

# 软 X 射线并联平场光栅的设计

王庆博<sup>1,2</sup> 刘正坤<sup>1\*</sup> 陈火耀<sup>1</sup> 王 宇<sup>1</sup> 付绍军<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029  
<sup>2</sup> 中国科学技术大学工程科学学院精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027

**摘要** 为了拓宽软 X 射线平场全息凹面光栅的工作波段, 提出了并联平场全息凹面光栅的优化设计方法。利用遗传算法, 将两块工作波段不同的平场光栅设计在同一基底上。两块平场光栅的工作波段分别为 2~5 nm 和 5~30 nm, 两者使用结构完全相同。应用光线追迹的方法, 研究了并联平场光栅的分辨特性, 其分辨率与现有商用平场光栅的分辨率相当。基于光程函数理论, 给出了并联平场光栅的制作光路, 理论设计值和光路优化值的线密度偏差在  $\pm 1$  line/mm 以内。数值模拟结果显示, 并联平场光栅既拓宽了工作波段, 又保证了分辨率与现有平场光栅分辨率相当, 其设计适用于记录更宽波段的软 X 射线光谱。

**关键词** 光栅; 并联平场光栅; 像差校正; 光线追迹; 分辨率

**中图分类号** O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0805001

## Design of Parallel Flat-Field Gratings in Soft X-Ray Region

Wang Qingbo<sup>1,2</sup> Liu Zhengkun<sup>1</sup> Chen Huoyao<sup>1</sup> Wang Yu<sup>1</sup> Fu Shaojun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230029, China

<sup>2</sup> Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China

**Abstract** In order to broaden the wavelength range of flat-field holographic concave grating (FHCG), the optimization method of parallel flat-field holographic concave gratings (PFHCGs) is proposed. Two flat-field gratings working in different wavebands, one for 2~5 nm and the other for 5~30 nm, are designed on the same substrate based on genetic algorithm, and the two gratings can work simultaneously because of the same working structure. Theoretical spectral resolution of PFHCGs is studied via ray-tracing method, which is pretty the same as that of existing commercial FHCG. Based on the optical path function theory, the recording optical path of PFHCGs is given. The results demonstrate the line density deviation is less than  $\pm 1$  line/mm between theoretical value and optimization value. Simulation results show that the waveband of HPFCHGs is broaden and the resolution is also ensured, so it is suitable for recording wider waveband of soft X-ray.

**Key words** gratings; parallel flat-field gratings; aberration correction; ray tracing; resolution

**OCIS codes** 050.1950; 110.7440; 220.1000; 340.7480

## 1 引 言

随着 X 射线激光、等离子体光谱学、强场物理和惯性约束聚变研究的发展, 高温高密度的等离子

体研究越来越受到人们的重视, 而等离子体中的 X 射线谱可以提供等离子空间和时间等重要信息<sup>[1]</sup>。平场谱仪是 X 射线谱测量的重要仪器, 其工作在掠

**收稿日期**: 2014-02-12; **收到修改稿日期**: 2014-03-27

**基金项目**: 国家自然科学基金(11105145, 11275205)

**作者简介**: 王庆博(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事平场光栅的设计和制作工艺等方面的研究。

E-mail: qbwang@mail.ustc.edu.cn

**导师简介**: 付绍军(1952—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事短波光学和超微细加工技术方面的研究。

E-mail: sjfu@ustc.edu.cn

\* **通信联系人**。E-mail: zhkliu@ustc.edu.cn

入射条件下(通常入射角大于  $85^\circ$ )以提高 X 光的反射效率<sup>[2-3]</sup>。相比于传统的罗兰圆结构的光谱仪,平场谱仪具有像散小,谱面平直等优点,易与平面探测器(如 CCD, CMOS, 条纹相机等)耦合<sup>[4]</sup>。平场谱仪中核心光学元件是平场光栅<sup>[5]</sup>,平场光栅的线密度随着光栅表面按照一定的规律变化,从而使不同波长的光聚焦在一个平面上,利用平面探测器可以同时接收所有波长的光谱。平场谱仪中,由于平场光栅是唯一的色散和成像元件,从而减少了一些不必要的光学损失,大大地提高了光谱仪的光通量。

