

# 掠入射多包含角平面光栅单色器的设计

彭倩<sup>1,2</sup>, 魏来<sup>1\*</sup>, 范全平<sup>1</sup>, 杨祖华<sup>1</sup>, 王心怡<sup>1</sup>, 张强强<sup>1</sup>, 易有根<sup>2</sup>, 曹磊峰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900;

<sup>2</sup>中南大学物理与电子学院, 湖南 长沙 410083

**摘要** 介绍了一种掠入射式多包含角平面光栅单色器的设计原理,从理论上对其可行性进行了分析和验证。该单色器系统对 SX-700 型单色器进行了改进,通过简单地升降多角平面反射镜即可对覆盖某个波长范围的包含角进行改变,选择所需的单色光波长。通过光学仿真软件 X-LAB 模拟了光束入射到多角平面反射镜的单个角度的反射面时,单色器对软 X 射线波段 1~2.48 nm 的单色化效果,从理论上验证了本设计能够实现宽能谱扫描及高次谐波的抑制,并且该单色器结构简单,易于在实际应用中得以推广。

**关键词** 光学器件;平面光栅单色器;多角平面反射镜;软 X 射线;谐波抑制

中图分类号 O434.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.022301

## Design of Grazing Incident Multi-Included-Angle Plane Grating Monochromator

Peng Qian<sup>1,2</sup>, Wei Lai<sup>1</sup>, Fan Quanping<sup>1</sup>, Yang Zuhua<sup>1</sup>, Wang Xinyi<sup>1</sup>

Zhang Qiangqiang<sup>1</sup>, Yi Yougen<sup>2</sup>, Cao Leifeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

<sup>2</sup>College of Physics and Electronics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China

**Abstract** The design principle of a grazing incident multi-included-angle plane grating monochromator is introduced, and the feasibility of the monochromator is analyzed and verified theoretically. This system is an improvement of SX-700 monochromator. Rising or falling the multi-angle plane reflection mirror can easily change the included-angle of covering a certain wavelength range, thus the desired wavelength of monochromatic light is chosen. Also, the monochromatization effect with X-LAB optical simulation software by monochromator at soft X-ray region 1~2.48 nm are simulated when the light incidents in the reflecting surface of a certain angular in multi-angle plane reflection mirror. This proves in theory that the wide energy spectrum scanning and high harmonics suppression can be realized with the proposed design. Furthermore, the structure of the monochromator is simple, which makes it easy to popularize for practical applications.

**Key words** optical devices; plane grating monochromator; multi-angle plane reflection mirror; soft X-ray; harmonics suppression

**OCIS codes** 230.1950; 220.4830; 340.7480

## 1 引言

随着第二、第三代同步辐射光源和激光等离子体光源的发展,如何从中获取高通量、高分辨的单色光也

收稿日期: 2016-09-29; 收到修改稿日期: 2016-10-13

基金项目: 国家重大科学仪器开发专项(2012YQ130125)、国家自然科学基金(11375160)

作者简介: 彭倩(1991—),男,硕士研究生,主要从事 X 光光学元件方面的研究。E-mail: yuphin@163.com

导师简介: 曹磊峰(1967—),男,博士,研究员,主要从事强场物理、激光等离子体诊断和 X 光光学等方面的研究。

E-mail: leifeng.cao@caep.cn

\* 通信联系人。E-mail: future718@yeah.net

逐渐成为了大家所关注的问题<sup>[1-3]</sup>。以衍射光栅作为分光元件的光源单色化技术是实现光谱测量分析、扫描波长输出的重要技术手段。同时,随着不断发展的白光光源技术和新型色散元件的出现,单色仪的使用范围越来越广,也拓展了其在谱学显微束单色化、宽波长扫描及高分辨成像等领域的发展空间<sup>[4-5]</sup>。

在软 X 射线波段(0.62~12.4 nm),要实现这种宽能谱的连续扫描,一般都采用掠入射式变包含角平面光栅单色器(VAPGM)<sup>[6]</sup>。在同步辐射束线中,平面光栅单色器(PGM)主要由 3 个元件组成:平面反射镜、光栅、凹面聚焦镜<sup>[7-8]</sup>。平面反射镜除了具有反射光束和改变光栅的包含角的作用外,还具有一定的光学滤波作用;光栅对入射光束进行色散;凹面聚焦镜用以聚焦已经分离的单色光束。其波长扫描由光栅绕中心转动及前置平面镜绕镜面外转轴的联合转动来完成,这种掠入射 VAPGM 的优点是扫描波长范围宽,理论分辨率高<sup>[9]</sup>。但在掠入射 VAPGM 工作时,平面镜和光栅都必须旋转一定的角度进行配合才能保证所需波长的单色光输出,该扫描方式较为复杂,且对单色器的机械加工精度要求极高。

