

文章编号: 0258-7025(2008)08-1173-04

高重复频率、窄脉宽全固态光纤放大器种子源

冯宇彤 孟俊清 毕进子 杜松涛 周军 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 高重复频率、窄脉宽的全固态激光器种子源级联光纤放大器是获得高功率脉冲激光输出的有效手段。短上能态寿命的 Nd:YVO₄ 晶体在连续抽运、高重复频率 Q 开关工作时容易得到接近连续性能的平均输出功率。理论分析了声光(AO)调 Q 器件中影响输出能量和脉宽大小的主要因素,优化配置了腔型参数。利用激光二极管(LD)光纤耦合模块端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体,实现了声-光调 Q 重复频率 100 kHz 以上,脉宽 20 ns 以下,波长 1064 nm 的激光输出。在抽运功率 5.7 W 时,得到了脉宽 15.3 ns,重复频率 150 kHz 的种子光输出,在级联单级光纤放大器后,得到了 20 W 的输出。

关键词 激光技术;声光调 Q;高重复频率;光纤放大;端面抽运

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083508.1173

High Repetition Rate, Short Pulse-Width All-Solid-State Laser Seed for Fiber Amplifier

Feng Yutong Meng Junqing Bi Jinzi Du Songtao Zhou Jun Chen Weibiao
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Cascaded fiber amplifier with high repetition rate, short pulse-width all-solid-state laser seed can achieve high output power. The average output power that is close to continuous wave (CW) performance is easily achieved for CW-pumped, high-repetitively Q-switched Nd:YVO₄ laser. The major factors influencing the pulse energy and pulse-width in acousto-optic (AO) Q-switched laser are analyzed, and the resonance parameters are optimized. The Nd:YVO₄ laser end-pumped by a fiber-coupled laser diode (LD) is reported, and A-O Q-switched 1064 nm laser with repetition rate larger than 100 kHz and pulse-width shorter than 20 ns is achieved. At the pump power of 5.7 W, laser seed with pulse width of 15.3 ns and pulse repetition rate of 150 kHz is acquired. The final output power of 20 W is achieved with the fiber amplifier.

Key words laser technique; acousto-optic Q-switch; high repetition rate; fiber amplifier; end pump

1 引言

重复频率在 100 kHz 以上的高光束质量、高功率的脉冲激光器在工业加工、精细雕刻、战场干扰、目标指示、激光测距等军民两用方面具有巨大潜力。考虑到激光器的应用环境,要求输出功率高的同时,做到体积小、寿命长、光束质量好、电光效率高。全固态激光器在高功率、高重复频率工作模式下,光束质量较差,而全光纤激光器需要多级放大才能达到所需输出功率,多级放大的结构使得器件整体体积

太大,不利于一些复杂环境下应用。综合考虑两种技术路线,采用全固态脉冲激光器的单模光纤耦合输出和单级光纤放大器的混合式主振功率放大(MOPA)方案,输出高功率、高重复频率和高光束质量的脉冲激光。声光(AO)调 Q 技术是得到大于 100 kHz 重复频率、主动调 Q 脉冲输出的有效手段^[1~4]。目前,声光调 Q 的固体激光器已有工作频率高达 500 kHz 的报道^[5,6],而且,声光调 Q 技术射频电路成熟,对波长和偏振态的要求低,调 Q 晶体抗

收稿日期:2007-12-03;收到修改稿日期:2007-12-17

作者简介:冯宇彤(1982—),男,陕西人,博士研究生,主要从事微型全固态激光器方面的研究。

E-mail: ytfeng@mail. siom. ac. cn

导师简介:陈卫标(1969—),男,上海人,研究员,博士生导师,目前主要从事激光遥感技术方面的研究。

E-mail: wbchen@mail. shenc. ac. cn

激光损伤阈值高。但是,声光调 Q 的激光器脉宽较宽,特别是在高重复频率下,通常都在几十纳秒左右,针对目标应用场合,要求脉宽在 20 ns 以下,与 Nd:YAG, Nd:YLF 等晶体相比, Nd:YVO₄ 晶体^[7,8]更短的上能级寿命(100 μs),更大的受激发射截面(15.6 × 10⁻¹⁹ cm²)更有利于在大于 100 kHz 的重复频率下得到较窄的脉冲^[9]。

