

变形镜在激光辐照下热畸变有限元模拟

张耀平^{1,2}, 樊峻棋^{1,2}, 龙国云^{1,2}

- (1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;
2. 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209)

摘要: 利用有限元分析软件数值模拟了固体激光器系统中由单晶硅(Silicon)、石英(Silica)与超低膨胀玻璃(ULE)等不同材料制作的变形反射镜受激光辐照下的热畸变特性。计算结果表明: 当入射激光功率密度为 0.225 kW/cm^2 , 激光照射时间为 10 s, 镜面反射率为 99.9% 时, 三种材料的变形镜的最大温升分别为 0.804 、 6.751 与 $7.122 \text{ }^\circ\text{C}$, 最大热变形分别为 0.0493 、 0.0348 与 $0.0054 \text{ } \mu\text{m}$, 相比之下, 单晶硅温升较小, 超低膨胀玻璃(ULE)的变形与应力最小, ULE 是未来比较理想的镜面材料。最后, 对变形镜在长脉冲激光辐照下也进行了计算与分析。

关键词: 自适应光学; 变形镜; 激光薄膜; 有限元分析

中图分类号: O484.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1136002

Finite element simulation of thermal distortions of deformable mirror with laser irradiation

Zhang Yaoping^{1,2}, Fan Junqi^{1,2}, Long Guoyun^{1,2}

- (1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. The Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: The thermal distortions of deformable mirror with such materials as mono-crystalline silicon, silica and nucleated glass (ULE), irradiated with diode-pumped solid-state laser (DPL) were calculated and analyzed using FEA software. The results show that when the power density of input laser is 0.225 kW/cm^2 , and the reflectivity of the deformable mirror thin film are 99.9%, the temperature rising and thermal distortions of the deformable mirror are separately 0.804 , 6.751 and $7.122 \text{ }^\circ\text{C}$, and 0.0493 , 0.0348 and $0.0054 \text{ } \mu\text{m}$ respectively, under the radiation time of 10 seconds. By comparison, the temperature rising of deformable mirror with mono-crystalline silicon substrate is smaller; the deformation and stress of ULE is the lowest, which would be a kind of more promising material for producing deformable mirror in future DPL laser system. In the end, some results of the long pulse laser irradiation were calculated and analysis.

Key words: adaptive optics; deformable mirror; laser thin film; FEA

收稿日期: 2016-03-12; 修订日期: 2016-04-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划

作者简介: 张耀平(1973-), 男, 博士, 主要从事激光薄膜方面的研究。Email: zyp_820@163.com

0 引言

在固体激光器(DPL)自适应光学系统中,对波前误差的补偿是由变形镜完成的。变形镜是一种与传统光学元件完全不同的能动光学器件,它能在外加作用力的控制下,实现高速高精度的光学镜面面形变化、平移或转角,从而改变光学系统的波前相位^[1]。变形镜抗激光损伤阈值是自适应光学系统中关键的设计依据之一,因为变形镜薄膜损耗较大的话,容易引起镜面产生大的热变形,有可能导致变形镜失去工作能力,甚至引起薄膜烧蚀,造成整个自适应光学系统失去作用,因此很有必要对变形镜与激光作用原理进行研究。文中利用有限元程序,建立了不同材料如单晶硅、石英与超低膨胀玻璃(ULE)制作的变形镜有限元模型,模拟了连续与长脉冲激光与其相互作用的物理过程,计算出变形镜温升与热变形分布,为变形镜研制提供理论根据。

1 理论模型

在激光辐照下,因为反射镜膜层和基底内的热扩散长度均已远远大于变形镜膜层的总厚度,膜层内温度分布的非均匀性可以忽略,所以可以仅考虑反射镜基底材料内的热传导方程,而将膜层内的热吸收作为边界条件,假定薄膜的反射率是 99.9%,那么膜层吸收为 0.1%,膜层吸收的激光能量全部作用到镜面上,在辐照时间内的激光能量密度不变,理论模型如图 1 所示,为方便计算,假定激光束共轴正入射镜面(实际变形镜在小角度下使用),轴对称的热传导方程随辐照时间变化为^[2-4]:

$$\begin{cases} \nabla^2 [T(\vec{r}, t)] = \frac{1}{D} \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} \\ -k \frac{\partial T}{\partial z} |_{z=0} = I(\vec{r}, t) \quad t > 0 \\ T(\vec{r}, 0) = T_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T(\vec{r}, t)$ 为变形镜内 (r, z) 点 t 时的温升值; $D=k/\rho c$ 为变形镜介质的热扩散率; k 为热导率; c 为比热; ρ 为密度; $I(\vec{r}, t)$ 为变形镜薄膜内即变形镜边界条件 $(r, 0)$ 点 t 时的入射光强,由于变形镜结构较为复杂,并且所包含材料的热参数较多,计算这类问题一般采取傅里叶变换方法求解,但计算过程十分复杂,在

