

文章编号 1004-924X(2011)10-2314-05

## 兼具高次谐波抑制的三镜偏振器

周洪军<sup>1\*</sup>, 王冠军<sup>2</sup>, 郑津津<sup>2</sup>, 霍同林<sup>1</sup>

- (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 230027)

**摘要:** 为了抑制同步辐射光通过光栅单色器后出射的单色光在长波段的高次谐波以及提高光源在该波段的偏振特性, 计算分析了三镜偏振器 Au<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>Au 的偏振特性及其对长波段高次谐波的抑制效果。比较了 Au<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>Au, Au<sub>2</sub>SiC<sub>2</sub>Au 和 Au<sub>2</sub>Be<sub>2</sub>Au 3 种不同材料的偏振镜抑制高次谐波的能力和对偏振度的提高。计算分析表明, Au<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>Au 三镜组合镜对长波段的高次谐波抑制效果较好, 光源通过 Au<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>Au 三镜反射后, P 分量的反射率几乎为 0, 而 S 分量在 30 eV 以后几乎全被抑制。Au<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>Au 三反射镜不仅可以抑制 30 eV 以上的高次谐波, 而且使该波段光源的偏振性得到提高, 20 eV 时最高偏振度可达 99% 以上, 从而在极大地改善同步辐射光源纯度的同时提高了光源的偏振度。

**关键词:** 光源偏振; 高次谐波抑制; 三镜偏振器

**中图分类号:** TH744.2    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3788/OPE.20111910.2314

## Triple reflector polarizer integrated with suppression of higher order harmonics

Zhou Hong-jun<sup>1\*</sup>, Wang Guan-jun<sup>2</sup>, Zheng Jin-jin<sup>2</sup>, Huo Tong-lin<sup>1</sup>

(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 230027, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: hjzhou@ustc.edu.cn*

**Abstract:** To suppress the higher order harmonics in monochromatic light come from a synchrotron radiation source and to improve the polarization characteristics of the source in a long wavelength, this paper analyzes the polarization characteristics of an triple-reflector polarizer Au<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>Au and discusses its suppress abilities for higher order harmonics based on the concept of triple-reflection polarizer. It compares the characteristics of Au<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>Au, Au<sub>2</sub>SiC<sub>2</sub>Au and Au<sub>2</sub>Be<sub>2</sub>Au triple-reflector polarizers for suppression to higher order harmonics and improvement on polarization characteristics. Obtained results show that the triple-reflector polarizer Au<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>Au can suppress the higher order harmonics more effectively than other polarizers. Furthermore, After the light is reflected by the polarizer, the reflectance of the P component almost can be zero and that of the S component can totally blocked in the photo energy down to 30 eV. Moreover, the polarization of the source has been improved up to 99%

**收稿日期:** 2011-01-19; **修订日期:** 2011-02-12.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No. 10575097, 10775128, 61073109); 中国科学院百人计划, 高等学校博士学位点专项科研基金资助项目 (No. 20060358050); 国家自然科学基金大科学装置联合基金资助项目 (No. 10979065); 111 工程资助项目 (No. B07033)

in wavelength of 20 eV.

**Key words:** polarization; suppressing higher order harmonics; triple-reflector polarizer

## 1 引言

同步辐射光源是当今广泛应用的极紫外和软 X 射线光源,同步辐射是一种连续光谱,其光通过单色器后出射的单色光中不可避免地含有高次谐波,而高次谐波严重影响光源、探测器和光学元件的定标精度,实验数据会因谐波干扰而增大误差,甚至导致错误的实验结论。因此,抑制光源中的高次谐波成分,提高光源品质,对提高实验结果的精确度具有重要意义。

偏振特性是同步辐射光源又一优异特性,利用同步辐射的射软 X 射线偏振特性可在生物、化学、物理、材料、信息科学及计量科学等领域开展大量的工作,因此如何获得偏振性较高的光源同样非常重要。

