

高能激光用无氧铜镜设计和加工

宋曙光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 无氧铜镜在激光的光路中是重要元件,起到扩束、折转光路的作用。这种无氧铜镜因材料内部晶格细腻、不具有氧逆集热现象而无冷却系统。材料为高纯度电解铜,经中压锻造后使材料内部晶格更细腻、无结块、形成无氧铜镜基板,稳定化处理后消除内应力,经机械加工达到图纸要求。通过工具显微镜检测无氧铜镜表面是否存在结块,若无异常现象便可进入镀镍工序,按照工序要求精磨、抛光,通过激光干涉仪检验,以满足我们需要的无氧铜镜要求的技术指标。

关键词: 无氧铜镜; 中压锻造; 激光干涉仪

中图分类号: O435 文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20112803.0037

Design and Processing of Oxygen-free Copper Mirror for High-energy Laser

SONG Shu-guang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: Oxygen-free copper mirror is important in high-energy laser optical components, while playing a beam expander and refracting the optical path. The oxygen-free copper mirror hasn't cooling system for fine crystal lattice within the material and without the phenomenon of oxygen. The material is high-purity electrolysis copper by medium-pressure forging, with more delicate lattice, without agglomeration, forming the oxygen-free copper mirror substrate. The internal stress is eliminated by stabilization treatment. It can meet the drawing requirement from mechanical processing. The oxygen-free copper mirror surface is detected using microscope. If there is no abnormal phenomenon, then turn into nickel plating. The grinding and polishing accord to the working procedure, and detected by the laser interferometer, so as to meet the technical requirements and achieve the targets of the oxygen-free copper mirror.

Keywords: oxygen-free copper; medium-pressure forging; laser interferometer

1 引言

无氧铜镜分多种类型，在激光、光路中起扩束作用的元件，称为扩束镜、次镜，起折反光作用的元件称为平面镜，它们的曲率半径 R ，视场 2ω ，通光孔径 Φ 由光学设计参数给定。

本文主要阐述无氧铜镜的设计、加工、镀镍、精磨、抛光、检验等相关技术。

2 无氧铜镜设计

图1为无氧铜镜示意图。它们的尺寸：长 (L) ×宽 (W) ×厚 (H) 为扩束后的光学尺寸，厚度 (H) 通过激光照射后克服辐射热变形来确定，除尺寸要求外还必须注重技术及工序要求^[1]。

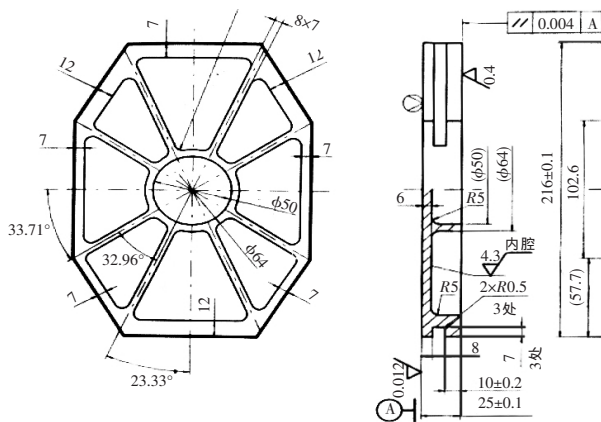


图1 无氧铜镜

2.1 无氧铜参数 (参照铜标准)

- 成分: Cu
- 摩尔质量: 63.54
- 密度 (g/cm^3): 8.93 (20 °C)
- 8.3 (1 083 °C)

晶系

铜 (Cu) 的空间晶格属立方晶系，其面心立方点阵的晶格常数 $a=0.360 775$ (18 °C)。

热、电和机械性质^[2]

- 熔点/°C: 1 083
- 沸点/°C: 2 855
- 蒸汽压/Torr: 10^{-4} (1 300 K)

- 10^{-2} (1 530 K)
- 1 (1 890 K)
- 100 (2 460 K)
- 线膨胀系数/ $(\times 10^{-6}/^{\circ}C)$: 14.09 (-191~16 °C)
- 16.78 (40 °C)
- 比热容 [$cal/(g \cdot s \cdot ^{\circ}C)$]: 0.091 9 (20 °C)
- 热导率/ $[cal/(cm \cdot s \cdot ^{\circ}C)]$: 0.923 (图 2)
- 比电阻/ $\Omega \cdot cm$: 2.28 (373 K)
- 1.70 (295 K)
- 1.06 (200 K)
- 0.215 (80 K)
- 0.001 7 (15 K)
- 硬度: 369 MPa(维氏硬度)
- 874 MPa(布氏硬度)
- 3.0 (莫氏硬度)
- 杨氏模量/ $(\times 10^{10} N/m^2)$: 12.98
- 刚性系数/ $(\times 10^{10} N/m^2)$: 4.83
- 体积弹性模量/ $(\times 10^{10} N/m^2)$: 13.78
- 弹性系数/ $(\times 10^{10} N/m^2)$ [0(300 K)]: c_{11} 17.62 (16.875)
- c_{12} 12.49 (12.158)
- c_{44} 8.18 (7.568)

