

半导体制冷对镜面热变形影响的数值研究

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 为了减小激光辐照下反射镜镜面的热变形问题,建立了反射镜热变形的有限元分析模型。对不同制冷功率时的镜面热变形进行分析,然后针对吸收功率为50 W、光斑半径为镜体半径1/3时的TEM₀₀模高斯光束对镜体结构进行优化,对优化后的反射镜在不同参数的TEM₀₀模高斯光束和TEM₁₀、TEM₁₁模厄米特-高斯光束辐照下的热变形进行了分析。仿真结果表明,当施加滞后于激光辐照且与吸收功率近似大小的制冷时,有利于减小镜面热变形,且镜体最终会趋于相对稳定的热平衡状态。此外,当镜体背部切去一厚度为1.4 mm、内径为25 mm的环状区域时,热变形峰谷(PV)值仅为0.005 μm;同时,优化后的镜体也可在一定程度上减小其他参数激光辐照下的镜面热变形的PV值。对于TEM₀₀模高斯光束和TEM₁₀、TEM₁₁模厄米特-高斯光束,均满足光学系统对热变形的要求。

关键词 激光光学;热变形;半导体制冷;结构优化;有限元分析

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0114002

Numerical Analysis on the Thermal-Deformation of Semiconductor Refrigerated Mirror

Nie Shanjun^{1,2} Guo Jin¹ Shao Junfeng¹ Wang Tingfeng¹ Tang Wei¹

¹State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to reduce the thermal-deformation of the silicon mirror, a finite element method analysis system about the thermal-deformation of the mirror is established. The thermal-deformation of the mirror with different semiconductor refrigeration powers are compared, then, for the TEM₀₀ mode Gaussian beam whose radius is 1/3 of the mirror, the structure of the mirror is optimized when the absorbed power is 50 W. The optimized mirror in the TEM₀₀ mode Gaussian beam of different parameters and TEM₁₀, TEM₁₁ mode Hermite-Gaussian beam under the irradiation of the thermal deformation are analyzed. The simulation results show that when the semiconductor refrigeration power equals the power of the laser absorbed and lags behind the laser works, the deformation is largely improved and is relatively stable at last. In addition, when a circular area with thickness of 1.4 mm and inner radius of 25 mm is removed at the backside of the mirror, the peak valley (PV) value is 0.005 μm. The PV value of the thermal distortion of the optimized mirror is reduced in a certain extent under other laser radiations. For TEM₀₀ mode Gaussian beam and TEM₁₀, TEM₁₁ mode Hermite-Gaussian beam, the mirror satisfies the requirement of the optic system.

Key words laser optics; thermal-deformation; semiconductor refrigeration; mirror structure; finite element method

OCIS codes 140.6810; 120.6810; 160.6840

收稿日期: 2014-06-25; 收到修改稿日期: 2014-08-30

基金项目: 激光与物质国家重点实验室自主基础研究(SKKLIM1303)

作者简介: 聂山钧(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: shjwind@sina.cn

导师简介: 郭劲(1964—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光电对抗技术的研究和装备的研制方面的研究。

E-mail: zhaobingdragon@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

受反射镜反射率的限制,反射镜在反射过程中会吸收一定的热量而产生局部蓄热,在镜体中产生温度梯度,从而导致镜体发生热变形,致使输出激光的光束质量变差,限制了激光功率的进一步提高^[1]。国内外对如何减小镜面热变形进行了广泛的研究,主要研究方向集中在选用超低热膨胀材料^[2-7]、冷却腔镜^[4,8-22]等。铜、硅因具有良好的机械和热性能,是理想的基体材料,其中,硅因较低的热膨胀系数在高功率反射镜中获得了广泛的应用,同等条件下,硅镜的热变形仅为铜镜的1/3。常用的主动冷却技术主要有水冷、相变制冷、半导体制冷、射流式水冷等。其中水冷是当前应用最为广泛的镜体冷却技术,但同射流式水冷一样,水流压力变形限制了其冷却效率的进一步提高;相变制冷的缺陷则在于其工作的连续性;文献[23]中对半导体制冷在高功率反射镜中的应用做了初步探讨,说明了其在高功率反射镜冷却中应用的可行性,同时,可以看出,镜体结构对镜面变形有较大影响。基于此,本文通过优化镜体结构改变其结构强度及利用半导体制冷改变其温度分布,在这种双重改进下对由热膨胀和热应力产生的热变形进行补偿,从而达到保持镜体热平衡的同时减小镜面的不均匀变形。

