

高稳定性半导体激光侧面抽运 Nd:YAG 300 Hz 再生放大器

张若凡^{1,2} 韦辉¹ 王江峰¹ 范薇¹ 李学春¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了一种测量激光晶体热焦距的装置和方法,并以此设计和实现了一台采用平-平腔结构激光二极管阵列侧面抽运 Nd:YAG 再生放大器。通过注入脉冲宽度为 2 ns、中心波长为 1064 nm、重复频率为 300 Hz 的 300 pJ 小信号种子光,实现了脉冲宽度为 2 ns,单脉冲能量 1.5 mJ 的基横模激光输出。总放大倍数为 5×10^6 , 输出能量稳定性为 1.08% [方均根值(RMS)], 方波扭曲度为 1.10。

关键词 激光器; Nd:YAG 晶体; 激光二极管抽运; 再生放大器; 热透镜焦距

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1002014

High Stability Laser Diode Side-Pumped Nd:YAG 300 Hz Regenerative Amplifier

Zhang Ruofan^{1,2} Wei Hui¹ Wang Jiangfeng¹ Fan Wei¹ Li Xuechun¹

(¹ Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A new method is proposed to measure the thermal focal length of laser crystal. Based on the experimental results, a laser diode (LD) side-pumped, flat-flat cavity regenerative amplifier is developed. By injecting a small signal seed light with wavelength of 1064 nm, pulse width of 2 ns, repetition rate of 300 Hz and pulse energy of 300 pJ, the output TEM₀₀ laser with maximum pulse energy of 1.5 mJ, pulse width of 2 ns is obtained. The corresponding amplification ratio is 5×10^6 , and the output energy stability is 1.08% [root-mean-square (RMS)] with the square-pulse distortion of 1.10.

Key words lasers; Nd:YAG crystal; laser diode pumped; regenerative amplifier; thermal focal length

OCIS codes 140.3280; 140.3480; 140.3580

1 引言

近年来,具有更高峰值功率的短脉冲激光在非线性和非线性光学、激光光谱学、生物医学、精密打孔、特种材料微加工、卫星激光测距^[1]等领域都得到了大量的应用。为获得微焦以上量级的短脉冲,通常采用多程放大^[2]以及再生放大^[3]两种方式。通常来说,多程放大需要复杂的结构与高的抽运功率,相比之下

再生放大的方式结构相对简单,所需要的抽运功率较低,可以将皮焦耳级的种子激光放大 $10^5 \sim 10^6$ 倍,并具有很好的光束质量和能量稳定性。再生放大器作为一种具有极高增益的前置放大器,在获取窄脉宽、高功率激光过程中具有重要作用。

Nd:YAG 晶体作为目前综合性能最为优异的激光晶体,其抽运阈值低、抽运效率高、光束质量好、热传导

收稿日期: 2013-04-19; **收到修改稿日期**: 2013-06-13

作者简介: 张若凡(1989—),男,硕士研究生,主要从事焦耳级固体激光器及再生放大器等方面的研究。

E-mail: alex_zhang0315@hotmail.com

导师简介: 李学春(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光技术与光纤应用等方面的研究。

E-mail: lixuechun@siom.ac.cn(通信联系人)

性好、机械性能稳定、造价相对低。并且由 Nd:YAG 晶体产生的重复频率激光及其倍频光,在光学元件损伤修复、损伤点预筛查等领域也有广泛的应用^[4]。

目前所报道的重复频率再生放大器主要集中在千赫兹量级,输出脉冲宽度为皮秒量级,输出光能量也多为微焦量级^[5-6],鲜有中低重复频率(1~500 Hz)激光运行的报道。然而相比于千赫兹量级重复频率再生放大器,百赫兹量级重复频率再生放大器可以获得更大的单脉冲能量;同时相对于低重复频率(1~10 Hz)再生放大器,有着更好的稳定性^[7-8]。

本文介绍了选用 Nd:YAG 晶体作为增益介质的再生放大器,通过激光二极管(LD)侧面抽运方式与平-平腔结构,实现了一台工作在 1064 nm 波段,重复频率为 300 Hz 的纳秒级激光脉冲再生放大器。注入脉宽为 2 ns、重复频率为 300 Hz、能量为 300 pJ 的种子光脉冲,经过再生放大后获得脉宽为 2 ns、能量大于 1.5 mJ 的输出脉冲,总放大倍数为 5×10^6 ,1.5 h 内的输出能量稳定性为 1.08% [方均根值(RMS)],方波扭曲度为 1.10。

