

# X 光掠入射平面反射镜系统的制备

胡家升 张景和 王宝林

孙可煦 马洪良 徐和平\*

(中国科学院长春光机所, 长春 130022)

(西南核物理与化学研究所, 成都 610003)

**摘要** 在论述 X 光掠入射平面反射镜工作原理的基础上, 重点讨论了超高精度 X 光镍平面反射镜的制备过程, 研制出表面粗糙度小于 1.5 nm 的平面反射镜。测试和使用表明: 在掠入射角为  $5^\circ$  时, 该反射镜的反射率在 54% 以上。

**关键词** 平面反射镜, 反射镜制备

## 1 引 言

对于许多脉冲 X 射线光源测量, 采用滤波法或其它类似的测量方法时, 都存在着不同程度的高能尾部的贡献, 这直接影响探测信号的测量精度。

在激光-等离子体相互作用过程中, 产生快脉冲 ( $\approx ns$  量级) 高强度 ( $\approx TW$  功率) X 射线光源, 这种光源的光子能量主要集中于亚千电子伏 ( $0.1 \sim 1.5 keV$ ) 能区。特别是对目前国际上比较重视的激光聚变方式——间接驱动惯性约束聚变, 激光能量首先转变成 X 光能, 形成辐射驱动源, 其中 90% 左右的 X 光能处于亚千 X 光能区, 因此, X 光谱及强度的测量十分重要, 它直接关系到惯性约束聚变实验研究中的关键物理量——辐射温度的确定。

从经济上及可靠性角度出发, 亚千 X 光能谱及绝对强度测量, 目前用得比较多的诊断设备是亚千 X 射线能谱仪, 它由滤光片——X 射线二极管 (XRD) 阵列组成。这种谱仪具有一定的能量分辨和时间分辨, 已被许多从事激光惯性约束聚变研究的实验室采用。但它有一个严重的缺点, 即每个探测道都存在不同程度的高能尾部影响, 特别是低能道, 高能尾部贡献有时竟与真实信号不相上下 (如图 1 所示)。采取理论计算的方式扣除低能道高能尾部的贡献, 部分解决了能谱问题。为了从根本上解决这个问题, 我们给亚千 X 光能谱仪低能道配置镍平面反射镜, 利用掠入射平面反射镜消除高能尾部的贡献。

## 2 平面反射镜工作原理

当低能 X 射线从光疏介质射向光密介质时, 一部分 X 光进入光密介质发生折射; 另一部分则被界面反射, 且反射角  $i_r$  等于入射角  $i$ , 如图 2(a) 所示。当入射角增大到接近  $90^\circ$  时, 折射光沿介质界面方向射出, 折射角  $r = 90^\circ$ , 此时称入射角为临界入射角, 用  $i_c$  表示, 而其余角称临界

\* 参加本工作的还有西南核物理与化学研究所的郑志坚、唐道源、崔延莉、易容清等同志。

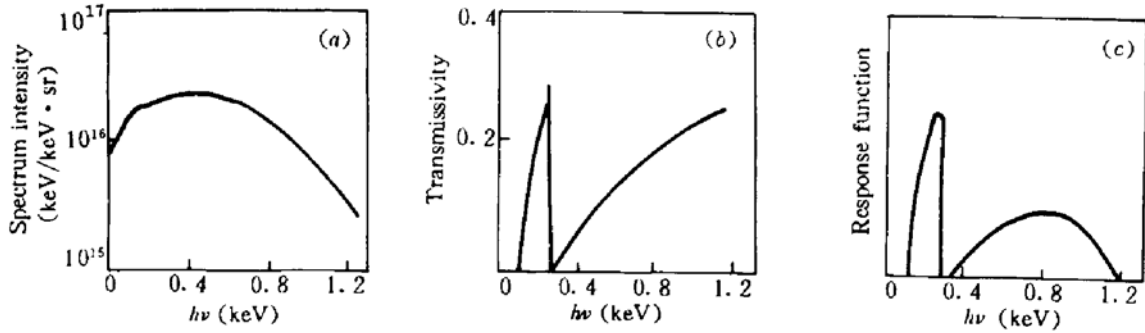


Fig. 1 The sub-keV X-ray spectrum detector channel energy response function

(a) energy spectrum; (b) filter transmissivity; (c) response function of a filter

