

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0172-04

高平均功率钕玻璃片状激光器增益特性模拟

刘建国, 贺少勃, 陈远斌, 曹丁象, 杨 东, 刘 勇, 於海武

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 推导了非稳态情况下固体激光器的输出光强表达式, 在此基础上数值模拟了钕玻璃热容激光器的增益性能。分析表明, 高抽运光强可使激光器工作在高提取效率范围; 介质大的发射截面、高长径比则可以大大减小激光器的阈值能量; 温度的影响在高抽运光强时不明显。另外, 由于温度和热容激光器脉冲串输出方式的影响, 总脉冲串输出能量在腔镜透射率上也将有一个优化值。

关键词 激光技术; 钕玻璃片状激光器; 增益特性; 高平均功率; 优化

中图分类号 TN241; TN248.1 **文献标识码** A

Modeling of Gain Characteristics of High Average Power Nd:Glass Disk Laser

LIU Jian-guo, HE Shao-bo, CHEN Yuan-bin, CAO Ding-xiang, YANG Dong,
LIU Yong, YU Hai-wu

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The expression for output laser intensity of solid state laser under unstable state is deduced in theory. And the gain characteristics of Nd:glass heat capacity laser is stimulated on the basis of that expression. It is shown that high pumped intensity, large emission cross-section, high aspect ratio can increase the extraction efficiency. The influence of temperature on extraction efficiency can be ignored under high pumped intensity. In addition, the transmission ratio of cavity mirror has an optimum value because of the influence of temperature on the output of the pulse string.

Key words laser technique; Nd:glass disk laser; gain characteristics; high average power; optimize

1 引 言

近些年来, 热容技术成为国内外超高平均亮度固体激光系统研究的一个热点。由于晶体技术和激光二极管(LD)抽运技术的驱动, 短短几年, 热容激光器已经从最初的灯抽运钕玻璃系统发展到今天的LD抽运掺钕GGG晶体结构, 平均功率从1.4 kW有望发展到100 kW(2007年)^[1,2]。然而, 由于成本优势, 在用作热容激光器技术研究平台以及某些不考虑重复频率的应用场合时, 钕玻璃系统仍有不可替代的优点。

在增益性能方面, 钕玻璃用作振荡器一般采用大长径比的棒状形态, 增益相对较大。但在热容激光器中, 由于损伤阈值以及抽运均匀性的要求, 必须采用较大口径的片状介质, 这样就降低了增益, 而且热容激光器采用非稳腔的要求会增大腔内损耗。因

此, 钕玻璃片的增益能力需要进行评估和优化。其次, 热容激光器采用不冷却的脉冲串工作模式, 钕玻璃激光器的输出对温度的依赖性还存在不同的见解^[1,3,4], 需要进行研究。本文理论推导了非稳态情况下固体激光器的输出光强表达式, 采用该非稳态模型数值求解了热容激光器的速率方程, 分析了抽运参量、增益介质、腔镜耦合输出参量以及温度等对固体热容激光器增益性能的影响, 提出了具体的优化措施。

2 理论模型

出于对器件可靠性以及能量转换效率的考虑, 钕玻璃热容激光器的抽运脉宽和荧光寿命在同一个量级, 此时激光器可能工作在各能级粒子数随时间不断变化的非稳态, 速率方程需要采用数值解法。

作者简介: 刘建国(1972—), 男, 山西陵川人, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心助理研究员, 主要从事高功率固体激光技术的研究。E-mail: franceliu@sohu.com

四能级速率方程为^[5]

$$\frac{dn_3}{dt} = n_0 W_{03} - n_3 S_{32}, \quad (1)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = n_3 S_{32} - (\sigma_{21} n_2 - \sigma_{12} n_1) N_1 v - n_2 (A_{21} + S_{21}), \quad (2)$$

$$n_1 = n - (n_0 + n_2 + n_3), \quad (3)$$

$$\frac{dn_0}{dt} = n_1 S_{10} + n_3 A_{30} - n_0 W_{03}, \quad (4)$$

$$\frac{dN_l}{dt} = (n_2 \sigma_{21} - n_1 \sigma_{12}) N_l v \frac{l}{L_1} - \frac{N_l}{\tau}, \quad (5)$$

关于温度的影响,有

$$n_2(T) = n_0 \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{KT}\right), \quad (6)$$

上述公式中, n_0, n_1, n_2, n_3, n 分别为四能级系统中基态能级、激光下能级、激光上能级、抽运高能级上以及总的掺杂粒子密度。 W_{03} 为抽运速率, N_l 为激光光子密度, L_1 和 l 分别为谐振腔和增益介质的长度, v 为介质中的光速, τ 为光子在腔中的平均寿命, $\tau = \frac{2L_1}{v(L - \log R)}$, 其中 L 为谐振腔单次往返损耗, R 为输出镜反射率。

