

射流式碳化硅水冷镜数值模拟

李 斌 焦路光 刘 亮 李 兰 周 琼 袁圣付 刘文广

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 将射流水冷技术应用到高能激光器反射镜的冷却中,设计了射流式碳化硅水冷镜。利用通用有限元分析软件 ANSYS 的流体分析模块 FLOTTRAN,建立了流体对流换热系数和压力计算的二维模型,在验证模型可靠性的基础上计算了一定参数下的换热系数和压力分布。利用 ANSYS 中的多物理场分析模块,建立了水冷镜形变计算的三维模型,计算了相应的镜体温度和形变分布,比较了不同材料和不同类型水冷镜的性能。计算结果表明,射流式碳化硅水冷镜可以获得很小的镜面形变,同时具有结构简单、冷却均匀性好、抗压性好等优点,在高能激光器中具有较广阔的应用前景。

关键词 激光器;射流式碳化硅水冷镜;射流水冷技术;数值模拟;计算流体力学

中图分类号 TN243 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0202009

Numerical Simulation of Water Jet Cooled SiC Mirror

Li Bin Jiao Luguang Liu Liang Li Lan Zhou Qiong Yuan Shengfu Liu Wenguang

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Jet cooling technology is used in mirror cooling of high power lasers and water jet cooled mirror is designed based on this. 2D model is built and validated to calculate the convective heat transfer coefficient and pressure of liquid under certain parameters by fluid analysis module FLOTTRAN in finite element analysis software ANSYS. 3D model is built to calculate corresponding temperature and deformation distribution of the mirror by the module of multi-physics in ANSYS, and the performance comparisons of different materials and different cooling methods are made. The results show that water jet cooled SiC mirror exhibits small mirror deformation, simple structure, good cooling uniformity and good pressure characteristic, which has great prospects in the application of high power lasers.

Key words lasers; water jet cooled SiC mirror; jet cooling technology; numerical simulation; computational fluid dynamics

OCIS codes 140.0140; 140.3460; 140.1550; 230.0230; 230.4040

1 引 言

激光器热效应是影响光束质量的重要因素,主要包含增益介质热效应和反射镜的热形变,对于前者即固体激光器中的热效应,可以采用微通道对流换热、金刚石、多孔介质、喷雾等方式进行冷却^[1~3]。后者即反射镜的热形变主要采用相变制冷、半导体制冷和液冷技术实现镜体的冷却^[4],由于水具有热容量大、可循环、无污染、成本低等优点,水冷成为应用最为广泛的反射镜冷却技术。

国内外学者对多种水冷镜进行了研究。美国的 F. M. Anthony 等^[5]对多种通道结构的冷却硅镜进行了研究,指出了主动冷却硅镜的良好性能。俄罗斯专家 A. A. Belyaev 等^[6]研究了更多结构类型的水冷镜,并对多孔材料冷却镜的性能进行了深入的研究。国内 Lu Yuling 等^[7~12]对微通道沟槽结构水冷硅镜做了相关的模拟和实验研究,取得了较好的效果。然而,微通道水冷硅镜结构相对比较复杂,降低镜面形变效果有限,不能满足更短波长高能激

收稿日期: 2010-07-08; 收到修改稿日期: 2010-08-27

作者简介: 李 斌(1985—),男,硕士研究生,主要从事高能激光器反射镜冷却方面的研究。E-mail: libin080106@163.com

导师简介: 袁圣付(1974—),男,博士,副教授,主要从事高能化学激光器方面的研究。E-mail: shengfuyuan_bb@163.com

光器的需求。用于有较大压力差的高能化学激光器时,形变将进一步增加,加之硅材料质地硬脆、微通道加工难度大、难以加工成大口径反射镜、水流侧向注入方式导致的出入口压差和冷却的不均匀性难以得到有效克服,这些因素都限制了沟槽结构水冷硅镜的普遍应用。

