

文章编号: 0258-7025(2009)01-0043-04

热容激光器中热致受激发射截面改变 对输出功率的影响

汪晓波 许晓军 陆启生

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 固体热容激光器发射期间将废热储存在激光介质中,从而使激光介质的温度随着激光的不断发射而不断升高。温度的升高导致激光介质的受激发射截面发生改变。有效受激发射截面的改变导致激光增益的变化。根据各种掺钕磷酸盐玻璃和掺杂原子数分数为1%的Nd:YAG的发射截面随温度变化的规律,计算出使用相应工作介质的固体热容激光器随温度上升后抽运阈值和输出功率的改变。计算结果表明,掺钕磷酸盐玻璃和Nd:YAG介质工作在热容模式下,随着温升导致的有效受激发射截面不断减小,激光器输出功率明显下降。

关键词 激光器;热容激光器;受激发射截面;数值计算

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0043

Effect of Thermally Induced Change of Stimulated Emission Cross Section in Heat Capacity Lasers

Wang Xiaobo Xu Xiaojun Lu Qisheng

(*Optoelectronic Science and Engineering College, National University of
Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China*)

Abstract During lasing process, the active medium is not cooled actively in heat capacity laser, so the temperature of the active medium increases sharply. As a result of the decreasing stimulated emission cross section with increasing temperature, the laser gain declines obviously. Based on the relation between the temperature and the stimulated emission cross section of Nd:phosphate and 1% doping Nd:YAG, the changes of power output and pump threshold in heat capacity lasers are calculated. The results show that the power output declines obviously and the pump threshold rises sharply with increasing temperature in heat capacity lasers because of thermally induced change of stimulated emission cross section.

Key words lasers; heat capacity laser; stimulated emission cross section; numerical calculation

1 引言

热容(heat capacity)模式最早是由 C. T. Walters 等^[1]提出的,并展示了单脉冲能量为40 J,重复频率为36 Hz的钕玻璃热容激光器实验。随后利弗莫尔实验室的 George Albrecht 等^[2]申请了热容激光器的相关专利。为了进行热容运行方式的原理性演示验证,美国利弗莫尔实验室在2001年左右

建造了一台平均功率10 kW的热容激光器^[3],该激光器采用闪光灯抽运的钕玻璃作为激光增益介质。之后 Mark D. Rottor 等^[4]发表了热容激光器的最新进展,报道中提到的激光器采用激光二极管阵列抽运 Nd:GGG 板条,可以输出4 s的平均功率10 kW的脉冲或者0.5 s的平均功率为16.6 kW脉冲。国内也有多家单位开展了相应的研究^[5~7]。

收稿日期:2007-12-19;收到修改稿日期:2008-06-23

基金项目:国家自然科学基金(60378009)资助项目。

作者简介:汪晓波(1982—),男,博士研究生,目前主要从事固体激光器的研究。

E-mail: xiaobowang1982@yahoo.com.cn

导师简介:陆启生(1942—),男,教授,博士生导师,目前研究方向为激光与物质相互作用和高能激光技术。

E-mail: luqsheng@public.cs.hn.cn

热容激光器的输出功率通常会随着输出时间的推迟出现明显的下降,其原因非常复杂,例如:吸收效率的下降;腔内激光介质的温度分布导致的波前畸变,波前畸变导致的因素主要是热致折射率的改变、热致应力导致折射率的改变和热致变形;提取效率的下降;受激发射截面下降导致的增益下降等。本文讨论的是激光介质有效受激发射截面随温度变化对输出功率的影响。

2 长脉冲和连续激光的抽运阈值及输出功率

固体热容激光器发射期间将废热储存在激光介质中,使激光介质温度随着激光的不断发射不断升高。温度的升高导致激光介质一些物理特性、光学特性发生改变,其中发射截面的改变导致激光增益的下降、抽运阈值的升高和输出功率的明显下降。

为了充分提取储存在固体热容激光器激光介质中的能量,通常采用高重复频率长脉冲输出方式。连续激光或者长脉冲激光到稳态时,输出功率满足^[8]

$$P_{\text{out}} = \left(\frac{-\ln R}{\delta - \ln R} \right) \eta \left[P_{\text{in}} - \left(\frac{\delta - \ln R}{2} \right) \frac{Ah\nu_L}{\eta\sigma(T)\tau_f} \right], \quad (1)$$

