

高稳定高性能皮秒光参量放大器抽运源研究

彭宇杰^{1,2} 潘雪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 结合短脉冲光参量放大抽运源的需求, 基于固体放大技术, 对光纤锁模激光器输出的 6 nm 带宽皮秒纳焦耳级激光脉冲进行放大, 获得了 6.2 mJ 的基频以及 3.0 mJ 的倍频输出, 输出脉冲的时间宽度为 8.6 ps, 倍频光峰值功率密度为 4.94 GW/cm²。采用高增益的 Nd³⁺:YLF 再生放大器做前级放大器, 利用其光谱增益窄化效应获得窄带的高功率光参量放大抽运光。理论计算表明, 在此增益条件下, 输出激光的光谱将被窄化至 0.3 nm。采取了合理的空间整形方案, 输出激光的近场呈平顶分布, 光束质量优良。再生放大器采用钢棒结构, 降低温度变化对系统稳定性的影响, 总能量输出稳定性优于 1%(RMS)。

关键词 激光器; 光参量放大; 再生放大器; 短脉冲放大; 增益窄化

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0802009

Research of High Stability High Performance Picosecond Pump Laser for Optical Parametric Amplification

Peng Yujie^{1,2} Pan Xue¹ 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 picosecond pump laser is demonstrated for short pulse optical parametric amplification. An all fiber mode-lock laser pulse with 6 nm bandwidth, 12.4 ps duration and nJ energy is amplified by a solid state amplifier. Amplified laser pulses with 6.2 mJ single pulse energy, 8.6 ps pulse width, 1053 nm wavelength are obtained. After frequency doubling, laser pulses with 3.0 mJ energy and 4.94 GW/cm² intensity are achieved. A high gain Nd³⁺:YLF regenerative amplifier is used as the first stage amplifier to generate narrow-band high power laser by taking advantage of the gain narrowing effect, and a bandwidth of 0.3 nm is obtained in theory. The output laser beam shows a top flat profile with excellent beam shaping. 1% (RMS) fluctuation is achieved by the stable regenerative amplifier which employs a three-steel-rod structure to mount the cavity.

Key words lasers; optical parametric amplification; regenerative amplifier; short pulse amplification; gain narrowing

OCIS codes 140.3280; 140.3580; 140.5560

1 引 言

近年来, 超短超强激光与物质相互作用例如快点火实验等成为了研究热点。在激光与物质相互作用过程中, 超短超强激光的聚焦功率密度通常达到 $10^{18} \sim 10^{21}$ W/cm²。而当激光与脉冲的聚焦功率密

度达到 $10^8 \sim 10^{11}$ W/cm² 时, 激光就会与靶物质相互作用使之气化或者产生预等离子体, 影响主脉冲与靶物质的相互作用。考虑到激光与物质的相互作用时间约 10 ps, 所以在快点火等极端物理过程中要求在主脉冲的前 10 ps 以外的预脉冲幅度得到很高

收稿日期: 2014-03-15; **收到修改稿日期**: 2014-03-28

作者简介: 彭宇杰(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事固体激光放大器方面的研究。E-mail: yjpeng@siom.ac.cn

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方面的研究。

E-mail: lixuechun@siom.ac.cn(通信联系人)

