

钕玻璃啁啾脉冲放大器产生百焦耳亚皮秒脉冲^{*}

谢旭东[†] 朱启华 曾小明 王 逍 黄小军 左言磊 张 颖 周凯南 黄 征

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 等离子体物理国家级重点实验室, 绵阳 621900)

(2009 年 1 月 9 日收到, 2009 年 2 月 16 日收到修改稿)

以钕玻璃为增益介质研制了高能啁啾脉冲激光放大器系统, 实验演示输出啁啾脉冲能量在百焦耳量级时, 光谱宽度保持在 4—6 nm, 最大能量 168 J, 相应谱宽 5.5 nm, 中心波长 1054 nm, 压缩脉冲宽度最短 710 fs.

关键词: 啁啾脉冲放大, 钕玻璃, 高能拍瓦

PACC: 4260

1. 引 言

啁啾脉冲放大技术(chirped pulse amplification, CPA)^[1]先将超短脉冲在时间上展宽然后在激光放大器内充分提取能量后再压缩回初始脉冲宽度, 既可以获得高能量的超短脉冲又避免了非线性破坏. 用掺钛蓝宝石晶体(Ti:sapphire)作为增益介质可以获得焦耳量级的飞秒脉冲(~ 30 fs)^[2-6], 在强场物理研究方面具有重要价值. 尽管钛宝石晶体的荧光光谱很宽, 但是其荧光寿命短(3.2 μ s, 需要蓝绿带激光如 Nd:YVO₄ 的倍频光来抽运), 高质量大口径晶体生长困难, 难以输出更高的脉冲能量. 当前在惯性约束聚变领域, 用钕玻璃(Nd:glass)作为增益介质的激光放大器可以产生数千焦耳以上的高能激光脉冲, 但是其脉冲宽度处于纳秒(10^{-9} s)尺度. 高密度物理研究如质子照相、X 射线照相、快点火等研究需要作为驱动源的激光脉冲的能量高达上千焦耳, 同时保持脉冲宽度在皮秒(10^{-12} s)、亚皮秒尺度. 因此用钕玻璃激光放大器系统获得高能超短脉冲是目前首选的研究方案之一. 钕玻璃的优点是光学质量好, 口径大, 激光输出能量高. 但是钕玻璃荧光带宽仅有 20—30 nm, 放大过程中钕玻璃有限增益带宽和增益窄化效应的影响相当严重, 要产生能量上千焦耳、脉宽 1 ps 以下的脉冲仍然具有相当的难度. 美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)用钕玻璃放大器

系统演示了 1.5 PW(10^{15} W)激光脉冲的产生^[7]. 本文采用啁啾脉冲放大技术以钕玻璃为激光增益介质研制了一套高能啁啾脉冲放大器系统, 数值模拟表明系统输出能量在百焦耳量级时相应的光谱宽度约 5 nm, 实验验证系统输出能量在百焦耳量级时, 光谱宽度保持在 4—6 nm, 最短压缩脉冲 710 fs, 输出最大能量 168 J, 相应的啁啾脉冲谱宽 5.5 nm.

2. 系统介绍及结果分析

高能啁啾脉冲激光放大器系统包括飞秒前端、展宽器、拼接光栅压缩器、钕玻璃放大器链和真空靶室(图 1). 前端采用超连续谱注入的飞秒光参量放大(optical parametric amplification, OPA)技术产生中心波长 1 μ m 的飞秒种子^[8], 可以改善纳秒尺度的信噪比. 单透镜单光栅展宽器将飞秒种子展宽为 2 ns/8 nm 的啁啾脉冲^[9]. 置于真空舱内的光栅压缩器将放大后的数百焦耳啁啾脉冲压缩到亚皮秒量级. 为了避免光栅损坏, 采用光栅拼接技术增大光栅通光口径^[10].

将 3 TW 钛宝石系统产生的飞秒激光分两束. 一束注入白宝石产生超连续谱, 其中包含与钕玻璃荧光光谱(磷酸盐玻璃, 中心波长 1053 nm)相匹配的光谱成分, 作为飞秒 OPA 的信号光; 另一束飞秒激光作为 OPA 的抽运光. 信号光与抽运光在原理上可以实现零同步. 飞秒 OPA 前端输出毫焦量级的宽带激光, 其带宽 25 nm, 中心波长被调谐到 1053 nm. 参

^{*} 国家高技术研究发展计划(863)(批准号 2006AA84502)资助的课题.

