

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0489-03

# 高功率多层水冷硅基反射镜的研究

余文峰, 程祖海, 孙峰, 周次明, 张耀宁

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 设计了三分支、螺旋形流道的硅基水冷镜结构, 并利用 ANSYS 程序对流速 1.6 m/s, 水静压  $1.5 \times 10^5$  Pa 时的水冷硅镜尺寸进行了优化设计, 并模拟了该尺寸下的热变形情况。实验证明, 对于直径 80 mm 的硅镜, 在净吸收热量 100 W 时, 最大热变形为 0.186  $\mu\text{m}$ , 并可长时间维持该数值不变。光照停止, 继续通水冷却时, 在 0.75 s 内, 镜面变形量恢复了 0.063  $\mu\text{m}$ ; 10.5 s 时, 镜面变形量为 0.038  $\mu\text{m}$ 。结合上述二点, 多层水冷硅基反射镜可在高功率激光中得到应用, 可满足激光武器的快速连发要求。

**关键词** 高功率激光器; 热变形; 压力变形; 水冷硅镜

中图分类号 TN243

文献标识码 A

## Investigation of the Multilayer Water-Cooling Si Mirror Used in High Power Laser

YU Wen-feng, CHENG Zu-hai, SUN Feng, ZHOU Ci-ming, ZHANG Yao-ning

(State key Lab of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** A three branch multilayer water cooled Si mirror is designed, which has a spirality shape. The characteristics of multilayer composite water-cooled Si mirror are simulated by ANSYS program and studied by experiments. When the flow rate is 1.6 m/s, the water pressure is  $1.5 \times 10^5$  Pa, the net absorbed heat is 100 W, the diameter is 80 mm, the largest deform is 0.186  $\mu\text{m}$ . The features of cooling process without heating caused by laser radiation is that the decreasing deform is 0.063  $\mu\text{m}$  in 0.75 s and the deform is 0.038  $\mu\text{m}$  in 10.5 s. The multilayer water-cooled mirror performs well and can be used in high power laser.

**Key words** high power laser; heat deform; pressure deform; water-cooling Si mirror

### 1 引言

水冷镜始终是控制腔镜镜面面形最有效的方案之一。近 30 年来, 美国的联合技术公司一直为美国空军 ABL 计划和海军 MIRACL 计划提供冷却镜, 采用的镜片基底材料主要为钼金属, 并设计了许多不同的冷却结构<sup>[1,2]</sup>。

水冷镜基底材料因受激光束辐照升温产生热变形, 同时将热量传导给冷却水以将热量带走, 因此, 选择何种基底材料就成为激光水冷却镜的设计首选工作。同时考虑材料的热传导系数、热弹性膨胀系数、刚度参量及光学加工性能, 以达到镜面变形及最小吸收系数为目的, 对硅、钨、钼、铜、碳化硅、铍、铝、镍等材料进行综合筛选后<sup>[3]</sup>, 首选铜和硅两种材料开展工作, 铜的最显著优点是热传导系数高, 在采用超薄水冷多层铜镜技术后, 可有效地抑制镜面的热变形, 但铜的光学加工性能较硅差, 采用低温镀膜工艺

附着一层硅后, 表面面形和弱吸收系数较硅差。因此在铜基水冷多层镜的基础上开展具有热膨胀系数小、导热率高和加工面形好等特点, 选择硅作为镜体基底材料是解决强激光辐照下热变形的有效途径。因此提出采用硅作为基底材料的硅基水冷镜方案。

### 2 多层复合硅基水冷镜的结构设计

水冷镜的设计包括流道结构形式和尺寸、进出水口及其分支和水流压力及流量等等方面的设计。一般情况下, 激光辐照导致的面形热畸变要大于水流压力及其脉动产生的压力畸变, 通常一个高效的水冷镜应该能把面形畸变降低到 0.05  $\mu\text{m}$  (变形峰谷值)、面形倾斜角减少到 100  $\mu\text{rad}$ <sup>[4]</sup>。

图 1 中设计的多层复合硅基水冷镜可分为受光层、硅基底、进水小孔层、导流层和密封层, 硅片直径 80 mm, 三条流道为阿基米德线型螺旋形沟槽, 长度

基金项目: 国家自然科学基金(69878008)资助项目。

作者简介: 余文峰(1970-), 男, 华中科技大学副教授, 主要从事气体激光器及光学元器件研究。E-mail: gdlaser@hotmail.com

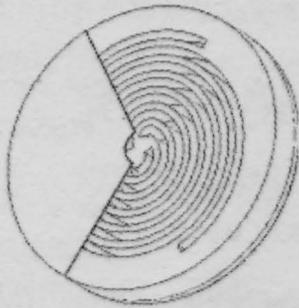


图1 多层硅基水冷镜外形图

Fig.1 Figuration of water cooling mirror

相等,相互间距为 2 mm,三入口分支位于中心并呈 120°对称排列,三出口分支位于外围,也呈 120°排列,层与层间通过焊接联结成一体。

采用的螺旋形流道不同于平行直线型的流道,平行直线型的流道与螺旋形流道相比不足之处在于:1)上游流体的温度比下游低,沿直线流道膨胀不均匀,易形成镜面倾斜;而螺旋形流道为阿基米德线型分布,对于圆镜,沿径向温度分布更均匀。2)直线型流道在拐弯处压降损失大,且压力波动明显;而螺旋形流道为平滑过渡,压降损失小。