这里为计算方便,采用有限元方法求解,考虑变形镜系统的热传导及边界条件,将激光源作为热源以热流边界条件的形式引入,公式(1)可利用有限元方法简化为:

$$\begin{cases} \nabla [k(T) \nabla T(\vec{r}, t)] = \frac{\partial H(T)}{\partial t} \\ -k \frac{\partial T}{\partial z} |_{z=0} = g(r, z, t) \quad t > 0 \\ T(\vec{r}, 0) = T_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $H(T)$ 为介质材料的焓函数; $g(r, z, t)$ 为热流函数。

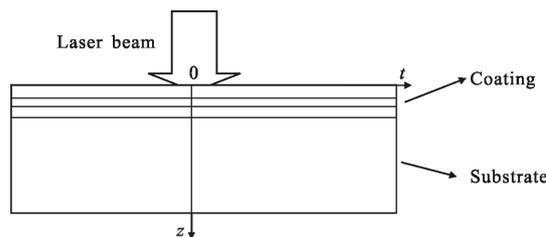


图 1 理论模型简图

Fig.1 Theory model of calculation

2 变形镜热畸变有限元计算结果分析

由于变形镜面的直径/厚度比(大于 30,厚度均匀、材料各向同性)较大,可采用力学中各向同性的弹性薄板理论来准确模拟^[5-6]。图 2 为利用有限元软件所建立的变形镜缩比样镜有限元模型,为提高计

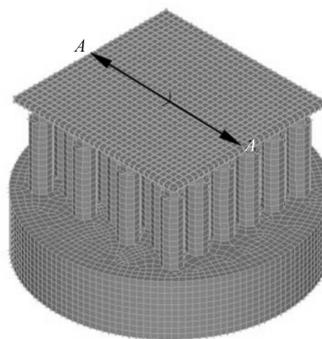


图 2 变形镜有限元模型

Fig.2 Finite element analyses model of deformable mirror

算准确性,将变形镜镜面与驱动器网络化加密,共划分了 61 054 个单元和 39 515 个节点。表 1 给出了变形镜有限元分析中用到的相关热力学参数。施加镜面的固体激光分两种:(1) 连续激光,相关参数:

激光功率密度为 0.225 kW/cm^2 ，激光照射时间为 10 s ；(2) 长脉冲激光，相关参数：激光平均功率密度为 2.8125 kW/cm^2 ，激光照射时间为 10 s ，有限元模拟激光辐照变形镜过程为辐照 10 s 后，再继续冷却 10 s ，计算辐照过程中变形镜的温升与热变形分布。

表 1 材料参数

Tab.1 Physical parameters of some materials

Material	ρ /kg·m ⁻³	E_s /GPa	α_T /K ⁻¹	μ	C /kJ· kg ⁻¹ ·K ⁻¹	K/W · m ⁻¹ ·K ⁻¹
Silicon	2 330	121	2.5×10^{-6}	0.24	0.714	144
Silica	2 210	73.1	5.8×10^{-7}	0.17	0.800	1.46
ULE	2 210	67.6	$0 \pm 30 \times 10^{-9}$	0.17	0.767	1.31

2.1 变形反射镜有限元模型验证

为验证所建立的变形镜模型的正确性，将一定功率的激光施加到单晶硅制作的变形镜镜面上，利用红外热像仪测量镜面的温升，并且与有限元计算结果比较，如图 3 所示，由图可见，有限元数值模拟结果与实验测量结果符合较好，说明所建立的变形镜有限元模型是合理的。