[†] E-mail: xiexudong76@yahoo.com.cn

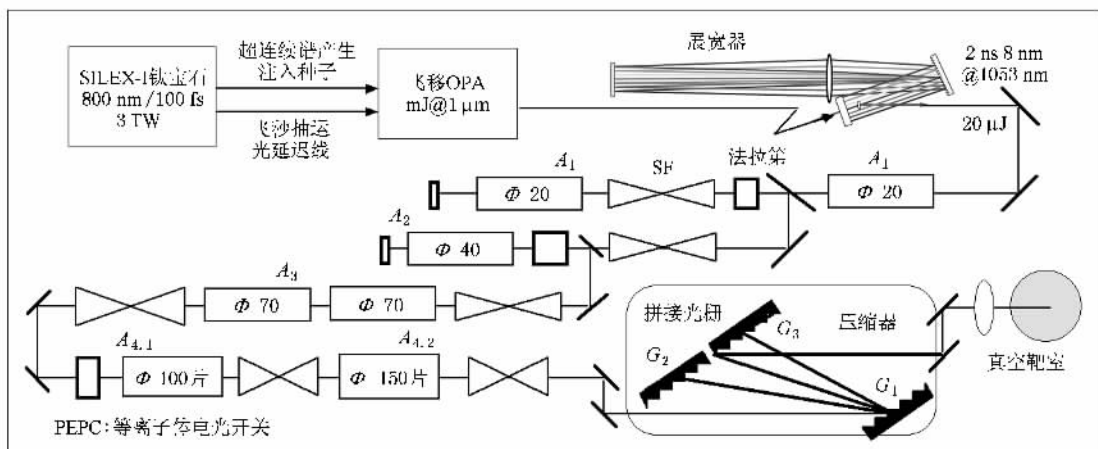


图 1 高能钨玻璃 CPA 系统示意图

量非线性过程受强度起伏的影响非常大, 输出光束近场调制明显. 通过充分衍射传输将其近场整形为具有高斯型空间分布的匀滑光束, 如图 2 所示, 这有利于补偿钨玻璃棒空间增益非均匀性. 整形后的宽带激光经过展宽器的时域展宽和光谱剪切(展宽器带通 8 nm), 成为脉宽 2 ns、带宽 8 nm 的啁啾脉冲. 其能量 20—30 μJ, 光谱形状接近平顶分布(图 2). 它将作为啁啾种子脉冲注入到钨玻璃放大链中充分提取能量达到百焦耳量级.

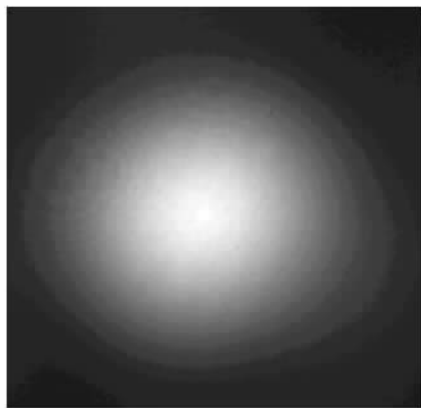


图 2 OPA 光束空间整形后近场

为实现百焦耳啁啾脉冲输出目标, 钨玻璃放大链需要提供 10^7 倍净增益. 钨玻璃放大链包括预放大级 ($2 \times \Phi 20$, $1 \times \Phi 40$ 和 $2 \times \Phi 70$ 共 3 级磷酸盐玻璃棒放) 和主放大级 ($\Phi 100$, $\Phi 150$ 四台片放共 20 张片磷酸盐玻璃片) 两部分, 放大器用氙灯抽运. 两台 $\Phi 20$ 高增益棒状放大器工作在小信号放大区域, 设计提供 10^4 — 10^5 倍增益. $\Phi 40$ 和 $\Phi 70$ 中间级提供 10^2 倍增益. 片状放大器提取能量工作在饱和放大