本文重点介绍激光器的振荡器结构和光纤耦合输出,并研制出 150 kHz 重复频率下的种子源系统,耦合到光纤放大器中实现了 20 W 的平均功率输出。

2 理论分析

根据 Wagner 等对 Q 开关速率方程的推导结果, Q 开关单脉冲输出能量和脉冲宽度与反转粒子数密度的关系可以分别表示为^[10]

$$E = \frac{h\nu A}{2\delta\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right), \quad (1)$$

$$\Delta t_p = \tau_c \frac{n_i - n_f}{n_i - n_i[1 + \ln(n_i/n_f)]}, \quad (2)$$

式中 $h\nu$ 为光子能量, δ 为受激发射截面, γ 为简并因子(对于四能级系统取值为 1), A 为有效光束截面, R 为输出腔镜反射率, τ_c 为腔内往返时间常数, n_i 和 n_f 分别为 Q 开关过程中初始和最终的反转粒子数密度,并满足

$$n_i - n_f = n_i \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right), \quad (3)$$

n_f 为阈值反转粒子数密度,可表示为

$$n_f = \frac{1}{2\delta l} \left(\ln \frac{1}{R} + L \right), \quad (4)$$

式中 l 为激活材料长度, L 为往返损耗。

对于重复频率为 f 的连续抽运 Q 开关激光器,脉冲之间建立反转粒子数的最长时间为 $t = 1/f$ 。为了在每次 Q 开关周期后反转粒子数回到初始值,应有

$$n_i = n_\infty - (n_\infty - n_f) \exp[-1/(\tau_f f)], \quad (5)$$

式中 τ_f 为自发衰减时间, n_∞ 为反转粒子数的渐进值,其中

$$n_\infty = \omega_p \tau_f n_{\text{tot}}, \quad (6)$$

式中 ω_p 为抽运速率, n_{tot} 为总的粒子数密度。

可以看出,在 R 一定的条件下,要得到高能量和窄脉宽的脉冲输出,就要提高 n_i/n_f 和 n_i/n_f 的值,即增加储能和提高提取效率。对种子源来说,脉宽的参数是主要的,同时信号光的平均输出功率越大,越有利于有源光纤的放大,一方面选用在晶体内聚焦

光斑半径 100 μm 的抽运光提高抽运速率,使 Q 开关在打开前可以积累更多的初始反转粒子数;另一方面尽可能缩短腔长,仅为 55 mm,减小腔内往返时间常数,压缩脉宽,并在腔内元件表面镀 1064 nm 增透膜,减少腔内损耗,降低阈值。同时, Nd:YVO₄ 晶体的热导率仅为 0.06 W/(cm·K),端面抽运时晶体温度分布引起的热透镜效应对光束的影响必须考虑,其有效焦距取决于抽运光束半径的平方^[11],选取掺杂原子数分数为 0.5% 的晶体,减小热畸变对腔内模式的影响,并选取 5 倍的扩束镜和 $R = 5$ m 的大曲率半径输出镜,实现输出光束直径和信号光耦合进光纤时最优光束直径范围的匹配。

在抽运功率 5.7 W,输出镜透射率 $T = 13\%$,工作频率 150 kHz 的条件下,根据分析,计算得到信号光平均输出功率 $P_{\text{av}} = 2.45$ W,脉冲宽度 $\Delta t_p = 11.4$ ns 的理论预测值。

