

文章编号: 0253-2239(2010)09-2753-04

5~40 nm 波段高次谐波的定量研究

周洪军¹ 王冠军² 郑津津² 霍同林¹ 邱克强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 连续光谱的同步辐射光通过入射狭缝照射到光栅单色器后, 在出射的单色光 λ 中总是不可避免的混有基波 λ 的高级次谐波 $\lambda_n = \lambda/n$ 。采用自制的 3300 lp/mm 金膜自支撑透射光栅和美国 IRD 公司的 AXUVI00G 光电二极管探测器, 定量研究了光谱辐射标准和计量光束线在 5~40 nm 波段的高次谐波。研究了 Zr, Si, Al 和 Al/Mg/Al 滤片在不同能量范围对高次谐波的抑制作用, 给出了实验数据和曲线。在 5~40 nm 波段, 适当的选用 Zr, Si, Al 和 Al/Mg/Al 滤片可有效地抑制高次谐波, 在 5~34 nm 波段将高次谐波与基波的信号强度比例控制在 8.06% 以内, 经量子效率修正后小于 3.08%, 在 35~40 nm 波段经探测器量子效率修正后高次谐波比例小于 10.00%。

关键词 光谱学; 高次谐波抑制; 滤片; 真空紫外; 光谱计量

中图分类号 O434.12 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2753

Suppression of Higher-Order Harmonics by Different Filter in 5~40 nm

Zhou Hongjun¹ Wang Guanjun² Zheng Jinjin² Hou Tonglin¹ Qiu Keqiang¹

¹National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230029, China

²Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The monochromatic synchrotron radiation spectra of spherical grating monochromator (SGM) working in soft X-ray and vacuum ultraviolet (VUV) region are often contaminated by significant amount of higher-order harmonics. They cannot be suppressed completely even by suitable filters. Higher-order contributions in the spectral radiation standard and metrology beamline are researched by using transmission grating (3300 lp/mm made in house) and IRD AXUVI00G (USA) photodiode detector. The exit beam is dispersed with the transmission grating behind exit slit of the monochromator, and the contributions of the different orders are analyzed. In wavelength region between 5 nm and 34 nm with proper Al, Si and Zr filters, the contributions of higher-order intensity are less than 8.06%. After modified by quantum efficiency of the detector, the higher-order contributions are restricted to less than 3.08%. In wavelength region between 35 and 40 nm with Al/Mg/A filter, the higher-order contributions are restricted to less than 10.00% after modified by quantum efficiency of the detector.

Key words spectroscopy; suppressing higher-order harmonics; filter; vacuum ultraviolet (VUV); spectral metrology

1 引 言

同步辐射光(SR)是一种连续光谱,光源通过光栅单色器后获得的单色光中不可避免的混有基波的高次谐波,根据光栅方程,这些高次谐波经过光栅单

色器分光后在同样的方向上发生衍射。一些光学元件的定标需要高纯度的光谱,而高次谐波的存在严重影响光学元件的定标精度。如光学元件反射比定标时,高次谐波的成分越强,测定的反射比就越低。

收稿日期: 2009-10-30; 收到修改稿日期: 2010-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(10575097, 10775128), 国家自然科学基金大科学装置联合基金(10979065), 111 引智工程项目(B07033)和高校博士点基金(20060358050)资助课题。

作者简介: 周洪军(1963—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事同步辐射计量方面的研究。E-mail: hjzhou@ustc.edu.cn

因此高次谐波的抑制工作对定量分析显得非常重要。

各国的同步辐射实验室都相继开展了高次谐波的研究工作,如德国的 Muller 等用透射光栅研究了超环面光栅单色器(TGM)在 VUV 短波段的高次谐波成分^[1],分析了能量在 337 MeV 时波长范围在 5~45 nm 波段的高次谐波分布,并研究了能量在 756 MeV 时该波段添加 Be(100 nm)和 Al(200 nm)滤片后的高次谐波分布,添加滤片以后高次谐波小于 10%。美国的利弗莫尔实验室为了抑制高次谐波,同时又不改变同步辐射光路的方向,采用了掠入射的三镜反射和 Be 膜相结合的方法,利用全反射角处的反射来达到消除高次谐波^[2],其主要针对紫外光刻 13 nm Mo/Si 反射比的测量。日本日立公司的 Waki 等利用 Photo Factory 的 BL-8A 设计了八棱柱型双镜反射高次谐波抑制装置^[3],该装置共有八对反射镜组成,每一对都由截止频率不同的低通滤波器组成,覆盖 80~1600 MeV 的能量范围,用于抑制掠入射光栅单色器射出的软 X 射线的高次谐波。

