文章编号 2095-1531(2015)01-0084-07

激光辐照下镀铬介质高吸收镜的热变形

聂山钧[1,2],郭 劲[1*],邵俊峰[1],王挺峰[1],汤 伟[1]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
激光与物质相互作用国家重点实验室,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为了分析激光辐照下反射镜热变形对光束质量的影响,本文建立了激光光束 45°角入射时镀铬介质高吸收镜的热固耦合模型,对不同辐照光束下反射镜的热变形和镜体厚度对热变形的影响进行了分析,并用哈特曼波前传感器对自由边界条件下的镜面热变形进行了检测。结果表明:吸收功率在 0.085 ~ 0.185 W 时,镜面热变形随吸收功率的增加近似线性增加,随辐照光斑的增加而减小;反射镜厚度在 1 ~ 5 mm 范围,镜面热变形基本不变。在激光照射的初始阶段,反射镜表面温度和热变形迅速增加,在激光连续照射 20 s 后,镜面温度增加量逐步变缓,镜面热变形则在 1 s 以内就上升至 0.27 μm,之后变形量缓慢增加,在 100 s 后达到相对稳定状态;关闭激光后,镜面在 120 s 后恢复到初始状态。分析表明,产生误差的因素主要为光斑大小和辐照光束入射角度。

关 键 词:热固耦合;热变形;哈特曼传感器
中图分类号:TN249 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20150801.0084

Thermal deformation of high absorption chrome plated mirror irradiated by laser

NIE Shan-jun[1,2], GUO Jin[1*], SHAO Jun-feng[1], WANG Ting-feng[1], TANG Wei[1]
(1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: guojin@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to analyze the effect of thermal deformation of the mirror irradiated by laser beam on the beam quality, thermal-static structural coupled model of high absorption chrome plated mirror irradiated by laser beam with the incidence angle of 45° is built. Thermal deformation under different irradiation laser and the influence of mirror thickness on the deformation are analyzed. Then thermal deformation is detected with Hartmann wavefront sensor on free boundary condition. The results show that thermal deformation increases approximately linearly with the increase of the power absorbed at the range of 0.085 – 0.185 W. When the diameter of the facula increases, the deformation decreases. When mirror's thickness keeps in the range of 1 ~ 5 mm, the deformation merely keeps constant. In the initial stage of laser irradiation, the temperature and deformation increase rapidly. After 20 s, the increase of temperature on the mirror becomes slowly. The deformation in-

收稿日期:2014-10-15;**修订日期**:2014-12-12
基金项目:激光与物质国家重点实验室自主基础研究资助项目(No. SKLLIM1303)

creases to 0.27 μm in 1 s, and then increase slowly. The deformation will reach balance after 100 s. When the irradiation laser is removed, the mirror will return to the initial state after 120 s. The analysis result shows that the testing error is mainly caused by the error of the diameter of the facula and the incident angle of the laser.

Key words: thermal-structural coupling; thermal deformation; Hartmann wavefront sensor

1　引　言

在反射式传输光路中,受反射镜反射率的限制,镜体在反射过程中会吸收一定的热量而导致镜体温度的不均匀分布,从而导致镜体发生不规则变形,引起光束发生波前畸变,致使光束在传输过程中质量变差[1]。由于硅、铜、碳化硅等有较高的热传导率,国内外对硅、铜、碳化硅等基底的反射镜热变形及其主动冷却技术进行了广泛的研究[2-7]。K9 玻璃由于价格低廉、易于加工等因素,在光学系统中得到了广泛的应用,国内外对其进行的研究以透射式居多[8-10],或为强制对流,或不考虑空气的温升。为了解决 K9 玻璃的热变形及其对光束传输特性的影响,有必要对自然对流时激光辐照下 K9 玻璃的镜面热变形进行研究。