2 Nd:YAG 热焦距测量

再生放大器选用海特光电 DPL-1064-S3-0075-0414-45 激光二极管抽运模块,其增益介质为 Nd:YAG 晶体,晶体尺寸为 $\Phi 3 \text{ mm} \times 78 \text{ mm}$,LD 阵列均匀地从三个方向对晶体进行抽运,激光头模块工作电流为 20 A 时,LD 输入电功率为 600 W,输出光功率为 300 W 左右。抽运光中心波长为 808 nm,抽运时间为 300 μs ,晶体表面采用循环去离子水冷却,控制晶体的工作温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,其结

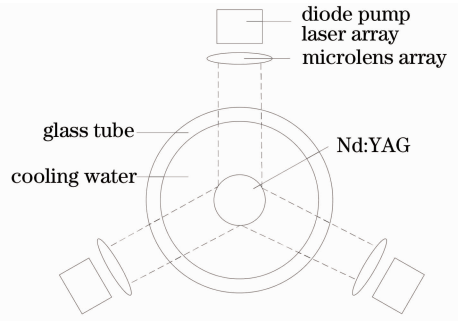


图 1 LD 抽运模块结构图

Fig. 1 Geometry of the LD pumped module

构如图 1 所示。

在晶体吸收抽运光能量的同时,部分抽运光能量转变为晶体的热能,引起晶体的热透镜效应。此热效应会使光束波面和偏振态发生畸变,降低光束质量,因此在谐振腔设计中应充分考虑此影响并设法消除。

晶体的等效热透镜焦距是诸多因子共同作用的结果^[9],可写为

$$f = \frac{KA}{P_d} \left[\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + n_0^3 \alpha C_{r,\phi} + \frac{\alpha r_0 (n_0 - 1)}{L} \right]^{-1}, \quad (1)$$

式中 K 表示导热率, A 是激光棒的截面面积, P_d 是激光棒吸收的总热量, dn/dT 表示折射率的温度梯度, α 为热膨胀系数, C_r 和 C_ϕ 分别对应径向和切向情况的常数,是材料光弹系数的函数, r_0 表示激光棒的半径, n_0 表示激光棒中心的折射率^[10]。由于变量较多,通过模拟计算得出等效热透镜焦距的值是比较困难的,因此为直接测量 Nd:YAG 晶体热焦距,提出如下方案,实验装置如图 2 所示,其中 D_s 表示探测光源输出光束的直径。

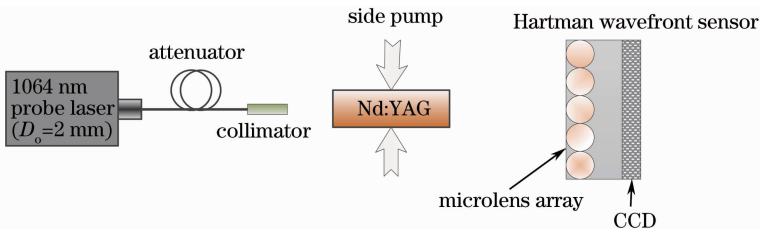


图 2 Nd:YAG 晶体热焦距测量装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of thermal focal length of Nd:YAG crystal measurement setup

系统采用自行搭建的哈特曼传感器,该传感器适用于 800~1100 nm 的探测光源,哈特曼传感器的测量精度为 0.1 λ ,它的高测量精度保证了热透镜焦距的测量精度。

由连续光纤激光器发出的探测光束经过衰减准直之后,其光斑大小在 3 m 范围内保持稳定不变,

此时探测光可视作一束平行光。光束穿过 Nd:YAG 晶体后,用距离晶体中心位置为 L 的哈特曼传感器来测量其波前信息。在无抽运光条件下,哈特曼传感器测得探测光曲率半径为 R ,光斑半径为 w 。将此条件下的 R 和 w 作为基准参数。由激光传输理论,此时哈特曼传感器探测平面处高斯光的 q

