

半导体激光泵浦固体激光器的增益开关效应*

周复正 郑桂珍 孙翠华 沈丽青 范滇元**

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 用功率大于 100mW 的二极管激光器列阵泵浦 Nd: YAG 固体激光器, 实现了 DPL 的增益开关作用。研究了增益开关的动态特性, 得到峰值功率大于 80 mW 的 $1.06\mu\text{m}$ 激光输出, 与计算结果一致。提出了三阶梯泵浦的高增益开关新方法, 得到峰值功率大于 150 mW、脉冲宽度小于 $0.2\mu\text{s}$ 的固体激光输出。

关键词: 增益开关, 阶梯泵浦

Gain switching of solid state laser pumped by laser diode array

Zhou Fuzheng, Zheng Guishen, Sun Cuihua, Shen Liqing, Fan Dianyuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract: Gain switching of Nd: YAG laser has been obtained by LD array pumping with an output power of 100 mW. The gain switching dynamics of LD pumped Nd: YAG resonator was realised. A peak power of 80 mW at $1.06\mu\text{m}$ has been obtained. The calculated values are in agreement with the experimental results. A new method of high gain switching by three-step pumping has been tested. A peak power of 150 mW and a pulsed width of $0.14\mu\text{s}$ have been observed.

Key words: gain switching, step pumping

一、增益开关原理

“增益开关”是用于半导体激光的一种快速跃阶电脉冲驱动新技术^[1~3]。近几年来, 此技术用于二极管激光泵浦固体激光器, 实现了固体激光器的增益开关效应, 达到了压缩激光脉冲宽度和提高输出功率的效果^[4]。增益开关的原理示于图 1, 首先用一个长的低光泵脉冲把固体介质中的 Nd 离子激发累积到接近它的激射阈值, 然后叠加一个快速跃阶的高光泵窄脉冲, 形成瞬间过阈值的反转粒子数状态, 粒子数的突然反转构成增益开关效应, 输出一个幅度比通常弛豫振荡高、脉冲宽度窄的单个激光脉冲。其输出特性可以用固体激光器的调 Q 方法计算

收稿日期: 1991年1月11日。

* 该研究为上海自然科学基金资助项目。

** 参加本工作的还有屠玉珍、顾德英、金志良、方祖捷、封伟忠等同志。

分析^[5],但与调Q技术不同,其高的初始反转粒子数积累不是靠腔损,而是依靠快速跃阶的泵浦光脉冲。这种方法简单方便,是一种理想的高功率单频注入光源^[6~8]。由于用于泵浦的光源LD的光脉冲波形可根据需要随驱动电流在ns响应量级上任意造形,以产生不同的增益开关效果,这也是用氙灯泵浦方法所难以实现的。

为了得到更高的输出功率、更窄和稳定的激光脉冲输出,设计了新的三阶梯泵浦高增益开关方法。其第二个小阶梯电驱动脉冲的作用是调节LD光强度,使它泵浦固体激光器稳定工作在 \cong 阈值水平,同时可以使第三个电脉冲加得更窄、更高,使二极管激光器工作到它的输出功率极限,产生更大的Nd初始反转粒子数,从而形成高增益开关效果。

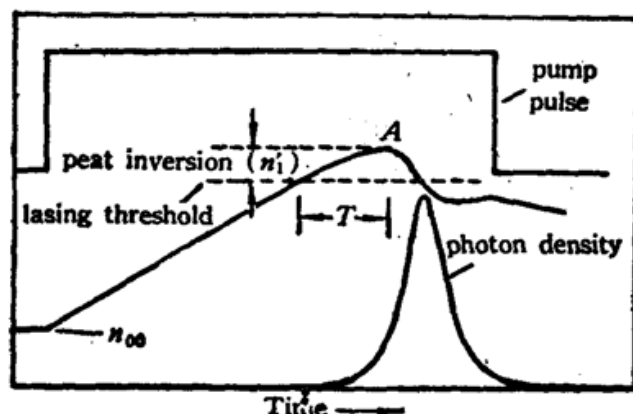


Fig. 1 Principle of the gain switching

为了得到更高的输出功率、更窄和稳定的激光脉冲输出,设计了新的三阶梯泵浦高增益开关方法。其第二个小阶梯电驱动脉冲的作用是调节LD光强度,使它泵浦固体激光器稳定工作在 \cong 阈值水平,同时可以使第三个电脉冲加得更窄、更高,使二极管激光器工作到它的输出功率极限,产生更大的Nd初始反转粒子数,从而形成高增益开关效果。

