

文章编号: 1001-4322(2003)10-0969-04

强激光反射镜热畸变对光束传输特性的影响*

周次明, 程祖海

(华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 通过等效净吸收功率密度方法获取了强激光反射镜热畸变的干涉图像, 提出了热畸变反射镜在平面波照射下近场波面畸变与远场光斑的计算方法, 探讨了强激光远场光斑测试的一种新思路。定量分析结果表明, 对单晶硅镜, 在净吸收功率 210W, 光照时间为 6s 时, 最大热畸变达到 0.76 μm , 由此造成的近场波面 Zernike 离焦系数为 0.32 μm , x 方向和 y 方向彗差分别为 0.13 μm 和 0.22 μm , x 方向倾斜系数上升到 0.12 μm , 光束质量因子达 5.7。

关键词: 强激光; 硅反射镜; 热畸变; 干涉图像分析

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A

随着高能激光器的快速发展, 人们对其谐振腔镜提出了越来越高的要求。高能激光器腔镜耐强光性能决定了激光近场相位分布和远场光斑能量分布这两项衡量高功率激光束光束质量的重要参数。研究表明^[1~4], 工作气压较低的高能激光束近场相位畸变主要来自于谐振腔腔镜和输出窗口的热吸收变形, 而且在高能激光器传输与发射系统中, 强激光反射镜热效应产生的变形也会进一步导致激光远场光斑能量聚焦程度降低, 影响激光的瞄准(指向)稳定性。过去人们的注意力都集中在大气湍流和热晕等对激光远场传输的影响, 并有过深入透彻的分析^[5], 但研究强激光腔镜热变形对光束传输特性影响的报道并不多见。

本文采用等效净吸收功率密度的方法对强激光反射镜的热畸变进行了测量; 提出通过对干涉图像的计算, 获得发生热畸变的反射镜在理想平面波照射下的近场畸变波面与远场光斑的方法, 分析讨论了热畸变对近场波面、远场光斑光强分布和发散特性的影响, 探讨了强激光远场光斑测试的一种新思路。

1 等效测量实验

强激光反射镜的热畸变与辐照激光功率、光斑尺寸、光强分布、材料或膜层的吸收率、作用时间等因素有关。为了模拟高能激光腔镜热畸变的影响, 本实验采用等效净吸收功率密度的方法进行等效测量。所谓吸收功率密度等效测量就是用较小的激光功率、较高的吸收率与合适的光斑尺寸, 模拟与实际高能激光运行过程中反射镜吸收功率密度相当的较高的净吸收功率密度, 达到反射镜在高能激光中发生热畸变的等效效果。

实验测试系统如图 1 所示。被测样品镜是直径为 80mm 没有镀上高反射膜的硅镜。使用 Infrared Instrument 公司的 IR-7 型 CO₂ 激光器做光源(激光功率 6W, 功率稳定度小于 2%), 在 Molectron 公司的功率计上测得此样品镜的吸收率为 70%。而在高功率激光器中, 实际使用的高反射率硅镜的反射率已经达到 99.9% 以上, 即使不考虑散射影响, 反射镜的净吸收率仅为 0.1%。也就是说, 用 CO₂ 激光作为模拟强激光光源, 用不镀膜硅镜作为模拟反射镜, 其视在功率可以放大 700 倍, 即模拟实验的 100W 激光相当于 70000W 的实际激光。因此在这个研究过程中, 用最高功率可以达到 2 kW 的 CO₂ 激光代替强激光光源是合理的。通过激光传输系统, 照射到镜面上的激光光斑是一个短半轴为

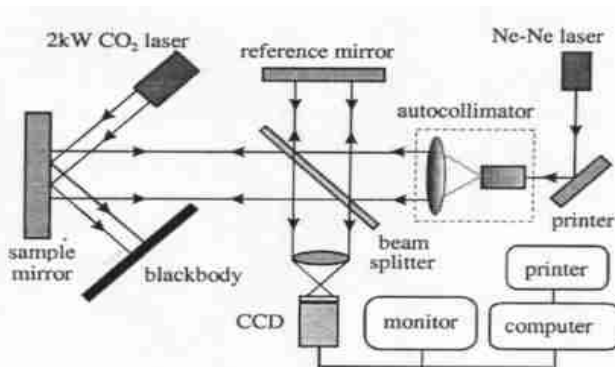


Fig. 1 Schematic of measurement system

图 1 实验测试系统简图

* 收稿日期: 2003-06-05; 修订日期: 2003-07-02

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题; 国家自然科学基金资助课题(69878008)

作者简介: 周次明(1973-), 男, 博士生, 从事高功率激光和光信息处理技术研究; E-mail: zhouciming@hotmail.com.

