

18 mJ, 100 Hz 飞秒钛宝石激光放大器

张伟 滕浩 沈忠伟 何鹏 王兆华 魏志义

A 18 mJ femtosecond Ti:sapphire amplifier at 100 Hz repetition rate

Zhang Wei Teng Hao Shen Zhong-Wei He Peng Wang Zhao-Hua Wei Zhi-Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 224204 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.224204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高功率梯度掺杂增益光纤温度特性理论研究

Theoretical study of the temperature distribution in high power gain fiber of gradient doping

物理学报.2016, 65(10): 104204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104204>

外腔共振和频系统中阻抗匹配的理论研究

Theoretical investigation of impedance matching in the process of sum-frequency generation in an external resonator

物理学报.2016, 65(4): 044207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044207>

面向谐振式微光学陀螺应用的球形谐振腔 DQ 乘积优化

Optimization of microsphere's DQ product based on resonant micro-optical gyro

物理学报.2015, 64(15): 154206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154206>

基于新型三环谐振器的诱导透明效应分析

Analysis of induced-transparency in an original three-order resonator system

物理学报.2015, 64(14): 144202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144202>

温度测量范围加倍的单微环传感器

Doubled temperature measurement range for a single micro-ring sensor

物理学报.2014, 63(15): 154209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154209>

18 mJ, 100 Hz 飞秒钛宝石激光放大器*

张伟^{1)†} 滕浩²⁾ 沈忠伟²⁾ 何鹏²⁾ 王兆华²⁾ 魏志义^{2)‡}

1) (首都医科大学附属北京同仁医院, 北京同仁眼科中心, 北京市眼科研究所; 北京市眼科学与视觉科学重点实验室; 国家眼科诊断与治疗工程技术研究中心, 北京 100005)

2) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

(2016年9月12日收到; 2016年10月10日收到修改稿)

采用环形腔再生放大及四通放大的两级放大方案, 在重复频率100 Hz、单脉冲能量75.1 mJ的倍频Nd:YAG激光抽运下, 通过啁啾脉冲放大飞秒钛宝石激光, 获得了单脉冲能量25.4 mJ的放大输出, 对应能量转换效率33.8%. 经光栅压缩器补偿色散后的单脉冲能量为18.3 mJ, 脉冲宽度为37.8 fs, 对应峰值功率0.48 TW. 测量其脉冲能量稳定性为3.6%, 光束质量 M^2 因子在 X 和 Y 方向上分别为1.8, 1.6.

关键词: 啁啾脉冲放大, 飞秒激光脉冲, 再生放大, 多通放大

PACS: 42.60.-v, 42.60.Da, 42.60.Lh, 42.65.Re

DOI: 10.7498/aps.65.224204

1 引言

随着啁啾脉冲放大(chirped-pulse amplification, CPA)技术的发明^[1], 超快激光朝高能量、高峰值功率的方向迅速发展, 在强场物理、化学、生物医学等领域的应用也越来越广泛^[2-4]. 基于钛宝石的CPA飞秒放大系统已经实现了太瓦(TW, 10^{12} W)、拍瓦(PW, 10^{15} W)量级的峰值功率输出^[5,6], 极大地推动了强场物理的研究进展, 在实验室天体物理、粒子加速等领域获得了成功应用^[7,8]. 然而这种高峰值功率的CPA系统重复频率多在100 Hz以下, 如10 Hz, 1 Hz甚至更低, 且此类设备体积庞大, 造价昂贵, 仅少数实验室拥有, 难以获得广泛应用.