本文提出了一种扫描方式简单、扫描能谱范围宽的平面光栅单色器。通过将单块平面镜的转动改进为多角平面镜(阶梯状排列多块不同水平夹角的小型平面反射镜)的上下平移。相比于平面光栅单色器进行能谱扫描时必须前置平面镜和光栅进行联动旋转的方式而言,所设计的机械结构与能谱扫描方式更为简单。为了验证本单色器的可行性及性能,采用 X 射线光学仿真软件 X-LAB 对所设计的单色器系统进行了仿真模拟。X-LAB 用于研究光束经过光学系统的传播过程,可广泛应用于可见光、紫外光以及 X 光方面的光学系统,具有一定的通用性,对于仿真和设计光谱仪、单色仪而言十分便捷。

## 2 基本原理

### 2.1 系统结构

平面光栅单色器常用于同步辐射束线中软 X 射线光源单色化,一种典型的单色系统就是变包含角平面光栅单色器 SX-700<sup>[10-12]</sup>。SX-700 的核心部分由一块前置平面镜,平面光栅和一块后置的椭球面聚焦镜构成。受到椭球镜的加工精度影响,其面型误差对狭缝上的成像质量有所影响。而根据变线距光栅的自聚焦特性而设计的单色器<sup>[13-14]</sup>,虽然可以不使用后置聚焦镜,但其光栅高阶变间距系数在宽能谱范围内造成的球差和彗差不可忽略。所提出的单色器系统将 SX-700 的平面镜和平面光栅联合转动扫描方式替换成多角平面镜的平移加光栅微转动调节的波长选择模式。图 1 为所提出的单色器的工作原理图,从左到右依次为入射狭缝  $S_1$ ,前置聚焦镜  $M_1$ (准直镜),多角平面镜  $M_2$ ,平面光栅  $G$ ,后置聚焦镜  $M_3$  和出射狭缝  $S_2$ 。该单色器的基本工作过程为:通过入射狭缝  $S_1$  的发散光束经过前置聚焦镜  $M_1$  成为准直光束,照射在多角平面镜  $M_2$  上,经多角平面镜  $M_2$  反射到平面光栅  $G$  分光后,色散光束也为准直光,由后置聚焦镜  $M_3$  聚焦在出射狭缝  $S_2$  处。其中  $f_1$ 、 $f_2$  分别为聚焦镜  $M_1$ 、 $M_3$  的焦距, $\alpha$ 、 $\beta$  分别为平面光栅的入射角和衍射角。

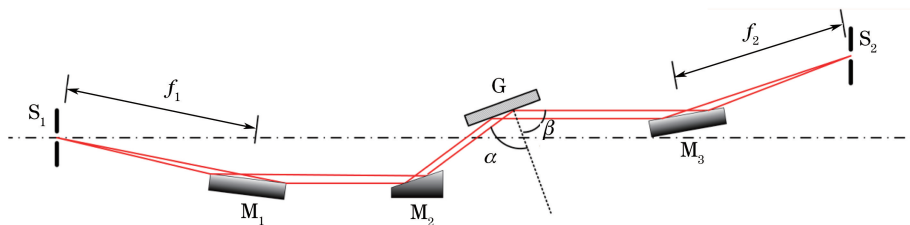


图 1 掠入射多包含角平面光栅单色器原理图

Fig. 1 Principle diagram of grazing incident multi-included-angle plane grating monochromator

本单色器仅色散单元(多角平面镜和平面光栅)需要通过位置变动来进行波长扫描,其他各元件均是固定的。由于光栅输入输出的光束始终为准直光束,离焦像差  $F_{200} = \frac{\cos^2 \alpha_n}{r} + \frac{\cos^2 \beta_n}{r'}$  中光栅的入射臂长度  $r$  和出射臂长度  $r'$  均为无穷远,因此光栅旋转扫描波长时,始终有  $F_{200} = 0$ ,即无离焦像差。这样单色器无需移动出射狭缝,仍可保证色散光束始终聚焦于出射狭缝处。根据所需的光栅包含角数目  $n$  ( $n$  为整数)和入射到平面镜的光束与光栅转轴的垂直距离  $H$ ,可以设计出相应的  $n$  个反射面的角度及相对位置关系,如图 2 所示。