二、实验与结果

输出脉冲功率100mW、辐射中心波长在809nm的二极管激光器线列阵,其结构、Nd:YAG固体激光器和泵浦实验装置与以前所用的一样^[9,10],仅把方波驱动器改为阶梯波电路。研究了不同阶梯波形对半导体激光器输出功率和光谱的影响,选择第一个阶梯电脉冲长度 $T=250\mu\text{s}$,与Nd离子荧光寿命 $\tau=255\mu\text{s}$ 相匹配,驱动电流 $I=1.1\sim 1.3I_{\text{thLD}}$,首先使LD光泵单块Nd:YAG固体激光器受激,然后降低LD功率,使Nd:YAG固体激光器处于小于但非常接近受激阈值泵浦状态。第二个阶梯电脉冲宽度为 $T=10\sim 20\mu\text{s}$,前后沿均小于 $1\mu\text{s}$,大电流 $I=1.6\sim 2I_{\text{thLD}}$ 驱动激光二极管列阵输出峰值功率达150mW。这个快速高抽运使Nd离子形成一个瞬时的、大于阈值所需的初始反转粒子数,构成增益开关,激射出一个小的高功率单脉冲。电驱动脉冲波形、二极管列阵激光器输出波形、Nd荧光波形和Nd:YAG固体激光器输出波形如图2所示。激光脉冲宽度为 $0.4\mu\text{s}$,峰值功率为80mW,相当于国际上同类器件中的实验结果(峰值功率60mW)^[4]。与同一条件下的LD泵浦固体激光器弛豫振荡输出^[10]相比,脉宽压缩了5倍,幅度增加了3倍,即峰值功率增加了15倍。

固体激光器输出脉冲宽度与第一阶梯泵浦功率的关系如图3所示,当泵浦功率低于固体激光阈值时,第二阶梯泵浦光主要用于抽运Nd离子达到阈值反转粒子数,增益开关作用很弱,输出脉冲较宽。在第一阶梯泵浦功率 \leq 固体激光阈值时,第二阶梯泵浦光几乎全部用于增益开关,输出脉宽最窄。而当第一阶梯泵浦光功率超过固体激光器阈值时,由于已产生受激辐射,不能形成很高的初始反转粒子数,因此增益开关效应也较弱,输出脉冲较宽,且出现次峰甚至多尖峰结构。固定第一阶梯泵浦光功率在 \leq 固体激光器峰值水平时,固体激光器的输出功率与第二阶梯泵浦光功率关系如图4所示。当第二阶梯泵浦功率很小时,输出功率较小,略大于固体激光器弛豫振荡尖峰功率。随着第二阶梯功率的增加,输出功率增大,但当在很大的电流驱动时,将出现LD的波形畸变和光谱漂移,有效泵浦功率增加不多,输出功率呈现饱和,且LD急速老化直至损坏。

