

## X 光掠入射平面镜反射率标定及应用

孙可煦 马洪良 徐和平 郑志坚

唐道源 崔延莉 易容清

(西南核物理与化学研究所, 成都 610003)

胡家陞 张景和

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

## 提 要

本文在简介软 X 光掠入射平面反射镜基本工作原理及其制备的基础上, 着重阐述了镍平面镜的反射率标定过程, 给出了标定结果, 且用于激光-等离子体亚仟 X 光辐射谱测量, 提高了能谱测量精度.

关键词 掠入射, 平面反射镜, 反射率.

## 1 引 言

亚仟 X 光能谱测量, 我们采用滤波法. 亚仟 X 光能谱仪(Dante)由滤波片-X 射线二极管(F-XRD)阵列组成<sup>[1]</sup>. 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

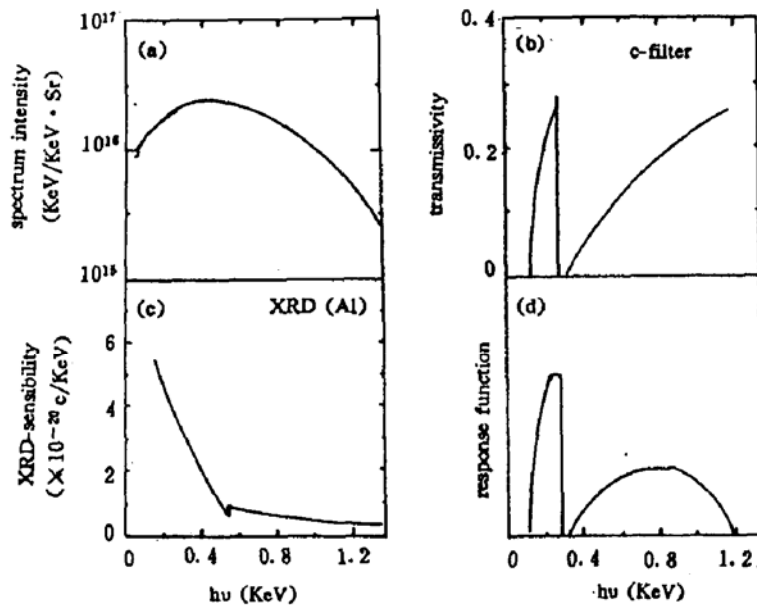


Fig. 1 The Sub-KeV X-ray spectrum detector channel energy response function, a. spectrum, b. filter transmissivity, c. XRD-sensitivity, d. response function

收稿日期: 1992年3月2日; 收到修改稿日期: 1992年6月12日

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). 这就给能谱测量带来了较大的误差. 过去, 通常采用理论计算方法扣除高能尾部贡献, 部分了解谱问题. 为了从根本上解决此问题, 国外在 70 年代末采用掠入射平面反射镜<sup>[2]</sup>, 消除高能贡献, 从而提高了能谱测量精度.

## 2 平面镜的工作原理

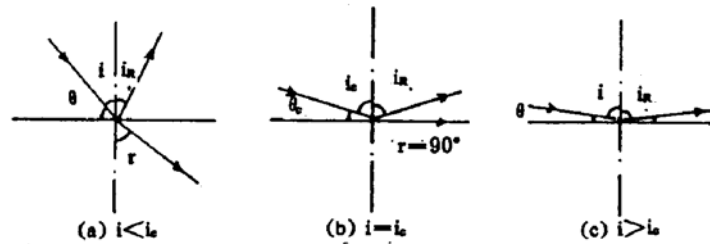


Fig. 2 The principle schematic of the planar mirror

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, 产生折射; 另一部分 X 光则被界面反射. 如图 2(a). 当入射角增大接近  $90^\circ$  时, 出现折射角  $r = 90^\circ$ , 此时称入射角为临界入射角, 用  $i_c$  表示, 如图 2(b) 所示. 进一步增大入射角(即当  $i > i_c$ ) 时, X 光不再产生折射而全部反射<sup>[3]</sup>, 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, 当反射镜材料确定后, 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; 波长小于这个特定波长时, 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, 消除高能尾部贡献.

## 3 平面镜的制备

由(1)式可得到平面镜截止波长与材料电子密度关系式:

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

由(2)式可知, 平面镜截止波长与掠射角  $\theta_c$  成正比, 与电子密度成反比. 当掠射角确定后, 要求截止波长较大时, 则应选择电子密度小的材料做镜面更有利. 在本文的亚能谱测量中, 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、Al 和 Si 等做镜面材料最为合适, 其次是 Fe、Cu 和 Ni 等材料也可以.

