

# 激光系统中元件热效应时空特性分析

胡鹏\*, 张建柱

北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088

**摘要** 从热传导方程和热弹性方程出发, 基于 EasyLaser 仿真软件, 对激光辐照 Si 反射镜、SiO<sub>2</sub> 窗口镜温度分布和热相差进行了模拟计算, 比较了相同吸收的情形下, 两种元件温升、热相差分布的时间、空间特性, 并开展光-热-力控制多物理耦合仿真, 比较了激光辐照 Si 反射镜、SiO<sub>2</sub> 窗口镜热效应对激光传输远场特性影响和自适应光学校正效果。仿真结果表明, 由于 SiO<sub>2</sub> 窗口镜导热性能差, 热相差随激光辐照时间的增加而线性增加, 其分布与辐照激光光斑空间分布相似, 且在激光辐照停止后较长时间内仍然存在; 而 Si 反射镜导热性能好, 温度分布在较短时间内均匀化导致温度梯度小, 热相差先快速、后缓慢增加, 在激光辐照停止后热效应的影响很快消退。实验光斑强度的空间分布, 对两种元件热效应的影响不同: 对于 SiO<sub>2</sub> 窗口镜, 其热相差的高空间频率成分增加, 严重影响激光光束远场传输与自适应光学校正效果, 而 Si 反射镜热导率大, 受到的影响较小。

**关键词** 激光光学; 元件热效应; 热相差; 时空特性; 自适应校正

**中图分类号** TN012; O439

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/AOS202040.2014001

## Analysis of Spatio-Temporal Characters of Thermal Effects of Optical Components in Laser System

Hu Peng\*, Zhang Jianzhu

*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*

**Abstract** Starting from heat conduction equation and thermal elastic equation, based on EasyLaser simulation software, the temperature distribution and thermal aberration of laser irradiated Si reflective mirror and SiO<sub>2</sub> window mirror are simulated and calculated. The spatio-temporal characteristics of temperature rise and thermal aberration of the two elements under the same absorption are compared. The optical-thermal-mechanical control multi-physical coupling simulation are carried out to compare the thermal effect of the laser-irradiated Si mirror and the SiO<sub>2</sub> window mirror on the far-field characteristics of laser transmission and the effect of adaptive optics correction. Simulation results show that due to the poor thermal conductivity of the SiO<sub>2</sub> window mirror, the thermal aberration linearly increases with the increase of the laser irradiation time, and its distribution is similar to the spatial distribution of the irradiated laser spot, and it still exists for a long time after the laser irradiation is stopped. The Si reflector has good thermal conductivity. The temperature distribution is homogenized in a short time, resulting in a small temperature gradient. The thermal aberration first increases rapidly and then slowly, and the influence of the thermal effect disappears quickly after the laser irradiation is stopped. The spatial distribution of the experimental spot intensity has different effects on the thermal effects of the two components: for the SiO<sub>2</sub> window mirror, the high spatial frequency component of the thermal aberration increases, which seriously affects the far-field transmission of the laser beam and the effect of adaptive optics correction, while the Si mirror is hot. The conductivity is large, and the impact is small.

**Key words** laser optics; thermal effect; thermal aberration; spatio-temporal characteristics; adaptive optics

**OCIS codes** 140.6810; 160.2750; 010.1080

## 1 引 言

热效应是光学系统设计中要考虑的重要因素之一, 固体激光<sup>[1-2]</sup>、合束光栅<sup>[3]</sup>、测量系统<sup>[4]</sup>的性能均

受热效应的影响。随着激光系统向高能量、高功率发展, 内部光路复杂度增加, 引入了更多的光学元件, 光学元件受到激光辐照升温、变形, 使得激光波面发生畸变, 降低了激光束光束质量, 影响了远场激

收稿日期: 2020-05-26; 修回日期: 2020-07-01; 录用日期: 2020-07-10

\* E-mail: hu\_peng@iapcm.ac.cn

光强度分布,因此,采用自适应光学(AO)对元件热效应进行校正,可以得到更好的光束质量。

元件热效应变化规律以及对热相差的补偿方法,国内外有很多丰富的研究成果。Peñano 等<sup>[5]</sup>研究了凹透镜、凸透镜热效应对光束评价因子  $M^2$  的影响,Sun 等<sup>[6]</sup>研究了主次镜在激光辐照下温升、热变形以及热相差 Zernike 系数变化,盛朝霞等<sup>[7-8]</sup>研究了窗口镜热效应对光束质量的影响,An 等<sup>[9-10]</sup>研究了窗口镜、介质气体综合热效应分析,刘文广等<sup>[11-12]</sup>等研究了元件热效应对激光光束远场传输特性的影响,Mao 等<sup>[13]</sup>研究了补偿热相差方法,周琼等<sup>[14-15]</sup>研究了反射镜、分光镜热效应相差特性与波前补偿问题。