然而,平场光栅工作波段有限,因为宽工作波段和高分辨率是相互冲突的。孔鹏等<sup>[6]</sup>研究了通过将使用波段一分为二,由两个使用结构完全相同的平场光栅分别进行光谱成像以提高光谱分辨。Wu 等<sup>[7]</sup>通过采用+1 级和+2 级衍射光分别覆盖 360~720 nm 和 180~360 nm 来拓宽光栅的工作波段。Imazono 等<sup>[8]</sup>采用 4 块平场光栅覆盖 50~4000 eV,4 块光栅切换时只需沿光栅法线移动一定的距离即可。上述方法中平场光栅均不能同时工作,需要采用切换机构切换。在等离子体诊断领域内,由于等离子的瞬态特性,上述平场光栅的工作方式不能同时记录下瞬时的等离子体信息。为了兼顾平场光栅的宽工作波段和高分辨特性,本文提出了一种并联平场光栅的方案,详细描述了设计原理,并研究了并联平场光栅的分辨率以及制作光路。

## 2 设计原理

平场光栅光谱仪工作原理如图 1 所示,G 为平场光栅,其基底面为球面,基底中心处的顶点为 O,  $f$  为平面探测器到光栅中心的垂直距离。定义坐标系如下:O 点为坐标系的原点,  $x$  轴为 O 点处光栅基底的法线,  $y$  轴和  $z$  轴分别垂直和平行于光栅的刻线。A 点为入射狭缝 E 的中心点,经光栅衍射后  $m$  级衍射光成像在平面探测器 D 上 B 点。 $r$  为狭缝中心与

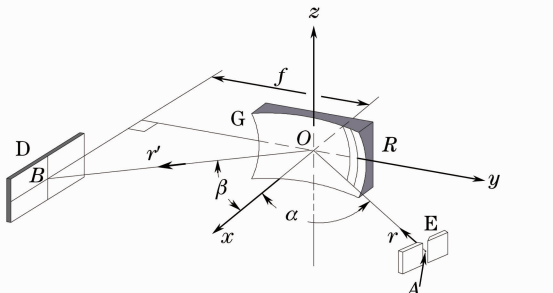


图 1 平场光栅光谱仪的工作示意图

Fig. 1 Schematic of the flat-field grating spectroph

光栅中心 O 点的距离,  $r'$  为 O 点和 B 点的距离,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为 AO、BO 与  $x$  轴的夹角。角度遵循以下符号规则:在  $y$  轴的正方向一侧为正,在  $y$  轴的负方向一侧为负<sup>[9]</sup>。

在子午面内,平场光栅的线密度为<sup>[10]</sup>

$$N = N_0 \left( 1 + \frac{2b_2}{R}y + \frac{3b_3}{R^2}y^2 + \frac{4b_4}{R^3}y^3 \right), \quad (1)$$

式中  $N_0$  为光栅中心处的线密度,  $b_2$ 、 $b_3$  和  $b_4$  为线密度变化系数,分别对应水平聚焦条件、慧差和球差,  $R$  为光栅的基底曲率半径。

并联平场光栅是将两个平场光栅(G1 和 G2)制作在同一光栅基底上,其结构图如图 2 所示。G1 的中心线密度为 1200 line/mm,工作波段为 5~30 nm; G2 的中心线密度为 2400 line/mm,工作波段为 2~5 nm。并联平场光栅要求两个子光栅同时工作,因此 G1 和 G2 具有相同工作参数,即基底半径相同,入射角度相同,入射距离相同,工作位置相同。为了与现有的软 X 射线掠入射平场谱仪兼容,选定光栅的入射距离为 237 mm,探测器工作位置距光栅中心的距离  $f$  为 235 mm。

