

文章编号 1004-924X(2007)07-1016-05

不同厚度 Al 滤片对 17~33 nm 高次谐波抑制的定量研究

周洪军¹, 钟鹏飞², 郑津津², 霍同林¹, 张国斌¹, 戚泽明¹

- (1. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029;
2. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026)

摘要:利用 840 l/mm 的金膜透射光栅分光和 AXUV100G 光电二极管(PD)探测器研究了不同厚度的 Al 滤片对光谱辐射标准和计量线(U27)球面光栅单色器(SGM)分支 17~33 nm 波段高次谐波的抑制情况。结果表明, Al 滤片厚为 400 nm 时, 在 17~33 nm 波段有较好的抑制效果且能保证探测器的信号强度, 高次谐波信号强度分量小于 2%。经过探测器量子效率修正后, 高次谐波分量小于 0.6%, 这对多层膜反射率的定标及探测器定标有着重要的意义。

关键词:同步辐射; 高次谐波抑制; Al 滤片

中图分类号: O434.12 **文献标识码:** A

Quantitative research on higher order harmonic suppression in 17~33 nm with different thickness Al filters

ZHOU Hong-jun¹, ZHONG Peng-fei², ZHENG Jin-jin², HUO Tong-lin¹, ZHANG Guo-bin¹, QI Ze-ming¹

- (1. *National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China*; 2. *Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

Abstract: With 840 l/mm transmission grating (made in house) behind the exit of Spherical Grating Monochromator (SGM) in Spectral Radiation Standard and Metrology (U27) beamline, the dispersion of exit beam and the contributions of different orders were analyzed. The results of higher order harmonics suppression by different thickness Al filters were given in the region of 17~33 nm. The results show that when the thickness of Al filter is 400 nm, and the wavelength between 17~33 nm, the contributions of higher orders to the detector signal are restricted to less than 2%, and the Photon Diode (PD) intensity is strong enough. After being corrected by quantum efficiency of the PD detector, the higher order contributions are less than 0.6%, which is important for calibration absolute reflectivities of multilayer and detector.

Key words: synchrotron radiation; higher order harmonics suppression; Al filter

收稿日期: 2007-01-11; 修订日期: 2007-04-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 10575097; No. 60473133); 中科院“百人计划”资助项目; 国家 973 计划资助项目(No. 2006CB303102); 高校博士点基金资助项目(No. 20060358050)

1 引言

随着空间科学、等离子体物理、极紫外光刻和微细加工等技术的快速发展,极紫外光源变得越来越重要。极紫外波段的光源^[1]、探测器^[2]和光学元件性能定标需要高纯度的光谱,因此高次谐波的充分抑制尤其重要。

同步辐射光源是当今常用的极紫外和软 X 射线光源,它是一种连续光谱,通过光束线中的单色器获得所需的单色光^[3],而光栅单色器不可避免地含有高次谐波。高次谐波的存在严重影响光源、探测器和光学元件性能的定标精度。例如光学元件反射比定标时,高次谐波成分越强,测定的反射比越低。采用合适的滤片抑制特定波段的高次谐波是最简单易行的方法。然而,不同厚度的滤片对高次谐波的抑制效果是不同的。

世界各国同步辐射实验室都相继开展过高次谐波的抑制研究。日本日立公司 Waki 等利用 Photon Factory 的 BL-8A 设计了八棱柱型双镜反射高次谐波抑制装置^[4],用于抑制掠入射光栅单色器出射的软 X 射线的高次谐波。美国 ALS 的 Gullikson 等人在 Beamline 6.3.2 上采用了三镜反射和 1 mm 厚的 Be 膜相结合来抑制高次谐波,其特别针对极紫外光刻 13 nm Mo/Si 多层膜反射比的测量^[5]。英国的 Quinn 等人利用 Daresbury 的光电子谱实验站研究了不同薄膜材料对衍射光栅单色器高次谐波的抑制作用^[6]。德国 PTB 的 Kühne 等人用透射光栅研究了超环面光栅单色器(TGM)在 VUV 短波长的高次谐波成分^[7]。综上所述,未见文献报道不同厚度 Al 滤片抑制高次谐波的定量研究。

