

文章编号: 0253-2239(2006)01-0081-5

5 TW/40 fs 级台式钛宝石激光系统研究

梁 敏^{1,2} 李文雪^{1,2} 胡婉约^{1,2} 王二玉^{1,2} 丁良恩^{1,2**}

(¹ 华东师范大学光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062)
(² 华东师范大学物理系, 上海 200062)

摘要: 在 TSA-25 系统输出 35 mJ, 800 nm 啁啾脉冲的基础上, 建立了以钛宝石作为增益介质的二级啁啾脉冲放大(CPA)系统。使用 0.6 J 和 1.6 J, 532 nm, 10 Hz Nd:YAG 激光抽运, 输出脉冲能量达到 500 mJ, 经压缩脉冲宽度为 41 fs, 压缩器的能量转换效率为 63%, 峰值功率可达 7.6 TW。通过对放大器系统的钛宝石晶体、抽运密度以及多通结构通道数的选择等实验, 有效地提高了能量放大器的萃取效率。其主放大器能量萃取效率达到 32%, 整个系统占用尺寸不到 10 m²。

关键词: 超快光学; 超短脉冲激光; 啁啾脉冲放大; 萃取效率; 钛宝石

中图分类号: TN245 文献标识码: A

Studies on 5 TW/40 fs Table-Top Ti:Sapphire Laser System

Liang Min^{1,2} Li Wenxue^{1,2} Hu Wanyue^{1,2} Wang Eryu^{1,2} Ding Liang'en^{1,2}

(¹ Key Laboratory of Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, Ministry of Education of China, East China Normal University, Shanghai 200062)
(² Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062)

Abstract: A table-top Ti:sapphire laser system with two-stage amplifier was built based on TSA-25 regeneration amplifier. Pumped by 0.6 J and 1.6 J, 532 nm, 10 Hz of Nd:YAG lasers, the output energy reached 500 mJ and a pulse with duration of less than 41 fs was generated by using a single grating compressor, the energy conversion efficiency of the compressor was 63% and the peak power reached 7.6 TW. By the experiments on the different absorption of crystals for 532 nm, pump-to-IR efficiency with pump fluence and passes of amplification, the system was optimized with an extraction efficiency of power amplifier ~32%, compacted less than 10 m².

Key words: ultrafast optics; ultrashort pulse laser; chirped pulse amplification; extraction efficiency; Ti:sapphire

1 引 言

飞秒超快强激光技术是获得高功率飞秒光源的重要手段。自 1985 年 Mourou 等^[1]首次将雷达信号放大理论应用于光学领域, 提出啁啾脉冲放大(CPA)的概念以来, 飞秒超快强激光技术至今已有了很大的发展。低重复频率钛宝石激光系统的发展尤其迅速, 因为其产生高功率脉冲而被广泛关注。现在日本、美国等研究小组相继研制成功峰值功率达到几十太瓦以上量级的台式钛宝石激光系统^[2~4]。近年来国内啁啾脉冲放大技术也有较快发展, 建成了太瓦级峰值功率的钛宝石激光系统^[5,6]。

特别是与光学参变放大技术(OPA)相结合的光学参变啁啾脉冲放大技术(OPCPA)的应用可以产生峰值功率 16.7 TW^[7]的激光脉冲。

基于啁啾脉冲放大技术我们研制了 5 TW, 40 fs 级台式钛宝石激光系统。峰值功率达到 5 TW 级的飞秒脉冲在强场物理方面已经可以有很广泛的应用, 这类激光系统输出的激光脉冲聚焦后峰值功率密度能够达到 10¹⁴ W/cm² 以上量级, 可以应用于超快软、硬 X 射线的产生^[8~10]; 高次谐波的产生^[11,12]; 在大气中传输时光丝现象的产生^[13] 以及超快化学反应动力学等诸多领域。

作者简介: 梁敏(1980~), 女, 山东人, 硕士研究生, 主要从事超快强激光技术的研究。E-mail: liangminecnu@yahoo.com.cn

** 通信联系人。E-mail: leding@phy.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2005-04-13; 收到修改稿日期: 2005-06-09

我们自行设计研制的两级多通能量放大系统,经系统优化,前级的能量萃取效率达 34%,主放大级的萃取效率 32%。啁啾脉冲放大系统输出能量达 500 mJ,重复频率 10 Hz。经过压缩实验,压缩器能量转换效率为 63%,脉冲宽度为 41 fs,峰值功率可达 7.6 TW。下面将介绍整个系统的设计,并重点介绍我们针对多通能量放大系统开展的一些实验研究。