本文选用了 Ni 材料作为镜面材料. 这是由于 Ni 材料的理化特性较好, 不活泼、不易氧化; 刚性甚好, 粘带度不大, 易于加工是目前加工平面镜较为理想的材料.

平面镜加工精度要求十分高. 根据天文学上常用的 X 光平面镜的使用情况, 当平面镜加

工精度低(即镜面粗糙度  $h$  大)时,则增加镜面对 X 光的散射率,实践得出下述经验公式<sup>[6]</sup>

$$\varepsilon = (4\pi h \sin \theta / \lambda)^2 \quad (3)$$

式中  $\varepsilon$  为镜面对 X 光的积分散射率,  $h$  为镜面粗糙度(nm),  $\theta$  为掠射角. 由此可见,当镜面粗糙度增加时,镜面对 X 光的散射率急骤增加. 根据(3)式,若要求积分散射率小于 20%时,要求镜面加工粗糙度达 1 nm.

Ni 平面镜是由长春光学精密机械研究所加工的. 采用感度为 0.2 nm 的英国 Talystep 台阶仪测量表面粗糙度,镜面粗糙度  $\sim 1$  nm.

#### 4 平面镜的反射率标定

前面用经典理论描述了平面镜的基本工作原理,更详细的理论计算应考虑电子共振效应. 对于软 X 光、波长较短,不能把金属当作连续媒质来描述,必须考虑物质的实际的粒子本性,介质中的自由电子要运动,要与原子(或离子)相互作用,形成振荡,根据原子振荡模型<sup>[6]</sup>,平面镜材料的折射率应为 1.

$$n_c = 1 - \frac{n_e e^2 \lambda^2}{2\pi m_e c^2} f_1 - i \frac{n_e r_e \lambda^2}{2\pi} f_2 \quad (4)$$

式中实部相当于经典理论计算中的连续媒质的折射率,虚部相当于光波与原子振荡波相互作用时,媒质吸收的部份,  $f_1$  和  $f_2$  为原子散射因子,参看 Henke 表<sup>[7]</sup>.

由此可见,平面镜的反射率,除了与镜面加工精度有关外,还与镜面材料的物理特性有关,通常制做的平面镜,当其掠射角确定后,由(2)式计算给出的截止波长附近,其反射率不是突变,而是缓变. 为了获得平面镜反射率随入射光能量变化的真实曲线,必须对平面镜的反射率进行实验标定.

利用质子-荧光单色光源<sup>[8]</sup>作标定源,对我们加工的镍平面镜进行反射率标定. 标定装置如图 3 所示. 单色 X 光源由质子束[(200~300) kV, (1~2) mA]轰击荧光材料靶所产生的荧光提供,质子束来自高压倍加型加速器;光源强度由两个流气正比计数器监测;标定信号用 J350 型弱电流计记录(其感应灵敏度达  $10^{-16}$  A.)

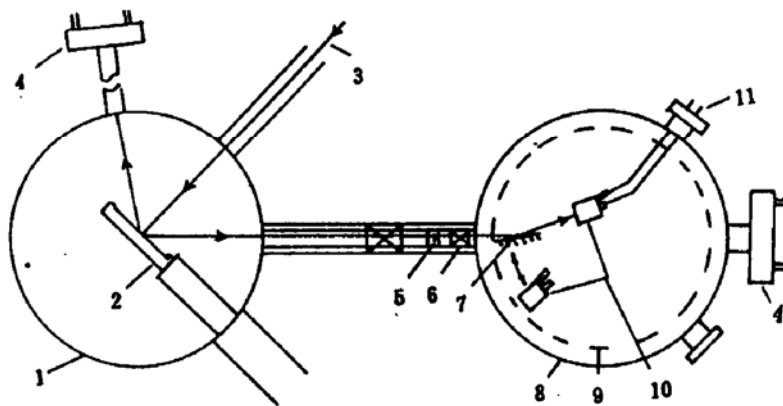


Fig. 3 The calibrating setup schematic. 1. Target chamber 2. Target 3. proton beam 4. proportional counter 5. filter 6. magnet 7. planar mirror 8. dectetor chamber 9. rotary table 10. XRD 11. singal leader

标定前,对平面镜镜面及 X 射线二极管灵敏面进行清洁处理,且在真空中置放一定时间,以利降低本底信号. 在一定的源强条件下,5°镍平面镜加 X 射线二极管的总探测灵敏度  $S_1(h\nu)$  由下式给出:

$$S_1(h\nu) = \frac{I_1(h\nu) - i_1}{\Phi_0(h\nu) \cdot h\nu \cdot \Delta\Omega_1 \cdot n} \quad (\text{C/KeV}) \quad (5)$$

式中  $I_1(h\nu)$  为当 X 光能量为  $h\nu$  时, 由  $5^\circ$  镍平面镜加 X 射线二极管的输出电流强度(A);  $i_1$  为平面镜探测系统的本底电流强度(A);  $\Phi_0(h\nu)$  为 X 光源总强度(photon/ $4\pi$ -sec);  $\Delta\Omega_1$  为探测系统对应光源的立体角因子;  $n$  为滤光片透过率.