针对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<sup>[1-5]</sup>,目前国家同步辐射计量光束线站即采用添加滤片的方法来抑制高次谐波,该方法不需要改动光束线和实验站的结构;英国的 F. M. Quinn 等人亦利用 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<sup>[6]</sup>。另外,反射式的偏振器被广泛应用于极紫外和软 X 射线光源。例如,美国的 Hartmut Htichst 等人用四反射式偏振器来提高光源的圆偏振度<sup>[7-8]</sup>;印度的 S. R. Naik<sup>[9-10]</sup>等人采用三反射式的 Au 膜偏振装置来提高光源的偏振性。不过为了抑制高次谐波将 160 nm 的锡滤片放置在光路中会使得光源的整体透过率大大降低。

5~40 nm 波段已经有合适的滤片抑制高次谐波,但在 40~140 nm 波段还没有解决这个问题。因此,提出一种既能提高光源的效率又能抑制高次谐波的方法显得非常重要。本文通过软件计算的方法确定在长波段可以通过 Au<sub>1</sub>Si<sub>1</sub>Au<sub>2</sub> 三反射式偏振器的组合来有效抑制该波段的高次谐波,该方法不需要在光路中另外添加滤片且光源通过三反射镜以后在相应的波段偏振特性大大提

高,这一特性拓宽了 NLSR 计量光束线站的应用范围。

## 2 基本理论

### 2.1 高次谐波

光栅方程  $d\sin(\alpha + \beta) = m(\lambda + n)$  表明,由于同步辐射光源垂直入射到光栅上,所以  $\alpha$  为 0 时,光栅方程可改写为  $d\sin\beta = m\lambda/n$ ,其中  $d$  为光栅周期常数, $m$  为衍射级次, $n$  为基波的高级次。当  $n=1$  时, $m$  为基波的不同衍射级次。当  $n \geq 2$  时,即  $(\lambda/2, \lambda/3, \lambda/4 \dots)$  为基波的高次谐波。

### 2.2 同步辐射的偏振特性

从弯铁引出的同步辐射光,在轨道平面上时为线偏振光,当偏离轨道平面时为椭圆和圆偏振光。通常从单色器输出的单色光中,其主要的电矢量方向在同步辐射储存环的平面内,入射光的偏振度为:  $P = (F_S - F_P) / (F_S + F_P)$ ,其中  $F_S, F_P$  是平行和垂直轨道平面的光辐射功率。

## 3 三反射镜计算

### 3.1 三反射镜的结构

为了有效地抑制高次谐波,同时又不改变同步辐射光路的方向,高次谐波抑制镜采用 3 块镜子的组合,两侧镜的入射角度是中心镜的两倍。如图 1 所示。

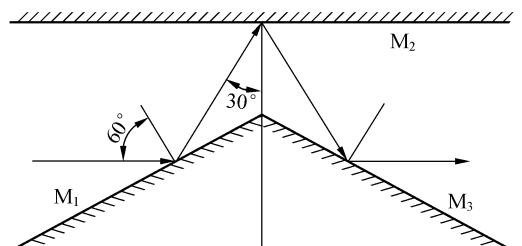


图 1 三反射镜的结构

Fig. 1 Construction of triple-reflecting mirror

在计算的过程中两侧镜 ( $M_1, M_3$ ) 均镀 Au 膜,入射角为  $60^\circ$ ,而中心镜子 ( $M_2$ ) 用不同材料分别计算,其入射角为  $30^\circ$ ,计算结果分别如下。

### 3.2 Au\_Si\_Au 的计算

$M_1$  和  $M_3$  采用在 Si 上镀 Au 膜的结构,根据经验镀膜的厚度在 40 nm 以下,这里取 Au 膜厚度为 30 nm,30 nm 的 Au 膜在入射角为  $60^\circ$  的 S 和 P 分量的反射率如图 2 所示。 $M_2$  是厚度为 500 nm 的 Si,入射角为  $30^\circ$ ,其 S 和 P 分量的反射率如图 3 所示。