1 kHz以上重复频率的飞秒钛宝石激光放大系统, 以其重复频率高、体积小、成本低, 获得了广泛应用及推广^[9-12]. 其中, 基于高重复频率飞秒激光放大器开展的阿秒脉冲及高次谐波实验备受关注, 成为超快领域最前沿的研究热点之一^[13,14]. 但能量转化效率低^[15], 一直是制约阿秒脉冲应用的

瓶颈之一. 通过提高驱动激光的脉冲能量提高阿秒脉冲的能量是一种简单有效的途径. 然而受限于1 kHz高功率半导体抽运源热效应影响及脉冲能量限制, 作为阿秒脉冲产生实验的驱动光源——1 kHz及以上重复频率的飞秒放大激光的单脉冲能量目前仍难以大幅度提升. 适当降低对放大后激光脉冲重复频率的要求, 采用高能量的抽运激光, 是获得高单脉冲能量、高峰值功率飞秒激光脉冲的一种有效方案, 也是近年来提高阿秒脉冲能量的新的突破方向^[16]. 100 Hz重频的闪光灯抽运Nd:YAG激光器虽然重复频率稍低, 但具有极高的输出能量, 且成本较低, 倍频后的波长为532 nm, 正是飞秒钛宝石激光放大的理想抽运波长.

因此, 本文开展了采用闪光灯抽运倍频Nd:YAG激光作为抽运源的100 Hz重复频率、高单脉冲能量的小型化飞秒钛宝石激光放大的实验研究. 本研究采用1 kHz再生放大作为前级预放大、100 Hz四通放大作为主放大的两级放大方案, 设计实施了重复频率为100 Hz的飞秒钛宝石激光放大器的实验研究. 将再生放大输出的未压缩、能

* 国家重大科学仪器设备开发专项基金(批准号: 2012YQ120047)和国家自然科学基金(批准号: 11434016)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangwei0724@163.com,

‡ 通信作者. E-mail: zywei@iphy.ac.cn

量为3 mJ的1 kHz激光脉冲,选单至100 Hz,通过一级四通放大,在75.1 mJ抽运能量下,将单脉冲能量放大到25.4 mJ,对应的转化效率为33.8%.经光栅压缩器补偿色散压缩后获得了单脉冲能量为18.3 mJ、脉宽为37.8 fs、峰值功率0.48 TW的放大激光输出,为开展高通量阿秒及高次谐波研究提供了高能驱动光源.系统结构紧凑,占用平台尺寸仅1.8 m × 1.5 m,也可作为TW或PW系统的前级放大方案.

2 实验装置

100 Hz重复频率飞秒钛宝石激光放大系统的整体光路示意图见图1,包括振荡器、马丁内兹展宽器、再生预放大器、四通主放大器、压缩器、100 Hz闪光灯抽运Nd:YAG激光抽运源Quanta-Ray (Lab-190, Spectra-Physics Inc.).其中振荡器输出的脉冲脉宽为20 fs,光谱半高宽为61 nm,重复频率为80 MHz,经马丁内兹型展宽器展宽至200 ps. 1 kHz再生预放大采用环形腔,由凹面镜M1, M2, M3, M4组成四镜环形腔,腔内普克尔

盒PC1及格兰棱镜P1, P2负责种子脉冲导入和放大脉冲导出.其抽运光为1 kHz、527 nm半导体激光,放大导出后光谱半高宽约为41 nm,支持30 fs的傅里叶变换极限脉宽.再生放大部分与前期实验方案类似^[17],但腔内普克尔盒PC1采用的是单脉冲普克尔盒(5046 ER, Fastpulse Technology, Inc.).主放大为四通多通放大器,采用了口径10 mm × 10 mm,长8 mm的钛宝石晶体,晶体置于底部通水的紫铜晶体夹中,并通过循环水制冷至10 °C.主放大抽运源输出重复频率为100 Hz,标称单脉冲能量最高100 mJ的532 nm绿光,脉冲宽度10 ns.

振荡器镜片透射的漏光由光电探头采集测量其重复频率,该信号的重复频率为80 MHz.将该信号经分频、延时电路分为若干1 kHz, 100 Hz的信号,用于同步再生放大中的1 kHz抽运源,两个普克尔盒PC1, PC2开启与关闭,主放大中的Quanta-Ray抽运源闪光灯开启时间与调Q开关时间.各路分频信号的相对延时及频率可调,用于同步控制各路触发信号,以达到最佳的放大效果.