本文采用 840 l/mm 自支撑的透射光栅(TG)和美国 IRD 公司生产的 AXUV100G 探测器^[9-10]定量研究了 200、400 和 600 nm 等不同厚度 Al 滤片对 17~33 nm 波段高次谐波的抑制情况。

2 研究原理

U27 是专门用于极紫外和软 X 射线计量的线站。其掠入射分支由超环面前置镜(TM₁)、入射狭缝(S₁)、球面光栅单色器(SGM)、出射狭缝

(S₂)和超环面后置镜组成(TM₂)^[8],简称为 SGM 分支,如图 1 所示。SGM 分支单色器有三块光栅,覆盖的波段范围为 5~140 nm。后面与反射率计相连,反射率计前端是可切换的滤片(Filters),其内部的探测器(Detector)可绕样品台(Sample stage)轴转动 180°。在参考文献[11]中已经对 SGM 分支的高次谐波进行了系统的研究。

实验时用透射光栅作色散元件,置于样品台位置,滤片置于光栅前面,见图 2。透射光栅占空比为 1:1,厚度约为 400 nm,有效面积为 1 mm × 5 mm。探测器绕轴转动时记录不同波长的衍射角和信号强度。

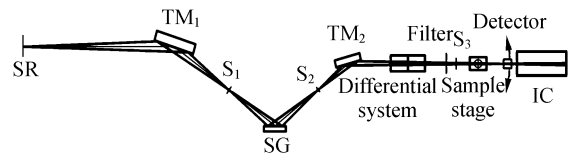


图 1 SGM 分支光路示意图

Fig. 1 Sketch of SGM branch optical system

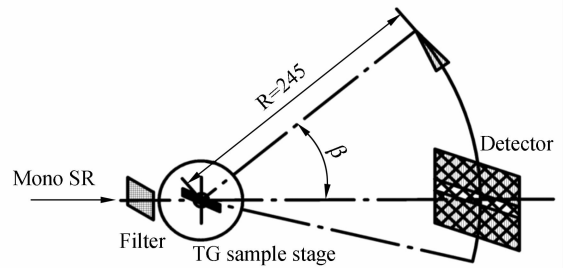


图 2 测量示意图

Fig. 2 Measurement setup

测量过程中单色化的同步辐射光垂直入射到透射光栅上,探测器绕图示方向转动。 β 为探测器与水平方向的夹角,则光栅方程可表示为下式:

$$d \sin \beta = m \lambda,$$

其中 d 为光栅周期, β 为衍射角, m 为衍射级次, λ 为波长。

设 λ_0 是单色器产生的单色基波,则 $\lambda = \lambda_0/n$ 是基波的高次谐波, $n = 2, 3, 4 \dots$ 。由于光栅周期常数 $d = 1/840 = 1.2 \mu\text{m}$,研究的波长范围 λ 为 17~33 nm,根据光栅方程可知,一级衍射角 $\beta_0 < 0.03 \text{ rad}$,所以光栅方程简化为: $d \cdot \beta = m \cdot \lambda$ 。高次谐波的衍射角 β 与基波的一级衍射角 β_0 的关

系可表示为:

$$\beta = \frac{m}{n} \beta_0,$$

比较计算和探测器测量得到的 β_0 、 β ,可知高次谐波和基波的衍射峰位。

通过对探测器信号强度曲线面积积分,计算高次谐波与基波一级衍射的信号强度比值,确定高次谐波所占信号强度比重,经探测器量子效率(QE)修正后,可以得到高次谐波光子通量占基波光子通量的比值。

3 17~33 nm 高次谐波抑制结果

17~33 nm 波段的极紫外光在实际的光学元件性能测试中应用非常广泛。通常采用 Al 滤片抑制高次谐波。不同厚度的滤片对高次谐波的抑制效果是不一样的,为了更好地比较,本文研究了无滤片的情况和 Al 滤片厚度分别为 200、400 和 600 nm 时,17~33 nm 波段的高次谐波抑制情况。