在同样实验条件下, X 射线二极管的灵敏度为:

$$S_0(h\nu) = \frac{I_0(h\nu) - i_0}{\Phi(h\nu) \cdot h\nu \cdot \Delta\Omega_0 \cdot n} \quad (\text{C/KeV}) \quad (6)$$

则  $5^\circ$  镍平面镜的反射率为:

$$P = \frac{S_1}{S_0} = \frac{I_1 - i_1}{I_0 - i_0} \cdot \frac{\Delta\Omega_1}{\Delta\Omega_0} \quad (7)$$

表 1 和图 4 给出了  $5^\circ$  镍平面镜对 0.183 KeV 和 0.277 KeV 的 X 光的反射率标定结果. 图 4 同时给出了 Henke 等人<sup>[9]</sup>的实验结果及理论计算值.

Table 1 The calibrating result of the  $5^\circ$  Ni planar mirror reflectance

target element	characteristic energy (KeV)	source intensity (photon/ $4\pi \cdot \text{sec}$ )	mirror-XRD signal (A)	XRD signal (A)	mirror reflectance (%)
B	0.183	$3.51 \times 10^{13}$	$1.84 \times 10^{-14}$	$5.17 \times 10^{-14}$	58
C	0.277	$3.55 \times 10^{13}$	$3.52 \times 10^{-14}$	$1.12 \times 10^{-13}$	54

标定过程中, 加速器束流的相对偏差  $< \pm 5\%$ , 生成光源强度偏差  $< \pm 5\%$ , 电流信号测量误差小于  $\pm 5\%$ , 立体角因子误差小于  $\pm 1\%$ , 平面镜反射率标定误差为  $\pm 7\%$ .

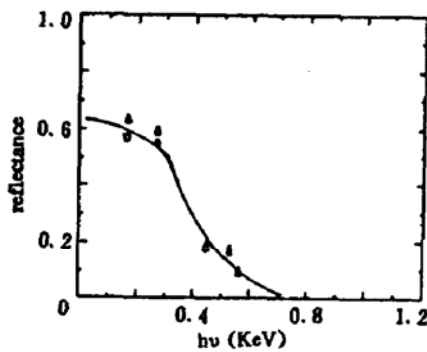


Fig. 4 The reflectance curve of the  $5^\circ$  Ni planar mirror

○ — experimental data    △ — from the Ref. 9

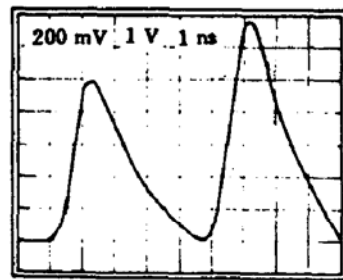


Fig. 5 Two C detector channel signals. the left pulse is the signal of  $5^\circ$  Ni mirror-XRD, the right pulse is the signal of the C-XRD

## 5 平面镜应用

1989 年 5 月, 在“神光”装置上的激光-黑洞靶实验中, 首次将镍平面镜安装到亚仟 X 光能谱仪上, 同时进行了考核和应用.

在 10 道滤光片-X 射线二极管能谱仪上, 使用两个同样厚度的碳滤光片, 其中一个装有  $5^\circ$  镍平面镜, 另一个不加平面镜, 两道信号通过叠加用同一台示波器记录, 结果如图 5 所示. 根

据这两个脉冲信号的计算结果,  $5^\circ$  镍平面镜对 230~277 eV 能量的 X 光, 其平均反射率为 53%, 这与标定结果完全符合.

根据实验测量得到的亚仟 X 光能谱, 对  $5^\circ$  Ni 平面镜进行了模拟计算, 如图 6 所示, 高能尾部约占探测信号的 8%. 而不用平面镜的碳道高能尾部对信号贡献约占 40%. 由此可见平面镜用于亚仟 X 光能谱仪, 可大大提高能谱测量的精度.