Si 反射镜、SiO<sub>2</sub> 窗口镜是激光系统中常用元

件,在激光辐照过程中,两者热相差的时间、空间变化规律不同,对光学系统自适应校正、传输特性也产生不同的影响。本文基于光束控制多物理耦合仿真分析软件 EasyLaser<sup>[16]</sup>,分析了 Si 反射镜、SiO<sub>2</sub> 窗口镜温升和热相差分布的时间、空间分布特征,对比分析了激光辐照强度分布对元件热相差的影响;搭建仿真光路,分析不同分布激光辐照 Si 反射镜、SiO<sub>2</sub> 窗口镜热效应的 AO 效果的影响,为光学系统设计及实验结果诊断、AO 校正提供参考。

## 2 元件热相差理论

激光辐照到光学元件上,若不考虑元件材料物性随温度的变化,并忽略辐射、对流散热对元件温度分布的影响,则温度分布随时间变化的热传导方程为

$$\rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \kappa \left[ \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + q(x, y, z, t)。 \quad (1)$$

忽略激光穿过透射元件的能量损失,则

$$q(x, y, z, t) = \beta(x, y, z) I(x, y, t)。 \quad (2)$$

元件表面吸收的激光能量作为热边界条件,即

$$\kappa \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_z = \eta(x, y) I(x, y, t)。 \quad (3)$$

假设元件初始温度分布均匀,则

$$T(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = T_0, \quad (4)$$

式中: $\rho$ 、 $c$ 、 $\kappa$  分别为材料密度、热容与热导率; $q(x, y, z, t)$  为元件体内吸收激光能量; $\beta(x, y, z)$  为元件体吸收率; $\eta(x, y)$  为元件表面吸收率; $I(x, y, t)$  为激光强度分布; $T_0$  为元件初始温度分布; $L$  为元件厚度。

得到元件温度分布后,求解热弹性方程<sup>[17]</sup>,即可得到元件变形。

$$\begin{cases} \nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \\ \nabla^2 u_\theta - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{1}{r(1-2\nu)} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} - \frac{2(1+\nu)}{r(1-2\nu)} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0。 \\ \nabla^2 u_z + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

元件热相差主要是由于激光辐照元件升温,导致元件变形、折射率发射变化,使得激光波前发生改变,影响激光传输特性。反射镜的热相差  $\Delta\phi_1$  正比于元件表面变形,即

$$\Delta\phi_1(x, y) = k \cdot \frac{2u_z(x, y, 0)}{\cos \theta}。 \quad (6)$$

窗口镜的热相差由前后表面变形以及由折射率变化引起的透射相差引起。折射率变化主要有两个原因:1)热光效应,即温度变化引起折射率变化;2)弹光效应,即应力引起折射率变化,一般后者可以忽略<sup>[10]</sup>。因此,窗口镜热相差  $\Delta\phi_2$  表达式为

$$\Delta\phi_2(x, y) = k \left\{ (n_0 - 1) \cdot \left[ \frac{u_z(x, y, 0)}{\cos \theta} + \frac{u_z(x, y, L)}{\cos \theta} \right] + \int_0^L \frac{dn}{dT} \cdot T(x, y, z) dz \right\}, \quad (7)$$

式中： $k$  为波矢； $u_z$  为元件表面热变形； $\theta$  为激光入射角度； $n_0$  为元件折射率； $\frac{dn}{dT}$  为元件热光系数。

### 3 元件热效应特性对比分析

Si 反射镜、SiO<sub>2</sub> 窗口镜是光学系统中常用元

件，两种材料属性<sup>[10-11]</sup>如表 1 所示。

高能激光采用非稳腔输出的光斑一般为环形束，如化学氧碘激光。计算中，假设环形区域内激光强度分布均匀，即平顶环形束，表示为

$$I(r) = \begin{cases} I_0, & r_{in} \leq r \leq r_{out} \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (8)$$

表 1 元件材料物理参数

Table 1 Physical parameters of the materials

Material	Density / (kg · m <sup>-3</sup> )	Heat capacity / (J · K <sup>-1</sup> · kg <sup>-1</sup> )	Thermal conductivity / (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	Young's modulus / GPa	Poisson ratio	Thermal expansion / K <sup>-1</sup>	Thermal optic coefficient /K <sup>-1</sup>
Si	2329	695	153	190	0.26	4.68 × 10 <sup>-6</sup>	—
SiO <sub>2</sub>	2200	753	1.4	73	0.17	0.42 × 10 <sup>-6</sup>	1.10 × 10 <sup>-5</sup>

