

准连续 60W 半导体激光侧面泵浦声光调 Q* Nd : YAG 板条激光器研究

陈有明 周复正 胡文涛 朱三又 陈秋水 范滇元

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 用准连续 60 W 激光二极管阵列侧面泵浦 Nd : YAG 板条激光器, 获得 3.5 mJ 的激光输出和峰值功率为 75 kW 的声光调 Q 激光脉冲, 脉冲幅度起伏小于 $\pm 1\%$ 。对研究结果进行了分析。

关键词 半导体激光, 侧面泵浦, 板条激光器, 声光调 Q。

1 引 言

半导体激光二极管泵浦固体激光器, 是当前国际上迅速发展的研究领域, 它已获得了以闪光灯泵浦方式难以达到的高难度技术成果, 诸如在数百瓦输出功率时有几倍衍射极限的高光束质量, 将 Nd : YAG 激光线宽由 1 MHz 压缩到 1 Hz 的单频激光器^[1]等, 美国利弗莫尔实验室报道的平均功率 1.05 kW 激光输出的微通道冷却的二极管阵列侧面泵浦的板条激光器^[2]更加动摇了闪光灯作为泵浦源在高平均功率和高功率固体激光系统的地位。随着二极管阵列研究工作的发展, 这种全固态器件的优点将会更加充分显示出来, 对激光材料加工、激光医学、军事应用甚至人们的生活产生深远影响。作者已成功研制出调 Q-CW 60 W 激光二极管阵列侧面泵浦 Nd : YAG 板条激光器, 单一脉冲的弛豫振荡激光能量达 3.5 mJ。并实现了声光调 Q 激光输出, 单一调 Q 脉冲的峰值功率达 75 kW。

2 实验研究与结果

激光二极管阵列侧面泵浦 Nd : YAG 板条激光器实验装置如图 1 所示。实验采用美国 SDL 公司研制的准连续 60 W 激光二极管阵列作为泵浦源, 在室温下 (293 K), 当驱动电流达到其最大额定值 72 A 时, 该二极管阵列输出脉冲功率为 60 W, 当重复频率为 100 Hz、泵浦脉宽为 200 μ s 时, 其发射波长为 804 nm, 输出线宽为 9 nm。实验所用的泵浦脉宽为 400 μ s, 重复频率 10 Hz, 占空比为 0.4%。为使泵浦光波长至 Nd : YAG 的主吸收峰 808 nm 附近, 将激光二极管阵列加温度 10 K, 并尽可能地贴近板条的一个侧面, 另一侧面紧贴一块镀有 808 nm 的反射膜板, 以反射第一次通过板条介质时没有被吸收的泵浦光。Nd : YAG 板条的几何设计

* 中国科学院军工重点项目资助课题。

收稿日期: 1994 年 1 月 26 日; 收到修改稿日期: 1994 年 6 月 6 日

为:长 16.25 mm, 宽 3 mm, 厚 2 mm(此维与泵浦光的方向一致), 板条的入射和出射端面平行切割成布儒斯特角以减小腔内损耗。这样的几何设计允许激光振荡单程有四次全内反射, 晶体的激活离子的掺杂浓度为 1 at%。输出耦合腔镜是透过率为 12

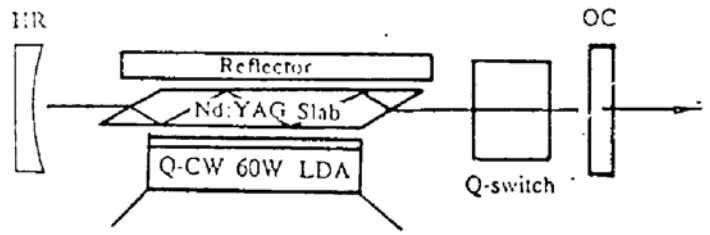


Fig. 1 Schematic of Q-switched Nd : YAG slab laser side-pumped by a Quasi-CW 60 W LDA

%的平面镜, 后腔镜则是曲率半径为 3 m、对 1.064 μm 的全反射镜, 激光器腔长为 8.5 cm, 振荡模的束腰半径计算值为 $\omega_0 = 0.411$ mm。声光调制器的声光介质为 ZF₆ 重火石玻璃, 其品质因数是熔融石英的 12.7 倍。声光作用长度为 $L = 16$ mm, 换能器选用的是 Y-36° 切割的 LiNbO₃ 单晶片。声光介质两端镀有 1.064 μm 的高增透膜, 插入损耗小于 1 %, 调制频率为 80 MHz, 一级衍射效率可达 15 %。

