

的研究。

参 考 文 献

- 1 祝家清著. 自由电子激光引论(第一版). 武汉: 湖北教育出版社, 1994
- 2 张世昌著. 自由电子激光导论(第一版). 成都: 西南交大出版社, 1993
- 3 惠钟锡主编. 自由电子激光(第一版). 北京: 国防工业出版社, 1995
- 4 Joshi C. IEEE J Q E, 1987; 23: 1578
- 5 Camel Y. Phys Rev Lett, 1983; 51: 566

高功率 CO₂ 激光作用下硅镜热畸变的动态过程研究

张耀宁 库 耕 张小莉 杜泽明 程祖海

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 以光学干涉方法, 实验研究了在 CO₂ 激光束入射在硅镜上, 硅镜热畸变的动态过程。在变形之初, 硅镜镜面的位移量变化迅速。对于一面直径 70mm, 厚 8mm 的硅镜, 吸收激光功率 140W, 作用时间 4s 时最大挠变形 0.76μm。这对于高功率短波长激光器而言是不可忽略的。

关键词: 热畸变 高功率激光器 硅镜 挠变形

The investigation of the dynamic process on thermal distortion of silicon mirror

Zhang Yaoning, Ku Geng, Zhang XiaoLi, Du Zeming, Cheng Zuhai

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: Used optical interferometry, the dynamic process of thermal distortion of the silicon mirror was investigated experimentally, while the 2kW CO₂ laser beam is used as incident source. The displacement of surface of the silicon mirror is varying rapidly in the beginning of the distortion. For a silicon mirror, that is 70mm in diameter and 8mm in thickness, the maximum deflection introduced by thermal distortion is 0.76μm, when the absorbed laser power is 140W and the acting time is 4s. It is not a negligible problem to a high power short wavelength laser.

Key words: thermal distortion, high power laser, silicon mirror, deflection

引 言

至今为止, 硅镜和铜镜仍是高功率激光器中最常用的腔镜基片材料。然而腔镜吸收了激光功率将产生热应力和热畸变。如果在镜面上有灰尘或缺陷时, 在这些地方上的热应力将变大到足以使镜子破坏。另一方面, 功率足够高时, 激光镜的热畸变将较严重, 当热畸变达到一定程度时激光束质量将变坏。G. L. Herriot 和 H. E. Reedy 以有限元法分析了铜镜和硅镜的稳态热变形^[1]。我们已对铜镜的变形作了实验研究, 硅镜的热变形作了数值模拟分析^[2,3]。然而硅镜热变形的实验数据, 特别是动态过程的数据很少。本文将介绍最近实验验证了的硅镜热变形动态过程。

一、热 畸 变 理 论

激光器腔镜受到腔内振荡的受激辐射作用被加热。由于热流是从镜子的镀膜面传导到背面、侧面, 镜子内将呈现不均匀的温度分布。而且, 硅的热导率较低, 对通常用作腔镜的硅镜, 这种轴向热流的热弛豫常数在数秒量级。因此, 分析硅镜热畸变需解含时热传导方程: $\Delta T = (1/a)(\partial T/\partial t)$ (1)

考虑到激光束在镜面上强度分布是以镜子的轴线为对称轴的轴对称分布, 则三维的热传导和热变形问题可以简化为二维问题 $\partial^2 T/(\partial z^2) + \partial^2 T/(\partial r^2) + (1/r)(\partial T/\partial r) = (1/a)[\partial T/(\partial \tau)]$ (2)

式中, $a = \lambda/\rho \cdot C$, λ 为硅镜的热导率, ρ 为它的密度, C 为它的比热; τ 为照射时间。

结合边界条件就可解出各个时刻中硅镜内的温度场。镀膜面吸收的受激辐射, 可以简化为高斯分布, 也

可以简化为均匀分布;硅镜和周边空气的自然对流换热,简化为绝热。

$$\omega = (1 + \nu)\alpha_l [C_1 + C_2 r^2 + \int_r^R \frac{H(r)}{r} dr] \quad (3)$$