14.5mm 长半轴为 17mm 的椭圆。图 2 为实测干涉图。从图 2 可以看到,随着激光照射时间的增加,干涉条纹的变化逐步增大,激光直接照射区域,条纹变化非常明显,表明镜面变形越来越严重。



Fig. 2 Experimentally measured fringe patterns, the irradiating laser power is 300W

图 2 在 300W 功率激光照射情况下,不同光照时间采集的镜面干涉图

2 干涉图像分析^[6]

干涉图像是由一系列灰度呈余弦分布的条纹组成。条纹灰度取极值时,相位差等于 2π 的整数倍。一般而言,干涉图像的计算机分析由以下几个步骤组成:去噪声、图像规整、条纹细化、细化条纹定级、波面拟合和后处理。限于篇幅,下面只描述本文使用的波面拟合和后处理中的远场光强分布仿真方法。

通过干涉图像获得激光近场波面的方法有很多,而对于泰曼-格林干涉仪得到的干涉图,去掉从中获得波面的倾斜项后,就能得到实际探测的波面。由于反射镜一般都有初始波像差。这个波像差通过干涉实验,被所采集的每一幅干涉图所携带。本文研究的是强激光造成反射波面的变化情况,因此,对于这个不利于分析的反射镜面的初始波像差,必须通过一定方式去掉。基于泽尼克(Zernike)多项式具有的正交特点,如果把包括初始时刻在内的各个时刻的干涉图都使用此多项式拟合后,通过多项式系数相减的方式就可以去掉初始波像差。相减后的系数表示的波面仅仅为强激光反射镜热效应造成反射波面的畸变,与反射镜的初始面形产生的波像差没有关系。

假设 $W_0(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n A_{0nm} Z_{nm}$ 是泽尼克多项式拟合的初始波面; $W_1(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n A_{1nm} Z_{nm}$ 是经泽尼克多项式拟合后所考察时刻的波面; $\Delta W(\rho, \theta)$ 是强激光反射镜热效应造成的波像差。则有如下关系

$$\Delta W(\rho, \theta) = W_1(\rho, \theta) - W_0(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n (A_{1nm} - A_{0nm}) Z_{nm} = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n A_{nm} Z_{nm} = \sum_{i=1}^I A_i Z_i \quad (1)$$

式中: (ρ, θ) 是极坐标, Z_{nm} 和 Z_k 是泽尼克多项式, A_{0nm} , A_{1nm} 和 A_i 是相应的泽尼克多项式系数。显然,强激光反射镜热畸变造成的波像差能由泽尼克多项式系数之差 A_i 来体现。

强激光反射镜热畸变造成远场接收平面上的归一化光强分布可以表示为^[7]

$$I(x, y) = \left| \frac{1}{z} \int F[\exp(ik \Delta W(\rho, \theta)) \exp(ik^2/2z)] \exp(ik^2/2z) \right|_{f_x=x/z, f_y=y/z}^2 \quad (2)$$

式中 $F[\exp(ik \Delta W(\rho, \theta)) \exp(ik^2/2z)]$ 是 $\exp(ik \Delta W(\rho, \theta)) \exp(ik^2/2z)$ 的傅里叶变换。 f_x, f_y 是频率空间变量, k 为波数, λ 为波长。

3 近场波面畸变

图 3 为使用上述理论计算得到的 300W 激光照射情况下近场畸变波面图。其中图 3(a) 为用泽尼克多项式全局拟合出图 2(a) 的干涉图表示的波面图后,去掉泽尼克多项式表示的倾斜项和常数项的波面图,它可以理解为镜面初始面形或初始波像差。图 3(b), (c), (d), (e) 为与初始波像差相减后的波面图,也就是由强激光造成理想波面的畸变图,与初始面形图 3(a) 没有关系。图中,横坐标单位是 mm,纵坐标单位为测量光束半波长。

从图 3 中可以明显地看出,在同一功率的照射下,随着激光辐照时间的增加,波面畸变越来越严重。激光照射区域波面畸变严重,同时也引起其他区域发生变化,如图 3(e) 可以看到整个波面有所倾斜。正如分析原理中所述,波面相减后干涉图本身携带的倾斜项已经被减掉,因此波面在此处的倾斜意味着强激光热畸变不仅造成波阵面相位畸变,而且还造成光轴方向漂移。定量分析此畸变波面,所获得数据的大小就是强激光造成热畸变的大小。图 3(b), (c), (d), (e) 中光照中心最大热变形分别为 0.48, 0.59, 0.69, 0.76 μm 。通过考察拟合此波面图的泽尼克多项式系数,可知此时主要像差是离焦和彗差。在 6s 时,离焦系数达到 0.32 μm , x 方向和 y