首先进行了短腔激光二极管列阵侧面泵浦 Nd : YAG 板条激光器的静态特性研究。获得了静态输出能量为 3.5 mJ、斜效率为 29 % 的实验结果。其输入与输出的关系曲线见图 2 所示。将腔长拉至 8.5 cm, 插入声光调制器。当泵浦能量为 23 mJ 时, 激光静态输出能量为 2.05 mJ(推出声光调制器的静态输出能量为 2.1 mJ), 光束的远场发散角约为 3~5 倍的衍射极限, 光斑呈 TM₀₀ 模。当声光调制器的驱动功率为 1 W 时, 调 Q 单脉冲能量为 1.5 mJ, 脉冲宽度为 20 ns, 峰值功率达 75 kW。脉冲幅度、脉宽起伏均小于 ±1 %。图 3 是十个调 Q 脉冲叠加的波形。

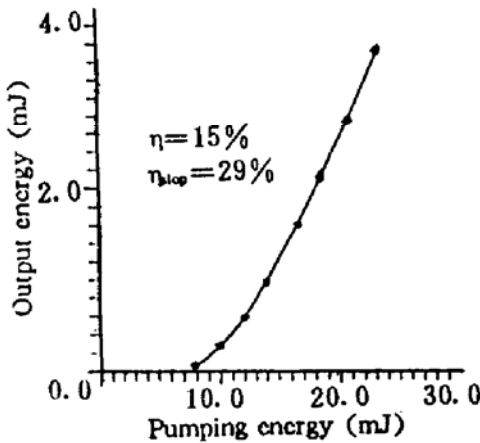


Fig. 2 Laser output versus LDA incident pump energy with optical-optical efficiency of 15 % and slope efficiency of 29 %

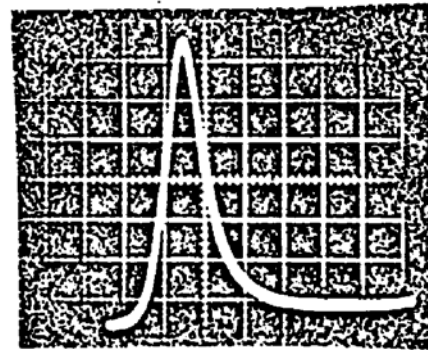


Fig. 3 Superposition of 10 A-0 Q-switched pulses

3 实验分析

虽然已获得输出峰值功率 75 kW 的实验结果, 但就本激光器而言, 是否已达到它的最佳值以及还有多少潜力, 作者从理论上进行了分析。

在单模、平面波的近似下, 激光器的速率方程可简单地表述为:^[3,4]

$$d\Phi/dt = (\eta - 1)\Phi, \tag{1}$$

$$d\eta/dt = -\Phi\eta, \quad (2)$$

Φ 是归一化腔内光功率密度, η 是归一化反转粒子数密度, $\Phi \equiv 2I_n/ch\nu N_t$, $\eta \equiv N/N_t$. 其中 N 为腔内平均反转粒子数密度; $N_t = \gamma/\sigma l$, 在 $t > 0$ 时阈值平均反转粒子数密度; I 为腔内功率密度, $\tau_c = 2nl/\gamma c$ 是腔模寿命; l 为腔长; $\gamma = \gamma_r + \gamma_0$ 为循环一周的腔损耗常数; γ_r 为寄生损耗常数; $\gamma_0 = -\ln(1 - T_0)$ 为耦合输出损耗常数; T_0 为耦合腔镜的透过率。

由(1)式除(2)式, 并积分可得:

$$\Phi - \Phi_0 = \eta_{0+} - \eta - \ln(\eta_{0+}/\eta) \quad (3)$$

η_{0+} 是调 Q 开关打开之前的归一化反转粒子数密度。该参数主要由调 Q 开关深度和泵浦速率大小决定, 它可视为调 Q 有效调制深度的表征量。进一步可推得输出脉冲峰功率的解析式为:

$$P_{p0} = (\pi r_m^2 ch\nu N_t/2n)[\eta_{0+} - 1 - \ln(\eta_{0+})](\gamma_0/\gamma) \quad (4)$$

输出的脉冲能量为:

$$E_0 = \eta N_0 \pi r_m^2 l h\nu \gamma_0/\gamma \quad (5)$$

其中 η 为调 Q 脉冲的量子提取效率。由(4)式和(5)式可推得调 Q 脉冲的脉宽表达式:

$$t_w = S_p E_0/P_{p0} \quad (6)$$

进一步推得:

$$t_w = 2S_p \eta_{0+} \eta l_r / (\eta_{0+} - 1 - \ln \eta_{0+}) c \quad (7)$$

S_p 是激光脉冲的波形系数, 高斯脉冲取值为 0.94。^[4]

