

高功率固体激光器激活介质的非辐射弛豫热吸收

夏文建 李正佳 朱长虹 邝能俊 丘军林
(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 分析了高功率固体激光器中激活介质的热吸收特征, 建立了连续运转条件下激活离子的非辐射弛豫模型, 给出激活介质非辐射弛豫热吸收对激光振荡的依赖关系, 以及激光振荡条件对激活介质屈光度的影响, 实验结果与理论模型分析一致。

关键词: 非辐射弛豫 激光振荡 屈光度

Thermal heat absorption of nonradiative relaxation in active medium of high power solid state laser

Xia Wenjian, Li Zhengjia, Zhu Changhong, Kuang Nengjun, Qiu Junlin
(National Lab. of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: In this paper, by analysing the characteristics of thermal heat absorption of active medium in high power solid state laser, we present the nonradiative relaxation model of excited ions in active medium in continuous operation and give the dependence of thermal heat absorption caused by nonradiative relaxation on laser oscillation. The influence of laser oscillation on diopeters of laser rod is also given. Experimental results show accordance with theoretical model analysis.

Key words: nonradiative relaxation laser oscillation diopter

引 言

高功率固体激光器中, 激活介质的热吸收与激活介质表面的冷却使介质内存在温度梯度,

较标准的链片进行参数标定, 然后随机选取五组同类链片进行两点在线测试, 结果为:

平均选出率 $b = \sum_{i=1}^5 c_i = 98.4\%$, 平均误选率 $e = \sum_{i=1}^5 e_i = 0.2\%$, 剔除率 100%, 可见, 选出率和误选率均有所提高^[1]。

六、结 论

1. 作者对链片的两点检测方法进行了讨论。若采用更多点进行测试, 效果将更加明显。
2. 链片的边缘为圆弧状, 因此此方法可以推广到其他复杂边缘塌角或缺陷的测量, 当然对直线边缘进行检测变得更加容易。

参 考 文 献

- 1 杨今才. 光电工程, 1996; 23(5): 40~ 43, 49
- 2 Beyon J D E. Charge-couple devices and their application. London: MC Graw Hill, 1980

作者简介: 刘 富, 男, 1968 年出生。在读博士。从事微弱信号检测与处理、复杂系统建模与优化方面的研究。
于在河, 男, 1965 年出生。在读博士。从事计算机应用、地面机械仿生技术方面的研究。

导致激活介质热应力的极限应力 σ_s 和热透镜的屈光度 D 分别正比于电泵浦功率^[1], 激光器的性能受到热应力和屈光度的影响, 热应力限制了最大输出功率, 输出光束的质量^[2]. 屈光度 D 与热注入因子 \times 有密切关系, 热注入因子定义为介质内产生的热量与激活介质内储存到激活介质的激光上能级的光学能量之比, 在闪光灯泵浦的固体激光器中, 产生的热吸收为被吸收的泵浦光子能量与发射的激光光子能量之间的差值, 这一热吸收可通过材料的相关光谱参数进行计算. 对于典型的闪光灯光谱, D. S. Sumida, D. A. Rockwell 等^[3]在其理论计算中, 考虑了由于荧光引起 Nd 离子的去激发过程, 以及⁴F_{3/2}态的非辐射淬灭. 理论计算的热注入因子约为 1.5^[3], 通过实验测得 \times 在 2.9 表明, 测量值近似为理论值的 2 倍, 这说明, 除正常的热吸收机制之外, 存在着另外的热吸收机制. 由之而产生的热吸收似乎由基底材料对泵浦光的直接吸收或由于小于 1.0 的量子效率所产生. 尽管高泵浦功率时, 由于闪光灯紫外辐射的加强导致热吸收增加, 但谱平均吸收效应产生的热吸收不高于由量子缺陷所产生的 10%^[4], D. P. Devor 和 L. G. Deshazer 等^[5]测量了由激光泵浦的不同掺杂浓度 YAG 棒, 量子效率在 0.48 到 0.85 之间, 且随激活离子的掺杂浓度呈线性降低, 由于⁴F_{3/2}能级的有效寿命不变, 因此, 一定出现从泵浦带或⁴F_{3/2}能级到基态的非常快的非辐射弛豫, 这一非辐射弛豫过程一般认为由闪光灯泵浦引起的瞬态和稳态色心吸收所致^[5,6]. 由于这一非辐射弛豫引起的非辐射弛豫热吸收正比于反转粒子数密度, 因此, 当激活介质内激光振荡发生时, 反转粒子数密度将下降, 导致屈光度下降^[6], 我们从四能级激光器的非辐射弛豫模型出发, 建立了连续运转条件下激活离子的非辐射弛豫的模型, 给出激活介质非辐射弛豫热吸收对激光振荡的依赖关系, 以及激光振荡条件对激活介质屈光度的影响, 并在实验上测试了同一泵浦功率条件下, 不同激光振荡条件下激活介质屈光度的变化, 实验结果与理论模型的分析相符.

