

高功率激光反射镜的几个关键技术

北京锦坤科技有限公司 www.jon-kon.com

(中国科学院光电技术研究所, 成都双流350信箱, 610209)

摘要 分析了制作高功率连续激光反射镜材料的热性能、缺陷及其加工工艺, 提出了制作高功率激光反射镜应考虑的几个关键问题: 反射镜材料的综合热性能比值 S , 材料的微观结构、缺陷的大小和晶向的选择, 以及加工工艺的设计。并介绍了实验结果。

关键词 反射镜 热性能 缺陷 粗糙度

中图分类号 TN 244

高功率连续激光反射镜(以下简称反射镜)是高能连续激光系统中的主要光学元件, 其质量的好坏, 直接影响着高能激光系统的性能。过去, 人们只注意研究如何提高反射镜的反射率, 单纯依靠表面镀膜层的好坏来衡量反射镜的好坏。随着高能连续激光技术的飞速发展, 激光系统中的反射镜承受着越来越高的功率密度, 传统的材料和表面质量标准已不能完全适应于高能连续激光系统的需要。在现在以及今后的高能连续激光系统中, 制约着反射镜性能的因素已不单是反射率, 它还包括制作反射镜材料的热性能、微观结构、缺陷、晶向以及加工工艺等。而这些因素, 不仅在过去, 就是现在也往往被我们的设计者及加工者所忽视。因此, 本文将重点分析这些因素对反射镜的影响。

1 反射镜的材料

1.1 材料的热性能

反射镜在传输高能激光束时将吸收一定的能量, 这部分能量转化为热能, 由于反射镜材料的热膨胀、局部热应力以及反射镜固定时的机械应力等原因, 从而使镜面产生形变, 影响光束的传输质量, 严重的甚至使反射镜炸裂, 使系统不能有效地进行工作。鉴于此, 高能激光系统中使用的反射镜, 要求其工作时表面形变应在许可的范围以内。机械应力产生的形变可以通过反射镜固定方式优化处理, 从而将其控制在允许范围以内; 局部热应力产生的形变远远小于热膨胀的形变, 故可忽略不计[1]。这里我们仅考虑反射镜材料的热膨胀产生的形变。当激光均匀或集中辐射到反射镜表面时, 根据热传导的数学理论可知, 固体中某个表面的热流量与局域温度的梯度成正比, 即:

$$Q_{z0} = - \lambda \left(\frac{dT}{dz} \right)$$

式中 λ 为材料的热导率, Q_{z0} 为通过固体表面的热流量。

$$dT = - \frac{1}{\lambda} Q_{z0} \cdot dz$$

反射镜热膨胀产生的形变正比于温度和热膨胀系数, 即:

$$dx = \alpha \cdot dT$$

式中 dx 为反射镜表面的局域形变, α 为反射镜材料的热膨胀系数, dT 为反射镜表面的局域温度。

将(2)式代入(3)式可得

$$dx = - S \cdot Q_{z0} \cdot dz$$

式中 $S = \alpha/\lambda$ 为反射镜材料的综合热性能比值。

由(4)式知, 反射镜表面的热形变与其材料的综合热性能比值 S 成正比, 在吸收热能及反射镜尺寸相

同的前提下,反射镜表面热形变的大小要由材料的综合热性能来确定, S 值越小,反射镜表面的热形变就越小。表1列出了国内现有的几种材料的有关热性能参数[2, 3]。

表1 材料的热性能
Table 1 the thermal capability of material

material	$\alpha/10^{-6}$	$\lambda/W \cdot \text{cm}^{-1} \text{K}^{-1}$	S
K9	6.6	0.0029	2275.9
Pyrex	3.2	0.0027	1185.2
SiO ₂	0.49	0.0024	204.17
Si	2.4	0.201	11.940
Mo	5	0.341	14.663
Cu	20	0.919	21.763