上述各种方法是针对各实验站不同的光束线站结构而采取的实验方法,对于目前国家同步辐射实验室(NLSR)计量光束线站采用添加滤片的方法抑制高次谐波,不需要改动光束线和实验站的结构,而且不同的波段选择合适的滤片是研究高次谐波的一种简单易行的办法,本文采用了自制的 3300 lp/mm 的透射光栅(TG)和美国的 IRD 公司生产的 AXUV100G 光电二极管探测器^[4~6]定量地研究了光谱辐射标准和计量线站在 5~40 nm 波段的高次谐波。另外分别研究了 LUXEL 公司生产的不同厚度的 Zr, Si, Al, Al/Mg/Al 滤片在该波段范围内对高次谐波的抑制作用,并给出了相应的实验数据测试曲线^[7~10]。

2 研究方法

2.1 计量光束线站 SGM 分支机构

球面光栅单色器(SGM)分支束线是国家同步辐射实验室二期工程建造的一条用于软 X 射线和极紫外光谱计量的线站,计量线站 SGM 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)、超环面后置镜(TM2)和反射率计和电离室^[11,12]组成,如图 1 所示。其中 SGM 有三块 Lamina 球面光栅(SG)组成,分别为 1800, 600 和 200 lp/mm,对应覆盖的范围为 5~12, 12~34 和

34~140 nm。后端与反射率计(reflectometer)相连,其内部的探测器(detector)可绕 TG 轴转动 180°。反射率计的前端是可切换的滤片(filter),滤片装在一个馈入机构上,可以通过馈入机构的旋进旋出来选择不同的滤片,当不用滤片时也可以把滤片退出光路。

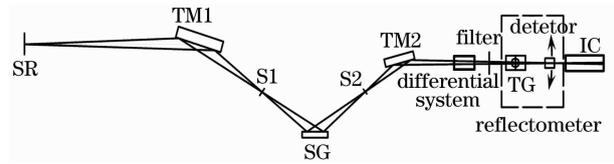


图 1 SGM 分支系统光路示意图

Fig. 1 Sketch map of SGM branch optical system

2.2 实验的方法

在实验的过程中将线密度为 3300 lp/mm 的透射光栅放在 TG 的位置,该光栅是自制的金膜、自支撑的透射光栅,占空比为 1:1,有效面积 10 mm×15 mm,厚度为 400 nm。经过该光栅后由于基波和高次谐波的波长不同,通过光栅后各波长的衍射峰角度不同,如图 2 所示由探测器绕(TG)轴转动来记录零级和各衍射级次衍射峰信号强度和角度的位置。

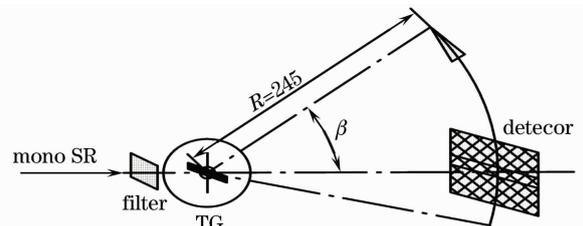


图 2 测量示意图

Fig. 2 Measurement setup

实验的过程中由于入射的同步辐射光是垂直照射到光栅上,光栅方程可表示为 $d \sin(\beta_T) = m\lambda/n$,其中 d 为光栅周期常数, m 为衍射级次(0, 1, 2...), n 为基波的高级次(1, 2, 3...),理论衍射角 β_T 可表示为 $\beta_T = \arcsin(m\lambda/dn) = \arcsin(3.3 m\lambda/n)$ 。而实际通过探测器测得的衍射角计为 β ,比较 β_T 与 β 可知衍射峰是基波的几级衍射和高级次的几级衍射峰。

确定基波和高次谐波的衍射峰后,对实验测得的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信号强度的比值,确定高次谐波占信号强度的比重,经过探测器量子效率(QE)修正后即可得到高次谐波光子通量占基波的比例。

3 实验的结果

在 5~40 nm 波段有合适的滤片,故分别测量无滤片和有滤片时高次谐波占基波信号强度。图 3

是波长为 17 nm 时没有滤片时的探测器扫描信号强度,随扫描角度的变化通过与理论衍射角的计算比较可以看出在 3.44°时为基波的一级衍射峰,而 1.72°为基波的二级高次谐波。

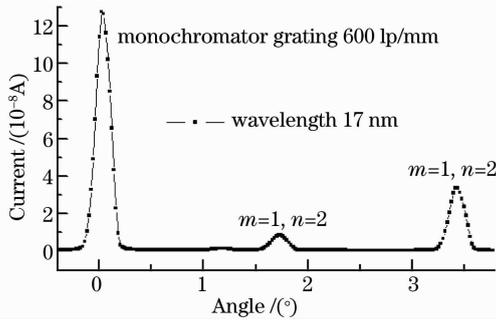


图 3 单色器光栅为 600 lp/mm, 波长为 17 nm, 无滤片时探测器扫描的谱图

Fig. 3 Intensity curves scanned by detector while wavelength is 17 nm with monochromator grating 600 lp/mm without filter

