

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0379-04

软 X 光平面镜反射率标定实验

孙可煦 易荣清 黄天 杨家敏 江少恩 崔延莉 丁永坤 张保汉

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心高温高密度等离子体物理国家重点实验室, 绵阳 621900)

崔明启 朱佩平 赵屹东 黎 刚

(中国科学院高能物理研究所同步辐射实验室, 北京 100039)

摘要: 报道了掠入射软 X 光平面镜反射率标定实验。实验利用北京同步辐射装置(BSRF)3W1B 束线及反射率计靶室, 在束流 35 mA~110 mA、贮存环电子能量 2 GeV 专用光运行模式下, 在 50 eV~850 eV 能区分四个能段, 进行了 5°掠入射 Ni 平面镜反射率标定实验。标定过程中用高灵敏度无死层的硅光二极管代替 X 射线二极管作探测器, 输出信号提高 2~3 个量级, 可标定能区从 150 eV~270 eV 拓展到 50 eV~850 eV, 给出了完整的 5°Ni 平面镜反射率标定曲线。最后把实验数据与理论计算作了比对并进行了分析。

关键词: 同步辐射; 平面镜; 反射率; 标定

中图分类号: TB96 文献标识码: A

1 引 言

在激光惯性约束聚变(ICF)实验研究中, 软 X 光能谱测量极为重要, 我们通常采用滤波法, 即由滤光片-X 射线二极管阵列(F-XRDs)制成软 X 光能谱仪(SXRES)^[1]。软 X 光能谱仪是一种比较经典的软 X 光能谱仪, 它具有一定的能量分辨和时间分辨, 已被许多相关实验室采用。但它有一个严重的缺点, 即每个探测道都存在不同程度的尾部影响, 特别是低能道, 高能尾部贡献有时竟与有用信号

不相上下, 图 1 为 B-XRD 探测道系统能量响应曲线 $R(E)$, $R(E) = \tau(E)S(E)$, 其中 $\tau(E)$ 为滤光片的透过率, $S(E)$ 为 X 射线二极管阵列的能量灵敏度。由此可见, 如不采取适当措施, 能谱测量结果将会出现严重失真。采用理论计算方法扣除高能尾部贡献, 可部分解决能谱测量问题。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作色散元件^[2], 基本消除高能尾部贡献, 从而提高了软 X 光能谱测量精度。

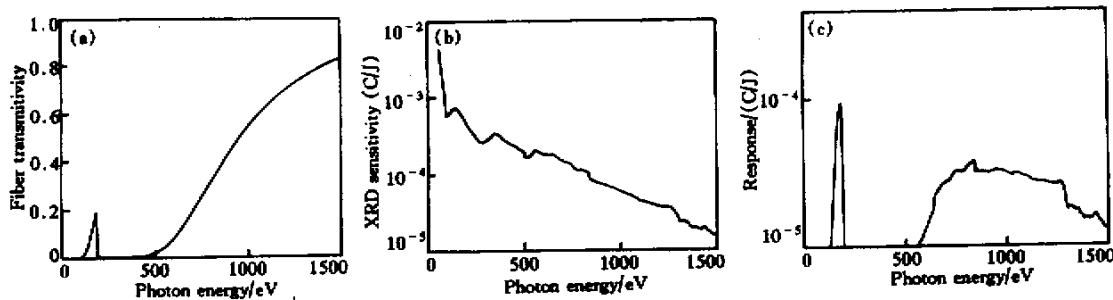


Fig. 1 The energy response of detection channel of SXRES. (a) Transmittivity of 1.5 μm thickness B-filter; (b) Sensitivity of XRD (Al); (c) Response function of the B-XRD channel

2 平面镜工作简介

当软 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, 当入射角增大接近 90° 时, 出现折射角等于 90°, 此时称入射角为临界入射角, 进一步增大入射角, 即入射角大于临界入射角时, X 光不再产生折射而全部反射。软 X 光掠入射平面反射镜就是利用这个原理工作的^[3]。根据经典理论计算, 临界

* 国家高技术 863-416-3 资助课题。

收稿日期 2000-12-21; 收到修改稿日期 2001-04-04

掠入射角 θ_c 可表示为

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

式中 n_e 为介质电子密度, e 为电子电荷量, m_e 为电子质量, λ 为 X 光波长, 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, 而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, 制成滤波法软 X 光能谱仪低能道 X 光的色散器, 达到消除高能尾