### 3 ANSYS 优化设计

采用 ANSYS 模型对图 3 中的水冷镜进行优化设计,入口处水温为 20℃,空气温度为 20℃,流速为 1.6 m/s,与硅基底的对流换热系数为 9000 W/m<sup>2</sup>K,水压的表压力为 1.5×10<sup>5</sup> Pa,镜面净吸收功率为 100 W,镜体与周围气体不存在对流换热。镜体边缘约束位移为零。经过优化设计,得到当流量为

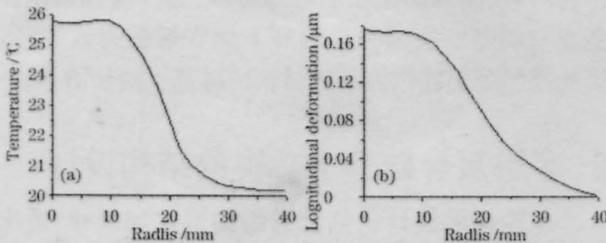


图2 第 5 s 时镜面的温度和变形分布

Fig.2 Temperature and deform distribution at 5th second

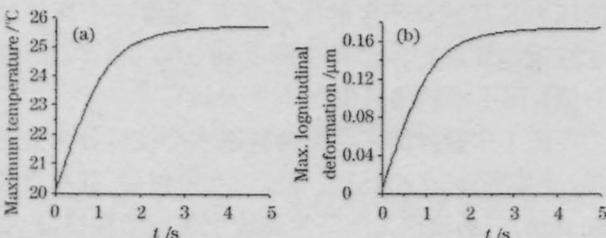


图3 (a) 最高温度时间变化曲线; (b) 最大变形时间变化曲线

Fig.3 (a) Highest temperature curve; (b) Largest deform curve

80 mL/s,表压为 1.5×10<sup>5</sup> Pa 时的螺旋形水冷硅镜结构方案,其流道深度为 10.2 mm,流道宽度为 2.5 mm。

图 2 至图 4 是相应的 ANSYS 模拟结果。

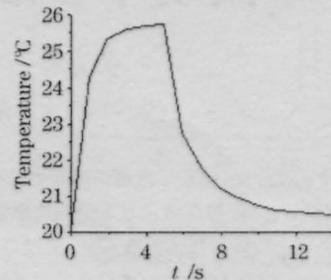


图4 水冷硅镜冷却曲线

Fig.4 Cooling curve of mirror

### 4 实验研究

采用图 5 中所述的热变形测试系统对水冷硅镜进行了水压、热变形和冷却实验。高功率激光入射到被测物镜上产生热变形,镜片表面由泰曼-格林干涉仪产生干涉条纹,干涉条纹经 CCD 转换经图像采集卡送到计算机中进行处理,即可得镜片表面上的各种参量,包括镜片表面曲率半径、变形大小等。

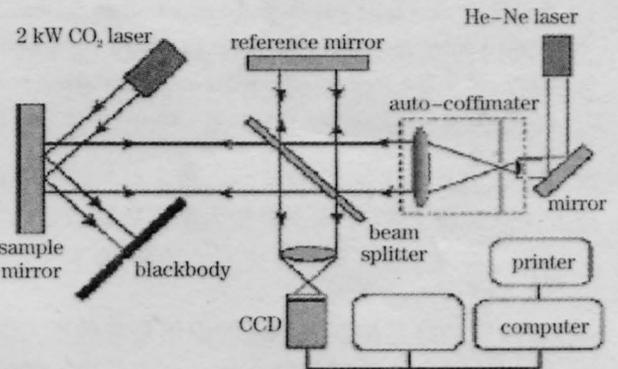


图5 镜面热变形的实验测试系统示意图

Fig.5 Lab system of heat deform measure

#### 4.1 水压试验

以自来水为冷却介质,通过调节阀门控制冷却水的静压和流量,得到了水冷硅镜在不同静压下的镜面面型干涉图(图 6)和变形峰谷值(见表 1)。从中可见,在通常压力范围(表压小于或等于 2 个大气压)时,超薄多层镜结构对冷却水静压的波动不敏感。