对输出光强的推导, 文献[4,5]的前提是反射率接近于1, 在钹玻璃热容激光器中, 输出镜透射率的明显提高以及非稳腔的反馈使该式不再成立。针对透射率 T 取 $0 \sim 1$ 范围, 输出光强的表达式重新推导如下:

如图1所示, 谐振腔内轴向的正反向光强符合下式:

$$I^+ = I_1 \exp(g_{x1} \Delta l - \alpha \Delta l) \exp(g_{x2} \Delta l - \alpha \Delta l) \times \dots \exp(g_{xm} \Delta l - \alpha \Delta l) = I_1 \exp[\sigma(\Delta n_1 + \Delta n_2 + \dots + \Delta n_n) \Delta l - \alpha l] = I_1 \exp(g - \alpha) l, \quad (7)$$

同理,

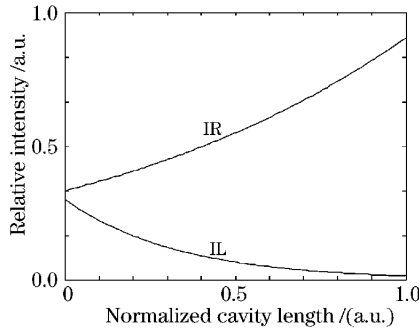


图1 腔内正反向光强示意图

Fig. 1 Laser intensity in cavity of positive and inverse direction

$$I^- = I_2 \exp(g - \alpha) l, \quad (8)$$

其中,

$$I_2 = I^+ (1 - T), \quad (9)$$

(7) ~ (9) 式中, I^+, I_1, I^-, I_2 分别为谐振腔在输出端和反射端处正、反向传输的光强, $g_{x1}, g_{x2}, \dots, g_{xm}$ 分别为腔长方向上 x_1, x_2, \dots, x_n 处的增益系数。

由(7)式易知, $I_1 = I^+ \exp[-(g - \alpha) l]$, 则轴向正向光强的表达式为

$$I = I^+ \exp[-(g - \alpha) l] \exp[(g - \alpha) x]. \quad (10)$$

由式(8)易知轴向反向光强的表达式为

$$I^- = I^+ (1 - T) \exp[(g - \alpha) x], \quad (11)$$

平均光强 I 可以由腔内的平均光子密度得出: $I = N_l v \hbar \nu$. 其中 ν 为激光频率, \hbar 为普朗克常数。对腔内平均光强和正向光强的关系采用积分平均法可以得到输出光强 I_{out} 和腔内平均光强的关系为

$$I_{out} = I_2 (1 - R) = \frac{Il(g - \alpha)(1 - R)}{\{\exp[-(g - \alpha) l] + R\} \{\exp[(g - \alpha) l] - 1\}}, \quad (12)$$

3 计算与分析

采用四阶龙格-库塔法对(1) ~ (6)式进行数值微分, 计算中采用的钹玻璃的基本参量见文献[4], 结果及分析如下。

3.1 抽运参量

分别计算了钹玻璃热容激光器在单脉冲能量 $100 \sim 10^5$ J 的抽运强度下, 优化透射率时的单脉冲输出能量如图2所示。

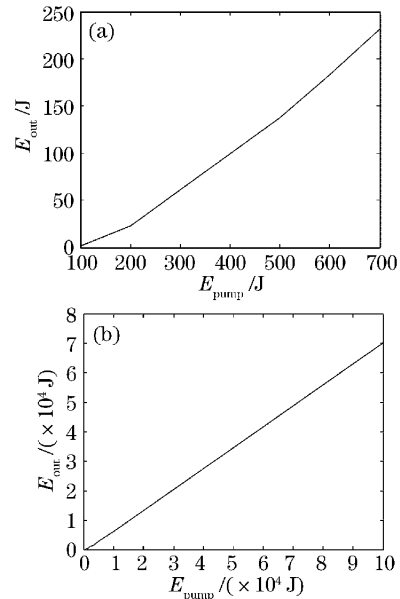


图2 抽运光强对钹玻璃激光器输出的影响

Fig. 2 Influence of pumped intensity on output

由图 2 可见,高强度抽运可大幅度提高提取效率,主要靠增大透射率来实现。而在实际中,得益于钕玻璃的高掺杂浓度,这种高强度抽运是可以实现的。抽运光的脉冲宽度对输出能量的影响如图 3。

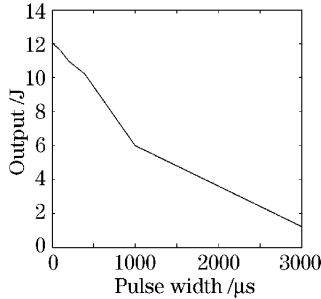


图 3 抽运光脉冲宽度对钕玻璃激光器输出的影响
Fig. 3 Influence of pumped pulse width on energy output

3.2 增益介质

从热储备能力和损伤性能的角度来看,热容模式对增益介质体积和截面积要求是越大越好,但从提取效率的角度,则有相反的结论。在增益长度相同的情况下,增益介质的体积对提取效率的影响如图 4 所示。而在体积相同时,尽量增大长径比带来的提取效率上的提高如图 5 所示。由于阈值能量的差