一、理论分析

图 1 给出了 Nd:YAG 的简化的能级图, 泵浦系统将基态离子抽运到泵浦带, 泵浦带上激活离子的寿命很短, 快速衰减到激光上能级, 设泵浦系统的抽运速率为 R_{pump} (单位时间内所抽运的单位体积中的原子数), 它与泵浦系统和激活介质的物理性质有关, 激光振荡在⁴F_{3/2}到⁴I_{11/2}之间发生, 激活离子跃迁的寿命为 τ_0 , 从激光上能级到基态存在非辐射弛豫, 寿命为 τ_c , 激光上能级的寿命为 τ , 它们之间的关系为 $1/\tau = 1/\tau_0 + 1/\tau_c$, 显然, 从激光上能级到激光下能级的受激辐射

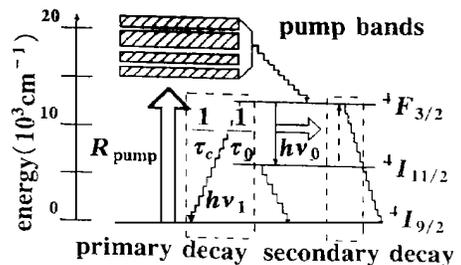


Fig. 1 Simple energy level profile of Nd:YAG

率 $1/(1 + \tau_0/\tau_c) < 1.0$, 我们称之为一次弛豫, 其产生的热吸收为 P_1 , 当腔内存在激光振荡时, 处于激光下能级的激活离子, 由于其电子吸收腔内振荡光子能量而跃迁到激光上能级, 再从激光上能级到基态能级的非辐射弛豫, 这一过程很复杂, 我们称这为二次弛豫, 它产生的热吸收为 P_2 , 总的非辐射弛豫热吸收 P_a 由这两部分组成: $P_a = P_1 + P_2$, 激活介质总的热吸收为

$$P_h = P_0 + P_1 + P_2 \quad (1)$$

式中, 右边第一项 P_0 为包括除非辐射弛豫之外的热吸收, 是输入功率的函数, 与腔内激光振荡光强无关.

由泵浦系统产生的反转粒子数 ΔN_p 近似为:
$$\Delta N_p = R_{\text{pump}} \times \tau \quad (2)$$

其中对激光振荡阈值有贡献的部分为:
$$\Delta N_e = \Delta N_p / (1 + \tau_0 / \tau_c) \quad (3)$$

谐振腔内激活介质的阈值反转粒子数 ΔN_{th} 与介质的物理特性, 谐振腔的损耗特性有关, 设谐振腔的两面反射镜的能量反射率分别为 100% 和 R , 棒状激活介质的长度为 l , 半径为 r , ΔN_{th} 值为:
$$\Delta N_{th} = 8\pi n^2 \tau_0 / [g(u_0) \lambda^2] \cdot [\alpha - \ln R / (2l)] \quad (4)$$

式中, n 为介质折射率, $g(u_0)$ 为联系受激跃迁几率和入射场强度的线性函数, u_0 为受激辐射光子的频率, α 为介质的分布吸收系数。当 R 很低时, 由 (4) 式决定的阈值反转粒子数 ΔN_{th} 将很高, ΔN_e 小于阈值反转粒子数 ΔN_{th} , 此时谐振腔内未产生激光振荡, 非辐射弛豫热吸收主要为一次弛豫产生的热吸收 P_1 , 它正比于反转粒子数 ΔN_p
$$P_1 = \Delta N_p h u_0 \pi r^2 l / \tau_c \quad (5)$$
 式中, $h u_0$ 为激光上能级与基态能级之间能量差, $1 / \tau_c$ 为弛豫速率。