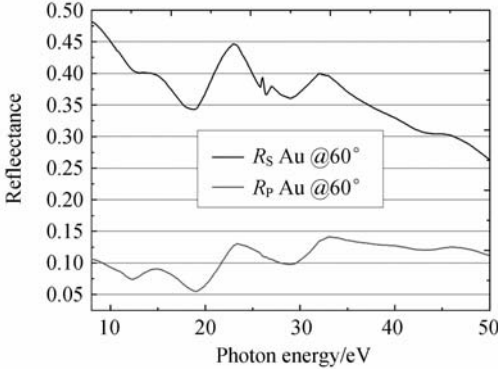


图 2 30 nmAu 膜在入射角为  $60^\circ$  时 S 和 P 分量的反射率

Fig. 2 S- and P-polarized reflectances of Au surface under incidence angle of  $60^\circ$

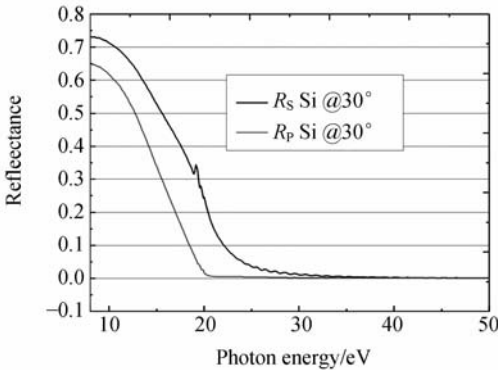


图 3 500 nmSi 膜在入射角为  $30^\circ$  时 S 和 P 分量的反射率

Fig. 3 S- and P-polarized reflectances of Si surface under incidence angle of  $30^\circ$

光源通过 Au\_Si\_Au 三反射镜后的 S 和 P 分量的反射率如图 4 所示。从图 4 可以看出 P 分量的反射率几乎为 0,而 S 分量在 30 eV 以后几乎全被抑制,因此该偏振器能有效地抑制相应波段高次谐波。例如当基波为 12 eV 时的反射率为 12%左右,而二次谐波(24 eV)和三次谐波(36 eV)的反射率几乎为 0。且光源通过 Au\_Si\_Au

三反射镜后的偏振度  $P$  在该波段光源的偏振性最高可达 99%以上,大大地提高光源的偏振度,拓宽了计量线站的利用效率,如图 5 所示。

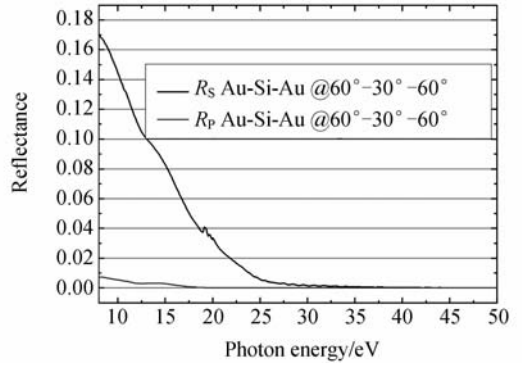


图 4 Au\_Si\_Au 系统的 S 和 P 分量的反射率

Fig. 4 S- and P-polarized reflectances of triple-reflecting mirror

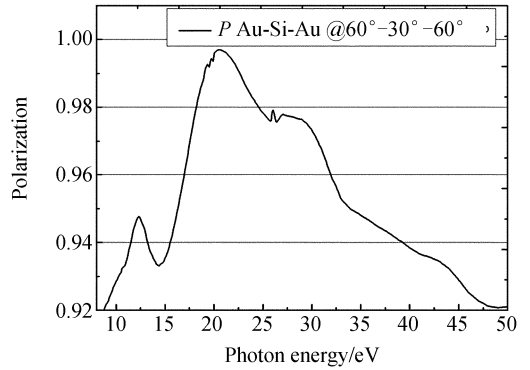


图 5 光通过 Au\_Si\_Au 三镜反射后的偏振度  $P$

Fig. 5 Polarization of triple-reflecting mirror Au\_Si\_Au

### 3.3 Au\_SiC\_Au, Au\_Be\_Au, Au\_Si\_Au 的比较

为了比较不同材料的三反射镜对光源偏振度的提高以及对高次谐波的抑制作用,文中还分别对 Au\_SiC\_Au 以及 Au\_Be\_Au 的三反射镜进行计算。

Au 膜的厚度及正入射角均与上节相同。

分别对 Au\_SiC\_Au 和 Au\_Be\_Au 三镜反射后 S 和 P 分量的反射率以及光源通过三反射镜后的偏振度  $P$  进行计算,并与 Au\_Si\_Au 的三反射镜偏振器比较。图 6 是 3 种三反射镜偏振器的偏振度的比较,可以明显地看出在 20 eV 时 Au\_Si\_Au 的三反射镜偏振器的偏振性最高,可以达