应用遗传算法,参考现有相同工作波段的平场光栅参数,设定光栅基底曲率半径的优化范围为

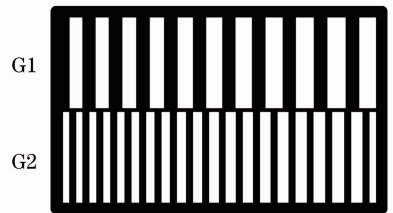


图 2 并联平场光栅的结构示意图

Fig. 2 Schematic of the parallel flat-field grating structure

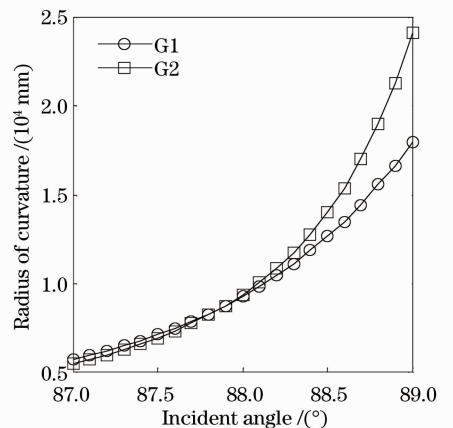


图 3 最优的基底曲率半径随入射角度的变化情况

Fig. 3 Optimal radius of curvature versus incident angle

$10^3 \sim 10^5$  mm,  $b_2$  的优化范围为  $-100 \sim 100$ , 分别计算 G1 和 G2 在不同的入射角度下, 最优的光栅基底曲率半径的变化情况。选取目标函数为<sup>[11]</sup>

$$f_{\text{ObjVal}} = \sum (r' - f \cos \beta)^2. \quad (2)$$

在迭代 200 次后, 得到的结果如图 3 所示。两条曲线的交点在  $88^\circ$  附近, 选定并联平场光栅的入射角度为  $88^\circ$ 。

在  $88^\circ$  入射角情况下, 继续对光栅的基底曲率半径  $R$  和系数  $b_2$  进行优化。仍然选取(2)式作为目

标函数, 设定光栅基底曲率半径的优化范围为  $5 \times 10^3 \sim 2.5 \times 10^4$  mm,  $b_2$  的优化范围为  $-100 \sim -10$ , 在迭代 200 次后, 得到并联光栅的参数  $R$  和  $b_2$  详见表 1。G1 和 G2 的聚焦曲线如图 4 所示, 可见, 确实可以找到一组参数, 使 G1 和 G2 具有相同的基底半径、入射角度、入射距离和工作位置。在满足上述并联光栅的条件下, 通过选取适当的  $b_3$  和  $b_4$ , 慧差和球差可以被抑制到最小。得到的参数详如表 1 所示。

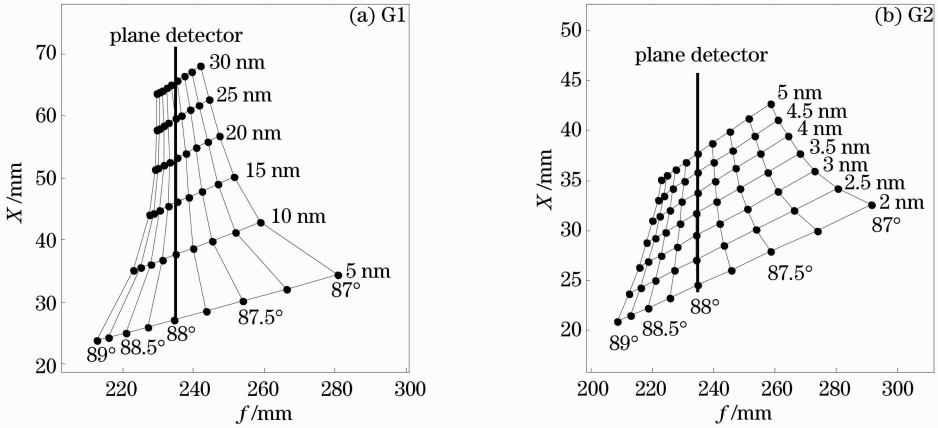


图 4 并联平场光栅的聚焦曲线

Fig. 4 Focal curves of the parallel flat-field gratings

表 1 并联平场光栅的设计参数

Table 1 Design parameters of the parallel flat-field gratings

	G1	G2
Nominal groove density / (line/mm)	1200	2400
Wavelength range / nm	5~30	2~5
Radius of curvature $R$ / mm		9245
Incident distance $r$ / mm		237
Incident angle $\alpha$ / ( $^\circ$ )		88
Position of plane detector $f$ / mm		235
$b_2$	-34.473443	-34.492754
$b_3/10^3$	1.263152	1.273052
$b_4/10^4$	-4.755225	-5.217395

### 3 分辨率

光栅方程和平场光栅的工作条件可表示为

$$d_0 (\sin \alpha + \sin \beta) = m\lambda, \quad (3)$$

$$x = -f \cot \beta, \quad (4)$$

式中  $d_0$  为光栅中心的光栅常数,  $m$  为衍射级次, 这里为 +1 级,  $\lambda$  为波长,  $x$  为像点的  $x$  轴坐标。