3 实验装置

实验装置如图 1 所示,其中激光二极管(LD)为最大输出功率 7.5 W 的光纤耦合输出激光器,热电冷却,光纤芯径 200 μm,数值孔径(NA) = 0.22;耦合透镜组耦合效率 $\eta = 90\%$,抽运光经过耦合后在晶体中聚焦光斑直径约为 200 μm;后腔镜为平面镜,沿通光方向一面镀膜为 $\text{AR} < 0.2\% @ 808$ nm,另一面镀膜为 $\text{HT} > 99\% @ 808$ nm, $\text{HR} > 99.7\% @ 1064$ nm; Nd:YVO₄ 晶体掺杂原子数分数为 0.5%,尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm,两个通光面都镀膜 $\text{HT} > 99.5\% @ 808$ nm 和 1064 nm,上下底面包铜箔置于传导冷却的黄铜热沉上;声光 Q 开关为 AA 公司生产,载波频率 40.68 MHz,最大射频功率 15 W,使用中实际设置为 13 W;输出镜为曲率 $R = 5$ m 的平凹镜,凹面镀膜 $T = 13\% @ 1064$ nm,平面 $\text{AR} < 0.2\% @ 1064$ nm。输出激光的 P_{av} 和 Δt_p 分别由 OPHIR 公司 NOVA II 功率计和 Tektronix 公司 TDS3052 示波器测量;光束质量 M^2 因子由 SPIRICON 公司 M^2 -200 光束分析仪测量。

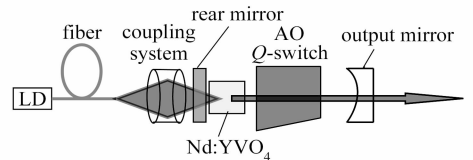


图 1 声光调 Q 装置图

Fig. 1 Schematic of AO Q-switched laser

为了更有效地把输出光束耦合到光纤中,选取

了 5 倍扩束镜压缩光束发散角。考虑到激光器的目标应用场合,在结构上舍弃了调整架装配方式而采用了机械固定的方式,从放大器整体结构的角度出发,把抽运光耦合系统、激光谐振腔和 5 倍扩束镜三者整体封装在一起,如图 2 所示。外观尺寸为 210 mm×54 mm×63 mm,其中谐振腔长度仅为 55 mm,这样设计的封装结构,增强了激光器的防尘、防水、力学性能,提高了激光器的稳定性。

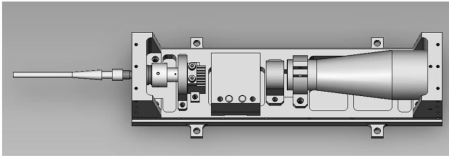


图 2 种子源结构图
Fig. 2 Structure of laser seed

4 实验结果及讨论

图 3 和图 4 分别为不同重复频率下,平均功率 P_{av} 和脉冲宽度 Δt_p 随抽运功率的变化曲线。由图 3 可以看出,在一定的抽运功率下,随着重复频率 f 的增大,平均功率也逐步增加但上升趋势趋于缓慢, f 超出

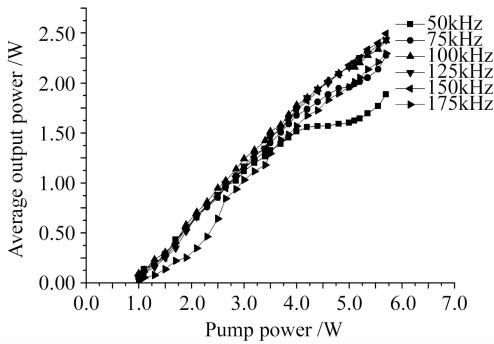


图 3 不同重复频率下平均功率与抽运功率的关系
Fig. 3 Average output power versus pump power under different pulse repetition rates

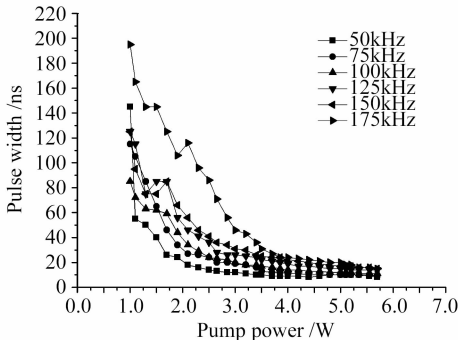


图 4 不同重复频率下脉宽与抽运功率的关系
Fig. 4 Pulse width versus pump power under different pulse repetition rates