参数可写为 $\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - \frac{i\lambda}{\pi\omega^2}$, 则探测光在晶体中心位置处的 q 参数可写为 $q' = q - L$ 。在有抽运光条件下, 测得探测光曲率半径变为 R' , 光斑半径为 ω' 。工作在抽运状态时, 由于热效应, 晶体可被视为一个薄透镜, 热焦距为 f_T , 晶体传输矩阵为 $\mathbf{M}_T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_T} & 1 \end{bmatrix}$ 。在哈特曼传感器的探测平面

处高斯光 q 参数写为 $\frac{1}{q_1} = \frac{1}{R_1} - \frac{i\lambda}{\pi\omega_1^2}$, 此时晶体中心位置处 q 参数为 $q'_1 = q_1 - L$ 。

由高斯光 q 参数变化关系, q' 经过激光晶体焦距为 f_T 的等效薄透镜后变换为 q'_1 , 满足关系式 $q'_1 = \frac{Aq' + B}{Cq' + D} = \frac{q'}{-(q'/f_T) + 1}$, 化简等式并比较两端的实部, 得到热透镜焦距 f_T 的表达式为

$$f_T = \frac{\{(1/R_1)/[(1/R_1)^2 + (\lambda/\pi\omega_1^2)^2] - L\} \{(1/R)/[(1/R)^2 + (\lambda/\pi\omega^2)^2] - L\}}{(1/R_1)/[(1/R_1)^2 + (\lambda/\pi\omega_1^2)^2] - (1/R)/[(1/R)^2 + (\lambda/\pi\omega^2)^2] - 2L} - \frac{\lambda^2/\pi^2\omega^2 [(1/R_1)^2 + (\lambda/\pi\omega_1^2)^2] [(1/R)^2 + (\lambda/\pi\omega^2)^2]}{(1/R_1)/[(1/R_1)^2 + (\lambda/\pi\omega_1^2)^2] - (1/R)/[(1/R)^2 + (\lambda/\pi\omega^2)^2] - 2L}, \quad (2)$$

可见, f_T 只与两次探测的 q 值有关, 由(2)式可以分别得出晶体工作在不同电压和频率时对应的晶体热焦距值, 如表 1 所示。

表 1 不同抽运电流和频率下的晶体热焦距

Table 1 Focal length of crystal with different pump currents and frequencies

| Frequency | Current /A | Thermal focal length /m |
|-------------------------|------------|-------------------------|
| Reference point | 0 | infinite |
| Continuous wave pumping | 9 | 0.75 |
| | 15 | 0.31 |
| 100 Hz | 9 | 9.5 |
| | 12 | 7.3 |
| 200 Hz | 15 | 4.4 |
| | 9 | 4.82 |
| | 12 | 3.4 |
| 300 Hz | 15 | 2.48 |
| | 9 | 3.4 |
| | 12 | 2.7 |
| | 15 | 2.08 |

可以看出, 相同电流条件下频率的增大, 或相同频率下电流的增大均会导致更加严重的累积热效应, 从而产生更小的热透镜焦距。在设计上应留有余量, 因此选取晶体热焦距为 2.5 m 进行再生放大器谐振腔设计。

3 再生放大器的腔结构

考虑到脉冲宽度为 2 ns, 电光开关上升沿和下降沿时间小于 9 ns, 因此谐振腔单次循环时间应大于 11 ns。设计腔长为 2 m, 对应往返一次的传输时

间约为 13 ns。在谐振腔设计中, 激光晶体直径为 3 mm, 激光抽运模块结构的光束入射孔径为 2 mm, 因此在晶体端面处的光斑直径应限制在 2 mm 之内。各个光学元件处的光束能量密度应低于对应位置处的损伤阈值以保护元件。输入种子光在注入端镜处的光斑半径约为 0.7 mm。腔镜稳定性设计应使谐振腔对热透镜焦距变化以及腔镜微小失调量不敏感, 并应考虑模式匹配的问题。