2 激光系统设计

我们研制的啁啾脉冲放大系统主要由振荡器、展宽器、再生放大器、前置放大器、前级多通放大器、能量主放大器以及真空压缩器组成,系统的结构布局如图 1 所示。其中展宽器、再生放大器和前置放大器使用了美国 S-P 公司生产的 TSA-25 系统。

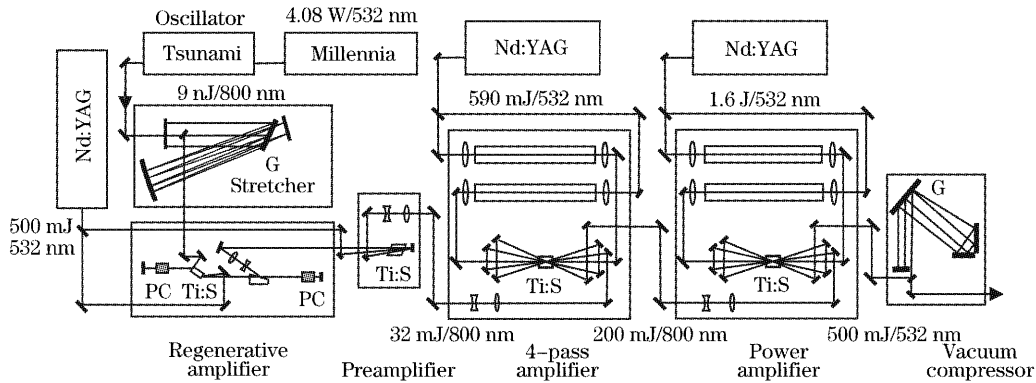


图 1 5 TW,40 fs 级钛宝石激光系统装置图。PC:泡克耳斯盒;Ti:S: 钛宝石晶体;G: 光栅

Fig. 1 Experimental setup of the 5 Tw/40 fs Ti:sapphire laser system. PC: Pockels cell;

Ti:S: Ti:sapphire crystals; G: gratings

2.1 振荡器、展宽器以及再生前置放大系统

振荡器 Tsunami 由 4.08 W Millennia 连续 532 nm 固体激光器抽运,产生平均功率 510 mW、脉冲宽度 25 fs、重复频率为 80 MHz 的锁模脉冲序列,中心波长在 800 nm,谱线半峰全宽(FWHM)为 51 nm。振荡器产生单脉冲能量为 9 nJ 的种子脉冲注入系统的展宽器装置。

展宽器采用单光栅结构,由光栅、凹面镜、平面反射镜和角反射器组成。其中光栅的常数为 1200 lp/mm,尺寸为 110 mm×30 mm。凹面镜曲率半径为 1800 mm,直径为 150 mm。种子脉冲经过展宽器后可展宽至 220 ps,单脉冲能量为 5 nJ。

从展宽器中输出的激光脉冲经过再生放大器后输出脉冲增益系数达到 10^6 ,脉冲能量为 5 mJ。再生放大器的晶体采用布儒斯特角切割的钛宝石晶体。脉冲再进入一个双通结构的前置放大器,该放大器的增益介质同样使用钛宝石晶体,采用单向抽运的方式。输出脉冲能量 35 mJ。此时输出信号光的光束直径为 3 mm 左右,经过伽利略望远镜系统扩束后光束直径达到 9 mm。一台重复频率 10 Hz、能量为 500 mJ 的 532 nm Nd:YAG 激光器作为再生放大器与前置放大器共同的抽运源。Nd:YAG 激光器输出光束分束后分别抽运再生与前置放大器的

钛宝石晶体,其中大部分能量用于抽运前置放大器。

2.2 激光能量放大系统研制及实验研究

前置放大器输出的激光脉冲经过望远镜扩束系统以及其他光学元件之后能量只有 32 mJ,注入到我们自行设计研制的多通能量放大系统中。如图 1 中所示,能量放大系统由两级多通放大器组成。这两级放大器均采用四通放大结构,使用的增益介质为钛宝石晶体(中国科学院上海光学精密机械研究所提供),抽运源都是调 Q 倍频 Nd:YAG 激光器,抽运方式采用双向端面抽运。选用双向抽运增益介质的方式,一方面可以避免晶体端面的损伤同时又提高介质的储能增益,另一方面也可以改善增益介质的空间均匀性^[14]。两台 Pro350 的 Nd:YAG 激光器分出总和为 590 mJ 的能量抽运前级放大器,532 nm 激光分束后双向抽运晶体的两个端面。经过四通放大后能量可以达到 200 mJ 的稳定输出,能量萃取效率达 34%。使用总和为 1.6 J 的 Nd:YAG 能量分束后抽运能量主放大器,输出激光能量稳定在 500 mJ 左右,能量萃取效率达到 32%。前级放大、主放大与抽运源 Nd:YAG 激光器的同步是通过 TSA-25 的同步输出对 Nd:YAG 激光器的 Q 外触发而控制的,800 nm 激光相对于 532 nm 光脉冲时间延迟为 175 ns,抖动小于 1 ns。