冲击射流在冲击面上形成极薄的速度边界层与热边界层,在获得很好的对流换热效果的同时可以保证良好的冷却均匀性,已广泛应用于涡轮机叶片冷却、微电子芯片散热等领域。A. A. Belyaev等^[6]提出了射流水冷在反射镜冷却中的应用并做了一定的实验探索,其结果表明,射流式水冷镜结构简单并可以获得接近于其他类型最好水平的冷却性能。

本文设计了射流式水冷镜,分析了其中冷却流体和镜体的相互作用,对物理过程做了简化分析,运用 ANSYS 有限元软件对孔内流体的流动和镜体的形变进行研究,得到了可靠的数值模拟方法。碳化硅材料具有刚度大、热变形系数小、尺寸稳定性好、易进行光学加工、易镀膜等优势,已经在各种光学反射镜领域得到了广泛的应用^[13,14],本文采用碳化硅作为水冷镜基体材料。

2 射流式水冷镜结构设计

自然界中,蜂巢的孔式结构使其以很轻的重量保证了结构的稳定性以及温度、湿度的均匀性。

图 1 是射流式水冷镜基体示意图。图 2 是包含射流喷管及进出水结构的剖面示意图,水流从进水通道 a 进入喷管 b,经喷管以较大速度冲击水冷镜基体 c 的冷却孔孔底,沿孔侧面继续对镜体进行冷却后,从出水孔 d 排出。各孔入口处水温及压力一致并可实现流速控制,使镜面的形变均匀性得到较大的改善。



图 1 射流式水冷镜基体示意图

Fig. 1 Diagram of water jet cooled mirror

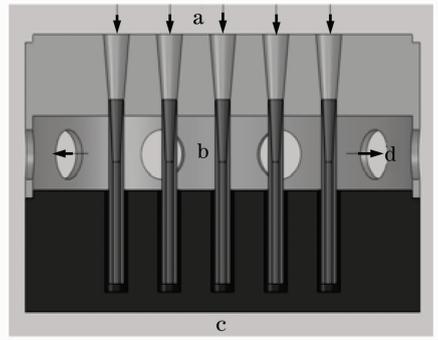


图 2 包含射流喷管及进出水结构的剖面示意图
Fig. 2 Diagram of section contains jet nozzles with water in and out structures

3 数值计算的模型和方法

射流式水冷镜中,在一定结构下,水流的换热性能和流场的压力决定了镜体的形变,由于冷却孔数量较多,如果建立包含流体和固体的三维模型进行数值模拟,巨大的网格要求和复杂的边界条件将使问题变得非常复杂。实际水冷镜中镜体的形变一般为微米级,孔径的尺寸则是毫米级,因此镜体形变对孔结构的影响可以忽略。考虑到每个孔内流体的流动状态基本一致,首先对单个孔的情况进行研究。

图 3 是单孔射流示意图,由对称性仅取孔截面的一半进行二维数值计算,借鉴文献^[15]中的数值模拟方法,建立图 4 所示的单孔射流模型,图中 AN 为孔中心对称轴,ABCDEF 为固体区域,其余为水流区域,AB 为水流冲击的孔底面,EF 为镜面,KLMN 所围区域为进水水箱,KJ 处为喷管区域。

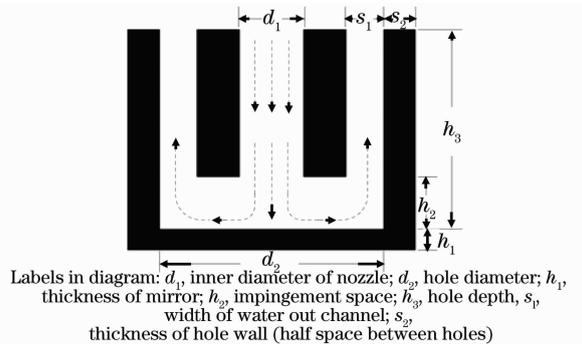


图 3 单个孔内射流示意图

Fig. 3 Diagram of jet in a single hole

有限元方法的思想是将求解区域离散化,通过基本的物理控制方程和给定的边界条件,求解各个节点的方程,最终得到整个区域的数值解。FLOTAN 中提供的 FLUID141 单元,可用于求解包含流体和固体区域的耦合热传导问题。

