WEI Fei, GUO Yihong, LENG Shuang, WEI Lai, CAO Leifeng. Highly monochromatic soft X-ray beam source design (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(1): 105-110. DOI:10.11728/cjss2019.01.105

无谐波软 X 射线单色仪设计*

韦 飞[1,2,3] 郭亦鸿[1,2,3] 冷 双[1,2,3]

魏 来[4] 曹磊峰[4]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院空间态势感知技术重点实验室 北京 100190)

4(中国工程物理研究院激光聚变研究中心 绵阳 621900)

摘 要 能量在 0.1∼1 keV 范围的软 X 射线辐射在空间科学任务中具有重要应用. 飞行前的辐射定标试验及地面辐射定标系统采用传统单色仪分光时, 由于波长的整数倍关系带来的高次谐波污染问题非常严重. 高次谐波在光束中的占比严重影响了软 X 射线探测仪器的定标数据精度. 本文探讨了无谐波单极衍射技术在产生具有高单色性能的软 X 射线光束中的应用, 基于单极衍射光栅技术实现软 X 射线无谐波单色仪设计. 软 X 射线无谐波单色仪应用于空间辐射定标系统时能够将高次谐波占比抑制到 0.3% 以下, 满足空间软 X 射线科学仪器高精度辐射定标试验对高次谐波抑制的要求.

关键词 空间环境, 软 X 射线, 高次谐波, 单极衍射光栅, 定标

中图分类号 P 35

Highly Monochromatic Soft X-ray Beam Source Design

WEI Fei[1,2,3] GUO Yihong[1,2,3] LENG Shuang[1,2,3]

WEI Lai[4] CAO Leifeng[4]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing* 100190)

3(*Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

4(*Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621900)

Abstract The soft X-ray radiation in the range from 100 eV to 1 keV consists of rich significant emission lines and the blackbody continuum. It is commonly used in X-ray instruments for space

* 国家科技部国家重大科学仪器设备开发专项 (2012YQ130125), 中国科学院空间科学战略性先导科技专项 (XDA04000000) 和国家重点研发计划国家质量基础的共性技术研究与应用 NQI 专项 (2016YFF0200802) 共同资助

2017-08-25 收到原稿, 2018-08-30 收到修定稿

E-mail: weif@nssc.ac.cn

scientific missions, and the instruments should be well calibrated for spectral response before the flight. Because of the obvious spectra contamination from higher orders of diffraction, X-ray source used traditional gratings is difficult to get highly monochromatic X-ray beam. A new monochromator based on single-order diffraction grating is designed in patterns of zigzag or photon sieves, which has excellent diffraction characteristics of suppressing all higher orders of diffraction from shorter wavelength. The monochromator can keep the percent of the higher order contamination below 0.3%. The results can bring great advantages in preflight calibration of X-ray instruments for space science purposes.

Key words Space environment, Soft X-ray, Higher order contamination, Single-order diffraction grating, Calibration

0 引言

空间中的软 X 射线主要来源于高温天体热辐射、离子态物质激发和退激等过程, 例如太阳 X 射线 (太阳耀斑爆发过程及高温太阳活动区的特征辐射), 太阳释放的高能电磁辐射, 太阳风在行星际传播时与行星表面及上层大气物质相互作用激发的 X 射线特征谱等.

软 X 射线辐射为开展太阳活动观测、高能天体探测、电离层与磁层动态过程观测及行星表面物质分析等提供了重要的遥感监测手段. 高分辨率光谱分析和成像观测能力是衡量空间软 X 射线科学仪器性能的重要指标.

许多空间 X 射线探测科学仪器的工作能段主要为 0.1~1 keV, 该能段对应的波长范围为 1.24~12.4 nm. 根据光栅衍射公式, 不同级次但是波长成整数倍关系的电磁辐射成分出现在相同的衍射角度上. 波长连续的电磁辐射作用在光栅上, 当选择较长探测波长的一级衍射光斑时, 较短波长的高次谐波对选择的波长构成污染. 在 1.24~12.4 nm 波段范围内, 通过传统黑白光栅或者衍射晶体进行分光存在严重的高次谐波污染 [1], 无法满足空间 X 射线科学仪器光谱响应特性测定的试验要求.