图 3 中是 SGM 出射光为 25,29,33 nm 时,无滤片的探测器扫描信号强度曲线。

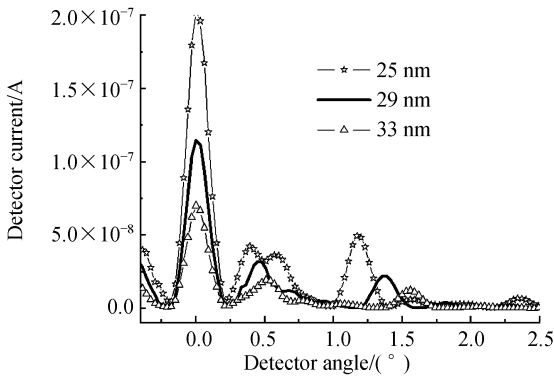


图 3 无滤片波长分别为 25、29、33 nm 时,探测器角度扫描得到的信号强度曲线

Fig. 3 Intensity curves of detector scanning while wavelengths are 25, 29 and 33 nm without any filter

从图 3 中看到,基波的一级衍射角随着波长的增加而变大。当波长为 33 nm 时,其一级衍射角 $\beta_0 = 1.560$ 。随着波长的增加,基波信号强度逐渐减弱,在零级衍射和基波的一级衍射之间存在一些峰,这些峰是高次谐波的衍射峰,高次谐波信号强度占基波的比例随波长的增加而增大。通过面积积分计算这些衍射峰的强度,并与基波的

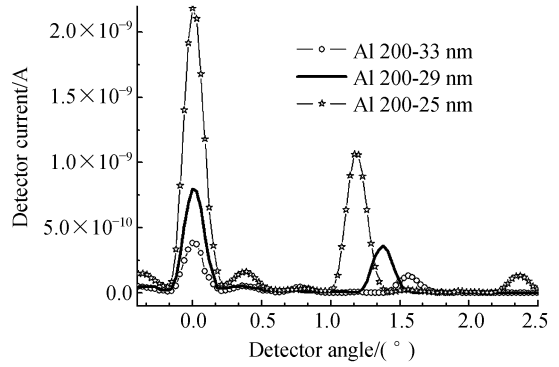


图 4 200 nm 厚 Al 滤片,波长为 25、29 和 33 nm 时,探测器角度扫描得到的信号强度谱线

Fig. 4 Intensity curves of detector scanning while wavelengths are 25, 29 and 33 nm with 200 nm Al filter

一级衍射峰强度相比,就能求得高次谐波所占比例。

同理,使单色化的 17~33 nm 同步辐射光经过不同厚度的 Al 滤片,由透射光栅色散后再用探测器探测其衍射峰强度。分别做数据处理后得到 Al 滤片厚度分别为 200、400 和 600 nm 三种情况下高次谐波强度占基波的比例。

图 4 是波长为 25、29 和 33 nm 三种波长下 Al 滤片厚度为 200 nm 时测得的衍射信号强度曲线。与同样波长时无滤片滤波的图 3 相比,可以看到高次谐波相对于基波的信号强度明显减小,即高次谐波得到了明显抑制,但是仍能看到还有高次谐波的衍射峰存在。

图 5 是波长分别为 25、29 和 33 nm 三种单色

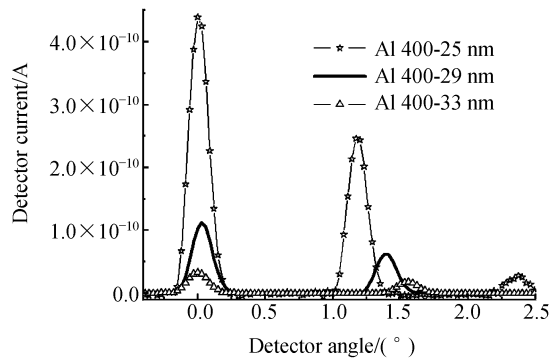


图 5 400 nm 厚 Al 滤片,波长为 25、29 和 33 nm 时,探测器角度扫描得到的信号强度谱线

Fig. 5 Intensity curves of detector scanning while wavelengths are 25, 29 and 33 nm with 400 nm Al filter

光通过 400 nm 厚的 Al 滤片,由透射光栅色散产生的衍射信号强度谱图。此时高次谐波的衍射峰基本上看不到了,即零级和基波的一级衍射峰之间的高级次峰几乎观察不到。将图放大后只有在 31 nm 和 33 nm(见图 6)的长波时还能观察到高次谐波的衍射峰。31 nm 时高次谐波信号强度占 0.5%,33 nm 时占 1.7%,见表 1。