本文采用 Ansys 有限元软件对半导体制冷功率、镜体结构参数和不同参数的辐照激光与反射镜热变形的关系进行了系统的探讨,从而确定了制冷功率和结构参数的最优值,同时给出了不同激光光束辐照下的镜面热变形。

2 理论基础

反射镜采用压圈方式加持,此时,镜面变形主要由热膨胀和镜体内部热应力所导致。在反射镜工作过程中镜体温度基本处于热平衡状态,即镜体温度梯度基本恒定,则镜面变形主要取决于镜体内部的热应力。为此,设计如图1所示的镜体结构,反射镜半径为 $R_0=50\text{ mm}$,在镜体背部切去一内径为 r_0 的环状区域,上面黄色部分为硅镜,下面红色部分为半导体制冷片冷端,材料为96%(质量分数)氧化铝的陶瓷基片,其厚度为 0.8 mm ,切去部分与陶瓷基片的总厚度为 h_0 。硅镜和陶瓷基片的总厚度 $H=6.8\text{ mm}$ 。硅与陶瓷基片的材料参数如表1所示。

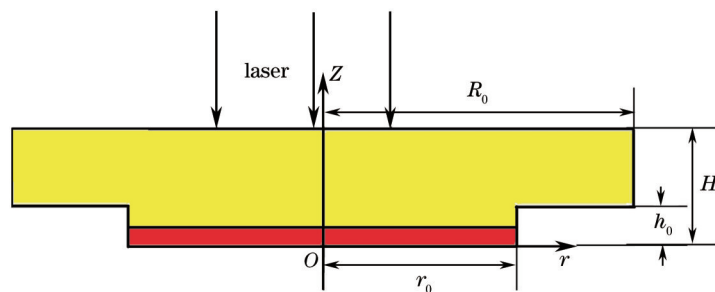


图1 全反射镜示意图

Fig.1 Schematic diagram of holophote

表1 硅和96%氧化铝陶瓷基片的物理参数

Table 1 Physical parameters of silicon and 96% Al_2O_3 ceramic wafer

Material	Density / (kg/m^3)	Specific heat / [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	Heat conductivity / [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	Poisson ratio	Heat expansion coefficient / K^{-1}	Modulus of elasticity / Pa
Si	2329	695	153	1.9×10^{-11}	0.26	2.33×10^{-6}
Al_2O_3	3700	800	286	3.4×10^{-11}	0.22	7×10^{-6}

硅镜表面与空气以自然对流换热,热对流系数为 $10\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,环境温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,由于热辐射对温度的影响极小,可忽略热辐射散热。

若不考虑镜体结构对镜面变形产生的影响,即镜体自由膨胀时,由于镜面中心温度高,因此由温度梯度产生的镜面热变形总是中心向外凸起。考虑到镜体结构,当镜体温度升高时,在 $z>h_0$ 区域,镜体在径向受到约束,而在 $z<h_0$ 区域,如图2所示,由于热胀冷缩,镜体沿径向向外膨胀,在热应力的作用下镜面在 z 方向向下

移动,从而对镜面热变形进行补偿。当获得良好的镜面变形后施加与吸收功率相同的功率即可保持镜体的热平衡。

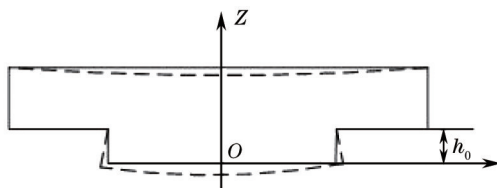


图2 背部结构对镜面变形的影响

Fig.2 Influence of back structure on the mirror surface deformation

对于半导体制冷片,设其冷端温度为 T_c ,热端温度为 T_h ,冷热端温差为 $\Delta T=T_h-T_c$,冷端从外界吸收的热量为 Q_c ,热端散热量为 Q_h ,热电偶输入功率为 N ,电路中电流为 I 。则制冷器的制冷功率应等于热端散热功率与输入的电功率之差。