掠射角,用 $\theta_c$ 表示,如图2(b)所示。当进一步增大入射角(即 $i > i_c$ 时),X光全部反射,如图2(c)所示。根据经典理论计算,临界掠入射角 $\theta_c$ 表示为

$$\theta_c = \sqrt{\frac{n_e e^2 \lambda^2}{\pi m_e c^2}} \quad (1)$$

由(1)式可知,反射镜材料确定后,对于特定波长的入射光,必定存在一个相应的临界掠入射角。当入射波长大于这个特定波长时,入射光全部被界面反射;当入射波长小于特定波长时,只有极少部分产生反射,大部分光产生折射,称这个特定波长为平面镜的截止波长。利用掠入射平面反射镜对低能X光的这种反射和截止现象,制成低能X光的色散滤波器,从而消除高能尾部的贡献。

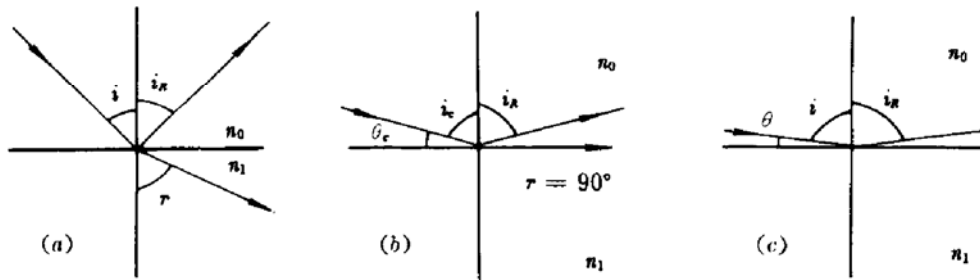


Fig. 2 The principle schematic of the X-ray planar mirror

(a)  $i < i_c$ ; (b)  $i = i_c$ ; (c)  $i > i_c$

由(1)式我们得到

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\theta_c^2 \pi m_e c^2}{n_e e^2}} \quad (2)$$

由此可知,平面镜截止波长 $\lambda_c$ 与掠入射角 $\theta_c$ 成正比,与电子密度成反比。 $\theta_c$ 确定后,当要求截止波长较大时,则应选择电子密度小的材料做镜面材料。在本文的亚千能谱测量中,高能尾部贡献较大的是低能(长波长)道,故选用电子密度低的Be、C和Si等做镜面材料最合适,其次是Fe和Ni等材料也较好<sup>[2,3]</sup>。

根据目前的工艺水平,我们选用Ni作为镜面材料,因为Ni的理化性能好,不活泼,不易氧化,刚性也好,易于涂敷和加工。

### 3 X 光掠入射镍平面反射镜的制备工艺

该设备对所使用的镍(Ni)平面反射镜的要求是极为严格的,特别是表面粗糙度要求 $\leq 1.5$  nm。而目前光学上常用的反射镜表面粗糙度一般在 10.0~20.0 nm 左右,相当于高出一个数量级,给光学加工带来很大难度。这就要求在光学加工工艺上采取特殊的工艺方法。

镍平面反射镜是以锻造铝合金为基底材料,表面进行化学镀镍后再经过光学精密加工而实现的。

镍平面反射镜的零件图示于图 3。

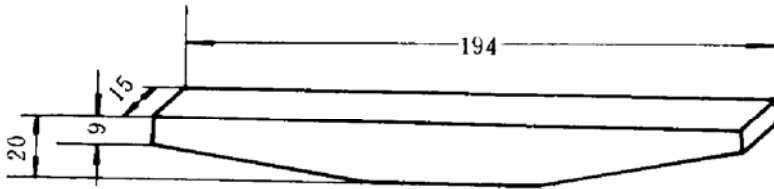


Fig. 3 Ni planar mirror

镍平面反射镜加工工艺的主要关键是:

(1) 基底材料的选择与稳定化处理 我们选择了致密度和稳定性较好的 LD<sub>2</sub> 铸造铝合金为基底材料,在毛坯成型与机械加工过程中要经过几次退火时效、稳定化处理,以保证在光学加工中的材料稳定性。