到 99%, Au\_SiC\_Au 的偏振度最低。图 7 是偏振器对高次谐波抑制的比较,也可以明显地看出 Au\_Si\_Au 的三反射镜偏振器对 30 eV 以后的波段抑制效果更好。

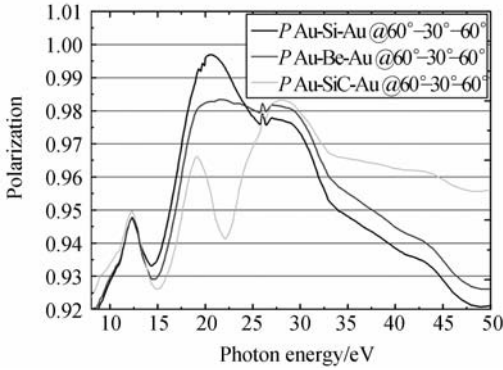


图 6  $M_2$  分别为 Si, Be, SiC 时三镜反射的偏振度  
Fig. 6 Comparison of polarization of triple-reflecting mirror

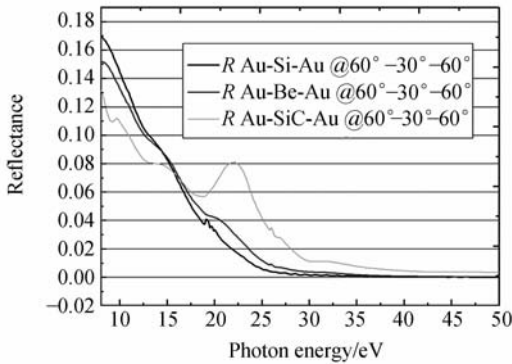
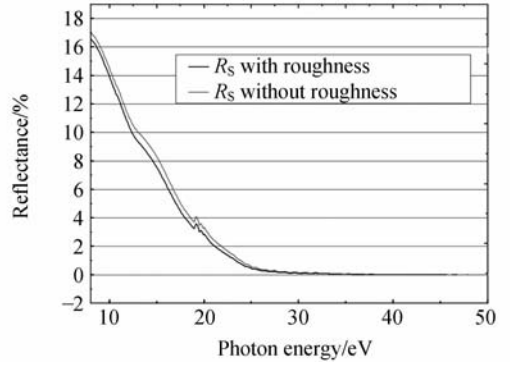


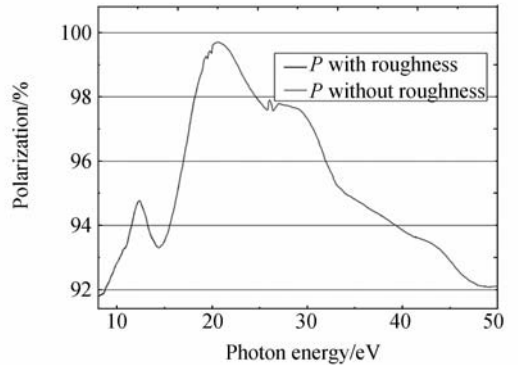
图 7  $M_2$  分别为 Si, Be, SiC 时,光经三镜反射后的反射率  
Fig. 7 Comparison of reflections of triple-reflecting mirrors

### 3.4 粗糙度对 Au\_Si\_Au 计算结果的影响

从以上计算结果来看, Au\_Si\_Au 的三反射镜偏振器对偏振度的影响以及高次谐波的抑制效果更好,但以上的计算结果都没有考虑镜面粗糙度,为了计算过程与实际情况更加接近,分别对 Si(粗糙度为 0.8~1 nm)、Au(粗糙度为 1.5~2 nm)的粗糙度进行了研究,结果 Au\_Si\_Au 三镜反射的反射率会减小 1% 左右(如图 8 所示),偏振度影响可忽略不计。计算中还 对 Si 镜氧化层对反射率的影响进行了研究:设 Si 的氧化层厚度为 3 nm,计算得到三镜反射率的影响很小,在 1% 左右。