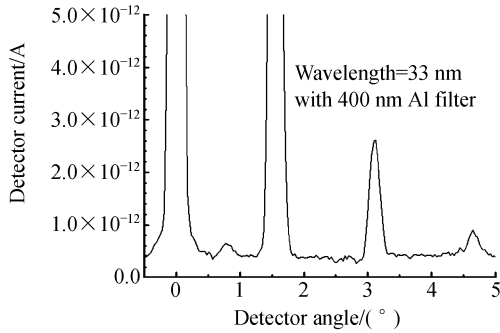


图 6 SGM 单色器出射波长为 33 nm, Al 滤片厚为 400 nm 时的透射光栅衍射图

Fig. 6 Intensity curve of detector scanning while wavelength is 33 nm and Al filter is 400 nm

表 1 无滤片和有不同厚度的 Al 滤片时高次谐波信号强度占基波的百分比

Tab. 1 Percentage of higher-order harmonics over base wavelength in the case of no filter and with 200 nm, 400 nm, 600 nm thickness Al filters.

波长 nm	No filter	Al200 nm filter	Al400 nm filter	Al600 nm filter
17	56.6%	16.9%	0	0
19	73.6%	4.3%	0	0
21	105.6%	6.6%	0	0
23	137.4%	7.5%	0	0
25	168.8%	18.0%	0	0
27	218.3%	26.1%	0	0
29	229.6%	31.0%	0	0
31	259.4%	50.3%	0.5%	0.4
33	282.3%	81.4%	1.7%	1.0%

图 7 是 Al 滤片厚度为 600 nm 时测得的探测器信号强度曲线。经面积积分后与 400 nm 厚的 Al 滤片抑制情况比较,在 31 nm 和 33 nm 波长时高次谐波占基波信号强度比稍有降低,见表 1。600 nm 的 Al 滤片时,31 nm 时高次谐波信号强度占 0.4%,33 nm 时占 1.0%。这两种 Al 滤片厚度条件下经过探测器的量子效率修正后,31 nm 波长处高次谐波成分可近似为零,33 nm

波长处高次谐波占基波的比都为 0.6%,见表 2。

表 1 中给出的是没加滤片和有不同厚度的 Al 滤片时高次谐波信号强度占基波一级衍射强度的百分比。无滤片时,高次谐波非常严重,随着波长的增加高次谐波所占比例快速增长,在 33 nm 时高次谐波的信号强度高达 282.3%。当加入 Al 滤片后,高次谐波成分得到极大的抑制。随着 Al 滤片厚度的增加,高次谐波成分越来越小,但同时损失的是信号强度。虽然 600 nm 厚的 Al 滤片抑制效果最好,但综合考虑信号强度问题,在这一波段选用 400 nm 厚的 Al 滤片滤波最为合适。

表 2 是经 AXUV100G 光电二极管探测器量子效率修正后得到的高次谐波占基波的百分比。

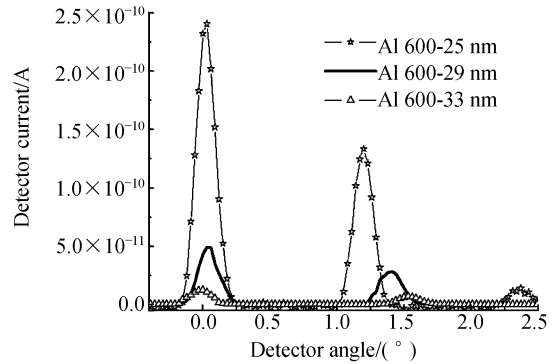


图 7 600 nm 厚 Al 滤片,波长为 25、29、33 nm 时,探测器角度扫描得到的信号强度谱线

Fig. 7 Intensity curves of detector scanning while wavelengths are 25, 29 and 33 nm with 600 nm Al filter

表 2 无滤片和有不同厚度的 Al 滤片经探测器量子效率修正后高次谐波占基波的百分比

Tab. 2 Percentage of higher-order harmonics over base wavelength corrected by PD QE in the case of no filter and with 200 nm, 400 nm, 600 nm Al filters

