

# 高增益亚纳秒脉宽激光 Nd:YAG 双通放大器

王金国 孙哲\* 姜梦华 惠勇凌 雷旬 李强

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 对亚纳秒脉宽激光脉冲进行了双通放大的实验研究。双通放大器增益介质掺杂原子数分数为 1.0%,  $\phi 3\text{ mm} \times 120\text{ mm}$  的 Nd:YAG 棒。为了消除自激振荡和放大自发辐射(ASE)效应, Nd:YAG 棒两端面采用  $1.5^\circ$  倾角设计。为了获得较高的能量提取效率, 通过选择合适的扩束镜倍率, 保证主振荡器输出的种子激光光斑面积大约为晶体棒端面面积的 80%。主振荡器输出的单脉冲能量为 0.16 mJ, 重复频率为 5 Hz, 脉冲宽度为 0.964 ns,  $M^2$  为 1.5 的种子激光, 经过 Nd:YAG 双通放大后, 得到了单脉冲能量 88 mJ, 脉宽 0.975 ns,  $M^2$  为 1.7, 不稳定度小于  $\pm 3\%$ , 550 倍的稳定高增益亚纳秒激光双通放大输出。

**关键词** 激光器; 高增益; 亚纳秒; 双通放大

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s102005

## High-Gain Sub-Nanosecond Nd:YAG Rod Double Pass Amplifier

Wang Jinguo Sun Zhe Jiang Menghua Hui Yongling Lei Hong Li Qiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** The experiment of sub-nanosecond pulse width Nd:YAG double-pass amplification is studied. Double pass amplifier gain medium is Nd:YAG rod with  $\phi 3\text{ mm} \times 120\text{ mm}$  size and doping atomic fraction of 1.0%. The two end surfaces of Nd:YAG rod with an angle of  $1.5^\circ$  is designed to avoid self-oscillation and amplified spontaneous emission (ASE) effect. The beam expanding lens magnification is optimized appropriately, the seed laser spot area is selected about 80% of Nd:YAG rod surface area to obtain a higher efficiency. The master oscillator output laser with single pulse energy of 0.16 mJ, repetition frequency of 5 Hz,  $M^2$  of 1.5, and pulse width of 0.964 ns is obtained. The Nd:YAG double-pass amplifier output laser with single pulse energy of 88 mJ,  $M^2$  of 1.7, stability of  $\pm 3\%$ , pulse width of 0.975 ns has been obtained and the total gain is 550.

**Key words** lasers; high-gain; sub-nanosecond pulses; double pass amplifier

**OCIS codes** 140.3280; 140.3460; 140.3538

## 1 引 言

窄脉宽、高单脉冲能量调 Q 固体激光器在材料加工、非线性光学、激光雷达等领域有着广泛的应用<sup>[1~3]</sup>。脉宽为纳秒和亚纳秒级的高峰值功率激光在加工过程中, 由于热作用少, 使得加工损伤小、精度高<sup>[4]</sup>; 同时, 相对于飞秒及皮秒激光, 纳秒和亚纳秒级脉冲激光的加工效率高、速度快, 因此在激光微加工制造领域具有广阔的应用前景<sup>[5]</sup>。对于高脉冲能量的短脉宽激光器, 大多采用主振荡器和放大器

结构, 实现高能量输出。双通放大器相比于单通放大器有很多优势, 例如高增益、结构紧凑、高效率等, 因此双通放大系统是一种可以获得高单脉冲能量的有效方法<sup>[6]</sup>。

1996 年 Kyusho 等<sup>[7]</sup>使用准连续半导体激光端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 调 Q 后获得了单脉冲能量 0.76 mJ, 脉宽 700 ps 的亚纳秒激光输出, 经过氙灯抽运 Nd:YAG 晶体单通放大, 氙灯抽运单脉冲能量为 34 J, 获得了单脉冲能量 12 mJ, 脉宽 700 ps 的亚