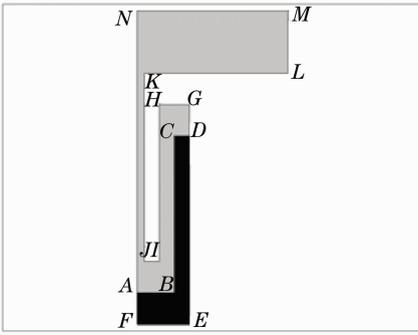


图 4 单个孔内射流模型

Fig. 4 Model of jet in a single hole

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = K \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right], \quad (4)$$

(1)~(4)式是不可压缩流体在柱坐标系下的流场基本控制方程(由模型对称性知与 Φ 无关,方程中忽略了重力和粘性耗散),(1)式是连续性方程,(2),(3)式是动量方程,(4)式是能量方程即温度方程, v_r 和 v_z 分别为径向速度和轴向速度, ρ 是密度, μ 是动力粘滞系数, p , c_p , K 和 T 依次为压力、定压热容、导热系数和温度。本问题中,温度变化不大,在此范围内忽略水的物性随温度的变化,因此可首先求解流场,此时求解连续性方程以及动量方程,方程收敛,固体区域节点速度为零,不影响流场的求解,流场求解完成以后在整个区域内求解能量即温度方程。求解时根据流场的实际情况,应用了湍流模型,以反映出湍流对流场速度和换热性能的影响。常用的湍流模型主要有 $k-\epsilon$ 和 $k-\omega$ 两种,SST $k-\omega$ 即剪切输运滞流模型是 $k-\omega$ 的改进,具有两种模型的优点,其中 k 为湍动能, ϵ 为耗散率, ω 为比耗散率。由于湍流方程比较复杂,此处不再详细给出。

在图 4 中, AN 施加对称约束, MN 为流体入口,施加入口速度边界,其速度使得喷口处平均速度满足所需要求,包含进水水箱是为了使喷管内流场符合实际,而非速度均匀分布。 DG 为流体出口,施

加压力边界,其值为一个大气压,其他流体边界为无滑移边界条件, EF 即镜面施加热通量边界。靠近壁面处的网格进行加密处理,以更好地捕捉近壁面巨大流场梯度的影响,单元节点数达到了 10 万左右。采用 SST $k-\omega$ 模型,可以兼有 $k-\epsilon$ 和 $k-\omega$ 两种湍流模型的优点,既适合于高湍流区,也适合于近壁面区,对本结构非常适用。

水流的换热性能和流场压力决定了镜体的形变,上述耦合热传导问题的求解,最终是为了求得流固交界面的对流换热系数和压力分布。对流换热系数为

$$h = \frac{q}{T_w - T_j}, \quad (5)$$

式中对流换热系数 h 表征了流体换热性能的大小,由流场性质决定, q 表示节点热通量, T_w 表示壁面节点温度, T_j 为自由流温度或流体平均温度, T_j 的值仅影响 h 的数值大小,而不影响传热的物理过程,在进行固体分析施加边界换热系数时, T_j 表示冷却水温度,二者须保持一致,此处设定为喷口流体温度 293 K。

图 5 是射流式水冷镜镜体有限元模型,镜体直径 80 mm,镜面的厚度 2 mm,光斑均匀分布,其直径为 25 mm,镜面净吸收功率 100 W,镜体背面加工 62 个孔,孔的直径 4 mm,深度 10 mm,间距 1 mm,冷却水的水温为 293 K,镜体的初始温度和环境温度均为 293 K,镜子侧面边界固定,忽略镜体与周围气体的对流换热,碳化硅材料物性参数如表 1 所示^[6,8,9]。采用 SOLID98 单元进行计算,将前面计算得到的换热系数和压力分布,加载到有限元模型的各个孔内,计算出稳态情况下镜体的温度和形变分布。直角坐标下温度场的控制方程为