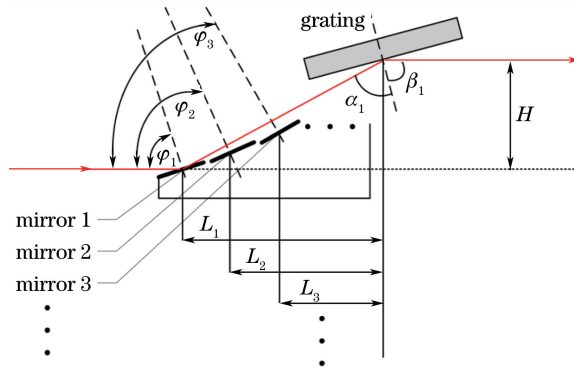


图 2 多角平面反射镜示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-angle-plane reflection mirror

图 2 中所示的多角平面镜由多块与水平夹角呈递增趋势的平面镜组成,图 2 中为了区别其对应不同的能量范围及高度  $H$ ,故将各块平面镜分开。多角平面镜在实际制作过程中,可以通过在长方体状的基底上切割出多个平整相连的小矩形区域,然后进行镀膜。每个镜面的角度允许存在一定的加工误差,少许的角度变化只是影响该镜面所能单色化的能量范围。为保证整个系统的通量和效率,对于一束从  $M_1$  出来直径为  $\phi$  的准直光,则多角镜的第  $n$  个反射面的宽度应不小于  $\phi/\sin(90^\circ - \varphi_n)$ 。同时,为了使多角平面镜的角度间隔精度控制在要求的公差范围内,解决加工误差对单色器精度的影响,应对多角平面镜的多个反射面之间的倾角间隔用精密测角仪进行标定测试,其标定测试的精度小于等于  $0.1''$ ,以实际测试的角度值作为标准角,进行平面光栅包含角的调整。

从几何光学的角度可以得出,当入射到多角平面镜第  $n$  个反射面时,光栅的包含角在入射到多角平面镜的光束方向上,每个反射面中心与光栅中心的水平距离满足  $L_n = -H \cot(2\varphi_n)$ 。在光源固定且光束小的情况下,平面光栅在不同的包含角之间切换时,只需要在垂直于入射到多角平面镜的光束方向升或降多角平面镜,使相应的反射面中心到达光路中心,就可以使经过多角平面镜反射的光束均可以到达光栅中心,并改变光栅的包含角。

## 2.2 波长扫描原理

平面光栅的任意包含角  $\theta_n$  都对应一段波长范围  $[\lambda_{n\_min}, \lambda_{n\_max}]$ ,且满足光栅方程

$$\sin \alpha_{n\_min} - \sin(\theta_n - \alpha_{n\_min}) = \frac{m\lambda_{n\_min}}{d}, \quad (1)$$

$$\sin \alpha_{n\_max} - \sin(\theta_n - \alpha_{n\_max}) = \frac{m\lambda_{n\_max}}{d}, \quad (2)$$

式中,  $m$  为正整数,代表光栅衍射级次(取  $m=1$ );  $d$  为光栅周期,  $\alpha_{n\_min}$  和  $\alpha_{n\_max}$  为光栅入射角的最小和最大值,由光栅旋转机构参数、光栅尺寸、单色器收集角确定。

平面光栅以其光学面中轴线为旋转轴,当需要输出的波长  $\lambda_0$  在某个包含角  $\theta_1$  对应的波段  $[\lambda_{1\_min}, \lambda_{1\_max}]$  内切换时,平面光栅在固定包含角的模式下工作,只需要旋转它使入射角  $\alpha_1$  满足  $\sin \alpha_1 - \sin(\theta_1 - \alpha_1) = \frac{m\lambda_0}{d}$ , 其中  $\theta_1 - \alpha_1 = \beta_1$ 。如果需要输出的波长  $\lambda_0$  超出当前包含角  $\theta_1$  对应的波段,那么就需要升或降多角平面镜,将对应的第  $n$  个反射面移进光路,切换平面光栅的包含角到对应值  $\theta_n$ ,再旋转平面光栅,使其入射角  $\alpha_n$  满足  $\sin \alpha_n - \sin(\theta_n - \alpha_n) = \frac{m\lambda_0}{d}$ , 其中  $\theta_n - \alpha_n = \beta_n$ , 就可以实现波长  $\lambda_0$  的输出。

整个单色器系统的理论分辨率可以表示为

$$\left(\frac{\lambda}{\Delta\lambda}\right)_{\text{system}} = \sqrt{\sum \left(\frac{\lambda}{\Delta\lambda}\right)_i^2}, \quad (3)$$