**收稿日期**: 2012-01-02; **收到修改稿日期**: 2012-03-01

**基金项目**: 国家自然科学基金(61040065)和北京市自然科学基金(4112005)资助课题。

**作者简介**: 王金国(1969—), 男, 博士研究生, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: wangjinguo@bjut.edu.cn

**导师简介**: 李 强(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: ncltlq@bjut.edu.cn

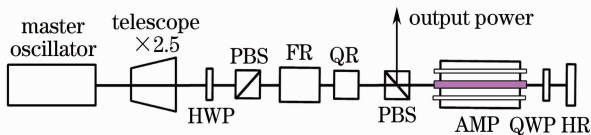
\* **通信联系人**。E-mail: allen-sun@emails.bjut.edu.cn

纳秒激光输出,脉冲稳定性为±4%,单通放大增益为15.7(12.0 dB)。2002年 Forget 等<sup>[8]</sup>使用能量3.9 μJ,频率28 kHz,脉宽800 ps的种子激光,经过Nd:YVO<sub>4</sub>六通放大后,获得了平均功率5.7 W,增益为57(17.5 dB)。2008年 Wandt 等<sup>[9]</sup>使用能量2 mJ,频率10 Hz,脉宽6.4 ns的种子激光,经过采用掺杂原子数分数为3%的Yb:YAG棒四通放大后,获得了220 mJ的激光输出,增益为110倍。2010年邱基斯等<sup>[10]</sup>使用能量10 μJ,频率1 Hz,脉宽3 ns,波长1053 nm的种子激光,经过钽玻璃放大器后,在抽运功率为8.2 kW,抽运脉冲宽度为400 μs时达到了70倍的稳定高增益。2010年 Agnesi 等<sup>[11]</sup>使用能量62 μJ,频率10 kHz,脉宽473 ps的种子激光,经过Nd:YVO<sub>4</sub>板条双通放大后,获得了能量545 μJ,脉宽577 ps的激光输出,增益为8.8倍。

本文采用半导体激光端面抽运沿a轴布儒斯特角切割,掺杂原子数分数为1.0%的Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,采用KD\*P晶体电光调Q,获得了单脉冲能量0.16 mJ,脉宽0.964 ns的亚纳秒脉冲激光输出。采用灯抽运Nd:YAG双通放大器对亚纳秒脉冲激光进行放大,重复频率5 Hz时,获得了单脉冲能量88 mJ,脉宽0.975 ns的亚纳秒激光输出,双通放大增益为550倍。

## 2 实验结构

激光放大器由主振荡器和双通放大器两部分组成,激光放大器布局如图1所示。主振荡器使用1 ns窄脉宽激光器<sup>[12]</sup>,采用最高峰值功率140 W准连续半导体激光器端面抽运布儒斯特角切割的Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,晶体尺寸3 mm×3 mm×2.6 mm,掺杂原子数分数为1.0%,Nd:YVO<sub>4</sub>抽运端面镀有808 nm的增透(AR)膜和1064 nm的高反(HR)膜。采用退压式调Q,调Q晶体采用KD\*P晶体。



PBS: polarizing beam splitter; QWP: quarter wave plate; HWP: half wave plate; AMP: Nd:YAG rod amplifier; FR: 45° Faraday rotator; QR: 45° quartz rotator; OC: optical coupler; HR: high reflection

图1 Nd:YAG双通放大器系统示意图

Fig. 1 Experimental setup of Nd:YAG amplifier system

主振荡器输出的光束经扩束后进入双通放大

器,双通放大器的增益介质为Nd:YAG晶体,晶体参数为φ3 mm×120 mm,掺杂原子数分数1.0%。主振荡器输出水平线偏振光,通过2.5倍扩束镜后,经λ/2波片后变为垂直线偏振光,通过45°法拉第光学隔离器、45°石英旋转器和偏振分光棱镜后,再次变为水平线偏振光,通过偏振分光棱镜后进入Nd:YAG晶体,实现一通放大。当激光通过λ/4波片,经全反镜反射再次通过λ/4波片变为垂直线偏振光,通过Nd:YAG晶体第二次放大后,从偏振分光棱镜输出,实现二通放大。