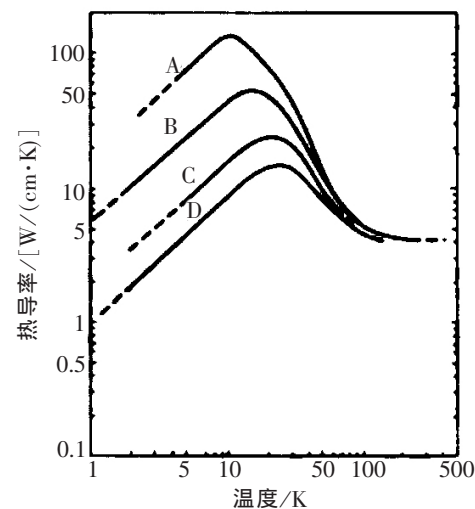


图2 低于室温时，铜的导热率。A, B: 不同公司的退火铜产品，纯度 99.999%；C: 无氧退火铜，纯度 99.98%；D: 电解铜，纯度 99.98%

光学性质

反射率

铜 (Cu) 的反射光谱曲线如图 3 所示。测量了 $\lambda=5\sim 34\text{ nm}$ 波长范围内的透过率。波长小于 $\lambda=500\text{ }\mu\text{m}$ 的反射率非常低。光学常数参考图 4。

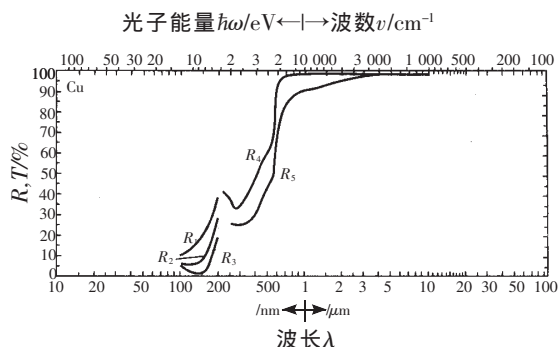


图3 铜的反射光谱曲线。R₁: 新表面镀膜; R₂: 镀膜后, 暴露在空气中5星期; R₃: 镀膜后, 暴露在空气中6个月; R₄: 新表面镀膜; R₅: 商业样品

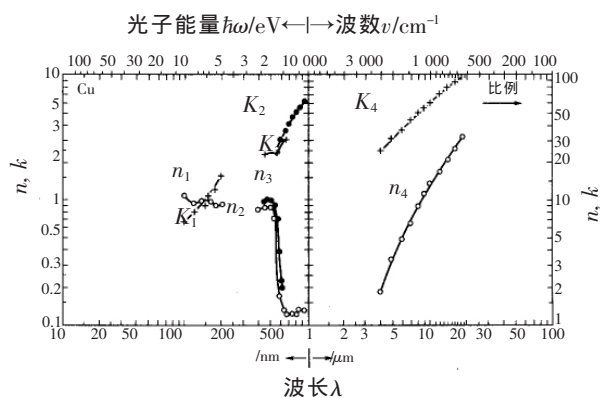


图4 铜的光学常数 ($n_l, k_l, l=1\sim 4$)

2.2 技术要求

- (1) 对铜镜表面瑕疵要求;
- (2) 选用铜镜材料晶格的处理方式;
- (3) 对铜镜基底检测要求、机加工要求;
- (4) 加工完后, 进行镀镍的膜层厚度、环境的要求;
- (5) 精磨镜面要达到光圈 N , 要达到通光孔径有效面积所要求的表面精度粗糙度一般为 $\text{RMS} \leq \lambda/20$, 标准为 $\lambda/100$;
- (6) 确定面形检测波长: $\lambda_0 (\mu\text{m})$, 满足平均 P-V 值 $1/(x)\lambda$;