部贡献的目的。如图 2 表示的是硼探测道加 5°Ni 平面镜的能量响应函数 $R(E) = \eta(E)S(E)P(E)$, 其中 $P(E)$ 为 5°Ni 平面镜的标定反射率曲线。由此可见硼探测道加 5°Ni 平面镜后, 基本消除了高能尾部的贡献。关于平面镜更详细的理论计算还要考虑电子共振效应, 对于软 X 光(波长短), 不能把金属材料当作连续媒质描述, 必须考虑物质实际的粒子本性, 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, 计算中要用到复变函数, 较复杂, 在此不再述说。本文主要描述平面镜的标定实验及其标定结果。

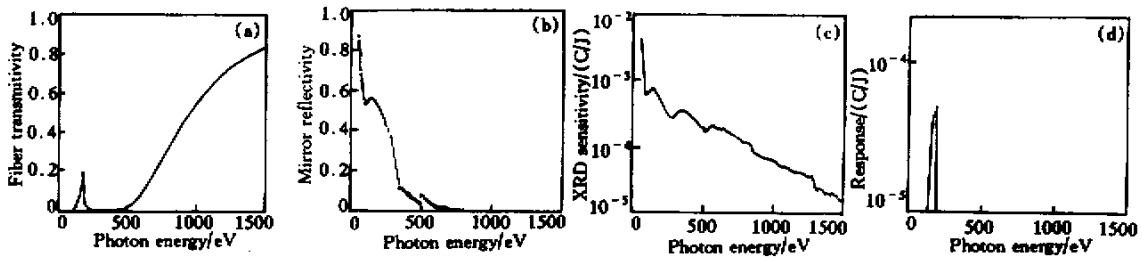


Fig. 2 The energy response curve of B-XRD with 5°Ni mirror: (a) Transmittivity of B-filter; (b) Reflectivity of 5°Ni mirror; (c) Sensitivity of XRD; (d) Function B-detection channel

3 实验条件

10 年前, 我们曾经对 5°Ni 平面镜做过反射率标定, 当时苦于无现成的高强度单色 X 光源, 我们特地研制了质子荧光源^[4], 即利用 K400 加速器加速质子, 轰击不同荧光材料靶, 如 B、C、Ti、Cr、Cu 等, 产生特征线荧光。虽然总通量(4π 立体角)可达 $(10^{12} \sim 10^{13}) \text{s}^{-1}$, 但实际到达标定探测器的有效光通量仅为 $(10^6 \sim 10^7) \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, 以 X 射线二极管灵敏度标定为例, 其输出电流约 10^{-14}A 左右, 信噪比较差, 很难做平面镜反射率标定, 只能在 B 和 C 两个特征能量点勉强测到标定信号^[5]。

同步辐射(SR)软 X 光源具有其它光源无法比拟的优点, 如通量密度高(在 1% 能谱带宽范围内达 $10^{13} \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2} \sim 10^{14} \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2}$), 准直性好, 发散角小(水平方向 $7.6 \times 10^{-8} \text{mrad}$), 稳定性高(束流寿命 15 h ~ 20 h), 还具有脉冲时间特性[脉宽(0.2 ~ 0.3) ns, 频率 1 MHz]等等^[6]。1998 年 BSRF-3W1B 软 X 光束线建成, 作为标定源, 立即显示出它的优越性, 1999 年我们首次利用 3W1B 束线进行了平面镜反射率标定, 并在 150 eV ~ 270 eV 能区获得连续标定结果。

4 平面镜的反射率标定

从 1999 年平面镜反射率标定结果看(参见图 5), 虽然标定能点比以前增加了许多, 但集中在一段(150 eV ~ 270 eV)能区, 仍不能给出完整的反射率曲线。当时存在两方面困难, 一是这段能区外无合适的滤光片, 特别是 270 eV ~ 400 eV 能区更是如此; 二是平面镜配置的探测器是 X 射线二极管, 而 X 射线二极管是一种灵敏度偏低的探测器, 用它作平面镜反射率标定探测器, 无法获得具有一定信噪比的信号。为了获得平面镜反射率完整的标定曲线, 2000 年 6 月, 我们对平面镜装置进行了改进, 用美国 IRD 公司生产的无死层硅光二极管(AXUV-

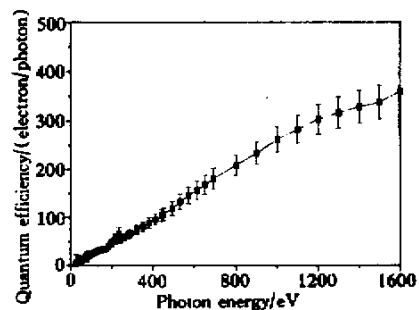


Fig. 3 The calibration curve of AXUV-100 quantum efficiency

$^{100}\text{J}^{71}$ 代替 X 射线二极管作平面镜的探测器,它的量子效率参见图 3,显然比 X 射线二极管灵敏度提高 2~3 个量级,从而,标定能区从 150 eV~270 eV 拓展为 50 eV~850 eV,获得较好的平面镜标定数据。标定装置见图 4。图 5 给出 6 块 Ni 平面镜反射率的标定曲线。