的抑制,主预脉冲的信噪比要求大于 10^{10} [1-2]。

目前产生超短超强脉冲的主要方式是啁啾脉冲放大技术(CPA)。相比传统介质能级跃迁式的放大技术,光参量放大技术(OPA)具有单程增益大、没有 ASE 激光、增益谱宽等特点。所以光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)成为了产生高信噪比超短超强激光脉冲的主流技术之一[3]。国内外相关理论和实验证明 OPA 过程中的参量荧光是造成 OPCPA 信噪比降低的主要因素之一[4]。由于参量荧光受制于抽运光的时间窗口效应,使用皮秒短脉冲激光结合纳秒长脉冲做抽运源对信号光进行参量放大,可以有效地降低主脉冲周围的噪声能量和时域宽度[5]。参量放大的增益与抽运光光强的平方成正比,高功率的抽运光可以获得高的参量放大增益。因此,短脉冲光参量放大(SPOPA)最重要的问题就是如何产生高性能的皮秒抽运源。王庆等[6-7]已经采用多种方法获得了皮秒激光脉冲源。本课题组也相继采用低温 Yb:YAG 再生放大器获得了 217 μ J、5.5 ps 的 1030 nm 激光脉冲[8],以及基于钕玻璃再生放大技术结合四程放大技术获得了 1.7 mJ、14 ps 的 526.5 nm 皮秒脉冲[9]。但是由于光参量放大的抽运光的光谱宽度通常要求相对信号光为单色光,上述皮秒脉冲源采用的增益介质为 Yb:YAG 或者钕玻璃,其增益带宽均大于 20 nm,无法直接获得与信号光同源的窄带皮秒抽运源,必须采用窄带带通

滤波器来获得窄谱脉冲,这样会导致预脉冲的出现。再生放大技术作为一种高增益的多程放大技术,在宽谱光放大的过程中会产生增益窄化效应。利用窄增益带宽的增益介质的光谱增益窄化效应,自然能获得高能量的皮秒脉冲源。

基于激光二极管(LD)抽运的固体激光放大技术,获得了高稳定高性能的皮秒 OPCPA 抽运源。为了保证抽运源的长期可靠性与稳定性,系统采用再生放大器结合四程放大器的结构。其中,再生放大器的再生腔固定在一个由三根热导率极小的钢棒组成的结构上,降低环境温度变化对再生腔结构的影响,改善整体结构,提高输出能量稳定性。再生放大器利用 $\text{Nd}^{3+}:\text{YLF}$ 的窄增益谱的增益窄化效应,实现了窄带的 1.5 mJ 的激光输出,稳定性优于 0.8%(RMS)。四程放大器获得了 6.2 mJ 的输出,经过倍频之后获得了大于 3 mJ 的 526.5 nm 的倍频光,能量稳定性为 1%(RMS),基频和倍频光近场光斑均呈近平顶分布,获得了性能优良的皮秒参量放大抽运源。