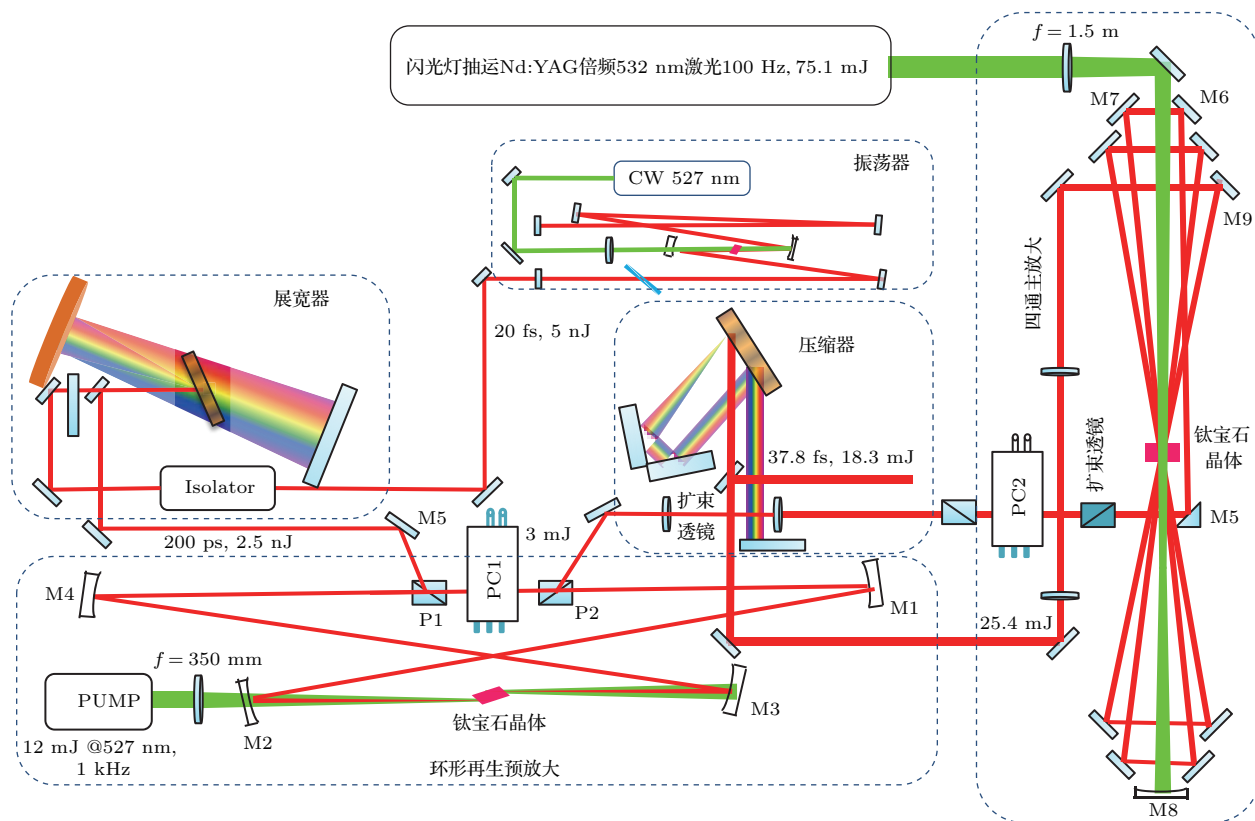


图1 (网刊彩色) 100 Hz重复频率的飞秒钛宝石激光放大系统光路示意图

Fig. 1. (color online) Schematic of the 100 Hz Ti: sapphire amplifier system.