式中 P_{in} 为抽运光功率, R 为输出耦合镜的反射率, δ 为激光谐振腔的损耗率, A 为激光增益介质的横截面积, ν_L 为激光频率, τ_f 为激光上能级的荧光寿命, $\sigma(T)$ 表示温度为 T 时激光介质的受激发射截面, η 为抽运光的抽运效率。从(1)式可以看出抽运阈值为

$$P_{\text{th}} = \left(\frac{\delta - \ln R}{2} \right) \frac{Ah\nu_L}{\eta\sigma(T)\tau_f}. \quad (2)$$

激光介质温度的整体上升并不会导致 R, δ, A 以及激光能级的明显改变。实验测量也证实激光上能级的荧光寿命与掺杂浓度息息相关,但是与温度并没有太大的关系^[9]。

激光发射截面随着温度的上升通常都会明显下降^[9~11]。当发射截面变小时,并不改变激光效率的斜率,但是会明显增加阈值,在其他条件不变时,阈值的升高会导致输出功率变低。

3 掺钕磷酸盐玻璃受激发射截面的影响

掺钕磷酸盐玻璃的发射截面随温度变化的近似规律为^[9,10]

$$\sigma(T) = \sigma \exp[b(T_0 - T)], \quad (3)$$

式中 σ 表示温度为 T_0 时的受激发射截面, T_0 为 295 K, b 为通过实验测量得出的经验系数,代入(2)式,可以得到

$$P_{\text{th}}(T) = \left(\frac{\delta - \ln R}{2} \right) \frac{Ah\nu_L}{\eta\sigma\tau_f} \exp[b(T - T_0)] = P_{\text{th}}(T_0) \exp[b(T - T_0)], \quad (4)$$

则输出功率变为

$$P_{\text{out}} = \left(\frac{-\ln R}{\delta - \ln R} \right) \eta \times \left\{ P_{\text{in}} - \left(\frac{\delta - \ln R}{2} \right) \frac{Ah\nu_L}{\eta\sigma\tau_f} \exp[b(T - T_0)] \right\}, \quad (5)$$

对于 LHG-5 型玻璃, b 为 $8.0 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, 室温下发射截面为 $4.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 荧光寿命为 $290 \mu\text{s}$; 对于 LHG-8 型玻璃, b 为 $6.3 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, 室温下发射截面为 $4.2 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 荧光寿命为 $315 \mu\text{s}$ ^[9]。另外一种类型的掺钕磷酸盐玻璃中 b 为 $4.3 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, 掺杂原子数分数为 3% 时, 荧光寿命为 $300 \mu\text{s}$, 室温下发射截面约为 $4.2 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ^[10]。

将以上参数代入, 可以得出三种材料工作在热容模式下时, 因为发射截面随温度变化导致的阈值相对变化如图 1 所示。

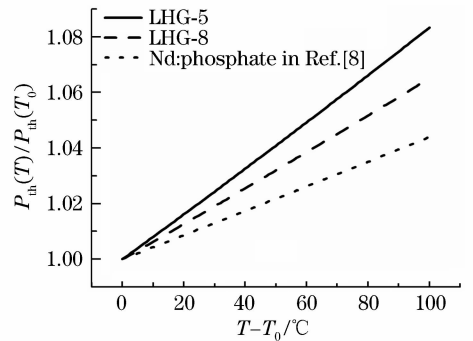


图 1 掺钕磷酸盐玻璃热容激光器的阈值随激光介质温度升高的相对变化

Fig. 1 Pump threshold of Nd³⁺ phosphate heat capacity laser changes with the temperature

合理假设输出耦合率为 50%, 腔内损耗在如此高输出耦合率的情况下可以忽略, 闪光灯抽运时, 可以合理地认为抽运效率为 5%, 则因发射截面变化导致的输出功率随温度的变化为

$$P_{\text{out}}(T) = \{ P_{\text{in}}/P_{\text{th}} - \exp[b(T - T_0)] \} \times P_{\text{out}}(T_0)/(P_{\text{in}}/P_{\text{th}} - 1), \quad (6)$$

