有待于优化处理和提升.

4 结 论

本文分别对T_m和H_o考虑了各自四个最低的能够影响T_m,H_o激光系统的能级, 利用速率方程

理论, 得出了激光各能级的反转粒子数分布规律; 通过计算预测出了超过1 ms的时间有巨脉冲的光子输出, 并且脉冲能量为88.4 mJ, 脉冲宽度为426 ns. 实验采用环形腔结构, 在超过1 ms的时间开启Q开关. 注入3.5 J能量时, 调Q激光能量为35.9 mJ, 脉冲宽度为418 ns左右. 对应的光-光转换效率为1.02%, 动静比为32.8%. 实验上获得与理论预见较为一致的实验结果. 但是调Q激光的转换效率不够理想, 调Q激光能量仍低于理论预测, 需要优化试验系统结构(比如腔型结构, 冷却系统等), 进一步提高系统的激光能量转换效率.

感谢与中国科学院福建物质结构研究所戴殊韬博士和上海光学精密机械研究所张艳丽副研究员的讨论.

参考文献

- [1] Walsh B M, Barnes N P, Singh U N 2008 *Proceedings of SPIE* 7153: 08-1-08-10
- [2] Mulugeta Petros, Jirong Yu, Songsheng Chen 2003 *Proceedings of SPIE* 4893: 203-210
- [3] Walsh B M, Barnes N P, Mulugeta Petros, Jirong Yu, Singh U N 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 3255
- [4] Zhang X L, Wang Y Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1160 (in Chinese) [张新陆, 王月珠 2006 物理学报 **55** 1160]
- [5] Zhang X L, Wang Y Z, Shi H F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1787 (in Chinese) [张新陆, 王月珠, 史洪峰 2006 物理学报 **55** 1787]
- [6] Xia Z C, Yang F G, Qiao L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 114206 (in Chinese) [夏忠朝, 羊富贵, 乔亮 2013 物理学报 **62** 114206]
- [7] Walsh B M, Barnes N P, Mulugeta Petros, Jirong Yua, Singh U N 2005 *Proceedings of SPIE* (SPIE, Bellingham, WA 2005) Lidar Remote Sensing for Industry and Environmental Monitoring V 2005, 5653:24-32
- [8] Louchev O A, Yoshiharu Urata, Satoshi Wada 2007 *Opt. Exp.* **15** 3940
- [9] Gao J Y, Zhang Q L, Sun D L, Liu W P, Yang H J, Wang X F, Yin S T 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 013102 (in Chinese) [高进云, 张庆礼, 孙敦陆, 刘文鹏, 杨华军, 王小飞, 殷绍唐 2013 物理学报 **62** 013102]
- [10] Shu S J, Yu T, Liu R T, Hou J Y, Hou X, Chen W B 2011 *COL* **9** 091407
- [11] Shu S J, Yu T, Zang H G, Liu D, Hou X, Chen W B 2011 *Infrared and Laser Engineering* **40** 1442 (in Chinese) [舒仕江, 余婷, 臧华国, 刘丹, 侯霞, 陈卫标 2011 红外与激光工程 **40** 1442]
- [12] Qiao L, Hou X, Chen W B 2009 *Chinese Journal of Lasers* **36** 1327 (in Chinese) [乔亮, 侯霞, 陈卫标 2009 中国激光 **36** 1327]
- [13] Qiao L, Hou X, Liu Y, Chen W B 2009 *Laser Physics* **19** 1402

- [14] Wan S P 2004 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [万顺平 2004 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
 [15] Koechner W (translated by Sun W, Jiang Z W, Cheng G

- X) 2002 *Solid-State Laser Engineering* (Beijing: Science Press) pp18–22 (in Chinese) [W. 克希耐尔著 (孙文, 江泽文, 程国祥译) 2002 固体激光工程 (北京: 科学出版社) 第 18—22 页]

Theoretical and experimental researches on Tm and Ho codoped Q-switching laser*

Qiao Liang[†] Yang Fu-Gui Wu Yong-Hua Ke You-Gang Xia Zhong-Chao

(Centre of Electronic Information and photoelectric technology, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China)

(Received 20 April 2014; revised manuscript received 22 May 2014)

Abstract

The distribution of population inversion has been obtained by solving the rate equations of a Tm and Ho codoped laser system. A giant pulse laser output of 88.4 mJ with pulse duration of 426 ns has been predicted at 0.1% duty cycle of LD pump source. In a 2 m ring resonator, the Tm, Ho:LuLF laser material has been side-pumped from three directions and Q-switched for acoustic-optic device. The slope efficiency is 6.36% in free running mode and 2.9% in Q-switching mode. When 3.25 J pump energy in 1 Hz repetition frequency is injected, it has been demonstrated that the laser pulse energy of 103.2 mJ with an optical-to-optical efficiency of 3.17% in the free running mode and 30.3 mJ with 0.93% optical-to-optical efficiency. When 3.5 J pump energy is injected, it has been obtained that the pulse energies of 129.3 mJ and 35.9 mJ in the two modes with optical-to-optical efficiencies of 3.69% and 1.02% respectively. The greatest dynamic to static ratio is 32.8%. The pulse duration is 417.2 ns when 3.25J pump energy is injected. If the ring resonator operates unidirectionally, the laser energy and the corresponding optical efficiency will be doubled, the result being in agreement with the theoretical analysis of rate equations.

Keywords: Tm, Ho:LuLF, rate equations, energy transfer, Q-laser

PACS: 42.55.Ah, 42.55.Xi, 42.60.Gd, 42.68.Wt

DOI: 10.7498/aps.63.214205

* Project supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (Grant No. 2012J05109), the Science-Technology Foundation of the Education Department of Fujian Province, China (Grant Nos. JA12333, JA12332, JK2012058), the Scientific Research Program of Fujian Jiangxia University, China (Grant No.2011C036), and the Experimental Teaching Platform Program of Fundamental Course of Fujian Province (Physics Innovative Experimental Centre).

† Corresponding author. E-mail: liangliangqiao@126.com