式中： $r_{in}$  和  $r_{out}$  分别是光束的内、外半径。计算中取  $r_{out} = 50$  mm,  $r_{in} = 15$  mm,  $I_0 = 1000$  W/cm<sup>2</sup>, 辐照时间为 20 s。为了方便比较分析，假设 Si 反射镜、SiO<sub>2</sub> 窗口镜厚度均为 30 mm, 直径为 300 mm, 元件对辐照激光总的吸收率均为  $200 \times 10^{-6}$ 。Si 反射镜只有迎光面受激光辐照，因此计算中取辐照面吸收率为  $200 \times 10^{-6}$ , 入射角度为 22.5°。SiO<sub>2</sub> 窗口镜为透射元件，可分为前、后表面吸收与体吸收，考虑了两种情形：1) 只考虑面吸收，即前、后表面吸收率均为  $100 \times 10^{-6}$ , 体吸收率为 0；2) 窗口镜以体吸收为主，体吸收率为  $60 \times 10^{-6}$  cm<sup>-1</sup>, 前、后表面吸收率为  $10 \times 10^{-6}$ 。

增加，且温度分布呈环状，而镜面中心凹区温升比辐照环形区域略小，如图 1 所示。激光辐照期间 Si 镜表面吸收激光能量后迅速向四周扩散，由于 Si 镜在 20 s 时的热扩散长度约为 8.7 cm, 大于光斑环形区域径向长度，Si 镜温升趋于动态平衡升高，即 Si 镜整体温度均在抬升，而中心凹区与环形辐照区温度梯度增加幅度逐渐减小。激光辐照停止后，镜面温度迅速平衡，镜面中心凹区温升很快高于辐照环形区；随着时间增加，光斑区内热量迅速扩散，导致光斑温度迅速降低，环形区温度也趋于平衡，在第 40 s 时，表面环形光斑区温度凹区已凸起，第 80 s 时表面径向温度梯度几乎可以忽略。

在激光辐照期间，Si 镜温升随辐照时间增加而

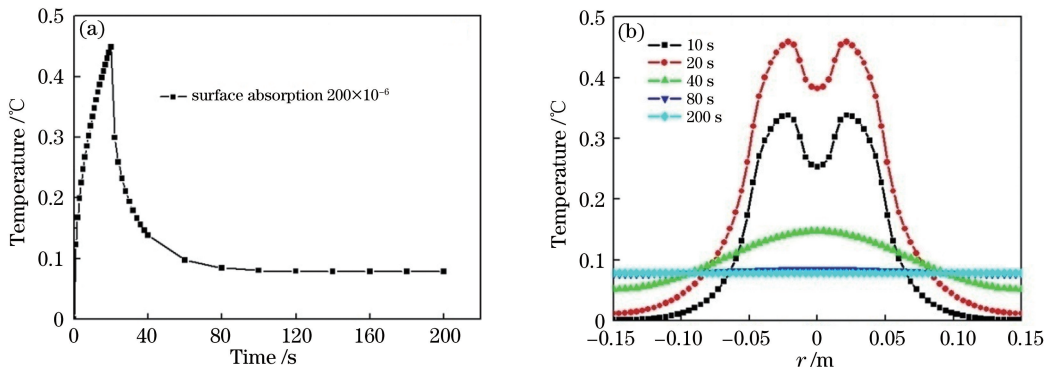


图 1 Si 反射镜温升分布。(a) 表面最大温升随时间变化；(b) 表面温升径向分布

Fig. 1 Temperature increase distribution of Si reflective mirror. (a) Maximal temperature increase change with time; (b) radial distribution of surface temperature increase

图 2 给出了 Si 反射镜表面热变形造成的热相差均方根(RMS)随时间的变化。在激光辐照期间，热相差 RMS 随辐照时间的增加而增加，先快速、后缓慢；当激光停止辐照后，RMS 值迅速减小，第 40 s 时已小于最大值的 1/10, 第 80 s 后几乎降为 0。

SiO<sub>2</sub> 材料的热导率比 Si 材料约小 2 个量级，当受到激光辐照时，SiO<sub>2</sub> 热扩散很慢，20 s 的扩散长度约为 0.8 cm, 导致 SiO<sub>2</sub> 温升随辐照时间增长近似线性增加，且温升分布与辐照激光光斑分布相似。即使激光停止辐照后，在很长时间内，温升分布

仍然与辐照激光分布相似,如图 3 所示。

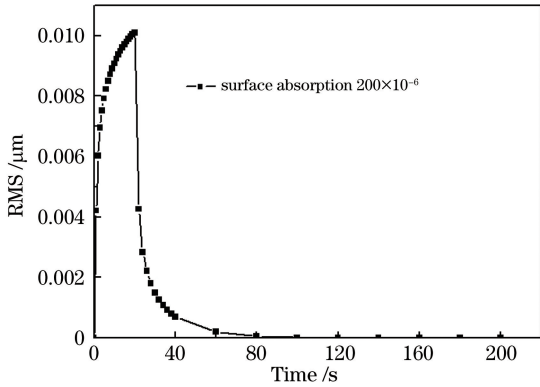


图 2 Si 反射镜热相差 RMS 随时间变化

Fig. 2 RMS of thermal aberration of Si reflective mirror change with time

SiO<sub>2</sub> 窗口镜表面、体吸收的不同处主要表现在表面最大温升随时间变化不同:只考虑面吸收时,表面温升较高,但是激光停止辐照后,表面温度下降很

快;以体吸收为主时,表面最大温升较低,激光停止辐照后,表面温度下降较慢。SiO<sub>2</sub> 窗口镜的热相差包括表面变形与热光效应两部分,当激光的总吸收率相同时,热相差 RMS 相近,如图 4 所示。