制冷量 Q_c 为

$$Q_c = \alpha IT_c - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T, \quad (1)$$

式中 α 为PN型半导体材料温差电动势,并假设电导率 σ 、热导率 K 和汤姆孙系数 T 与温度无关。

由(1)式可知,当制冷器件确定时,制冷量只与冷热端温度和电流有关。当热端散热功率较大时,必须对热端进行强迫冷却,通常为风冷和水冷,此时通过控制电流的大小即可调节制冷功率,从而控制冷端的温度甚至将冷端温度控制在室温以下。目前质量优异的半导体制冷片可将冷端温度控制在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内。

3 数值模拟结果

3.1 制冷功率大小对镜体热变形的影响

取 $r_0=20\text{ mm}$, $h_0=1.3\text{ mm}$, $\omega=R_0/3$,激光为基模高斯光束,镜体吸收功率为 $P_a=50\text{ W}$ 。为分析镜面变形随制冷功率的变化趋势,假定在镜体背部分别施加 $P_s=40、50、60\text{ W}$ 散热3种情况。用Ansys有限元软件顺序耦合进行非线性瞬态热分析可以得到施加不同散热功率时镜体的温度分布,以热分析中节点温度作为载荷对镜体进行热变形分析。图3为吸收功率为 50 W 而散热功率 P_s 分别为 $40、50、60\text{ W}$ 3种不同情况时在 30 s 内光照面中心点的位移。

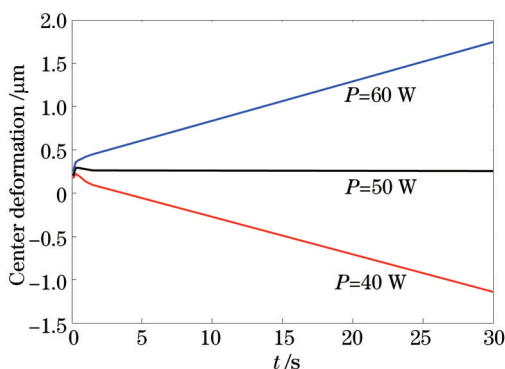


图3 施加不同制冷功率时中心点的位移

Fig.3 Displacement of the center with different refrigeration powers

如图3所示,在起始的 0.5 s 内,由于镜体内热传递进行得不充分,镜体光照面温度梯度迅速变大,而在镜体背部,该段时间内其温度变化较小,故初始阶段由镜体不均匀温升产生的热膨胀是导致镜面变形的主要因素。 1 s 后,当制冷功率确定时,虽然反射镜整体温度随着时间变化会不断升高(净吸热)或降低(净散热),但镜体的温度梯度基本不变,此时,镜面变形的变化主要由镜体内的热应力产生。当背部散热功率为 60 W 时,镜体温度不断下降,在 $z>h_0$ 区域,镜体在径向受到约束,而在 $z<h_0$ 区域,如图4所示,由于热胀冷缩,镜体背部沿径向向内收缩,在热应力的作用下,镜面沿 z 方向向上移动,因此,随着镜体净吸热量的不断增加,镜面



图4 背部结构对镜面变形的影响

Fig.4 Influence of back structure on the mirror surface deformation

不断向外凸起。

同理,由第1节可知,当制冷功率小于镜体吸热功率时,镜面将不断地向内凹陷。由 $P_c=40\text{ W}$ 时中心点的热变形曲线可知,当镜体吸收功率大于制冷功率时,存在光照面由凸起到内凹的过程,镜面整体热变形会先减小后增加。故可使镜体先吸收一定的热量,以获得较小的热变形,之后再施加 P_c 的制冷,使镜体处于热平衡状态。

3.2 反射镜结构尺寸分析

改变镜体结构会影响镜体的热膨胀,热扩散和热应力分布,从而影响镜体的热变形。以下针对 $\omega=R_0/3$ 的基模高斯光束,对切去区域内径 r_0 和厚度 h_0 进行分析,以得到一个较优的尺寸参数。

