超短超强激光波前修正*

王兆华 金 展 郑加安 王 鹏 魏志义** 张 杰

(中国科学院物理研究所光物理实验室,北京100080)

摘要 对自适应波前修正系统进行了探讨和研究,并将其应用于 20TW 的 CPA 激光放大装置中. 在没有进行波前修正前,该激光系统输出的激光光束的波前畸 变的 P-V 值约为 20 *λ*,对应的光束质量约为 3.5 倍的衍射极限;使用自适应波前 修正系统后,激光光束的波前畸变的 P-V 值达到了 0.15*λ*,相应的光束质量改进 到了 1.5 倍的衍射极限,不仅使同样能量的超强飞秒激光的可聚焦功率密度提高 了约 1 个数量级,而且也明显地改善了聚焦激光与周围背景的对比度.

关键词 Shack-Hartmann 传感器 自适应波前修正系统 衍射极限光束 飞秒激光

啁啾脉冲放大(CPA)技术促进了超短超强激光研究的飞速发展^[1,2],利用该技 术目前人们所能得到的脉冲峰值功率已经达到了几百太瓦(TW)乃至拍瓦(PW)的 量级^[3],并被广泛地应用于超快 X 射线源的产生、电子加速、激光聚变、相对论 等离子体物理及强场物理等研究领域^[4~6].但是,在超强激光与物质相互作用的 实验中,真正起作用的最主要指标通常不是激光的峰值功率,而是可聚焦的功率 密度.为了提高激光的可聚焦功率密度,最直观而常用的措施是提高激光脉冲的 能量、压缩脉冲的宽度,为此就必须发展规模更大的激光装置,但其昂贵的造价 对许多研究人员来说是不现实的.然而,如果能有效地提高激光的光束质量,压 缩可聚焦的光斑尺寸,同样可以得到高的功率密度.考虑到激光的功率密度反比 于激光光斑的平方,因此提高光束质量不仅比提高脉冲能量"经济"得多,而且 对聚焦功率密度还有更为显著的效果^[7].实际上,对于同样百 TW 的超强激光装 置,由于光束质量的不同,功率密度可能会从 10¹⁸~10²¹W/cm²而不同.

光束质量是高功率激光系统中至关重要的一个问题,由于在实际的放大过

²⁰⁰⁴⁻⁰⁴⁻²⁶ 收稿, 2004-10-22 收修改稿

^{*}国家重点基础研究项目基金(批准号:G1999075202)、国家自然科学基金(批准号: 60225005, 60308001) 及国家惯性约束核聚变高技术主题基金资助项目

^{**} 联系人, E-mail: zywei@aphy.iphy.ac.cn

程中放大介质所存在的温度梯度效应及众多光学元件的像散、像差、球差等因 素^[8],使得放大后的激光光束通常不再是理想的衍射极限光束,在聚焦时,就会 出现散斑现象,从而导致激光能量不能有效地聚集在焦点上.随着激光能量的不 断增大、放大级次的不断增多、装置规模的不断升级,这种效应会越来越严重.因 此,为了得到更高的激光功率密度,补偿放大过程中的光学畸变,追求接近衍射 极限的光束质量,是超强飞秒激光研究中具有重要实际意义的研究内容.尽管冷 却放大介质以消除温度梯度效应可以部分解决光学畸变的问题^[8],但目前最有效 的手段仍然是采用自适应光学系统修正放大脉冲波前畸变的技术方案^[9].在一般 情况下,对于大功率激光系统而言,直接放大后的光束质量通常在 3~5 倍衍射 极限,而经过自适应光学系统修正波前畸变后,光束质量可以提高到接近 1 倍衍 射极限,这样用相对低的成本,既可使功率密度提高约 1 个数量级.鉴于此,我 们在本室的 20TW 激光装置(极光 II 号)上,通过采用自适应光学系统,进行了放 大脉冲波前畸变的修正研究.结果表明,对于光束质量为 3.5 倍衍射极限的激光 光束,经波前畸变修正后其光束质量可以提高到 1.5 倍的衍射极限,本文将报道 有关的实验结果.

1 自适应光学系统

典型的自适应光学系统通常由 Shack-Hartmann 波前传感器、变形镜、数字 信号处理器、控制与显示程序等几个部分组成.其工作原理是先用 Shack-Hartmann 传感器探测激光的波前畸变,再将波前信息传送给控制程序,控制程序 根据畸变量的大小,给数字信号处理器发出改变电压指令,处理器根据指令将相 应的电压加到变形镜电极上以改变变形镜的形状,此时由变形镜反射的激光波 前也随之发生变化,然后再用传感器探测激光波前,判断其畸变情况,依此重复, 直到得到理想的激光波前^[10].下面简单介绍一下各部分的原理:

1.1 Shack-Hartmann 传感器

Shack-Hartmann 传感器由一组微透镜阵列和 CCD 摄像机组成. 微透镜阵列 将一个完整的激光波前在空间上分成许多微小的部分,每一部分都被相应的小 透镜聚焦在焦平面上,一系列微透镜就可以得到由一系列焦点组成的平面,如 图 1(a)所示;如果激光波前为理想的平面波前,那么在微透镜阵列焦平面上就 可以得到一组均匀而且规则的焦点分布,如图 1(b)所示;然而实际的激光波前 并不是理想的平面波前,它们或多或少地带有一些畸变,用微透镜阵列聚焦后, 焦点不再是均匀分布,而是与理想的焦点发生了位移,如图 1(c)所示;用 CCD 摄像机来测量实际焦点与理想焦点之间的位移量就可以估算出实际激光波前的 畸变情况.



