

文章编号 1004-924X(2015)08-2117-08

# 自由电子激光器用极紫外波段平面变栅距光栅

姜岩秀<sup>1,2\*</sup>, 巴音贺希格<sup>1</sup>, 赵旭龙<sup>1,2</sup>, 杨 硕<sup>1,2</sup>, 吴 娜<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**针对极紫外波段自由电子激光器(大连相干光源, DCLS)对高分辨能力平面变栅距光栅的需求, 基于光程差以及像差原理构建了极紫外平面变栅距全息光栅。采用改进的局部优化算法给出了平面变栅距光栅的记录参数, 利用全息曝光技术在硅光栅基底上制作了中心刻线密度为 600 gr/mm、占宽比为 0.46、槽深为 550 nm、有效刻划面积为 30 mm×30 mm 的极紫外平面变栅距全息光栅。采用 Littrow 衍射法测量了平面变栅距光栅的刻线密度, 并基于像差理论分析了平面变栅距光栅的理论分辨能力。结果表明:制作的 600 gr/mm 平面变栅距光栅在有效面积内的刻线密度误差小于 0.175 gr/mm, 在极紫外波段(50~150 nm)的分辨能力大于 12 000, 满足自由电子激光器的设计要求。提出的设计及制作方法为制作高质量平面变栅距光栅提供了理论及技术保障。

**关键词:**自由电子激光器; 平面变栅距光栅; 全息曝光; 刻线密度误差; 分辨能力

**中图分类号:** TN248.6; O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152308.2117

## Plane holographic varied-line-space grating for DCLS in EUV region

JIANG Yan-xiu<sup>1,2\*</sup>, Bayanheshig<sup>1</sup>, ZHAO Xu-long<sup>1,2</sup>, YANG Shuo<sup>1,2</sup>, WU Na<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: jiangyanxiup@163.com

**Abstract:** According to the demands of a free electron laser( Dalian Coherent Light Source, DCLS) at extreme ultraviolet (EUV) for high resolution plane holographic varied-line-space grating, a plane holographic varied-line-space grating was fabricated based on optical path difference and aberration principle. By using the improved local optimization algorithm, recording parameters of the varied-line-space grating were calculated. The varied-line-space grating at EUV with a center groove density of 600 gr/mm, a duty cycle of 0.46, a groove depth of 550 nm and an effective score area 30 mm×30 mm was fabricated on a silicon substrate by using the holographic method. The groove density of the varied-line-space grating was measured by Littrow diffraction and its theoretical resolution was analyzed by aberration theory. The results show that the groove density in an active area is less than 0.175 gr/mm, namely the resolution is far above 12 000 in 50—150 nm EUV region, which meets the

收稿日期: 2014-09-25; 修订日期: 2014-11-23.

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 2011YQ120023)

demand of the DCLS. It concludes that these theories and research findings provide theoretical and technical supports for improving the quality of plane varied-line-space gratings.

**Key words:** free electron laser; plane varied-line-space grating; holographic exposure; groove density error; resolution

## 1 引言

同步辐射光源具有连续光谱、高准直性、高亮度及光谱性能可预知和精确调节等特点,因此广泛应用于基础科学、物质科学和生命科学等研究领域<sup>[1-5]</sup>。自由电子激光器作为第四代同步辐射光源,其光学设计面临着新的挑战<sup>[6]</sup>,如光源光谱的在线诊断即为设计难题之一。通常采用超环面镜和光栅构成的光谱仪对光源进行在线诊断。考虑光谱仪工作区为 50~150 nm 的极紫外波段,且其分辨能力要在 100 nm 处达到 12 000<sup>[7]</sup>,人们普遍选用平面变栅距光栅作为此光谱仪的核心元件<sup>[7-8]</sup>,以便保持较高的能量传输特性和后续光束线传播。