式中,  $i$  表示对系统分辨率有影响的各种因素,如狭缝宽度,聚焦镜(准直镜)、平面镜与光栅的面型误差,机械运动精度等。此外,光学放大系数  $c_{ff} = \cos \beta / \cos \alpha$  也是 VAPGM 的一个重要特征参数,若  $c_{ff}$  取值过大,

后置聚焦镜的像差就会降低单色器的分辨能力;若  $c_{ff}$  取值过小,掠入射角变大,反射率变小。 $c_{ff}$  还与多角镜的反射率和所采用光栅的衍射效率有关。通过选择合适的  $c_{ff}$  值,确定包含角  $\theta_n$  的取值,合理划分每块多角镜上的小反射镜(对应入射角  $\varphi_n$ )所覆盖的波长范围,就能实现所设计的掠入射多包含角平面光栅单色器的高分辨、高通量、宽能谱扫描和谐波抑制。

### 3 光线追迹仿真结果与分析

根据实际情形,当  $\varphi=87^\circ, 86^\circ, 85^\circ, 81.5^\circ, \alpha=83.3^\circ\sim 88.63^\circ$  时,一块线密度为 1200 line/mm 的平面光栅可以覆盖 1~20 nm 的波长范围,与平面光栅单色器的覆盖范围相当。设计入射到平面镜的光束与光栅转轴的垂直距离  $H=35$  mm。为避免高次谐波影响出光的单色性,设计多角平面镜的不同反射面,使包含角可以在  $174^\circ, 172^\circ, 170^\circ, 163^\circ$  间切换,分别对应 4 个波段:1~2.48 nm, 2.06~4.43 nm, 4.13~8.26 nm, 7.74~20 nm。由于目前的 X-LAB 版本还是一款序列化的光学仿真软件,无法对以上 4 个波段范围同时进行模拟,故仅对第一个波段进行计算,以其特殊性推广到对其他波段的普适性。

模拟直接采用直径为 1 mm 的平行光源( $\lambda_0=2$  nm)入射,不需要入射狭缝与前置聚焦镜将发散光转为平行光。按照图 1 结构及上述设计参数,平行光以  $\varphi=87^\circ$  入射多角平面镜的第一个反射面,此时对应光栅入射角可由(1)式或(2)式得出,  $\alpha=88.31^\circ$ , 为保持与入射光平行,相应的光栅出射角  $\beta=85.69^\circ$ 。后置聚焦镜采用柱面反射镜(也可使用球面、抛物面、轮胎面等面型),柱面镜轴线与光线垂直,实现出射光在  $y$  方向上的聚焦。已知柱面镜成像公式

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{2}{\rho \cos \delta}, \quad (4)$$

式中,  $u$  为物距,  $v$  为像距,  $\rho$  为柱面镜曲率半径,  $\delta$  为光线到柱面镜的入射角。取  $v=f_2=500$  mm, 则  $\rho=22926$  mm, 狭缝  $S_2$  宽 10  $\mu\text{m}$ , 仿真结果如图 3 所示,可以达到约 2000 的能量分辨。

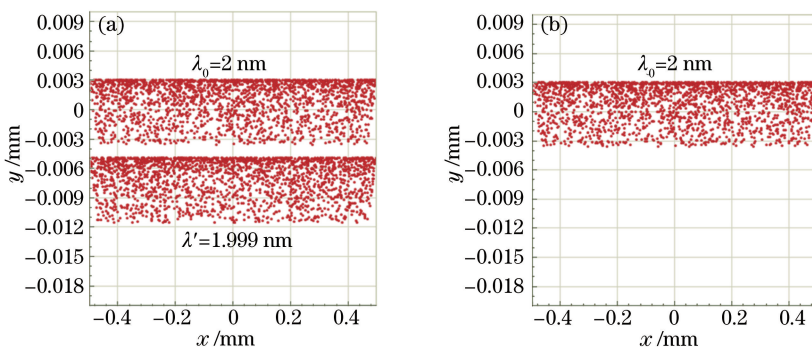


图 3 X-LAB 仿真结果。(a)不加狭缝  $S_2$ ; (b)加狭缝  $S_2$

Fig. 3 Simulation results of X-LAB. (a) Without  $S_2$ ; (b) with  $S_2$

加设狭缝,不仅是为了限制出光的尺寸以提高分辨率,更提高了出光的纯度。此外,本单色器的出光分辨能力还受柱面镜尺寸的影响,可根据所需出光亮度(转换效率)和纯度,选择适当大小的柱面镜和狭缝。按照上述的光学设计,可以用含 4 块反射的多角镜,实现对软 X 光波段的准单色出光,同时还能够抑制高次谐波的叠加,整个扫描范围内无离焦像差。