振荡器平均功率为400 mW, 种子光单脉冲能量为5 nJ. 经展宽器展宽后, 脉宽为200 ps, 展宽器能量传输效率为50%. 展宽后的种子光以S偏振态注入环形再生腔时仍有2.5 nJ的单脉冲能量. 在中心波长为527 nm、单脉冲能量为12 mJ, 重复频率1 kHz的脉冲激光抽运下, 种子光经再生放大器放大后可以获得3 mJ的单脉冲能量. 将光束直径由1.5 mm扩束准直至2.2 mm, 不经过压缩器, 直接进入外置的普克尔盒PC2, 重复频率选单至100 Hz. 主放大中的100 Hz抽运光经焦距为1.5 m的透镜聚焦, 焦点位于钛宝石晶体后约30 cm, 而不是直接聚焦在晶体上. 因为抽运源 Quanta-Ray 输出脉冲宽度仅10 ns, 晶体表面处光斑太小时, 峰值功率太强容易损伤晶体. 实际使用抽运光斑大小约为2.5 mm, 抽运能量密度最大为1.6 J/cm². 75.1 mJ的抽运光一次通过钛宝石晶体后, 仍能透过约10 mJ, 采用曲率半径为750 mm的0°、532 nm镀膜凹面反射镜M8 收集剩余抽运光, 并再次汇聚至钛宝石晶体以提高抽运能量.

待放大的光脉冲经直角棱镜M5斜面反射至平面镜M6, 再由平面镜M7反射至钛宝石晶体(镜片均为S偏振态45°高阈值宽带镀膜反射镜), 与抽运光在时间和空间上重合, 获得第一程放大, 单脉冲能量提升至5.0 mJ, 随后依次通过钛宝石晶体三次, 进行多通放大, 每经过一次放大, 单脉冲能量分别提升为12.2 mJ, 18.6 mJ, 25.4 mJ. 四通放大以后放大能量已达饱和, 即使再增加放大程数, 放大后能量也不再有明显提升. 四通放大后激光脉冲由平面镜M9导出, 经扩束准直后导入至光栅压缩器. 光栅压缩器采用单光栅结构(光栅刻线密度为1500 线/mm), 通过两平面镜折叠成像构成平行光栅对, 实现对200 ps激光脉冲的压缩. 压缩器的能量传输效率为72%, 压缩后输出的光束直径为10 mm.

3 实验结果与分析

抽运脉冲能量与四通放大后的脉冲能量对应关系如图2所示, 在40 mJ以内的抽运能量下, 放大倍数低, 转换效率较低. 随着抽运能量的提高, 放大脉冲能量及转换效率均有所提高. 抽运能量达到最高75.1 mJ时, 放大后的最高脉冲能量为25.4 mJ, 对应的能量转换效率为33.8%. 经压缩后

可以以最高18.3 mJ的单脉冲能量输出. 实验受限于抽运激光脉冲能量, 如果抽运脉冲能量能继续提高, 放大脉冲能量仍有一定提升空间.

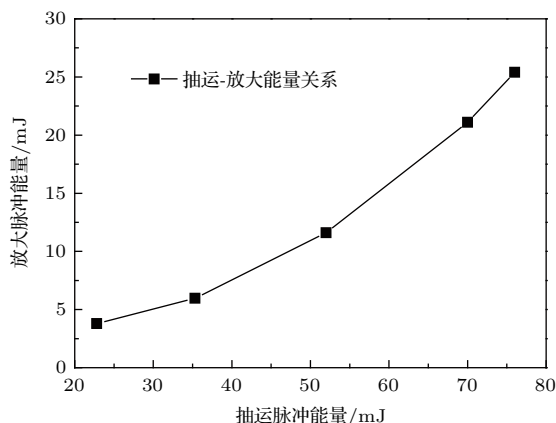


图2 抽运激光-放大激光脉冲能量关系

Fig. 2. Amplified energy as a function of pump energy.

闪光灯抽运源也有一定缺陷, 如输出光斑质量差(呈现为明显的多层圆环状高阶模式)、输出脉冲能量稳定性差等. 放大激光脉冲能量与抽运源脉冲能量的稳定性如图3所示, 100 Hz抽运源输出的10000发脉冲的能量抖动为3.4% (root mean square, RMS均方根与均值之比). 由1 kHz再生预放大器输出的脉冲能量抖动为0.31%, 而经过多通放大后脉冲能量抖动达到了3.6%, 这主要是由100 Hz闪光灯抽运源脉冲能量的抖动较大造成的. 为了获得更佳的脉冲能量稳定性, 下一步拟替换为更为稳定的100 Hz闪光灯抽运源或半导体激光抽运的抽运源, 有望实现更加稳定的放大脉冲能量输出.