针对如何使放大系统输出的脉冲能量安全稳定,在放大器中钛宝石晶体的选择、抽运密度以及通道数的选择等方面作了一系列实验,下面将详细介绍实验结果以及结论。

2.2.1 钛宝石晶体的选择

为了选择适合 5 TW 激光放大系统的钛宝石晶体,在前级多通放大器中比较了两种不同浓度宝石晶体的实验结果。对两种浓度的晶体进行编号:晶体 1 的尺寸为 10 mm×10 mm×15 mm,优质因数 FOM=180,93% 以上的抽运能量可以被晶体吸收;晶体 2 的尺寸为 $\phi 10$ mm×15 mm,FOM=110,晶体约吸收 75% 的抽运能量。两种浓度的晶体均采用垂直切割,双面镀增透膜。在相同抽运能量及抽运密度下,比较了两种不同浓度的宝石晶体对输出脉冲能量的影响,具体实验结果如图 2 所示。很明显相同抽运情况下使用晶体 1 输出的脉冲能量明显高于晶体 2,在 460mJ 的抽运能量作用下,使用晶体 1 的放大器能量萃取效率达到了 29.3%,而晶体 2 的能量萃取效率仅有 17.1%。

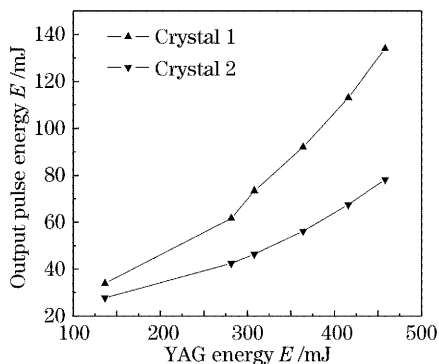


图 2 不同浓度晶体输出脉冲能量比较

Fig. 2 The output energy of the amplified pulse for different doping of Ti:sapphire crystals

根据实验结果我们分析认为在峰值功率 5 TW 的情况下,10 Hz 的重复频率比较低,单脉冲能量不高,热透镜效应等各种非线性效应不明显,使用高浓度的宝石晶体可以提高能量放大器的萃取效率,提升系统的参量指标。通过对宝石晶体的各项测试和实验结果表明,在 5 TW 放大系统中增益介质选用国内生产的钛宝石晶体完全可以满足各项要求。

2.2.2 抽运密度

多通能量放大器中,为了使抽运密度达到或超过激发增益介质的阈值,必须将抽运光束聚束后入射到钛宝石晶体的两个端面。按照理论计算结果表明,钛宝石放大器运转在 2 J/cm^2 左右的饱和通量时,能获得

最大的能量萃取效率。我们在前级放大器中针对抽运密度对萃取效率的影响也作了一些研究。

比较了不同抽运光束尺寸下输出脉冲能量随抽运光能量变化的曲线,抽运光束尺寸不同对应着不同的抽运密度。图 3 表示的是抽运光束聚焦后光斑直径从 10 mm 到 8.5 mm 依次变化时输出脉冲能量图线。图中抽运光斑直径越小,对应的抽运密度就越高,则能量萃取效率越大。当抽运光束直径聚焦到 8.5 mm 时,在 680 mJ 抽运能量下放大器的能量萃取效率甚至达到了 37.8%,但是此时放大器中宝石晶体和其他光学元件很容易损伤。综合考虑能量萃取效率和系统安全稳定运行等因素,我们选择抽运光束尺寸聚焦至 $\phi 9$ mm。