本文针对中国单极衍射二维光栅研制进展, 设计基于单极衍射二维光栅的无谐波污染软 X 射线单色仪研制方案, 研制可适应 0.1~1 keV 能量范围的连续可调 X 射线光源单色化装置, 将高次谐波占比抑制到 0.3% 以下. 该单色仪能够满足中国空间 X 射线科学仪器辐射定标要求.

1 空间 X/EUV 科学仪器辐射定标系统

为了满足应用卫星和科学卫星的空间软 X 射线/ EUV 探测仪器定标和测试试验需要, 中国科学院国家空间科学中心建造了空间 X/EVU 辐射定标实验室. 该实验室建设了 2 个 10 万级洁净间和 1 个万级洁净间. 其中 1 个 10 万级洁净间主要用于实验室公用光学元器件、设备的调试以及光电器件、电子学设备的放置, 同时也可用于仪器的装配. 万级洁净间总长约 10 m, 宽 5.8 m, X/EUV 辐射定标系统运行于其中.

X/EUV 辐射定标系统主要由 X/EVU 光源、单色仪、准直管道和试验真空腔体组成 (见图 1) , 其中试验真空腔体直径 1.9 m, 可满足空间 X 射线望远镜等大型科学仪器整机定标和测试需要. 该系统能够满足两类探测设备的标定需求: 一是谱分析设备, 要求光束单色性较好, 对光束的平行性要求略低; 二是成像观测类设备, 要求光束单色性优于普通光栅单色仪, 同时要求较高的光束平行度. 这里研究如何通过无谐波单色仪获得 20 nm 以下软 X 射线单色光源, 从而实现空间软 X 射线谱仪整机定标和成像设备重要部组件的性能测试.