当谐振腔的 R 增加时, 阈值反转粒子数 ΔN_{th} 将下降, 在降至与 ΔN_e 相等时, 谐振腔内开始阈值振荡, 定义此时的反射率为阈值反射率 R_{th} , 由方程 (2) 和 (4) 即可求出 R_{th} , 而相对应的激活介质的屈光度为阈值屈光度 D_{th} , 见图 2。 R 进一步增加时, 阈值反转粒子数 ΔN_{th} 继续降低, 达平衡态时, P_1 变为
$$P_1 = \Delta N_{th} h u_0 \pi r^2 l \tau_0 / \tau_c \quad (6)$$
 同时, 腔内由于存在激光振荡, 由二次弛豫产生的非辐射弛豫热吸收 P_2 为

$$P_2 = \Delta N_{th} h u_0 \pi r^2 l \omega(u_0) R \quad (7)$$

式中, $\Delta N_{th} h u_0 \pi r^2 l \omega(u_0)$ 为激光振荡功率, $\omega(u_0)$ 为跃迁速率, 表达式为

$$\omega(u_0) = (1 / \tau) [2 \gamma_0 l / (\alpha - \ln R) - 1] \quad (8)$$

式中, γ_0 为单位长度增益系数, 总的非辐射弛豫热吸收 P_a 为

$$P_a = \frac{8\pi^2 n^2 h r^2 l \tau_0}{g(u_0) \lambda^2} \left[\alpha - \frac{\ln R}{2l} \right] \left[u_0 \frac{\tau_0}{\tau_c} - u_0 \frac{R}{\tau} + u_0 \frac{\gamma_0 R}{\tau} \right] \quad \text{激光} \quad (9)$$

激光振荡发生后, 由于 P_1 降低较快, P_2 的增加不足以补偿其降低量, 导致 P_a 下降, 表现为激活介质的屈光度 D 降低, 随着 R 的继续增加, D 继续降低, 此时 P_2 迅速上升, 当 P_2 的增加量等于 P_1 的减小量时, D 达到一最低点 D_{opt} , 此时的 R 称为 R_{opt} , 由下式确定,

$$R_{opt} = R \mid \frac{dP_a}{dR} = 0 \quad (10)$$

当 $R > R_{opt}$ 时, P_2 的增加量大于 P_1 的减小量, P_a 开始上升, 相应地 D 呈上升趋势, 甚至会超过 D_{th} , 如图 2 所示。

二、实验结果与讨论

实验在一连续 YAG 激光器上进行, 激光棒 ($f 8\text{mm} \times 116\text{mm}$) 由两支 Kr 弧灯泵浦, 输入功率在 0~ 10kW 之间变化, 如图 3 所示, 一氦-氖激光束经一望远镜系统 (放大倍数为 4.0) 进行扩束和准直后进入激光棒,

且与激光棒同轴, 经激光棒聚焦后, 热焦距确定为从光屏 (Screen) 上观察到最小光斑时的位置

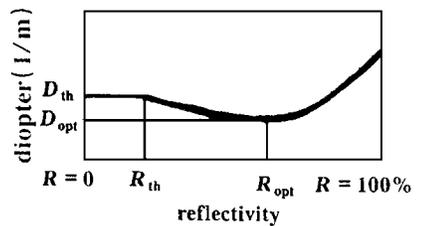


Fig. 2 Dioptr of laser rod vs reflectivity with certain pumping power

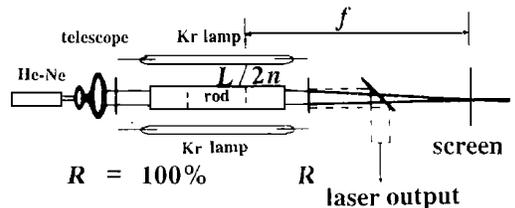


Fig. 3 Setup for the maeasurement of dioptr of laser rod and the output power of laser head