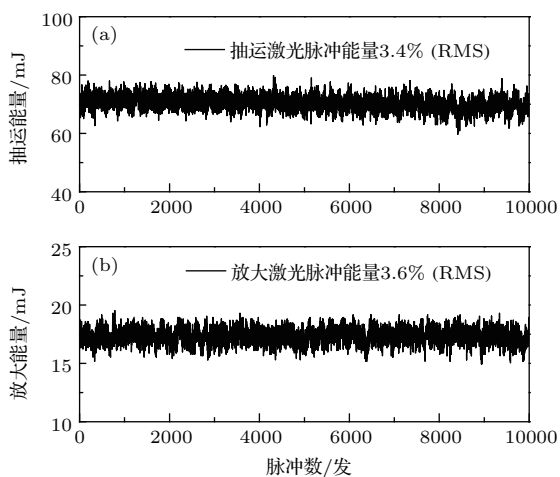


图3 (a) 抽运脉冲能量稳定性; (b) 放大压缩后的脉冲能量稳定性

Fig. 3. (a) Pulse energy stability of the pump source; (b) pulse energy stability after compressor.

1 kHz 再生放大器输出的光束质量 M^2 因子, 在 X, Y 方向分别为 1.4 和 1.3, 而通过 100 Hz 主放大后由于每一通与抽运光均有夹角, 且 100 Hz 抽运源输出的光斑为多模, 其光束质量对放大光的光

束质量有一定影响, 最终经过主放大和压缩器后的光束在 X, Y 方向的 M^2 因子分别为 1.8 和 1.6, 如图 4 所示 (其中光斑插图均为近场及远场光斑, 右下插图均为再生预放大输出的光束 M^2 因子).

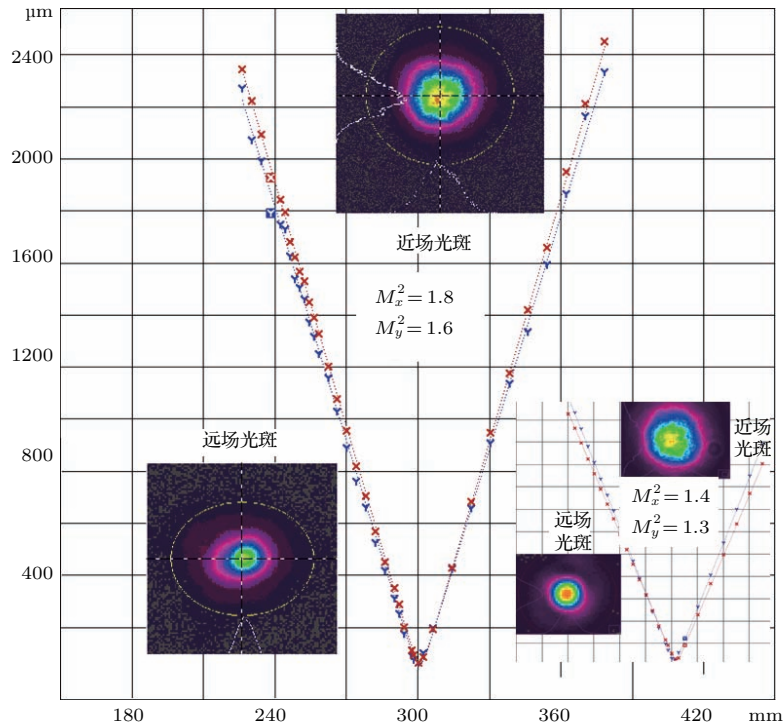


图 4 (网刊彩色) 放大脉冲压缩后的远场、近场光斑及光束质量 M^2 因子 (右下插图为再生预放大光束质量 M^2 因子; 其中 X, Y 方向曲线分别以红色 X 及蓝色 Y 标记)

Fig. 4. (color online) Near-field and far-field beam profiles and M^2 factor of the compressed pulse (The insert shows M^2 factor of the regenerative amplifier. X and Y direction lines are marked as alphabet X and Y).

