

文章编号 : 0258-702X(2002)03-0201-04

高功率 CO₂ 激光器全反射镜热应力变形 解析分析

陆培华, 王润文

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提要 根据高功率 CO₂ 激光器谐振腔全反射镜的工作情况建立了热传导方程, 并给出了符合实际情况的边界条件。应用薄片分层分析法得到了全反射镜温度分布的解析结果, 并由温度分布求得了热应力引起的全反射镜的挠度以及由此引起的反射镜表面变形后所形成的曲率半径。

关键词 CO₂ 激光器, 全反射镜, 热形变

中图分类号 TN 248.2+2 **文献标识码** A

Analysis Research for Thermal Deformation of High Power CO₂ Laser Mirror

LU Pei-hua, WANG Run-wen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract Thermal conduction equation of high power CO₂ laser is established according to its running state, and the boundary conditions are given also. Analysis solution of temperature distribution of the mirror is obtained using the method of thin pieces analysis. At the end of this paper deformation of the surface of mirror is obtained.

Key words CO₂ laser, laser mirror, thermal deformation

1 引 言

高功率 CO₂ 激光器谐振腔的全反射镜的反射率一般为 98% 左右, 其表面散射很小, 可以忽略, 则约有 2% 左右的入射光能量被表面膜层吸收而转化成热量, 一般需要采用背面及边缘水冷却来控制镜片温度升高。激光器稳定工作时反射镜内就会形成一定的温度分布, 由于热传导作用镜片反射面中心的温度大于边缘的温度, 同时边缘因为定位需要处于压紧状态, 从而导致反射镜面中心向外凸出。平面反射镜会变成凸面反射镜; 凸面反射镜的曲率半径会变小; 凹面反射镜的曲率半径会变大, 甚至会变成平面反射镜或凸面反射镜。研究谐振腔中全反射镜的热形变情况十分重要, 它直接关系到谐振腔的结构参数设计及其实际激光的腔模振荡情况, 从而关系到输出光束的质量和激光功率的大小。

有关高功率 CO₂ 激光器全反射镜热形变问题已有一些文献进行了研究。文献 [1] 采用有限元分析法对全反射镜的温度分布及热形变情况进行了数值分析; 文献 [2] 对用硅作为基底的全反射镜(以下简称硅镜)在高功率 CO₂ 激光入射的开始阶段的变形情况进行了实验研究, 实验中全反射镜的边缘自然冷却; 文献 [3] 对用铜作为基底的全反射镜(以下简称铜镜)进行了实验研究, 并设计了一种蜂窝状水冷却结构的新型铜镜。

除温度变化引起的全反射镜热应力变形外, 全反射镜还存在压力变形。当全反射镜的厚度取到恰当的大小时, 其压力变形可不予考虑。本文针对稳定运转中的高功率 CO₂ 激光器谐振腔全反射镜的实际情况, 设定镜片已取了恰当的厚度而不考虑其压力变形, 给出了热传导方程及其边界条件。运用薄片分层分析法求得了全反射镜的温度分布解析结

收稿日期 2000-11-14; 收到修改稿日期 2001-03-27

作者简介 陆培华(1968—), 男, 浙江桐乡人, 光学工程博士, 主要研究方向为光学仪器制造及其应用。E-mail: phlu@mail.

果,同时采用数值计算热应力分析法给出了全反射镜镜面的热形变分布情况——挠度以及由此导出的反射镜表面受热变形引起的曲率半径(热致曲率半径)。

2 理论模型

高功率 CO₂ 激光器谐振腔的全反射镜一般采用背面水冷来控制镜片温升,全反射镜镜面特别是膜层吸收的激光能量由反射镜基体背面及边缘的流动冷却水带走。一般采用硅、铜等各向同性材料作为这种激光器反射镜的基底,因此其物性参数在各方向是一样的,设定入射激光束强度分布在镜面上是均匀的,并采用圆柱坐标系来研究镜片导热和热形变问题。如图 1 所示,设截面上光强均匀分布的激光束沿 z 轴入射到反射镜镜面上,激光束充满整个镜面,圆柱形反射镜的半径为 a,厚度为 h,取镜面中心为坐标原点。