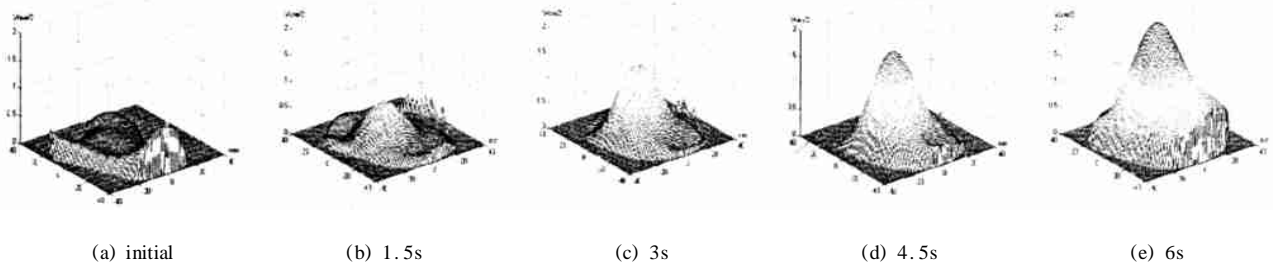


Fig. 3 Wavefront with aberrations, the irradiating laser power is 300W

图 3 在 300W 激光照射情况下不同光照时间的畸变波面图

方向的彗差分别达到 $0.13\mu\text{m}$ 和 $0.22\mu\text{m}$,同时 x 方向倾斜系数(光轴漂移)上升到 $0.12\mu\text{m}$ 。

4 远场光强分布

图 4 为远场光斑的三维图和灰度图。三维图是通过使用公式(2)计算,并将理想平面波远场分布最大光强归一化为 100,其他强度分布与其比较后绘制出。由于光斑主瓣和旁瓣强度差很大,为了便于比较和更好地看到光斑主瓣和旁瓣的变化情况以及旁瓣的细节,将图中纵向坐标最大标示限制在 20 以内,截断了相对强度大于 20 的三维显示。灰度图是三维图在平面上的投影。

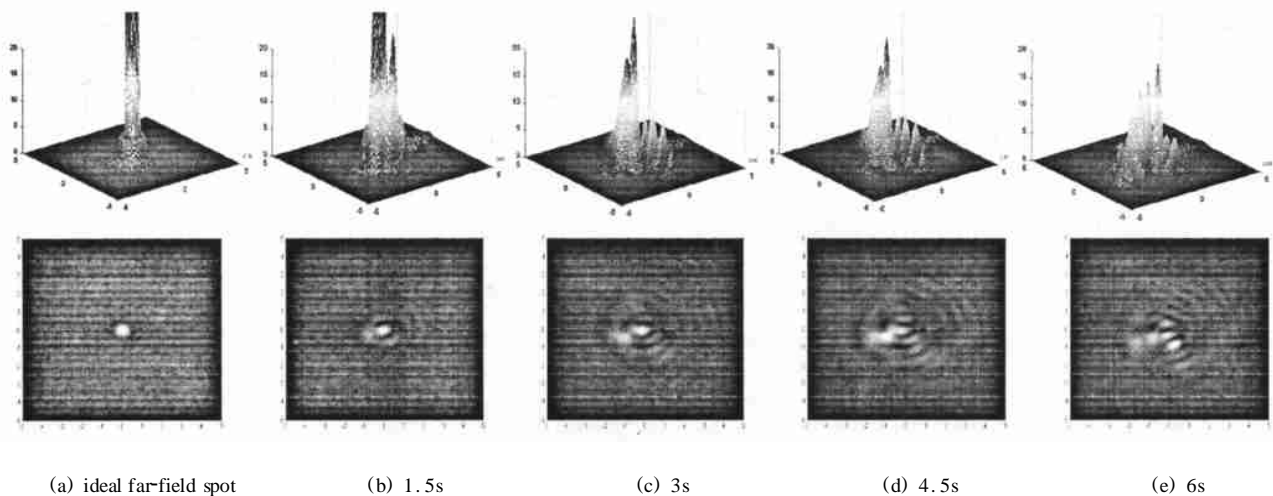


Fig. 4 Three dimension maps and grey images of far-field spots,

the ideal maximum power of far-field spot is normalized to 100,the irradiating laser power is 300W

图 4 在 300W 激光照射情况下远场光斑的三维图和灰度图,三维图中理想远场最大强度归一化为 100

从图 4 中可以看出,随着时间的推移,由于热效应的存在,理想平面波的远场光斑由图 4(a) 迅速变化到图 4(e)。最为明显的特征就是远场光斑形状在不停地发生变化,中心光强逐步降低,旁瓣光斑亮度逐步升高,光斑半径扩大,同时还出现了多个强度极大值,也就是说,除了光斑中心附近外,在像面其他区域又出现了一些相对较强的光点,即光斑弥散。为了量化热畸变对远场光斑的影响,本文使用远场 86.5% 能量光斑半径之比计算了光束质量因子。图 4(b), (c), (d) 和 (e) 中的因子分别为 3.6, 5.24, 5.6 和 5.7。