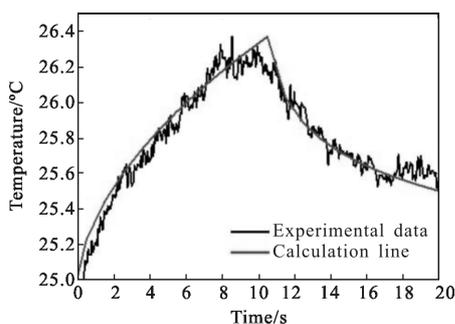


图 3 实验测量与有限元计算的变形镜镜面温升比较图

Fig.3 Surface temperature comparison of experimental and calculation

2.2 不同材料制作的变形镜有限元模型在连续激光辐照下的计算结果

由单晶硅、石英与 ULE 制作的变形镜在连续激光辐照 10 s 后的温升与最大热变形分布有限元模拟结果见图 4，为了方便比较，将单晶硅的计算结果归一化，计算结果见表 2，从图 4(a)可以看出，当入射激光功率密度为 0.225 kW/cm^2 激光照射时间为 10 s ，镜面反射率为 99.9% 时，三种材料制作的变形镜的最大温升分别为 0.804 、 6.751 与 $7.122 \text{ }^\circ\text{C}$ ，从表 1 可以看出：由于单晶硅的导热系数最高，所以单晶硅的

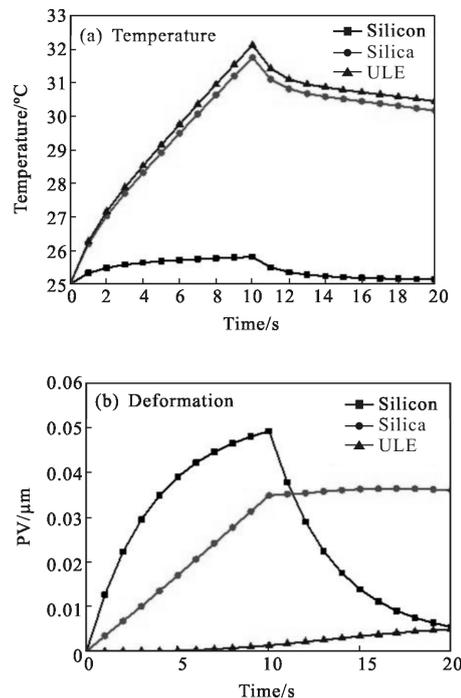


图 4 由单晶硅、石英与 ULE 制作的变形镜在连续激光辐照 10 s 后的温升与最大变形分布结果

Fig.4 Temperature and deformation distribution of deformable mirror made by silicon, silica and ULE after 10 s

表 2 3 种材料有限元计算结果对比

Tab.2 FEA calculation results of three materials

Material	Temperature rising	Thermal deformation	Thermal stress
Silicon	1	1	1
Silica	8.390	0.705	2.690
ULE	8.858	0.109	0.079

温升最低，激光辐照结束后，温升下降速度很快，在 20 s 时温升为 $0.140 \text{ }^\circ\text{C}$ ，基本达到初始温度状态；而石英与 ULE 的导热系数相差不大，所以两者的最大温升也相差不大，激光辐照结束后，由于两者的导热系数比单晶硅低很多，所以与空气换热较慢，在 20 s 时最大温升还有 $5.171 \text{ }^\circ\text{C}$ 与 $5.450 \text{ }^\circ\text{C}$ ，温升下降速度很慢，由于变形镜镜面后面有特殊胶存在，对温度非常敏感，如果温度过高，容易导致变形镜后面的驱动器与镜面分离而造成变形镜失效，表 2 同样说明石英与 ULE 的温升是单晶硅的 8.390 倍与 8.585 倍，从降低变形镜镜面温升角度来说，单晶硅适合作为制作变形镜的镜面材料。从图 4(b)可以看到，3 种材料

制作的变形镜的最大热变形分别为 0.049 3、0.034 8 与 0.005 4 μm ,从表 1 可以看出,单晶硅的热膨胀系数比石英高一个数量级左右,所以在激光辐照后产生的最大热变形比石英大,但由于导热系数远远大于石英,散热快,所以两者之间的最大热变形相差并不是很大,激光辐照结束后,单晶硅最大热变形下降速度快于石英,而石英的最大热变形在激光辐照结束后,由于导热系数低,所以最大热变形下降速度较慢,ULE 的热膨胀系数最低,所以其最大热变形在三者之中也是最小的,在激光辐照结束时,最大热变形只有 0.001 3 μm ,几乎零变形,从表 2 可以看出,石英最大热变形是单晶硅的 0.705 倍,ULE 的最大热变形仅为单晶硅的 0.109 倍。图 5 是单晶硅、石英与超低膨胀玻璃(ULE)制作的变形镜在连续激光辐照 10s 后沿直线 A-A 方向应力分布有限元模拟结果,直线 A-A 方向见图 2 所示,表 2 显示,石英制作的变形镜面在激光辐照下应力最大,是单晶硅的 2.69 倍,ULE 最小,仅为单晶硅的 0.079 倍,从控制变形镜镜面变形与应力这方面说,ULE 在变形镜光学薄膜超低吸收的情况下,将激光辐照后的温升控制在合理范围内,ULE 也许是一种具有很大发展潜力的用于制作固体激光系统用的变形镜镜面材料。

