

XRD探测器和滤片在北京同步辐射 3B3中能束线上的标定

崔延莉¹ 易荣清¹ 杜华冰¹ 赵屹东² 崔明启² 郑雷²

1 (中国工程物理研究院激光聚变研究中心 绵阳 621900)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 利用北京同步辐射3B3中能束线,在国内首次实现了XRD X射线探测器灵敏度在2—6keV能区的标定,灵敏度的不确定度小于7%。另外中能束线的应用还极大地提高了滤片厚度的标定精度,其厚度的不确定度小于3.6%。

关键词 中能X光 同步辐射 XRD探测器 滤片

1 引言

在ICF实验研究中,激光等离子体产生的X光是一个重要的物理量和研究对象,定量测量X光发射的时间过程、总量和能量范围可以为ICF的研究提供重要的物理信息^[1-7],X光的测量方法有多种,其中无窗X-ray二极管(XRD)^[1]是一种性能较理想,时间响应快的X光探测器。过去,曾经在北京同步辐射装置的3W1B束线上对XRD探测器的能量响应进行标定,但是,由于该束线能量范围的限制,只实现了50—1500eV能区的标定^[2],根据ICF实验的需要,测量能区为50—6000eV,所以,1500—6000eV能区的标定也是非常重要的。滤光片在软X光能谱仪中是关键的元件之一^[1],所以它对于X光和X光谱的测量是非常重要的,过去确定滤光片的厚度有两种方法,第一种方法是根据称重的方法来确定滤片的厚度;另一种方法是通过测量X光的透过率来确定滤片的厚度,第一种方法误差较大,第二种方法对光源的要求较高,要求光源具有较高的能量分辨和强度,较小的高次谐波,测量探测器具有较大的线性动态范围。中能束线的建立,为确定滤片的厚度提供了重要的条件。

2 光源介绍

光源的结构

北京同步辐射3B3中能束线是中科院高能所与

中物院激光聚变研究中心共同投资,由中科院高能所同步辐射实验室承建的一台大型实验装置,该项目包括光束线前端区、光束线(前置镜、聚焦镜、精密狭缝、光束位置监测器、双晶单色器、真空差分系统和控制系统等),是我国建造的第1条同步辐射中能X射线光束线,用于1.5—6.0keV能区范围相关探测器等谱响应及灵敏度标定,以及该能区谱学方面的研究,具有重要的国防科学研究意义和基础科学研究意义。

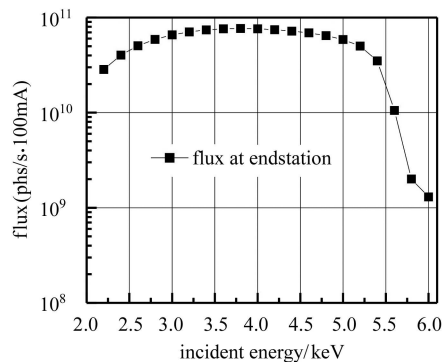


图1 光源的强度谱图

该束线利用前置镜进行能量截取、压弯柱面镜实现双向聚焦、两对平面分光晶体覆盖全部能量范围,并采用有效方法抑制高次谐波。从而获得的光源的技术指标如下:

能量范围: 1.5—6.0keV;

光谱强度: 10¹⁰—10¹¹ (phs/s);

能量分辨: 1000—3000;

高次谐波: 小于1% (2.1—6.0keV).

利用AXUV-100G硅光二极管, 给出了光源的强度谱如图1所示. 利用物质的吸收特性, 给出了光源的能量分辨, 如图2所示.