对(3)式和(4)式求导, 可得

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{d_0 \sin^2 \beta \cos \beta}{f}. \quad (5)$$

根据瑞利判据, 平场光栅的分辨率可表示为

$$\mathcal{R} = \frac{\lambda}{d\lambda} = \frac{\lambda f}{d_0 \sin^2 \beta \cos \beta \times W_{\text{FWHM}}}, \quad (6)$$

式中  $W_{\text{FWHM}}$  为半峰全宽。

应用光线追迹<sup>[12]</sup>的方法评价了并联光栅的分辨特性, 其中狭缝光源的大小为  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ , 光栅的有效区域为  $46 \text{mm} \times 26 \text{mm}$ 。追迹光线的数目为 5000, 由于像散的存在, 成像面接收到的入缝的像高度约为 50 mm。实际上由于探测器尺寸的限制, 不可能所有光线都被探测器接收, 假定探测

器高度为 20 mm,因此在计算半高宽度时只统计高度在±10 mm 以内的光线分布情况。以波长为 10 nm 的入射光为例,图 5 为波长为 10 nm 的光线经 G1 光栅衍射后接收面的光线分布情况,其中统计以 10 μm 为一个区间,计算落入此区间的光线个数的相对分布情况。图 6 为将光线分布情况高斯拟合后的曲线。

根据(6)式,已知波长为 λ 的半峰全宽,即可求出其理论的分辨率。将得到的并联光栅与现有相同

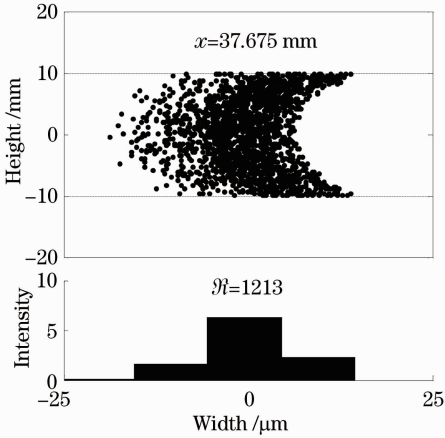


图 5 光线经追迹得到的点列图

Fig. 5 Spot diagrams by ray tracing

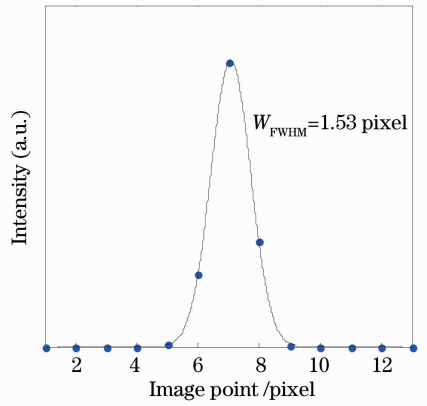


图 6 平面探测器像素强度的高斯拟合曲线

Fig. 6 Gaussian fitting curve of the plane detector pixel intensity

波段下商用平场光栅(以下称标准光栅)的理论分辨率进行了对比,如图 7 所示,其中 SG 代表标准光栅,G 代表并联光栅。以 CCD 为例,目前平场光谱仪中 CCD 的宽度一般为 20~38 mm,高度一般为 8~28 mm,像素大小一般为 13~20 μm,在 6 nm 时 CCD 的分辨率约为 200~300,在 25 nm 时 CCD 的分辨率约为 800~1200<sup>[8]</sup>。因此,考虑平面探测器对分辨的影响后,并联光栅和标准光栅的分辨率基本相同。

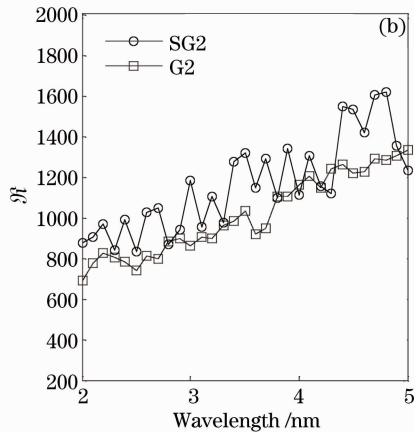
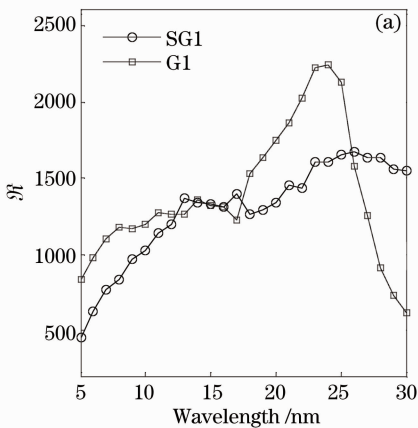