2 实验装置

实验装置系统如图 1 所示,激光系统包含四个部分:锁模振荡器、再生放大器、四程放大器和倍频部分。

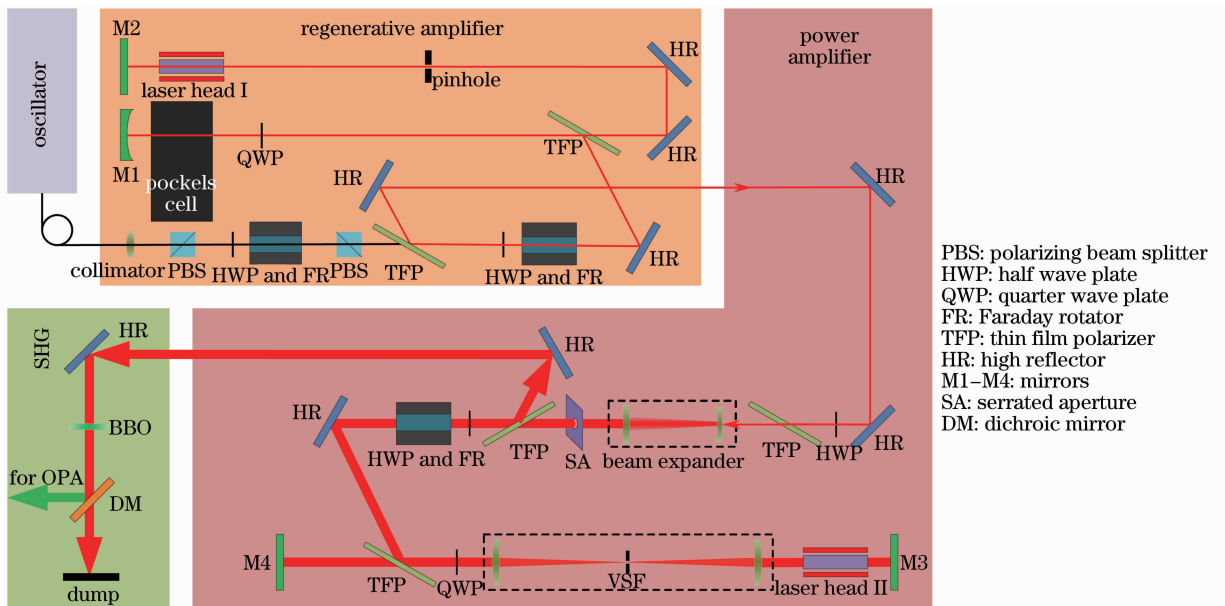


图 1 激光系统结构图

Fig.1 Schematic of the laser system

激光系统的振荡器是一台自主研发的基于非线性偏振旋转效应和光谱滤波器的全光纤锁模激光

器,其结构如图 2 所示[10]。锁模振荡器采用全光纤环形腔结构,主要器件包括两个偏振控制器(PC1、

PC2)、在线起偏器(ILP)、光隔离器(ISO)、光谱滤波器(SF)、抽运光波分复用器(WDM)、Yb198 增益光纤和输出耦合器。增益光纤在 980 nm 抽运光的作用下产生自发辐射,在光纤内部由于自相位调制效应会产生与光强相关的偏振旋转现象,在 PC1、PC2 和 ILP 的共同作用下,激光脉冲在谐振腔内循环“削波”,最终实现锁模输出。振荡器输出激光脉冲中心波长为 1053 nm,谱宽为 6 nm,脉冲宽度约为 21.5 ps,重复频率为 15.2 MHz。

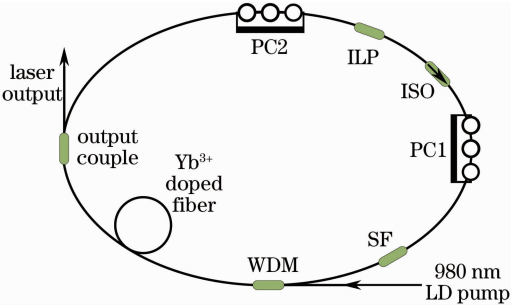


图2 光纤锁模激光器结构图

Fig. 2 Schematic of the all fiber mode-locked laser

由光纤输出的激光脉冲经过准直器准直后,经两级法拉第隔离器和薄膜偏振片进入再生放大器。两级法拉第隔离器主要隔离反向激光对光纤元器件及振荡器造成的损害。再生放大器采用“腔倒空”设计,由再生腔、1/4 波片、电光开关、激光头构成。再生腔是一个线性折叠腔,由腔镜(M1、M2)和高反镜构成,腔结构的设计主要基于 ABCD 矩阵理论,综合考虑腔内光斑模式分布、激光头能量提取效率和腔内光学元件的损伤控制。电光开关实现激光脉冲的导入与导出。由于光参量放大的抽运光的光谱宽度通常要求相对信号光为单色光,增益介质采用 c 轴切割的 Nd³⁺:YLF 晶体,其 σ 偏振激光发射峰为 1053 nm,增益谱宽度为 1.35 nm,利用再生放大器的增益窄化效应获得窄光谱的 OPCPA 抽运源。晶体的尺寸为 $\Phi 4 \times 60$ mm,采用 LD 抽运,抽运功率为 750 W 时,激光头的单程小信号增益为 1.8 倍。在此抽运功率下,再生放大器的最高输出能量为 1.5 mJ,稳定性优于 0.8%(RMS)。为了保证再生放大器的输出激光为基模,在再生腔内引入硬边小孔抑制高阶模的产生。如图 3 所示,再生放大器内所有光学元件用三根钢棒结构固定,减小由于温度变化对再生腔结构带来的影响,提高放大器稳定性。锁模激光器输出的高重复频率激光脉冲序列经过再生放大器选单之后降频为 1 Hz。为了保证再生放大器的可靠性与安全,再生放大器的输出能量被限制在 1 mJ 左右。