到棒的主平面(主平面到棒端面的距离为 $l/(2n)$, l 为棒长, n 为棒折射率)之间距离, 激光输出能量经反射镜(Reflector)反射后输出并由功率计监测。

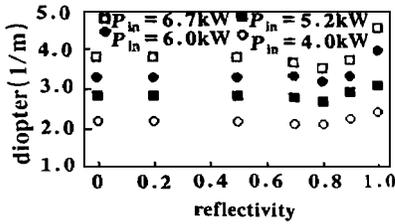


Fig. 4 Dioptr vs reflectivity of output mirror for different input power

实验测得的在不同输入功率条件下, 激光棒的屈光度随反射镜反射率的变化关系曲线, 如图 4 所示。图 5 给出了对应于不同反射率的输出功率与输入功率的关系曲线。

从图 4 中可看出, 不同输入功率条件下, 屈光度的

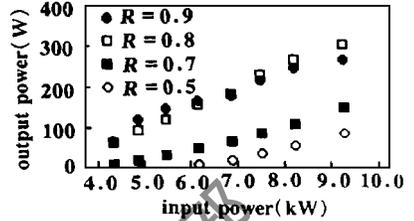


Fig. 5 Output power of laser head vs input power for different reflectivities

起始值, 即阈值屈光度 D_{th} 随输入功率的增加而升高。同一输入功率条件下, 当镜面反射率 R 增加到某一值后, 激光振荡开始, 此时屈光度均下降, 原因在于由方程(4)决定的反转粒子数减小, 一次弛豫导致的非辐射弛豫热吸收减小所致, 虽然二次弛豫所产生的热吸收增加, 但总的非辐射弛豫热吸收仍呈下降趋势。随着反射率 R 的增加, 谐振腔内振荡功率增加, 二次弛豫所产生的非辐射弛豫热吸收亦上升, 在反射率达到某一值时, 屈光度 D 降到最低值, 此时, 一次弛豫的非辐射弛豫热吸收的减小量等于二次弛豫的增加量, 这一反射率即为 R_{opt} , 当反射率高于 R_{opt} 时, 二次弛豫引起的热吸收的增加量高于一次弛豫的减小量, 总的非辐射弛豫热吸收呈上升趋势, 表现为屈光度 D 的增加, 另外, 从图 4 中可知, $R = 100\%$ 时激活介质的屈光度均比 $R = 0$ 时的要高, 这是由于此时反射率高, 由(8)式决定的跃迁速率很高, 腔内激光振荡功率较大, 且几乎全部变为二次弛豫热吸收(反射率很高), 总的非辐射弛豫热吸收已超过 $R = 0$ 时的一次弛豫非辐射弛豫热吸收。

从理论分析和实验结果可知, 连续高功率固体激光器的热吸收可由非辐射弛豫模型来说明, 激光振荡输出可降低非辐射弛豫热吸收, 对于实际运转的高功率固体激光器而言, 特别当激光器工作在接近于极限功率附近时, 切不可突然停止激光振荡, 否则会由于非辐射弛豫热吸收的增加而导致激光棒的损坏。高功率固体激光器谐振腔的设计中应考虑非辐射弛豫热吸收对屈光度的影响。

参 考 文 献

- 1 Koehner W. Solid State Laser Engineering. New York: Springer, 1986
- 2 Ifflander R, Weber H, Seiler P. SPIE, 1986; 650: 92~ 100
- 3 Sumida D S, Rockwell D A, Mangir M S. IEEE J Q E, 1988; 24(6): 985~ 994
- 4 Caid J A, Staver P R, Jancaits K S. Flashlamp induced transient absorption in Nd-doped YAG and phosphote laser glasses. Laser program annual report, Lawrence Livermore laboratory, 1986: 7~ 157
- 5 Devor D P, Deshazer L G, Pastor R C. IEEE J Q E, 1989; 25(8): 1863~ 1989
- 6 Hodgson N, Rahlff C, Weber H. Opt & Laser Technol, 1993; 25(3): 179~ 185

作者简介: 夏文建, 男, 1966 年 6 月出生。博士。现赴新加坡工作。

收稿日期: 1996-12-27 收到修改稿日期: 1998-04-13