2 无谐波软 X 射线单色仪设计

无谐波软 X 射线光源单色化系统的核心部件是基于单极衍射光栅的单色仪. 该单色仪覆盖真空紫外到软 X 射线波段, 高次谐波抑制能力可达 0.3%[2]. 单

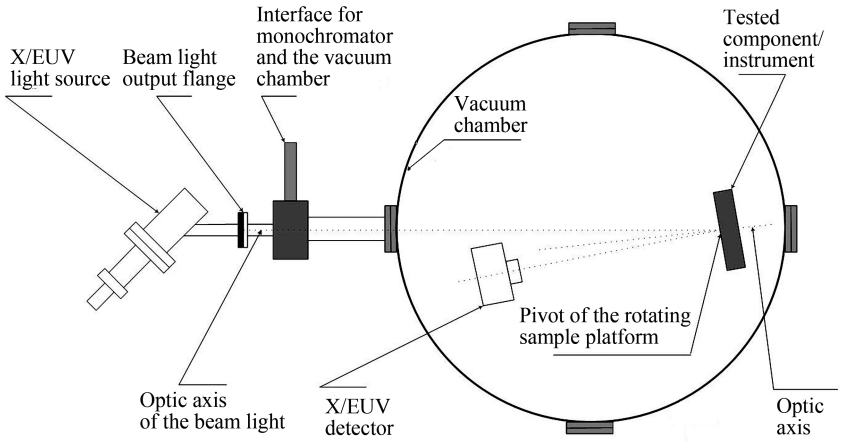


图 1　X/EUV 辐射定标系统

Fig. 1　Schematic illustration for the X/EUV calibrating system

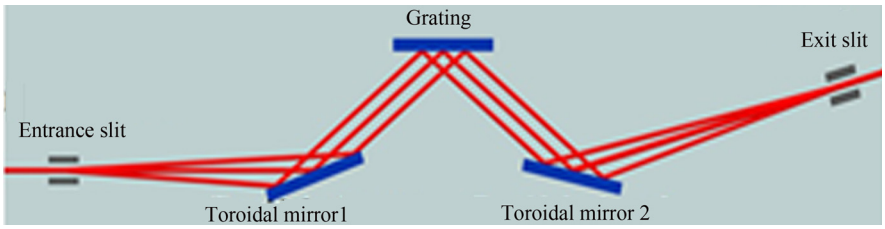


图 2　单色仪光路系统设计

Fig. 2　Optical scheme design for the monochromator

极衍射光栅单色仪的主要光学元件包括入射球面镜、平面光栅和出射聚焦镜. 这里选用结构简单的固定包含角单色器结构, 以简化加工和调试. 为了避免大范围的移动出缝, 使用两块共轭球面镜作为聚焦镜, 其焦点位置分别位于入缝和出缝处, 光栅的入射和出射光束在谱分辨方向均为平行光束, 无需移动出缝即可满足聚焦条件. 该单色仪利用一块平面光栅就能够覆盖从真空紫外到软 X 光的上限, 其采用平行光入射方式, 平面镜只需转动有限的角度. 在平面镜的每个角度姿态下, 光栅以固定包含角的模式工作, 覆盖一定的波段. 图 2 给出了单色仪工程样机的总体光路排布. 为了覆盖 1.24~12.4 nm 的工作波长范围, 设置 1200, 600, 300 $\mathrm{lp{\cdot}mm^{-1}}$ 三组单极衍射光栅, 光路主要参数列于表 1, 光栅元件的覆盖能段与对应参数列于表 2.

表 1　光路主要参数

Table 1　Parameters of the optics

参量	数值
入缝/出缝尺寸/μm	300
收集角/mrad	4×10
光栅线密度/($\mathrm{lp{\cdot}mm^{-1}}$)	1200, 600, 300
聚焦镜掠入射角/(°)	3
光栅包含角/(°)	7
能谱分辨本领	$E/\Delta E > 40$

3　单极衍射光栅元件设计

为了解决高次谐波污染问题, 本单色仪采用无谐波单极衍射光栅作为主要分光元件. 普通黑白光栅由一组平行的等间距狭缝构成, 光栅周期宽度为 d, 狭缝宽度为 $d/2$. 设狭缝透射系数为 1, 空间无限大的黑白光栅透射系数 $t_{\mathrm{bw}}(x)$ 为 1 和 0 的交替函数, 其表达式为

$$t_{\mathrm{bw}}(x)=\begin{cases}1, & nd\leqslant x<\left(n+\dfrac{1}{2}\right)d;\\ 0, & \left(n+\dfrac{1}{2}\right)d<x\leqslant(n+1)d.\end{cases}\quad(1)$$

其中, $n=0,1,2,\cdots$. $t_{\rm bw}(x)$ 的傅里叶级数展开为 [1]

$$t_{\rm bw}(x)=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sum_{i=-\infty}^{\infty}=-\frac{i}{im}\exp\Big(-\frac{2\pi{\rm i}\,mx}{d}\Big). \quad (2)$$

其中, $m=\pm1,\pm3,\pm5,\cdots$.

设振幅为 A_0、波长为 λ 的平面波沿光轴方向入射到光栅平面上, 如图 3 所示. 接收面上沿 ξ 方向的光强分布为

$$U_{\rm bw}(\xi,0)=A_0\frac{\exp({\rm i}\,kz)}{{\rm i}\,\lambda y}\exp\Big(\frac{{\rm i}\,k\xi^2}{2z}\Big)\cdot \Big[\frac{1}{2}\delta\Big(\frac{\xi}{\lambda z}\Big)+\frac{1}{2}\sum_{m=-\infty}^{\infty}-\delta\Big(\frac{\xi}{\lambda z}+\frac{m}{d}\Big)\Big]. \quad (3)$$

其中, k 为入射光波数, $\delta(*)$ 为狄拉克函数. $\xi=0$ 时, 光强沿 ξ 方向有最大值. $\xi=m\lambda z/d$ 定义了透射光栅的衍射级数, 由式 (3) 可以看到, 衍射模式的各级分别对应透射率的傅里叶展开各级.