为分析切去区域内径对镜面热变形的影响,取 $h_0=1.3\text{ mm}$,分别对 r_0 为12.5、15、17.5、20、22.5、25、27.5 mm时镜面热变形的情况进行计算,镜面变形峰谷(PV)值如图5所示。可以看出,当切去环状区域内径为25 mm时,镜面热变形PV值最小。

设定切去环状区域半径 $r_0=25\text{ mm}$,进一步分析切去厚度对镜面热变形的影响。对切去厚度 h_0 分别为1.05、1.3、1.55、1.8 mm时的情况进行分析。光照面热变形的PV值如图6所示。

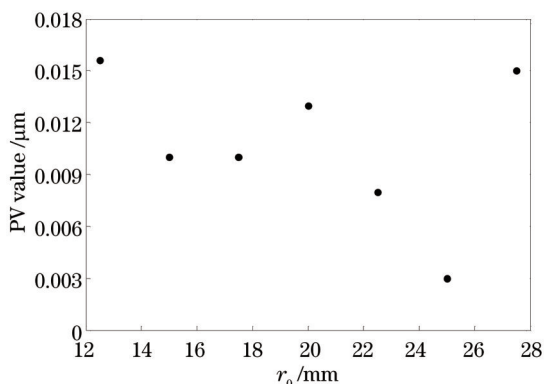


图5 切去区域内径对镜面热变形的影响

Fig.5 Influence of the mirror surface deformation with different cut off area inner diameters

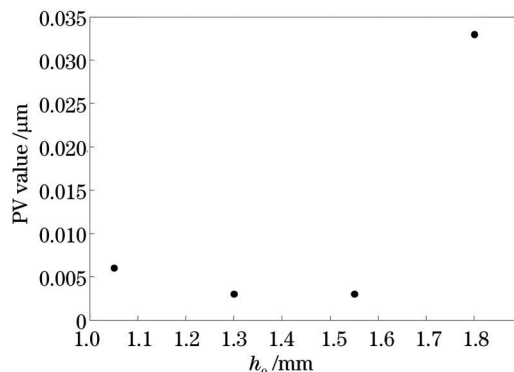


图6 切去厚度对镜面热变形的影响

Fig.6 Influence of the mirror surface deformation with different cut off thicknesses

由图6可知,当 h_0 分别为1.05、1.3、1.55 mm时,镜面热变形相差不大,当 h_0 为1.8 mm时,由于镜体结构强度变小,热应力对镜体变形影响加大,故镜面总变形较大。

综上所述,切去区域内径 $r_0=25\text{ mm}$,厚度 h_0 在1.05~1.55 mm范围内较佳。

3.3 不同参数的激光辐照下热变形分析

取切去内径 $r_0=25\text{ mm}$,厚度 $h_0=1.4\text{ mm}$,进一步对不同参数激光辐照下镜面的热变形进行分析。以下分别对 TEM_{00} 、 TEM_{10} 、 TEM_{11} 模厄米特-高斯激光辐照下当功率分别为 P_c 为30、40、50 W, ω 为 $R_0/2$ 、 $R_0/3$ 、 $R_0/4$ 、 $R_0/6$ 情况下的镜面热变形进行分析,镜面热变形如图7所示。

由图7可知,镜面变形与吸收功率近似成线性关系。随着光斑半径的增加,光斑能量密度越来越大,故同一模式和功率光束辐照下的镜面变形将随着光斑半径的减小不断增加。当光斑半径不是太小($\omega=R_0/2$ 、 $R_0/3$ 、 $R_0/4$)时,反射镜热变形对于基模高斯光束最小;当 $\omega=R_0/6$ 时,由于 TEM_{11} 模能量分布较基模更分散,其镜面变形要小于基模高斯光束。