## 3 实验分析及结论

根据Koechner理论分析<sup>[13]</sup>,小信号单程增益与抽运能量的关系为

$$\ln G_0 = g_0 l = KE_p, \quad (1)$$

式中K是能量转换因子, $E_p$ 表示放大器抽运能量, $G_0$ 表示小信号增益系数, $g_0$ 表示增益介质中单位长度的增益系数, $l$ 为增益介质长度。

根据Franz和Nodvik理论<sup>[14]</sup>,激光脉冲放大增益表达式为

$$G = \frac{E_s}{E_{in}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp\left(\frac{E_{in}}{E_s}\right) - 1 \right] G_0 \right\}, \quad (2)$$

上式给出了激光脉冲增益G与输入脉冲能量密度 $E_{in}$ 的关系, $E_s$ 表示饱和能量密度,

$$G_0 = \exp(g_0 l) = \exp(\beta E_s l). \quad (3)$$

对于四能级系统

$$E_s = \frac{h\nu}{\sigma}, \quad (4)$$

式中h是普克尔常量, $\nu$ 表示激光频率, $\sigma$ 表示受激发射截面。对于Nd:YAG晶体, $E_s = 0.21 \text{ J/cm}^3$ , $\beta = 4.73 \text{ cm}^2/\text{J}$ , $\sigma = 4.3 \times 10^{-19} \text{ cm}^{-2}$ 。

$$E_{out} = \left(\frac{E_s}{M}\right) \ln \left\{ 1 + \left[ \exp\left(\frac{ME_{in}}{E_s}\right) - 1 \right] \exp(M\sigma N_0) \right\}, \quad (5)$$

$$N_0 = \int_0^L ndz = \frac{g_0 l}{\sigma}, \quad (6)$$

式中M表示通过Nd:YAG晶体放大的次数。

使用OPHIR NOVA II能量计测量单脉冲能量输出,Nd:YAG双通放大器单脉冲能量测量与理论计算随电压变化的关系如图2所示。

理论曲线与实验曲线的差异主要与激光放大器的热效应有关。随着抽运能量的增加,激光放大器的热效应会随之增加,由热致双折射效应引起的热退偏效应也会显著增加,造成激光放大器的能量提取

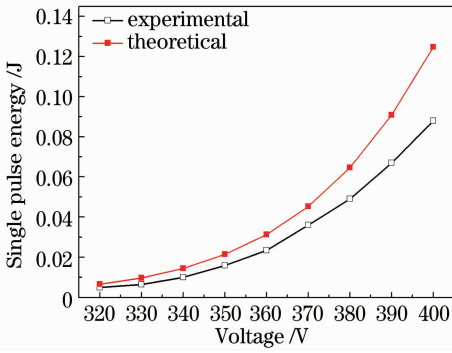


图 2 Nd:YAG 双通放大器输出单脉冲能量随电压的变化曲线

Fig. 2 Relationship between double pass single pulse energy of Nd:YAG amplifier and voltage

效率降低,输出的单脉冲能量也随之降低。因此随着抽运电压的增加,理论曲线明显高于实验曲线。同时热退偏效应容易造成主振荡器和放大器的光学元件损坏,因此主振荡级与放大级之间必须使用光隔离器,阻止放大器和主振荡器之间的反馈。光隔离器由  $\lambda/2$  波片、两个偏振分光棱镜、法拉第旋转器、石英转镜组成。由于抽运模块的小信号增益系数和增益长度的乘积很大,光隔离器对防止放大器的自激振荡和放大自发辐射(ASE),提高放大器的储能有重要作用。