振荡器输出的种子光光谱半高宽约为 61 nm, 中心波长 812 nm, 且在此处光谱有凹陷, 此凹陷有利于补偿放大过程中的增益窄化. 然而在后续再生及多通放大过程中, 仍不可避免地受镜片镀膜带宽及增益窄化效应的影响, 光谱半高宽有一定程度的窄化. 放大后输出光谱半高宽降为 39 nm, 中心波长为 814 nm, 如图 5 所示. 此时的光谱仍可以支持最短 32.8 fs 的傅里叶变换理论极限脉宽.

点经高斯拟合后, 脉宽显示为 37.8 fs, 如图 6 所示. 压缩后的峰值功率为 0.48 TW, 而系统占用平台仅 $1.8 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, 是一套小型化的 TW 量级飞秒放大

压缩器采用的是单光栅四通结构, 通过折叠镜成像构成平行光栅对压缩器 (光栅刻线密度为 1500 线/mm). 放大光扩束后直径 10 mm, 脉冲能量 25.4 mJ, 在光栅上的能量密度为 32 mJ/cm^2 , 远低于其损伤阈值 300 mJ/cm^2 . 压缩器整体能量传输效率为 72%, 压缩后脉冲能量 18.3 mJ. 通过微调光栅入射角及间距, 优化压缩脉宽后采用单次自相关仪 (Minioptics Inc.) 测量其脉冲宽度, 实测数据

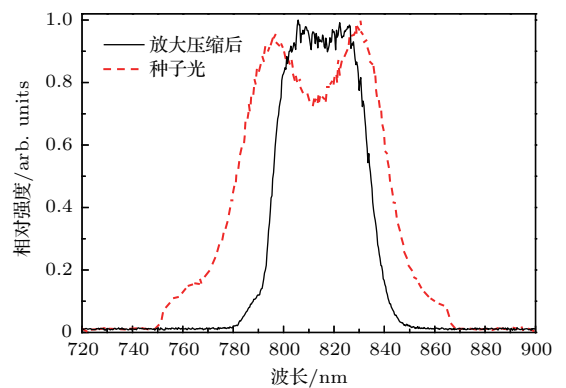


图 5 种子光放大前后的光谱

Fig. 5. Spectra of seeding laser pulse (dashed curve), compressed laser pulse.

器. 实测脉宽结果与傅里叶变换理论极限脉宽 32.8 fs 接近, 但仍有一定差距. 对于钛宝石激光, 马丁内兹光栅展宽器可以提供正的二阶及负的三阶色散, 平行光栅对提供负的二阶、正的三阶色散, 理想情况下可以将二阶、三阶色散补偿到 0. 但由于放大器中存在钛宝石晶体及透镜等透射元件, 其二阶、三阶材料色散均为正, 就会造成压缩器补偿色散时将系统中二阶色散补偿到 0, 三阶色散补偿不到 0 的情况. 而残余的三阶及更高阶色散对脉宽有影响, 造成最终压缩不到理论极限脉宽的情况. 此时, 如果实验条件允许, 可以采用可编程声光色散滤波器进行色散补偿和光谱整形, 以获得更为接近极限脉宽的激光脉冲.

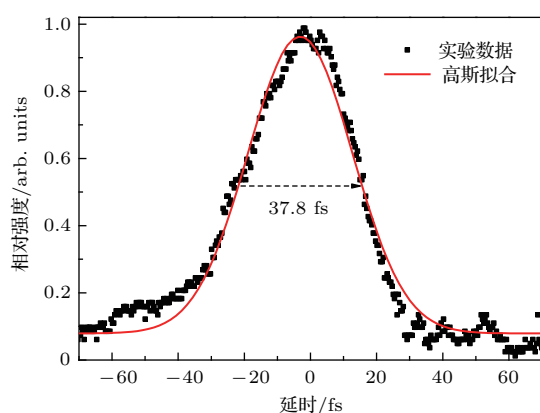


图6 压缩后脉冲宽度测量自相关数据曲线, 高斯拟合后脉宽为 37.8 fs

Fig. 6. Interference autocorrelation trace of the pulses after the compressor. The pulse width is 37.8 fs as Gaussian Fitting.

