

文章编号: 1001-3806(2007)01-0095-03

## 高功率超短脉冲钛宝石激光系统波前测量实验

刘兰琴<sup>1</sup>, 朱启华<sup>1</sup>, 周凯南<sup>1</sup>, 王晓东<sup>1</sup>, 黄小军<sup>1</sup>, 彭翰生<sup>1</sup>, KUDRYASHOV A V<sup>2</sup>, ZAVALOVA V<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900; 2 俄罗斯科学院 激光和信息技术研究所, 莫斯科 140700)

**摘要:** 为表征 SILEX-I 超强超短脉冲钛宝石激光装置的性能, 利用高空间分辨的哈特曼波前传感器实验研究了该系统的光束波前畸变特性。实验中采用俄罗斯科学院激光和信息技术研究所研制的自适应哈特曼波前测量系统, 哈特曼波前传感器的最大入射口径可达 95mm, 测量精度为  $0.08\mu\text{m}$ 。得到激光脉冲在压缩前的 P-V 值仅为  $0.13\lambda$  ( $\lambda = 800\text{nm}$ ), RMS 值为  $0.02\lambda$ ; 压缩后 P-V 值为  $0.63\lambda$ , RMS 值为  $0.09\lambda$  并对实验结果进行了分析和讨论。结果表明, 该激光装置具有良好的光束质量, 其主要波前畸变来源于压缩池。

**关键词:** 激光技术; 光束质量; 波前测量; 哈特曼波前传感器; 高功率超短脉冲激光装置

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## Wavefront distortion measurement in high power ultra-short pulse Ti sapphire laser system

LIU Lan-qin<sup>1</sup>, ZHU Qi-hua<sup>1</sup>, ZHOU Kai-nan<sup>1</sup>, WANG Xiao-dong<sup>1</sup>, HUANG Xiao-jun<sup>1</sup>,  
PENG Han-sheng<sup>1</sup>, KUDRYASHOV A V<sup>2</sup>, ZAVALOVA V<sup>2</sup>

(1. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 2. Institute on Laser and Information Technology, the Russian Academy of Science, Moscow 140700, Russia)

**Abstract** To characterize beam quality in high power SILEX-I ultra-short pulse Ti sapphire laser system, experiments on wavefront measurement are performed. Using Shack-Hartmann wavefront sensor manufactured by Institute of Laser and Information Technology of the Russian Academy of Science, experiments at different positions are completed. The results show that the beam quality of this facility is very good, the P-V is  $0.13\lambda$ , the RMS is  $0.02\lambda$  before the compressor, and the P-V is  $0.63\lambda$ , the RMS is  $0.09\lambda$  after the compressor. The experimental results show that the system has good beam quality, and the wavefront aberration mainly come from the compressor.

**Key words** laser technique; beam quality; wavefront measurement; Shack-Hartmann wavefront sensor; high power ultra-short pulse laser facility

### 引 言

在过去十多年里,啁啾脉冲放大(chirped-pulse amplification, CPA)技术得到迅速发展<sup>[1-3]</sup>,国际上相继建成多台高功率超强超短脉冲钛宝石激光装置。超强超短脉冲钛宝石激光装置追求高聚焦功率密度,在激光驱动器输出能力一定的情况下,激光驱动器的光束质量是影响聚焦焦斑的大小和能量集中度即影响功率密度的一个关键因素<sup>[4]</sup>,因此,光束质量长期以来一直是激光技术研究工作者关心的核心问题<sup>[5]</sup>。

系统波前的精确测量是表征光束质量、确定系统

性能的一种手段。在纳秒级激光器中,自适应光学技术的应用已经非常成熟<sup>[6,7]</sup>。对高功率超短脉冲钛宝石激光器而言,自适应光学技术的应用还处于发展阶段,国外只有少数几个实验室使用了自适应光学系统,譬如,美国密歇根大学 45TW 钛宝石激光装置<sup>[8]</sup>,在没有使用变形镜校正波面时,焦斑能量没有集中,周围有很多旁瓣,信噪比非常低;使用变形镜校正波后才得到比较好的焦斑。德国 MPQ 的 10TW 钛宝石激光装置<sup>[9]</sup>在未使用变形镜前的焦斑质量也非常差,焦斑的能量集中度非常低;使用变形镜后,焦斑质量才得到很大改善。国内还未见到此方面的相关报道。

作者在 SILEX-I 超强超短脉冲钛宝石激光装置的研制中,为了达到近衍射极限的聚焦光斑以及大于  $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$  的聚焦功率密度这一标的,表征系统光束质量,为装置中引进变形镜波前校正系统作前期准备,而进行了波前测量实验研究。