主振荡器输出激光的单脉冲能量为 0.16 mJ,脉宽为 0.964 ns,  $M^2$  为 1.5,不稳定性小于  $\pm 3\%$ ,脉宽波形图如图 4(a)所示。为了保证主振荡级的稳定工作和输出的亚纳秒脉宽,主振荡器输出激光单脉冲能量一般很小,放大器中能量抽取效率很低,对于亚纳秒脉宽激光,Nd:YAG 放大器工作时输入信号能量密度大于  $0.05 \text{ J/cm}^2$ <sup>[13]</sup>时才能有效地提取能量。为了实现高增益亚纳秒激光输出,一方面要提高主振荡器输出的激光单脉冲能量密度,另一方面要增加激光放大次数。实验中,通过双通放大结构,大大提高了能量抽取效率。

对于入射光束来说,放大器晶体棒相当于有限孔径,当入射光束半径大于晶体棒半径时,将会产生衍射环,它严重干扰了光束的均匀性,降低了光束质量和稳定性。当入射光束半径远小于晶体棒半径时,虽然激光光束质量较好,但能量提取效率会很低,放大器的抽运能量不能充分利用,很难实现高增益。通过实验研究发现,为了避免衍射效应,通过改变扩束镜倍率大小来改变入射光束半径,使入射光斑面积大约为晶体棒端面面积的 80%,通过晶体棒后不会产生衍射效应,且具有较高的能量提取效率。

由于主振荡器输出光束直径约为  $900 \mu\text{m}$ ,而双通放大器抽运模块的 Nd:YAG 棒直径为 3 mm,因此本实验使用 2.5 倍扩束镜,将光束扩到约  $\phi 2.2 \text{ mm}$ ,扩束后的光束可以完全进入 Nd:YAG 棒且不产生衍射,且在  $\phi 3 \text{ mm}$  内分布较均匀。不同入射光斑填充率的 Nd:YAG 双通放大器增益随电压变化规律如图 3 所示。从图中可以明显看出,当入射光斑面积大约为晶体棒端面面积的 80% 时,Nd:YAG 双通放大器具有较高的增益。

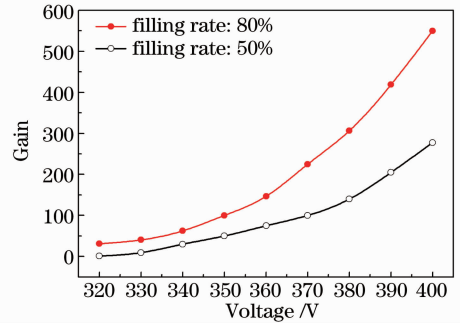


图 3 不同填充率下 Nd:YAG 放大器双通放大增益倍数随电压的变化曲线

Fig. 3 Relationship between double pass gain multiple of Nd:YAG amplifier and voltage in different filling rates

激光放大器可能会形成自激振荡和 ASE 效应,不仅降低放大器的增益,而且会影响激光主振荡器的稳定工作和双通放大的输出脉宽。为了使激活材料能够有效地起到储能作用,消除 Nd:YAG 棒端面与偏振分光棱镜的一个端面形成的自激振荡和 ASE 效应,将 Nd:YAG 棒端面切  $1.5^\circ$  倾角,并镀上增透膜,使用布儒斯特角的偏振片代替偏振分光棱镜,同时尽量扩大光隔离器与放大器的间距。使用端面未切角的 Nd:YAG 棒双通放大产生的激光输出脉宽,如图 4(c)所示。从图中可以明显看出,由于 Nd:YAG 棒端面与偏振分光棱镜的一个端面形成了子腔,存在严重的自激振荡和 ASE 效应,展示了主振荡器产生的激光脉冲的同时,又在其后产生一连串脉冲信号,严重影响了激光放大器的稳定工作和输出。