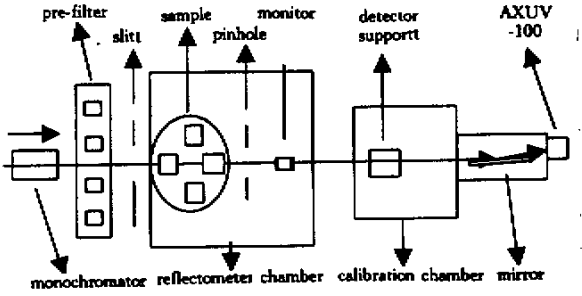


Fig. 4 Setup of the energy response calibration for soft X-ray detection elements

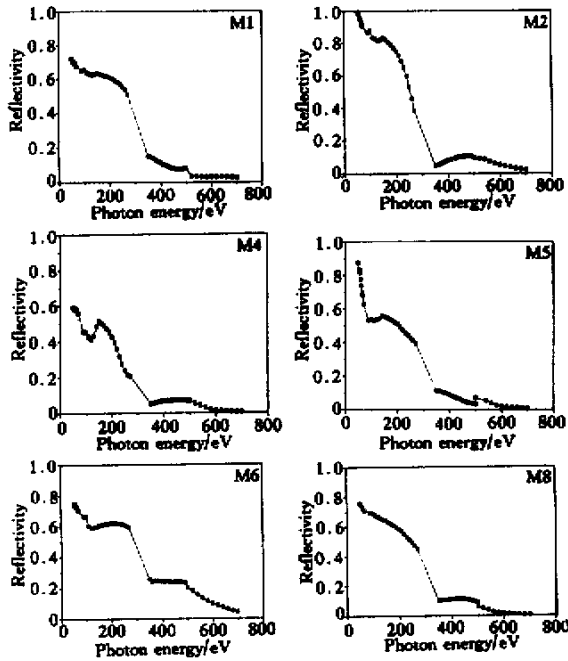


Fig. 5 Reflectivity calibration curve of six pieces of Ni-mirror

5 讨 论

从 5°Ni 平面镜反射率标定结果看,其截止能量并不像理论计算值那么高,截止能量计算值约在 550 eV 附近,而实验值是在 250 eV~350 eV 之间,参见图 6。观察所有平面镜标定曲线(见图 5),发现它们有一个共同的规律,即 5°Ni 镜反射率下降段都

出现在 250 eV~350 eV 之间,当我们把 5°Ni 镜的标定值与 5°C 镜的理论计算值作比较时[见图 6 (b)],发现它们惊人地相似,尤其在 250 eV~350 eV 能区。这说明 5°Ni 镜表面附有 C(碳)层,镜面在大于 C 的 K 吸收边能量附近大量吸收 X 光,造成反射光大大减少。C 层来源于真空泵油汽的蒸发,油汽附着在 Ni 镜表面,当我们采取酒精类常规清洗液时,很难将附着在镜面上的油汽完全去除,特别是平面镜长期在真空中使用,已形成厚厚的一层油汽沾污膜,甚至渗透入镜面材料内,更难清除。

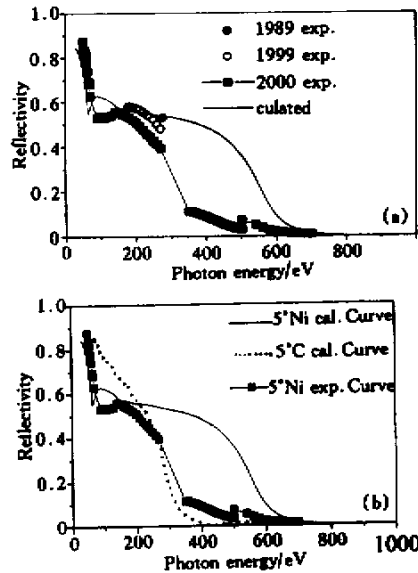


Fig. 6 (a) The reflectivity calibration curve of 5°Ni mirror ; (b) The reflectivity calibration value of 5°Ni mirror and 5°C mirror