图 4 是波长为 25 nm 无滤片时探测器扫描的信号强度。通过与理论衍射角计算的比较可以看出在 5°时为基波的一级衍射峰,而 2.5°和 1.65°时为基波的二级和三级高次谐波。

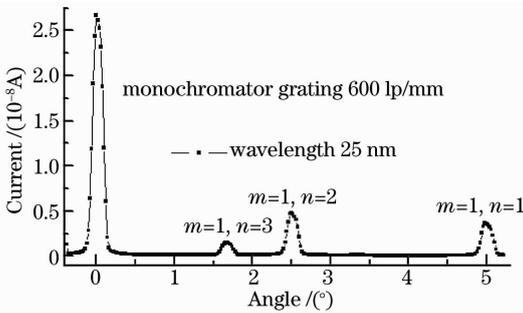


图 4 单色器光栅为 600 lp/mm, 波长的 25 nm 时无滤片时探测器扫描的谱图

Fig. 4 Intensity curves scanned by detector while wavelength is 25 nm with monochromator grating 600 lp/mm without filter

为抑制高次谐波,在不同波段分别选择相应的滤片放置在 filter 的位置重复上述的测试过程。5~40 nm 波段分别选用厚度为 192 nm 的 Zr 滤片、278 nm 的 Si 滤片、393 nm 的 Al 滤片和 250 nm Al/Mg/Al 滤片,滤片均从 Luxel 公司购买。图 5 是波长为 17 nm、添加 Si 滤片时测得的探测器信号强度曲线,可以清楚的看到高次谐波基本被抑制。图 6 是波长为 25 nm、添加 Al 滤片后的探测器信号强度曲线,也可看到高次谐波基本被抑制。

对 5~40 nm 波段的测试结果分别进行积分运

算,结果如图 7 所示。图中的四条曲线分别为无滤片(曲线 1)、有滤片(曲线 3)、无滤片经过量子效率(QE)修正后(曲线 2)和有滤片经过量子效率(QE)修正后(曲线 4)时的高次谐波占基波的一级衍射积分面积。可以看出在波长为 25 nm 无滤片时高次谐波占基波的积分面积最大,高次谐波比较严重。

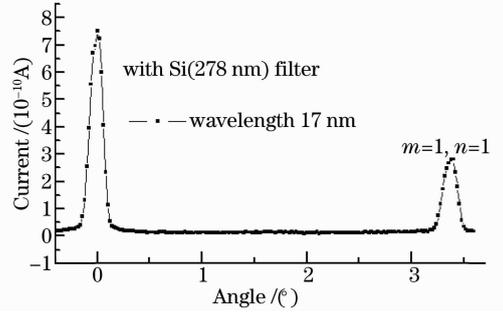


图 5 波长为 17 nm 是加厚度为 278 nm 的 Si 滤片后的探测器信号强度

Fig. 5 Intensity curves of wavelength 17 nm scanned by detector with Si filter (thickness 278 nm)

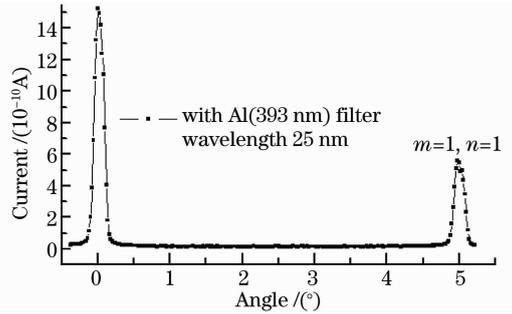


图 6 波长为 25 nm 是加厚度为 393 nm 的 Al 滤片后的探测器信号强度

Fig. 6 Intensity curves scanned by detector of wavelength 25 nm with Al filter (thickness 393 nm)

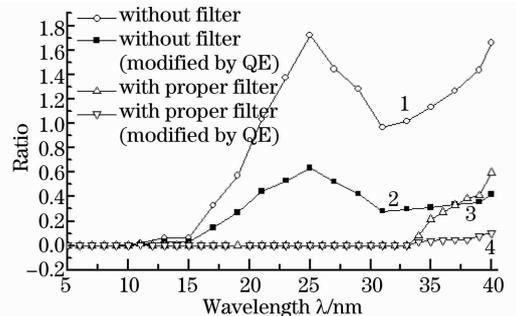


图 7 高次谐波占基波的一级衍射的比值

Fig. 7 Ratio of intensity of higher order to first order

表 1 给出了不同滤片有效抑制高次谐波的各个波段,实验表明在 5~12 nm 波段添加 Zr 滤片后高次谐波占基波的信号强度小于 1.25%,经探测器效

率修正后高次谐波小于 0.64%，在 13~17 nm 波段添加 Si 滤片后高次谐波几乎全部被抑制，在 18~34 nm 波段添加 Al 滤片后高次谐波小于 8.06%，修正后小于 3.08%，在 35~40 nm 波段添加 Al/Mg/Al 滤片经修正后小于 10.00%。本站先前在 5~