图 7 并联光栅和标准光栅分辨率的对比

Fig. 7 Comparison of resolution between parallel gratings and standard gratings

#### 4 制作光路

平场光栅的记录光路为第二代全息凹面变线距光栅记录光路,如图 8 所示, R 为光栅基底 G 的曲率半径, R<sub>2</sub> 为球面反射镜 M<sub>2</sub> 的曲率半径。以 G 的中心 O 点建立 x<sub>1</sub>y<sub>1</sub>z<sub>1</sub> 坐标系,其坐标轴的方向与图 1 中相同,以 M<sub>2</sub> 的中心 O<sub>2</sub> 点建立 x<sub>2</sub>y<sub>2</sub>z<sub>2</sub> 坐标系, x<sub>2</sub> 轴为 O<sub>2</sub> 点处 M<sub>2</sub> 的法线, y<sub>2</sub> 轴位于 xO<sub>1</sub>y<sub>1</sub> 平面内, z<sub>2</sub> 轴与 z<sub>1</sub>

轴平行。D 点光源发出的光经 M<sub>2</sub> 反射后在光栅表面与 C 点光源发出的光干涉,经曝光、显影后形成平场光栅的光刻胶掩膜。角度的符号规则与图 1 相同。

表 2 给出了 G1 和 G2 的具体制作光路参数,其中 b<sub>20</sub>, b<sub>30</sub> 和 b<sub>40</sub> 分别为由记录光路得到的线密度变化系数。图 9 给出了平场光栅线密度的理论设计值和光路优化值的对比情况,图中正方形符号代表的

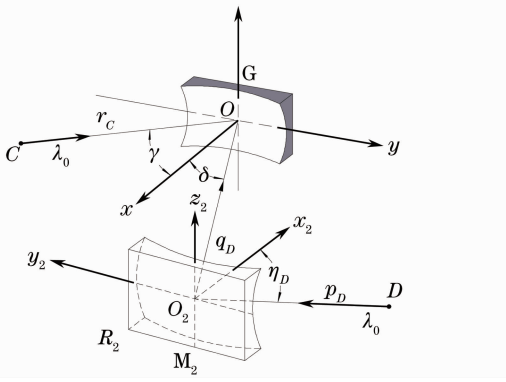
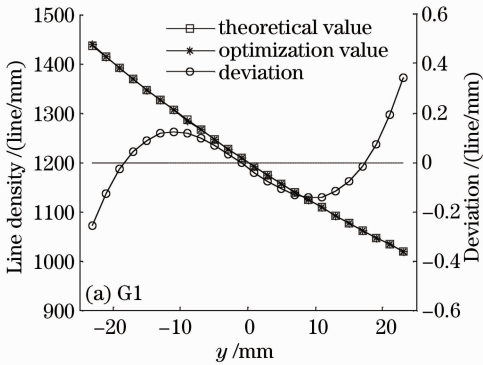


图 8 平场光栅的记录光路示意图

Fig. 8 Schematic of record optical path of flat-field grating

是理论设计值,星号代表的是制作光路的优化值,圆形符号代表的是二者线密度的偏差,由图可见,其



线密度偏差在±1 line/mm 以内。

表 2 并联平场光栅的记录光路参数

Table 2 Recording optical path parameters of the parallel flat-field gratings

Parameter	G1	G2
$r_c / \text{mm}$	1214.512	1129.387
$\gamma / (^\circ)$	-60.586	-64.648
$p_D / \text{mm}$	511.199	511.055
$\eta_D / (^\circ)$	62.305	40.490
$q_D / \text{mm}$	324.468	336.906
$\delta / (^\circ)$	-19.948	8.985
$R_2 / \text{mm}$	400	400
$b_{20}$	-34.397786	-34.383226
$b_{30} / 10^3$	1.260140	1.268287
$b_{40} / 10^4$	-5.768165	-6.681408