如果透射光栅在 xy 平面的透射率分布满足正弦分布 [3], 如图 4 所示, 则式 (1) 可改写为

$$t(x)=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\cos\Big(\frac{2\pi x}{d}\Big). \quad (4)$$

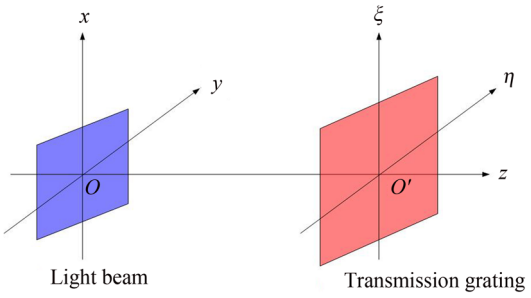


图 3 入射光与透射光栅坐标系统

Fig. 3 Coordinating system for the incidence light beam and the transmission grating

表 2 光栅元件覆盖能段与主要参数

Table 2 Parameters of the gratings concerning the soft X-ray energy band

光栅刻线/(lp·mm^{-1})	1200		600		300	
能量/eV	1000(高)	500(低)	510(高)	250(低)	255(高)	100(低)
入缝/μm	300	300	300	300	300	300
出缝/μm	300	300	300	300	300	300
入缝 + 出缝 $E/\Delta E$	45.0	85.0	44.2	85.0	44.2	72.7
球面镜像差 $E/\Delta E$	625	716	614	716	680	695
面型误差 $E/\Delta E$	528	1011	518	1011	518	857
衍射极限 $E/\Delta E$	84 000	108 000	42 000	54 000	21 000	24 000
总分辨率 $E/\Delta E$	44	84	44	84	44	72

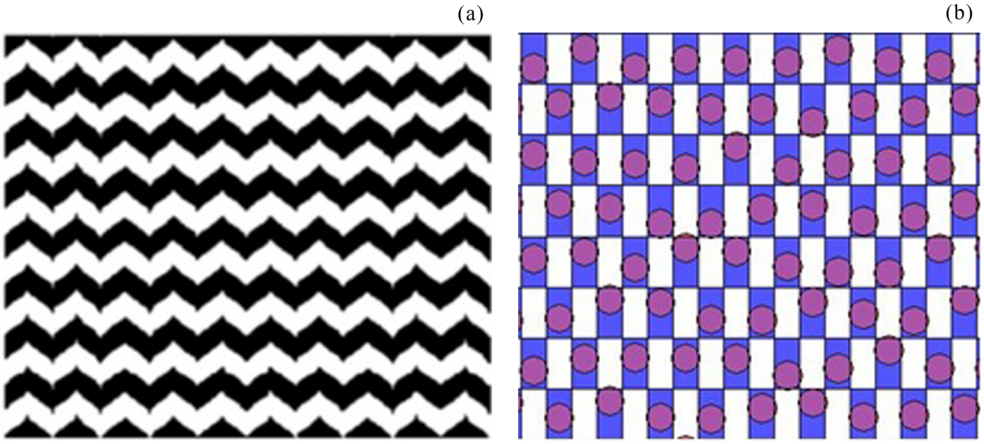


图 4 之字形 (a) 与光子筛 (b) 单极衍射光栅

Fig. 4 Zigzag shape (a) and photon sieve (b) single-order diffraction grating

在接收面的衍射模式仅剩下 0 级和 ±1 级光斑, 能够消除入射光波长的高次衍射, 形成单极衍射效应. 正弦光栅的高次谐波衍射强度比普通黑白光栅低 3~4 个数量级, 仿真结果如图 5 所示. 在多种波长混合光入射时, 正弦光栅可以有效抑制不同波长的高次衍射成分, 获得高单色性衍射光斑. 之字形光栅/光子筛