#### 4 自适应光学校正

采用光束控制多物理耦合仿真分析软件 EasyLaser 搭建元件热分析及自适应光学校正仿真光路,并设置光路中元件的总吸收率相同,仿真中主要分析 Si 反射镜、SiO<sub>2</sub> 窗口镜热效应对光束传输与自适应光学校正的影响,不考虑其他光学元件和激光传输光路中气体热效应。图 5(a)光路中只考虑 Si 反射镜热效应,共有 5 块反射镜,每个反射镜表面吸收率均为  $200 \times 10^{-6}$ ,激光入射角度均为  $22.5^\circ$ ;图 5(b)光路中只考虑 SiO<sub>2</sub> 窗口镜热效应,窗口镜总吸收率为  $1000 \times 10^{-6}$ ,激光入射角度均为  $0^\circ$ 。两个光路中元件大小与前文相同。

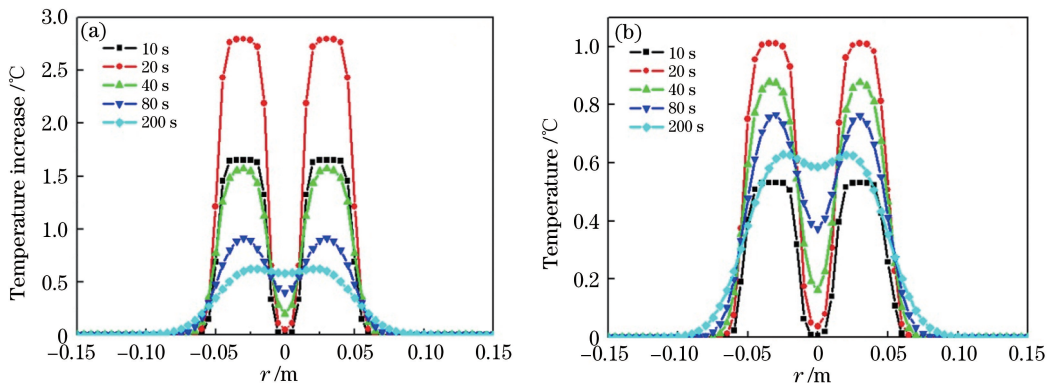


图 3 SiO<sub>2</sub> 窗口镜不同时刻温升分布。(a)面吸收;(b)体吸收

Fig. 3 Temperature increase distribution of SiO<sub>2</sub> window mirror at different moments.

(a) Face absorption; (b) body absorption

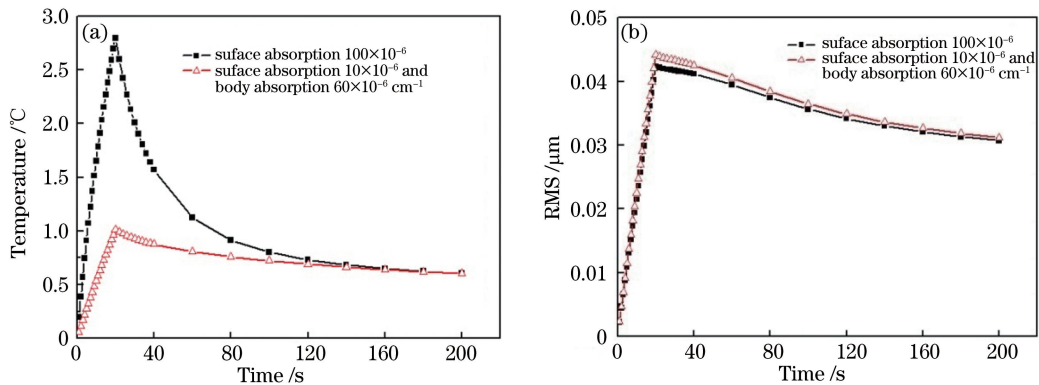


图 4 SiO<sub>2</sub> 窗口镜热效应的变化。(a)表面最大温升;(b)热相差 RMS

Fig. 4 Thermal effect of SiO<sub>2</sub> window mirror change with time. (a) Maximal temperature increase; (b) RMS of thermal aberration

AO 校正原理如下:激光束通过变形镜、反射镜或窗口镜,主激光由分光镜透射后进行光束远场诊断,反射光进入哈特曼探测器对热畸变波面进行探测和重构,根据哈特曼探测器与变形镜间的共轭关系,计算变形镜驱动器的行程量,基于控制传函驱动变形镜产生与热畸变波面共轭的面形分布,达到畸