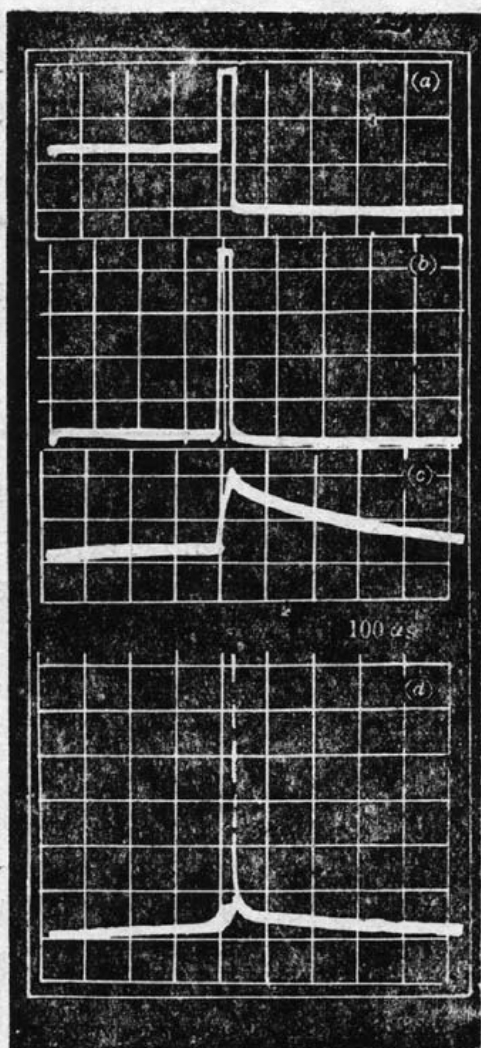


Fig. 2 Temporal profiles of GS-Nd: YAG laser
(a) driving pulse; (b) LD array output; (c) Nd⁺ fluorescence; (d) Nd: YAG laser output

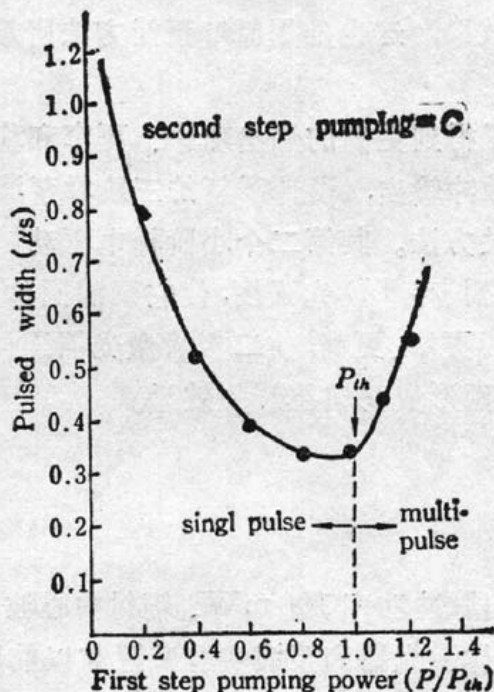


Fig. 3 Pulse width of GS-laser vs the first step pump power

为了获得更窄、更高的固体激光脉冲输出,设计并实验了高增益开关方法。在上述二阶梯泵浦实验中,由于第一个长驱动电脉冲电平的微小波动和 LD 的致冷器温控精度的限制,造成 LD 输出功率的微变化和光谱的漂移,较难在第一个阶梯脉冲的结束瞬间正好工作在非常接近固体激光阈值水平,至使第二个阶梯脉冲的一部分光泵能量用于泵浦固体激光器到阈值,另一部分能量产生增益开关作用,这就要求更快、更高的泵浦功率以产生理想的增益开关效应。但是一定脉宽的大电流驱动将会导致 LD 的老化以至损坏。为此,研究了 LD 本身的增益开关动态特性,测量了驱动电流与 LD 的输出功率、脉冲波形和发射光谱之间的关系,确定了直到极值破坏的使用条件,设计和研制了三阶梯泵浦电路。

三阶梯泵浦产生固体激光器高增益的关键是在第一个阶梯脉冲的末尾叠加一个小电驱动脉冲 ($I = 1.3 \sim 1.5 I_{thLD}$, $T = 5 \sim 20 \mu s$), 调节其脉冲幅度和密度,以精确控制 LD 稳定泵浦在 \cong Nd:YAG 固体激光器的阈值状态。然后再叠加一个很高很窄的电脉冲 ($I = 3 \sim 5 I_{thLD}$, $T = 0.5 \sim 1.0 \mu s$, $T_r < 0.001 \mu s$), 这个强激励电脉冲使二极管阵列激光器输出功率 $\sim 0.5 W$, 达到它的输出功率极限,形成了固体激光器的高增益开关效应。电驱动波形、LD 激光波形、Nd 荧光和在第三个阶梯泵浦下 Nd:YAG 固体激光器输出瞬态波形如图 5 所示。激光脉冲宽度为 $0.14 \mu s$, 峰值功率达 $150 mW$, 与通常泵浦的弛豫振荡相比,脉宽压缩了 $8 \sim 10$ 倍,幅度增

