

1 kHz-0.1 TW 高效率钛宝石激光放大器*

刘 军† 李小芳 陈晓伟 姜永亮 李儒新 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

(2006 年 6 月 13 日收到, 2006 年 7 月 19 日收到修改稿)

介绍了一种高重复频率掺钛蓝宝石飞秒激光多通高效率放大系统. 在抽运功率为 23 W, 入射功率为 660 mW 时, 获得 7.2 W 的放大输出, 放大效率达 30%. 经压缩器压缩后, 获得单脉冲能量 4.5 mJ, 脉冲宽度为 38 fs, 重复频率为 1 kHz, 峰值功率大于 0.1 TW 的超短超强激光脉冲.

关键词: 飞秒脉冲, 高重复频率, 啁啾脉冲放大

PACC: 4260, 4260B, 4260F

1. 引 言

近 20 年来, 由于在 X 射线激光、等离子物理、激光离子加速器以及阿秒脉冲产生等前沿研究领域的重要应用^[1,2], 高强度超短激光脉冲的产生获得很大的发展. 利用啁啾脉冲放大技术^[3], 人们已经能够在实验室里获得重复频率为 10 Hz, 峰值功率达 0.85 PW 的激光脉冲^[4]. 由于在高次谐波产生、超短激光表面物理、激光微加工等领域, 稳定性好的高重复频率高平均功率的激光脉冲更为重要. Backus 等人^[5]利用液氮冷却晶体的方法, 在 26.5 W 抽运下成功将 0.7 mJ 脉冲放大到 6.7 mJ. Seres 等人^[6]利用制冷机冷却晶体的方法, 25 W 抽运情况下, 将 0.5 mJ 脉冲放大到 3.8 mJ, 并压缩获得 < 10 fs 脉冲. 相对于前面的研究, 本文利用压缩制冷机冷却晶体, 通过优化光路结构给出了一种高效率激光放大器. 在 23 W 抽运情况下, 将 0.66 mJ 脉冲放大到 7.2 mJ, 放大效率达 30%. 通过一声光调制器进行光谱整形, 我们最后获得 < 40 fs 超短激光脉冲.

2. 实验装置

我们的实验装置图如图 1 所示. 装置前端主要由自锁模态宝石激光振荡器输出脉宽约为 35 fs, 半高全宽约为 35 nm 的飞秒激光脉冲, 经过可编程声

光散射滤波器(acousto-optic programmable dispersive filter, AOPDF)(Fastlite 公司产品, 型号: DAZZLER)调制光谱, 再经过脉冲展宽器展宽到约 90 ps, 最后在再生放大器中放大(Spectra-physics 公司产品, 型号: Spitfire50fs). 再生放大器输出约 1 mJ 的激光脉冲经过透镜缩束, 进入四通放大器进一步放大激光脉冲能量. 放大的激光脉冲经过扩束系统扩束后进入压缩器压缩获得飞秒激光脉冲输出.

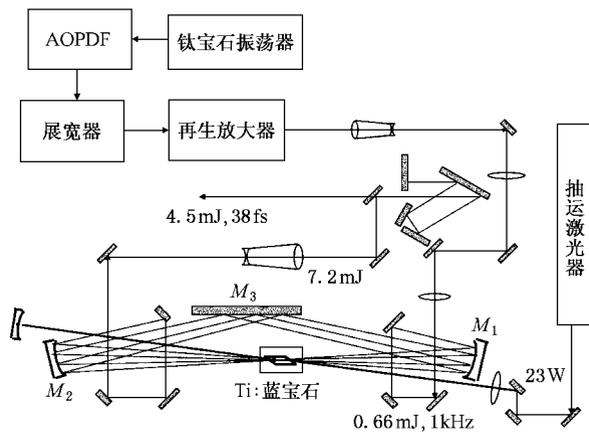


图 1 放大器装置的光路图

3. 实验及结果讨论

在多通放大级中, 抽运激光器为一商用灯泵 Q 开关频率倍频 Nd:YLF 激光器(Quantronix 公司产品

* 国家自然科学基金(批准号: 69925513, 19974058)和上海市科学技术委员会基础研究重大项目资助的课题.