变波面的自适应光学校正。若断开图中“AO 控制传函”向“变形镜”的反馈信号,仿真光路表示 AO 开环。两个光路中 AO 采用同样的计算参数:哈特曼探测器为  $14 \times 14$  子孔径,子孔径像素数为 31,像素视场角为  $30 \mu\text{rad}$ ;变形镜单元数为 127;AO 控制传函采用比例积分算法。

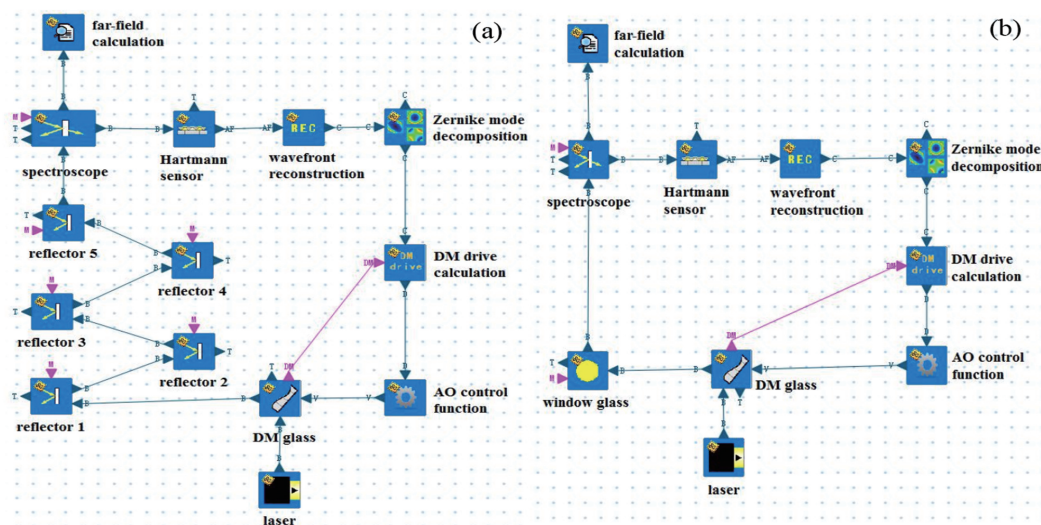


图 5 元件热效应自适应校正仿真光路。(a) Si 反射镜;(b)  $\text{SiO}_2$  窗口镜

Fig. 5 Adaptive correction simulation optical path of thermal effect. (a) Reflective mirrors Si; (b) window mirror  $\text{SiO}_2$

首先考虑均匀环形光斑辐照情形。 $\text{SiO}_2$  窗口镜与 Si 反射镜表现出不同的特性:随着时间增加, $\text{SiO}_2$  窗口镜热相差 RMS 值随辐照时间线性增加,而 5 块 Si 反射镜总热相差的 RMS 在辐照前 5 s 内增加很快,随后增加速度减慢;在激光辐照时间内, Si 反射镜总的热相差比  $\text{SiO}_2$  镜大,如图 6 所示。

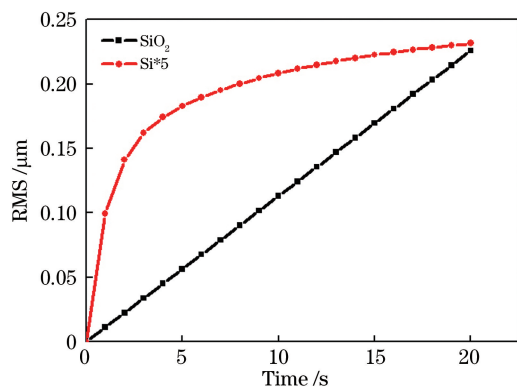


图 6 均匀光斑辐照时,元件热相差 RMS 随时间变化

Fig. 6 RMS of thermal aberration under uniform intensity laser irradiation change with time

以不考虑元件热效应、激光传输到远场的光斑峰值强度为参考,得到光学自适应校正前后归一化激光远场峰值强度的变化,对比 5 块 Si 反射镜、1 块  $\text{SiO}_2$  窗口镜热效应激光远场传输的影响,如图 7 所

示。在激光辐照期间内,当 AO 开环时, Si 反射镜热效应对远场光斑峰值强度的影响比  $\text{SiO}_2$  窗口镜大,远场光斑峰值强度与热相差 RMS 变化规律相同。当 AO 闭环时,开始时 Si 镜校正后远场光斑峰值强度小于  $\text{SiO}_2$  镜校正后的,约在 12 s 后,大于  $\text{SiO}_2$  镜校正后的远场峰值强度,且峰值强度随辐照时间增加下降缓慢;  $\text{SiO}_2$  镜热效应在校正后,远场峰值强度随辐照时间增加持续减低,先下降慢、后下降快。仿真结果表明,长时间看, Si 镜热效应的校正效果优于  $\text{SiO}_2$  镜。