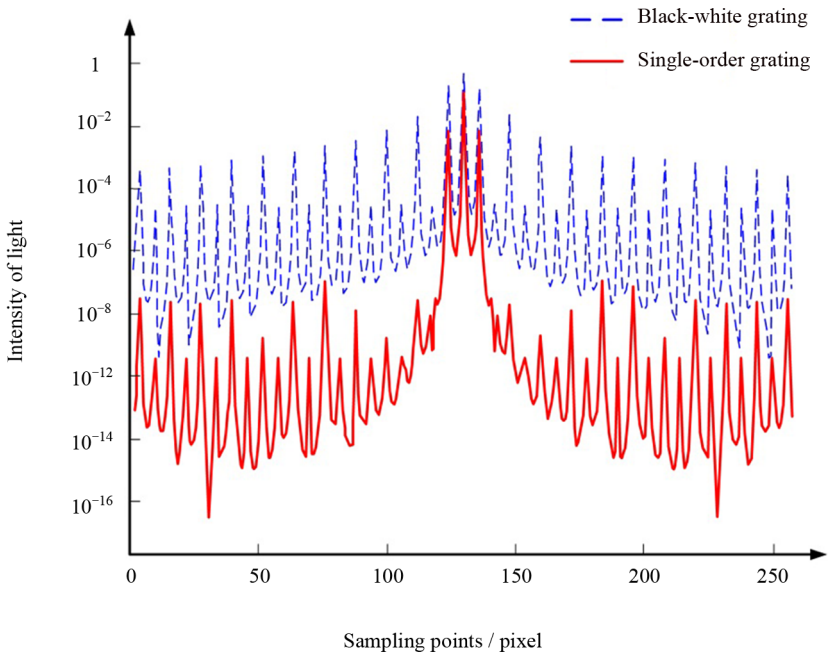


图 5　普通黑白光栅与正弦光栅衍射光强分布比较

Fig. 5　Comparison of diffraction efficiency between black-white grating and single-order grating

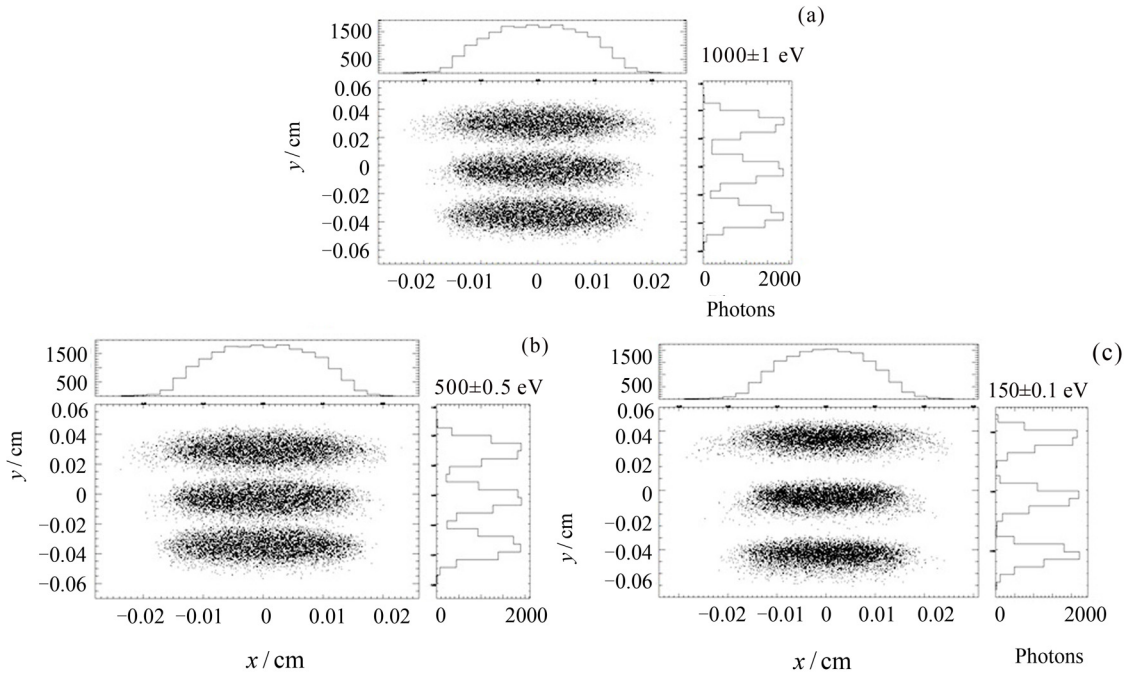


图 6　不同能段光斑能量分布

Fig. 6　Energy resolution with different energy segments

利用电子束刻蚀方法获得良好的制备性能 [4], 具有工程应用价值. 在 1.24~12.4 nm 波段范围内, 由于波长的整数倍关系十分突出, 并且有可能携带更短波长的其他成分, 采用单极衍射光栅解决高次谐波污染的问题在实际应用中具有重要意义.