综合以上条件, 分析了两种设计方案, 结构示意图分别如图 3(a)、(b)所示, 其中 f_i 为 Nd:YAG 晶体的等效热透镜, 在频率为 300 Hz, 电流为 20 A 的稳定工作条件下, 由上一节热焦距测量结果取 $f_i = 2.5$ m。方案一采用平-平腔结构, 并在腔内中央位置处放置焦距为 3.5 m 的模式匹配透镜; 方案二采用凹-凹腔结构, 两端镜曲率半径均为 2.2 m。两种方案的腔内光斑半径变化如图 4(a)、(b)所示。可见, 凹-凹腔结构虽然可以补偿热透镜效应, 但是腔内光斑尺寸变化不均匀, 光斑尺寸最小处功率密度过大, 有可能引起元件损伤; 平-平腔结构中光斑尺寸变化较为平滑, 端镜处光斑半径约为 0.7 mm, 有利于腔模与种子光模式匹配。综上谐振腔结构选用方案一, 并在腔内加入 $\Phi 2$ mm 的限模小孔, 将振荡模式限制在高斯基横模 TEM_{00} 上。

需要指出的是, 以上谐振腔设计对应于最大工作电流 20 A。考虑到减小工作电流的情况, 此时热的累积变小, 热焦距变长。分别取 f_i 等于 2.5、4、5、8 m 时, 对应腔内光斑分布如图 5 所示, 可见对于减小工作电流的情况, 谐振腔仍然稳定。