实验中,光斑强度分布不均匀,取某次实验测量光斑分布,如图 8 所示,保持激光总功率与均匀光斑时相同进行对比分析。由于 Si 镜热导率大,激光辐照 20 s 时环形光斑辐照区域热相差分布与光斑分布区别很大,呈环形分布;  $\text{SiO}_2$  镜热导率小,激光辐照 20 s 时辐照区域热相差分布依然与辐照激光强度分布相似,具有与激光强度分布相近的高空间频率,如图 9 所示。

在实验光斑辐照下,激光强度空间分布引起两种元件热相差 RMS 大于均匀分布激光辐照,  $\text{SiO}_2$  窗口镜的增幅尤其明显,如图 10 所示。AO 开环时,远场光斑峰值强度下降速度比均匀光斑辐照时

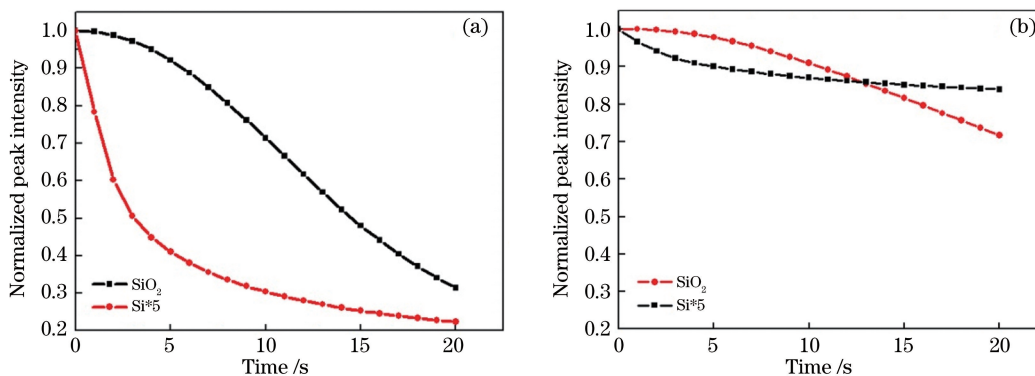


图 7 均匀光斑辐照时,远场光斑归一化峰值强度随时间变化。(a) AO 开环;(b) AO 闭环  
Fig. 7 Normalized peak intensity of far-field under uniform laser irradiation change with time.