现今,平面变栅距光栅大多采用全息离子束刻蚀法制作,法国的 J-Y 公司是此类光栅的主要生产商<sup>[9]</sup>。全息曝光制作平面变栅距光栅的方法分为两种<sup>[10-11]</sup>,一种采用球面波干涉曝光,而另一种采用非球面波干涉曝光。与球面波曝光相比,非球面波曝光增加了记录参数的自由度,通过理论计算可设计出与期望刻线密度函数高度符合的变栅距光栅,能够消除高阶像差。非球面波的生成方法主要有三种<sup>[12]</sup>:一是使用辅助镜面,该方法要在光路中增加光学元件,引入的杂光会降低衍射效率,且对记录参数较为敏感,记录参数的微小误差都会大幅降低光栅的分辨能力,故不适合制作高质量的光栅。二是使用变形镜,由于其加工以及实际光路调试极其困难,目前尚无法实现。三是使用辅助光栅,即采用平面等间距光栅作为辅助光栅制作变栅距光栅。这种方法的难点在于辅助光栅的制作精度要求较高,而在实际制作过程中记录参数、辅助光栅调试误差以及实际衍射光的传播方向与理论追迹之间存在的误差对光栅光谱性能的影响较大,故制作结果很难达到设计要求。然而,球面波曝光系统却仅有 4 个记录参数,相比于非球面曝光系统使用的 6~8 个记录参数,不仅在工艺上容易实现高的调试精度,而且通

过研究适宜的优化方法,给出合理的记录参数,充分消除特定阶次像差,即可制作出满足设计要求的高分辨能力平面变栅距光栅。本文采用球面波曝光系统,通过改进的局部优化算法给出合理的记录参数,分析了光栅的刻线密度制作值与设计值的误差及分辨能力,并制作了满足大连相干光源(Dalian Coherent Light Source, DCLS)设计要求的平面变栅距光栅。

## 2 平面变栅距光栅参数设计

### 2.1 理论基础

图 1 为变栅距全息光栅的球面波记录光路图。

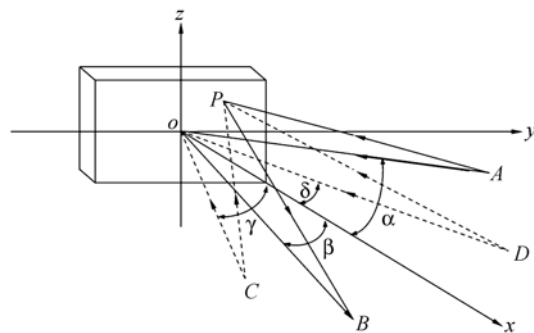


图 1 球面波曝光系统

Fig. 1 Layout of spherical wavefront recording system

从光程函数出发,根据球面波几何理论计算基底上任意一点的光程差,将费马原理应用到光程函数中,并对其进行级数展开,最终得到变栅距光栅的刻线密度函数<sup>[12]</sup>。理想球面波曝光系统下,子午面内光栅的刻线密度表达式为:<sup>[13]</sup>

$$n_u = n_0 + n_1 y + n_2 y^2 + n_3 y^3 + \dots, \quad (1)$$

其中:  $y$  表示在光栅有效区域内子午线上位置点,  $n_0, n_1, n_2$  和  $n_3$  是关于球面波记录参数( $\gamma, r_c, \delta, r_D$ )的函数,  $n_0$  为光栅中心处的线密度,  $n_1$  对应水平聚焦条件,  $n_2$  和  $n_3$  分别对应彗差和球差。

根据 M. Itou 的数学模型<sup>[13]</sup>,变栅距全息光栅的光程函数  $F$  可以表示为关于  $(y, z)$  的函数:

$$F = r_c + r_D + yF_{10} + y^2 F_{20} + z^2 F_{02} + y^3 F_{30} + yz^2 F_{12} + y^4 F_{40}, \quad (2)$$