$$K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (6)$$

热应力求解的控制方程为经典的热弹性方程,此处不再给出。

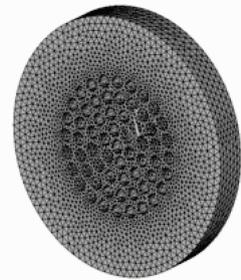


图 5 镜体有限元模型

Fig. 5 Finite element model of mirror

表 1 材料的物性参数
Table 1 Physical properties of materials

Material	Density / (kg /m ³)	Specific heat / [J / (kg·K)]	Thermal conductivity / [W / (m·K)]	Linear expansion coefficient / (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	E modulus / GPa	Poisson ratio
Cu	8940	385	395	16.70	117	0.33
Si	2329	697	153	2.33	190	0.26
SiC	2950	670	172	2.10	364	0.14

4 结果与分析

4.1 换热系数和压力的变化

前述耦合热传导问题求解至各项参数均不再随时间变化,得到稳定的流场速度分布和温度分布,并对计算结果做了网格无关性检验。

图 6 是计算所得到的孔内流场速度图(做了镜像对称,使流场更直观),速度分布规律与文献[16]中吻合较好,喷口中心速度最大,冲击孔底后在壁面处形成很薄的速度边界层,从而获得很高的对流换热系数。为验证本文计算方法的可靠性,仿真了文献[15]中的单孔射流实验,图7是喷口直径为

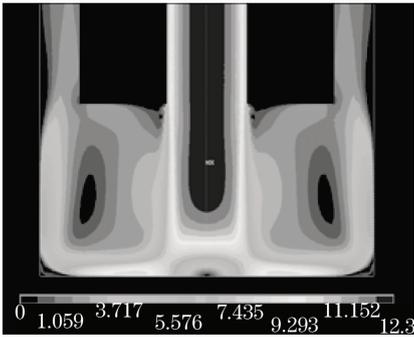


图 6 孔内流场速度图

Fig. 6 Contour of velocity in hole

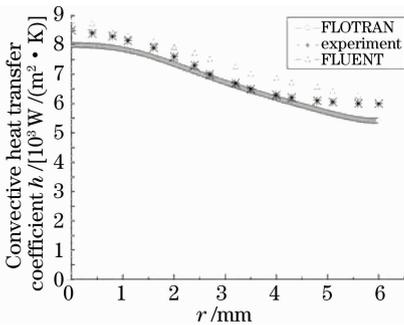


图 7 喷口直径 3.18 mm 时冲击面换热系数实验值和模拟值的对比

Fig. 7 Comparison of convective heat transfer coefficient between experiment, FLOTRAN and FLUENT for $d=3.18$ mm

3.18 mm,冲击距离为 12.72 mm,喷口平均流速为 3.27 m/s(流体为 FC-77,一种常用于电子器件冷却的氟化物)时冲击面换热系数实验值和模拟值的对比。文献[15]中给出的实验值与本文 FLOTRAN 程序的计算值吻合得很好,文献中 FLUENT 得到的最佳计算值也与实验值吻合较好,这证明本文的计算方法是比较可靠的。

图 8 是在喷管直径 $d_1=1$ mm,冷却孔直径 $d_2=4$ mm,镜面厚度 $h_1=5$ mm,冲击距离 $h_2=2$ mm,孔的深度 $h_3=10$ mm,水流出宽度 $s_1=0.5$ mm,孔壁厚 $s_2=0.5$ mm,喷口水流平均速度为 10.06 m/s,镜面施加 25 W/cm² 热通量时冲击面换热系数的径向分布曲线,其平均值与文献[6]中的实验平均值基本一致。由图可知,在冲击面中心,壁面受到直接冲击,换热系数很大,在 0.5 mm 附近,流体速度从垂直于壁面向平行于壁面急剧转折,形成最好的冷却效果,换热系数出现一个峰值;在 1.5 mm 后因转角处流场分层且速度下降,换热系数急剧下降并出现如图所示的波动。图 9 是相应的压力分布曲线,压力分布也有类似的规律。