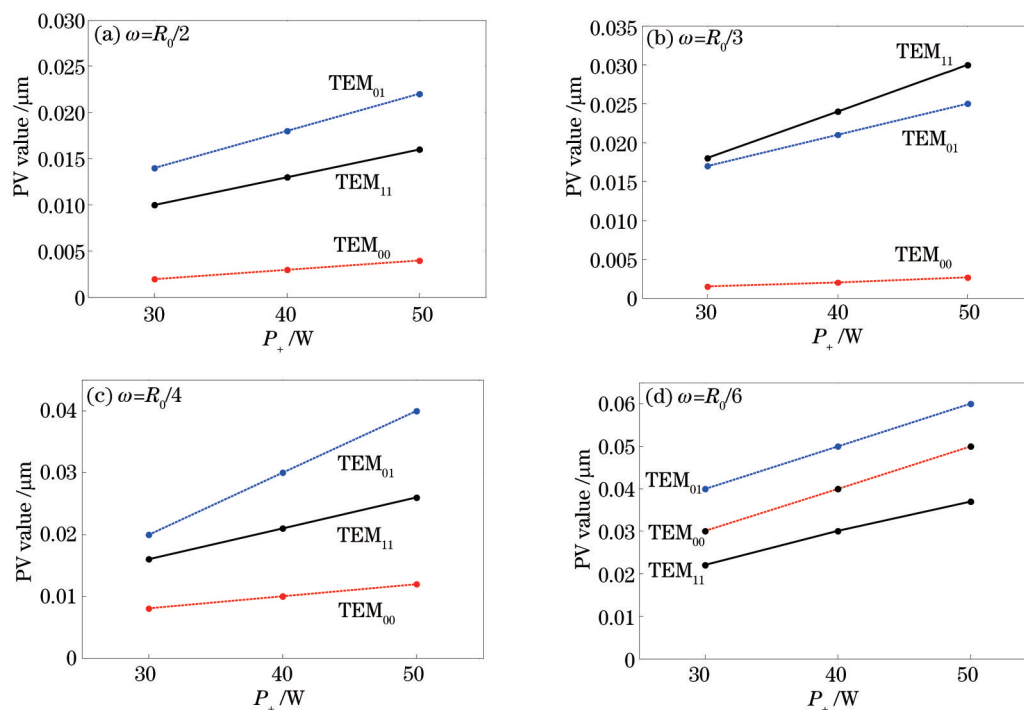


图 7 不同光束辐照下镜面热变形

Fig.7 Mirror surface deformation with different laser radiations

4 结 论

对半导体制冷在减小激光辐照下镜面热变形进行了分析,说明虽然镜体吸收一定热量后温度升高,但因镜面变形与镜体温度梯度和镜体热应力两方面有关,反而有利于降低镜面热变形。只要辐照光斑不是太小($\omega < R_0/6$),吸收功率在 50 W 内,无论对于基模高斯光束还是 TEM₀₁ 和 TEM₁₁ 模厄米特-高斯光束,该反射镜均可将镜面热变形控制在 0.06 μm 以内,约为同等条件下水冷硅镜的 1/3。

参 考 文 献

- 1 Zhou Bingkun. Principles of Laser [M]. Chengdu: National Defence Industry Press, 1987. 129-133.
周炳琨. 激光原理[M]. 成都: 国防工业出版社, 1987. 129-133.
- 2 Zhang Feng. Combined type polishing of silicon modification layer on silicon carbide mirror for space camera [J]. Chinese J Laser, 2013, 40(7): 0716001.
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): 0716001.
- 3 Zhang Yaoning, Cheng Zuhai, Ku Geng, *et al.*. A study of thermal distortion of silicon mirror [J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(8): 688-692.
张耀宁, 程祖海, 库 耕, 等. 硅镜热畸变研究[J]. 中国激光, 1997, 24(8): 688-692.
- 4 F M Anthony, A K Hopkins. Actively cooled silicon mirrors [C]. SPIE, 1981, 291: 196-203.
- 5 G L Herrit, H E Reedy. Advanced figure of merit evaluation for CO₂ laser optics using finite element analysis [C]. SPIE, 1989, 1047: 33-42.
- 5 Peng Yufeng, Cheng Zuhai. Finite element analyses of thermal distortions of mirror substrates for high power lasers [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(1): 5-8.
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.
- 6 Lu Peihua, Wang Runwen. Analysis research for thermal deformation of high power CO₂ laser mirror [J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(3): 201-204.
陆培华, 王润文. 高功率 CO₂ 激光器全反射镜热应力变形解析分析[J]. 中国激光, 2002, 29(3): 201-204.
- 7 Han Yuanyuan, Zhang Yumin, Han Jiecai. Current status of research on silicon carbide mirror technology [J]. Material Bulletin,