图 4, 5 是分别根据(6)式和(4)式计算的输出调 Q 脉冲宽度随 η_{0+} 变化和调 Q 脉冲峰值功率随 η_{0+} 的变化关系曲线。

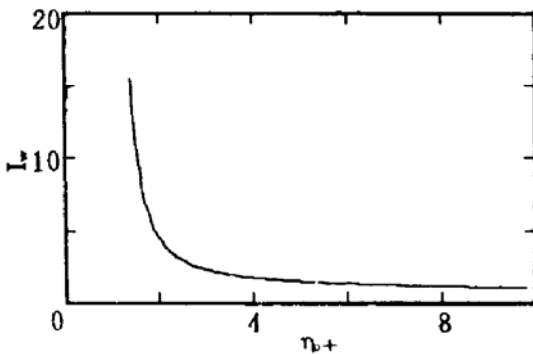


Fig. 4 Normalized pulse width T_w (FWHM) as a function of the initial normalized inversion population density η_{0+}

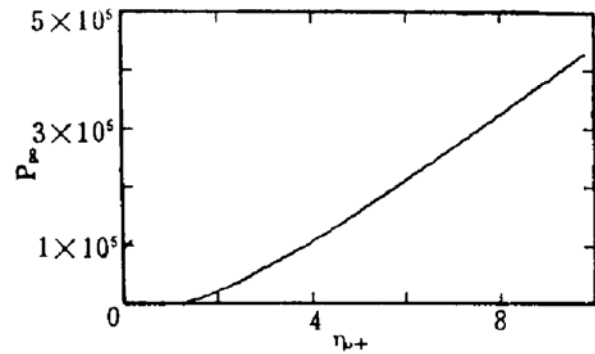


Fig. 5 Peak power P_{p0} as a function of the initial normalized inversion population density η_{0+}

由上述计算结果可知:在输出耦合系数一定条件下, 脉冲的输出能量随调制深度 η_{0+} 的增加而增加, 而调 Q 脉冲宽度则随调制深度的增加而减小。实验中阈值泵浦功率为 20 W ($I_{th} = 36$ A), 调 Q 开关关闭时的最大泵浦功率为 58 W ($I = 70$ A)。其相应调 Q 脉冲反转粒子数密度为初始量 η_{0+} 可取为 $\eta_{0+} \approx 3$, 则输出功率的计算值为 94 kW, 与 75 kW 的实验结果基本一致。根据图 5 的分析结果可知, 当 $\eta_{0+} > 4$ 时, 相应的峰值功率将达到 130 kW。因此只要减少腔内的损耗, 降低激光器的静态阈值, 提高调 Q 脉冲的初始归一化反转粒子数, 如静态阈值降至 15 W 时, $\eta_{0+} \approx 4$, 则可获得 130 kW 以上的峰值功率。事实上该器件的输出功率是非常有潜力的, 在实验中曾使器件在 50 Hz 的重复率下运转, 由于激光二极管列阵内部的

温升使发射波长与 YAG 的吸收峰更匹配, 在谐振腔调整到良好状态时, 自由振荡能量达到 5 mJ。

在研究过程中, 得到沈丽青, 范瑞瑛, 竺庆春等人的帮助, 谨表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] G. P. A. Malcolm, A. I. Ferguson, Diode-pumped solid-state laser. *Contemp. Phys.*, 1991, **32**(5): 305~319
- [2] G. Albrecht, R. Beach, B. Comaskey, Diode-pumped-slab-laser output exceeds one kilowatt. *Laser Focus World*, 1992, **28**(8): 9
- [3] J. J. Zayhowshi, P. L. Kelley, Optimization of Q-switched lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **27**(9): 2220~2225
- [4] O. Svelto, *Principles of Lasers*, 3rd ed., Division of Plenum Publishing Corporation, New York, 1989.

Acousto-Optic Q-Switched Nd : YAG Slab Laser Side-Pumped by a Quasi-CW 60 W LDA

Chen Youming Zhou Fuzheng Hu Wentao Zhu Shanyou
Chen Qiushui Fan Dianyuan

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

(Received 26 January 1994; revised 6 June 1994)

Abstract Output with peak power of 75 kW per pulse and fluctuation less than $\pm 1\%$ have been obtained from a Nd : YAG slab laser side-pumped by a quasi-CW 60 W laser diode array. The optical-optical efficiency of 15 % and slope efficiency of 29 % are measured.

Key words laser-diode-array, slab laser, Q-switched laser.