

高功率激光反射镜变形的半导体致冷补偿的研究

库 耕 程祖海 张耀宁 朱松林

(华中理工大学激光技术国家重点实验室 武汉 430074)

提要 激光谐振腔中的反射镜在激光作用下其镜面产生变形,使反射镜面偏离原设计要求。实验表明,半导体致冷铜镜和硅镜可以很好地补偿激光热变形,使反射镜在承受激光功率的时候,其镜面面型保持不变。此外,半导体致冷镜还有无压力变形、致冷量可控、致冷均匀等优点。

关键词 镜面变形,半导体致冷,镜面补偿

1 引 言

高功率激光器中激光谐振腔反射镜承受很高的功率密度,虽然现在的镀膜技术使镜面反射率很高,但在实际使用中,谐振腔中的反射镜所吸收的激光功率仍然可以使腔镜产生微小的变形。这种变形会使腔镜镜面偏离原设计的面型,对光束质量产生严重的后果。高亮度的激光器对谐振腔反射镜面型有严格的要求,其中之一是镜面局部面型的畸变应小于 $1/4$ 波长^[1]。数值模拟计算表明,激光腔镜热变形应小于 $1/10$ 波长,否则激光器将无法产生严格的基模振荡。对于高功率激光器中较复杂的激光谐振腔如多折腔,腔镜变形对激光振荡模式的影响将更为严重。由于万瓦级高功率激光器及谐振腔结构的限制,直接测量谐振腔反射镜在工作状态下的镜面变形比较困难,考虑一般情况下激光器近场光强分布与腔内一致,为了解激光器中反射镜的镜面变形情况,我们建立了一套用于定量地测试激光照射下反射镜镜面变形的实验装置,利用该装置也尝试用各种方法消除激光热变形,观测不同补偿方法对镜面变形的补偿效果。

2 实验装置

镜面变形测量装置由一台泰曼-格林干涉仪及配套的图像采集、数据处理系统组成,其光路如图 1 所示。当高功率激光束照射到被测的反射镜上时,镜面因吸收激光功率而产生变形;He-Ne 激光光束是探测光,被准直后由分束镜分为两束,一束由标准镜反射,另一束由被测反射镜反射,这两束光产生干涉,其干涉条纹图反应了被测镜面的面型。实验中,在物镜后可以观察到镜面变形引起的干涉条纹变化。用 CCD 摄像机摄下干涉条纹的变化过程,用计算机对干涉条纹图进行数据处理,获得准确的被测反射镜面面型。干涉仪的精度为 $0.03 \mu\text{m}$ 。

半导体致冷镜示意图如图 2。在镜子基片的后面是由半导体致冷单元组成的阵列。实验中使用的半导体致冷器件分别在 $40 \times 40 \text{ mm}^2$ 和 $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 面积上均布着 127 个致冷单元,这

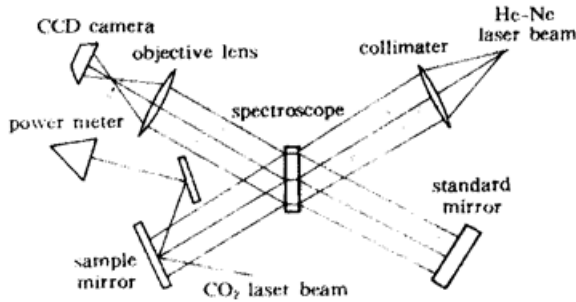


图 1 测量反射镜镜面装置示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the mirror surface measurement

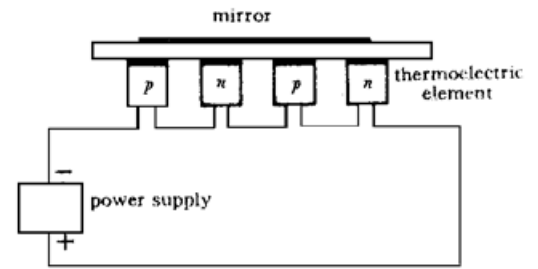


图 2 半导体致冷反射镜示意图

Fig. 2 The illustration of thermoelectric cooling of a mirror

些致冷单元在电路上是串联的, 流过每个致冷单元的电流相同, 故每对电偶产生的致冷量是相同的, 其致冷量 Q 由下式表示^[2]

$$Q = (\alpha_p - \alpha_n)IT - \frac{1}{2}I^2T - k\Delta T \quad (1)$$

式中第一项是珀尔粘热, $\frac{1}{2}I^2T$ 是电流流过电偶臂时产生的焦耳热, $k\Delta T$ 是沿电偶臂传入致冷端的热量。半导体致冷镜的镜子基片厚度应较薄, 其材料可以是铜、硅、钼等各种材料。分别对半导体致冷的铜镜和硅镜在激光照射下的镜面变形及半导体致冷补偿进行了实验测试。实验中使用一台 2 kW 横流连续 CO₂ 激光器, 其输出功率为 50 W ~ 2 kW 可调, 激光以 35°角入射时该实验铜镜对 10.6 μm 激光的反射率约为 96%; 实验用的硅镜对 10.6 μm 激光的反射率约为 28.2%, 入射到镜面位置的激光光斑为椭圆形状, 其大小与激光功率有关, 500 W 激光光斑约为 40 × 25 mm² 的椭圆。