† E-mail: jliu@siom.ac.cn

型号:Falcon-527-40-M).激光器输出的激光波长为 527 nm,重复频率为 1 kHz,单脉冲最高能量为 25 mJ,能量稳定性 < 2%.抽运激光通过透镜组合聚焦在 $\phi 10 \times 12$ mm 布鲁斯特角切割的掺钛蓝宝石晶体上.晶体对抽运光的单程吸收约为 90%,透过晶体的抽运绿光再用凹面反射镜再聚焦抽运在晶体上.在晶体上,抽运光的光束口径约为 1.3 mm.钛宝石晶体侧面裹有一层 0.1 mm 厚的铜片并用紫铜架夹住固定.很软的铜片可以使晶体表面与铜片很好的接触从而有利于晶体和紫铜架之间的热传导.我们使用紫铜是因为紫铜的导热性能好.紫铜架子被安装固定在低温制冷机的冷头(IGC Polycold Systems Inc. 产品,型号:Cryotiger-PT30)上.同时,在紫铜架接触晶体的侧面安装一个低温温度传感器来监测晶体表面温度.钛宝石晶体被冷却到 142 K,从而有效地减少了晶体热畸变,极大地提高了晶体热导率,并降低了热致折射率系数,减弱了晶体的热透镜效应^[5-8].在放大过程中,晶体的温度上下浮动小于 0.2 K.为了防止低温下空气中的水汽凝结在钛宝石晶体表面散射激光而降低透过率,冷头和晶体被置于真空腔体内.真空腔两端的通光窗口为布鲁斯特角设计窗口.真空室通过一个干泵和一个分子泵组成的真空泵机组(Varian 公司产品,型号:Task Turbo V 70LP)来抽真空.真空的环境同时也减弱了冷头与真空腔体之间的热传导,提高了冷头的有效冷却功率.

四通放大器光路主要由两块共焦的凹面反射镜 M_1 , M_2 , 平面反射镜 M_3 和钛宝石晶体组成.凹面反射镜上的光线夹角约为 12° ,这样可以补偿由于布鲁斯特角与偏离光轴的凹面反射镜带来的像散^[9].我们设计让 M_1 曲率半径比 M_2 曲率半径大, M_1 的曲率半径为 1400 mm, M_2 的曲率半径为 1200 mm.这样随着入射激光在放大器内传播, M_1 上的光斑逐级减小而聚焦在钛宝石晶体上的光斑逐级增大,从而防止了等曲率半径设计中的由于激光能量增加而使激光功率密度随放大次数增加而导致的饱和效应,有效地提高了激光提取效率.在入射激光脉冲能量为 0.66 mJ,抽运能量为 23 mJ 时,我们获得了单脉冲能量为 7.2 mJ 的激光输出.激光提取效率达 30%.放大输出的激光能量稳定性 < 2%.放大的激光经过扩束系统扩束到约 12 mm 口径,再输入到压缩器.压缩器光栅刻线为 1500 ln/mm,这与展宽器光栅刻线为 1200 ln/mm 不配对.这样是因为利用刻线

不配对光栅可以优化补偿高阶位相^[10],同时通过结合 AOPDF 预补偿高阶色散,可以获得好的脉冲压缩效果.

利用 F-N 方程^[11],我们数值模拟了放大输出的激光能量随入射激光能量和抽运功率的变化关系.图 2(a)给出了,在抽运能量为 23 W 的情况下,放大输出随入射能量的变化关系曲线.其中,实线为数值模拟结果,三角形点为实验数据.随入射能量的增加,实验结果显示放大出现的饱和效应往后推移,这得益于光路的优化结构设计.图 2(b)给出了,在入射能量为 0.66 mJ 的情况下,放大输出的激光能量随抽运能量的变化关系曲线.图中低抽运功率情况下,实验结果远低于模拟结果.这是因为我们通过改变激光器电流来控制抽运功率,这样在低电流下抽运功率低,抽运光的脉冲宽度增加.在延时不变的情