(a)



图 1 Shack-Hartmann 传感器工作原理示意图 (a)微透镜阵列,(b)理想平面波的焦点分布,(c)实际波前的焦点位移情况

1.2 变形镜

变形镜由反射膜层、玻璃基底、压电材料以及几十个微小电极组成.反射膜 层根据需要将金属膜或者介质膜镀在玻璃基底上,玻璃基底与压电材料紧密连 接在一起,压电材料后面是一组微小电极;在工作时,将适当的电压加在电极上, 压电材料就会伸缩,从而引起玻璃基底的形状改变,这时的反射面将不再是理想 的平面,而是根据实际的激光波前形状变得凸凹不平,当激光被变形镜反射时, 不同位置的激光走过的光程就会不一样,进而得到补偿,反射后的激光波前就接 近理想的平面波前.图2为变形镜结构示意图和实物照片.

1.3 信号处理和控制系统

信号处理和控制系统由数据采集卡、数据分析处理软件和一组电压控制器组成. 首先将 Shack-Hartmann 传感器采集到的波前信息输入到计算机内部, 用软件进行分析处理, 根据波前畸变量的大小给出需要施加到变形镜电极上的电压大小, 并将该信息传送给电压控制器让其执行; 由于每一个电压控制器都对应着变形镜的单个小电极, 这样不同的电极上就有不同的电压, 不同位置上的压电材料就有不同的伸缩量, 使得一个完整的平面根据光束的实际畸变情况而改变形状.

SCIENCE IN CHINA Ser. G Physics, Mechanics & Astronomy



图 2 变形镜结构示意图和实物照片 (a)变形镜结构, (b)变形镜实物照片

2 实验装置

我们的自适应光学系统安装在 CPA 系统压缩器与实验靶室之间,并置于真 空室中,如图 3 所示.由压缩器输出的激光通过真空室的窗口入射到变形镜上, 再由变形镜反射后经过一个全反镜反射出真空室,之后另用一分光比为 99:1 的 分束镜将光分为两路.其中反射后的主光束入射至实验靶室以待开展物理实验 用,低能量的透射光束作为探测光入射到 Shack-Hartmann 传感器中,由传感器探 测其波前畸变的情况,并与理想波前进行比较,通过比较给出畸变量的大小并且 传送给控制系统,控制系统给电压控制器发出改变电压指令,以将所需的电压施 加到变形镜上使其形状发生改变,从而使得反射激光的波前发生相应的变化;如 此重复迭代,直到激光的波前接近理想波前为止;由于此时入射到靶室中的主激 光具有理想的波前,因此可望聚焦到接近衍射极限的焦斑尺寸.

3 实验结果及数据分析

在自适应光学系统中,正确地选择参考波前具有十分重要的意义. 一般来说, 有两种方法可以得到参考波前^[11,12],一是通过理论计算,由计算得出的理想平面

波前作为参考波前;另一种方法是使用光束质量非常好的激光光源,比如半导体激光器、氦氖激光器等,在使用时,先将参考光源扩束使其光束口径与要修正的激光相同,然后用 Shack-Hartmann 传感器采集参考光源的波前,用它作为理想的波前.图 4(a)为我们利用氦氖激光器建立的参考波前,图 4(b)为采集到的钛宝石激光器放大后的实际波前.



图 4 Shack-Hartmann 传感器采集到的激光波前 (a) 理想的激光波前, (b) 实际的激光波前

实验中我们所用的钛宝石激光的光斑直径约为 30mm,将采集到的实际激光 波前与理想激光波前进行相干迭加,迭加后的干涉图案如图 5(a)所示,根据干涉 图可以计算出激光波前的相位分布和畸变量的大小,图 5(b)给出了波前的相位分 布,相位分布的峰谷值(P-V),也就是指最大的波前畸变量,图中显示的量大约有 20λ,这里λ为激光波长;这样的激光在聚焦时就不能得到很小的焦斑.我们用一 块焦距为4m的长焦距透镜将其聚焦后,得到的焦点光斑分布如图 5(c)所示,CCD 采集到的结果表明,其水平和垂直方向的光斑直径分别为 568 μm 和 432 μm,各 对应着 4.2 倍和 3.2 倍的衍射极限.