式中, ω 为挠度, ν 为泊松比, α_l 为线膨胀系数。式中 $H(r) = \int_0^r m_0(r) r dr$ (4)

式中, $m_0(r)$ 定义为温度矩 $m_0(r) = \frac{12}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} \Theta(r, z) z dz$ (5)

式中, $\Theta(r, z) = T(r, z, \tau) - T(r, z, 0)$ (6)

是硅镜中温升的分布函数。(3)式中积分常数 C_1, C_2 决定于夹持镜子的边界条件。对于简支圆镜

$$C_1 = -R^2 C_2 = (1 - \nu) / [2(1 + \nu)] H(R) \quad (7)$$

对于周边夹紧圆镜 $C_1 = -R^2 C_2 = - (1/2) H(R)$ (8)

二、实验研究方法

由热畸变引起的镜面位移量是微米量级,所以用光学干涉测量方法。测试系统主要由二部分组成:泰曼-格林干涉仪;图像采集与处理系统。图 1 展示了测试系统的光路图,作为样品的圆形硅镜 5 把它的侧面夹持在镜架上,这意味着边界条件可认为是简支圆镜。硅镜不镀膜反膜时,它对 10.6 μ m 的吸收系数达 70%,因此可用 2kW CO₂ 激光代替高功率激光作入射光源。两个平面硅镜作为样品:标记为 iv 的镜直径 50mm,厚 8mm;标记

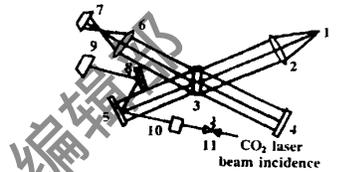


Fig. 1 The scheme of optical path of the test system



Fig. 2 A set of the interference patterns of 50mm silicon mirror

为 ⑤ 的镜直径 70mm,厚 8mm。入射激光斑为椭圆,短半轴 12.5mm,长半轴 15mm。这种实验条件下热弛豫时常数为 2 s,因此硅镜中温度和热畸变在开始的几秒均未达到稳态。为了找出热畸变随时间的变化规律,干涉图像由 CCD 摄像管 7 及录像机连续记录下来。与此同时,干涉图像还由计算机采集。入射激光束的功率由功率计 10 测量,对于样品 iv,样品 ⑤ 分别是 126W 和 140W。二者照射时间均为 4s。然后由电磁光闸 11 将激光束切断。图 2 是一组 i 50mm 硅镜在不同时刻采集下来的干涉图像。

通过计算机图像处理系统对干涉条纹细化、定级并算出在每一时刻硅镜镜面的拟合公式。处理系统还有一种功能,即可将变形前后的面形拟合公式相减。这样,热畸变引起的镜面上每一点的位移量就可从相减后所得拟合公式求出。这可以显示为三维曲面,也可显示为任一截面上的曲线。i 50mm 硅镜变形后的截面上的曲线示于图 3,可看到硅镜热畸变随时间的变化。最大挠变形 ω 在 2s 后不再进一步增大,对样品 iv 达到 0.45 μ m。同样的方法,也取得了样品 ⑤ 的数据。

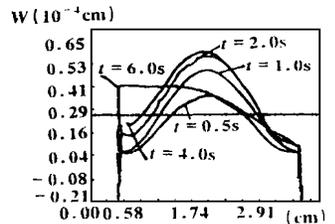


Fig. 3 The thermal distortion varied with time

三、实验结果及分析

各时刻二种样品的镜面最大挠变形列于附表。而镜面挠变形随时间的变化在图 4 中看得更清楚。

从图 3,图 4 可得到硅镜热畸变的动态过程如下:

Table The maximum deflections(ω) at each time

	ω (μ m)				
	0.5s	1.0s	2.0s	4.0s	6.0s
sample iv	0.29	0.43	0.45	0.45	0.11
sample ⑤	0.44	0.68	0.75	0.76	