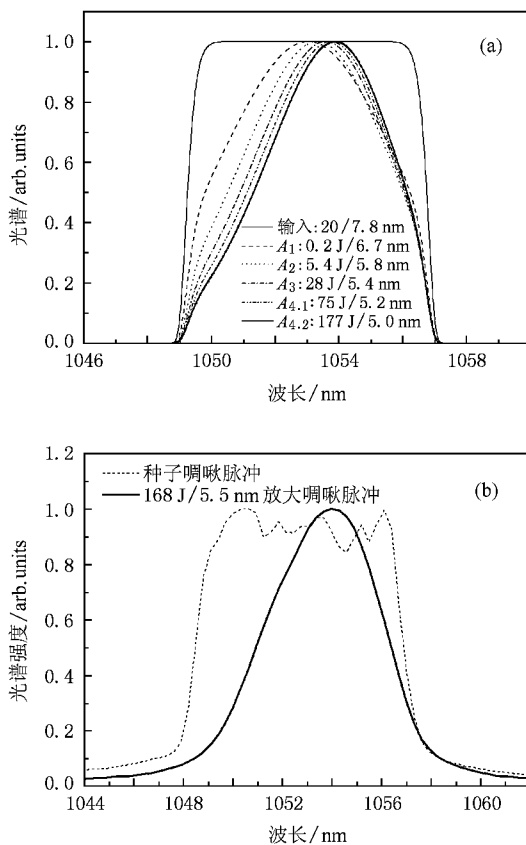


图 3 钨玻璃 CPA 光谱特性 (a) 模拟计算 (b) 实验结果(虚线是种子脉冲光谱, 实线是啁啾脉冲放大输出 168J 脉冲的光谱)

区域, 提供 ~10 倍增益, 系统透过率 10%.

由非线性薛定谔方程描述^[11,12]啁啾脉冲的放大动力学过程:

$$\frac{\partial E(z, t)}{\partial z} = g(\omega, t)E(z, t) + i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E(z, t)}{\partial t^2} - ik_0 n_2 |E(z, t)|^2 E(z, t), \quad (1)$$

其中小信号增益、增益窄化和增益饱和效应包含在 $g(\omega, t)$ 里. 根据初始条件, 钕玻璃的增益带宽约 20—30 nm, 注入啁啾脉冲 2 ns/8 nm 平顶分布, 能量 20 μ J. 模拟啁啾脉冲经过钕玻璃链放大后达到 100 J 量级时的输出光谱如图 3(a) 所示.

模拟计算表明: 在预放大阶段, 啁啾脉冲的光谱形状由超高斯型过渡到高斯型. 这是因为预放大级的两台 $\Phi 20$ 放大器 (A_1) 和 $\Phi 40$ 放大器 (A_2) 提供了约 10^6 倍增益, 强烈的增益窄化效应起主要作用, 导致光谱宽度相应变窄. 在后继的能量提取阶段总增益不到 100 倍, 增益窄化效益明显变弱, 增益饱和效应开始起作用, 啁啾脉冲的前沿消耗更多反转粒子数, 频谱红移, 而增益窄化效应则使啁啾脉冲频谱回归增益曲线的中心处. 在二者的共同作用下, 光谱窄化速度减慢, 如图 3(a) 所示. 全系统输出能量 177 J 时, 光谱近似高斯分布, 光谱半高全宽 (full width at half maximum, FWHM) 5 nm, 中心波长由 1053 nm 向 1054 nm 偏移.

在实验研究过程中, 先让钕玻璃放大器各级氙灯工作在较低的电压水平, 系统总增益相对较低, 调试系统状态完全正常后, 逐步提升氙灯的工作电压. 在系统正常工作电压时, 几十微焦的种子啁啾脉冲可以被放大到百焦耳量级, 光谱带宽保持在 4—6 nm. 图 4 所示, 光谱宽度的变化源于注入种子啁啾脉冲光谱及能量的起伏. 钕玻璃放大链产生的最大啁啾脉冲能量 168 J, 对应的光谱带宽 5.5 nm, 光谱形状接近高斯型, 如图 3(b) 所示. 理论设计及实验研究都验证了系统输出百焦耳量级宽带啁啾脉冲的能力.