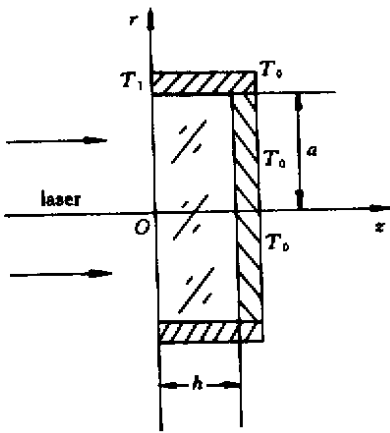


图 1 全反射镜示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser mirror

采用圆柱坐标系的热传导方程为

$$\frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

全反射镜采用背面水冷,设背面温度为 T_0 。全反射镜的厚度较薄,一般在 10 mm 以下,只要能够承受反射镜两边的压差就可以了。可以认为反射镜边缘的温度沿 z 方向呈线性递减,即由镜面边缘温度 T_1 线性减小到背面温度 T_0 。热传导方程(1)的边界条件为

$$T(r, z)|_{z=h} = T_0 \quad (2)$$

$$T(r, z)|_{r=a} = T_0 + g(h-z) \quad (3)$$

$$T(0, 0) = T_c \quad (4)$$

上式中 $g = \frac{T_1 - T_0}{h}$, T_c 为反射镜反射面的中心温度,它与反射镜吸收的激光功率及其冷却状态有关,可通过实验测得。

应用变量分离法可以求得方程(1)的解为

$$T(r, z) = c_1 J_0(\lambda r) [c_2 e^{-\lambda z} + c_3 e^{\lambda z}] \quad (5)$$

式中 c_1, c_2, c_3 为待定常数, λ 为特征值, $J_0(\lambda r)$ 为零阶 Bessel 函数。特征值 λ 的确定与反射镜截面上的吸热情况和传热情况有关,也即与反射镜吸收激光功率情况及其边界冷却情况有关。由边界条件(2)可知,温度在镜片背面均匀分布,整个镜片背面的温度为 T_0 ,于是此面上(5)式中的 λ 取值只能为 0,否则 $T(r, z)$ 在 $z = h$ 时会随着 r 的改变而改变。在镜片前反射面上,由边界条件(3)(4)可从下式求得特征值 λ_0

$$J_0(\lambda_0 a) = \frac{T_1}{T_c} \quad (6)$$

反射镜内的轴向温度分布由于热传导的作用沿 z 方向单调递减。若令 $r = 0$ 考察(5)式沿 z 轴变化情况,因 λ 为正数,则第二项会出现镜子背面温度高于前反射面,与实际物理状态相违背应予摒弃。即得

$$c_3 = 0 \quad (7)$$

由式(5)(7)(4)式可得

$$T(r, z) = T_c J_0(\lambda r) e^{-\lambda z} \quad (8)$$

式中 λ 与 z 有关, $\lambda = \lambda(z)$,可由边界条件(3)从下面的方程求得

$$T(a, z) = T_c J_0(\lambda a) e^{-\lambda z} = T_0 + g(h-z) \quad (z \neq h, 0)$$

$$\lambda = 0 \quad (z = h)$$

$$\lambda = \lambda_0 \quad (z = 0) \quad (9)$$

对边界条件(3)及式(8)采用薄片分层分析法可求得反射镜内温度分布为

$$T(r, z) = \frac{[T_0 + g(h-z)]J_0(\lambda r)}{J_0(\lambda a)} \quad (10)$$

由文献[4]可知因热应力而产生的反射镜镜面挠度 $u(r)$ 为

$$u(r) = (1 + \nu)\alpha \left[d_1 + d_2 r^2 + \int_r^a \frac{H(r)}{r} dr \right] \quad (11)$$

式中 ν 为泊松比, α 为线膨胀系数。其中

$$H(r) = \int_0^r m(r) r dr \quad (12)$$

式中 $m(r)$ 定义为温度矩

$$m(r) = \frac{12}{h^3} \int_0^h \tau(r, z) \left(z - \frac{h}{2} \right) dz \quad (13)$$

其中

$$\tau(r, z) = T(r, z) - T_0 \quad (14)$$

是镜片中温升的分布函数,积分常数 d_1, d_2 取决于夹持镜子的边界条件。

对于高功率 CO₂ 激光器谐振腔的全反射镜因定位需要而处于固定状态,即满足 $u(a) = 0$ 及

$$\left. \frac{du(r)}{dr} \right|_{r=a} = 0, \text{可求得}$$

$$d_1 = -a^2 d_2 = -\frac{1}{2} H(a) \quad (15)$$

由热变形而引起的反射镜镜面中心曲率半径 R_{th} 为

$$\frac{1}{R_{th}} = \frac{\left| \frac{d^2 u(r)}{dr^2} \right|}{\left\{ 1 + \left[\frac{du(r)}{dr} \right]^2 \right\}^{3/2}} \quad (16)$$