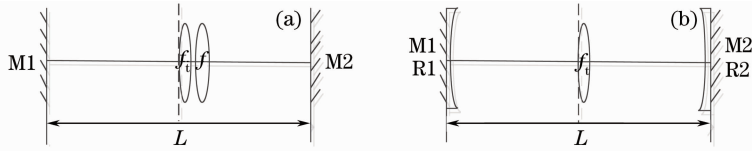


图 3 (a) 平-平腔结构; (b) 凹-凹腔结构

Fig. 3 (a) Flat-flat cavity structure; (b) concave-concave cavity structure

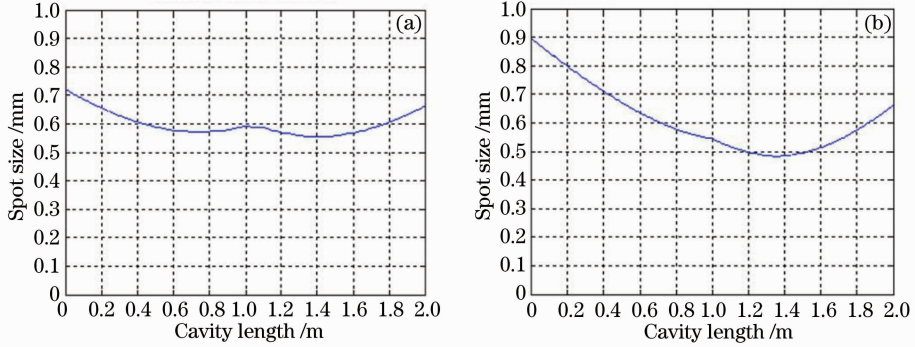


图 4 腔内光斑半径分布。(a) 平-平腔; (b) 凹-凹腔

Fig. 4 Spot size distribution. (a) Flat-flat cavity; (b) concave-concave cavity

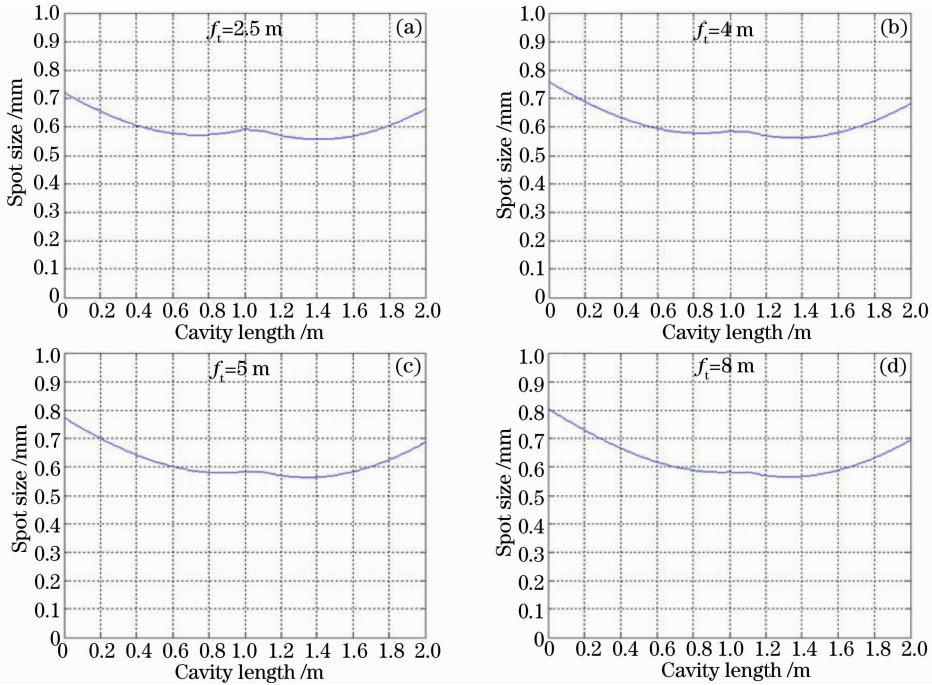


图 5 不同热透镜焦距条件下腔内光斑分布

Fig. 5 Spot size in the cavity for different thermal focal lengths

由以上分析,搭建再生放大器,其结构如图 6 所示。选取线性折叠腔,使再生放大器结构紧凑,M1、M2 均为平面反射镜;重复频率为 300 Hz 的百皮焦量级小信号种子激光脉冲经过光纤注入再生放大器;调节偏振控制器使输入光 p 偏振分量最大;第一组半波片(HWP)和法拉第旋光器(FR)光轴调至合适的角度,使输入光 p 分量透过,第二组 HWP 和 FR 光轴调至合适角度,使 p 光通过后旋为 s 光,再

由薄膜偏振片(TFP3)导入腔内;种子脉冲进入谐振腔后,通过同步机控制,在脉冲第二次通过电光开关(PC)之后开启 PL,使 PC 抵消 $\lambda/4$ 波片(QWP)的改变偏振态的作用,此时脉冲光以 p 偏振在腔内振荡,通过调节 PC 的高压开启门宽,控制脉冲光在腔内的往返程数,得到最高的能量放大后,再次改变脉冲偏振态,通过 TFP3 反射导出腔外。

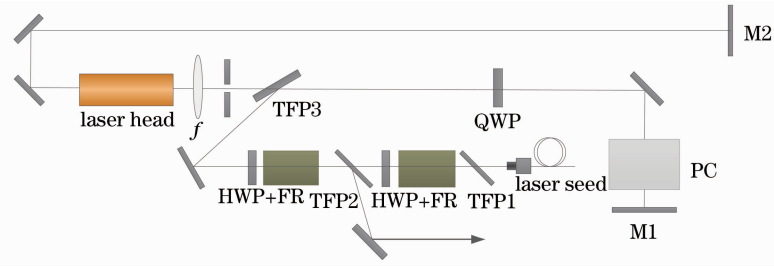


图 6 Nd:YAG 再生放大器结构示意图

Fig. 6 Schematic of Nd:YAG regenerative amplifier

4 实验结果

4.1 单程净增益

首先对再生放大器激光抽运模块的单程净增益 G_{net} 进行测试,注入小信号种子光到腔内,并在抽运模块后方放置反射镜将光束导出,如图 7 所示。

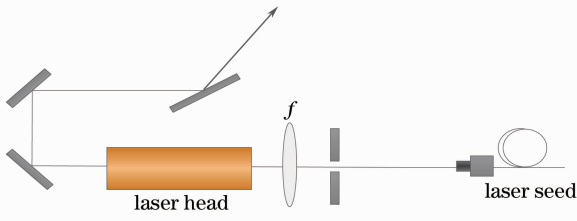


图 7 单程净增益测试

Fig. 7 Measurement of net gain in single pass

改变抽运电流,用示波器观察不同电流条件下,种子脉冲单次通过晶体后的示波器示数变化,得到对应的单程净增益,如图 8 所示。可见,当抽运电流增大时,单程净增益也逐渐增大,实验中再生放大器最大工作抽运电流为 20 A,此时单程净增益约为 1.42,限制此单程净增益的主要原因是晶体棒的尺寸和储能密度。