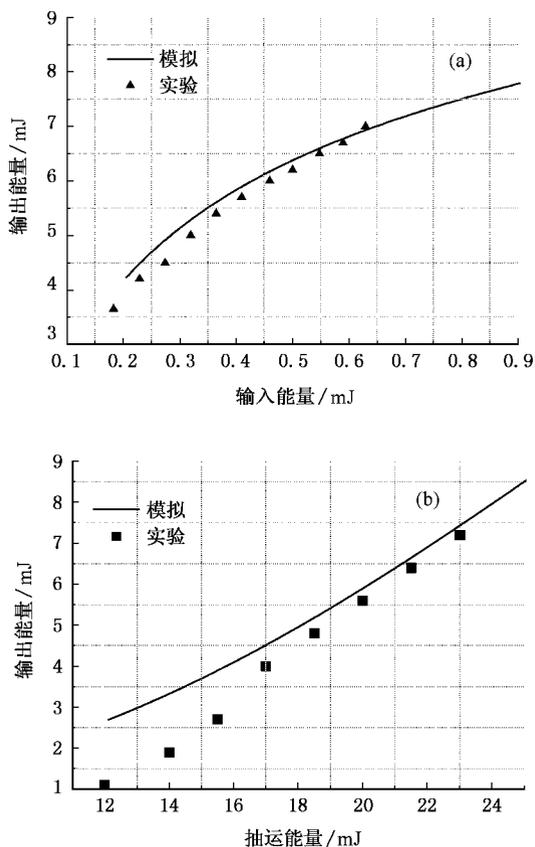


图 2 (a)放大输出激光能量随入射激光能量的变化关系 (b)放大输出激光能量随抽运激光能量的变化关系

况下,抽运光与入射激光之间的延时在低功率情况下不为最好,从而降低了提取效率.由图 2 可以预见,将来通过优化抽运激光器,在抽运功率为 25 W 和更高入射激光能量下,将有可能获得 > 8 W 的放

大输出.同时通过优化压缩器,提高压缩效率后,将有可能获得压缩后 > 5 mJ 的激光输出.

激光脉冲在再生放大过程中,会由于高增益放大而导致增益窄化^[12].在我们的系统中,当 AOPDF 未加光谱调制时,再生放大输出激光光谱的半高全宽度由振荡器输出的 35 nm 窄化为约 22 nm.经过多通放大后输出的激光光谱如图 3(a)细点线所示,激光光谱半高全宽度约为 22 nm.经过压缩器压缩后获得 52 fs 的激光脉冲,如图 3(b)实线所示.为了抑制再生放大过程中的增益窄化,获得更短的激光脉冲,一个有效的方法在放大前的激光光谱上光谱调制,使调制后的光谱为中心凹陷的马鞍形来预补偿增益窄化.我们在 AOPDF 加上光谱调制后,再生输

出光谱如图 3(a)短线所示,激光光谱半高全宽度约为 36 nm.多通放大输出的激光光谱如图 3(a)实线所示,激光光谱半高全宽度未变,光谱因为饱和放大而稍微有红移.放大后激光经过压缩器压缩后获得约 38 fs 的飞秒激光脉冲,如图 3(b)虚线所示.由图 3(a)可见经过优化补偿后的激光光谱相位较平坦.其中,脉冲与相位直接由电场重建光谱相位干涉超短脉冲测量仪(spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction, SPIDER (APE 公司产品))测量.光谱为美国 Ocean-Optics 公司的商用光纤光谱仪测得.同时我们用 CCD(LBA-300PC)测量了放大后的激光模式如图 3(b)所示,可见放大后的激光具有较好的光斑模式,同时具有好的光束质量.