4 结 论

本文报道了一种采用闪光灯抽运倍频 Nd:YAG 激光作为抽运源的 100 Hz 重复频率的小型化高能量飞秒钛宝石放大系统. 以 1 kHz 环形腔再生放大器为前级, 结合四通主放大, 在 75.1 mJ 抽运脉冲能量下获得了 25.4 mJ 的放大输出, 能量转换效率达 33.8%. 压缩后实现了单脉冲能量为 18.3 mJ、脉冲宽度为 37.8 fs、峰值功率为 0.48 TW 的 100 Hz 重复频率飞秒钛宝石放大激光输出, 为

开展高能量的高次谐波与阿秒脉冲实验提供了有效的研究工具, 也可以为开展更高能量的飞秒激光放大研究提供前级放大系统. 下一步拟采用能量更为稳定、光束质量更佳的抽运源, 有望获得性能更加优良的 100 Hz 重复频率的高能量飞秒钛宝石激光放大.

参考文献

- [1] Strickland D, Mourou G 1985 *Opt. Commun.* **55** 447
- [2] Lu X, Chen S Y, Ma J L, Hou L, Liao G Q, Wang J G, Han Y J, Liu X L, Teng H, Han H N 2015 *Sci. Rep.* **5** 15515
- [3] Horio T, Suzuki Y, Suzuki T 2016 *J. Chem. Phys.* **145** 044307
- [4] Zhang J Y, Wang R, Chen B, Ye P, Zhang W, Zhao H Y, Zhen J, Huang Y F, Wei Z Y, Gu Y 2013 *Laser. Surg. Med.* **45** 450
- [5] Ito S, Ishikawa H, Miura T, Takasago K, Endo A, Torizuka K 2003 *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* **76** 497
- [6] Wang Z H, Liu C, Shen Z W, Zhang Q, Teng H, Wei Z Y 2011 *Opt. Lett.* **36** 3194
- [7] Dalui M, Wang W M, Trivikram T M, Sarkar S, Tata S, Jha J, Ayyub P, Sheng Z M, Krishnamurthy M 2015 *Sci. Rep.* **5** 11930
- [8] Remington B A, Takabe H 1999 *Science* **284** 1488
- [9] Gilbertson S 2010 *Phys. Rev. A* **81** 043810
- [10] Schmidt B E, Shiner A D, Lassonde P, Kieffer J C, Corkum P B, Villeneuve D M, Legare F 2011 *Opt. Express* **19** 6858
- [11] Tian Y C, Tian H, Wu Y L, Zhu L L, Tao L Q, Zhang W, Shu Y, Xie D, Yang Y, Wei Z Y, Lu X H, Shih C K, Zhao J M 2015 *Sci. Rep.* **5** 10582
- [12] Liu J, Li X F, Chen X W, Jiang Y L, Li R X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1375 (in Chinese) [刘军, 李小芳, 陈晓伟, 姜永亮, 李儒新, 徐至展 2007 物理学报 **56** 1375]
- [13] Ye P, He X K, Teng H, Zhan M J, Zhong S Y, Zhang W, Wang L F, Wei Z Y 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 073601
- [14] Wang L F, He X K, Teng H, Yun C X, Zhang W, Wei Z Y 2015 *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* **121** 81
- [15] Goulielmakis E 2008 *Science* **320** 1614
- [16] Wu Y, Cunningham E, Zang H, Li J, Chini M, Wang X, Wang Y, Zhao K, Chang Z 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 201104
- [17] Zhang W, Teng H, Wang Z H, Shen Z W, Wei Z Y 2013 *Appl. Opt.* **52** 1517

A 18 mJ femtosecond Ti:sapphire amplifier at 100 Hz repetition rate*

Zhang Wei^{1)†} Teng Hao²⁾ Shen Zhong-Wei²⁾ He Peng²⁾ Wang Zhao-Hua²⁾ Wei Zhi-Yi^{2)‡}