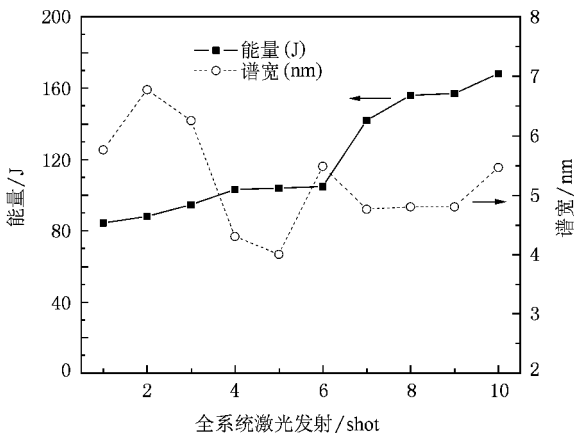


图 4 钕玻璃 CPA 系统百焦耳量级运转能量与带宽统计

被放大的啁啾脉冲宽度在纳秒尺度, 可以用条纹相

机精确测量其脉冲宽度, 结合光栅单色仪可以同时测量纳秒尺度啁啾脉冲的光谱与时间特性. 在百焦耳量级的啁啾脉冲进入拼接光栅压缩器之前, 先用光谱分辨的条纹相机测量其啁啾特性^[13], 有助于理解放大过程. 测量光路布局如图 5(a) 所示. 取样啁啾脉冲经过光栅一级衍射, 不同频谱按不同的衍射角度出射, 聚焦透镜将沿不同方向传输的频谱汇聚到其傅里叶频谱面. 进入条纹相机扫描变换得到脉冲频谱及其群延迟的二维图像. 条纹相机的入射狭缝与透镜傅里叶变换平面重合, 狭缝水平方向与光谱展开方向一致. 图 5(b) 就是光谱分辨条纹相机测量到的百焦耳量级啁啾脉冲的条纹图, 经过数据处理后可以获得啁啾脉冲包络内不同时刻对应的频谱 (图 5(c)), 即啁啾特性. 定义啁啾率为脉冲宽度与光谱宽度之比, 测量所得啁啾率 0.254 ns/nm 与展宽器输出啁啾脉冲 (2 ns/8 nm = 0.25 ns/nm) 的啁啾率一致, 且频率随时间线性变化表现出线性啁啾, 说明放大后的百焦耳量级的啁啾脉冲具有可压缩特性.

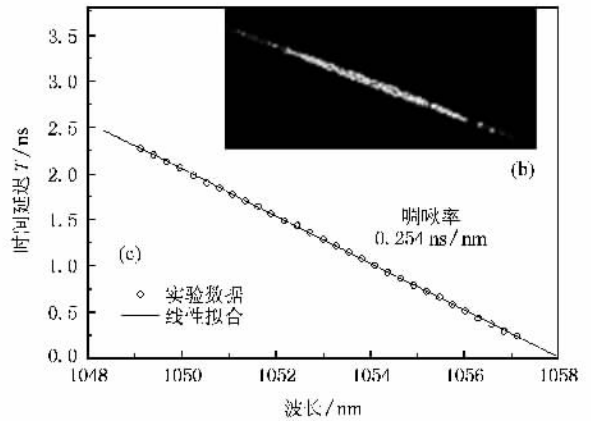
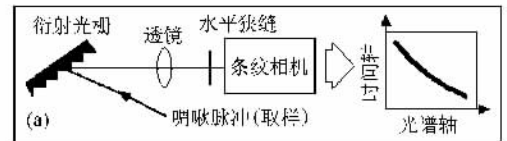


图 5 全系统工作时光谱分辨条纹图 (a) 测量原理图 (b) 光谱分辨条纹图 (实测) (c) 数据处理结果

放大后的啁啾脉冲进入光栅压缩器, 压缩器采用双光栅单程压缩构型 (图 1), 其中第二片光栅是合成口径光栅, 由两片较小口径的子光栅相干拼接而成^[10], 解决目前制造获得大口径光栅的难题. 拼接光栅压缩器将百焦耳量级的啁啾脉冲压缩到皮秒、亚皮秒尺度. 图 6 是采用单次自相关仪测量到的最短脉冲自相关曲线, 标定其脉冲宽度为 710 fs. 压缩器位于真空容器内, 与真空靶室相通. 到目前为

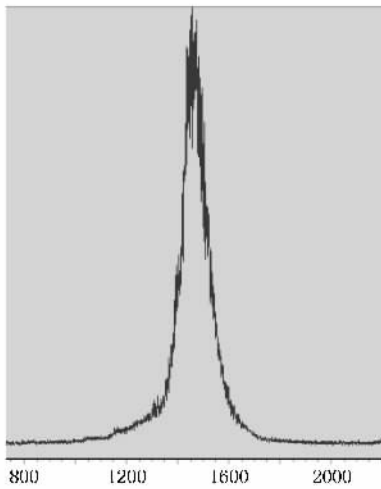


图 6 百焦耳级压缩脉冲单次自相关曲线(取样测量)标定结果为 710 fs

止,全系统已经为两轮物理实验提供了从几十焦耳到上百焦耳的压缩脉冲打靶。

3. 结 论

实验建立了高能钹玻璃啁啾脉冲放大器系统,超连续谱注入 OPA 前端能够实现注入光与抽运光的精确同步并改善激光信噪比,拼接光栅技术突破了压缩器大口径光栅瓶颈,从而实现了钹玻璃放大器系统输出百焦耳亚皮秒激光脉冲。系统在百焦耳量级运转时具有 4—6 nm 的带宽,具备输出 300 fs 压缩脉冲的潜力,最短压缩脉冲 710 fs。最大输出 168 J 啁啾脉冲,对应带宽 5.5 nm。这是目前国内报道的高能短脉冲的最好结果。