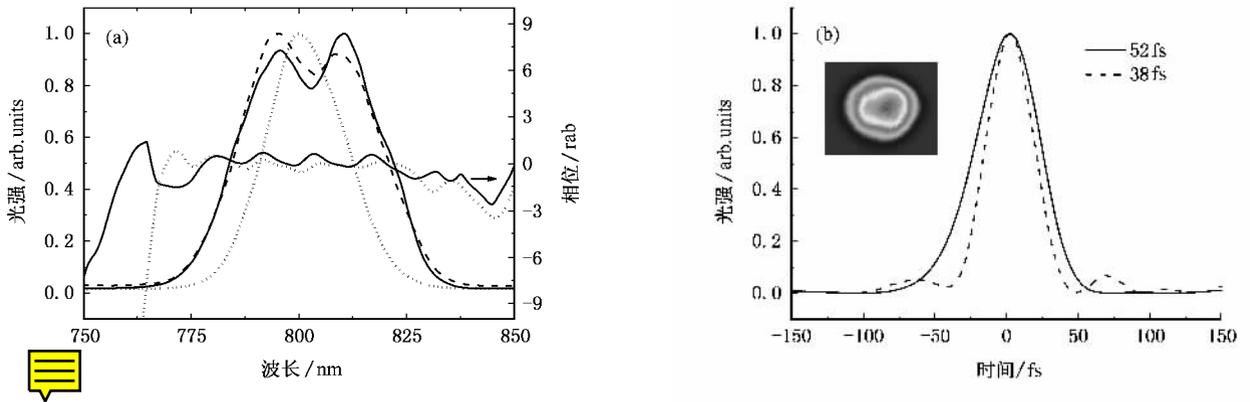


图 3 (a)放大输出激光脉冲光谱及相位 (b)压缩后激光脉冲形状(插图为输出激光光斑模式)

4. 结 论

通过优化光路结构,以及对入射激光进行光谱整形,我们研制成功了一台重复频率为 1 kHz 的高效率多通掺钛蓝宝石激光放大器.在抽运功率仅为 23 W 的情况下,我们获得了 7.2 W 稳定的放大输出,提取效率达 30%.经过压缩后,我们获得了能量

为 4.5 mJ,脉冲宽度为 38 fs,峰值功率 > 0.1 TW 高重复频率的超短超强激光脉冲.通过提高抽运功率和入射激光能量及压缩效率,我们将有可能获得 > 5 mJ 压缩输出.并且通过腔外脉冲压缩技术,有望在不久的将来获得 < 10 fs, > 1 mJ 的超短脉冲输出.这种激光器将为在超短脉冲激光微加工,高次谐波,阿秒脉冲产生等许多强场物理实验提供了有效的工具.

- [1] Brabec T, Krausz F 2000 *Rev. Mod. Phys.* **72** 545
 [2] Backus S, Durfee C G, Murnane M M, Kapteyn H C 1998 *Rev. of Sci. Instru.* **69** 1207
 [3] Strickland D, Mourou G 1985 *Opt. Commun.* **56** 219
 [4] Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y, Ma J, Inoue N, Ueda H, Kiriya H 2003 *Opt. Lett.* **28** 1594
 [5] Backus S, Durfee III C G, Mourou G, Kapteyn H C, Murnane M M 1997 *Opt. Lett.* **22** 1256

- [6] Seres J, Müller A, Seres E, O'Keeffe K, Lenner M, Herzog R F, Kaplan D, Spielmann C, Krausz F 2003 *Opt. Lett.* **28** 1832
 [7] Zhavoronkov N, Korn G 2004 *Opt. Lett.* **29** 198
 [8] Backus S, Bartels R, Thompson S, Dollinger R, Kapteyn H C, Murnane M M 2001 *Opt. Lett.* **26** 465
 [9] Kogelnik H W, Ippen E P, Dienes A 1972 *IEEE J. Quantum Electron.* **8** 373
 [10] J Squier, Salin F, Barty C P J, Blanc C L, Kane S 1998 *Appl. Opt.* **37** 1638

- [11] Frantz L M , Nodvik J S 1963 *J. Appl. Phys.* **34** 2346
[12] Cao D M , Wei Z Y , Teng H , Xia J F , Zhang J , Hou X 2000 *Acta*

Phys. Sin. **49** 1202 (in Chinese) 曹东茂、魏志义、滕浩、夏江帆、张杰、侯洵 2000 *物理学报* **49** 1202]

1 kHz-0.1 TW high efficiency Ti :sapphire laser amplifier^{*}

Liu Jun[†] Li Xiao-Fang Chen Xiao-Wei Jiang Yong-Liang Li Ru-Xin Xu Zhi-Zhan

(*State Key Laboratory of High Field Laser Physics , Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics ,
Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China*)

(Received 13 June 2006 ; revised manuscript received 19 July 2006)

Abstract

A Ti :sapphire multipass amplifier with high efficiency at the repetition of 1 kHz is described. The incident 0.66 W pulses are amplified to 7.2 W when the pump power is 23 W. The energy extraction efficiency is about 30%. After compressed in the compressor , we obtained 4.5mJ , 38fs pulses with peak power greater than 0.1 TW.

Keywords : femtosecond pulse , high repetition rate , chirped pulse amplification

PACC : 4260 , 4260B , 4260F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos.69925513 and 19974058) , and the Major Basic Research Project of Shanghai Commission of Science and Technology.

[†] E-mail : jliu@siom.ac.cn