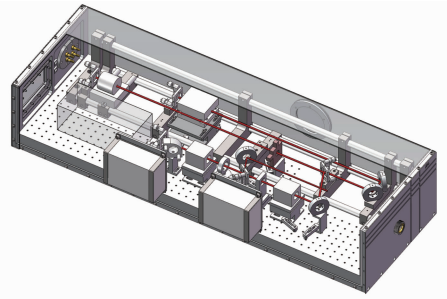


图3 再生放大器结构图

Fig. 3 Setup of regenerative amplifier

由于激光脉冲宽度为皮秒量级,激光脉冲的峰值功率已经很高,放大过程中过高的峰值功率会引起剧烈的克尔效应,光束质量会遭到严重的破坏,还会引起光学元件及膜层的损伤。再生放大器的输出激光为直径 2 mm 左右高斯分布,经过 3 倍扩束之后,用软边光阑(SA)整形为直径 3 mm 的平顶超高斯光束,经过整形之后的激光注入四程放大器。四程放大器由两个腔镜(M3、M4)、空间滤波器(VSF)、腔薄膜偏振片、1/4 波片以及激光头组成。四程放大器的光路排布遵循严格的 4f 像传递设计,像传递的起点为软边光阑,空间滤波器将像面传递至腔镜 M3 和 M4。激光头采用 LD 抽运,增益介质为钕玻璃。由于 1/4 波片的作用,激光脉冲在放大腔内四程之后被导出。

四程放大器的输出激光经过厚度为 2 mm 的偏硼酸钡(BBO)晶体获得 526.5 nm 的倍频激光,BBO 晶体置于输出激光的像传递面上,倍频过程采用第一类相位匹配。倍频后的激光经过双色片(DM)分束之后用作皮秒 OPCPA 的抽运源。

3 实验结果与分析

振荡器输出的种子光中心波长为 1053 nm,图 4 为从示波器上观测到的锁模激光器种子源的脉

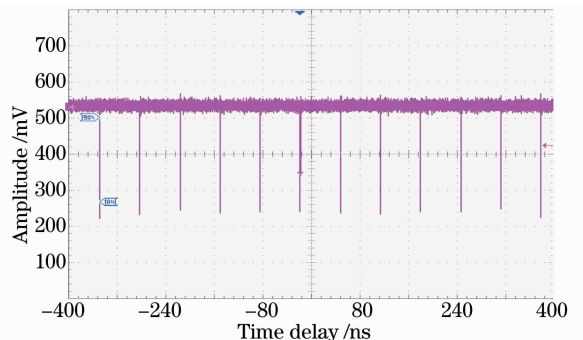


图4 锁模激光器种子脉冲序列

Fig. 4 Output pulse train of the mode-locked laser

冲序列,可以看出脉冲序列的周期为 65.8 ns,锁模激光器的重复频率为15.2 MHz。用 YOKOGAWA 公司生产的 AQ6370B 光谱分析仪测量锁模激光器的光谱宽度,如图 5 所示。可以看出,锁模激光器输出的种子脉冲的光谱呈平顶分布,半高全宽度(HWHM)为 6 nm。