(2) 零件的粗成型 是用机械加工方式来完成零件外形尺寸的加工及相应的位置尺寸公差检制,其中支承平面镜转动的销孔和螺丝孔也要同时完成。

(3) 光学精密研磨 为了便于光学加工,使零件达到平面度、平等度、垂直度的要求,并使表面粗糙度达到一定水平。我们将机械加工过的零件按 12 块凑成一盘进行光学研磨,而不能采用单块加工法。研磨中的磨料按不同号数的金刚砂逐号进行,添加剂不用水而采用煤油。研磨达到要求后转入镀镍。

(4) 化学镀镍 在化学镀镍中要严格地清洗零件表面及控制镍的纯度和镀制过程中镍层的致密度、均匀性并尽量加大所镀镍层的厚度,同时要保护销孔和螺孔不被镍所涂镀,在镀镍后要进行稳定化处理。

(5) 镀镍后的细磨 零件镀完镍层后仍按镀镍前的排列方式上盘,并要严格保证上盘后被加工面的共面性,因镍层厚只有 0.10 mm 左右,如共面性不好,细磨中易将镍层磨掉。在细磨中只要将镀镍表面上的一些微小疵病去除为止。

(6) 抛光 抛光方法与一般光学抛光大致相同,只是在抛光中所用磨辅料不同并相当严格。抛光初始阶段可用氧化铬作为抛光磨料,抛光所用的胶盘要软。我们用的抛光胶相当半号胶,即使用经过过滤的玉门三号(或胜利 1 号)与特级松香按 1:3.5 比例配制而成。当被抛光表面面形及粗糙度达到一定程度后,为进一步提高表面精度,可用 0.5 mm 的高纯氧化铝抛光液进行抛光,要适当控制抛光液的浓度,注意表面面形及粗糙度的变化,及时把握住最佳的抛光时机下盘。

抛光后的镜面检验,加工者可在聚光灯下看不出表面有任何疵病及微亮道子的情况下进行定量测试。我们先用半定量的 Nomaski 干涉显微镜测试后再用可定量的 Talystep 阶梯厚度测量仪进行定量测试,测试曲线如图 4 所示。检测结果表明:镜面表面粗糙度 $\leq 1.5$  nm。

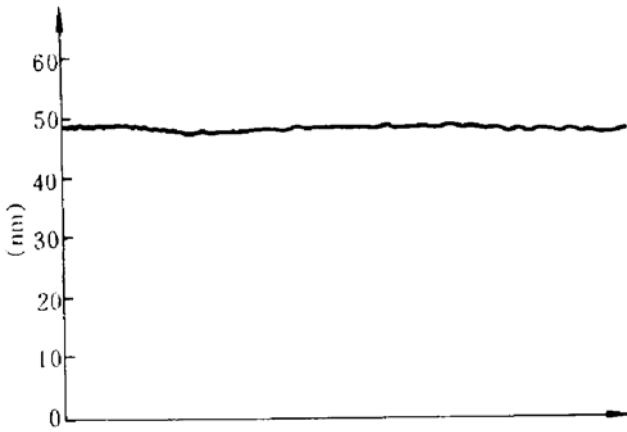


Fig. 4 Surface roughness curve of the Ni planar mirror

### 4 测试与应用

长春光机所研制成功的高精度 X 光掠入射镍平面反射镜由西南核物理与化学研究所测试与标定。在一定的强源条件下,在 5°掠入射角时,其反射率高于 54%<sup>[4]</sup>。

该反射镜系统在“神光”装置上进行了实地激光打靶实验。我们首次把镍平面镜安装在亚千 X 光能谱仪上诊断亚千 X 射线<sup>[4]</sup>。实验中,对镍平面镜进行了考核使用,得到了预想的结果。

我们在同一谱仪中设置了两个相同条件的碳探测道,在其中一道安装镍平面镜装置(掠射角为 5°),进行对比测量,图 5 是平面镜实验装置示意图,两个碳探测道的脉冲信号通过叠加在同一台示波器上记录,图 6 是同一发实验两个碳探测道的两个脉冲信号记录照片。