5 讨论

对于强激光远场光斑的测试一般采用长焦距透镜成像放大法、列阵相机测试法^[8]和 Rattle Pair 测试法^[9]三种。这三种方法都有其固有的缺点,文献[10]对其进行了比较分析。这几种测试法有一个共同的特点就是使用 CCD 作为光斑记录介质。由于强激光本身和在传输过程中众多因素的影响,使远场光束的强度分布中含有较多的高阶空间频率分量,光强最强区域(主瓣)和光强较弱区域(旁瓣)的光强相差太大。强激光经衰减后如果用 CCD 接收光斑,而目前还没有动态范围如此大的 CCD 探测器,很难探测到光斑的高阶分量,相对的空间强度分布很难反映出光斑的高阶分量,而只能给出光斑主瓣形状,往往探测不到光斑的旁瓣。因此,如果将由上述通过干涉图仿真强激光近场波面和远场光强分布的方法进行推广,通过一定的方式获得被测强激光的干涉图像,然后由此推出其远场的数字化光斑,这样就可以弥补现有远场光斑测试技术的不足。另外,对于本

文中光斑图的计算方法,在使用具有标准像差的波面进行检验后,结果表明与经典文献中记载完全相同。

参考文献:

- [1] 马毅勇,程祖海,张耀宁. 高功率激光器窗口热变形分析的有限元方法[J]. 强激光与粒子束,1999,11(1): 6—10. (Ma Y Y, Cheng Z H, Zhang Y N. Finite - element method in thermal deformation analysis of high power laser windows. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(1): 6—10)
- [2] Pearson J E. Adaptive Laser Resonator[J]. *Laser Focus*, 1981, 17(9): 53—70.
- [3] 陈金宝,刘泽金,蒋志平,等. 非稳腔DF激光窗口热效应及其对远场光斑的影响[J]. 强激光与粒子束,1994,6(2): 243—249. (Chen J B, Liu Z J, Jiang Z P, et al. Heating effect of DF laser unstable cavity window and its affect on far - field optical spot. *High Power Laser and Particle Beams*, 1994, 6(2): 243—249)
- [4] 库耕,程祖海,朱松林,等. 腔镜变形对平凹稳腔激光振荡模式影响的数值研究[J]. 强激光与粒子束,1997,9(3): 447—450. (Ku G, Cheng Z H, Zu S L, et al. Numerical study of effect of the mirror distortion on the oscillatory mode variation on stable resonator. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, 9(3): 447—450)
- [5] Strohbehm J W, Walsh J L, Ulrich P B, et al. Laser beam propagation in atmosphere[M]. Berlin: Spring - Verlag, 1978.
- [6] Zhou C M, Cheng Z H, Zhang Y N. Good processing method of interference patterns[A]. SPIE[C], 2001, 4552:16—21.
- [7] 黄婉云. 傅里叶光学教程[M]. 北京:北京师范大学出版社,1985. (Huang W Y. Tutorial of Fourier Optics. Beijing: Beijing Normal University Press, 1985.)
- [8] 梁向春,蒋玉柱,施阿英. 高功率激光的光学性能测试[J]. 光学学报,1982,2(2): 113—121 (Liang X C, Jiang Y Z, Shi A Y. Optical characteristics measurements of high power laser. *Acta Optica Sinica*, 1982, 2(2): 113—121)
- [9] Laumann C W, Miller J L, Thompson C E, et al. ICF Quarterly Report[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, UCRL-JC-106786, 1991.
- [10] 何凌,陈波,刘华,等. 激光远场焦斑测试技术的实验研究[J]. 强激光与粒子束,2003,15(3): 245—248. (He L, Chen B, Liu H, et al. Experimental investigation in far - field test technique for high power laser output. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(3): 245—248)

Influence of thermal deformations of high power laser mirror on beam transfer characteristic

ZHOU Ci-ming, CHENG Zai-hai

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper presents a method of obtaining distorted wavefront and far-field spots generated by ideal beams from a mirror of laser induced deformations, through the calculating the interferograms of mirrors which are obtained by the experimental method of equivalent power density of pure absorption, and discusses a new idea of measuring far-field spot of high power laser. The results of quantitative analysis indicate that, for pure Si mirror, when the power of pure absorption is 210W and irradiating time is 6s, the maximum thermal deformation is 760nm, and because of deformations the defocusing of near-field wavefront 320nm, primary coma along x axis and y axis is 130nm and 220nm respectively, the tilt along x axis is up to 120nm, and the beam quality factor is 5.7.

Key words: High power laser; Si mirror; Thermal deformation; Interferogram analysis