其中  $F_{ij}$  可表示为:

$$F_{ij} = C_{ij} + n_{i0} m \lambda M_{ij}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} M_{10} = 1, C_{10} = -\sin \alpha - \sin \beta \\ M_{20} = \frac{n_{20}}{2n_{10}}, C_{20} = \frac{1}{2} \left( \frac{\cos^2 \alpha}{r_1} + \frac{\cos^2 \beta}{r_2} \right) \\ M_{30} = \frac{n_{30}}{2n_{10}}, C_{30} = \frac{1}{2} \left( \frac{\sin \alpha \cos^2 \alpha}{r_1^2} + \frac{\sin \beta \cos^2 \beta}{r_2^2} \right), \\ M_{40} = \frac{n_{40}}{8n_{10}}, C_{40} = \frac{1}{8} \left( \frac{4\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha - \cos^4 \alpha}{r_1^3} + \right. \\ \left. \frac{4\sin^2 \beta \cos^2 \beta - \cos^4 \beta}{r_2^3} \right) \end{cases} \quad (4)$$

$M_{ij}$  只与使用参数  $A, B$  的坐标有关,  $C_{ij}$  只与记录点  $C, D$  的坐标有关。  $F_{ij}$  即为平面变间距全息光栅的像差, 其中  $F_{20}$  为离焦,  $F_{30}$  为子午彗差,  $F_{40}$  为球差, 其他代表高阶像差。 由式(4)可以看出, 光程函数  $F$  不仅与使用参数  $A, B$  两点的位置有关, 而且还与记录点光源  $C, D$  的位置有关。

### 2.2 刻线密度函数构建

应用于 DCLS 的光栅使用要求如下<sup>[8]</sup>: 波段为 50~150 nm, 中心刻线密度为 600 gr/mm, 面积为 10 mm×30 mm, 光谱级次  $m=+1$ , 入射角  $\alpha=87.6^\circ$ , 入臂  $r_A=-19\ 000$  mm, 其中波长为 100 nm 时, 出臂  $r_B=1\ 500$  mm。

由式(1)、(4)及光栅方程, 令聚焦方程  $F_{20}=0$ , 彗差校正方程  $F_{30}=0$  以及球差校正方程  $F_{40}=0$ , 求得平面变栅距光栅的刻线密度表达式为:

$$n_c = 600 - 0.786\ 9y + 7.398\ 2 \times 10^{-4}y^2 - 5.969 \times 10^{-7}y^3. \quad (5)$$

### 2.3 变栅距光栅的优化

式(5)为根据光谱仪器使用要求得到的平面变栅距光栅刻线密度表达式, 对变栅距全息光栅记录参数进行优化设计, 其方法是选择合适的记录参数使制作出来的变栅距光栅的刻线密度函数在光栅有效区域内逼近式(5)。 由于变栅距光栅刻线密度函数是一个以记录参数为变量的多变量函数, 需要建立以式(5)作为期望函数的变栅距光栅刻线密度目标函数, 以光栅表面刻线密度误差的平方和的形式来建立优化目标函数<sup>[14]</sup>, 得到目标函数的表达式为:

$$\begin{aligned} obj = & r_1^2 + \frac{1}{3}y_0^2(2r_1r_3 + r_2^2) + \frac{1}{5}y_0^4(r_3^2 + 2r_2r_1) + \\ & \frac{1}{7}y_0^6r_4^2. \end{aligned} \quad (6)$$

使用改进的局部算法对球面波曝光系统条件下的平面变栅距全息光栅进行优化设计。 优化结果如表 1 所示。

表 1 球面波曝光系统的记录参数

Tab. 1 Recording parameters of spherical plane recording system

Parameters	$r_c$ /mm	$\gamma$ /rad	$r_D$ /mm	$\delta$ /rad
Value	1 463.88	-1.544	1 322.60	-0.825

根据优化结果绘制了刻线密度函数及其误差分布曲线, 分别如图 2, 3 所示。 由图可知, 平面变栅距光栅的刻线密度分布曲线在光栅有效区域基本重合, 其设计值与期望值的绝对误差约为 0~0.07 gr/mm, 相对误差约为  $1 \times 10^{-4}$ , 刻线密度符合程度较好, 满足设计要求。