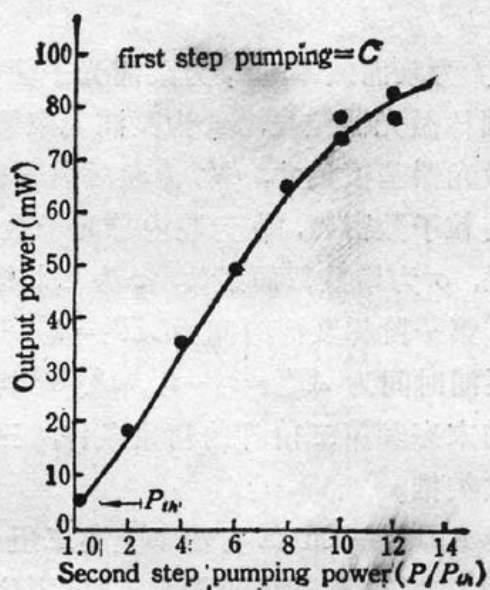


Fig. 4 Output power of GS-laser vs the second step pump power

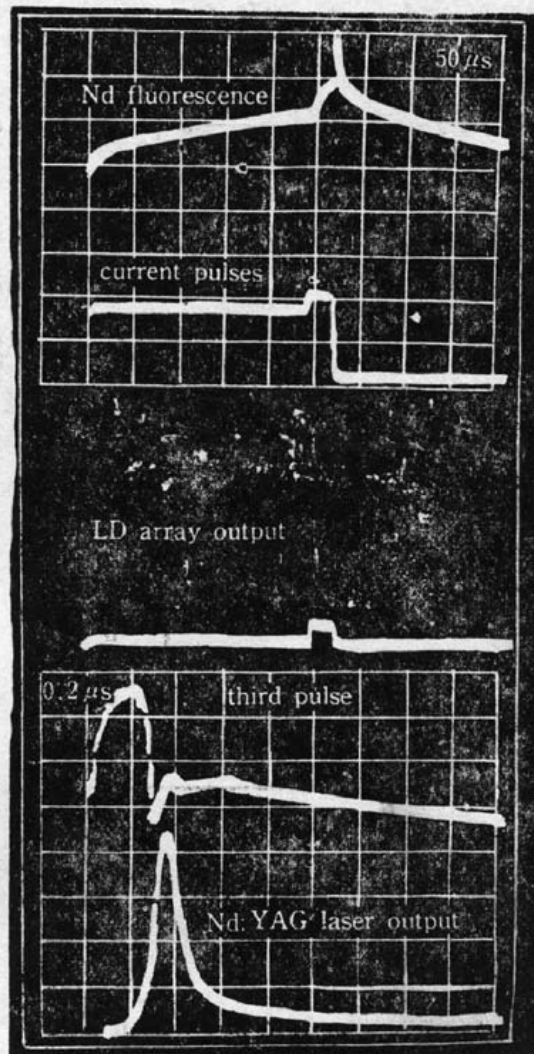


Fig. 5 Temporal waveforms of high gain switched Nd: YAG laser

加了 4 倍, 即峰值功率增加了 30~40 倍。

三、理论计算

DPL 的速率方程、光子数方程和用方波泵浦计算的泵浦阈值功率、输出激光弛豫振荡尖峰波形、峰值功率等前已叙述^[9,10]。在此仅对阶梯泵浦的 DPL 增益开关效应进行分析。