由于自然对流换热条件下,散热功率为 $h_c(T_s - T_f)$,与镜体表面温度和镜体表面附近环境温差成正比,镜体附近空气在对流作用下温度升高,因此需考虑环境温度的变化对镜体温升的影响。本文采用 fluent 流体分析和 static structural 结构分析进行多域热固耦合,对以 K9 玻璃为基底,表面镀铬高吸收镜在不同光束辐照下的热变形进行了分析,同时对反射镜厚度对镜面热变形的影响进行了探讨,最后通过实验验证了镜面热变形随吸收功率和光斑大小的变化,并测得了镜面变形随时间的变化。

2　基本理论

反射镜基底材料为 K9 玻璃,其材料参数[11]密度为 2 510 Kg/m^3;比热为 879 J/(kg·K^{-1});热传导率为 1.1 W/(m·K^{-1});热膨胀系数为8.6×10^{-6} K^{-1};杨氏模量为 82 GPa;泊松比为 0.21。

反射镜表面镀高反膜,镜体厚为 h,直径为 D_0,其结构如图 1 所示。

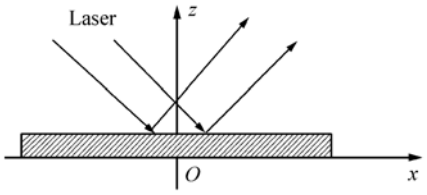


图 1　反射镜结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the reflection mirror

激光光束沿 45°角入射时,热传导方程在直角坐标系(x,y,z)下表示为[12]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t}, \tag{1}$$

式中,$a = \lambda/(\rho \cdot C)$,$\lambda$ 为导热率,ρ 为密度,C 为比热;t 为照射的时间。

镜体表面与空气以自然对流换热,热对流系数为 10 W/(m^2·K),环境温度为 25 ℃,由于镜体温度较低,热辐射对温度的影响极小,可忽略热辐射散热。

连续激光辐照下,由于反射镜膜层的厚度远小于基底的厚度,故膜层内的应力应变场对反射镜热畸变的影响均可忽略。又因连续激光的辐照时间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。所以反射镜的热畸变可由基底材料内的忽略体应力及惯性力的热弹方程来描述[13]:

$$\begin{cases} \nabla^2 u_x - \dfrac{u_x}{x^2} + \dfrac{1}{1-2v}\dfrac{\partial e}{\partial x} - \dfrac{2(1+v)}{1-2v}\alpha_T \dfrac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \\ \nabla^2 u_y - \dfrac{u_y}{y^2} + \dfrac{1}{1-2v}\dfrac{\partial e}{\partial y} - \dfrac{2(1+v)}{1-2v}\alpha_T \dfrac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \\ \nabla^2 u_z + \dfrac{1}{1-2v}\dfrac{\partial e}{\partial z} - \dfrac{2(1+v)}{1-2v}\alpha_T \dfrac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \end{cases}, \tag{2}$$