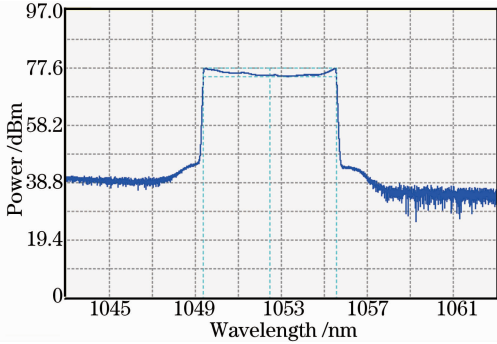


图 5 锁模激光器种子脉冲光谱

Fig. 5 Spectrum of the mode-locked laser

锁模种子脉冲的输出脉冲宽度用商用自相关仪(德国 APE 公司, Pulse Check 150)测量,测量结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,激光脉冲的自相关信号呈高斯分布,其半高全宽度为 30.1 ps。由自相关测量原理可以推算出锁模种子源的脉冲宽度为 21.5 ps(除以自相关因子 1.414)。

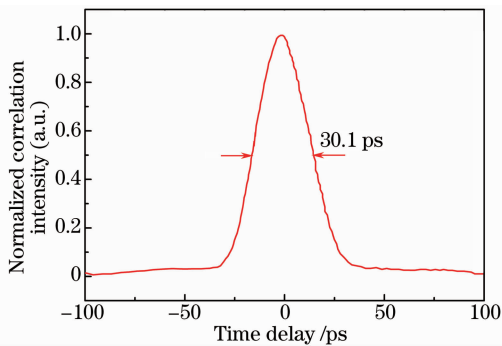


图 6 锁模激光器种子脉冲时间宽度

Fig. 6 Pulse duration measured with autocorrelator of the mode-locked laser

锁模激光器输出的种子激光注入到 $\text{Nd}^{3+}:\text{YLF}$ 再生放大器中。再生放大器 LD 抽运功率为 750 W 时,能够提供 1.8 倍的单程小信号增益。为了保证光学元件的安全与再生放大器的长期可靠性,控制激光脉冲在再生腔内的放大圈数为 20 圈,再生放大器的输出能量为 1 mJ,能量稳定性优于 0.8% (RMS)。由于此时再生放大器并未工作在饱和状态,输出能量稳定性并未达到最好状态。若采用脉冲堆积方法,将种子脉冲与一个纳秒后缀脉冲同时注入再生放大器,则可以使再生放大器安全地同时

工作在饱和状态,获得更稳定的输出能量。

再生放大器输出的激光经过空间整形之后成为近似平顶的 5 阶超高斯分布,这样可以避免超短激光产生严重的克尔效应聚焦破坏光学元件。图 7 给出了四程放大器在不同抽运电流时的输出能量,图中的曲线是指数拟合的结果。可以看出,输出能量与 LD 抽运电流基本呈指数关系。当四程放大器的激光头抽运电流为 80 A 时,抽运功率约 6 kW,此时放大输出的激光能量为 6.2 mJ。为了光学元件的安全,实验中并没有继续增加电流,而是使系统维持在 6 mJ 左右的输出水平。

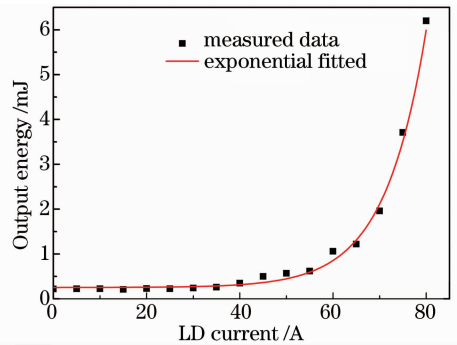


图 7 四程放大器抽运电流与输出能量的关系

Fig. 7 Relationship between the output energy of the four pass amplifier and the LD pumping current

经过 2 mm 厚的 BBO 晶体第一类相位匹配倍频后,得到的倍频光的能量为 3.0 mJ,倍频效率为 48.4%。倍频光的输出能量波动如图 8 所示。得益于再生放大器的稳定输出和稳定的机械结构,最终得到的倍频光的稳定性优于 1% (RMS)。