假如输入的抽运功率为阈值的 3 倍, 因为工作介质温度升高导致受激发射截面变化对输出功率的影响如图 2 所示。

由上述计算可见, 输入的抽运功率相对于阈值

的比例越高,温度导致发射截面的变化对功率的相对变化影响越小。对于 3 种不同类型的掺钕磷酸盐玻璃的热容激光器,当激光介质温度升高 100 °C 时,激光输出功率随抽运功率与阈值之间的比值的相对变化如图 3 所示。

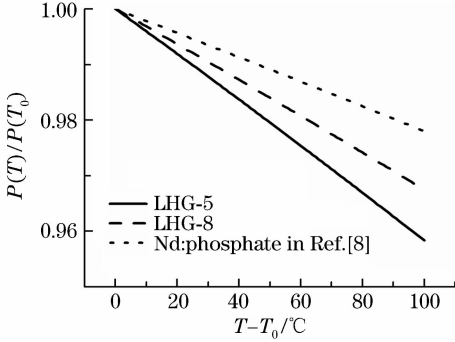


图 2 掺钕磷酸盐玻璃热容激光器输出功率随激光介质温度升高的相对变化

Fig. 2 Power output of Nd:phosphate heat capacity laser changes with the temperature

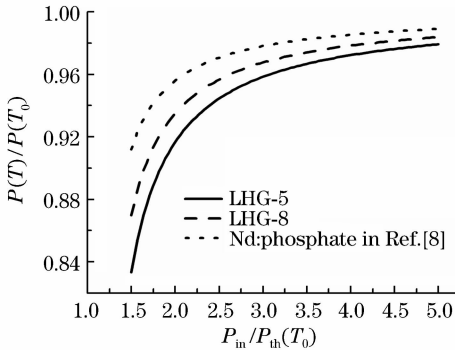


图 3 掺钕磷酸盐玻璃热容激光器输出功率随抽运功率与阈值之间的比值的相对变化

Fig. 3 Power output of Nd:phosphate heat capacity laser changes with the ratio of the pump power to threshold

4 Nd:YAG 受激发射截面的影响

Nd:YAG 的发射截面随温度变化比掺钕磷酸盐玻璃明显,对于掺杂原子数分数为 1% 的 Nd:YAG,发射截面随温度变化的规律为

$$\sigma(T) = (2.35 - 3.7 \times 10^{-3} T) \times 10^{-19} (\text{cm}^2), \quad (7)$$

式中 T 的单位为 °C^[11]。则可以得出 Nd:YAG 随工作温度变化时,抽运阈值的相对变化如图 4 所示。

将以上参数代入,并同时合理假设输出耦合率为 25%,腔内损耗在高输出耦合率的情况下可以忽略,激光二极管抽运时,合理假定激光的斜率效率为 50%,当输入的抽运功率为阈值的 3 倍时,则因发射

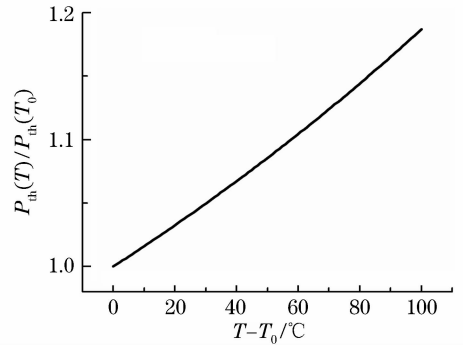


图 4 Nd:YAG 热容激光器的阈值随激光介质温度升高的相对变化

Fig. 4 Pump threshold of Nd:YAG heat capacity laser changes with the temperature

截面变化导致的温度变化为

$$P_{out}(T) = \left(P_{in}/P_{th} - \frac{2.35}{2.35 - 3.7 \times 10^{-3} T} \right) \times P_{out}(T_0) / (P_{in}/P_{th} - 1). \quad (8)$$