式中,u_x、u_y、u_z分别为基底材料内(x,y,z)点上的位移 u 在 x,y,z 方向上的分量,e 为体应变,α_T为

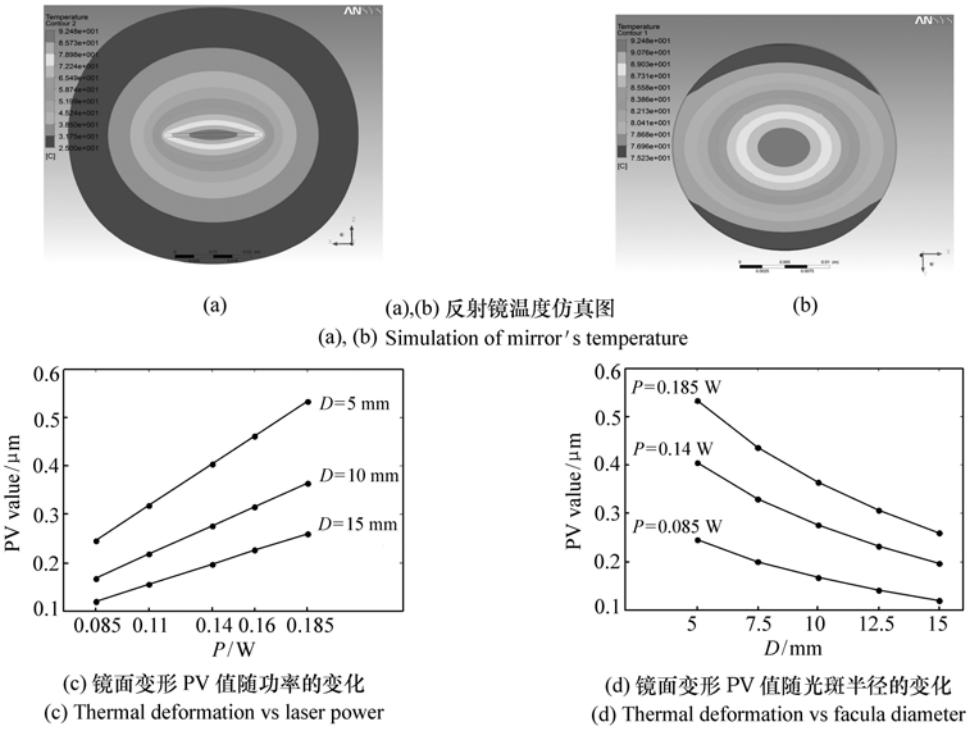
热膨胀系数，v 为泊松比。

由于反射镜镜体较薄，较小的夹持力也会使反射镜产生较大的镜面变形，故而镜体采用自由边界条件。

3 有限元分析结果

3.1 镜面热变形随光斑大小和吸收功率的变化

取反射镜厚度 h_0 为 1 mm，直径 D_0 为 25 mm，辐照光束为基模高斯光束，图 2(a)、2(b)为吸收功率为 0.185 W，光斑大小为 5 mm，镜体达到热平衡后镜体及周围空气在 $x=0$ 平面上的温度分布，中间方框区域为反射镜。当吸收功率分别为 0.085、0.11、0.14、0.16、0.185 W 时，光斑直径 D 分别为 5、7.5、10、12.5、15 mm 时，当镜体达到热平衡后，镜面变形 PV 值如图 2(c)和 2(d)所示。



(a),(b) 反射镜温度仿真图

(a), (b) Simulation of mirror′s temperature

(c) 镜面变形 PV 值随功率的变化

(c) Thermal deformation vs laser power

(d) 镜面变形 PV 值随光斑半径的变化

(d) Thermal deformation vs facula diameter

图 2 反射镜温度仿真图及镜面变形随功率、光斑半径的变化

Fig. 2 Simulation diagram of mirror temperature, and thermal deformation dependence of laser power and facula diameter

由图 2(a)、2(b)可知，镜体附近空气温升达 60 ℃，此时若将周围环境温度设置为室温，由对流散热公式可知，镜体达到热平衡时，镜体温升比实际情况要小很多，此时镜面热变形要小于实验结果。实际上，由于空气温度的升高，镜体达到热平衡时，相较于将环境温度设为室温，镜体温度比之高出近 20 ℃，镜面热变形比之高出 0.15 μm，故此时必须考虑环境温度变化对镜体温度和热变形的影响。由图 2(c)可知，当光斑大小一定时，镜面变形随吸收功率的增加近似线性增加，且光斑越小，热变形随功率增加的略快。由图 2(d)可知，当吸收功率一定时，随着光斑直径的增加，镜面热变形变小。由于光照面功率密度与光斑直径的平方成反比，故光斑越小，热变形随吸收功率的变化率越大。

3.2 镜面热变形随镜体厚度的变化

取吸收功率为 0.185 W，当光斑直径分别为 5、10、15 mm 时，反射镜镜面热变形 PV 值随镜体厚度的变化如图 3 所示。

由图 3 可知，随着厚度的增加，热变形略有减小，但由于热变形下降很小，故可认为厚度在 1 ~ 5 mm 范围内，镜面热变形与镜体厚度几乎无关。若镜体厚度太小，则较小的加持力将会使镜体产生较大的挠曲应变，因此在选择反射镜时不必考虑其厚度会对镜面热变形产生影响，而是要考虑其结构强度。