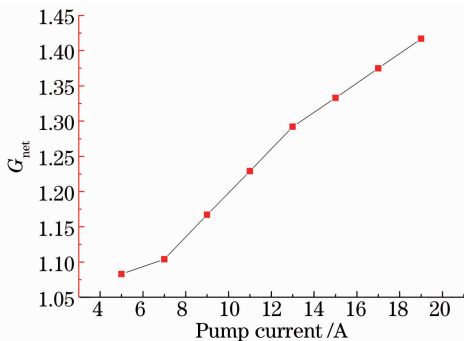


图 8 单程净增益随抽运电流的变化

Fig. 8 Net gain in single pass versus pump current

4.2 多程脉冲放大理论分析

Nd:YAG 增益介质的脉冲宽度 ($10^{-9} \sim 10^{-7}$ s)

远小于其上能级寿命 ($230 \mu\text{s}$),同时大于上能级横向弛豫时间 ($10^{-11} \sim 10^{-12}$ s) 和下能级弛豫时间 ($10^{-12} \sim 10^{-13}$ s)。在脉冲多程放大过程中,满足能级弛豫时间远小于脉冲宽度的条件,因此可以通过速率方程得到迭代关系^[11]

$$E_k = TE_s \ln\{G_{k-1} [\exp(E_{k-1}/E_s) - 1] + 1\}, \quad (3)$$

式中

$$G_{k-1} = \exp\left(\sigma \int_0^L N_{k-1} dx\right), \quad (4)$$

(3)、(4)式中, T 为腔内单程透射率,描述再生放大器谐振腔单程损耗, E_k 为脉冲在腔内放大 k 程的能量密度, $E_s = h\nu/\sigma$ 为饱和能量密度, h 为普朗克常数, ν 为频率, N_k 为第 k 程前介质内粒子反转数密度, σ 为受激发射截面。引入增益参量 $g_k = \ln G_k$, G_k 代表第 k 程前介质的单程增益,则有

$$g_k = \sigma \left(\int_0^L N_{k-1} dx - \frac{\Delta E_k}{h\nu} \right), \quad (5)$$

式中 $\Delta E_k = \frac{E_k}{T} - E_{k-1}$, ΔE_k 为第 k 程时的激光脉冲通过介质所增加的能量。化简得到 $g_k = g_{k-1} - \frac{\Delta E_k}{E_s}$ 。

临界条件为 $g_0 = \sigma \int_0^L N_0(x) dx$, 其中 $N_0(x)$ 为初始上能级粒子数分布^[12]。图 8 是以单程净增益等于 1.42 (对应抽运电流为 20 A) 为初始条件,模拟计算得到的放大脉冲能量与放大程数的关系。通过计算可以看出,开始阶段输出脉冲能量很小,随放大程数的增加而呈指数关系增大;随着脉冲能量的增大,出现增益饱和现象, Nd:YAG 晶体的单程增益逐渐降低;当单程增益降低到与单程损耗相等,即腔内循环圈数为 90 圈左右时,可以得到最大为 1.2 mJ 的能量输出。

实验中注入重复频率为 300 Hz、脉宽为 2 ns 的

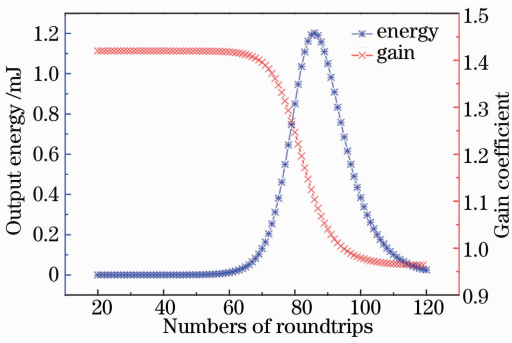


图 9 输出脉冲能量及增益系数与放大程数的关系
Fig. 9 Output energy and gain coefficient versus number of round trips

百皮焦量级的脉冲种子信号光进行放大,图 10(a)显示了整个脉冲放大过程。可见,整个放大持续时间约为 $1.2 \mu\text{s}$,放大圈数 100 圈左右。由图 10(b)可知,在放大前期,单程增益稳定,约为 $G^2 = 1.24$,即 $G = 1.11$ 。由此推定腔损耗为 $G/G_{\text{NET}} = 0.78$ 。在靠近输出的几圈,增益下降较为明显,至最终输出时刻,单程增益等于损耗。再生放大器腔损耗比较大,导致总体的光-光转换效率并不高(约 6%)。在今后工作中,应设法加以改进,相关工作正在开展当中。用能量计测得最大输出单脉冲能量为 1.5 mJ。此放大过程的参数与理论计算值比较接近。