随着温度的升高,输出功率的相对变化如图 5 所示。

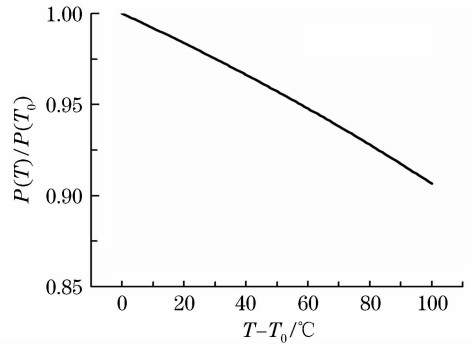


图 5 Nd:YAG 热容激光器的输出功率随激光介质温度升高而不断下降

Fig. 5 Power output of Nd:YAG heat capacity laser decreases with the temperature

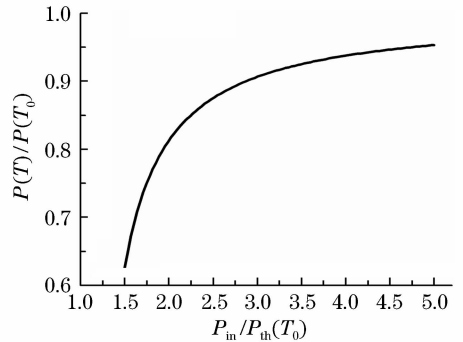


图 6 Nd:YAG 热容激光器的输出功率随抽运功率与阈值之间的比值的相对变化

Fig. 6 Power output of Nd:YAG heat capacity laser changes with the ratio of the pump power to threshold

另外以温度升高100℃为例,计算可以得出输入的抽运功率相对于阈值的比例越高,温度导致发射截面的变化对功率的相对变化影响越小,计算结果如图6所示。

5 结 论

固体热容激光器中介质温度上升后,抽运阈值明显上升且输出功率明显下降,其中的一个重要原因是激光介质的有效受激发射截面随温度发生了变化。随着固体热容激光器中激光介质的温度升高,介质的激光发射截面不断降低,增益的降低导致固体激光器的抽运阈值明显升高。不同材料的激光发射截面随温度变化的规律不同,Nd:YAG晶体的激光发射截面随温度变化比掺钕磷酸盐玻璃剧烈,热容工作模式下,抽运阈值上升得更快,输出功率也下降得更快。此外,抽运的实际功率与抽运的阈值的比值越高,温度升高对输出功率的影响越小;为了保证介质温度升高后热容激光器的输出功率,实际抽运功率应为阈值功率的3倍以上。

参 考 文 献

- 1 C. T. Walters, J. L. Dulaney, B. E. Campbell *et al.*. Nd-glass burst laser with kW average power output [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(2):293~300
- 2 George Albrecht, E. Victor George, William F. Krupke. High

- Energy Bursts from a Solid State Laser Operated in the Heat Capacity Limited Regime [P]. U. S. patent 5526372, 1996
- 3 G. Albrecht, S. Sutton, V. George *et al.*. Solid state heat capacity disk laser [J]. *Laser and Particle Beams*, 1998, **16**(4):605~625
- 4 Mark D. Rottor, C. Brent Dane, Sally A. Gonzles *et al.*. The Solid-State Heat-Capacity Laser. www.llnl.gov, 2004
- 5 Xiaodong Yang, Yong Bo, Qinjun Peng *et al.*. 2277-W continuous-wave diode-pumped heat capacity laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4):226~228
- 6 Guo Mingxiu, Li Jindong, Fu Wenqiang *et al.*. Kilowatt laser diode-pumped solid-state heat capacity slab laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):280~286
郭明秀,李劲东,付文强等. 千瓦级半导体抽运的固体热容板条激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2):280~286
- 7 Yin Xianhua, Zu Jifeng, Hou Liqun *et al.*. Two-dimensional thermal effects in crystal slab heat capacity laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):771~776
尹宪华,祖继锋,侯立群等. 板条热容激光器的二维热特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6):771~776
- 8 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. 5th ed.. New York: Springer, 1999. 98~106
- 9 Jun Dong, Michael Bass. Temperature-dependent stimulated-emission cross section and concentration quenching in Nd³⁺-doped phosphate glasses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(2):454~457
- 10 C. Erlandson, G. F. Albrecht, S. E. Stokowski. Model predicting the temperature dependence of the gain coefficient and the extractable stored energy density in Nd:phosphate glass lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(2):214~222
- 11 Alexandra Rapaport, Guohua Xiao, Andrew Howard *et al.*. Temperature dependence of the 1.06- μm stimulated emission cross section of neodymium in YAG and in GSGG [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(33):7052~7057