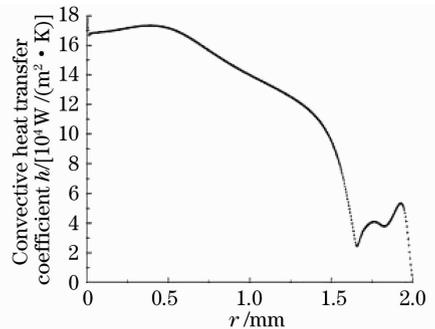


图 8 冲击面换热系数径向分布

Fig. 8 Distribution of convective heat transfer coefficient along radial distance in impingement area

图 10,11 是在以上参数条件下冷却孔侧面的换热系数和压力的分布曲线。由图 10 可知,在孔底转角处,换热系数很小,在水流首先冲击的侧面区域内,可以获得较大的对流换热系数,换热系数随后减

小,在出现一个小峰值后趋于一个稳定值,换热系数的分布与流场的特征相吻合。图 11 所示的压力分布也有类似的规律。

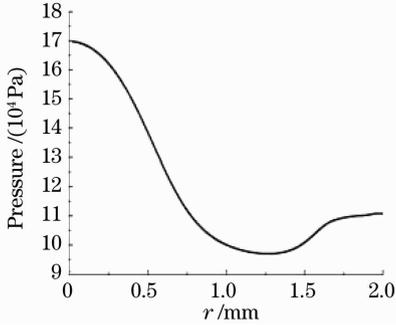


图 9 冲击面压力径向分布

Fig. 9 Distribution of pressure along radial distance in impingement area

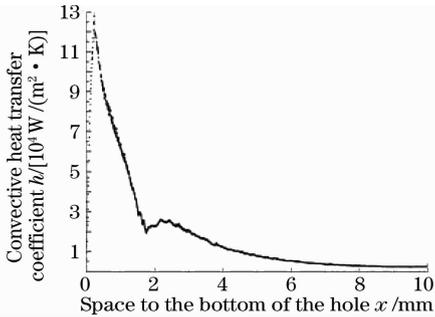


图 10 孔侧面换热系数分布

Fig. 10 Distribution of convective heat transfer coefficient along hole side

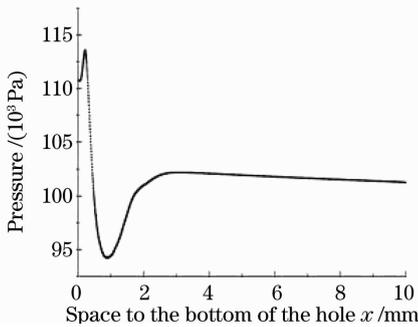


图 11 孔侧面压力分布

Fig. 11 Distribution of pressure along hole side

4.2 镜体温度和形变的变化

在流体工况一定时,流场仅由结构决定,换热系数和压力仅由流场决定,它们的值并不随加载热通量数值和分布的变化而变化,大量的计算也证明了这个结论。在微通道沟槽结构冷却中,文献[7~11,17]中各沟槽都取了同样的换热系数,其数值模拟的结果与实验值均符合较好。综上所述,将前面得到的换热系数和压力加载到镜体模型上,计算镜体的形变。

本方法的可靠性通过重复文献[8]中沟槽结构三维镜体模型形变的计算得到验证,计算结果一致,此处不再给出。

图 12,13 是计算所得到的镜体温度和形变分布云图。由图 12 可知,镜面温度升高的区域集中在中心处,与光斑区域基本一致,最大温升为 4.652 K,其他区域温升很低,这说明 62 个冷却孔已经能很好地带走镜面吸收的热量。由图 13 可以看出,镜面中心形变最大,为 $0.0908 \mu\text{m}$,整个镜面都有一定的形变,冷却均匀性较好,光斑所在区域变形峰谷值仅为 $0.03 \mu\text{m}$,形变控制已经相当理想。

