

文章编号: 0258-7025(2005)03-0379-05

DF 强激光反射镜热畸变的检测及 热吸收的有限元分析

齐文宗^{1,2}, 黄 伟^{1,2}, 张 彬¹, 蔡邦维¹, 刘志国²

(¹ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064; ² 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 以功率约为 30 kW, 中心波长为 3.8 μm , 出光时间为 1 s 的连续 DF 化学激光器作为抽运源, 在抽运光共轴近正入射于圆形反射镜条件下, 利用夏克-哈特曼 (Shack-Hartmann) 波前传感器, 对不同工艺条件下镀制的 3.8/0.633 μm 双波段多层膜强激光反射镜的热畸变量进行了检测。基于热传导方程和热弹方程, 在考虑到空气折射率热效应基础上, 利用有限元分析方法, 完成了对不同反射镜热吸收的评价。结果表明, 在目前最好的工艺参数控制条件下, 所镀制的反射镜的热吸收率接近于 80×10^{-6} 。从而在膜层材料及膜系设计结构均完全相同的前提下, 达到了评价及优化膜系镀制工艺的目的。

关键词 薄膜; 热吸收; 有限元分析

中图分类号 O 484.5; O 343.6; TN 247 **文献标识码** A

Thermal Distortion Measurements and Absorption Analysis by Finite Element Method of High Power DF Laser Reflectors

QI Wen-zong^{1,2}, HUANG Wei^{1,2}, ZHANG Bin¹, CAI Bang-wei¹, LIU Zhi-guo²

(¹ College of the Electronics Information, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China
² Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract Irradiated by a continuous wave (CW) DF laser with power of ~ 30 kW, wavelength of 3.8 μm , and irradiation time of 1 s, under the conditions of the laser beam approximately perpendicular to the coaxially rounded reflector, the thermal distortions of 3.8/0.633 μm dual-wavebands multi-layer high-power laser reflectors manufactured by different crafts are tested by a Shack-Hartmann wave-front sensor. Based on the thermal conduction equations and thermal-elastic equations, taken account of the thermal effect of the refractivity of the air, a finite element method is used to estimate the thermal absorptions of the reflectors. The results indicate that the lowest thermal absorpaility of the reflectors manufactured with best crafts is approached to 80×10^{-6} . On account of the materials and the structure designs of the coatings being all complete the same, the purpose of the film-plating parameters estimate and/or evaluating is realized.

Key words thin films; thermal absorption; finite element analysis

1 引 言

多层膜强激光反射镜与其他薄膜光学元件一样, 膜层内较高的热吸收率及较低的热传导率是薄膜光学元件激光损伤的根源^[1,2]。尽管在普通实验室内的低功率抽运光源条件下, 对膜层内的热吸收

率及热传导率的评价可采用光热光偏转^[3,4]、光热透镜^[5]、激光量热计^[6]、光热干涉位移法^[7]、辐射热度计^[8]、光声光谱法^[9]等多种方法, 但由于目前还缺乏实验室用的 3.8 μm 波长的低功率激光光源, 在万瓦以上输出功率的 DF 化学激光器上直接做强光实验, 是测量连续 DF 化学激光系统用强激光反射

收稿日期: 2003-10-05; 收到修改稿日期: 2004-05-12

作者简介: 齐文宗(1967—), 男, 吉林长春人, 四川大学副研究员, 博士后, 目前从事激光薄膜光热及损伤特性方面的研究。

E-mail: qiwenzong@sohu.com

镜热畸变及评价其热吸收的比较可行的方法。

以波长为 $3.8 \mu\text{m}$ 的连续 DF 化学激光作为抽运光源,利用夏克-哈特曼(Shack-Hartmann)波前传感器,对不同工艺条件下镀制的 $3.8/0.633 \mu\text{m}$ -双波段多层膜强激光反射镜的热畸变量进行了检测。

2 基本理论

2.1 热传导方程及热弹方程

在 DF 激光系统出光的 1 s 时间内,因为反射镜膜层和基底内的热扩散长度均已远远大于膜层的总厚度,膜层内温度分布的轴向非均匀性可以忽略。又因为反射镜膜层的总厚度远远小于基底材料的厚度,可以仅考虑反射镜基底材料内的热传导方程^[10,11],而将膜层内的热吸收作为边界条件。在 DF 抽运光共轴正入射条件下,反射镜内的热传导方程可写为

$$\begin{cases} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla^2 T = 0, & (1) \\ T|_{z=0} = 0, & (2) \\ -k \|\nabla T\|_{z=0} = \eta I(r,t) - hT(r,t)|_{z=0}, & (3) \\ T|_{z=z_1} = 0, & (4) \\ T|_{r=r_1} = 0, & (5) \end{cases}$$