作者简介: 刘兰琴(1973-),女,博士,主要从事高功率固体激光技术研究。

Email: ly\_ly2008@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-11-18 收到修改稿日期: 2006-01-20

### 1 SILEX-I 激光装置简介

SILEX-I (super intense laser for experiment on the extremes) 超强超短脉冲激光装置<sup>[4-10]</sup>以钛宝石晶体作为增益介质,采用啁啾脉冲放大技术,将飞秒量级的种子光脉冲通过展宽再进行放大,获得足够的脉冲能量后,再将脉冲压缩至接近初始脉宽,从而获得极高峰值功率的激光脉冲输出。系统光路如图 1 所示。

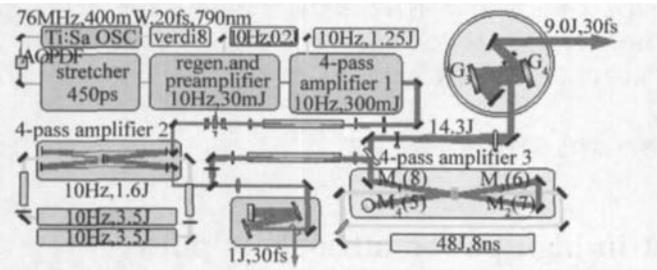


Fig 1 Optical layout of the SILEX-I

该装置的总体技术指标如下:激光波长为 800nm (中心波长);输出能量大于 8 J 输出脉宽小于 30fs 峰值功率大于 2861W;靶面功率密度大于 10<sup>30</sup>W/cm<sup>2</sup>;重复频率为 1发/20min (大于 30TW), 10Hz (小于 30TW)。

SILEX-I 超强超短脉冲激光装置共有 3 级功率输出能力:5TW 前端级,30TW 中间级,百太瓦级,每级都配有相应的脉冲压缩器、靶场、诊断、控制和支撑系统,可以满足多种物理实验的要求。

在该装置的研制过程中,为了保证光束质量,将光束近场整形为超高斯,采用了超高斯光束传输、全像传递的立体四程放大构型以及大口径晶体的折射率匹配包边技术等多项关键技术<sup>[4-10]</sup>,这些技术在同类激光装置中的应用尚属首次,目前正在申请多项专利。

### 2 波前测量的基本原理

哈特曼波前测量的基本原理<sup>[6-7]</sup>是利用 CCD 阵列或四象限探测器来测量光束波阵面上各分割子孔径成像的星点光强分布以获得各子孔径上的波面斜率,再通过斜率与位相的数学变换关系重构波前位相。图 2 为哈特曼波前传感器示意图。这种测量方法首先需要

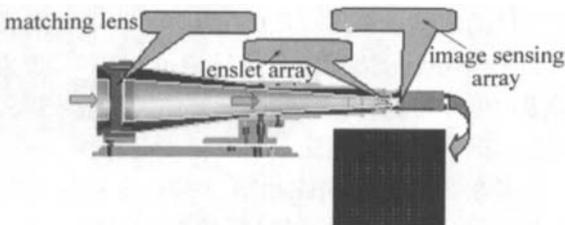


Fig 2 Schematic diagram of Hartmann sensor

对测量系统自身进行标定,即先运用一束平行光记录一幅系统自身的本底波前 reference0 实际中需减去本底波前 reference0 后方可得到所要测量的波前畸变。

本实验中采用的哈特曼测量系统是俄罗斯科学院

激光和信息技术研究所研制的自收缩哈特曼波前测量系统,其技术指标为:探测范围约为 15μm;测量精度为 0.08μm;响应速度约 30Hz 探测口径为 20mm~95mm。

### 3 实验测量及结果分析

为了避免激光装置输出高峰值功率的激光脉冲对哈特曼测量系统造成破坏,以及使用衰减元件给激光系统累加畸变波前,实验测量是在低能量下进行的。

实验分为两部分进行。首先,对进入压缩池前的激光脉冲波前畸变进行研究,以避免压缩池引入的波前畸变从而考察整个装置前面部分的性能水平。在压缩池前的波前测量光路如图 3 所示。