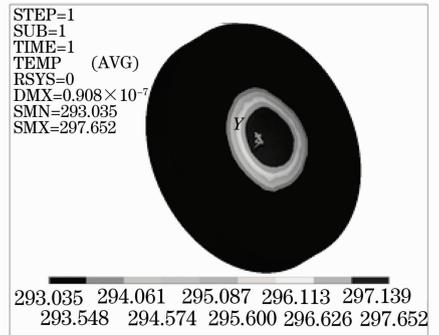


图 12 镜体温度分布云图

Fig. 12 Temperature contour of mirror

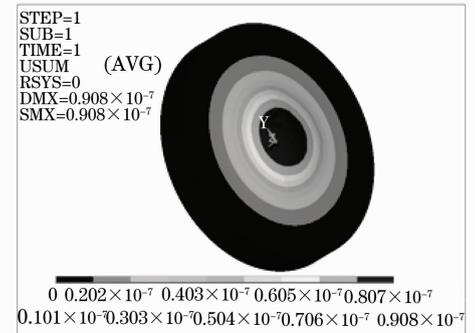


图 13 镜体形变分布云图

Fig. 13 Deformation contour of mirror

表 2 是使用不同材料时的镜面最大形变,其中各材料的物性参数如表 1 所示。由表 2 可以看出,使用硅作为镜体材料时最大形变为 $0.122 \mu\text{m}$,其性能大大优于铜,这与文献[12]的结论是一致的。同时,使用碳化硅可以得到比硅更小的镜面形变。将射流式水冷镜应用于具有低腔压的化学激光器时,镜体两面的压力差将使镜面产生更大的形变,硅镜的形变为 $0.380 \mu\text{m}$,相对增加了 $0.258 \mu\text{m}$,而碳化硅镜形变仅为 $0.226 \mu\text{m}$,相对增加了 $0.135 \mu\text{m}$,证明碳化硅材料具有更好的抗压性,可以获得更小的镜面形变。

表 2 不同材料时的镜面最大形变

Table 2 Variation in maximum surface deformation of mirror with material of mirror

Material	Maximum surface deformation of mirror / μm	
	Surface pressure of mirror: 101.3 kPa	Surface pressure of mirror: 1 kPa(chemical laser)
Cu	0.599	1.000
Si	0.122	0.380
SiC	0.0908	0.226

4.3 不同水冷形式的影响

如表 3 所示,在镜体直径为 80 mm,镜面净吸收功率为 100 W,光斑直径为 25 mm,使用硅作为镜体材料等相同情况下,对当前研究的几种水冷镜性能做了对比。由表可知,对于多层微通道水冷硅镜,采用螺旋形沟槽方式比直线型可以获得更小的镜面形变,通过改进沟槽结构降低了镜面形变,但效果有限,而使用射流水冷方式,镜面形变为 0.122 μm ,仅为螺旋形沟槽的 70%,镜面形变得到了更好的控制,并且具有很大的优化空间。

表 3 不同类型水冷硅镜的形变对比

Table 3 Deformation comparison of different water cooled Si mirrors

Type of water cooled mirrors	Maximum surface deformation of mirror / μm
Linear microchannel ^[8]	0.217
Spiral microchannel ^[7,11]	0.174
Jet cooled	0.122

5 结 论

分析了射流式水冷镜中冷却流体和镜体的相互作用,运用 ANSYS 有限元软件对孔内流体的流动进行了研究,孔底换热系数可达 $10^5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 以上。计算了一定参数下射流式水冷镜的温度和形变分布,结果表明射流式碳化硅水冷镜可以获得很好的镜面形变量:在镜体直径 80 mm,镜面净吸收功率 100 W,光斑直径 25 mm 的情况下,镜面最大形变低于 0.1 μm ,优于沟槽结构的水冷镜。对于射流式碳化硅水冷镜的研究,这里仅仅做了一个初步的探索,下一步将对影响镜面形变的各项参数进行分析和优化。

参 考 文 献

1 Tian Changqing, Xu Hongbo, Cao Hongzhang *et al.*. Cooling technology for high-power solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1686~1692
田长青,徐洪波,曹宏章等.高功率固体激光器冷却技术[J].*中国激光*,2009,**36**(7):1686~1692

2 Liu Dong, Liu Minghou, Wang Yaqing *et al.*. Experimental studies on large height/width ratio and mini-channel radiator for high power density laser cooling[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 640~645
刘东,刘明侯,王亚青等.大高宽比小槽道冷却大功率激光器的实验研究[J].*中国激光*,2010,**37**(3):640~645