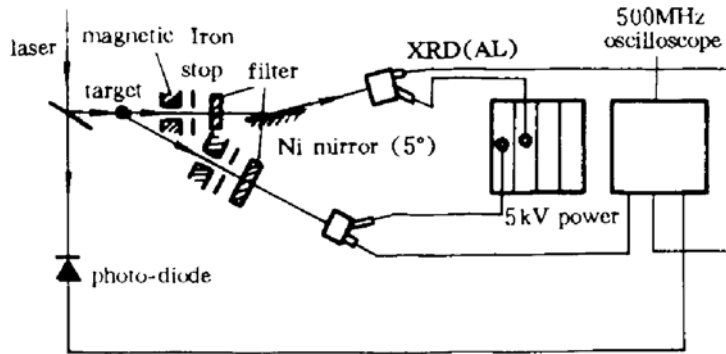


Fig. 5 Schematic of the experimental setup with two carbon detector channels, a Ni mirror with a 5° grazing angle is installed into one of the channels

根据对比实验,我们对 5°镍平面镜的反射率进行了估算。首先,我们假定碳道探测道的 5°镍平面镜全部消除高能尾部的贡献,碳滤片厚度为 2.17 μm,得到平面镜反射率为 59%。后来我们根据实验测量能谱,进行理论模拟计算,得到碳道加镍平面镜(5°),高能尾部的贡献仍占 10%左右。对反射率进行修正,得到穿过碳滤片(厚度 2.17 μm)的 X 光在 5°镍平面镜上的反射率约为 54%。这个数值和实验标定值一致。

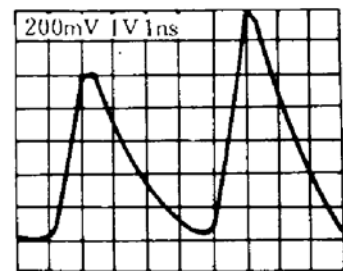


Fig. 6 Two C detector channel signals. The left is the signal of the Ni mirror-XRD with a 5° grazing angle and the right is the signal of the C-XRD

### 参 考 文 献

- 1 许顺生. 金属 X 射线学. 第一版. 上海: 上海科学技术出版社, 1964. 13~15
- 2 A. I. Mahanf. Reflection and refraction at Oblique incidence on a dielectric-metallic interface as a boundary value problem in electromagnetic theory. *J. O. S. A.*, 1956, 48(11) : 913~926
- 3 B. L. Henke, P. Lee, T. J. Tanaka. Low-energy X-ray interaction coefficients, photoabsorption, scattering and reflection, *Atomic Data and Nuclear Table* 27, New York Dr. Angela Li-scholz, 1982. 8~13
- 4 孙可煦, 马洪良, 徐和平等. X 光掠入射平面镜反射率标定及应用. *光学学报*, 1993, 13(10) : 934~939

## Manufacturing Technology of an X-ray Grazing Mirror System

Hu Jiasheng Zhang Jinghe Wang Baolin

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Changchun 130022)

Sun Kexu Ma Hongliang Xu Heping

(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

**Abstract** In this paper, the basic working principle of an X-ray grazing mirror system is introduced. An emphasis is placed on the manufacturing technology of the super-high accuracy mirror system. A Ni mirror system with less than 1.5nm surface roughness has been made out. The reflectivity of the Ni mirror system is more than 54% at a 5° grazing angle.

**Key words** planar mirror, manufacturing technology of mirrors



## 力科光电有限公司向您致谢

力科公司自 1992 年创办以来,受到光学界的关怀而不断发展,为答谢广大客户,力科公司将以最好的品质和服务,为国内外用户效劳。

- 1 非线性晶体: KTP, DKDP, KDP, LI, LBO, BBO;
- 2 激光晶体: Nd: YAG, Cr: Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;
- 3 光学材料: CaF<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub>, MgF<sub>2</sub> 等。
- 4 二维光学调整架,晶体抛光,镀膜服务

力科光电有限公司  
济南七里河路 32 号  
联系人: 祁建平

电 话: 0531-8931365  
传 真: 0531-8908274  
邮 码: 250100