- 2005, 19(4): 5-8.
韩媛媛, 张宇民, 韩杰才. 碳化硅反射镜技术的研究[J]. 材料导报, 2005, 19(4): 5-8.
- 8 Zhou Leping, Tang Dawei, Du Xiaoze, *et al.*. High power laser weapons and their cooling systems [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(8): 34-38.
周乐平, 唐大伟, 杜小泽, 等. 大功率激光武器及其冷却系统[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(8): 34-38.
- 9 Chen Jiayuan, Yu Wenfeng, Cheng Zuhai. Numerical study on outside cooling mirror with heatpipe [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(5): 710-714.
陈佳元, 余文峰, 程祖海. 强激光热管冷却镜的数值研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(5): 710-714.
- 10 Peng Yufeng, Cheng Zuhai. Thermal distortion in a super-thin multilayer metal mirror with silicon substrate subjected to irradiation of high power lasers [J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(1): 21-24.
彭玉峰, 程祖海. 强激光辐照下硅基片超薄多层金属镜的热畸变[J]. 中国激光, 2002, 29(1): 21-24.
- 11 Cheng Zuhai, Zhang Yaoning. A research on thin multilayer mirrors with circular coolant channel [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1997, 9(3): 418-422.
程祖海, 张耀宁. 回流式水冷超薄多层镜的研究[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(3): 418-422.
- 12 V V Apollonov, A I Barchukov, V I Borodin, *et al.*. Possibility of using structures with open pores in construction of cooled laser mirrors [J]. Sov J Quantum Electron, 1978, 8(5): 672-673.
- 13 V V Apollonov, P I Bystrov, Y A Broval'skii, *et al.*. Feasibility of using liquid-metal heat carriers to cool power optics components made of porous structures [J]. Quantum Electronics, 1981, 11(6): 796-798.
- 14 W W Yuen, R V Fleishman. A parametric study of mesh-enhanced forced convection heat transfer for the cooling of high power density mirrors [C]. SPIE, 1989, 1047: 43-57.
- 16 Xia Jin'an, Zhang Yaoning, Cheng Zuhai, *et al.*. Experimental study on the deformation of copper mirrors in a high power laser system [J]. Chinese J Lasers, 1996, 23(7): 603-606.
夏金安, 张耀宁, 程祖海, 等. 强激光系统中铜镜微变形实验研究[J]. 中国激光, 1996, 23(7): 603-606.
- 17 J Bluege. Solid-to-liquid phase change cooled mirror arrangement: US, 5076348 [P]. 1991-12-31.
- 18 Li Bin, Jiao Luguang, Liu Liang, *et al.*. Numerical simulation of water jet cooled SIC mirror [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0202009.
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): 0202009.
- 19 Yu Wenfeng, Sun Feng, Cheng Zuhai, *et al.*. Optimum design of phase-change cooling mirrors fabrication by finite element method [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(12): 1523-1525.
余文峰, 孙峰, 程祖海, 等. 相变致冷镜的有限元结构优化[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(12): 1523-1525.
- 20 Lu Yuling. Phase Change Cooled Unstable Resonator with Coaxial Output [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
陆宇灵. 同轴输出相变制冷非稳腔[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- 21 Liu Yihong, Yu Wenfeng, Sun Feng, *et al.*. Finite element simulating about laser radiation of semiconductor-cooled composite phase change silicon mirror [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 9-11.
刘倚红, 余文峰, 孙峰, 等. 半导体致冷复合相变硅镜光照热有限元模拟[J]. 激光技术, 2005, 29(1): 9-11.
- 22 Hu Panpan, Zhu Haihong, Zuo Duluo. Influence of channel parameters on thermal-deformation of microchannel mirror [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1102001.
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.
- 23 Yu Liangying, Zhu Haihong, Cheng Zuhai, *et al.*. Analysis of the effects of mirror structure on mirror surface thermo-deformation using finite methods [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2007, 35(6): 108-110.
余亮英, 朱海红, 程祖海, 等. 强激光反射镜体结构对镜面热变形的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(6): 108-110.

栏目编辑: 张雁