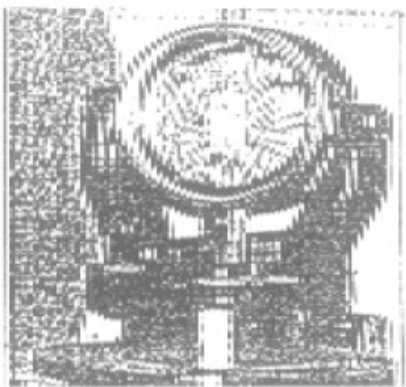


Fig 1 K9 reflector broken
图1 炸裂的K9反射镜



Fig 2 gap of monocrystalline silicon
图2 单晶硅的缺陷

通过表1中的参数对比我们发现,硅、钼和铜等材料的综合热性能比值 S 较小,而K9玻璃、派勒克斯(Pyrex)和石英玻璃的 S 比值就比它们大得多。根据(4)式,在吸收相同热流通量的条件下,用表1中所列的前三种材料作反射镜,其表面热形变将比用硅、钼和铜等材料作反射镜大一、二个数量级。有鉴于此,在仅考虑反射镜表面热形变的情况下,用硅、钼和铜等材料作反射镜是比较理想的。在激光束的功率密度较低时,也可选用石英玻璃,但用K9、派勒克斯玻璃或与其参数相近的材料作反射镜则是不现实的。图1所示的就是K9玻璃反射镜被强激光束打裂的情形。

1.2 材料的结构、缺陷及晶向

通过上述材料的热性能分析可知,在国内现有的材料中,单晶硅是制作反射镜最理想的材料。过去,人们在设计 and 加工反射镜时,往往不考虑或是不完全考虑制作反射镜的材料本身的一些因素,如微观结构、缺陷及晶向等。对于高功率激光反射镜来说,由于反射镜表面的超光滑(表面粗糙度小于 1nm RMS [4])要求,这些因素将严重制约着反射镜表面粗糙度的降低。

单晶硅的晶格常数是 $a = 0.357\text{nm}$, 对于(111)晶面而言,其晶面间距 $d = \sqrt{3} a / 4 =$

0.1235nm , 其晶向的平均原子距离 $l = \sqrt{3} a / 2 = 0.47\text{nm}$ ^[5], 硅原子的半径 $r = 0.134\text{nm}$ [6], 两相邻原子间的平均缝隙为 $l - 2r = 0.202\text{nm}$, 其深度是 $2r + d = 0.503\text{nm}$ 。两相邻原子间的平均缝隙的深度就是

用单晶硅制作反射镜时,其表面粗糙度的理论极限值(R_t)。根据经验,表面粗糙度的均方值一般在峰谷值的四分之一至七分之一之间,由此可知,用单晶硅作反射镜时,其表面粗糙度的理论极限值将大于或等于 $0.126 \sim 0.072 \text{nmRMS}$ 。如此小的粗糙度已完全满足反射镜的要求,所以,单晶硅是适合作反射镜的最佳材料之一。

单晶硅的缺陷一般分点缺陷、线缺陷和面缺陷。单晶硅的这些缺陷在加工时将造成被加工表面各局部区域去除量的不一致,有缺陷的区域去除量要多一些,没有缺陷的区域去除量要少一些。加工结束后,在被加工表面有缺陷的区域就出现一些小坑,特别是采用机械和化学相结合的加工方式更是如此。用金相显微镜(最小分辨率为亚微米量级)可以非常明显地看见这些小坑(图2)。对于表面粗糙度小于 1nmRMS 的反射镜,这些小坑的出现是不容许的。

单晶硅主要有(111)、(110)和(100)晶面,由于(111)晶面是自然解理面,所以沿(111)晶面切割时不易碎裂,而(110)和(100)晶面不是自然解理面,沿晶面切片时就容易破碎,特别是边缘的破碎在今后的研磨抛光中很容易在表面产生划痕。另外,(111)晶面很容易抛光成镜面,而(110)和(100)晶面抛光成镜面就比较困难。