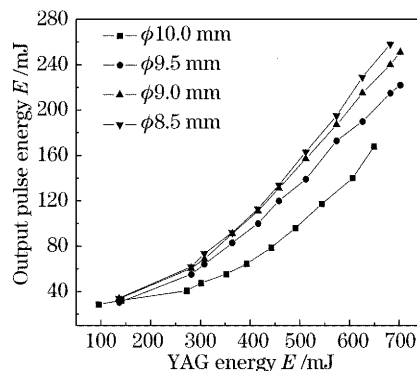


图 3 不同抽运密度下输出脉冲能量比较

Fig. 3 The output energy of the amplified pulse for different pump fluence

根据以上的实验结果我们设计了能量主放大器中使用总能量为 1.6 J 的 Nd:YAG 抽运光分束后双向抽运晶体的两个端面,宝石晶体两侧抽运光束直径为 13.5 mm,在这种状态下能量萃取效率稳定在 32%。

2.2.3 多通结构通道数

能量放大器大多采用多通结构,多通结构的设计是让信号光脉冲在空间上按一定光路多次通过增益介质,使增益介质反转粒子数得到充分利用,使信号光脉冲尽可能的提取储存在增益介质中的能量。

我们研究了前级多通放大器中每一通的能量增益情况,图 4 表示的是前级放大器从单通结构直到四通结构下输出脉冲能量随着抽运光能量变化曲线。从图 4 中可以看出在四通情况下,当抽运能量达到 590 mJ 时,输出脉冲能量增益略有饱和的趋势。预计将系统结构改至五通结构后输出脉冲能量应该有进一步的提升,能量萃取效率也会有一定提高。同时五通甚至六通结构对放大器系统的光学元

件和宝石晶体的抗损伤性能等方面都有更高的要求。因此这方面作进一步提高系统性能的实验还有待整个系统元件参量的提高。我们选择四通结构使前级放大系统稳定运行在萃取效率 34% 的状态下。

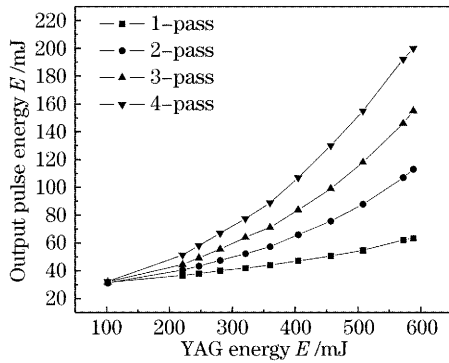


图 4 前级放大器中前四通脉冲输出能量随抽运光能量变化的关系

Fig. 4 The output energy of the amplified pulse as a function of the pump energy with different multi-pass constructions

以上我们总结了研制 5 TW 级钛宝石激光放大系统几个关键部分的实验结果,包括钛宝石晶体的选择,放大结构通数的选择,抽运能量的分配以及适当抽运密度下较高能量萃取效率的获得。

通过对实验结果的分析,我们认为在 5 TW 级钛宝石激光放大系统中使用高浓度钛宝石晶体的各项实验指标均优于低浓度的钛宝石晶体,并且国内生产的钛宝石晶体在抗损伤性能、能量萃取效率以及稳定运行等各方面都表现得比较出色,完全可以应用于该类型的能量放大器中。我们之所以选择 Nd:YAG 激光器中分出 590 mJ 能量抽运前级多通放大

器,剩余的 1.6 J 能量抽运能量主放大器是基于上面的实验结果。即前级多通放大器中对不同抽运密度下能量萃取效率的实验结果表明:钛宝石晶体端面尺寸 10 mm×10 mm、抽运能量在 590 mJ 时,前级多通放大器稳定运转在萃取效率 34% 左右。这样我们设计了能量主放大器中钛宝石晶体的参量,即端面尺寸为 $\phi 15$ mm,抽运能量选用 1.6 J。在这种情况下能量主放大器萃取效率达到 32%,由于在这一级放大器中选用的钛宝石晶体的浓度偏低,下一步将会使用浓度较高的宝石晶体替代,预计主放大系统能稳定运行在 35% 左右的萃取效率状态。

选用的四通放大结构运行稳定可靠,且具有较高的能量萃取效率。此外,设计使用两级放大系统实现能量放大是基于系统安全性以及灵活性的考虑。仅用一级放大则对系统中各光学元件和钛宝石晶体的抗损伤阈值要求很高,系统运行存在风险性。两级放大的设计就可以避免这一点,同时还可以根据实验需要选择激光脉冲经过一级或者两级放大后注入压缩器进行压缩,系统灵活性强并且运行经济。