(a) AO open; (b) AO closed

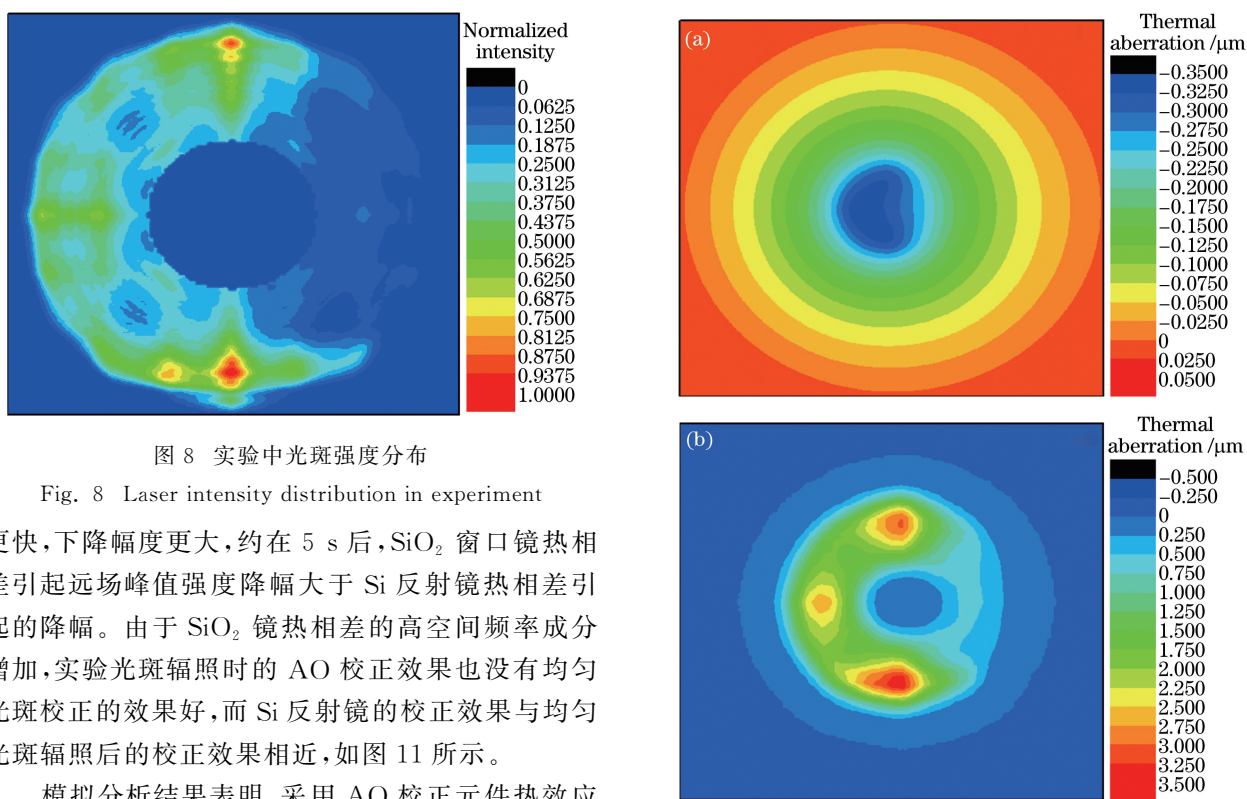


图 8 实验中光斑强度分布  
Fig. 8 Laser intensity distribution in experiment

更快,下降幅度更大,约在 5 s 后, SiO<sub>2</sub> 窗口镜热相差引起远场峰值强度降幅大于 Si 反射镜热相差引起的降幅。由于 SiO<sub>2</sub> 镜热相差的高空间频率成分增加,实验光斑辐照时的 AO 校正效果也没有均匀光斑校正的效果好,而 Si 反射镜的校正效果与均匀光斑辐照后的校正效果相近,如图 11 所示。

模拟分析结果表明,采用 AO 校正元件热效应同时,采取以下措施也有助于减小元件热效应对激光传输的影响:1)采用导热性能好的元件;2)减少元件对激光的吸收率;3)提高辐照激光光斑强度均匀性。

## 5 结 论

光学元件热效应与激光光斑分布、材料特性等密切相关,具有不同的时空特性。对于 Si 反射镜与 SiO<sub>2</sub> 窗口镜,温升与热相差的时空分布主要区别有:1) SiO<sub>2</sub> 窗口镜热导率小,表面温升分布与激光光斑强度分布相似,且在激光停止辐照后仍然能保持较长时间; Si 镜热导率大,温度分布平衡很快达

图 9 20 s 时元件热相差分布。(a) Si 反射镜;  
(b) SiO<sub>2</sub> 窗口镜

Fig. 9 Distribution of thermal aberration at 20 s.  
(a) Reflective mirrors Si; (b) window mirror SiO<sub>2</sub>

到动平衡,因此,当吸收激光总能量相同时, SiO<sub>2</sub> 窗口镜表面最大温升以及热相差 RMS 值均比 Si 反射镜高许多;2)当吸收激光总能量相同时, SiO<sub>2</sub> 窗口镜面吸收、体吸收特性与表面最大温升有关,但对窗口镜热相差 RMS 值影响很小;3) SiO<sub>2</sub> 窗口镜热相差 RMS 值随着激光辐照时间增加而增加,且在辐照停止后影响仍然维持较长时间; Si 反射镜热相差 RMS 值随激光辐照时间增加先快速增加,然后增加

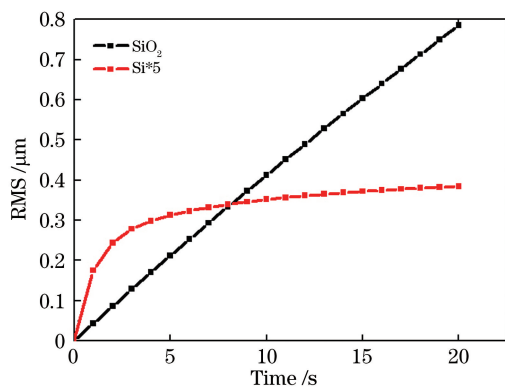


图 10 实验光斑辐照时,元件热相差 RMS 随时间变化

Fig. 10 RMS of thermal aberration under experimental laser irradiation change with time

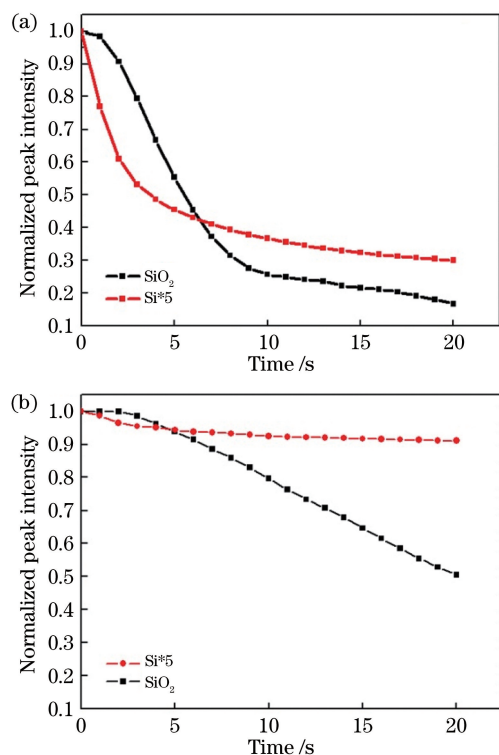


图 11 实验光斑辐照时,远场光斑归一化峰值强度校正前后随时间变化。(a) AO 开环;(b) AO 闭环

Fig. 11 Normalized peak intensity of far-field under experimental laser irradiation change with time before and after correction. (a) AO open; (b) AO closed