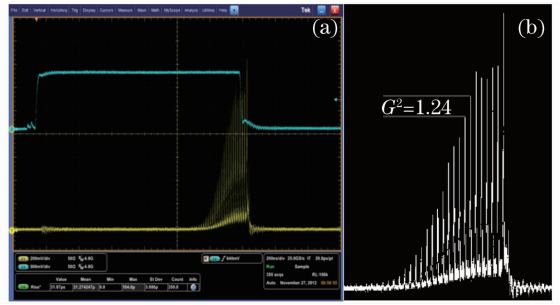


图 10 (a) 脉冲放大过程; (b) 单程增益
Fig. 10 (a) Amplification of input pulse; (b) one-pass gain coefficient

图 11(a)、(b)分别是示波器观察到的注入信号脉冲和再生放大后的脉冲波形,前后脉冲的宽度均为 2 ns。定义脉冲前沿与后延之比为方波扭曲 (SPD),由图 11(a)测得种子脉冲的 SPD 为 1.06,图 11(b)测得输出脉冲的 SPD 为 1.10。

再生放大器的波形畸变主要由峰值输出附近的几程放大产生。小信号输入时,SPD 相对于输入激光脉冲的大小不敏感。脉宽 t_p 对再生放大器峰值输出时的 SPD 的影响也非常小。初始单程小信号增益 G_0 是决定 SPD 的主要因素, G_0 越大,再生放大器峰值输出时的 SPD 越大^[12]。在输出端镜后方约 50 cm 处,用 CCD 测量得到其光强分布如图 12(a)所示,对应光强一维分布如图 12(b)所示。

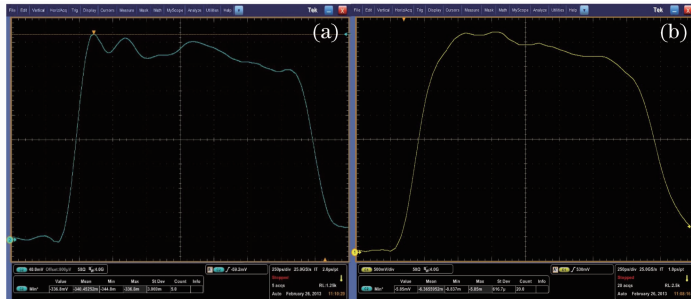


图 11 (a) 注入种子光波形; (b) 输出脉冲波形
Fig. 11 (a) Waveform of input pulse; (b) waveform of output pulse

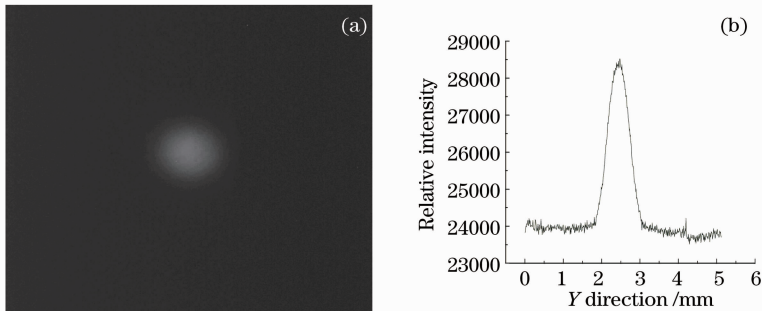


图 12 (a) 近场光强分布; (b) 输出脉冲能量的一维分布
Fig. 12 (a) Near field intensity distribution; (b) intensity distribution in one-dimension

用能量计测试再生放大器输出稳定性,工作频率在 300 Hz 时,测得在 1.5 h 内的输出能量稳定性为 1.08%(RMS),如图 13 所示。如果在种子光源部分加入主动偏振控制系统,并保证再生放大器工作环境的清洁度和温度稳定,会得到更好的稳定性。