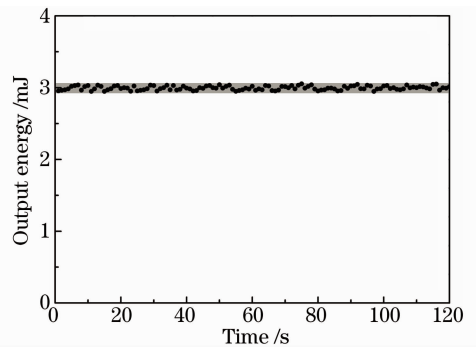


图 8 激光放大系统输出能量稳定性

Fig. 8 Output pulse energy fluctuation of the laser system

此时激光脉冲的通量密度已经达到 0.088 J/cm^2 ,功率密度接近 10 GW/cm^2 ,如此高的功率密度势必会引起强烈的非线性效应。通常用 B 积分值来衡量非线性效应的严重程度, B 积分描述了介质的非线性折射率引起的附加相位变化,其表达式为

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l \gamma I(z) dz = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l \gamma I_0 \exp(g_0 z) dz, \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{4\pi n_2 \times 10^7}{n_0 c} = 4.19 \times 10^{-3} \frac{n_2}{n_0} (\text{cm}^2/\text{W}), \quad (2)$$

式中 I_0 是增益介质的入射光强, g_0 是增益介质的小信号增益系数, n_0 是激光介质折射率, n_2 是介质非线性折射率。对于钕玻璃, 其非线性折射率为 1.12×10^{-13} esu。可以计算, 在 6.2 mJ 输出能力下

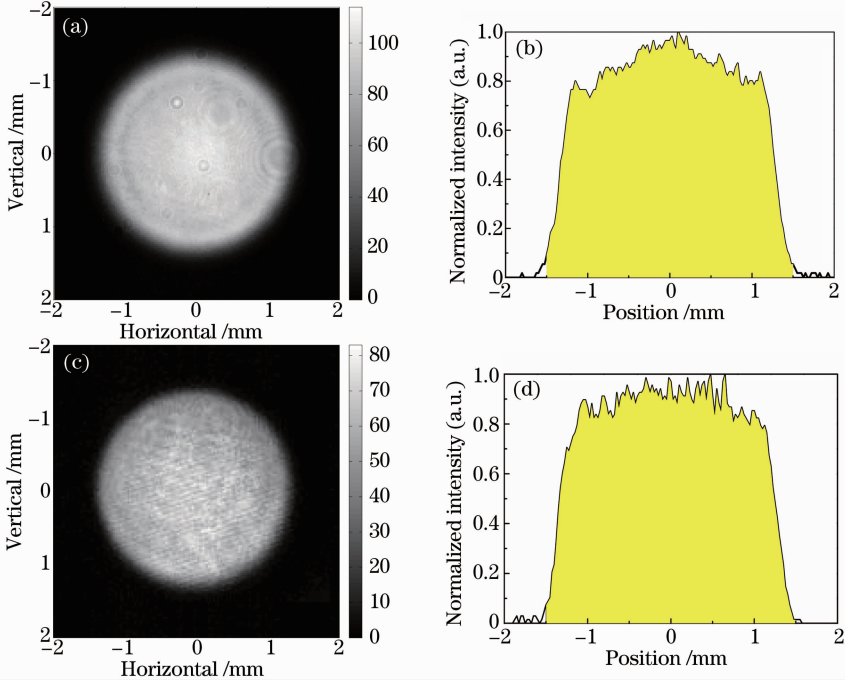


图9 激光放大系统输出光斑。(a) 基频光近场光斑;(b) 基频光近场一维分布;
(c) 倍频光近场光斑;(d) 倍频光近场一维分布

Fig. 9 Output beam profiles. (a) Beam profile of the 1053 nm laser; (b) one-dimensional intensity distribution of (a);
(c) beam profile of the 526.5 nm laser; (d) one-dimensional intensity distribution of (c)