1) (Beijing Institute of Ophthalmology, Beijing Tongren Eye Center, Beijing Tongren Hospital, Capital Medical University; Beijing Key Laboratory of Ophthalmology and Visual Sciences; National Engineering Research Center of Ophthalmology, Beijing 100005, China)

2) (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 12 September 2016; revised manuscript received 10 October 2016)

Abstract

High energy and high repetition rate femtosecond Ti:sapphire lasers are widely used in isolated attosecond pulses and high-order harmonic generation. Enhancing the driving laser energy is a convenient and effective way to improve attosecond pulse energy. A 1 kHz or higher repetition rate millijoule level femtosecond Ti:sapphire amplifier is generally used to generate isolated attosecond. However, due to the limitation of its green pump laser energy, the energy of femtosecond Ti:sapphire laser is limited to several millijoules. Appropriately reducing the requirements for repetition rate, realizing high energy driving laser will significantly improve attosecond pulse energy and extend its application scope. Meanwhile, a 532 nm pump laser from frequency doubled 1064 nm Nd:YAG flash lamp pumped laser at 100 Hz repetition rate can achieve high pump energy with lower cost. Accordingly, we develop a 100 Hz repetition rate high energy amplifier based on Ti: sapphire crystal.

The femtosecond amplifier system consists of oscillator, stretcher, ring cavity regenerative amplifier, four-pass amplifier and grating compressor. The ring cavity regenerative amplifier is the first amplifier as pre-amplifier, and the four-pass amplifier is the booster amplified-stage. 80 MHz seed pulse from the oscillator has a full width at half maximum bandwidth of 61 nm with a 20 fs duration. Then the seed pulses are stretched to 200 ps with a Martinez grating stretcher, rotated to vertical polarization and injected into the regenerative amplifier. The amplified uncompressed 1 kHz repetition rate laser pulses with 3 mJ pulse energy are selected to be 100 Hz and input into the four-pass amplifier. With a pulse energy of 75.1 mJ, wavelength at 532 nm flash lamp pumped pump laser at 100 Hz repetition rate, single pulse energy up to 25.4 mJ is obtained from a Ti: sapphire crystal, corresponding to a high energy conversion efficiency of 33.8%. We believe that higher energy should be possible if the pump energy can be further increased. After expanding the beam to 10 mm in diameter, the amplified chirped pulse is compressed using a four-pass, single grating compressor, with an overall efficiency of 72%. The highest pulse energy after compression is 18.3 mJ. For a fluctuation of the 100 Hz pump laser is as high as 3.4% for over 10000 shots, the 3.6% energy stability of the amplifier has a room to be improved. The typical spectrum bandwidth after the compressor is 39 nm, which can support transform-limited pulse duration of 32.8 fs. After fine dispersion compensation by the compressor, A pulse duration of 37.8 fs is measured using a single shot autocorrelator (Miniopic Technology, Inc). In addition, the spatial profile of the output beam from the compressor is measured using a commercial laser beam analyzer (Spiricon, Inc). The beam quality M^2 factor are 1.8 and 1.6 in X and

* Project supported by the Special Foundation of State Major Scientific Instrument and Equipment Development of China (Grant No. 2012YQ120047) and National Natural Science Foundation of China (Grants No. 11434016).

† Corresponding author. E-mail: zhangwei0724@163.com,

‡ Corresponding author. E-mail: zywei@iphy.ac.cn

Y directions, respectively.

In summary, a peak power of 0.48 TW compact 100 Hz femtosecond laser with pulse duration of 37.8 fs, pulse energy of 18.3 mJ is achieved from a two-stage amplifier system based on Ti: sapphire crystal. We believe that with a more stable and better spatial profile pump source, even better performance can be obtained by this scheme. Nevertheless, the current results show that this system should be favorable for high energy attosecond pulse generation and further amplification such as Terawatt system.

Keywords: chirped-pulse amplification, femtosecond laser pulse, regenerative amplifier, multi-pass amplifier

PACS: 42.60.-v, 42.60.Da, 42.60.Lh, 42.65.Re

DOI: [10.7498/aps.65.224204](https://doi.org/10.7498/aps.65.224204)