在计算中采用 MATLAB 中的 Polyfit 对(13)式 $m(r)$ 进行多项式曲线拟合,得到

$$m(r) = a_0 a^3 + a_1 a^2 + a_2 a + a_3 \quad (17)$$

其中 a_0, a_1, a_2, a_3 为曲线拟合得到的常数,它们的值由边界条件 T_0, T_1, T_c 的取值决定。当 $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $T_1 = 21^\circ\text{C}$, $T_c = 60^\circ\text{C}$ 时, $a_0 = -0.0059$, $a_1 = 0.4640$, $a_2 = -0.4261$, $a_3 = -194.8$ 。

由(12)式得

$$H(r) = \frac{1}{5} a_0 r^5 + \frac{1}{4} a_1 r^4 + \frac{1}{3} a_2 r^3 + \frac{1}{2} a_3 r^2 \quad (18)$$

把(18)式代入(11)可求得 $u(r)$ 的代数表达式,再将得到的代数表达式代入(16)式可得到全反射镜反射面中心热致曲率半径 R_{th} 的代数表达式

$$\frac{1}{R_{th}} = \left| -(1 + \nu) \alpha \left(\frac{1}{5} a_0 a^3 + \frac{1}{4} a_1 a^2 + \frac{1}{3} a_2 a \right) \right| \quad (19)$$

3 结论与讨论

采用文献[1]给出的物性参数,对 $\phi 50 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的硅镜进行了温度分布计算和镜面挠度计算并求得了不同镜面中心温度下的热致曲率半径。计算中,硅镜的 ν 取 0.28, α 取 $2.56 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 铜镜的 ν 取 0.34, α 取 $16.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。 T_1 取 21°C , T_0 取 20°C 。图 2 给出了 T_c 取 60°C 时全反镜内部 λ 值随 z 的变化,反射镜背面 λ 值的突然变化是由背面被强迫水冷引起的。图 3 给出了 T_c 取 60°C 时全反镜内部的温度分布,靠近背面的温度突变是由强迫水冷引

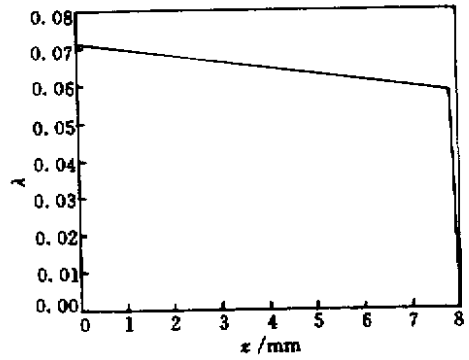


图 2 z ~ λ 变化情况

Fig.2 Curve of z ~ λ

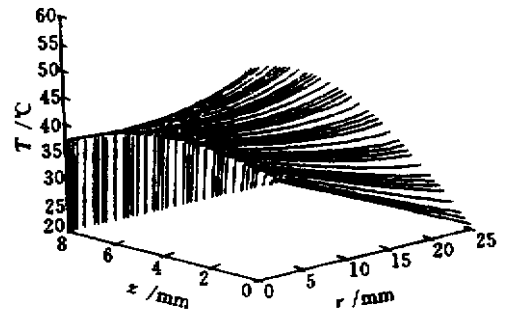


图 3 全反射镜内温度分布

Fig.3 Temperature of laser mirror

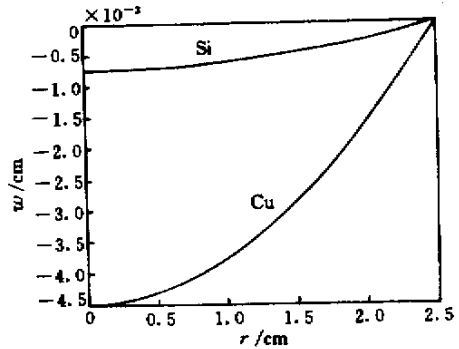


图 4 全反射镜镜面挠度分布

Fig.4 Deformation of laser mirror

起的,它的详细分析要用边界层理论。由于本文分析的是全反射镜反射面的热变形主要是由温度随 r 的变化引起,其背面附近温度分布随 z 的变化对热致曲率半径 R_{th} 的影响极小,因此图中近似用一直线表示这一层的突然冷却过程。图 4 给出了 T_c 取 80°C 时铜镜、硅镜的挠度分布。图 5 给出了铜镜 (Cu)、硅镜 (Si) 反射面中心热致曲率半径 R_{th} 随反射面中心温度 T_c 的变化情况。由图 4 可以看出,在同样的温场作