其中 $T(r,z,t)$ 为基底材料内 (r,z) 点 t 时的温升值, $\alpha = \kappa/\rho C$ 为基底的热扩散率, κ 为热导率, ρ 为密度, C 为比热, h 为空气对流散热因子, $I(r,t)$ 为反射镜上 $(r,0)$ 点 t 时的入射光强, η 为薄膜内的光热吸收率, z_1 为反射镜的厚度, r_1 为反射镜的半径。

在出光时间为 1 s 的连续激光辐照下,因为反射镜膜层的厚度远远小于基底的厚度,膜层内的应力应变场对反射镜热畸变的影响均可忽略;又因为 DF 激光的辐照时间远远大于反射镜的共振周期,反射镜的热致弹性振动也可忽略。所以在抽运光共轴正入射条件下,反射镜的热畸变可由基底材料内的、忽略体力及惯性力的热弹方程^[12]来描述

$$\nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e}{\partial r} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (6)$$

$$\nabla^2 u_z + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e}{\partial z} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad (7)$$

其中 u_r, u_z 分别为基底材料内 (r,z) 点上的位移 u 在 r, z 方向上的分量, e 为体应变, α_T 为热膨胀系数, ν 为泊松比。

实验中反射镜处于简支状态,故热弹方程的边界条件可以取为

$$u_z|_{r=r_1, z=z_1} = 0. \quad (8)$$

图 1 给出了共轴正入射激光辐照条件及反射镜筒支状况的示意图。

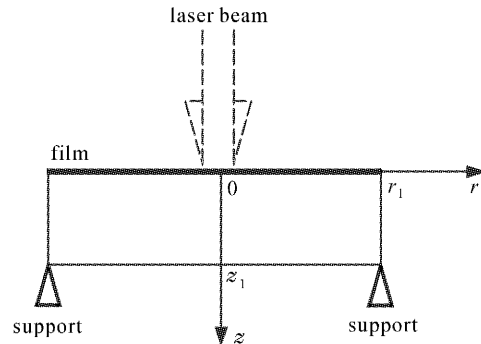


图 1 激光反射镜筒支状况示意图
Fig. 1 Sketch of the laser reflector under unconstrained support

2.2 反射镜升温的有限元分析

反射镜的温升为瞬态热传导过程,其时间域与空间域之间没有耦合关系,可以采用部分离散的方法建立有限元格式。而在圆形激光束共轴正入射于圆形平面反射镜条件下,依据温度场的对称性,在 (x,y,z) 直角坐标系中,可仅计算 $x,y \geq 0$ 的部分。由此及热传导方程(1)~(5)式,得加权余量积分公式^[13]

$$\int_{\Omega} R_{\alpha} w d\Omega - \int_{\Gamma} R_{\Gamma} w d\Gamma = 0, \quad (9)$$

其中

$$R_{\alpha} = k \left(\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial z^2} \right) - \rho C \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t}, \quad (10)$$

$$R_{\Gamma} = k \frac{\partial \tilde{T}}{\partial z} - \eta \tilde{T} + h \tilde{T}, \quad (11)$$

Ω 为所计算的空间域, Γ 为存在激光辐射的边界 $z = 0$ 。带有“ \sim ”上标的变量为经结点变量值插值得到的单元内的变量值。将(10),(11)式代入(9)式,并分部积分,就可以得到描述反射镜内全部结点在任意时刻的温度的矩阵方程

$$CT' + KT = P_t, \quad (12)$$

其中 C 为热容矩阵, K 为热传导矩阵, T 为结点温度列阵, T' 为结点温度的时间导数列阵, P_t 为温度载荷矩阵,对应于入射激光能量在反射镜表面所产生的热吸收。通过对此矩阵方程的数值求解,采用结点间的二阶插值,即可完成对反射镜内任意位置处在任意时刻的温度场或温升场的有限元求解。

2.3 反射镜形变及热应力的有限元分析

当物体各部分的温度发生变化时,由于热膨胀

机制而产生线应变。如果物体各部分的热变形不受任何约束,则物体上仅有热形变而不产生热应力。而当物体受到各种约束的边界条件或各部分温度变化不均匀,从而导致热变形不能自由进行时,则在物体中产生热应力。