(7) 确定铜镜镀反射膜, 反射波段 ($\lambda=m\sim n$) 及所要求反射率 $x\%$ 。

3 镀镍工艺

无氧铜这种材料至少含有 99.95% 的铜, 常用于制造要求光学表面有较高热幅率的反射镜, 也可以镀镍, 一种镀电解镍 (EN)、另一种为化学镀镍 (ELN)。化学镀镍使用的镍含有 8%~11% 的磷。两种镀镍方法都会形成一个更平滑的表面, 降低散射性能。镍的热膨胀系数是 $1.35 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 铜的热膨胀系数是 $1.49 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 比较相配。一般电镀镍 (EN) 可以镀到厚度 0.030 in (0.76 mm) 或更厚, 洛氏硬度为 50~58。非电镀镍 (ELN) 是一种含磷量在 11%~13% 的无定形材料, 可以镀得更平, 更耐腐蚀。非电镀镍的最实际厚度大约为 0.008 in (0.20 mm), 涂镀前, 基板必须有几乎完全合乎设计要求的轮廓形状。非电镀镍工艺的温度约为 $200\text{ }^\circ\text{F}$ ($93\text{ }^\circ\text{C}$), 比电镀镍的温度高, 必须控制到 $\pm 5\text{ }^\circ\text{F}$ ($\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$)。非电镀镍的洛氏硬度典型值是 49~55, 非电镀镍层与反射镜基板材料热膨特性的不匹配会造成镀完后光学外形尺寸不稳定。影响非电镀镍金属反光镜长期稳定性的一个因素是膜层本身具有应力和含磷结块, 应力主要与淀积的镍层中磷含量有关, 一般规定磷的含量典型值 $< 12\%$, 保证退火后应力为零。改变化学成分和使用的热处理工艺就可以使零残余应力控制在已知工作范围内。给出非电镀镍膜层的热膨胀系数、密度、杨氏模量和硬度与磷含量的依赖关系, 这些参数对反射镜设计建模是非常重要的。

4 机械加工

加工无氧铜镜一般用两种机械, 一种为高精度机床, 另一种为高精度金刚石机床, 按照 SPDT 工艺进行加工。

- (1) 将零件预先加工或按照惯例机械加工到粗略形状, 所有待加工表面上材料余量为 0.1 mm (0.004 in);

- (2) 将该零件进行热处理，释放应力^[3]；
- (3) 将具有最小尺寸的零件安装在 SPDT 机床一个合适的卡盘或工装夹具上；
- (4) 在机床上选择、安装和对准金刚石刀具、高精度机床刀具；
- (5) 在计算机控制下进行多次轻切削，将零件精确加工到最终的形状和表面质量；
- (6) 验收零件 (如可能，现场验收)；
- (7) 清洗零件，去除切削油和溶液。

在光学件的某些应用中，步骤 (2) 之后对表面进行涂镀，为金刚石刀具、高精度机床刀具提供一个无定形金属层，步骤 (7) 之后抛光光学表面，再镀适当的光学膜层。

5 无氧铜镜检验

无氧铜镜检验有如下 3 种方法：一种是刀口仪检验，根据阴影图修磨，直至 $RMS < \lambda/10$ 。另一种为光学样板检验，从等厚干涉原理可知：相邻两亮条纹之间的空气隙厚度差近似为 $\lambda/2$ ，即通常所说的一个干涉条纹 (光圈)，相当于空气隙厚度变化为 $\lambda/2$ ，因此，光圈数为 N 部位所对应的空气隙厚度变化为 $N \cdot \lambda/2$ 。所以，光学零件的面形精度可以通过垂直位置观察到的干涉条纹数量、形状、颜色及其变化来确定，检验结果为 $N \cdot \lambda/2 < 1$ (光圈)。最后一种为激光干涉仪检验，可以得到如下图形及数据。

5.1 主要数据图

被检设计系统 PV-平均残余波像差：

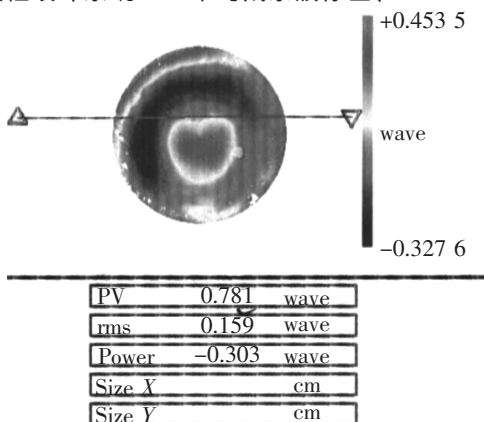


图5 面形波像差

RMS-最大波像差。

Power-最小面形波像差。(图 5)