由于激光介质增益谱的限制, 宽带激光在放大过程中存在增益窄化现象^[11], 相对峰值增益归一化的光谱传递函数可以表示为

$$T(\Delta\nu) = \exp\left[-\ln G_0 \frac{(\Delta\nu)^2}{(\Delta\nu)^2 + (\nu_{\text{hw}})^2}\right], \quad (3)$$

式中 ν_{hw} 是增益介质的增益谱半宽, $\Delta\nu$ 是相对增益峰的频率差值, G_0 是激光放大器的总增益。6 nm 的平顶宽谱光经过增益谱宽为 1.35 nm 的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YLF}$ 再生放大器, 得到的窄化后的光谱如图 10 所示。计算过程中, 取再生放大器总增益值为 60 dB。由图 10 可以看出, 放大后的激光脉冲光谱将被窄化至 0.3 nm, 相对锁模种子源已经是单色光, 能够满足参量放大抽运源光谱宽度的要求。

由于锁模种子源输出的激光脉冲带有啁啾, 在激光脉冲放大的过程中, 伴随光谱的增益窄化过程,

的 B 积分值约为 0.49。

6.2 mJ 放大能力下的输出激光光斑形状如图 9(a) 所示, 可以看出经过整形放大之后的光斑质量非常好, 接近平顶分布, 如图 9(b) 所示, 并无明显的自聚焦效应。经过倍频晶体倍频之后, 倍频光的光斑如图 9(c) 所示, 倍频光的近场也是良好的近平顶分布。倍频光近场中致密的条纹是倍频晶体抛光时的刀纹所引起。

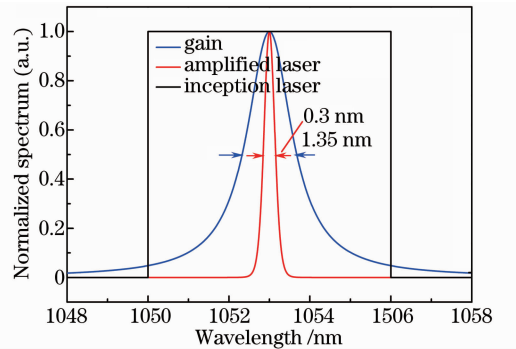


图10 种子光经过再生放大器后的归一化光谱
Fig. 10 Normalized spectrum of the injected and amplified laser pulse

激光脉冲的时间宽度也会被压缩。由于四程放大器输出的激光脉冲重复频率为 1 Hz, 无法用商用自相关仪测量其脉冲宽度, 本实验室自主研制了测量单

发低重频超短脉冲激光宽度的自相关仪^[12-13]。用该自相关仪测量得到的归一化的自相关强度如图11所示,测量得到的数据点很好地满足高斯拟合曲线。自相关信号的半峰全宽为12.2 ps,可以推算激光脉冲的宽度为8.6 ps。

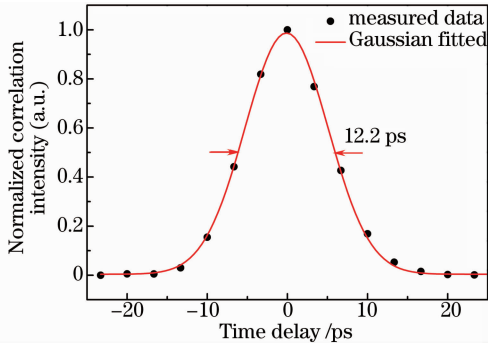


图 11 自相关仪测量的自相关信号

Fig. 11 Pulse duration measured by the homemade autocorrelator

4 结 论

结合短脉冲光参量放大抽运光的需求,提出了一种基于再生放大器和多程放大器的皮秒短脉冲激光系统。锁模振荡器输出的脉宽21.5 ps、谱宽6 nm、能量为纳焦耳级的激光脉冲依次经过Nd³⁺:YLF再生放大器放大、空间整形单元整形和钕玻璃四程放大器之后,得到6.2 mJ基频和3.0 mJ的倍频激光脉冲,基频和倍频光近场均呈平顶分布,光束质量优良。采用高增益高稳定的再生放大器做前级放大,利用增益窄化效应理论上可以获得0.3 nm的窄带高功率激光,输出激光脉冲时域上呈高斯分布,半峰全宽为8.6 ps,输出能量稳定性优于1%(RMS)。