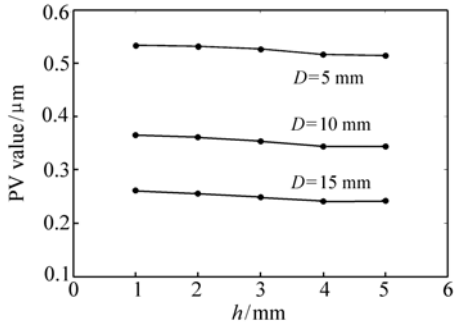
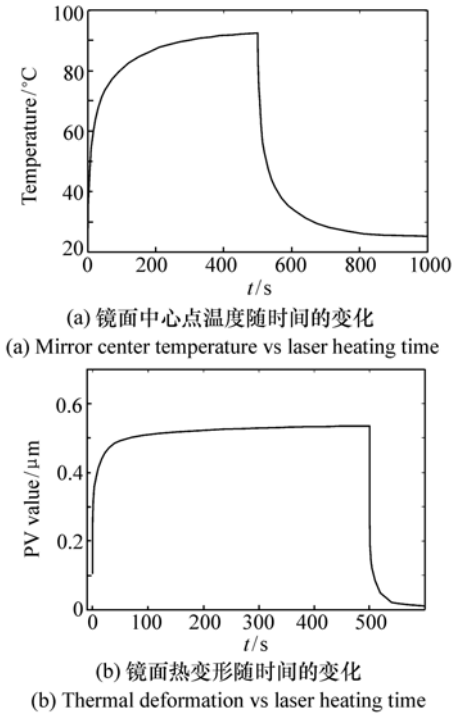


图 3　镜面变形随镜体厚度的变化

Fig. 3　Thermal deformation with different diameter and thickness

3.3　镜面中心点温度和热变形随时间的变化

取光斑直径为 5 mm,镜体厚度为 1 mm,吸收功率为 0.185 W,镜面中心点温度和镜面热变形 PV 值随时间的变化如图 4 所示。



(a) 镜面中心点温度随时间的变化

(a) Mirror center temperature vs laser heating time

(b) 镜面热变形随时间的变化

(b) Thermal deformation vs laser heating time

图 4　镜面中心点温度和镜面热变形随时间的变化

Fig. 4　Variation of mirror center temperature and thermal deformation with laser heating time

在光照初始阶段,由于镜体温度较低,吸热功率远大于散热功率,中心点温度快速上升,反射镜整体温度也快速增加,因此镜面变形在初始阶段快速上升;随着光照时间的增长,镜体整体温度变大,与周围环境的温差变大,热对流散热逐渐变大,镜体的净吸热随温度的增加逐渐减小,镜体最终达到热平衡。由图 4 可知,在初始阶段镜面变形增长较快,50 s 后,由于镜体净吸热较小,镜体温度增加变缓,此时反射镜整体温度升高,局部温差变化很小,故镜面变形随时间增加变化缓慢。关闭辐照激光后,由于此时散热量近似等于辐照激光功率,故反射镜温度急剧下降,镜面热变形也快速下降;随着散热时间加长,镜体与环境的温差变小,镜体温度下降变缓,经 300 s 后,基本下降至环境温度;经 40 s 后,镜面基本恢复至初始状态。

4　实验装置和实验结果

4.1　实验装置

首先,用红外热像仪对镜体温度进行测量,其测温精度与镜体辐射系数有关,对光斑直径为 5 mm,镜体厚度为 1 mm,吸收功率为 0.185 W,镜体达到热平衡时镜面温度进行测量,反射面温度分布如图 5 所示。对光照中心点,测得的温度为 91.7 ℃,与理论计算值 92.5 ℃相差约 0.8 ℃,由图 4 可知,因为镜面热变形与镜体温度梯度有关,而与镜体整体温度无关,所以镜面热变形随着镜体温升的变化逐渐变缓。