一定范围后平均功率开始下降,在 f 为 100 ~ 150 kHz 时,输出功率曲线较平滑,线性度较好;在低抽运功率下,脉宽变化很大,数值很不稳定,图 4 中数值较大的点取值均为连续读 20 次的平均值。随着抽运功率的加大,脉宽趋于稳定,随着 f 的增加,达到稳定脉宽所需的抽运功率也越大。这是因为脉冲之间建立反转粒子数的时间随着 f 的增加而减少,为了达到所需的 n_i ,就必须相应地增大抽运功率,提高抽运速率。

图 5 是抽运功率为 5.7 W 时,重复频率 150 kHz 的脉冲图,测得的脉宽为 15.3 ns。如果继续增大抽运功率,脉宽会进一步变小,但考虑到器件长时间工作的稳定性和可靠性,抽运源宜工作在满负荷的 70%~80%,即应在 6 W 以下。图 6 是测量的 M^2 因子,结果为 $M_x^2 = 1.29, M_y^2 = 1.23$,发散角在 x 方向为 3.73 mrad, y 方向为 3.68 mrad。可以看出光斑的对称性比较好,这主要得益于抽运源的输出光纤芯径小,经过成像倍率为 1 的耦合系统时引入的像差小。

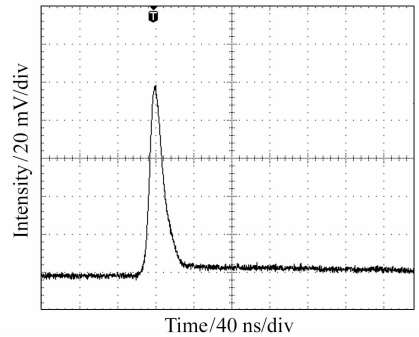


图 5 150 kHz 时的脉冲图

Fig. 5 Pulse shape at the repetition rate of 150 kHz

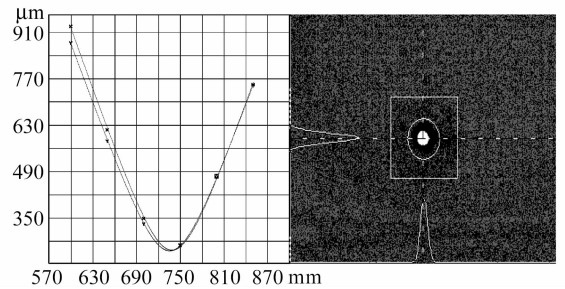


图 6 150 kHz 时的 M^2 因子

Fig. 6 Beam quality M^2 of laser at 150 kHz

从图 3 和图 5 可以看出,抽运功率 5.7 W,工作频率 150 kHz 时,信号光平均输出功率 $P_{av} = 2.49$ W,脉冲宽度 $\Delta t_p = 15.3$ ns,与第二节的理论分析值相比,平均输出功率吻合度较高,脉冲宽度有些差别。这主要有两个原因:第一,实验中声光调 Q

晶体随着腔内功率密度的增大有一些热变形,相当于增大了谐振腔光学长度,也就增加了腔内往返时间常数;第二,理论分析中谐振腔光学长度是按照最佳装配状况考虑的,即光轴垂直通过每个通光面,而实际装调中总会引入一定的误差,也相当于增大了谐振腔的光学长度。

采用 5 倍扩束镜对输出光束发散角进行压缩,利用耦合透镜组把输出激光耦合到光纤中进行放大,耦合效率为 65%,放大器采用 $(1+2)\times 1$ 的耦合器,有源光纤为掺 Yb^{3+} 的 D 型双包层石英光纤(芯径为 $20\ \mu\text{m}$, NA 为 0.06;内包层为 $400\ \mu\text{m}$, NA 为 0.46;吸收系数为 $1.7\ \text{dB/m}@975\ \text{nm}$),MOPA 的抽运源采用两个输出波长为 $975\ \text{nm}$,单个最大输出功率为 $25\ \text{W}$ 的半导体光纤耦合模块(在熔接尾纤前,分别标定了电流-输出功率曲线),在重复频率为 $150\ \text{kHz}$ 时,得到了 $20\ \text{W}$ 的激光输出,放大过程中斜率效率为 66%,结果如图 7 所示。实验中观测到放大后光脉冲宽度仅比种子光脉宽略窄一些,差别不到 $0.3\ \text{ns}$,这是由于放大过程中能量提取效率不同使得种子光脉冲下降沿被压缩导致的。目前实验中采用的还是芯径 $20\ \mu\text{m}$ 的多模光纤,使得放大后的光束质量变差。采用单模放大光纤可以改善输出光束质量,这部分工作已在进行中。