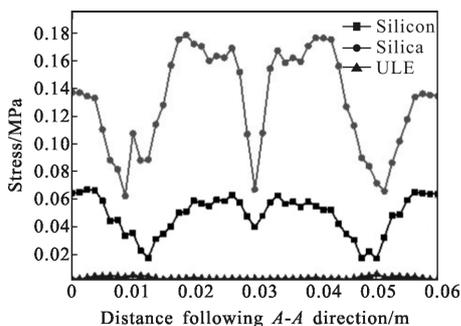


图 5 由单晶硅、石英与 ULE 制作的变形镜在连续激光辐照 10 s 后的沿直线 A-A 方向应力分布结果

Fig.5 A-A direction stress distribution of deformable mirror made by silicon, silica and ULE after 10 s

2.3 单晶硅制作的变形镜有限元模型在长脉冲激光辐照下的计算结果

由单晶硅制作的变形镜在长脉冲激光辐照 10 s 后的温升模拟计算结果见图 6,从图 6 可以看出:当入射激光平均功率密度为 2.812 5 kW/cm^2 、激光照射时间为 10 s、镜面反射率为 99.9%时,变形镜的最大

温升分别为 0.064 8 $^{\circ}\text{C}$,从图 6 温升局部放大图可以看出:在长脉冲激光辐照过程中,变形镜镜面的温升几乎是线性的,在脉冲停止作用的脉冲间隔内,由于没有热源及能量聚集,变形镜镜面处于冷却阶段,变形镜镜面表面激光辐照中心点的温度急剧下降。在下一个脉冲辐照前,有充足的时间进行冷却,所以变形镜镜面表面激光辐照中心点的温度随激光辐照时间呈锯齿分布,脉冲激光辐照薄膜材料的热作用具体过程很复杂,在光束与物质相互作用过程中,上层薄膜和基底都会吸收激光能量而引起温度上升,但是由于不同材料的吸收系数和热导率并不相同,各部分的温升不一致,形成不同的温度梯度,再加上各材料的热膨胀系数相差也很大,产生的热膨胀程度也不一样,所以产生不同的热应力,尤其两种材料的交界处,极有可能因为应力较大而导致变形镜损伤^[7-11]。所以很有必要研究长脉冲激光辐照变形镜产生的温度场和应力场。

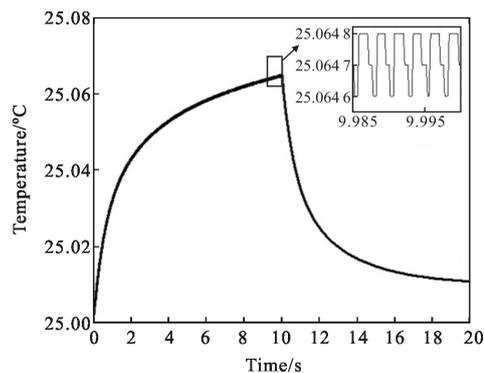


图 6 由单晶硅制作的变形镜在长脉冲激光辐照 10 s 后的温升分布结果

Fig.6 Temperature distribution of deformable mirror made by silicon after 10 s

3 结论

自适应光学系统是固体激光系统中的重要组成部分,而作为自适应光学系统的关键器件变形镜起着非常重要的作用,对于变形镜来说,必须镀制低吸收、高反射的光学薄膜。为了制备具有特殊要求的低损耗变形镜光学薄膜,为了更加深入理解变形镜与激光相互作用的物理机制,利用有限元软件数值模拟了由单晶硅、石英与 ULE 等不同材料制作的变形反射镜受激光辐照下的热畸变特性。计算结果表明:当入射激光功率密度为 0.225 kW/cm^2 、激