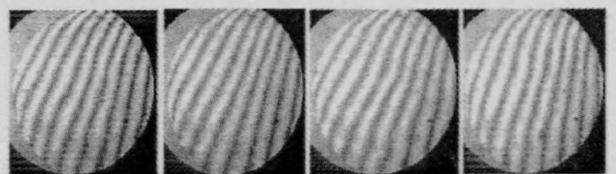


图6 不同冷却水静压上的镜面干涉图

Fig.6 Interference pattern of different water pressure

表 1 不同冷却水静压下的镜面变形峰谷值

Table 1 Peak-valley value of mirror's deformation under different pressure

The pressure of water	0.5	1.0	1.4
P-V value of deformation / $\mu\text{m}$	0.017	-0.026	0.024

#### 4.2 热变形试验

当冷却水流流量为 80 mL/s, 静压为 0.125 MPa 时, 冷却水的温度为 23 $^{\circ}\text{C}$ , 空气温度为 26 $^{\circ}\text{C}$ , 水冷硅镜净吸收 100 W 热量的镜面干涉条纹图形如图 7 所示。图 8 为测得的水冷硅镜变形峰谷值时间变化曲线, 并与计算结果做了对比。夹持方式为压板法。在激光辐照前 0.75 s 内, 水冷硅镜的变形增加较快, 第 0.75 s 时为 0.117  $\mu\text{m}$ ; 随后速度减慢, 到第 3 s 时变形峰谷值为 0.187  $\mu\text{m}$ 。3 s 后, 由于冷却水带走大量热量, 温度和变形就达到稳态, 曲线变化平缓, 第 5.25 s 时的变形量为 0.186  $\mu\text{m}$ 。计算结果偏小于实验结果的原因在于: 计算时采用的热源为光强均匀分布的光斑, 而在实验时光斑光强分布并不均匀, 局部的高功率密度导致镜面的局部升温 and 增大变形。

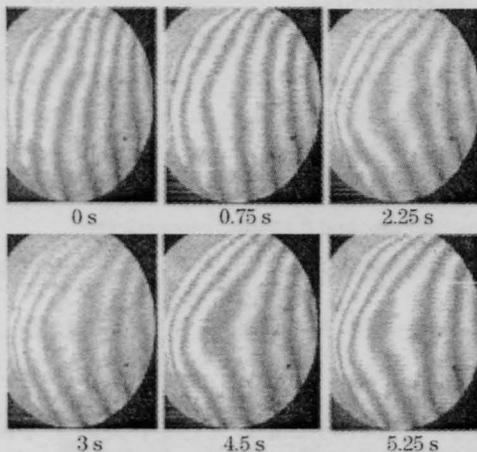


图 7 水冷硅镜的干涉图

Fig.7 Interference pattern of mirror

#### 4.3 镜面恢复试验

光闸在开启 5.25 s 后关闭, 镜面继续通水冷

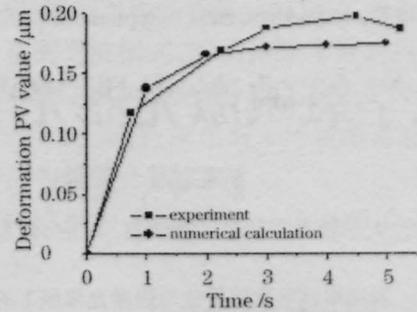


图 8 水冷硅镜变形时间变化曲线

Fig.8 Deform curve of mirror with time change

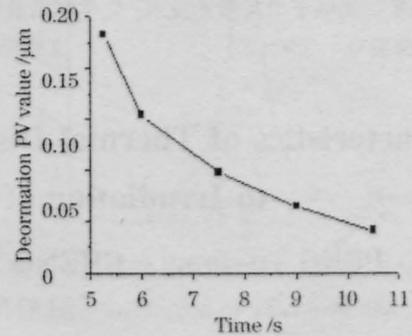


图 9 水冷硅镜冷却过程变形变化曲线

Fig.9 Deform curve under water cooling

却, 此时镜面变形峰谷值随时间的变化曲线如图 9。在 0.75 s 内, 镜面变形量恢复了 0.063  $\mu\text{m}$ ; 10.5 s 时, 镜面变形量为 0.038  $\mu\text{m}$ 。实验表明, 水冷硅镜镜面恢复速率快, 这对高能激光系统的快速连发要求具有重大意义。

#### 参 考 文 献

- 1 F. M. Anthony, A. K. Hopkuis. Actively cooled silicon mirrors[C]. *SPIE*, 1981, 297: 196-203
- 2 Cheng Zuhai, Zhang Yaoning et al.. The investigation of multi-layer super thin water cooling mirror [J]. *High Power Laser and Particle*, 1997, 9(3):418-422  
程祖海, 张耀宁等. 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
- 3 H. A. Bender, W. T. Silfvast, K. M. Beck et al.. Investigation of distortion and damage of molybdenum-silicon multiplayer reflective coatings with high-intensity ultraviolet radiation [J]. *Appl. Opt.*, 1993, 32 (4): 6999-7006