

文章编号 1004-924X(2003)04-0349-05

# 多种材料软 X 光平面镜反射率标定

孙可煦<sup>1</sup>, 崔延莉<sup>1</sup>, 易荣清<sup>1</sup>, 江少恩<sup>1</sup>, 黄天日<sup>1</sup>, 杨家敏<sup>1</sup>, 王永坤<sup>1</sup>,  
崔明启<sup>2</sup>, 朱佩平<sup>2</sup>, 赵屹东<sup>2</sup>, 黎刚<sup>2</sup>, 张景和<sup>3</sup>

- (1. 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, 四川 绵阳 621900;  
2. 中国科学院 高能物理研究所 同步辐射实验室, 北京 100039;  
3. 哈尔滨工业大学 精密工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 利用北京同步辐射装置(BSRF)-3W1B 束线及反射率计靶室, 在束流强度 40~120 mA、贮存环电子能量 2 GeV 专用光运行模式下, 做了不同材料掠入射平面镜反射率标定实验。标定过程用高灵敏度无死层的硅光二极管代替 X 射线二极管(XRD)作探测器, 使输出信号提高 2~3 个量级, 可标定能区从 150~270 eV 拓展为 50~1500 eV 能区, 对 C、Si 和 Ni 材料平面镜给出完整的反射率标定曲线, 最终把实验数据与理论计算比对并分析。

**关键词:** 同步辐射; 平面镜; 反射率; 标定  
中图分类号: O435.1 文献标识码: A

## Reflectance calibration of different material soft X ray planar mirrors by BSRF

SUN Ke xu<sup>1</sup>, CUI Yan li<sup>1</sup>, YI Rong qing<sup>1</sup>, JIANG Shao en<sup>1</sup>, HUANG Tian ruan<sup>1</sup>, YANG Jia min<sup>1</sup>,  
DING Yong kun<sup>1</sup>, CUI Ming qi<sup>2</sup>, ZHU Pei ping<sup>2</sup>, ZHAO Yi dong<sup>2</sup>, LI Gang<sup>2</sup>, ZHANG Jing he<sup>3</sup>

- (1. National Key Laboratory of Laser Fusion, Laser Fusion Research Center  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;  
2. Synchrotron Radiation Laboratory of Institute of High Energy Physics,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;  
3. The Department of Fine Mechanical Engineering,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Beijing synchrotron radiation facility(BSRF)-3W1B beam line with beam current of 40~120 mA, storage ring electron energy of 2 GeV and photon energy of 50~1500 eV was used to conduct experiments on the reflectance calibration method. The XRD detectors of planar mirror facility were replaced by AXUV-100, increasing the rate of signal versus noise by 2 to 3 orders of magnitude, and the calibration region of 150~270 eV has been expanded to be 50~1500 eV. The reflectivity calibration curves for C, Si and Ni planar mirrors are given, and the values of experiment and calculation are compared and analyzed.

**Key words:** synchrotron radiation; planar mirror; reflectance; calibration

收稿日期: 2003-01-20; 修订日期: 2003-03-14.

基金项目: 国家高技术 863-4163 资助项目

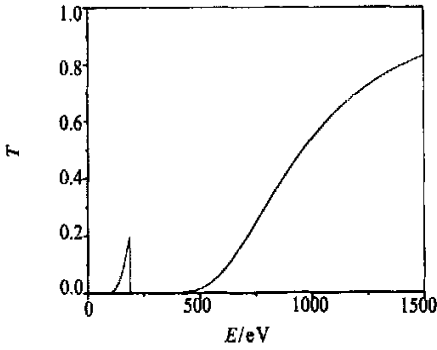
# 1 引言

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,通常采用滤波法谱仪测量,即由滤片-X射线二极管阵列(F-XRDs)构成软X光能谱仪(SXES)<sup>[1-2]</sup>,测量软X光能谱(100~1500 eV)。它的探测道系统能量响应函数:  $F(E) = \eta(E)S(E)$ , 其中  $\eta(E)$  为滤光片的透过率曲线,  $S(E)$  为XRD的能量响应灵敏度曲线。SXES是一种比较经典的软X光能谱仪,它具有中等的能量分辨和时间分辨,已被许多相关实验室采用。但它也有一个严重的缺点,即探测道存在不同程度的高能尾部影响。当做基频光实验时,还只是低能道高能尾部贡献比较突出,需适当采取措施进行修正。三倍频打靶后,随着激光能