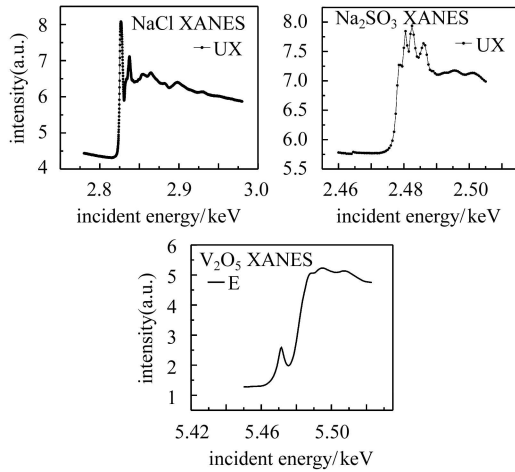


图2 光源的能量分辨测量结果

3 光源强度测量

光源的强度采用已经标定的AXUV-100G硅光二极管作标准进行定量测量, AXUV-100G硅光二极管利用电离室标准探测器^[4]进行标定. 实验结果如图3所示, 电离室标准探测器是由我们自行研制的, 其光源强度测量的不确定度小于5%. 为了提高标准探测器的标定精度, 降低不确定度, 采用了以下几种方法:

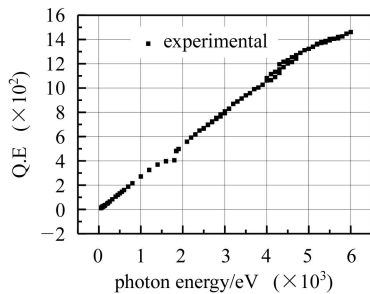


图3 AXUV-100G硅光二极管标准探测器的能量响应

1) 在电离室电流 I_{C1} , I_{C2} , I_d , I_{Ni} 的测量中选用美国进口的弱电流计6517A, 而且采用同一台电流计同时对上述电流进行测量, 为了提高电流测量的可靠性, 在光路中设置Ni网探测器, 随时监测光强的变化, 并且, 测量时电流测量取10次平均, 测量不确定度小于1.5%.

2) 为了降低气体压强梯度对实验结果的影响, 采用首先将电离室抽至高真空—— 3×10^{-4} Pa, 然后喷气

清洗3次, 补气至所需压强, 关闭进气排气阀门, 密封5min后开始取数.

3) 为了降低气体杂质的影响, 选用的工作气体都是高纯度的气体, 纯度达到99.99%.

4) 为了降低温度的影响, 作了专门的实验, 实验证明, 温度变化正负 1° , 在取对应能点的实验数据期间内其对相对不确定度的贡献小于0.2%.

5) 为了降低光源稳定性的影响, 对光源的能量分辨和高次谐波进行测量, 实验结果证明, 高次谐波可以忽略, 能点偏移全程小于1eV, 能量分辨好于1000. 在光路中增加 $2\mu\text{m}$ 的C滤片, 有效地消除了杂散光.

通过上面的方法和分析, 可以给出标准探测器光源强度测量的不确定度小于5%.

4 XRD探测器的标定

4.1 XRD探测器的标定方法

在3B3中能束线上, 利用新的标定装置, 光源的强度由标准探测器给出, 探测器的输出信号用6517电流计记录, 对于某一能点, 假如标准探测器的输出电流 I_a , 探测器的暗电流 I_c , 标准探测器的能量响应为 S_a , 被标定的探测器的输出电流 I_b , 那么, 被标定的探测器的灵敏度为

$$S_b = S_a(I_b - I_c)/(I_a - I_c).$$

为了保证探测器测到的光强与标准探测器测得的光强是一致的. 在光路中使用 $\phi 5$ 的光阑, 由于美国进口的AXUV-100G硅光二极管标准探测器的光阴极为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$, XRD探测器的光阴极为 $\phi 10$, 而光斑的大小为 $\phi 5$, 整个光斑都在测量范围内. 所以探测器测到的光强与标准探测器测得的光强是一致的.

XRD探测器的偏压是根据2002年在北京同步辐射源上的实验结果决定的, 选用的偏压是100V, 偏压为100V时, 探测器的输出已经饱和. 所以, 探测器的偏压没有必要选太高, 另外偏压太高, 暗电流也高, 会降低测量的信噪比. 所以, 选用100V的偏压, 即使探测器工作在饱和状态, 同时也获得了较高的信噪比, 在这次实验中, 暗电流小于 5×10^{-15} A. 信噪比大于100.