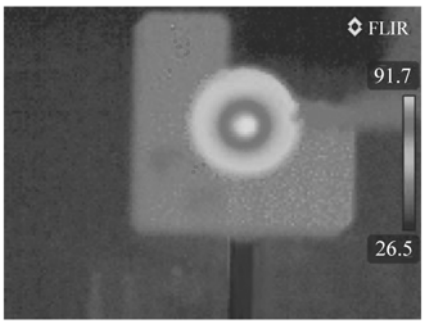
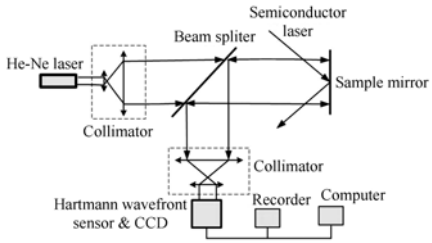


图 5　镜面温度分布

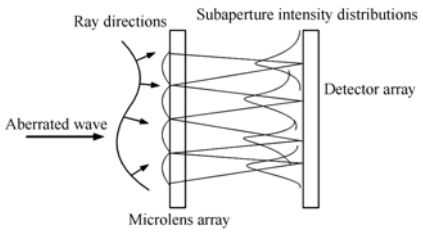
Fig. 5　Temperature distribution of the mirror

采用哈特曼波前传感器对镜面热变形进行了测量,实验装置如图 6 所示。半导体激光器数值孔径为 0.22,发散角为 0.2 rad,45°角照射在反射镜上。He-Ne 光源经准直后经过分光板照射在反射镜上,反射回的光束再经分光板的反射,经缩束

后照射在哈特曼波前传感器的微透镜阵列上,通过阵列微透镜将目标成像在 CCD 焦面上,形成一阵列图像,其中每一子图像的相对平移代表着相应子孔径处波前斜率的变化。采用未照射辐照激光时的图像作为参考,并假定其对应的波前斜率为 0,通过相关处理方法计算每一个子图与参考子图像间的相对平移量,即可得到每一子孔径处的波前斜率,然后通过 Zernike 多项式拟合等方法,可重构出整个波前。由于是反射式系统,此波前即相应的镜面热变形的 2 倍。



(a) 镜子热变形测量实验装置
(a) Experimental equipment for measuring thermal deformation



(b) 哈特曼检测的原理
(b) Principle of Hartmann test

图 6 热变形测量实验装置及哈特曼检测的原理

Fig. 6 Experimental equipment for measuring thermal deformation and principle of Hartmann test

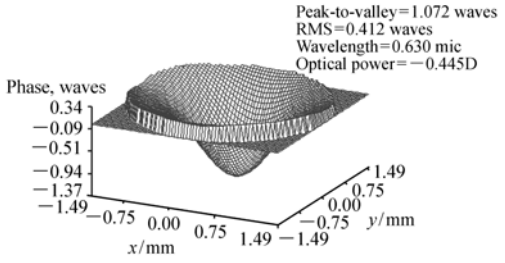
通过功率计测量并计算出反射镜的吸收功率,用哈特曼传感器对 He-Ne 光源波前进行多次测量,经计算可得测量系统的测量精度为 0.006 μm。

4.2 实验结果及分析

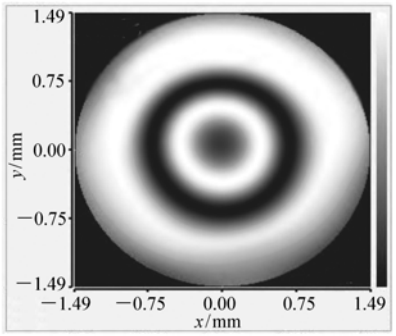
测量过程中经数据处理系统可直接得到波前面型和干涉图,图 7 为吸收功率 0.185 W,光斑直径为 5 mm,光照 100 s 时的波前面型和干涉图。