通过以上分析,我们可以得出这样一个结论:制作反射镜时应选择没有或很少缺陷的,其反射面为(111)晶面的单晶硅。

2 反射镜的加工

反射镜分冷却反射镜和非冷却反射镜,对于冷却反射镜,我们在考虑其加工性能时,不仅要考虑它的光学加工性能,同时,由于它的复杂冷却通道结构、冷却管接口以及密封结构等因素,因而还要考虑它的机械加工性能,对表1所列的几种材料,铜的机械可加工性能是最好的,而钼仅比其余四种材料稍好。对于非冷却反射镜,仅考虑它的光学加工性能即可。

高能激光技术的发展,要求光学元件的表面质量精度高、超光滑。由于能动光学在强激光系统中的应用,它还使用了大量的超薄型光学元件,这些元件的展弦比(直径与厚度之比)一般大于20,有些甚至超过100。强激光系统中使用的这些镜子,要求表面不能有划痕、麻点等缺陷,表面面形一般小于一个波长($0.6328 \mu\text{m, PV}$);表面的微观质量则要求表面粗糙度小于 1nmRMS 。国内外对高功率激光反射镜的加工工艺的具体报导基本上没有。我们对具有常规厚度以及超薄型的反射镜都进行了一些实验,并取得了一些成果。

光学元件的表面抛光机理存在着三种理论,即机械磨削理论、化学作用理论和表面流动理论。传统光学元件的加工都是以普雷斯顿假设为基础,即镜子表面磨去层的厚度可以通过下式求得[7],

$$h_i = A \int_0^T p_i \cdot v_i \cdot dt$$

式中 h_i 为在 i 点磨去镜片的厚度; A 为系数; p_i 为在 i 点的瞬时压力; v_i 为在 i 点的瞬时速度; T 为加工的持续时间。

由于机械磨削作用在抛光过程中是最基本的,因此,抛光表面破坏层缺陷的大小与磨料的直径成正比。传统抛光粉(直径为微米量级)的微小切削作用可以在分子大小范围内进行,抛光结束后,表面将形成几纳米至几十纳米的小坑及划痕。要使被抛光表面的粗糙度达到亚纳米量级,则切削作用必须限制在原子大小范围内进行,即以纳米量级的微粒参与切削。虽然离子束抛光是原子量级地去除,但设备复杂、价格昂贵。通过分析比较,我们采用简单易行的水中抛光法加工反射镜。这是因为水中抛光反射镜时,微米量级甚至是更大颗粒的抛光粉在离心力及重力的作用下,逐渐沉降于承液器的底部,不参与切削,而纳米量级的微粒在布朗运动的作用下参与切削,从而得到亚纳米量级的表面粗糙度。

实验发现,从面形精度来看,硅和钼没有多少差别;从表面粗糙度来看,采用传统抛光工艺,其结果明显比不上水中抛光,无论是传统抛光还是水中抛光,钼镜的表面粗糙度总是大于硅镜,这主要是因为钼镜中的杂质含量过高以及致密性较差。如果采用高纯度的单晶钼,则可避免这种现象的产生;从加工时间来看,

钼镜所需时间是硅镜的两倍。对于超薄型元件,我们用传统的粘结上盘及一种特殊上盘方式进行了加工实验见图3、图4。从图中可以看出,两种上盘方式加工的面形差别很大,这主要是因为超薄型硅片的刚性较差,传统的粘结上盘加工时,由于粘结胶的原故,有很大的胶结变形,下盘时变形很大。而特殊上盘后进行水中抛光,就不存在胶结变形和热变形,仅仅因为材料本身的应力以及抛光盘的不均匀,才使镜子表面产生了很小的象散。如果采用高精度抛光盘并对材料进行精密退火,则可使表面面形更好,甚至做到小于 0.1λ (PV)。