4.2 XRD探测器的标定结果

实验对Au阴极的XRD探测器和Al阴极的XRD探测器分别进行了标定, 实验结果如图4所示, 其中图4(a)是Al阴极XRD探测器在0.1—6keV能区的标定

结果, 图4(b)是Au阴极XRD探测器在2.1—6keV能区的标定结果. 在2.1—6keV能区, 由于探测器信噪比较高, 光源的能量分辨较高, 高次谐波较小, 暗电流较低, 实验结果非常理想. 从图4(a)中可以看出, 我们的实验结果与美国LLNL的实验结果一致, 尤其Au阴极的XRD探测器的标定, 观察到了许多吸收边. 对多个Al阴极的XRD探测器分别进行了标定, 发现它们的灵敏度并不完全一致, 说明每个XRD探测器都有它们的特殊性, 所以, 为了获得准确的实验数据, 每一个探测器都应该进行标定.

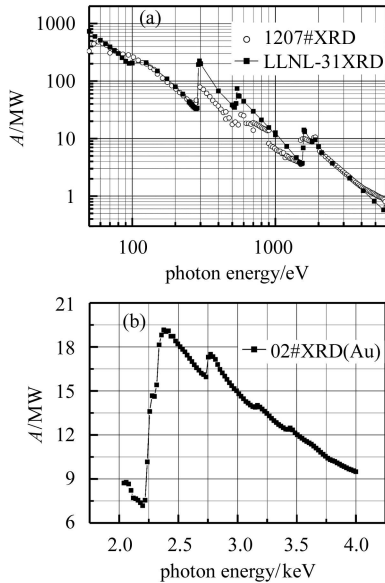


图4 XRD探测器灵敏度标定曲线
(a) Al阴极的XRD探测器灵敏度; (b) Au阴极的XRD探测器灵敏度.

4.3 XRD探测器标定的不确定度分析

根据第3节的分析, 标准探测器测量值的不确定度小于5%. 探测器的输出信号由6517A弱电流计给出, 其测量不确定度小于1%. 探测器的暗电流约为 5×10^{-15} A, 信号电流为 5×10^{-12} — 5×10^{-11} A, 探测器的信噪比大于100, 所以, 信号测量的不确定度小于1%. 光源的能量分辨好于1000, 光子能量的不确定度小于0.1%. 高次谐波小于1%, 所以, 由于高次谐波引起的测量不确定度小于1%. 根据不确定度合成规则, XRD探测器标定的不确定度好于7%.

5 滤片的厚度标定

5.1 滤片的厚度标定方法

滤片厚度的标定采用测量滤片对单能光子的透过率来标定. 在3B3中能束线上, 利用新的标定装置,

光源的强度由标准探测器给出, 探测器的输出信号用6517A弱电流计记录, 对于某一能点 E_i , 在没有滤片的时候, 标准探测器的输出电流 I_{0i} , 当把滤片移到光路中, 探测器的输出电流 I_i , 那么, 被标定滤片的透过率为

$$T(E_i) = I_i / I_{0i}$$

更换不同的能点, 可以获得一系列不同能点下的滤片的透过率, 根据滤片的透过率公式:

$$T = e^{-\mu d},$$

式中 μ 是材料的吸收系数, d 是滤片的面密度, 单位是 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. 将上式变化一下, 有

$$d = -\ln T / \mu,$$

对于不同的能点有

$$d_i = -\ln T(E_i) / \mu(E_i).$$

通过若干能点的实验结果求平均, 可以给出滤片的厚度:

$$\bar{d}_i = \frac{\sum d_i}{i} = -\frac{1}{i} \sum \frac{\ln T(E_i)}{\mu(E_i)}.$$