3 实验结果及讨论

对于未加载致冷电流的铜镜和硅镜, 在激光照射镜面的同时, 就可以观察到干涉条纹发生变化。除干涉条纹的整体移动外, 条纹的曲率、条纹的间距均发生变化。这种现象随着激光的辐射延时而持续变化, 说明反射镜受光后立即吸收激光能量, 使镜面变形, 变形后的镜面不再是原有的镜面曲率分布。当半导体致冷器通电工作, 就可以观察到干涉条纹反向变化, 直至干涉条纹恢复到初始不受光时的干涉图样。上述现象说明反射镜吸收激光能量使镜面变形的作用与半导体致冷的反向作用相互抵消, 当半导体致冷器调整到适当的致冷电流时, 可完全补偿反射镜的镜面变形。

图 3 和图 4 中的 (a) 图显示出半导体致冷前铜镜(Φ45 × 3 mm) 原始的镜面面型。图中的灰度图是由镜面干涉图经条纹细化处理后得到的镜面面型等位图, 相同灰度的区域表示相同的镜面高度, 镜面是连续光滑的。图中的曲线是灰度图中水平及垂直的镜面截面的镜面面型曲线。图中横坐标的单位为 cm, 表示研究的镜面产生光照变形的范围。图 3 和图 4 描述了激光照射下约 27 × 27 mm² 范围内的镜面面型变化情况。图中纵坐标代表了镜面高度尺寸, 单位是 μm, 可反应镜面的高度变化。(b) 图反应了镜面在激光功率分别为 520 W 和 450 W 照射下的镜面面型, 从灰度图和镜面截面曲线可以看到, 此时镜面发生了明显的变化。图 3 和图 4 中的

(c) 图是镜面受光照的同时, 启动半导体致冷器件调整致冷电流, 使反射镜恢复时的镜面面型。此时的灰度图和镜面截线与初始状态一致, 说明此时镜面面型可由半导体致冷电流控制。

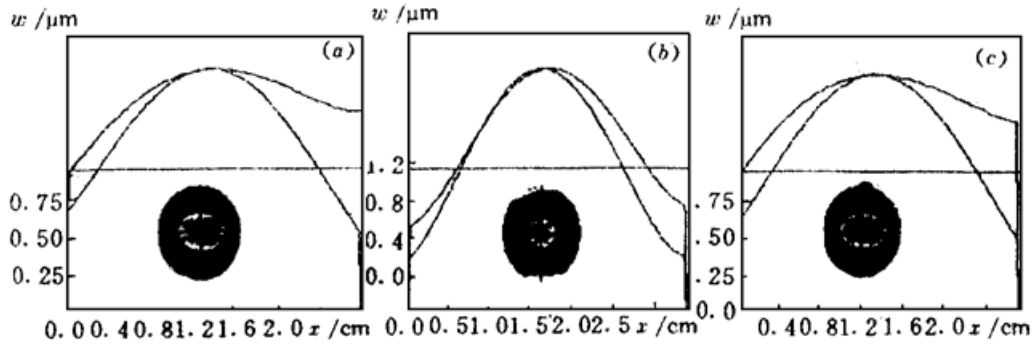


图 3 铜镜的镜面面型变化

(a) 原始状态; (b) 450 W 激光功率照射时的镜面面型; (c) 半导体致冷补偿时的镜面面型

Fig. 3 The change of the copper mirror surface

(a) original state; (b) under 450 W laser irradiation; (c) under thermoelectric cooling compensation

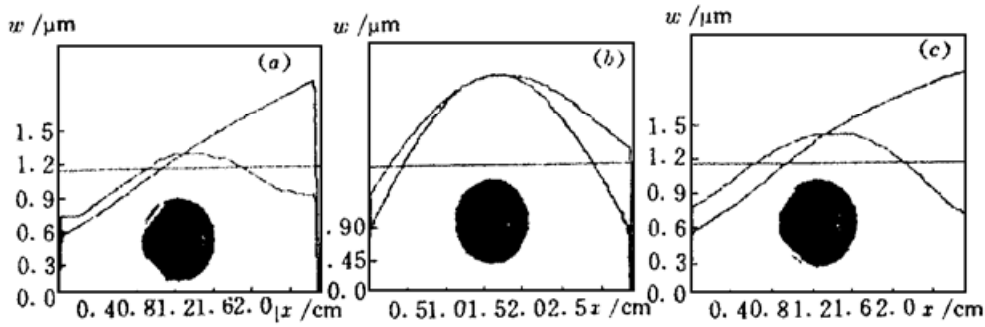


图 4 铜镜的镜面面型变化

(a) 原始状态; (b) 520 W 激光照射时的镜面面型; (c) 半导体致冷补偿时的镜面面型

Fig. 4 The change of the copper mirror surface

(a) original state; (b) under 520 W laser irradiation; (c) under thermoelectric cooling compensation