热应力-应变之间的关系为

$$\sigma = \mathbf{D}(\epsilon - \epsilon_0), \quad (13)$$

其中 \mathbf{D} 为弹性矩阵, ϵ_0 为初应变

$$\epsilon_0 = \alpha(T - T_0)[1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad (14)$$

由此及热弹方程(6)~(8)式,得用以求解热应力问题的最小位能原理的泛函表达式^[13]如下

$$\Pi_p(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} \epsilon^T \mathbf{D} \epsilon - \epsilon^T \mathbf{D} \epsilon_0 - u^T f \right) d\Omega - \int_{\Gamma} u^T \tilde{F} d\Gamma, \quad (15)$$

其中 \tilde{F} 为边界上的面力分布函数, f 为体积 Ω 内的体力分布函数。在忽略体力及惯性力的条件下, $f = 0$ 。

将求解域 Ω 进行有限元离散,从 $\delta \Pi_p = 0$, 可得到确定结点位移的矩阵方程

$$\mathbf{K} \mathbf{a} = \mathbf{P}_e, \quad (16)$$

其中 \mathbf{K} 为结构整体刚度矩阵, \mathbf{a} 为结构结点位移列阵, \mathbf{P}_e 为结构结点载荷列阵, 为体积载荷 P_f , 表面载荷 P_F 及温度载荷 P_{e0} 三者之和。在本问题中的简支状态的边界条件下, 体积载荷 P_f 和表面载荷 P_F 都等于零, 而温度载荷定义为

$$P_{e0} = \sum_{\Omega_e} \int_{\Omega_e} B^T \mathbf{D} \epsilon_0 d\Omega. \quad (17)$$

在获得反射镜温升的有限元分析结果之后, 通过对矩阵方程(16)的数值求解, 即可完成对反射镜内热形变场及热应力场随时间变化规律的有限元分析。

3 实验系统及结果

实验光路如图 2 所示。DF 激光束分别经平面镜、凹面镜反射, 经 CaF_2 透镜再次聚焦后, 以小入射角照射在待测反射镜样品中心上(以在实验中尽量满足共轴正入射条件), 从样品上反射出的激光束由吸收池吸收。检测样品热畸变的夏克-哈特曼波前传感器自带 $0.650 \mu\text{m}$ 波长半导体激光源, 且垂直于待测样品放置。

图 3 给出了夏克-哈特曼波前传感器的结构原理示意图^[14]。图中的反射波前是由夏克-哈特曼自带的半导体激光源发出的平面波前垂直入射于待测反射镜样品上所形成的, 其中包含了反射镜的畸变

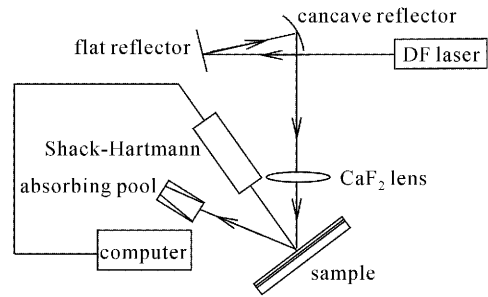


图 2 多层膜反射镜热畸变测量光路图

Fig. 2 Sketch of the thermal distortion measurement setup of multi-layered reflectors

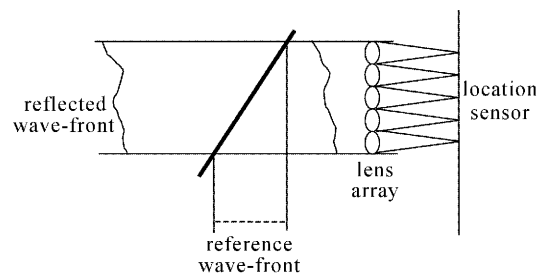


图 3 夏克-哈特曼波前传感器的结构示意图

Fig. 3 Sketch of the structure of Shack-Hartmann wave-front sensor

信息。通过在其阵列透镜的焦面上测出畸变波前所成像斑的质心坐标与参考波前质心坐标之差, 再经计算机处理, 就可以完成反射镜(热)畸变的检测。

入射激光功率密度为 24.6 kW/cm^2 ; 反射镜厚度 1.4 cm ; 反射镜直径 5.2 cm ; 出光时间 1 s ; 反射镜基底材料为单晶硅; 反射镜面上的光斑形状为一 $1.0 \text{ cm} \times 1.3 \text{ cm}$ 的矩形, 光斑中心与反射镜的中心重合。