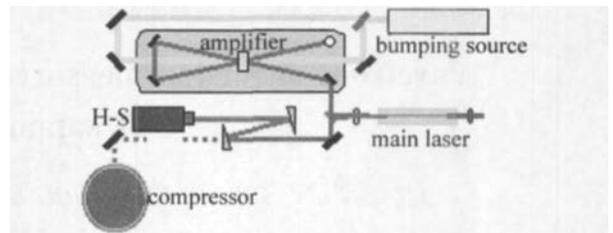


Fig 3 Layout of wavefront measurement before compressor

由主放大器输出的 ∅60mm 的光束通过两块劈板引入哈特曼波前传感器,通过调整哈特曼自带的消像差缩束系统,数据采集系统采集到了如图 4a 所示的子孔径成像光斑图,通过重构算法得到的波前图 4c 以及相应远场焦斑见图 4b。

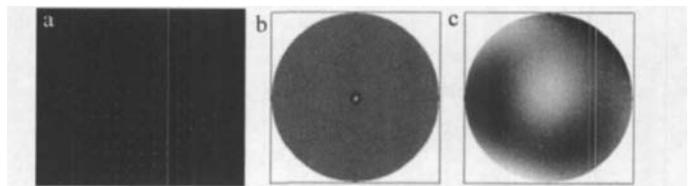


Fig 4 a- sub-lens focal spot b- far field focal spot c- wavefront aberration before compressor

由图 4 可以看到,压缩池前的波前 P-V 值为 0.13λ, RMS 值为 0.02λ,波前畸变的主要项为离焦。而相应的聚焦光斑已经接近了衍射极限水平。此结果表明 SILEX-I 超短脉冲激光系统压缩池前部分引入的波前畸变非常小,系统光束质量很好。

其次,还在压缩池后进行了波前测量实验。测量光路图见图 5。由于压缩池中使用了许多大口径的反射镜和衍射光栅,因此需要分析压缩池部分引入的波前畸变,同时对整个系统的性能指标做一个总体评价。为了降低压缩池内光栅上的激光通量,主放大器输出的 ∅60mm 的光束经一组 1:2.3 的透镜组扩束到 ∅140mm,再注入到压缩池。测量光路由压缩池内的取样镜通过窗口导出。

在测量实验中由于压缩池输出光束口径达到 140mm,超过了哈特曼波前传感器的探测口径,因此,

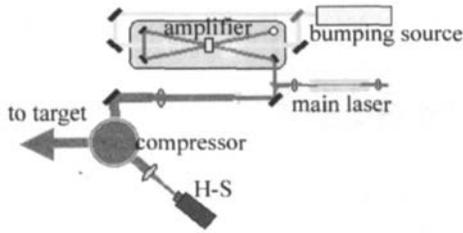


Fig 5 Layout of wavefront measurement after compressor

在测量光路中使用一块焦距为 1.6m 的透镜进行缩束,再由哈特曼波前传感器自带的自缩束系统进行准直。此缩束系统应先通过平行光进行定标,测量中需扣除此定标波前,即 1.6m 透镜及哈特曼自缩束系统引入的波前,从而得到激光装置在压缩池后的波前畸变。

图 6a 中给出了压缩池后波前畸变的测量结果。由图可以看到,波前 P-V 值为  $0.63\lambda$ , RMS 值为  $0.09\lambda$ ,主要包括像散和彗差,这可能是由压缩池中光栅的拼接误差以及光栅失谐造成的。同时,还对压缩池后输出的激光脉冲用  $F/1.7$  的立轴抛物镜进行聚焦,得到了如图 6b 所示的聚焦光斑的光强分布,焦斑的半峰全宽为  $5.7\mu\text{m}$ 。这个结果相比于国际上其它超短脉冲钛宝石激光装置在未进行波前校正的情况下得到的聚焦光斑而言,是最好的结果。

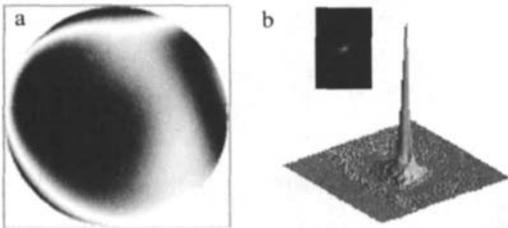


Fig 6 a-wavefront aberration after compressor b- focal spots of compressed beam

## 4 结论

对 SILEX-I 超强超短脉冲钛宝石激光装置的系

(上接第 94 页)