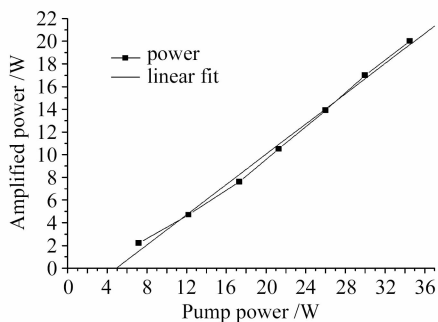


图 7 150 kHz 时光纤放大功率与抽运功率的关系

Fig. 7 Amplified power versus pump power at 150 kHz

5 结 论

理论上分析了影响脉宽的主要因素,优化控制了谐振腔结构参数,在重复频率为 $150\ \text{kHz}$,抽运功

率为 $5.7\ \text{W}$ 时,得到了脉宽为 $15\ \text{ns}$ 的种子光输出,并通过单级光纤放大,得到 $20\ \text{W}$ 的激光输出。若能进一步优化参量,级联光纤放大的声光调 Q 的 Nd:YVO₄ 固体激光器在获得窄脉宽、高重复频率、高功率激光输出方面还有较大潜力。通过合理的结构设计,初步实现了高可靠性的小型化全固体种子源。

参 考 文 献

- 1 Takashige Omastu, Masahito Okida, Ara Minassian *et al.*. High repetition rate Q-switching performance in transversely diode-pumped Nd doped mixed gadolinium yttrium vanadate bounce laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7):2727~2734
- 2 Yang Chengwei, Huo Yujing, He Shufang *et al.*. LD pumped high-efficiency high-repetition-rate Nd:YAG ceramic laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5):593~596
杨成伟,霍玉晶,何淑芳等. 激光二极管抽运的高效高重复频率 Nd:YAG 陶瓷激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5):593~596
- 3 Feng Lichun, Huo Yujing, He Shufang *et al.*. LD-pumped acousto-optically Q-switched 532 nm laser with high repetition rate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):461~465
冯立春,霍玉晶,何淑芳等. 激光二极管抽运声光调 Q 高重复频率 532 nm 激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):461~465
- 4 Pan Zhiwen, Huo Yujing, Liang Zhe *et al.*. Double-control acousto-optic Q-switched all-solid-state infrared laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):882~888
潘志文,霍玉晶,梁喆等. 双控声光调 Q 全固态红外激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7):882~888
- 5 J. H. García-López, V. Aboites, A. V. Kiryanov *et al.*. High repetition rate Q-switching of high power Nd:YVO₄ slab laser [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **218**:155~160
- 6 F. He, L. Huang, M. Gong *et al.*. Stable acousto-optics Q-switched Nd:YVO₄ laser at 500 kHz [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(7):511~514
- 7 Tao Li, Zhuang Zhuo, Xiaomin Li *et al.*. Study on optical characteristics of Nd:YVO₄/YVO₄ composite crystal laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3):175~177
- 8 Zhang Hongrui, Gao Mingyi, Zheng Yi *et al.*. High power diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):19~21
张红瑞,高明义,郑义等. 大功率激光二极管端面抽运的 Nd:YVO₄ 激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1):19~21
- 9 Zhengping Wang, Lianke Sun, Shaojun Zhang *et al.*. Investigation of LD end-pumped Nd:YVO₄ crystals with various doping levels and lengths [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2001, **33**:47~51
- 10 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. World Books Press, 2005. 469~479
- 11 M. E. Innocenzi, H. T. Yura, C. L. Fincher *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(19):1831~1833