图 5 (a) 显示了半导体致冷的硅镜初始状态的镜面面型, (b) 是硅镜净吸收了 40 W 激光功率时镜面的变形情况, 其相当于反射率为 99.9% 的反射镜承受 40 kW 激光照射的条件。测量得最大变形量达 0.36 μm, (c) 图是半导体致冷启动后, 在适当电流下镜面恢复后的面型。仔细对比图 5(a) 和图 5(c), 镜面中央部分的条纹重合, 说明硅反射镜在半导体致冷器件的控制下没有发生明显的变形。被测硅镜是一平面镜, 为测量及处理干涉条纹方便, 实验中硅镜倾斜一个很小的角度, 这样可以得到适当的干涉条纹数, 经数据处理可得到镜面面型。图 5 中两条曲线中的一条斜线是垂直于干涉条纹的镜面截线, 主要反应了镜面的倾斜, 该斜线的弯曲度可反应对应镜面截线的弯曲。另一条曲线是对应的平行于干涉条纹的镜面截线, 该曲线直接反应了对应镜面截线的变形。半导体致冷腔镜的工作特点决定了半导体致冷腔镜还有以下几方面的优点:

(1) 无镜面压力变形。常规水冷腔镜内部有冷却水流动的槽沟。流动液体的压力大于激光器腔内的压力, 这种压力会造成镜面压力变形。为获得好的镜面传热特性, 希望镜体厚度尽量

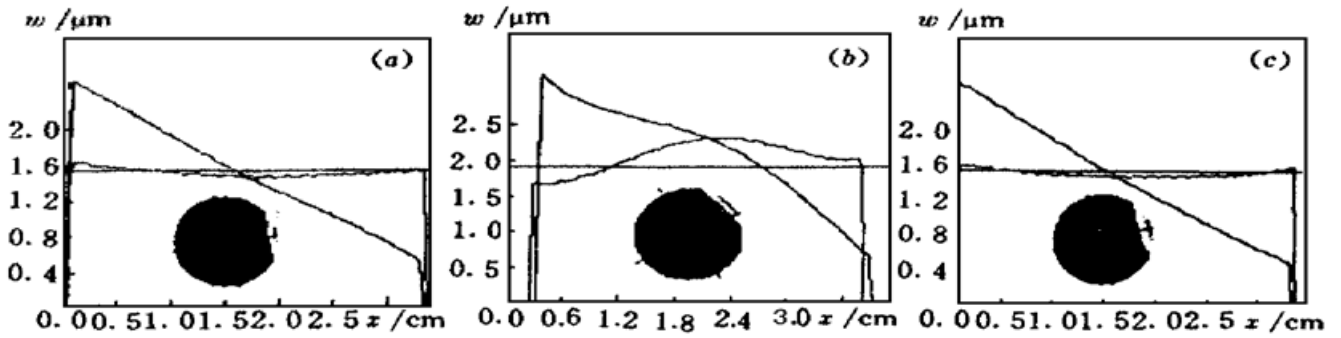


图 5 硅镜的镜面面型变化

(a) 原始状态; (b) 吸收 40 W 激光功率时的镜面; (c) 半导体致冷补偿时的镜面

Fig. 5 The change of the silicon mirror surface

(a) original state; (b) 40 W laser power being absorbed; (c) under thermoelectric cooling compensation
小, 这时镜面压力变形问题更加严重, 而半导体致冷的腔镜镜体可以很薄, 镜体内没有冷却介质流动, 所以不存在流体的压力及压力波动造成的镜面压力变形。

(2) 致冷功率可调。由公式(1)可以看到半导体致冷镜的致冷量主要由半导体致冷器件的电流决定。可以通过改变电流方便地控制腔镜的致冷量, 甚至可以根据强激光脉冲的过程设置一对应的电流变化过程以补偿强激光引起的腔镜变形。

(3) 致冷均匀, 半导体致冷器件是由许多小的致冷单元组成的。均匀布置致冷单元可以获得均匀的致冷效果。按照某一特定规律排列, 则可以得到特定致冷分布效果的致冷腔镜。

参 考 文 献

- 1 Fang Honglie. Theory of Optical Resonators. Beijing: Science Press, 1981, p350 (in Chinese)
- 2 Xu Dsheng. Semiconductor Refrigeration and Applied Technology. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1992, 9 (in Chinese)

Research of Laser Reflectors Cooled by a Thermoelectric Refrigerator

Ku Geng Cheng Zhuhai Zhang Yaoling Zhu Songlin

National Lab. of Laser Technology, Huazhong University of Sci. and Tech., Wuhan 430074)

Abstract The surface distortion of reflector mirrors in the laser cavity caused by high laser power changes the designed mirror surface that should be highly strict in the laser of good beam quality. The experiments show that both the copper reflector and the silicon reflector cooled by the thermoelectric refrigerator can compensate the distortion caused by laser power, so that the reflector surface is unchanged when it works. There are many other advantages of this kind of reflectors, such as no pressure distortion, the refrigerating power can be easily controlled and the cooling is even.

Key words reflector distortion, thermoelectric refrigerating, reflector compensation