5.2 滤片厚度的标定结果及分析讨论

实验中对多种滤片进行了标定, 其典型结果如图5所示, 下面就Ni滤片的标定结果进行分析讨论. 采用这种方法标定滤片的厚度, 对光源的要求较高, 要求光源具有较高的能量分辨和强度, 较小的高次谐波, 测量探测器具有较大的线性动态范围. 在标定实验中, 利用3B3中能X光束线标定滤片的厚度, 光源具有较高的能量分辨(大于1000)和强度(大于 10^{10} 光子/s), 较小的高次谐波(小于1%), 这些都为确定滤片的厚度提供了重要的条件. 过去, 在3W1B低能X光束线上, 标定结果一直不理想, 就是因为光源性能不好. 从数据处理过程, 可以看到, 如果光源的能量分辨较差, 能量坐标不确定度较大, 如果高次谐波严重, 透过率测量结果不确定度变大, 如果光源强度弱, 信噪比

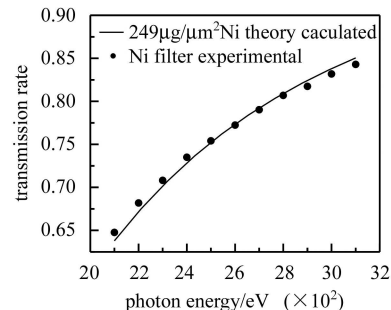


图5 Ni滤片的透过率测量结果与理论结果的比较

就低, 信号测量误差就大. 所以光源具有较高的能量分辨和强度, 较小的高次谐波是做好滤片标定的重要条件. 从实验结果来看, 理论计算与实验的标定结果一致性较好.

5.3 滤片厚度标定的不确定度分析

通过不同的能点来定义滤片的厚度, 不同能点透过率的偏差列于表1, 从不同能点透过率的偏差来看, 测量结果是可信的. 通过计算, 透过率的偏差小于1%. 所以, 我们初步可以给出滤片厚度的不确定度小于3.6%.

作者感谢3B3中能X光束线的全体工作人员, 他们为这项工作作出了非常大的贡献.

表1 不同能点透过率的偏差

能点/eV	理论值	实验值	偏差
2100	0.63791	0.64762	0.0097
2200	0.67152	0.68182	0.0103
2300	0.70135	0.7081	0.00675
2400	0.72804	0.73499	0.00694
2500	0.75178	0.7541	0.00232
2600	0.77296	0.77234	0.00062
2700	0.79192	0.79033	0.00159
2800	0.8089	0.807	0.0019
2900	0.82414	0.81749	0.00665
3000	0.83787	0.83179	0.00608
3100	0.85046	0.84298	0.00748
	平均偏差		0.0054

参考文献(References)

- 1 SUN Ke-Xu et al. *Laser and Particle Beam*, 1990, **2**(1): 16—22
- 2 YI Rong-Qing, SUN Ke-Xu et al. *Laser and Particle Beam*, 1996, **4**(8): 202—208
- 3 SUN Ke-Xu, YI Rong-Qing et al. *Acta Physica Sinica.*, 1997, **4**(46): 191—196
- 4 YI Rong-Qing, CUI Ming-Qi et al. *Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics*, 1998, **1**(15): 233
- 5 Gaines J L et al. *SPIE*, 1986, **689**: 155—164
- 6 Henke B L et al. *J. Appl Phys.*, 1981, **52**(3): 1509—1520
- 7 Henke B L et al. *J. Appl Phys.*, 1977, **48**(5): 1852—1866

Calibration of XRD Detector and Filter on the 3B3 Medium Energy X-Ray Beam in BSRF

CUI Yan-Li¹ YI Rong-Qing¹ DU Hua-Bing¹ ZHAO Yi-Dong² CUI Ming-Qi² ZHENG Lei²

¹ (Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

² (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract The sensitivity of XRD detector in 2.1—6.0keV energy range has been calibrated on the 3B3 medium energy X-ray beam at the BSRF for the first time in our country, and the uncertainty is less than 7%. In addition, the calibration precision of filter thickness has been improved by using the 3B3 medium energy X-ray beam, and the uncertainty of the filter thickness is less than 3.6%.

Key words medium energy X-Ray, synchrotron radiation, XRD detector, filter