图 6 (a) 给出同一批加工的 Ni 镜的三次标定数据,其中 \circ 和 \blacksquare 同为 5 号镜子的标定数据,并且都是利用 BSRF-3W1B 束线标定的, \circ 是用 X 射线二极管作平面镜装置的探测器,由于 X 射线二极管灵敏度低,标定信噪比低,限制了标定能区。 \blacksquare 是用 AXUV-100 作探测器,AXUV-100 灵敏度高,信噪比好,拓展了标定能区,基本获得了平面镜反射率完整的标定曲线,且置信度也得到提高。 \bullet 是 10 年前利用质子荧光源标定在 180 eV 和 280 eV 处的结果,由于当时镜子新加工,在这两个能点处与计算值符合。与目前标定结果比较,尤其在 280eV 能点,反射率明显偏低。

结束语 掠入射 Ni 平面反射镜经过长期真空中使用,其反射率标定结果表明,平面镜反射率下降并不

严重(见图5),而是截止能量变化较大(参见图6)。根据理论计算,5° Ni 平面镜的截止能量应在 550 eV 附近,实际标定结果显示,截止能量在 250 eV~350 eV 之间。分析认为,这是真空油污造成的。吸附在镜面的真空油由 C、H、O 等元素组成,主要成分是 C,因此,Ni 平面镜工作时在 C 的 K 吸收边能量附近时大量吸收 X 光,从而 Ni 镜标定反射率显示如同 C 镜一样的反射率曲线[参见图 6(a)]。这提示我们,其一,平面镜使用过程要注意沾污问题;其二,平面镜反射率必须用标定值,不能用计算值代替。

在 BSRF-3W1B 束线上所做的软 X 光掠入射平面反射镜反射率标定实验,受到中国科学院高能物理研究所的各级领导及加速器运行人员的关心、支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

[1] Sun Kexu, Yang Jianguo, Zheng Zhijian. A sub-keV X-ray spectrometer used in laser plasma interaction

experiments. *High Power Laser and Particle Beams*(强激光与粒子束),1990,2(1):16~22(in Chinese)

[2] Heinle R A, Tirse H K G. Filtered-mirror sub-keV X-ray measurement system. *Laser Program Annual Report*, 1979, 5.5~5.7

[3] Xu Shunsheng. *X-Ray for Metals*(金属 X 射线学), Shanghai: Science and Technology Press, 1964. 13~15(in Chinese)

[4] Qi Lanying, Zhang Wenhui, Li Sanwei *et al.*. A X-ray source excited by protons and its applications. *High Power Laser and Particle Beams*(强激光与粒子束), 1991, 3(4):503~511(in Chinese)

[5] Sun Kexu, Ma Hongliang, Xu Heping *et al.*. The reflectance of X-ray grazing planar mirror and application. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1993, 13(10):934~939(in Chinese)

[6] Cui Mingqi, Liu Libing, Xu Wenxuan *et al.*. Fine adjustment for the Beijing synchrotron radiation facility-3B1 beam. *High Energy Physics and Nuclear Physics*(高能物理与核物理), 1992, 16(8):673~678(in Chinese)

[7] Cui Congwu, Cui Mingqi, Zhu Peiping *et al.*. The measuring system for soft X-ray absolute intensity and its calibration. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 1998, 22(2):180

Reflectivity Calibration of Soft X-Ray Planar Mirror in the BSRF

Sun Kexu Yi Rongqing Huang Tianxuan Yang Jiamin Jiang Shaoen Cui Yanli
Ding Yongkun Zhang Baohan

(National Key Laboratory of High Temperature and High Density Plasma Physics, Laser Fusion Research Centre, The Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

Cui Mingqi Zhu Peiping Zhao Yidong Li Gang
(Synchrotron Radiation Laboratory, Institute of High Energy Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

(Received 21 December 2000; revised 4 April 2001)

Abstract: The calibration experiment of glancing incidence soft X-ray planar mirror reflectivity is reported. The Beijing synchrotron radiation facility(BSRF)-3W1B beam line and target chamber with reflectometer was used. Under the specific operation mode of beam current 35 mA~110 mA, the storage ring electron energy 2 GeV, photon energies 50 eV~850 eV. 50 eV~850 eV energy region was divided into four energy sections. The calibration experiment for reflectivity of 5° grazing incidence Ni planar mirror was done. High sensitivity silicon photodiode without dead layer was used as detector replacing X-ray diode during the calibration. Therefore, 2 to 3 orders of magnitude of the signal-noise ratio are increased, and the calibration region is expanded from 150 eV~270 eV to 50 eV~850 eV. The entire calibration curve for 5° Ni planar mirror reflectivity is given. The values of experiment and theoretical calculation are compared and analyzed.

Key words: synchrotron radiation; planar mirror; reflectivity; calibration