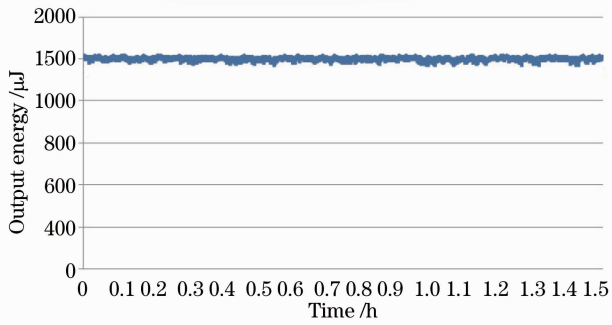


图 13 再生放大器输出稳定性

Fig. 13 Output stability of regeneration amplifier

5 结 论

提出一种热焦距测量装置和方法,并以此测量结果为依据,设计并搭建了一台 Nd:YAG 再生放大器。实验中,将 Nd:YAG 晶体温度控制在 20 °C,采用侧面抽运方式对其进行抽运,抽运光中心波长为 808 nm,抽运时间为 300 μs。将 300 Hz、百皮焦量级的小信号脉冲注入再生放大器,当 LD 输出光功率为 300 W 时,再生放大器以基横模运转,输出能量为 1.5 mJ,总放大倍数为 5×10^6 ,1.5 h 内的输出能量稳定性为 1.08%(RMS),方波扭曲度为 1.10。

参 考 文 献

- 1 Cai Zhiqiang, Wang Peng, Wen Wuqi, *et al.*. LD end-pumped all-solid-state picosecond passively mode-locking lasers [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34 (7): 901–907.
蔡志强,王 鹏,温午麒,等. 端面抽运全固态皮秒被动锁模激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(7): 901–907.
- 2 P Heinz, A Seilmer, A Piskarskas. Picosecond Nd:YLF laser-multipass amplifier source pumped by pulsed diodes for the operation of powerful OPOs[J]. Opt Commun, 1997, 136(5): 433–436.

- 3 M Siebold, Mhornung, J Hein, *et al.*. A high-average-power diode-pumped Nd:YVO₄ regenerative laser amplifier for picosecond-pulses[J]. Appl Phys B, 2004, 78(3-4): 287–290.
- 4 Chen Meng, Yuan Xiaodong, Lü Haibing, *et al.*. Laser conditioning technology of optics[J]. Optical Technique, 2010, 36(1): 79–83.
陈 猛,袁晓东,吕海兵,等. 光学元件激光预处理技术[J]. 光学技术, 2010, 36(1): 79–83.
- 5 Chang Liang, Chen Meng, Li Gang, *et al.*. Thermal characteristic analysis of laser diode side-pumped regenerative amplifier for kHz picosecond laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37 (3): 873–876.
常 亮,陈 檬,李 港,等. 激光二极管侧面抽运千赫兹皮秒激光再生放大器的热特性[J]. 中国激光, 2010, 37 (3): 873–876.
- 6 Zou Yue, Mao Xiaojie, Bi Guojiang, *et al.*. LD side-pumped 10 kHz pico-second regenerative amplifier[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(9): 983–985.
邹 跃,毛小洁,秘国江,等. 二极管侧面泵浦 10 kHz 皮秒激光再生放大器[J]. 激光与红外, 2012, 42 (9): 983–985.
- 7 Li Xiang, Wang Jiangfeng, Li Xuechun, *et al.*. Laser diode pumped cryogenic cooled Yb:YAG regenerative amplifier[J]. Chinese J Laser, 2011, 38(11): 1102010.
李 响,王江峰,李学春,等. 激光二极管抽运低温 Yb:YAG 再生放大器[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102010.
- 8 Wang Xiaofa, Fan Zhongwei, Yu Jin, *et al.*. High energy and high efficiency Nd:Glass regenerative amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0802001.
王小发,樊仲维,余 锦,等. 高能量高效率钕玻璃再生放大器[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0802001.
- 9 Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu, *et al.*. Study on thermal lens of Nd³⁺:YAG laser pumped by a laser diode[J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(9): 777–781.
张行愚,赵圣之,王青圃,等. 激光二极管抽运的激光器热透镜效应的研究[J]. 中国激光, 2000, 27(9): 777–781.
- 10 W Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Transl. Beijing: Science Press, 2002. 415–417.
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. 415–417.
- 11 W H Lowdermilk, J E Murray. The multipass amplifier; theory and numerical analysis [J]. J Appl Phys, 1980, 51 (5): 2436–2444.
- 12 Wang Jiangfeng. Research on Highly Stable Nd:Glass Regenerative Amplifier [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. 19–22.
王江峰. 高稳定钕玻璃再生放大技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2008. 19–22.

栏目编辑:张 腾