3 Wang Yaqing, Liu Minghou, Liu Dong *et al.*. Experiment study on non-boiling heat transfer performance in spray cooling for high power laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1973~1978
王亚青,刘明侯,刘东等.大功率激光器喷雾冷却中无沸腾区换热性能实验研究[J].*中国激光*,2009,**36**(8):1973~1978

4 Ma Menglin, Guo Jin, Zhang Laiming *et al.*. Study on the control of micro-deformation of resonator mirrors and windows in high power laser[J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, **14**(1): 81~84
马梦林,郭劲,张来明等.控制高功率激光器腔镜与窗口微变形技术的探讨[J].*光电与控制*,2007,**14**(1):81~84

5 F. M. Anthony, A. K. Hopkins. Actively cooled silicon mirrors [C]. *SPIE*, 1981, **297**: 196~203

6 A. A. Belyaev, A. L. Zhevnikov. Optics of High-Power Lasers [M]. Baltic: Press of Baltic State Technical University, 2005. 36~95

7 Yuling Lu, Zuhai Cheng, Yaoning Zhang *et al.*. Investigations and experiments of a new multi-layer complex liquid-cooled mirror [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(7): 407~410

8 Liu Yihong. Design and Investigation of the Multilayer Water-cooling Si Mirror[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005, 17~28
刘倚红.多层水冷硅镜的设计和研制[D].武汉:华中科技大学,2005,17~28

9 Zhu Haihong, Cheng Zuhai, Yu Liangying *et al.*. Structure optimization design of water-cooled copper mirror with micro-channel [J]. *Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2007, **35**(4): 72~74
朱海红,程祖海,余亮英等.超薄微通道水冷铜镜的结构优化设计[J].*华中科技大学学报(自然科学版)*2007,**35**(4):72~74

10 Yu Liangying, Cheng Zuhai, Zhu Haihong *et al.*. Channel parameter analysis of water-cooled silicon mirror for high-energy laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(3): 353~356
余亮英,程祖海,朱海红等.强激光作用下水冷硅镜沟槽参数的模拟分析[J].*强激光与粒子束*,2007,**19**(3):353~356

11 Yu Wenfeng, Cheng Zuhai, Sun Feng *et al.*. Investigation of the multilayer water-cooling Si mirror used in high power laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(s1): 489~491
余文峰,程祖海,孙峰等.高功率多层水冷硅基反射镜的研究[J].*中国激光*,2004,**31**(s1):489~491

12 Peng Yufeng, Cheng Zuhai. Finite element analysis of thermal distortions of mirror substrates for high power lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(1): 5~7
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):5~7

13 Han Yuanyuan, Zhang Yumin, Han Jiecai *et al.*. Development of the silicon carbide mirror and system in the world [J]. *J. Materials Engineering*, 2005, (6): 59~60
韩媛媛,张宇民,韩杰才等.国内外碳化硅反射镜及系统研究进展[J].*材料工程*,2005,(6):59~60

14 Gao Jinsong, Shen Zhenfeng, Wang Xiaoyi *et al.*. Research on surface modification of space used SiC mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2624~2629
高劲松,申振峰,王笑夷等.空间反射镜基底材料碳化硅表面改性研究[J].*光学学报*,2009,**29**(9):2624~2629

15 G. K. Morris, S. V. Garimella, R. S. Amano. Prediction of jet impingement heat transfer using a hybrid wall treatment with different turbulent Prandtl number functions [J]. *Journal of*

Heat Transfer, 1996, **118**(3): 562~568

16 S. V. J. Narumanchi, V. Hassani, D. Bharathan. Modeling single-phase and boiling liquid jet impingement cooling in power electronics[R]. Technical Report of National Renewable Energy Laboratory, 2005. 1~17

17 Wang Jianlei, Li Lei, Shi Xiangchun *et al.*. Modeling and optimization of cooling system for high power slab laser amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1553~1559

王建磊, 李 磊, 施翔春等. 高功率板条放大器冷却系统模拟及优化设计[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1553~1559