- 一旦硅镜吸收了入射激光能量,热畸变立即产生。然后,硅镜镜面的位移迅速增加。
- 由热畸变引起的镜面位移在 2s 后不再增加。这与硅镜中的热层由镜面向镜背面传输的热弛豫时间相吻合。
- 热畸变还引起硅镜的扭转,它发生在 2s 后。当激光切断后,镜中的弯矩减小,直到消失,但扭转还在继续。

4. 经过热弛豫时间后,从数值模拟的结果可知,镜面和镜背面的温

差不再增加,但在硅镜中的温度分布还未达到稳态。因此由弯矩产生的挠变形不再增加但扭矩还在增加。当扭矩大于夹持力矩时,硅镜就会产生扭转。

即使镜子镀高反膜,硅镜的反射率达到 99%~99.9%,当激光腔内光强高达 100kW 时,腔中的硅镜也发生变形,镜面的挠变形将高达 0.5 μ m。这在 10.6 μ m CO₂ 激光器中也许可以忽略,但对 1.315 μ m 的氧-碘激光器运行就大有影响。热畸变产生后,激光束质量就会变坏。另外,当反射膜上有灰尘或缺陷的地方,更多的激光能量会被吸收,产生更严重的热应力以致于破坏反射膜,接着产生更大的热应力使镜子遭到破坏。实验表明,这一过程在 1~2s 内发生,连续激光器中的腔镜将可能遭受不可挽回的破坏。因此硅镜上的反射膜应牢牢地附着在基底上。同时,在激光器运行时最好有保护气体吹拂镜表面,达到保护目的。

参 考 文 献

- 1 Herrit G L, Reedy H E. SPIE, 1989; 1047: 33
- 2 Zhang Y N, Cheng Z H, Ku G *et al.* SPIE, 1996; 2889: 253
- 3 夏金安,程祖海,丘军林. 激光技术, 1996; 20(6): 380
- 4 Parkus H. Thermoelasticity, 2nd edition. Springer-Verlag, Wien, 1976: 46~49

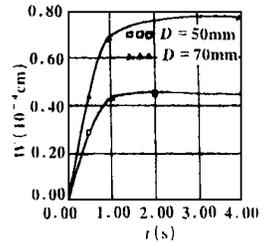


Fig. 4 The variation of the maximum deflection as time goes on

孔栅分束镜测量强激光远场光束质量的研究

马毅勇 程祖海 库耕 张耀宁

(华中理工大学激光技术与工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 论述了孔栅镜光束衰减和取样的原理及特点,用此法对高功率连续 CO₂ 激光器远场光强分布进行了检测,给出了光强空间分布。算出了光束的焦斑半径、远场发散角,并通过 M² 参数对光束质量作了评估。

关键词: 光束质量 光束取样 光束诊断 孔栅镜

The measurement of hel beam far field with hole grating beam sampler

Ma Yiyong, Cheng Zuhai, Ku Geng, Zhang Yaoning

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: A high-power laser beam profile intensity measuring system using hole grating is introduced. The principle of hole grating sampler was analyzed. The HL CO₂ laser focal irradiance distribution was measured with hole grating. The divergence and radius of laser beam were calculated. The beam quality can be valued by M² factor.

Key words: beam quality beam sampler beam diagnostics hole grating

引 言

高功率激光器的应用日益广泛,但对其光束功率密度的检测一直存在问题。使用面阵 CCD 和热释电探测器测量光束能量分布的优点是反应速度快,灵敏度高,可探测脉冲光,探测的信号可直接用计算机处理。但这些探测器能接受的光强很小,元件在高能量密度下易被破坏,普通的衰减手段不能保证线性和波面不发生畸变。目前高功率激光衰减方式有:漫反射衰减,多次折射衰减,光栅法利用衍射实现光束取样^[1]。这些方法分离角小(平晶片折射法)、衰减变形大,不能实时测量(漫反射屏法)、强光破坏(光栅法)。我们的测量系统中采用孔栅镜取样器,具有衰减倍率高,畸变小,的优点,在很高功率下仍可正常工作,适用于不同波长的激光器。由于孔栅镜产生多个光束,可以在不影响激光器正常工作情况下对高功率激光束多个参量进行实时监测^[2]。