幅度减小,且在辐照停止后影响快速下降;4)当辐照激光光斑不均匀时,光斑强度空间分布会增大元件热相差 RMS, SiO<sub>2</sub> 窗口镜热相差 AO 校正效果变差,而 Si 反射镜热相差的校正效果几乎不影响。

由于这两类元件温升、热相差的时空变化特征区别较大,当实验中出现由于元件热效应引起激光远场强度变化时,可以通过测量激光辐照期间、辐照

停止后波面的变化,反推出影响激光系统性能的元素类型,并采取适当措施降低元件热效应的影响。

### 参 考 文 献

[1] Huang T R, Huang W F, Wang J F, et al. Thermal-induced wavefront aberration in sapphire-cooled Nd: glass slab[J]. Applied Physics B, 2016, 122(7): 1-9.

[2] Sikocinski P, Novak O, Smrz M, et al. Time-resolved measurement of thermally induced aberrations in a cryogenically cooled Yb: YAG slab with a wavefront sensor [J]. Applied Physics B, 2016, 122(4): 1-10.

[3] Xu J, Chen J M, Chen P, et al. Thermal distortion of 960-line spectral beam combining grating[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0505002. 徐娇, 陈俊明, 陈鹏, 等. 960 线光谱合束光栅的热畸变分析[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0505002.

[4] Ramette J, Kasprzack M, Brooks A, et al. Analytical model for ring heater thermal compensation in the advanced laser interferometer gravitational-wave observatory [J]. Applied Optics, 2016, 55(10): 2619-2625.

[5] Peñano J, Sprangle P, Ting A, et al. Optical quality of high-power laser beams in lenses [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(3): 503-510.

[6] Sun Y, Li F, Yang W Q, et al. Thermal effects of optical antenna under the irradiation of laser [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10463: 104631F.

[7] Sheng Z X, Wang Z J. Influence of thermal deformation of high-power laser output windows on beam quality [J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 278-280. 盛朝霞, 王再军. 强激光输出窗口热行为对光束质量的影响[J]. 激光技术, 2008, 32(3): 278-280.

[8] Sun F, Chen Z H, Zhang Y N, et al. Thermal distortions in calcium fluoride, potassium chloride and fused silica windows at 1.315 μm [J]. Chinese Journal Lasers, 2004, 31(4): 412-416. 孙峰, 程祖海, 张耀宁, 等. 在波长 1.315 μm 下的几种激光器窗口热效应比较研究, 中国激光, 2004, 31(4): 412-416.

[9] An J Z, Li Y K, Du X W. Thermal effects of a laser beam tube consisting of a window and nonflowing gas [J]. Optics Letters, 2004, 29(24): 2899-2901.

[10] An J Z, Li Y K, Du X W. Influence of laser window's thermal lensing effect on beam quality [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(4): 429-433.

- 安建祝, 李有宽, 杜祥琬. 激光窗口热透镜效应对光束质量的影响[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(4): 429-433.
- [11] Liu W G, Rao P, Hua W H. Effects of thermal distortion of Si mirror irradiated by non-uniformity laser intensity on laser propagation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(10): 1615-1619. 刘文广, 饶鹏, 华卫红. 非均匀激光辐照下硅镜热变形对光束传输特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(10): 1615-1619.
- [12] Guo R H, Chen N, Zhuang X Y, et al. Simulations of far-field optical beam quality influenced by the thermal distortion of the secondary mirror for high-power laser system[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9255: 92553G.
- [13] Mao Y J, Li S K, Sun G, et al. The thermal aberration analysis of a lithography projection lens [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10147: 101471P.
- [14] Zhou Q, Jiang Z F, Xi F J. Designing of scaling model and study of thermal deformation compensation for inner optical system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(4): 0402008.
- 周琼, 姜宗福, 习锋杰. 内光路系统的缩放模型及其热变形像差的波前预补偿[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0402008.
- [15] Zhou Q, Jiang Z F, Xi F J. Study of thermal deformations induced optical aberrations for  $Al_2O_3$  mirror in an optical system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10): 1002001. 周琼, 姜宗福, 习锋杰. 光学系统中白宝石分光镜的热变形像差分析[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1002001.
- [16] Xie X G, Zhang J Z, Yue Y F, et al. EasyLaser: component-based laser system simulation software [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(10): 2536-2540. 谢晓钢, 张建柱, 岳玉芳, 等. 激光系统组件化仿真软件 EasyLaser [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(10): 2536-2540.
- [17] Yan Z D, Wang H L. Heat stress [M]. Beijing: Higher Education Press, 1993: 100. 严宗达, 王洪礼. 热应力[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 100.