根据以上分析选用的单晶硅,并采用特殊方式加工的硅镜,经过强激光打靶试验,当反射镜处于非焦点位置时,功率密度为 $22.5\text{kW}/\text{cm}^2$,其形变基本上看不出来,当反射镜处于焦点位置,功率密度为 $66.46\text{kW}/\text{cm}^2$ 时,其表面的形变也不超过半个波长。这说明反射镜表面的粗糙度越小,其抗损伤域值就越高,而表面粗糙度的大小又与材料的结构、缺陷、晶向及其加工工艺密切相关。

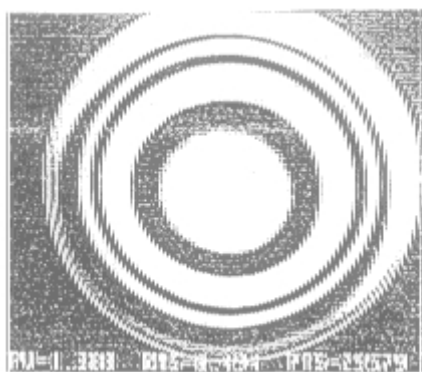


Fig. 3 Classic locating: interferogram of Si
图3 硅镜传统粘结上盘加工的干涉图

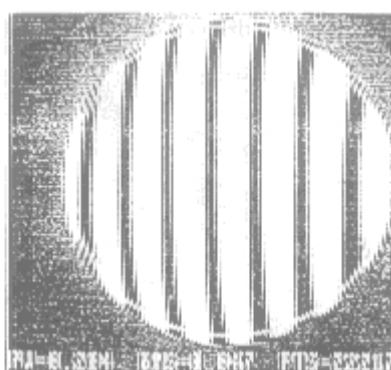


Fig. 4 Specific locating: interferogram of Si
图4 硅镜特殊粘结上盘加工的干涉图

3 结论

通过以上分析我们可以知道,在设计和制作高功率连续激光反射镜时必须考虑以下几点:其一是材料的综合热性能比值;其二是材料的微观结构、缺陷及晶向等因素;其三是材料的加工工艺。

今后我们将开展较大口径($\phi 250\sim\phi 400\text{mm}$)元件的超光滑加工,使其加工后的表面粗糙度小于 1nmRMS ,并对超光滑表面的加工工艺及机理进行深入探讨,力争达到表面粗糙度小于 0.2nmRMS 的水平,使加工的光学零件不仅用于一般高能激光系统,而且适用于X射线光学系统。

参考文献

- 1 黄涛等. 强激光全反腔镜热变形模型及计算. 强激光与粒子束, 1995, 7 (3): 336~ 372
- 2 (日) 素木洋一. 硅酸盐手册. 北京: 轻工业出版社, 1988
- 3 李责贤, 郑乐年. 光学设计手册. 北京: 北京理工大学出版社, 1990
- 4 Taylor r J R. Specification and testing facilities fo r op tical components used in h igh average power visible laser system. *SPIE*, 1989, **1047**: 250~ 255
- 5 孙一材. 半导体测试技术. 北京: 冶金工业出版社, 1984
- 6 钱逸泰. 结晶化学. 合肥: 中国科技大学出版社, 1988
- 7 曹天宁等. 光学零件制造工艺. 北京: 机械工业出版社, 1983

**SEVERAL KEY MANUFACTURE TECHNOLOGIES OF
MIRROR IN HIGH POWER LASER SYSTEM**

Deng Jianming, Ling Ning

Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, 610209

ABSTRACT The thermal capability of material, the surface defect and the fabrication techniques of the mirrors using in high power continuous laser are analyzed in this paper. Several features for manufacturing mirror must be considered, which are the ratio S of the thermal capability, micro structure, size of the surface defect, the crystal direction on the mirror material and design of technique for the mirror. Moreover the results of experimentation are given.

KEY WORDS mirror, thermal capability, defect, roughness

522 强激光与粒子束第10卷

© 1995-

北京锦坤科技有限公司 [www. jon-kon. com](http://www.jon-kon.com)