制方式的符号结构、传信率及误包率等性能,通过分析和比较,可知 DPM 调制方式比较复杂、传信率不如 DH-PM,但每个符号包含的比特数相同时其误包率小;DH-PM 方式的传信率高,误包率相对略大,但可以通过增加每个符号的比特数来减小其误包率,而此时传信率会下降。DH-PM 和 DPM 各有优势,应根据具体的要求选择相应的调制方式。由于 DH-PM 的传信率高,因而实时性要求较高时可选用该调制方式,而 DPM 则更适合于要求平均功率较低或系统可靠性要求较高(如军事通信)的通信系统。

## 参 考 文 献

[1] KE X Zh, XI X L. Wireless laser communication conspectus [M]. Beijing: Beijing University of Ports and Telecommunications Press

统波前畸变进行了研究。结果表明,系统的主要波前畸变来源于压缩池,压缩池输出波前的 P-V 值为  $0.63\lambda$ , RMS 值为  $0.09\lambda$ 。而压缩池前的波前畸变非常小, P-V 值仅为  $0.13\lambda$ , RMS 值为  $0.02\lambda$ 。用  $F/1.7$  的立轴抛物镜进行聚焦,得到聚焦光斑的半峰全宽为  $5.7\mu\text{m}$ 。结果肯定了该激光装置的良好性能,其光束质量在未使用变形镜补偿的国际同类装置中处于领先水平。

## 参 考 文 献

- [1] BACKUS S, DURFEE III C G, MURNANEM M *et al*. High power ultrafast lasers [J]. Review of Scientific Instruments 1998 69(3): 1207~1223
- [2] STEINMEYER G, SUTTER D H, GALLMANN L *et al*. Frontiers in ultrashort pulse generation: pushing the limits in linear and nonlinear optics [J]. Science, 1999 286(19): 1507~1512
- [3] TAJIMA T, MOUROU G. Zettawatt lasers and their applications in ultrastrong field physics [J/OL]. [http://prstab.aps.org/pdf/PRSTAB/v5/i3/e031301\\_2006-01-18](http://prstab.aps.org/pdf/PRSTAB/v5/i3/e031301_2006-01-18)
- [4] LIU L Q. Studies on beam control in high power ultra-short pulse Ti:sapphire laser system [D]. Mianyang Graduate Department CAEP, 2005 2: 22~29 (in Chinese).
- [5] LÜ B D. Laser optics propagation transform and beam quality of laser [M]. revised edition, Chengde: Sichuan University Press, 1992. 9~10 (in Chinese).
- [6] JIANG W H, XIAN H, YANG Z P *et al*. Applications of Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998 15(2): 228~235 (in Chinese).
- [7] LIX Y, JIANG W H. Zernike modal wavefront reconstruction error of Hartmann sensor on measuring the atmosphere disturbed wavefront [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002 14(2): 243~249 (in Chinese).
- [8] BAHK S, ROUSSEAU P, PLANCHON T *et al*. Generation and characterization of the highest laser intensities ( $10^{22}\text{W}/\text{m}^2$ ) [J]. Opt Lett, 2004 29(24): 2837~2839
- [9] BAUMHACKER H, PRETZLER G, WITTE K J *et al*. Correction of strong phase and amplitude modulations by two deformable mirrors in a multistaged Ti:sapphire laser [J]. Opt Lett, 2002 27(17): 1570~1573
- [10] PENG H Sh, HUANG X J, ZHU Q H *et al*. 286-TW Ti:sapphire laser at CAEP (invited paper) [J]. SPIE, 2004 5627: 1~5
- 2004 148~150 (in Chinese).
- [2] PANG Zh Y, PIAO D Zh, ZOU Ch Y. Performance comparison of several modulation schemes for optical wireless communication [J]. Journal of Guilin Institute of Electronic Technology, 2002 22(5): 2~4 (in Chinese).
- [3] ZHANG K, GONG M L, ZHANG H T. Performance of dual header-pulse interval modulation for wireless infrared multipath channels [J]. Laser Technology, 2003 27(1): 5~7 (in Chinese).
- [4] HU ZM, TANG JX. Digital pulse interval modulation for atmospheric optical wireless communications [J]. Journal on Communications, 2005 26(3): 76~77 (in Chinese).
- [5] JAROS B. Comparison of optical wireless modulation technique [OL/EB]. <http://72.14.203.104/search?q=cache:gUB3f5J2wJwww.stanford.edu/~rjaros/final.pdf+%22Comparison+of+Optical+Wireless+Modulation+Technique%22&hl=zh-CN,2002-04-10>
- [6] GHASSEMLOOY Z, HAYES A R, WILSON B. Reducing the effects of intersymbol interference in diffuse DPM optical wireless communications [J]. IEEE Proc Optoelectron, 2003 150(5): 446~447