2.3 啁啾脉冲压缩

测量了进入压缩器前激光脉冲在各个阶段的光谱,并对它们作了比较,如图 5 所示。使用的光谱探测器是 Ocean Optics 公司生产的光纤光谱仪 HR2000。从图中可以清楚的看到,再生放大过程谱线增益窄化效应比较明显,脉冲半峰全宽由 51 nm 变窄到 29 nm。经过前级多通放大和能量主放大系统后谱线的半峰全宽分别为 28 nm 和 25 nm。即在两级能量放大器中谱线变窄效应较弱。放大过程中,伴随着谱线增益窄化的效应,脉冲谱线中心发生红移。

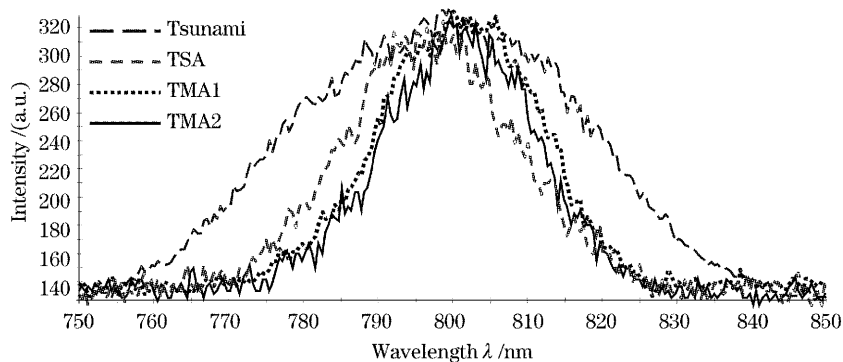


图 5 800 nm 激光脉冲各级放大后光谱变化,长虚线表示振荡器输出脉冲谱线;短虚线表示经过再生放大和前置放大(TSA)后脉冲谱线;点线表示经过前级多通放大(TMA1)后脉冲谱线;实线表示经过能量主放大(TMA2)后脉冲谱线

Fig. 5 Measured spectra after the regenerative amplifier and pre-amplifier (short dashed curve), power amplifier I (dotted curve) and power amplifier II (solid curve). The long dashed curve represents the spectrum of the Tsunami

系统的压缩器使用 S-P 公司生产的产品,采用单光栅结构,结构如图 1 所示。光栅常数 1500 g/mm。将放大后激光光束扩束后注入压缩系统,此时入射到光栅上的光通量仅有 26 mJ/cm²,低光通量可以避免对压缩器中光栅等光学元件造成损害。

压缩器的调节通过一台 Positive Light 公司生产的 SSA (Single shot autocorrelator) 自相关仪监控,仔细调节各元件使得压缩后获得的脉宽最短。图 6 是示波器记录的由 CCD 探测到的信号的空间分布曲线,定标后推算出压缩脉冲半峰全宽 (FWHM) 41 fs。整个压缩器的转换效率达到 63%,脉冲峰值功率可达 7.6 TW。由于压缩后脉冲峰值功率大于 1 TW,整个装置必须放置在真空系统里,真空度要求达到 0.1333~1.333 Pa。

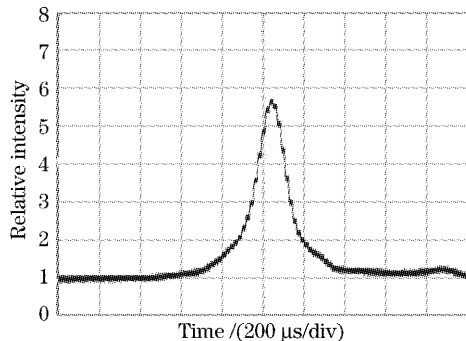


图 6 压缩后激光脉冲自相关曲线

Fig. 6 Measured autocorrelation trace of the compressed pulse

3 结 论

研制了一套 5 TW/40 fs 级台式钛宝石激光系统,全部增益介质采用钛宝石晶体,经过压缩后输出脉冲的脉宽为 41 fs,峰值功率可达 7.6 TW。系统具有的高效经济、运行稳定以及使用灵活安全等优点已经可以与同类型的商售产品相比拟。

这套啁啾脉冲放大系统的性能还有很大的提升余地。两级能量放大系统的抽运密度均低于 0.70 J/cm²,最后一级能量主放大器的萃取效率为 32%,在不增加抽运能量的情况下可以通过适当调节抽运光光束尺寸来提高抽运密度,当然这也有待于各光学元件质量的提高。相信在能量主放大器中选择使用浓度稍高的钛宝石晶体还可以进一步提高系统输出的脉冲能量。同时由于再生放大器中谱线增益变窄的效益比较明显,使得放大后的脉冲在进入压缩器前谱宽较窄,这也限制了最后输出激光脉宽的进一步压窄。下一步将使用 10 fs 的振荡器代替现有