主振荡器输出的种子激光经过 Nd:YAG 双通放大器放大后,最终获得了单脉冲 88 mJ,不稳定性小于  $\pm 3\%$ ,增益为 550,脉宽 0.975 ns 的激光输出,测量距离激光器输出端口不同位置的光斑大小,获得激光光束质量  $M^2$  为 1.7,如图 3、图 4(b)、图 5 所示。虽然进一步提高电压可得到更高能量的激光输出,但受偏振分光棱镜损伤阈值所限,通常使输出激光峰值功率密度稳定在低于  $1 \text{ GW/cm}^2$  的状态。为

了能够实现高增益输出,同时避免自激振荡,最后使用了布儒斯特角的偏振片代替偏振分光棱镜,损伤

阈值满足要求。

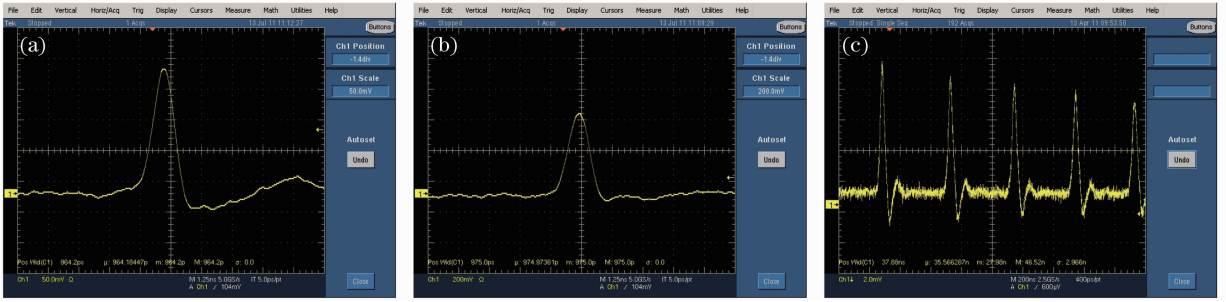


图 4 激光脉宽输出波形。(a)调 Q 窄脉宽波形;(b)双通放大单脉冲脉宽波形图;(c)存在 ASE 效应时的激光脉宽波形  
Fig. 4 Profile of laser pulse output. (a) Profile of Q-switched short pulse output; (b) profile of double pass single pulse of the Nd:YAG amplifier; (c) profile of output pulse when ASE effect exists

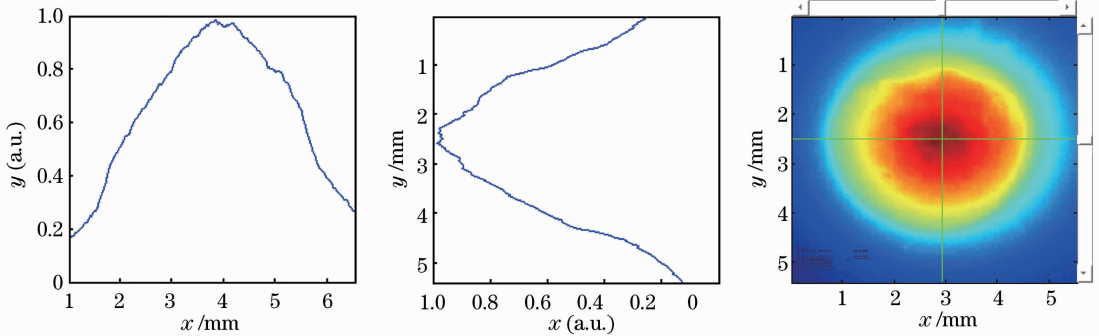


图 5 Nd:YAG 放大器双通放大光斑形状  
Fig. 5 Profile of double pass output beam of Nd:YAG amplifier