5.2 显示主镜直径波像差

PV-直径平均残余波像差；

RMS-直径最大面形波像差。(图 6)

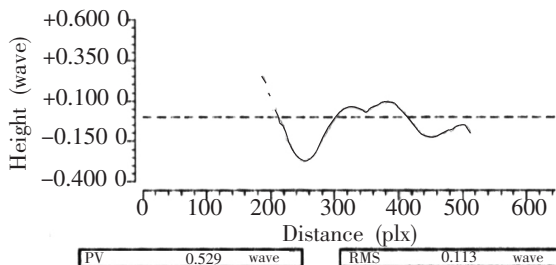


图6 直径最大面形波像差

5.3 轴侧图

面形布局观察如图 7。

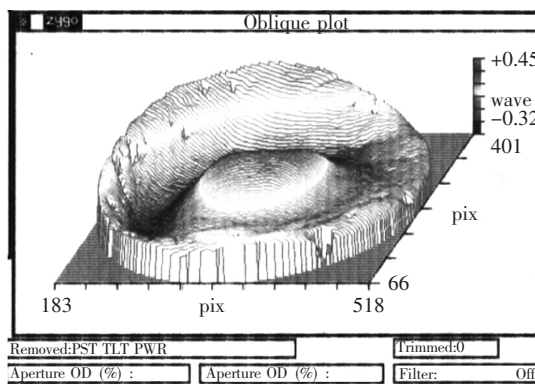


图7 面形轴侧图

5.4 面形

面形波成像强度可以分析出无氧铜镜成像质量如何，判定无氧铜镜成像是否合格。(图 8)

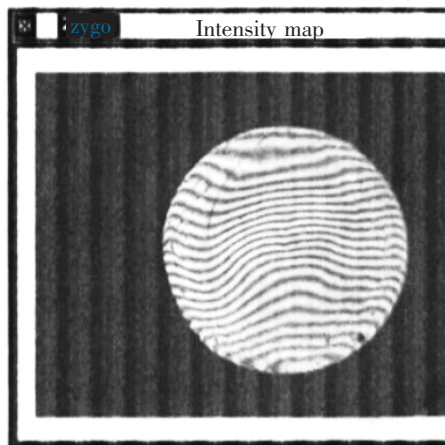


图8 面形波成像强度

6 结 论

本文结合光路中的扩束无氧铜镜、转折无氧铜平镜设计、锻造、加工、镀镍、精磨、抛光、检验的整个过程进行陈述及探讨,提出了在设计、加工、镀镍、精磨过程中应该注意的问题,在设计中应注重辐射力热、有效辐射热对无氧铜镜产生的热变形,

在中压锻造时一定不能集聚粘。无氧铜 (Cu) 的空间晶格属立方晶系,晶格分布要均匀,从而给镀镍打下好的基底,使镀镍能产生良好效果^[4]。

7 致 谢

无氧铜镜的设计、加工、镀镍、精抛整个过程是经多人努力奋斗完成的,在此表示诚挚感谢!

参考文献

- [1] 张新,许英朝. 光学自由曲面的检测方法[J]. 中国光学与应用光学, 2008, 1(1): 92-99.
- [2] Wakaki M, Kudo K, Shibuya T. *Physical Properties and Data of Optical Materials*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [3] Yoder P R, Jr. 光机系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [4] 查立豫,林鸿海, 编著. 光学零件工艺学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1987.

作者简介: 宋曙光 (1954-), 男, 汉族, 吉林临江人, 副研究员, 1978年毕业于大连理工大学, 主要从事光学仪器设计。
Tel: (0431)86176962

《液晶与显示》 (双月刊)

《液晶与显示》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办, 科学出版社出版。

- 中国最早创办的液晶学科专业中文核心期刊
- 中国唯一的液晶学科和显示技术领域综合性学术期刊
- 中国光学光电子行业协会液晶分会会刊, 中国物理学会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》征集有关液晶和各类显示材料及制备方法、液晶显示、等离子体显示、阴极射线管显示、发光二极管显示、有机电致发光显示、场发射显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他显示、各类显示器件物理和制作技术、各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用、显示材料和器件的测试方法与技术等研究论文。《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。同时, 竭诚欢迎社会各界洽谈广告业务、合作组织技术交流与信息发布活动。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报、综合评述和产品信息等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术, 及时反映国内外本学科领域及产业信息动态, 是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果, 进行国际交流的平台。其内容丰富, 涵盖面广, 信息量大, 可读性强, 是我国专业期刊发行量最大的刊物之一。

网址: <http://www.yjyxs.com> 欢迎访问!