的 25 fs 种子源,并且采取一系列谱线展宽的措施以期获得更短的输出脉冲。我们认为通过进一步的优化,系统完全可以达到峰值功率 10 TW、脉宽 20 fs 的激光脉冲输出。

致谢 作者真诚地感谢中国科学院徐至展院士对本项目的悉心指导以及中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学重点实验室所给予的多方面帮助。

参 考 文 献

- 1 Danna Strickland, Gerard Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3): 219~221
- 2 K. Yamakawa, M. Aoyama, S. Matsuoka *et al.*. 100-TW sub-20-fs Ti:sapphire laser system operating at a 10-Hz repetition rate[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(18): 1468~1470
- 3 Barry C. Walker, Csaba Toth, David N. Fittinghoff *et al.*. A 50-EW/cm² Ti:sapphire laser system for studying relativistic light-matter interactions[J]. *Opt. Exp.*, 1999, **5**(10): 196~202
- 4 A. Antonetti, F. Blasco, J. P. Chambaret *et al.*. A laser system producing 5×10^{19} W/cm² at 10 Hz[J]. *Appl. Phys. (B)*, 1997, **65**(2): 197~204
- 5 Xu Zhizhan, Yang Xiaodong, L. Vigroux *et al.*. 5.4-TW/46-fs 10-Hz Ti:sapphire laser system[J]. *Science in China (Series A)*, 2000, **30**(1): 63~69 (in Chinese)
徐至展,杨晓东, L. Vigroux 等. 5.4 TW/46 fs 台式钛宝石超短超强激光系统[J]. *中国科学(A 辑)*, 2000, **30**(1): 63~69
- 6 Wei Zhiyi, Zhang Jie, Xia Jiangfan *et al.*. Highly efficient TW multipass Ti:sapphire laser system[J]. *Science in China (Series A)*, 2000, **30**(11): 1046~1050 (in Chinese)
魏志义,张 杰,夏江帆等. 高效率太瓦级飞秒掺钛蓝宝石激光装置[J]. *中国科学(A 辑)*, 2000, **30**(11): 1046~1050
- 7 Zhizhan Xu, Xiaodong Yang, Yuxin Leng *et al.*. High-power output from a compact OPCPA laser system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(1): 24~27
- 8 C. L. Gordon III, G. Y. Yin, B. E. Lemoff *et al.*. Time-gated imaging with an ultrashort-pulse, laser-produced-plasma X-ray source[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(9): 1056~1058
- 9 Xu Zhizhan, Zhang Zhengquan, Li Xuexin *et al.*. Coherent soft X-ray radiation obtained by high-order harmonic generation[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(7): 957~958 (in Chinese)
徐至展,张正泉,李学信等. 利用超快强光场产生的高次谐波获得相干软 X 射线辐射[J]. *光学学报*, 1997, **17**(7): 957~958
- 10 Qin Ling, Deng Jian, Zhong Fangchuan *et al.*. Soft X-ray emission spectrum of Ar puff target irradiated by ultrashort pulse intense laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3): 342~345 (in Chinese)
覃 岭,邓 健,钟方川等. 超短超强激光辐照 Ar 喷气靶的 X 射线发射[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3): 342~345
- 11 J. Zhou, J. Peatross, M. M. Murnane *et al.*. Enhanced high-harmonic generation using 25 fs laser pulses[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(5): 752~755
- 12 J. J. Macklin, J. D. Kmetec, C. L. Gordon III *et al.*. Higher order harmonic generation using intense femtosecond pulses[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(6): 766~769
- 13 Zhao Shanghong, Shi Lei, Li Yujiang *et al.*. Filamentation of femtosecond laser pulse in atmosphere and its application[J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(3): 256~258 (in Chinese)
赵尚弘,石 磊,李玉江等. 飞秒激光脉冲在大气中的光丝现象及其应用[J]. *激光技术*, 2003, **27**(3): 256~258
- 14 Zhang Shukui, Wen Guoqing, Zhou Pizhang *et al.*. Theoretical and experimental studies on the chirped-pulse multipass amplification in double-side pumped Ti:sapphire [J]. *Acta Physica Sinica*, 1997, **46**(5): 908~914 (in Chinese)
张树葵,文国庆,周丕璋等. 双向抽运钛宝石啁啾脉冲激光多通放大的理论与实验研究[J]. *物理学报*, 1997, **46**(5): 908~914