4 单色性能分析

根据单色仪光学元件的参数设计, 加入各元件的面形误差, 通过 Shadow 软件仿真得到出射狭缝处的能量分辨情况. 不同能段的光斑能量分布如图 6 所示. 由图 6 可以看出, 使用 300 μm 入缝时, 不同能点的能量分辨均能达到 $\geqslant 40$ 的要求.

单色仪所用反射镜均使用 30 nm Pt 镀膜, 粗糙度为 0.5 nm, 对软 X 射线的反射效率见图 7. 低能端的系统整体通光效率约为 78%, 高能端的通光效率约为 40%. 考虑不同能量的镜子反射率、光线在入缝与出缝的通过率以及光栅的衍射效率 (统一估计为 0.5%), 可以得到系统整体光路的通过效率. 实验室中使用的软 X 射线光源的光子计数率范围通常为 10^5~10^7 s^{-1}. 通过无谐波单色仪分光后的光束强度可满足一般软 X 射线探测仪器工作范围的匹配要求.

5 结论

通过单极衍射光栅有效抑制高次谐波污染, 设计了无谐波污染的软 X 射线单色仪, 获得高单色性 X 射线光束. 基于单极衍射光栅的无谐波软 X 射线单色仪构成的光路能量分辨率 $E/\Delta E$ 满足 $\geqslant 40$ 的要求, 高次谐波占比达 0.3% 以下, 可用于空间软 X 射线仪器测试和标定系统建设.

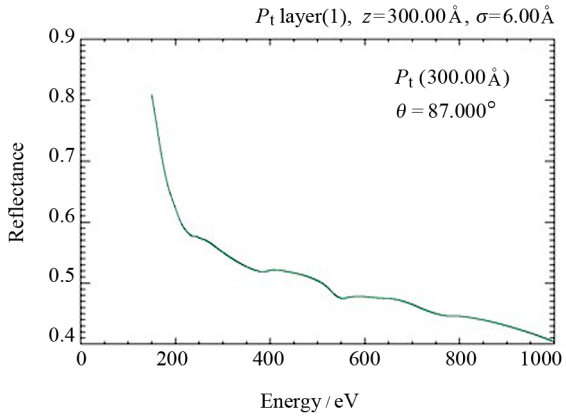


图 7 30 nm Pt 镀膜反射镜对软 X 射线的反射效率

Fig. 7 Reflection efficiency of 30 nm Pt-coating mirror in soft X-ray band

参考文献

[1] CAO Leifeng, FÖRSTER E, FUHRMANN A, *et al.* Single order X-ray diffraction with binary sinusoidal transmission grating [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(5): 053501

[2] KUANG Longyu, WANG Chuanke, WANG Zhebin, *et al.* Quantum-dot-array diffraction grating with single order diffraction property for soft X-ray region [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, **81**(7): 073508

[3] ZANG Huaping, CAO Leifeng, WANG Chuanke, *et al.* Numeric simulation of the diffraction pattern of zigzag grating [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011, **60**(3): 034215 (臧华平, 曹磊峰, 王传珂, 等. "之" 字形光栅衍射特性的数值模拟研究 [J]. 物理学报, 2011, **60**(3): 034215)

[4] ZHU Xiaoli, MA Jie, CAO Leifeng, *et al.* Fabrication of high-density transmission gratings for X-ray diffraction [J]. *Chin. J. Semicond.*, 2007, **28**(12): 2006-2010 (朱效立, 马杰, 曹磊峰, 等. 高线密度 X 射线透射光栅的制作工艺 [J]. 半导体学报, 2007, **28**(12): 2006-2010)