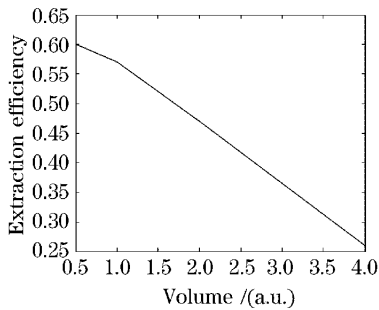


图 4 增益介质体积对提取效率的影响
Fig. 4 Influence of Nd glass volume on extraction efficiency

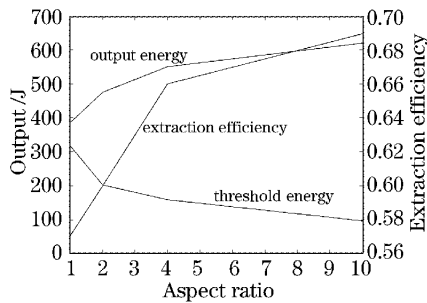


图 5 介质长径比对输出能量、阈值以及提取效率的影响
Fig. 5 Influence of aspect ratio on output, threshold and extraction efficiency

别,同样能量的抽运,小体积介质会输出更高的能量。

3.3 腔镜耦合参量

如果要达到高的平均亮度,热容激光器在高能输出的同时必须保证高的光束质量,因此腔镜的透射率必须考虑到有对非稳腔支持的要求,同时兼顾介质的阈值能量。计算了输出镜透射率分别为 0.4~0.9 时该钕玻璃激光器的阈值能量,如图 6。分析表明,对于 Nd:YAG 等大发射截面的晶体介质热容激光器而言,增益系数可以支持足够高的透射率,而对于钕玻璃热容激光器,由于增益系数较小,除非有足够高的抽运光强,否则设计中必须兼顾到阈值能量和光束质量的平衡。

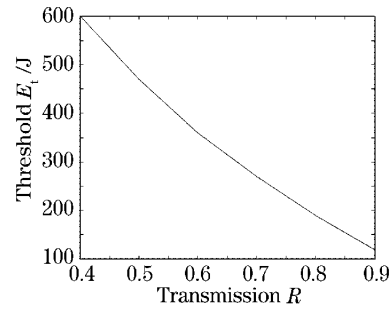


图 6 钕玻璃激光器不同透射率时的阈值
Fig. 6 Threshold with different couple transmission

3.4 温度

图 7 模拟了在不同抽运强度的情况下温度升高时输出能量的变化,模拟的结论和文献中的结论完全相同。即对钕玻璃介质而言,在高强度抽运下,温度的影响并不明显。同时,随着温度的升高,阈值增大,原先的优化反射率不再是优化值。因此,如果没有随时间反射率可变的输出镜,需要在工作温度范围优化脉冲串工作时的透射率。

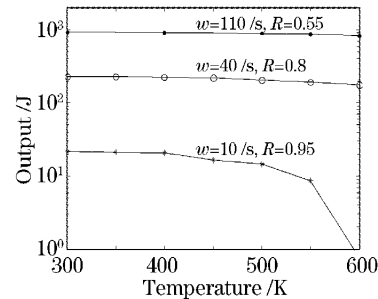


图 7 温度对输出能量的影响
Fig. 7 Influence of Nd glass temperature on output

4 结 论

尽管在目前用作热容激光器的介质的选取中，Nd:GGG 晶体是综合性能最佳的，但其昂贵的成本让人望而却步。相比之下，钷玻璃介质的优势在于其低廉的价格。虽然增益系数远低于 GGG 和 YAG 等晶体，但易于高掺杂和制作大面积的玻璃片弥补了输出光强的不足。

钷玻璃用于热容工作时具有非常好的增益性能。大的横向尺寸可以承受高的光强输出，高的掺杂浓度允许高的抽运强度。在高强度抽运情况下，钷玻璃的发射截面尺寸的劣势得以弥补，提取效率可以达到 0.6。

参 考 文 献

- 1 G. F. Albrecht, S. B. Sutton, E. V. George *et al.*. Solid state heat capacity disk laser [J]. *Laser and Particle Beams*, 1998, **16** (4): 605~625
- 2 M. D. Rotter, C. D. Dane. Solid state heat capacity laser review [R]. UCRL-JC-148318. 2002
- 3 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): 293~230
- 4 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen transl., Beijing: Science Press, 2002. 47
W. 克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 孙文, 江泽文, 程国祥译, 北京: 科学出版社, 2002, 47
- 5 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Jiahua. Principle of Laser [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. 148
周炳琨, 高以智, 陈家骅. 激光原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 148