此外, 由于本文的有限元计算是在圆形光束共轴正入射于圆形反射镜条件下进行的, 依据光斑面积相等的原则, 由实验参数折合出的、理论计算中所采用的光斑半径为 0.65 cm 。

图 4 及图 5 给出了经夏克-哈特曼波前传感器

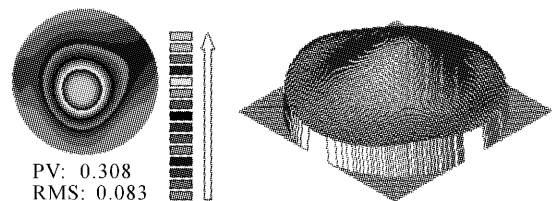


图 4 007 号样品出光过程中某时的热畸变三维效果图

Fig. 4 Three-dimensional effect of the thermal distortion of the sample 007, at one moment during the laser irradiations

采集并经计算机处理而得到的 007 号样品热畸变测量的实验结果。

图 4 为 007 号样品在 DF 激光作用下, 某一时刻热畸变的三维效果图, 从中可以清晰地看到反射镜在强激光作用下“热包”的形状及其等高线的分布。

图 5 为 007 号样品在 DF 激光作用下, 热畸变

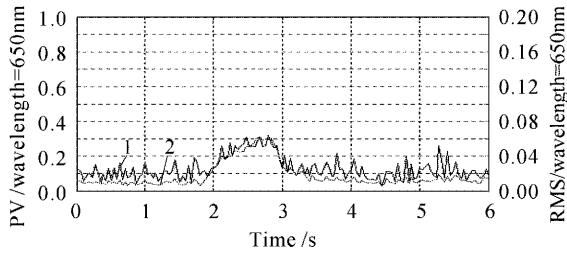


图 5 007 号样品 PV 值及 RMS 值随激光辐照时间的变化规律

Fig. 5 Regular patterns of PV value and RMS value of the thermal distortions of the sample 007 versus the laser irradiation time

的 PV 值(峰谷值, 曲线 1)及 RMS 值(均方根值, 曲线 2)随时间的变化规律。本图像采集的开始时间早于激光系统出光时间 1.8 s。从中可清晰看到反射镜在强激光作用下热畸变量的增加及激光停止后反射镜热畸变的恢复过程。

4 有限元分析结果

由于实验满足小温升、线弹性小形变条件, 在反射镜及光斑的尺寸及其相互位置不变前提下, 反射镜表面的形变与其表面的热流密度成正比。

在热吸收系数为 100×10^{-6} 条件下, 反射镜表面热流密度为 $2.462 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。以此计算得到的硅镜表面最大温升值为 3.63 K , 最大形变量值为 62.1 nm 。

实验是在大气条件下进行的, 还应该考虑空气折射率热效应^[15]对结果的影响。表 1 中给出了有限元分析过程中所需的单晶硅及空气的光学及热力学参数。

表 1 硅及空气的光学及热力学参数

Table 1 Optical and thermal parameters of silicon and air

Material	ρ /(g/cm^3)	C /[$\text{J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$]	κ /[$\text{J}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$]	α_T / $^\circ\text{C}^{-1}$	E /GPa	σ	$\partial n/\partial T$
Silicon	2.33	0.603	0.2613	2.4×10^{-6}	130	0.24	—
Air	1.29×10^{-3}	1.005	2.39×10^{-4}	—	—	—	-1.00×10^{-6}

表 2 不同工艺条件下镀制的 DF 用双波段反射镜膜层热吸收率的有限元分析结果

Table 2 Finite element analysis result of the thermal absorptions of DF dual-wavebands reflect coatings with different crafts

Sample number	Average PV value, unit: $\lambda/650 \text{ nm}$	Thermal absorpbility $\eta_1 / \times 10^{-4}$	Thermal absorpbility $\eta_2 / \times 10^{-4}$
001	0.13	1.4	1.2
002	0.22	2.3	2.0
003	0.09	0.94	0.82
004	0.18	1.9	1.7
005	0.16	1.7	1.5
006	0.40	4.2	3.7
007	0.28	2.9	2.5

由于 DF 系统的出光时间为 1 s, 对应的空气内的热扩散长度为 $\mu_t = \sqrt{\kappa t / \pi \rho C} = 0.242 \text{ cm}$, 故此, 在本实验条件下, 每 100×10^{-6} 的热吸收, 由反射镜周边空气折射率热效应引起的夏克-哈特曼轴向位移检测结果的附加量为

$$\Delta L = -\frac{\partial n}{\partial T} \mu_t \Delta T = 8.8 \text{ nm}. \quad (18)$$