量增加,打靶激光强度增大,ICF典型靶(材料-Au)发射谱的M带(2.2~3.5 keV)份额随之增大,亚千X射线能谱仪几乎所有探测道高能尾部响应份额都有大幅度增加,为了提高各探测道的测量精度,各探测道都必须使用掠入射平面反射镜,抑制高能尾部。利用不同材料平面镜做能量色散元件,消除不同探测道高能尾部。带平面镜探测道系统的能量响应函数:

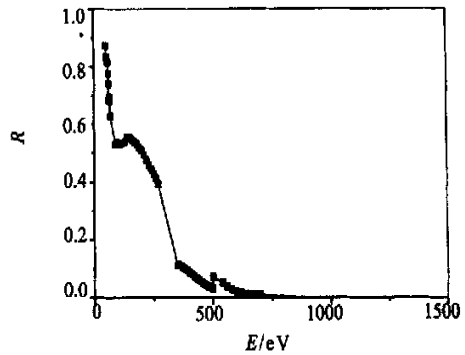
$$F(E) = \eta(E)R(E)S(E), \quad (1)$$

其中  $R(E)$  为平面镜的反射率曲线,带平面镜探测道系统的能量响应函数参见图1,图1为硼滤片(B)-XRD探测道加 $5^\circ$ 掠入射Ni平面反射镜能量响应曲线,由此可见,由于采用掠入射平面反射镜作色散元件<sup>[3-4]</sup>,基本消除了高能尾部贡献,从而提高了软X光能谱测量精度。



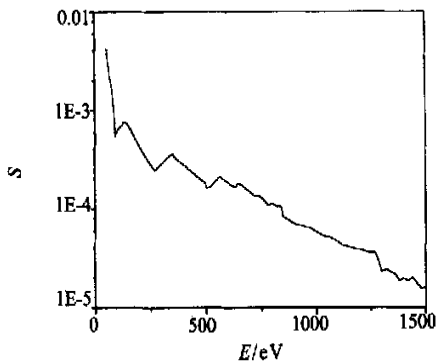
(a)硼滤片透过率曲线

(a)B-filter transmittivity



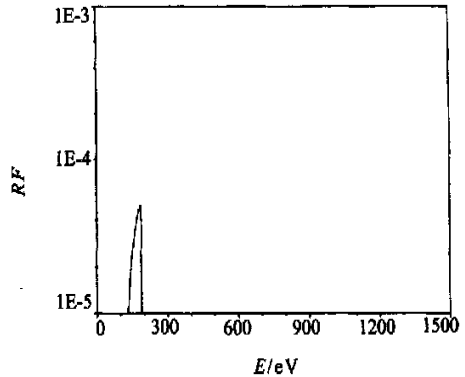
(b)镍平面镜反射率曲线

(b)Ni-mirror reflectivity



(c)铝阴极XRD灵敏度曲线

(c)Al-XRD sensitivity (c/J)



(d)硼探测道系统总响应函数

(d)Boron-channel response function (c/J)

图 1 硼探测道能量响应函数

Fig. 1 Boron channel energy response function

### 2 平面镜工作原理

在软 X 光波段, 由于固体材料介质折射率小, 且接近 1, 当软 X 射线从光密介质射向光疏介质时, 一部分 X 光进入光疏介质产生折射, 且折射角大于入射角, 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<sup>[5]</sup>。根据经典理论计算, 临界掠入射角  $\theta_c$  可表示为:

$$\theta_c = \sqrt{\frac{n_e e^2 \lambda^2}{\pi m_e c^2}}, \tag{2}$$

式中  $n_e$  为介质电子密度,  $e$  为电子电荷量,  $\lambda$  为 X 光波长,  $m_e$  为电子质量,  $c$  为光子速度。由(1)式可知, 当反射镜材料确定后, 对于特定波长的人射光, 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。对于确定材料的平面镜, 当入射光的入射角确定后, 特定波长  $\lambda$  可以表示为:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\theta_c^2 \pi m_e c^2}{n_e e^2}}, \tag{3}$$

此时, 这个特定波长  $\lambda$  也可称为平面镜的截止波长。利用掠入射平面反射镜对软 X 光的这种反射和截止现象, 作为软 X 光的色散元件, 与滤波法结合, 构成软 X 光的能谱仪新的响应函数, 达到消除高能尾部贡献的目的, 参见图 1。

### 3 实验条件

同步辐射(SR)软 X 光源具有其它光源无法比拟的优点, 如高强度、准直性、小发散角、高稳定性和脉冲时间特性等等<sup>[6]</sup>, 因此 SR 软 X 光源已成为软 X