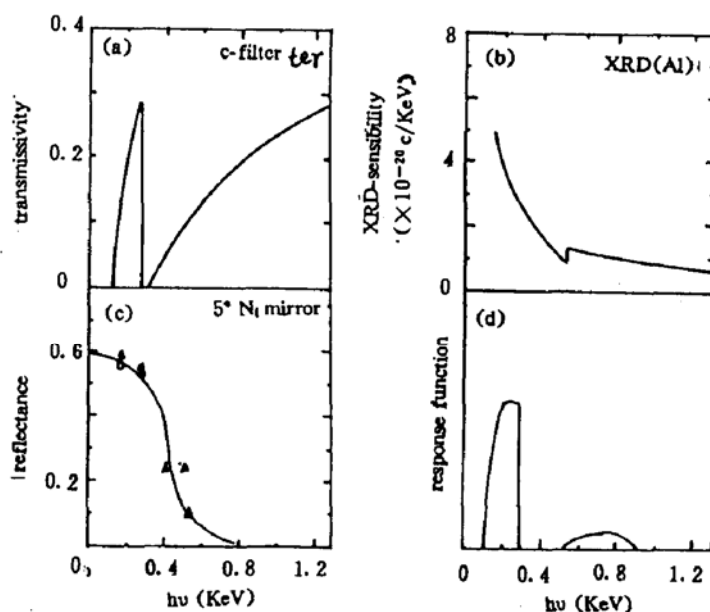


Fig. 6 The energy response function of  $5^\circ$  Ni mirror C-filter and XRD of the Dante spectrometer

## 6 结束语

$5^\circ$  镍平面镜的反射率标定结果, 对 0.183 KeV 的光子, 其反射率为 58%. 对 0.277 KeV 的光子, 其反射率为 54%, 标定误差为  $\pm 7\%$ .

$5^\circ$  Ni 平面镜用于亚仟 X 光能谱测量, 可大为改善能谱的探测精度. 特别是低能探测道, 可把高能尾部对信号的贡献从 30~50% 降低到 8~10%.

为了进一步降低或消除高能尾部对信号的贡献, 需用更低 Z 元素做镜面材料. 例如 Be 和 C 等材料, 只要镜面加工精度达 1 nm 左右, 选择适当的掠射角, 即可基本消除高能尾部对信号的贡献.

在平面镜反射率的标定过程中, K-400 加速器运行人员及质子-荧光源运行人员给予了积极地协作. 在此, 一并表示衷心的感谢!

## 参 考 文 献

- [1] 孙可煦, 杨建国, 郑志坚, 用于激光等离子体诊断的亚仟 X 射线能谱仪. 强激光与粒子束, 1990, 2(1): 16~22
- [2] R. A. Heinle, K. G. Tirsell, Filtered-Mirror Sub-KeV X-Ray measurement system. *laser program Annual Report*, 1979, 5.5~5.7
- [3] 许顺生, 金属 X 射线学, 第 1 版, 上海, 科学技术出版社, 1964, 13~15
- [4] 母国光, 战元龄编, 光学, 第 1 版, 北京, 人民教育出版社, 1981, 20~52
- [5] B. L. Henke, E. S. Ebsu, Low energy X-Ray and electron absorption within solids (100-1500 eV Region),

Edited by C. L. Grant

- [6] 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, 46(11) : 913~926
- [7] B. L. Henke, P. Lee, T. J. Tanaka, *et al.*, Low-energy X-ray interaction coefficients, photoabsorption, scattering and reflection,  $E=100\sim 2000$  eV,  $z=1\sim 94$ , Atomic Data and Nuclear Table 27, 1982, 8~13, New York (Dr. Angela Li-scholz)
- [8] 祁兰英, 张文海, 李三伟等, 质子激发 X 光源及其应用, *强激光与粒子束*, 1991, 3(4) : 503~511
- [9] B. L. Henke, Low energy X-ray spectroscopy with crystals and multilayers, University of Hawaii, Department of physics and astronomy, Honolulu, Hawaii 96822

## The reflectance of X-ray grazing planar mirror and application

SUN Kexu    MA Hongliang    XU Heping    ZHENG Zhijian

Tang Daoyuan    CUI Yanli    YI Rongqing

(*Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry*)

HU Jiasheng    ZHANG Jinghe

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

(Received 2 March 1992; revised 12 June 1992)

### Abstract

In this paper, we briefly introduce basic principle and the preparation of soft X-ray grazing planar mirror. The calibrating reflectance process are principally described. The scaling results are given. Finally, the planar mirror are used to measure sub-KeV X-ray spectrum of the laser-plasma interection. The spectrum measurement precision are improved.

**Key words** grazing, planar mirror, reflectance.