波长 nm	No filter	Al200 nm filter	Al400 nm filter	Al600 nm filter
17	22.6%	6.3%	0	0
19	26.5%	0.9%	0	0
21	24.8%	1.8%	0	0
23	46.9%	3.0%	0	0
25	67.8%	5.7%	0	0
27	71.6%	7.0%	0	0
29	72.1%	6.7%	0	0
31	73.6%	15.4%	0	0
33	72.2%	26.6%	0.6%	0.6%

4 结 论

通过对无滤片和有 200、400、600 nm 不同厚度的 Al 滤片对高次谐波抑制情况的定量研究,可知对 17~33 nm 波段 U27 光束线 SGM 单色器的出射光选用 400 nm 的 Al 滤片抑制高次谐波

最为合适,既能保证高次谐波的充分抑制又能保证信号强度,光谱纯度在 99% 以上。

5 致 谢

在此感谢付绍军研究员和同济大学王占山及吴永刚教授在实验中给予的帮助。

参考文献:

- [1] 邢进,王淑荣,李福田. 紫外-真空紫外辐射标准光源的比对[J]. 光学 精密工程,2004,12(4):373-379.
XIN J, WANG SH R, LI F T. Comparisons between radiometric scales on UV-VUV radiant standard light source [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(4):373-379. (in Chinese)
- [2] 崔明启,黎刚,崔聪悟,等. 北京同步辐射装置软 X 光束线通量谱的绝对测量与计算[J]. 高能物理与核物理,1996,20(9):847-853.
CUI M Q, LI G, CUI C W, *et al.*. Absolute measurement and calculation of flux spectra from the soft X-ray beam-line of Beijing Synchrotron Radiation Facility [J]. *High Energy Physics and Unclear Physics*, 1996,20(9):847-853. (in Chinese)
- [3] 马礼敦,杨福家. 同步辐射应用概论[M]. 上海:复旦大学出版社,2001.
MA L D, YANG J F. *Introduction to Synchrotron Radiation Applications* [M]. Shanghai:Fudan Press, 2001. (in Chinese)
- [4] WAKI I, HIRAI Y, MOMOSE A, *et al.*. Higher-harmonics suppressor for soft X rays [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1989, 60(7):2072-2075.
- [5] GULLIKSON E M, MROWKA S, KAUFMANN B B. Recent developments in EUV reflectometry at the advanced light source [J]. *SPIE*, 2001, 4343:363-373.
- [6] QUINN F M, TEEHAN D, MACDONALD M, *et al.*. Higher-order suppression in diffraction-grating monochromators using thin films [J]. *J Synchrotron Rad.*, 1998, 5:783-785.
- [7] KÜHNE M, MÜLLER P. Higher order contributions in the synchrotron radiation spectrum of a toroidal grating monochromator determined by the use of a transmission grating [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1989, 60(7):2102-2104.
- [8] 薛松,邵景鸿,卢启鹏,等. 合肥同步辐射反射率测试装置[J]. 光学 精密工程,2004,12(5):480-484.
XUE S, SHAO J H, LU Q P, *et al.*. Reflectivity measuring device in the national synchrotron radiation laboratory [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5):480-484. (in Chinese)
- [9] 曹继红,尼启良,陈波. 用 Si 光电二极管标定软 X 射线探测器[J]. 光学 精密工程,2004,12(1):118-121.
CAO J H, NI Q L, CHEN B. Calibration of soft X-ray detector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1):118-121. (in Chinese)
- [10] GULLIKSON E M, KORDE R L, CANFIELD R, *et al.*. Stable silicon photodiodes for absolute intensity measurements in the VUV and soft X-ray regions[J]. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 1996, 80: 313-316.
- [11] 周洪军,郑津津,霍同林,等. 计量线高次谐波的定量研究[J]. 光学 精密工程,2007,15(5):640-645.
ZHOU H J, ZHENG J J, HUO T L, *et al.*. Quantitative research on higher order harmonics in metrology beam-line [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(5):640-645. (in Chinese)

作者简介:周洪军(1963—),女,辽宁黑山人,博士,中国科学技术大学国家同步辐射实验室高级工程师,主要从事同步辐射光谱计量、微细加工、超高真空技术研究工作。E-mail: hjzhou@ustc.edu.cn