光照射时间为 10 s、镜面反射率为 99.9% 时,3 种材料的变形镜的最大温升分别为 0.804,6.751 与 7.122 °C,最大热变形分别为 0.0493,0.0348 与 0.0054 μm,相比之下,单晶硅温升最小,是目前比较理想的镜面材料,ULE 的热变形与应力最低,在控制变形镜光学薄膜吸收系数的前提下,是未来一种非常有潜力的镜面材料。最后,对变形镜在长脉冲激光辐照下也进行了计算与分析。计算结果对实际工作具有一定的指导意义,为变形镜下一步研制提供理论根据。

参考文献:

- [1] Ling Ning, Guan Chunlin, Wang Lan, et al. The development of 61-element discrete piezoelectric deformable mirror [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(4): 527-530. (in Chinese)
凌宁, 官春林, 王岚, 等. 61 单元分立式压电变形反射镜的研制[J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(4): 527-530.
- [2] Qi Weizong, Huang Wei, Zhang Bin, et al. Finite element analysis of thermal distortion of infrared CW laser reflectors [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(8): 953-956. (in Chinese)
齐文宗, 黄伟, 张彬, 等. 红外连续激光反射镜热畸变的有限元分析[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(8): 953-956.
- [3] Wang Zhenbao, Wu Yong, Yang Pengling, et al. Numerical simulation and experiment on temperature fields distribution of aluminum target under intensive laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2061-2065. (in Chinese)
王振宝, 吴勇, 杨鹏翎, 等. 强激光辐照铝靶温度分布数值模拟及实验研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2061-2065.
- [4] Liu Jian, Lu Jian, Ni Xiaowu, et al. Fracture behavior during pulsed laser irradiating silicon wafer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 414-420. (in Chinese)
刘剑, 陆建, 倪晓武, 等. 单晶硅片在脉冲激光作用下的断裂行为[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 414-420.
- [5] Zeng Zhige, Ling Ning, Rao Xuejun. Analysis for the finite element of the active thin mirror surface[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, 22(2): 8-19. (in Chinese)
曾志革, 凌宁, 饶学军. 能动薄镜面的有限元分析[J]. 光电工程, 1995, 22(2): 8-19.
- [6] Zhang Yaoping, Xu Hong, Ling Ning, et al. The study on finite element analysis of the residual stress of thin film and component of deformable mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(8): 28-31. (in Chinese)
张耀平, 许鸿, 凌宁, 等. 变形反射镜薄膜应力与元件变形有限元研究[J]. 光电工程, 2005, 32(8): 28-31.
- [7] Wang Xi, Bian Jintian, Li Hua, et al. Experiment on damage in K9 glass due to repetition rate pulsed CO₂ laser radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1204-1207. (in Chinese)
王玺, 卞进田, 李华, 等. 重频脉冲 CO₂ 激光损伤 K9 玻璃的实验[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1204-1207.
- [8] Xiao Dongming, He Kuanfang, Wang Di. Transient temperature evolution of selective laser melting process based on multilayer finite element model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2672-2678. (in Chinese)
肖冬明, 何宽芳, 王迪. 基于多层有限元模型的激光选区熔化多层瞬态温度场演化规律研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2672-2678.
- [9] Tang Wei, Ji Tongbo, Guo Jin, et al. Numerical analysis of HgCdTe crystal damaged by high repetition frequency CO₂ laser [J]. *Chinese Optic*, 2013, 6(5): 736-741. (in Chinese)
汤伟, 吉桐伯, 郭劲, 等. 高重频 CO₂ 激光损伤 HgCdTe 晶体的数值分析[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 736-741.
- [10] Chen Zhaobing, Guo Jin, Lin Sen. Application of FE-BIto calculation of opto-electronic target scattering [J]. *Chinese Optic*, 2011, 4(2): 169-174. (in Chinese)
陈兆兵, 郭劲, 林森. 有限元边界法在光电目标散射计算中的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(2): 169-174.
- [11] Zhang Liang, Ni Xiaowu, Lu Jian, et al. Numerical simulation of vaporization effect of long pulsed laser interaction with silicon [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 437-444. (in Chinese)
张梁, 倪晓武, 陆建, 等. 长脉冲激光与硅相互作用气化过程的数值模拟[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 437-444.