## 4 结 论

对亚纳秒脉宽激光脉冲进行了双通放大的实验研究,将放大器增益介质 Nd:YAG 棒端面切 1.5° 倾角,并镀上增透膜,同时尽量扩大光隔离器与放大器的间距,在提高放大器增益倍率的同时有效地抑制了自激振荡和 ASE 效应的出现。通过选择合适的扩束镜倍率,改变主振荡器输出的种子激光光斑大小,获得了较高的能量提取效率。在种子激光单脉冲能量 0.16 mJ,脉宽 0.964 ns,  $M^2$  为 1.5,重复频率 5 Hz 的条件下,获得了单脉冲能量 88 mJ,不稳定性小于 ±3%,脉宽 0.975 ns,  $M^2$  为 1.7,550 倍高增益的亚纳秒激光双通放大输出。

### 参 考 文 献

- 1 D. Hwang, S. G. Ryu, N. Misra *et al.*. Nanoscale laser processing and diagnostics[J]. *Appl. Phys. A-Mater.*, 2009, **96**(2): 289~306
- 2 P. Cerny, H. Jelinkova, P. G. Zverev. Solid state lasers with Raman frequency conversion [J]. *Prog Quantum Electron.*, 2004, **28**(2): 113~143
- 3 M. Ostermeyer, P. Kappe, R. Menzel *et al.*. Diode-pumped Nd:YAG master oscillator power amplifier with high pulse

- energy, excellent beam quality, and frequency-stabilized master oscillator as a basis for a next-generation lidar system[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(4): 582~590
- 4 P. B. Corkum, F. Brunel, N. K. Sherman *et al.*. Thermal response of metals to ultrashort pulse laser excitation[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **61**(25): 2286~2289
- 5 D. L. Matthews, L. Da Silva, B. M. Kim *et al.*. Surgical application of ultrashort pulse laser technology [C]. Proc. of ASSL, 1999. 342~344
- 6 Lee W. Casperson, Janet M. Casperson. Power self-regulation in double-pass high-gain laser amplifiers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **87**(5): 2079~2083
- 7 Y. Kyusho, M. Arai, K. Mukaiharu *et al.*. High-energy subnanosecond compact laser system with diode-pumped, Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Advanced Solid-State Lasers*, 1996, **1**: 382~385
- 8 S. Forget, F. Balembois, P. Georges *et al.*. A new 3D multi-pass amplifier based on Nd:YAG or Nd:YVO<sub>4</sub> crystals[J]. *Appl. Phys. B-Lasers O.*, 2002, **75**(4-5): 481~485
- 9 C. Wandt, S. Klingebiel, M. Siebold *et al.*. Generation of 220 mJ nanosecond pulses at a 10 Hz repetition rate with excellent beam quality in a diode-pumped Yb:YAG MOPA system[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(10): 1111~1113
- 10 Qiu Jisi, Fan Zhongwei, Tang Xiongxin *et al.*. 70 times high gain Nd:glass rod amplifier sidely pumped by laser diode array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(6): 061401
- 邱基斯, 樊仲维, 唐熊忻 等. 70 倍高增益激光二极管阵列侧面抽运钕玻璃放大器[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(6): 061401

- 11 A. Agnesi, P. Dallochio, F. Pirzio *et al.*. Sub-nanosecond single-frequency 10-kHz diode-pumped MOPA laser[J]. *Appl. Phys. B-Lasers O.*, 2010, **98**: 737~741
- 12 Zhang Xiang, Feng Chi, Xie Xiyong *et al.*. 1 nanosecond E-O Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(9): 2361~2364  
张翔, 冯驰, 谢希盈等. 1纳秒电光调Q Nd:YVO<sub>4</sub>激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(9): 2361~2364
- 13 W. Koechner. *Solid State Laser Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002  
W. 克希耐尔. *固体激光工程*[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- 14 Lee M. Franz, John S. Nodvik. Theory of pulse propagation in a laser amplifier[J]. *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**(8): 2346~2349

栏目编辑: 宋梅梅