参 考 文 献

1 Kiriya H, Michiaki M, Nakai Y, *et al.*. High-spatiotemporal-quality petawatt-class laser system[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(11): 2105-2115.
 2 Wang Z, Liu C, Shen Z, *et al.*. High-contrast 1.16 PW Ti:Sapphire laser system combined with a doubled chirped-pulse amplification scheme and a femtosecond optical-parametric amplifier[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3194-3196.

3 Ross I N, Matousek P, New G H C, *et al.*. Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification[J]. *JOSA B*, 2002, 19(12): 2945-2956.
 4 Wang Yanhai. Engineering Design Research on OPCPA for the Front End of Picosecond-Petawatt-Class Lasers[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009. 45-61.
 王艳海. 皮秒拍瓦前端 OPCPA 的工程设计研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2009. 45-61.
 5 Musgrave I, Shaikh W, Galimberti M, *et al.*. Picosecond optical parametric chirped pulse amplifier as a preamplifier to generate high-energy seed pulses for contrast enhancement[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(33): 6558-6562.
 6 Wang Qing, Wei Zhiyi, Shen Zhongwei, *et al.*. High-power 532 nm kilohertz picosecond laser amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s1): s114004.
 王 庆, 魏志义, 沈忠伟, 等. 高功率 532 nm 千赫兹皮秒激光放大器[J]. *光学学报*, 2013, 33(s1): s114004.
 7 Metzger T, Teisset C Y, Krausz F. High-repetition-rate picosecond pump laser based on a Yb:YAG disk amplifier for optical parametric amplification [C]. *Advanced Solid-State Photonics*, Optical Society of America, 2008. TuA2.
 8 Qu Yexi, Pan Xue, Huang Wenfa, *et al.*. 1030 nm picosecond level optical parametric chirped pulse amplification pump[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0802003.
 瞿叶玺, 潘 雪, 黄文发, 等. 1030 nm 皮秒级光参量啁啾脉冲放大抽运源[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0802003.
 9 Pan Xue, Peng Yujie, Wang Jiangfeng, *et al.*. Research on high-intensity picosecond pump laser in short pulse optical parametric amplification [J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30 (1): 014202.
 10 Zhang Panzheng, Fan Wei, Wang Xiaochao, *et al.*. Generation of 8.5 nJ pulse from all-fiber dispersion compensation-free Yb-doped laser[J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(8): 768-770.
 11 Chu Xiaoliang, Zhang Bin, Cai Bangwei, *et al.*. Study of the multipass amplification of the chirped pulse and its inverse problem[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(10): 4696-4700.
 楚晓亮, 张 彬, 蔡邦维, 等. 啁啾脉冲多程放大及其逆问题的研究[J]. *物理学报*, 2005, 54(10): 4696-4700.
 12 Ouyang Xiaoping, Zhang Fuling, Zhang Panzheng, *et al.*. Second order autocorrelation applied to femtosecond laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(3): 742-745.
 欧阳小平, 张福领, 张攀政, 等. 短脉冲激光的二阶自相关[J]. *中国激光*, 2009, 36(3): 742-745.
 13 Ouyang Xiaoping, Yang Lin, Peng Yonghua, *et al.*. Research on precise diagnostics for pico-second single shot pulse[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0408003.
 欧阳小平, 杨 琳, 彭永华, 等. 皮秒自相关仪的性能测试研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0408003.

栏目编辑: 胡 冰