基于采集到的光束畸变数据,我们启动自适应光学系统以矫正激光波前,在 矫正过程中,用 Shack-Hartmann 传感器监测波前的变化,干涉图将随着激光波前

SCIENCE IN CHINA Ser. G Physics, Mechanics & Astronomy

624

的变化而发生变化,当接近理想波前时,干涉图就会变的比较平整,图 6(a)为我 们得到的补偿后的典型干涉图,从该图可以明显地看出相位分布的 P-V 值已变得 比较小,图 6(b)是对应的相位分布图,结果显示 P-V 值大约为 0.15λ,如果还是采 用图 5(b)的坐标,这样小的畸变已经很难用相位分布图表示出来,因此我们将坐 标值放大,才可以清楚的看到畸变的结构;同样采用 4 m 的透镜聚焦后的远场焦 斑分布如图 6(c)所示,其水平和垂直方向的光斑直径分别为 200 μm 和 214 μm, 对应着 1.5 和 1.6 倍的衍射极限.



图 5 修正前的激光波前及其聚焦后的焦斑大小 (a)实际波前与理想波前相干迭加后的干涉图,(b)波前的相位分布,(c)聚焦后的焦斑

通常来说,使用变形镜对激光波前进行矫正可以区分为两种方式:(i)对时间域的矫正,(ii)对空间域的矫正.对时间域的矫正是将变形镜安装在色散器件中,如展宽器或者压缩器中,矫正的目的是为了得到脉宽更窄激光脉冲,由于我们的激光器已经达到了 30fs 的良好指标,因此不需要再对时域进行矫正.对空间域的矫正通常是安装在压缩器之后(有的也在压缩器之前安装一个小的变形镜), 其目的只是对空间分布进行矫正,基本不影响时间域的分布,我们用相关仪测量



的结果显示,矫正前后的脉冲宽度没有变化.

图 6 修正后的激光波前及其聚焦后的焦斑大小 (a)实际波前与理想波前相干迭加后的干涉图, (b)波前的相位分布, (c)聚焦后的焦斑

4 结论

我们对自适应波前修正系统进行了探讨和研究,并将其应用于我们 20TW 的 CPA 激光放大装置中,对其输出的激光波前进行修正.实验中首先用 Shack-Hartmann 传感器对该系统输出的激光波前进行测量,以收集修正之前光束 的有关数据,结果显示通常情况下波前畸变的 P-V 值可达 20 λ,对应的光束质量 大约为 3.5 倍衍射极限,这样的光束在激光功率密度起主导作用的物理实验中, 经聚焦后显然不可能得到很好的焦斑;当启动自适应波前修正系统后,重新用 Shack-Hartmann 传感器测量到的波前畸变的 P-V 值变为 0.15 λ,激光光束的衍射 倍数也达到 1.5 倍衍射极限,基于这一改善后的聚焦焦斑,可使得同样能量下的 超强激光经聚焦后的功率密度能提高约 1 个数量级.此外使用波前修正系统后, 聚焦焦斑的形状也变得非常规则,有效地提高了与周围背景的对比度^[13],这对物 理实验研究和实验数据的分析都具有十分重要的意义.

SCIENCE IN CHINA Ser. G Physics, Mechanics & Astronomy

参考文献

- 1 Baltuska A, Wei Z Y, Pshenichnikov M S, et al. Optical pulse compression to 5 fs at a 1-MHz repetition rate. Optics Letters, 1997, 22 (2): 102~104
- 2 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.中国科学,A 辑,2000,30(11): 1046~1050
- 3 Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y, et al. 0.85-PW, 33-fs Ti:sapphire laser. Optics Letters, 2003, 28 (17): 1594~1596
- 4 Li Y T, Zhang J, Sheng Z M, et al. Spatial distribution of high-energy electron emission from water plasmas producedby femtosecond laser pulses. Physics Review Letters, 2003, 90(16): 165002(1~4)
- 5 Malka G. Relativistic electron generation in interactions of a 30 TW laser pulse with a thin foil target. Physical Review E, 2002, 66: 066402(1~8)
- 6 Hosokai T. Effect of a laser prepulse on a narrow-cone ejection of MeV electrons from a gas jet irradiated by an ultrashort laser pulse. Physical Review E, 2003, 67: 036407(1~8)
- 7 Matsuoka S, Yamakawa K. Wave-front measurements of terawatt-class ultrashort laser pulses by the Fresnel phase-retrieval method. J Opt Soc Am B, 2000, 17(4): 663~667
- 8 Primot J. Three-wave lateral shearing interferometer. Applied Optics, 1993, 32: (31): 6242-6249
- 9 Zeek E, Maginnis K, Sterling B K, et al. Pulse compression by use of deformable mirrors. Optics Letters 1999, 24 (7): 493~495
- 10 Druon F, Cheriaus G, Faure J, et al. Wave-front correlation of femtosecond terawatt lasers by deformable mirrors. Optics Letters, 1998, 23 (13): 1043~1045
- 11 Zhu L J, Sun P C, Bartsch D U, et al. Wave-front generation of zernike polynomial modes with a micromachined membrane deformable mirror. Applied Optics, 1999, 38 (28): 6019~6026
- 12 Zhu L J, Sun P C, Bartsch D U, et al. Adaptive control of a micromachined continuous-membrane deformable mirror for aberration compensation. Applied Optics, 1999, 38(1): 168~176
- 13 Chanteloup J C, Druon F, Nantel M, et al. Single-shot wave-front measurements of high-intensity ultrashort laser pulses with a three-wave interferometer. Optics Letters, 1998, 23(8): 621~623