### 4 结 论

就目前已存在的掠入射变包含角平面光栅单色器的结构进行了改进,通过含有多块平面反射镜的多角镜将光栅前置镜的旋转机制转换为平移机制。相比于旋转机制,平移机制更加方便调试,为光栅单色器的使用提供了一种新的方式。使用多角平面镜非连续地改变光栅包含角不仅简化了单色器扫描方式,还增加了整个系统的容错性。提出的掠入射多包含角单色器可在同步辐射装置或其他软 X 射线光谱分析中以较高分辨率方式工作,覆盖能谱范围宽、精度高、结构简单,具有重要的实用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Attwood D. Soft X-rays and extreme ultraviolet radiation: principles and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 1-21.
- [2] Tang Fuyuan. Synchronized radiation-its discovery, feature and exploitation [J]. Physics and Engineering, 2004, 14(3): 34-39.  
唐福元. 同步辐射的发现、特性及其应用领域的开拓 [J]. 物理与工程, 2004, 14(3): 34-39.
- [3] Freund A K. Third-generation synchrotron radiation X-ray optics [J]. Structure, 1996, 4(2): 121-125.
- [4] Gong Xuepeng, Lu Qipeng, Peng Zhongqi. Structure design and accuracy testing of monochromator in a soft X-ray spectromicroscopic beamline [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0234001.  
龚学鹏, 卢启鹏, 彭忠琦. 软 X 射线谱学显微光束线单色器结构设计及精度测试 [J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0234001.
- [5] Jiang Yaguang, Huang Peiqing, Cao Guorong. Compound holographic lenses used as a monochromator [J]. Acta Optica Sinica, 1987, 7(1): 55-61.  
姜亚光, 黄佩清, 曹国荣. 复合全息透镜用作单色器 [J]. 光学学报, 1987, 7(1): 55-61.
- [6] Petersen H, Jung C, Hellwig C, *et al.* Review of plane grating focusing for soft X-ray monochromators [J]. Rev Sci Instrum, 1995, 66(1): 1-14.
- [7] Lu Qipeng. Synchrotron radiation soft X-ray beam-line monochromator [J]. OME Information, 2001, 9: 35-39.  
卢启鹏. 同步辐射软 X 射线束线单色器 [J]. 光机电信息, 2001, 9: 35-39.
- [8] Chen Jiahua, Xue Song, Lu Qipeng, *et al.* The variable included angle plane grating monochromator and the key technology [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2011, 41(1): 6-11.  
陈家华, 薛松, 卢启鹏, 等. 变包含角平面光栅单色器及其关键技术 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41(1): 6-11.
- [9] Lu Qipeng, Song Yuan, Gong Xuepeng, *et al.* Key technologies and the performance measuring methods in variable included angle plane grating monochromator [J]. Chinese Optics, 2016, 9(2): 284-287.  
卢启鹏, 宋源, 龚学鹏, 等. 极高分辨变包含角平面光栅单色器关键技术及检测方法研究 [J]. 中国光学, 2016, 9(2): 284-287.
- [10] Petersen H. The plane grating and elliptical mirror: a new optical configuration for monochromators [J]. Opt Commun, 1982, 40(6): 402-406.
- [11] Lu L J, Chen J Y. Discussion and improvement of the SX-700 beamline [J]. Nucl Instrum Meth A, 1991, 309(3): 581-584.
- [12] Wu Kun, Xue Song, Lu Qipeng, *et al.* Simulation analysis and measurement of rotation angle repeatability for grating sine mechanism of SX-700 monochromator [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1): 45-51.  
吴坤, 薛松, 卢启鹏, 等. SX-700 单色器光栅正弦机构转角重复精度的模拟分析与测量 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 45-51.
- [13] Tong Yajun. Study of precision measurements of Monk-Gillieson soft X-ray grating monochromator and Offner imaging spectrometer [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010: 18-23.  
佟亚军. Monk-Gillieson 软 X 射线光栅单色器精密测试及 Offner 成像光谱仪研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2010: 18-23.
- [14] Jark W, Melpignano P. Optimisation of a spherical grating monochromator for soft X-ray microscopy applications [J]. Nucl Instrum Meth A, 1994, 349(1): 263-268.