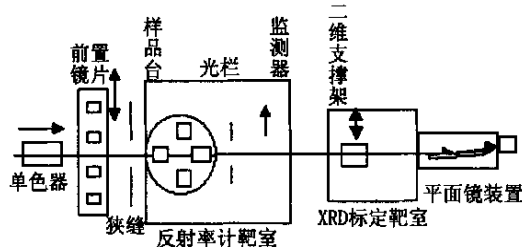


图 2 平面镜标定装置示意图  
Fig. 2 Calibration set-up for mirror

光探测元器件能量响应曲线标定不可替代的光源之一。实验利用北京同步辐射装置(BSRF)-3W1B 束线及其反射率计靶室, 在专用光运行模式下, 束流强度 40~120 mA, 贮存环电子能量 2 GeV, 单色光可用能区 50~1 500 eV。标定装置见图 2。

### 4 标定结果

平面镜装置配置的探测器是 XRD, XRD 是一种灵敏度偏低的软 X 光探测器, 用它作平面镜反射率标定探测器, 在较大能区范围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, 对平面镜标定装置进行了改进, 采用目前在光源上通常使用的标准探测器—硅光二极管 (AXUV-100)<sup>[7]</sup> (它是美国 IRD 公司生产的高灵敏度半导体硅光二极管, 由于无死层, 它的高灵敏度延伸至低能区, 并在 50~6 000 eV 能区基本具有平响应特征), 用它代替 X 射线二极管作探测器, 使输出信号提高 2~3 个量级, 使可标定能区范围从 150~270 eV 拓展为 50~850 eV。对 C、Si 和 Ni 等材料平面镜做了完整的反射率标定曲线, 图 3~图 5 为这三种材料平面镜反射率标定结果。

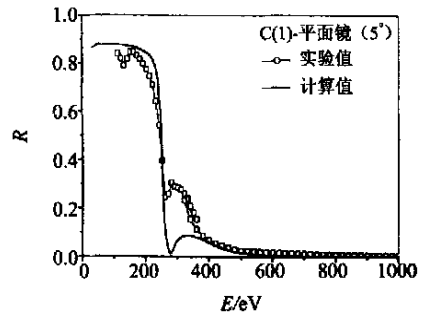


图 3 碳-平面镜(5°)反射率标定曲线  
Fig. 3 C-mirror reflectivity calibration curve

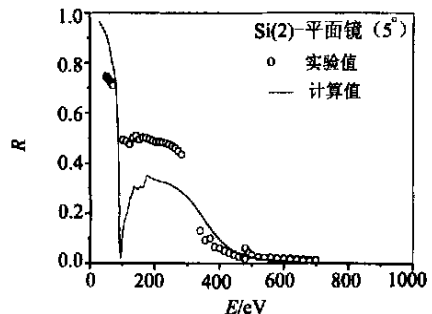


图 4 硅-平面镜(5°)反射率标定曲线  
Fig. 4 Si-mirror reflectivity calibration curve

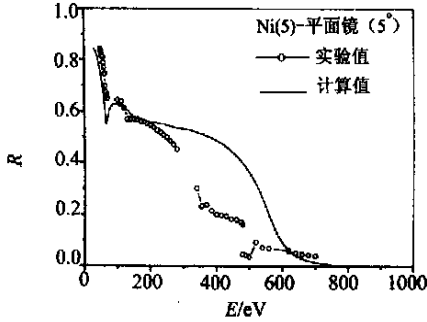


图 5 镍-平面镜(5°)反射率标定曲线

Fig. 5 Ni-mirror reflectivity calibration curve

## 5 讨论

以往 ICF 实验,在软 X 光能谱仪中,平面镜掠射角使用最多的为 5°,因此标定平面镜反射率时,也以 5°掠射角为基准。碳材料和硅材料平面镜均为新加工平面镜,在 5°掠射角情况下,标定曲线与计算曲线比较符合,参见图 3 和图 4。

镍材料平面镜为 10 年前加工,使用多年,它的反射率标定值与理论计算值很不符合,这可能是长期使用,平面镜表面油沾污严重造成的。从镍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,理论计算曲线截止能量约在 550 eV 附近,实验曲线截止能量在 250~300 eV 之间,参见图 5。在图 6 中同时给出 5°碳镜理论计算反射率曲线,由此可见,5°镍镜标定反射率截

止能量与 5°碳镜截止能量比较接近,这说明 5°Ni 镜表面附有 C 层,镜面在 C 的 K 吸收边能量附近大量吸收 X 光,造成反射光严重下降。平面镜长期使用在真空状态下,C 层来源于真空设备的油汽蒸发,油汽附在 Ni 镜表面,当采取酒精类常规清洗方法时,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,更难清洗。