- [1] Strickland D , Mourou G 1985 *Opt. Commun.* **55** 447
- [2] Peng H S , Huang X J , Zhu Q H *et al* 2004 *Proc of SPIE* **5627** 1
- [3] Wei Z Y , Wang Z H , Wang P *et al* 2008 *Journal of Physics : Conference Series* **112** 032003
- [4] Aoyama M , Yamakawa K , Akahane Y , Ma J , Inoue N , Ueda H , Kiriya H 2003 *Opt. Lett.* **28** 1594
- [5] Liang X Y , Leng Y X , Wang C *et al* 2007 *Opt. Exp.* **15** 15336
- [6] Yanovsky V , Chykov V , Kalinchenko G 2008 *Opt. Exp.* **16** 2109
- [7] Perry M D , Pennington D , Stuart B C *et al* 1999 *Opt. Lett.* **24** 160
- [8] Zhang X M , Fan D Y , Zeng X M , Wei X F , Huang X J , Wang X , Zhu O H , Qian L J 2006 *Opt. Lett.* **31** 646
- [9] Wang X , Zhu Q H , Lin D H , Huang X J , Zeng X M , Zhou K N , Wang F , Jiang D B , Xu B , Liu L Q , Xie X D , Wang X D , Guo Y 2006 *Chinese. J. Lasers* **33** 895 (in Chinese) [王 道、朱启华、林东晖、黄小军、曾小明、周凯南、王 方、蒋东镇、徐 冰、刘兰琴、谢旭东、王晓东、郭 仪 2006 中国激光 **33** 895]
- [10] Zuo Y L , Wei X F , Zhu Q H , Liu H J , Wang X , Huang Z , Guo Y , Ying C T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5233 (in Chinese) [左言磊、魏晓峰、朱启华、刘红婕、王 道、黄 征、郭 仪、应纯同 2007 物理学报 **56** 5233]
- [11] Chuang Y H , Zheng L , Meyerhofer D D 1993 *IEEE J. QE* **29** 270
- [12] Zhang Y , Wei X F , Zhu Q H , Xie X D , Wang F R , Zeng X M , Ying T C , 2008 *Acta. Opt. Sin.* **9** 1767 (in Chinese) [张 颖、魏晓峰、朱启华、谢旭东、王凤蕊、曾小明、应纯同 2008 光学学报 **9** 1767]
- [13] Xie X D , Wang X , Zhu Q H *et al* 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6463 (in Chinese) [谢旭东、王 道、朱启华 等 2007 物理学报 **56** 6463]

Generation of 100-J sub-picosecond laser pulse in high energy Nd :glass chirped pulse amplification system^{*}

Xie Xu-Dong[†] Zhu Qi-Hua Zeng Xiao-Ming Wang Xiao Huang Xiao-Jun

Zuo Yan-Lei Zhang Ying Zhou Kai-Nan Huang Zheng

(National Key laboratory of laser Fusion , Research Center of Laser Fusion , CAEP , Mianyang 621900 , China)

(Received 9 January 2009 ; revised manuscript received 16 February 2009)

Abstract

Generation of high energy sub-picosecond laser pulse was demonstrated in the Nd :glass chirped pulse amplification system. Seeded with pulse originating from OPA front end , the laser system output chirped pulse with maximum energy up to 168 J , and the spectral width was 5.5 nm(FWHM) , centering at 1054 nm. Systematic investigation showed the spectral width of pulses was about 4—6 nm with energy higher than 100 J , which supports high energy laser pulse with pulse duration less than 300 fs. The final pulse was compressed to as short as 710 fs by a mosaic grating compressor.

Keywords : chirped pulse amplification , Nd :glass amplifier , high energy petawatt

PACC : 4260

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA84502).

[†] E-mail : xiexudong76@yahoo.com.cn