(a) Effect of roughness on reflectance  
(a)粗糙度对反射率的影响



(b) Effect of roughness on polarization  
(b)粗糙度对偏振器的影响

图 8 有无粗糙度时 Au\_Si\_Au 三镜系统的反射率和偏振度(Si 的粗糙度取 1 nm, Au 的粗糙度取 1.8 nm)

Fig. 8 Comparison of Au\_Si\_Au system for reflectance and polarization with and without roughness

## 4 结 论

由于 40~140 nm 波段没有合适的滤片来抑制高次谐波,因此该波段的光源的利用效率很低。为了能够抑制该波段的高次谐波并提高光源的偏振特性,本文研究了三镜偏振器的偏振特性及其对长波段高次谐波的抑制效果。通过计算可以看出在长波段利用 Au\_Si\_Au 三反射镜不仅可以有效地抑制相应波段的高次谐波,改善高波段光源的纯度,还能更好地提高该波段光源的偏振度,在波长为 20 eV 时光源的偏振度达到了 99%,有效提高了该波段的光源利用效率。

## 参考文献:

- [1] 周洪军, 郑津津. 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. Quantitative research on higher order harmonics in metrology beamline [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 640-645. (in Chinese)
- [2] 周洪军, 钟鹏飞. 不同材料的滤片对 13~43 nm 高次谐波的抑制[J]. 光学精密工程, 2007, 15(12): 1915-1920.  
ZHOU H J, ZHONG P F. Suppression of higher-order harmonics by different material filters in 13~43 nm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12): 1915-1920. (in Chinese)
- [3] 薛松, 邵景鸿. 合肥同步辐射反射率测量装置[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 480-484.  
XUE S, SHAO J H. Reflectivity measuring device the in national synchrotron radiation laborator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5): 480-484. (in Chinese)
- [4] 周洪军, 钟鹏飞. 不同厚度 Al 滤片对 17~33 nm 高次谐波抑制的定量研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 1016-1020.  
ZHOU H J, ZHONG P F. Quantitative research on higher order harmonic suppression in 17~33 nm with different thickness Al filters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1016-1020. (in Chinese)
- [5] 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.  
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)
- [6] QUINN F M, TEEHAN D. Higher-order suppression in diffraction grating monochromators using thin films [J]. *J. Synchrotron Rad.*, 1998, 5: 783-785.
- [7] HARTMUT HOCHST, DENNIS RIOUX, *et al.*. Directional magnetization effects in magnetic circular dichroism spectra of Fe [J]. *Phys. Rev. B*, 2002, 65: 064439.
- [8] HARTMUT H, PETER B. Performance evaluation of a soft x-ray quadruple reflection circular polarizer [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, 66(2): 1598-1600.
- [9] NAIK S R, LODHA G S. The effect of misalignment errors in optical elements of VUV polarimeter [J]. *Methods Phys Res. A*, 2006: 211-218.
- [10] YANG M H, TONG X L, SUN Y, *et al.*. In-line extreme ultraviolet polarizer with hybrid configuration [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2009, 80: 033105.

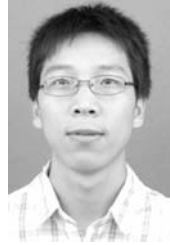
## 作者简介:



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



郑津津(1963—)男, 教授, 博士生导师, 于复旦大学获得学士学位, 中国科技大学获得硕士学位, 英国伯明翰大学获得博士学位, 主要从事细分曲面造型理论和方法、基于图像的曲面重构等方面的研究。E-mail: jjzheng@ustc.edu.cn



王冠军(1985—)男, 硕士研究生, 主要从事同步辐射计量以及机械设计方面的研究, E-mail: guanwj@mail.ustc.edu.cn



霍同林(1970—), 男, 助理研究员, 主要从事真空紫外及软 X 射线波段光谱辐射计量方面的研究。E-mail: huotl@ustc.edu.cn