吸收功率为 0.185 W,光斑直径为 5 mm 时,半导体激光束照射 120 s 后关闭激光器,镜面变形量随时间的变化如图 8 所示。

由图可知,镜面变形量在初始不到 1 s 之内



(a) 波前面型
(a) Wavefront surface



(b) 干涉图
(b) Interferogram

图 7 波前面型和干涉图

Fig. 7 Wavefront surface and interferogram

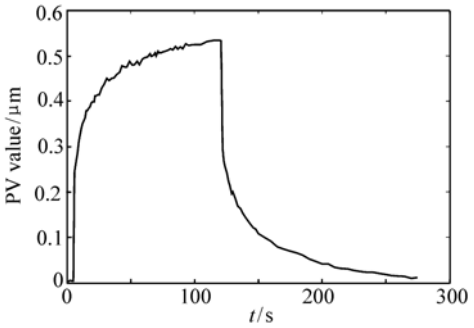


图 8 镜面热变形 PV 值与激光辐照时间的关系

Fig. 8 Thermal deformation vs laser heating time

就上升至 0.27 μm,之后随着镜体净吸热功率的降低上升速度逐渐变缓,80 s 后热变形为 0.534 μm,基本达到热平衡。关闭辐照激光后,反射镜温度快速下降,镜面热变形在 1 s 内即下降至 0.3 μm,之后随着反射镜温度的降低下降趋势有逐渐减缓,100 s 后镜面基本恢复至初始状态。

不同功率和大小的光束照射下镜面热变形实验值与仿真结果如图 9 所示,其中虚线表示仿真

结果,实线为实验测量结果。

测量过程中光斑大小的不确定性将产生误差。由基模高斯光束的能量分布方程可知,能量密度和光斑直径的平方成反比,取 $\zeta = 1/D$,对图 2(d)所示热变形量随 ζ 的变化用最小二乘法进行二次多项式拟合,得:

$$PV = a\zeta^2 + b\zeta + c . \tag{3}$$

经计算可得,光斑大小引入的误差为:

$$\Delta PV_1 = (-2a/D^3 - b/D^2)\Delta D . \tag{4}$$

吸收功率为 0.185 W 时,将计算得到的 a、b 和光斑大小带入,取光斑直径的相对误差为 ±5%,ΔD 将引入约 ±0.01 μm 的误差。

同时,由图 2(c)可知,在吸收功率为 0.085 ~ 0.185 W 范围内,反射镜热变形与吸收功率近似成线性关系,经计算可得,反射镜吸收功率与半导体激光束入射角度的关系可表示为:

$$PV = 4.073P\cos\theta . \tag{5}$$

由半导体激光束入射角引入的误差为:

$$\Delta PV_2 = -4.073P\Delta\theta . \tag{6}$$

其相对误差为:

$$\frac{\Delta PV}{PV} = -\Delta\theta . \tag{7}$$

当辐照光束偏角为 2°,镜面热变形为 0.3 μm 时,$\Delta\theta$ 引入的误差即达 0.01 μm。由图 9 可知,理论仿真与实验结果之间的绝对误差在 0.015 μm之内,考虑到上述两种测量误差的存在可知,理论仿真与实验结果吻合。

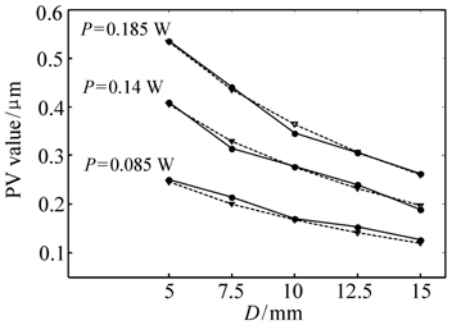


图 9　热变形与吸热功率和光斑大小的关系

Fig. 9　Relationships of thermal deformation, absorbed power and diameter of the laser beam

5　结　论

本文对 K9 玻璃为基底,镀铬高吸收镜在不同激光辐照下的镜面热变形进行分析,结果表明,在吸收功率为 0.085 ~ 0.185 W 范围内,镜面吸收功率密度越大,则热变形越大;镜片厚度在 1 ~ 5 mm 范围内,热变形与厚度几乎无关。实验中光斑大小引入的误差约为 0.01 μm,辐照光束角度引入的相对误差与角度的误差在数值上相等。

参考文献:

[1] 周炳琨. 激光原理[M]. 成都:国防工业出版社,2009:129-133.
ZHOU B K. *Principles of Laser*[M]. Chengdu:National Defence Industry Press,2009:129-133. (in Chinese)