由此得, 每 100×10^{-6} 的热吸收, 由夏克-哈特曼检测到的, 硅基底高反镜的热畸变量为: $62.1 + 8.8 = 70.9 \approx 71 \text{ nm}$ 。

以此为理论根据, 对前实验数据处理, 得不同工艺参数下所镀制的 $3.8/0.633 \mu\text{m}$ -双波段多层介质膜强激光反射镜的热吸收率如表 2。

其中, η_1 为未考虑空气折射率的热效应时, 计

算得到的反射膜内的热吸收率值; η_2 为考虑到空气折射率的热效应后的热吸收率的相应值。两者之间的比值约为 1.14。由表 2 可以看出, 在膜层材料及膜系设计结构均完全相同的前提下, 不同工艺参数所镀制的 $3.8/0.633 \mu\text{m}$ -双波段多层介质膜强激光反射镜的热吸收率之间的差别还是很大的: 本轮测试的反射镜样品中, 最大的热吸收率约为 370×10^{-6} , 最小的热吸收率仅约为 82×10^{-6} , 其间的比值约为 4.5 倍。而这可以作为评价及优化膜系镀制工艺的依据。

5 结 论

利用夏克-哈特曼波前传感器, 完成了 $3.8 \mu\text{m}$ 强激光反射镜热畸变的检测; 利用有限元分析方法, 在膜层材料及膜系设计结构均完全相同的前提下, 对不同工艺参数条件下制备的强激光反射镜的热吸收率给出了定量的评价结果, 从而达到了评价及优化膜系镀制工艺的目的。

参 考 文 献

- 1 Fan Zhengxiu, Wu Zhouling, Tang Xuefei. Repeat-rate-laser induced damage in optical coating [J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(9):734~738
范正修, 吴周令, 汤雪飞. 重复率激光对光学薄膜的破坏[J]. *中国激光*, 1994, **A21**(9):734~738
- 2 Zhao Qing, Fan Zhengxiu. Interface absorption effected on temperature field of optical coatings [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(6):777~782
赵 强, 范正修. 光学薄膜界面吸收对温度场的影响[J]. *光学学报*, 1996, **16**(6):777~782
- 3 W. B. Jackson, N. M. Amer, A. C. Boccara *et al.*. Photothermal deflection spectroscopy and detection [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(8):1333~1344
- 4 Mireille Commandre, Pierre Roche. Characterization of optical coatings by photothermal deflection [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(25):5021~5034
- 5 Z. L. Wu, P. K. Kuo, *et al.*. Non-destructive evaluation of thin film coatings using a laser-induced surface thermal lensing effect [J]. *Thin Solid Film*, 1996, **290~291**:271~277
- 6 D. A. Pinnow, T. C. Rich. Development of a calorimetric method for making precision optical absorption measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(5):984~992
- 7 R. Atkinson. Development of a wavelength scanning laser calorimeter [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(4):464~471
- 8 Vaughn G. Draggoo, Richard G. Morton, Richard H. Sawichi *et al.*. Optical coating absorption measurements for high power laser system [C]. *SPIE*, 1986, **622**:186~190
- 9 Herbert S. Bennett, Richard A. Forman. Photoacoustic spectroscopy: a measurement technique for low absorption coefficients [J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(11):2834~2836
- 10 M. Chester. Second sound in solids [J]. *Phys. Rev.*, 1963, **131**(5):2013~2015
- 11 R. M. Morse, H. Feshbach. *Method of Theoretical Physics* [M]. New York: McGraw-Hill, 1953
- 12 Nowinski. *Theory of Thermo-Elasticity with Applications* [M]. Sijthoff & Noordhoff. International Publishers B. V., Alphen ann den Rijn, the Netherlands, 1978
- 13 Wang Xucheng, Shao Min. *Finite Element Analysis: Basic Principles and Numeric Methods* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997
王勖成, 邵 敏. *有限单元法基本原理和数值方法*[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997
- 14 Zhou Renzhong. *Self-Adapt Optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996
周仁忠. *自适应光学*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996
- 15 Yin Qingrui, Wang Tong, Qian Menglu. *Photo-Acoustical/Thermal Technologies and Applications* [M]. Beijing: Sciences Press, 1991
殷庆瑞, 王 通, 钱梦禄. *光声光热技术及其应用*[M]. 北京: 科学出版社, 1991