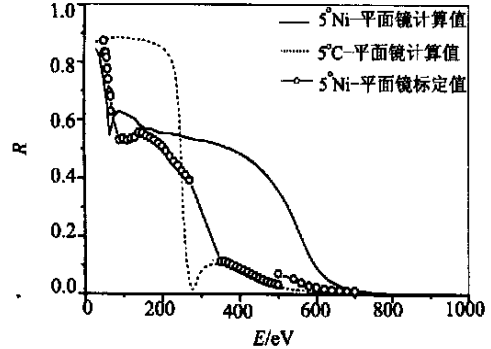


图 6 5°Ni 平面镜反射率标定值和理论计算值与 5°C 平面镜反射率计算值比较

Fig. 6 5°Ni-mirror calibration reflectivity volume comparison with calculation reflectivity curve of 5° Ni and C-mirror

致谢:在 BSRF-3W1B 束线上,软 X 光掠入射平面反射镜反射率标定实验,受到中科院高能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] 孙可煦,杨建国,郑志坚.用于激光等离子体诊断的亚千 X 射线能谱仪[J].强激光与粒子束,1990,2(1):16-22.  
SUN K X, YANG J G, ZHENG ZH J. High power laser and particle beams[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1990, 2(1): 16-22. (in Chinese)
- [2] TIRSELL K G. Time resolved sub-keV X ray measurements using filtered X ray diodes, UCRL-81478[Z], 1979.
- [3] 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[J].光学学报,1993,13(10):934-939.  
SUN K X, MA H L, XU H P, et al. The reflectance of X ray grazing planar mirror and application[J]. *Acta Optica Sinica*, 1993, 13(10): 934-939. (in Chinese)
- [4] HEINLE R A, TIRSELL K G. Filtered mirror sub-keV X ray measurement system[J]. *Laser Program Annual Report*, 1979, 5: 5.5-7.
- [5] 许顺生.金属 X 射线学[M].上海:上海科学技术出版社,1964.13-15.  
XU S S. *X-ray for metals* [M]. Shanghai: Shanghai Science Engineering Press Publish, 1964. 13-15. (in Chinese)
- [6] 崔明启,刘丽冰,徐文轩,等.北京同步辐射装置 3B1 束线精细调试[J].高能物理与核物理,1992,16(8):673-678.  
CUI M Q, LIU L B, XU W X, et al. High energy physics and nuclear physics[J]. *High energy physics and nuclear physics*, 1992, 16(8): 673-678. (in Chinese)
- [7] 崔明启,崔聪悟,朱佩平,等.软 X 射线绝对强度测量系统和它的标定[J].高能物理与核物理,1998,22(2):180-185.

CUI C W, CUI M Q, ZHU P P, *et al.* The measuring system for soft X ray absolute intensity and its calibration[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 1998, 22(2): 180-185. (in Chinese)

作者简介:孙可煦(1941-),男,上海人,1966年毕业于哈尔滨军事工程学院原子物理系,现在中国工程物理研究院工作,研究员,主要从事原子物理微观参数研究及激光聚变研究工作。

## 向您推荐《液晶与显示》期刊

《液晶与显示》是中国最早的液晶学科期刊,也是中国唯一的液晶学科和显示领域中综合性学术期刊。它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。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报、综合评述、信息与动态和产品信息等栏目集中报道国内外液晶学科和显示领域中最新理论研究、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。本刊是英国《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)和“中国科学引文数据库”、“中国科技论文统计源期刊”等国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊。

《液晶与显示》以创新性、综合性、实用性为办刊特色,其内容丰富,信息量大,涵盖面广,可读性强。既是启迪科技人员开拓创新思路的参考期刊,又是从事液晶和显示技术研究的广大科技人员、大专院校师生及相关领域的科技工作者进行学术交流的良好园地,也是图书、情报等部门必不可少的信息来源。《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿,将您的科技创新、产品信息、企业风貌通过这一窗口展示出来。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》为双月刊, A4开本, 80页, 国内定价 10.00元, 国内外公开发售。国际标准刊号: ISSN 1007-2780, 国内统一刊号: CN 22-1259/04, 国际刊名代码(CODEN): YYXIFY。广告经营许可证号: 200004100137。国内邮发代号: 12-203; 国外发行代号: 4868Q。同时,《液晶与显示》编辑部将竭诚为广大读者服务,随时办理订阅。

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登产品信息

地 址: 吉林省长春市人民大街 140 号	中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
《液晶与显示》编辑部	邮 编: 130022
电 话: (0431) 5261594	传 真: (0431) 5682346
E mail: yjxs@ciomp.ac.cn	网 址: www.ciomp.ac.cn