[2] 彭玉峰,程祖海. 强激光反射镜基体材料的热畸变特性有限元分析[J]. 强激光与粒子束,2005,17(1):5-8.
PENG Y F,CHENG Z H. Finite element analyses of thermal deformations of mirror substrates for high power lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2005,17(1):5-8. (in Chinese)

[3] 李斌,焦路光,刘亮,等. 射流式碳化硅水冷镜数值模拟[J]. 中国激光,2011,38(2):1-7.
LI B,JIAO L G,LIU L,*et al*.. Numerical simulation of water jet cooled Sic mirror[J]. *Chinese J. Lasers*,2011,38(2):1-7. (in chinese)

[4] BELYAEV A A,ZHEVLAKOV A L. *Optics of High-Power Lasers*[M]. Baltic:Press of Baltic State Technical University,2005:36-95.

[5] 康健,宣斌,谢京江. 表面改性碳化硅基底反射镜加工技术现状[J]. 中国光学,2013,6(6):824-833.
KANG J,XUAN B,XIE J J. Manufacture technology status of surface modified silicon carbide mirrors[J]. *Chinese Optics*,2013,6(6):824-833. (in Chinese)

[6] 张峰. 空间相机碳化硅反射镜表面硅改性层的组合式抛光[J]. 中国激光,2013,40(7):1-5.
ZHANG F. Combined type polishing of silicon modification layer on silicon carbide mirror for space camera[J]. *Chinese*

J. Laser,2013,40(7):0716001-1-0716001-5. (in Chinese)

[7] 胡攀攀,朱海红,左都罗. 流道截面参量对微通道水冷镜热变形的影响[J]. 中国激光,2011,38(11):1102001-1-1102001-7.
HU P P,ZHU H H,ZUO D L. Influence of channel parameters on thermal-deformation of microchannel mirror[J]. *Chinese J. Laser*,2011,38(11):1102001-1-1102001-7. (in Chinese)

[8] 杜少军,陆启生,舒柏宏. 激光辐照下铝膜反射镜温升和热应力的计算[J]. 红外与激光工程,2001,30(2):128-133.
DU SH J,LU Q SH,SHU B H. Calculation of laser-induced temperature increment and thermal stress of Al-film reflector [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2001,30(2):128-133. (in Chinese)

[9] 黎明,吴清文,余飞. 基于热光学分析的光学窗口玻璃厚度的优化[J]. 光学学报,2010,30(1):210-213.
LI M,WU Q W,YU F. Optimization of optical window glass thickness based on the thermal optical analysis[J]. *Acta Optica Sinica*,2010,30(1):210-213. (in Chinese)

[10] 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.
AN J ZH,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. (in Chinese)

[11] BASS M,LI G F,STRYLAND E V. *Handbook of Optics* III[M]. USA:OSA,2010:249-254.

[12] 胡汉平. 热传导理论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2010:5-7.
HU H P. *Heat Transfer Theory*[M]. Hefei:Press of University of Science and Technology of China,2010:5-7. (in Chinese)

[13] NOWINSIK J L. *Theory of Thermo-Elasticity with Applications*[M]. Netherlands:Sijthoff & Noordhoff International Publishers,1978:261-270.

作者简介:

聂山钧(1989—),男,山东临沂人,硕士研究生,2011年于西安电子科技大学获学士学位,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail:shjwind@sina.cn

王挺峰(1977—),男,山东文登人,研究员,硕士生导师,1999年、2002年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电对抗技术方面的研究。E-mail:wangtf@sina.com

郭 劲(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事激光与物质相互作用、激光探测方面的研究。E-mail:guojin@ciomp.ac.cn

汤 伟(1985—),男,黑龙江绥棱人,博士研究生,2009年于天津科技大学获得学士学位,主要从事激光辐照效应、热控方面的研究。E-mail:twei222@163.com

邵俊峰(1984—),男,安徽宿州人,博士研究生,助理研究员,2006年、2009年于复旦大学分别获得学士、硕士学位,主要从事激光辐照效应、光电对抗技术方面的研究。E-mail:shaojunfeng1984@163.com