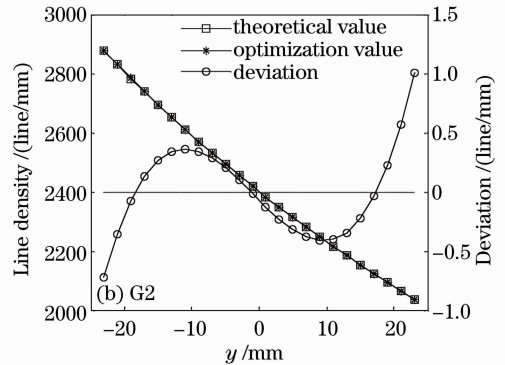


图 9 并联平场光栅线密度理论设计值和光路优化值的对比

Fig. 9 Comparison of line density of parallel flat-field gratings between theoretical value and optimization value

## 5 结 论

给出了并联平场光栅的优化设计方法,通过将两个平场光栅设计在同一基底上,确保二者的工作参数相同,使其工作在并联模式下,拓宽了平场光栅的工作波段。通过光线追迹的方法,研究了并联平场光栅与现有相同工作波段下商用平场光栅的理论分辨率对比情况,二者分辨率相当。基于光程函数理论,研究了并联平场光栅的制作光路,结果表明理论设计值和光路优化值的线密度偏差在±1 line/mm 以内。可见,并联平场光栅的方案既拓宽了工作波段,又确保了光栅的高分辨率,其设计在记录更宽波段等离子体瞬态光谱信息方面具有积极的作用。

## 参 考 文 献

1 Li Yingjun, Yang Jianlun, Zhang Jie. Imaging study of flat-field gratings for non-point light source [J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(5): 863-867.  
李英骏, 杨建伦, 张 杰. 非点光源情况下平场光栅的成像研究

[J]. 物理学报, 2000, 49(5): 863-867.  
2 K V Cone, J Dunn, M B Schneider, et al.. Development of a time-resolved soft X-ray spectrometer for laser produced plasma experiments [J]. Rev Sci Instrum, 2010, 81(10): 10E318.  
3 Ni Yuanlong, Mao Chusheng. A soft X-ray flat field grating spectrograph and its experimental applications [J]. China Nuclear Science and Technology Report, 2000, (0): 15-25.  
倪元龙, 毛楚生. 软 X 光平焦场光栅光谱仪及其实验应用[J]. 中国核科技报告, 2000, (0): 15-25.  
4 Zhang Jiyan, Yang Guohong, Bayanheshig, et al.. Design of a small-sized flat field grating spectrograph [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(9): 1009-1102.  
张继彦, 杨国洪, 张保汉, 等. 小型平焦场光栅光谱仪的研制 [J]. 光学学报, 2001, 21(9): 1009-1102.  
5 Zhou Qian, Li Lifeng. Design method of convex master gratings for replicating flat-field concave gratings [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(8): 2281-2285.  
周 倩, 李立峰. 光谱仪用平场凹面光栅的凸面母光栅的消像差设计思路[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(8): 2281-2285.  
6 Kong Peng, Tang Yuguo, Bayanheshig, et al.. Double-grating minitype flat-field holographic concave grating spectrograph [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0105001.  
孔 鹏, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 双光栅切换微型平场全息凹面光栅光谱仪[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0105001.  
7 J F Wu, Y Y Chen, T S Wang. Flat field concave holographic

- grating with broad spectral region and moderately high resolution [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(4): 509–514.
- 8 T Imazono, M Koike, T Kawachi, *et al.*. Laminar and blazed type holographic gratings for a versatile soft X-ray spectrograph attached to an electron microscope and their evaluation in the 50~200 eV range [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(13): 2351–2360.
- 9 M Koike, M Ishino, T Imazono, *et al.*. Development of soft X-ray multilayer laminar-type plane gratings and varied-line-spacing spherical grating for flat-field spectrograph in the 1~8 keV region [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2009, 64(8): 756–760.
- 10 T Harada, T Kita. Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings [J]. *Appl Opt*, 1980, 19(23): 3987–3993.
- 11 T Harada, K Takahashi, H Sakuma, *et al.*. Optimum design of a grazing-incidence flat-field spectrograph with a spherical varied-line-space grating [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(13): 2743–2748.
- 12 H Noda, T Namioka, M Seya. Ray tracing through holographic gratings [J]. *J Opt Soc Am*, 1974, 64(8): 1037–1042.

栏目编辑: 史 敏