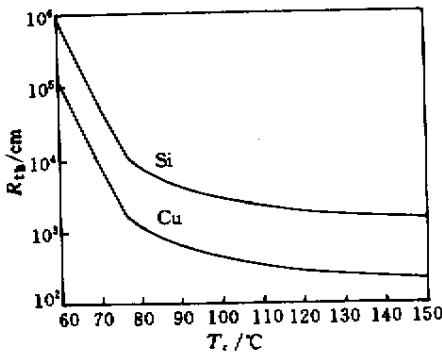


图 5 全反射镜反射面中心热致曲率半径 $R_{th} \sim T_c$

Fig.5 Curve of $R_{th} \sim T_c$

用下铜镜的热变形大于硅镜。从图 5 的结果得知,当 T_c 大于 80°C 时铜镜的 R_{th} 将变化到 10m 以下, T_c 大于 90°C 时硅镜的 R_{th} 将接近 10m ,

此时热致曲率半径 R_{th} 将会严重影响激光器的腔模振荡,从而影响激光器输出激光的功率大小与光束质量。本文给出的高功率 CO_2 激光器全反射镜镜片变形解析分析方法对分析镜片表面变形、设计激光器结构参数提供了有效途径。

参 考 文 献

- 1 G. L. Herrit, H. E. Reedy. Advanced figure of merit evaluation for CO_2 laser optics using finite element analysis [C]. *SPIE*, 1989, **1047** 33 ~ 42
- 2 Zhang Yaoning, Cheng Zuhui, Ku Gen *et al.*. A study thermal distortion of silicon mirror [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(8) 688 ~ 692 (in Chinese)
- 3 Xia Jinan, Zhang Yaoning, Cheng Zuhai *et al.*. Experimental study on the deformation of copper mirrors in a high power laser system [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(6): 603 ~ 606 (in Chinese)
- 4 H. Parkus. Thermoelasticity [M]. 2nd edition. Wien : Springer-Verlag, 1976. 46 ~ 69

连续 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的受激辐射在 $1250 \sim 1580\text{nm}$ 近红外波段,正是光纤通信的低损耗窗口,因此 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器在光通信研究领域有应用前景。

本实验小组用掺 Cr^{4+} 浓度为 $2.5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 的 YAG 晶体做增益介质得到了 240mW 的单模连续光输出,输出镜面上的光斑半径为 0.2mm ,波长为 1.5mm ,斜效率为 1.6% ,抽运阈值为 2.5W 。

实验装置采用 X 型折叠腔,晶体为圆柱形,直径 5mm ,长 20mm ,布儒斯特角切割,用焦距 f 为 100mm 的透镜耦合抽运光,聚焦腔凹面镜曲率半径 R 为 100mm ,总腔长 1300mm ,输出镜透射率 $T \approx 1\%$ 。用 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 激光器做抽运源。由于 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的增益系数较低,因此需要高质量的全反镜,并且将晶体冷却到 15°C 以下。实验装置如图 1 所示。

致谢 对天津大学精密仪器与光电子工程学院的王清月教授给予的大力支持和帮助表示感谢。

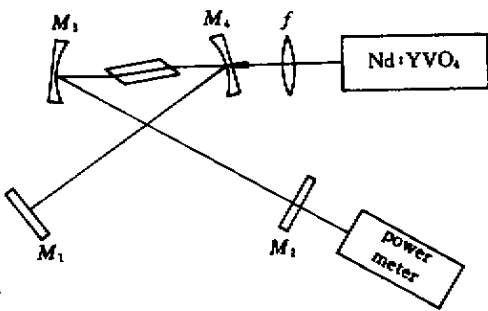


图 1 实验装置图

Fig.1 Experimental set-up

¹ 山西大学电子信息与技术系,山西太原 030006
² 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室,国家教育部光电子信息技术科学重点实验室,天津 300072
 宋晏蓉^{1,2},张志刚²,裴为华¹,宋丽军¹,周国生¹
 收稿日期 2001-09-17,收到修改稿日期 2001-11-29