第一阶梯泵浦的暂态方程为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{2P_1 f}{\pi h \nu_p L \omega_p^2 N_0} \exp(-u) - \frac{x}{\tau} - \frac{2N_0 C \sigma}{\pi \omega_0^2 n_d L} \exp(-a^2 u) x y, & t \leq t_1 \\ \frac{dy}{dt} = \frac{N_0 C \sigma a^2}{n_d} y \int_0^\infty x \exp(-a^2 u) du - \frac{C \sigma}{2n_d L} y + \frac{\Omega \omega_p^2 L}{8\tau} \int_0^\infty x du, & t \leq t_1 \\ x_{t=0} = 0 \\ y_{t=0} = 0 \end{cases}$$

第二阶梯泵浦的暂态方程为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{2P_2 f}{\pi h\nu_p L \omega_0^2 N_0} \exp(-u) - \frac{x}{\tau} - \frac{2N_0 C \sigma}{\pi \omega_0^2 n_d L} \exp(-a^2 u) x y, & t_1 < t \leq t_2 \\ \frac{dy}{dt} = \frac{N_0 C \sigma a^2}{n_d} y \int_0^\infty x \exp(-a^2 u) du - \frac{C \delta}{2n_d L} y + \frac{\Omega \omega_p^2 L}{8\tau} \int_0^\infty x du, & t_1 < t \leq t_2 \\ x_{t=t_1} = x^0(u) \\ y_{t=t_1} = y^0(u) \end{cases}$$

式中:

$$\begin{aligned} x &= N/N_0, \quad y = \phi/N_0, \\ a^2 &= \omega_p^2/\omega_0^2, \quad u = -2r^2/\omega_p^2 \end{aligned}$$

在此 P_1, P_2 分别为第一、第二阶梯泵浦光功率, f 为泵浦效率, $h\nu_p$ 为泵浦光子能量, L 为

单块固体激光器腔长, ω_p 为泵浦光束腰, ω_0 为固体激光器基模尺寸, N_0 为激活离子密度, N 为反转粒子数密度, ϕ 为腔内总光子数, δ 为双程损耗, σ 为增益截面系数, τ 为 Nd 离子荧光寿命。第一阶梯泵浦时间为 $\Delta T_1 = t_1 - 0$, 第二阶梯泵浦时间为 $\Delta T_2 = t_2 - t_1$ 。 x^0, y^0 均为第一阶梯的末态和第二阶梯的初始条件, 三阶梯泵浦依次类推。

用 Runge-Kutta 方法解上述二组微分方程^[13], 得到 LD 列阵泵浦 Nd:YAG 固体激光器增益开关效应计算值为

输出脉冲峰值功率 68 mW;
输出脉冲宽度 320 ns(FWHM)。 } 二阶梯泵浦
输出脉冲峰值功率 113 mW;
输出脉冲宽度 120 ns(FWHM)。 } 三阶梯泵浦

阶梯波泵浦 Nd:YAG 固体激光器增益开关的脉冲波形计算曲线如图 6 所示, 与实验结果一致。

Fig. 6 Calculated pr files of GS-Nd:YAG laser

多阶梯 LD 光脉冲泵浦固体激光器动力学、DPL 增益开关效应极限和高重复频率 DPL 增益开关输出特性将进一步推导和实验。

李远和陈浩参加了部分实验工作, 林康春指导了半导体致冷器的制作, 杜世高蒸涂了高质量增透膜和反射膜, 胡中良加工了小尺寸固体激光棒。谨致以衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Fuzheng Zhou *et al.*, OLEO'89, paper WC6, 166
- 2 Patricia M. Downey *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-23**(6), 1039(1987)
- 3 K. Y. Lau, *Appl. Phys. Lett.*, **52**(4), 257(1988)
- 4 R. L. Schmitt *et al.*, *Opt. Lett.*, **10**(10), 484(1985)
- 5 A. E. Siegman, *Lasers* (University Science Books), USA, 1986
- 6 R. L. Schmitt *et al.*, *Appl. Opt.*, **25**(5), 629(1986)
- 7 D. L. Sipes *et al.*, OLEO'85, paper TuL 2
- 8 T. Baer *et al.*, OLEO' 85, paper ThZ 1
- 9 周复正 *et al.*, 半导体激光泵浦 Nd: glass 固体激光器, 光学学报, 待发表
- 10 王能超, 数值分析简明教程, 高等教育出版社, 114