34 nm 波段^[13]添加国产滤片后的测试结果高次谐波占基波的比例小于 14%，经量子效率修正以后小于 6.5%，与其对比本实验的高次谐波的抑制效果有了较大的提高。

表 1 Zr, Si, Al, Al/Mg/Al 滤片有效抑制高次谐波的波段

Table 1 Wavelength regions of Zr, Si, Al, Al/Mg/Al filters suppressing higher-order harmonics

Wavelength /nm	Filter type (thickness /nm)	Ratio of higher order to first order	Modified by QE
5~12	Zr(192)	<1.25%	<0.64%
13~17	Si(278)	0	0
18~34	Al(393)	<8.06%	<3.82%
35~40	Al/Mg/Al(250)	<59.74%	<10.00%

4 结 论

研究表明在 5~40 nm 波段通过加滤片是一种简单且有效的抑制高次谐波的方法。在 5~40 nm 可以选用 Zr, Si, Al, Al/Mg/Al 滤片来抑制高次谐波，在 5~34 nm 高次谐波占基波的比例小于 3.82%，在 35~40 nm 高次谐波占基波的比例小于 10.00%。对于 40~115 nm 波段目前还没有合适的滤片。

参 考 文 献

- 1 M. Kuhne, P. Muller. Higher order contributions in the synchrotron radiation spectrum of a toroidal grating monochromator determined by the using of a transmission grating [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1989, **60**(7): 2102~2104
- 2 E. M. Gullikson, S. Mrowka, B. B. Kauffann. Recent developments in EUV reflectometry at the advanced light source [C]. *SPIE*, 2001, **4343**: 91~102
- 3 I. Waki, Y. Hiral, A. Momose *et al.*. Higher-harmonics suppressor for soft X rays [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1989, **60**(7): 2072~2075
- 4 B. Kjornrattanawanich, R. Kored, C. N. Boyer *et al.*. Temperature dependence of the EUV responsivity of silicon photodiode detectors [J]. *IEEE T. Electron. Dev.*, 2006, **53**(2): 218~223
- 5 R. Korder, C. Prince, D. Cunningham *et al.*. Present status of radiometric quality silicon photodiodes [J]. *Metrologia*, 2003, **40**: 145~149
- 6 L. R. Canfield, R. E. Vest, R. Korder *et al.*. Absolute silicon photodiodes for 169 nm to 254 nm photons [J]. *Metrologia*, 1998, **35**: 329~334
- 7 Sun Kexu, Yi Rongqing, Huang Tianxuan *et al.*. Reflectivity calibration of soft X-ray planar mirror in the BSRF [J]. *Acta*

Optica Sinica, 2002, **22**(3): 379~382

- 孙可煦, 易荣清, 黄天暄 等. 软 X 光平面镜反射率标定实验 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 379~382
- 8 Xiong Limin, Liu Jinyuan, Li Ping *et al.*. Ultraviolet and vacuum ultraviolet spectral radiance standard with synchrotron radiation source [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 547~550
 - 9 Chen Rui, Wang Fengli, Wang Zhanshan. Producing subfemtosecond pulses by using chirped multilayer mirror in the extreme ultraviolet region [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1380~1383
 - 陈 锐, 王凤丽, 王占山. 极紫外啁啾多层反射镜产生亚飞秒脉冲 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1380~1383
 - 10 Cheng Yunli, Zhu Qinshi, Huang Bin *et al.*. Simplified X-ray diode and its performance measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1338~1341
 - 程元丽, 朱秋石, 黄 斌 等. 结构简单的 X 射线二极管及其性能指标测定 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1338~1341
 - 11 Xue Song, Shao Jinghong, Lu Qipeng *et al.*. Reflectivity measuring device in the national synchrotron radiation laboratory [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(5): 480~484
 - 薛 松, 邵景鸿, 卢启鹏 等. 合肥同步辐射反射装置 [J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(5): 480~484
 - 12 Cao Jihong, Ni Qiliang, Chen Bo *et al.*. Calibration of soft X-ray detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(1): 118~121
 - 曹继红, 尼启良, 陈 波. 用 Si 二极管标定软 X 射线探测器 [J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(1): 118~121
 - 13 Zhou Hongjun, Zheng Jinjin, Huo Tonglin *et al.*. Quantitative research on higher order harmonics in metrology beamline [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(5): 640~645
 - 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