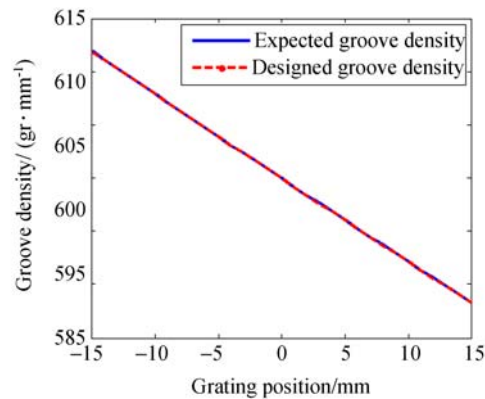


图 2 刻线密度分布

Fig. 2 Curves of groove density

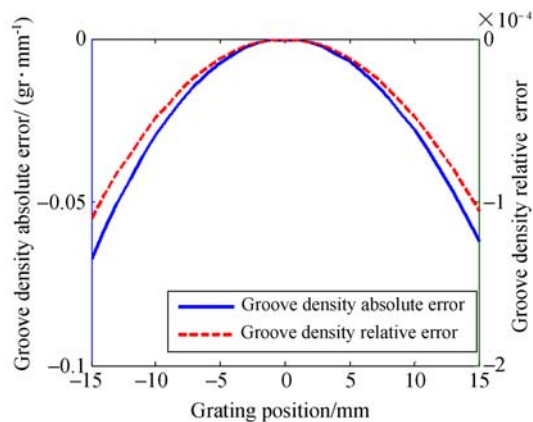


图 3 刻线密度误差分布

Fig. 3 Curves of groove density error

根据像差对平面变栅距光栅光谱分辨率的影响<sup>[15]</sup>,计算了不同使用波长下平面变栅距光栅的理论分辨能力。当  $m=+1$  时,像差对谱线宽度的影响为:

$$\Delta\lambda_{co} = \frac{3}{2}dY^2 F_{30}, \Delta\lambda_{sp} = dY^3 F_{30}, \quad (7)$$

其中:  $Y$  为有效光栅区域的半长度,  $d$  为光栅常数。

因此光栅的理想分辨率为:

$$R. P = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\lambda}{\sqrt{\left(\frac{\lambda}{mN}\right)^2 + (\Delta\lambda_{co} + \Delta\lambda_{sp})}} \quad (8)$$

由式(8)计算在使用波段 50~150 nm 下光栅的分辨能力,结果如图 4 和 5 所示。由图可知,设计的平面变栅距光栅在使用波段下的分辨能力在 17 340 以上,能够满足仪器 12 000 分辨能力的使用要求。

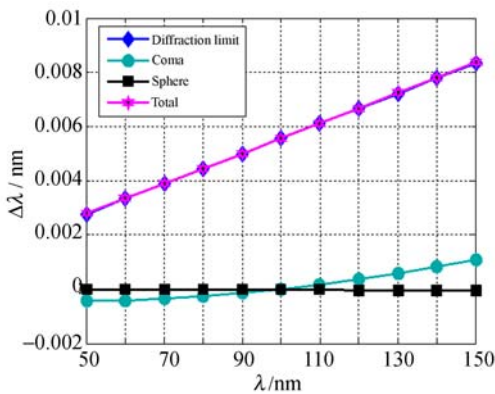


图 4 理论谱线宽度  
Fig. 4 Curves of groove density

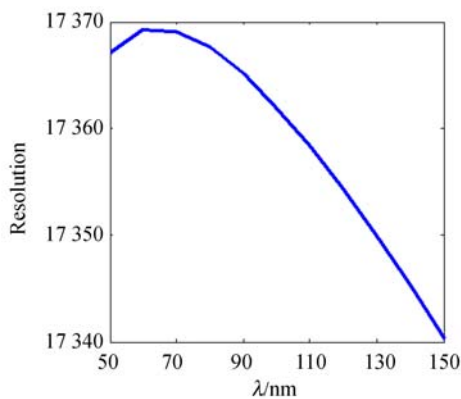


图 5 理论分辨能力  
Fig. 5 Theoretical resolution

### 3 平面变栅距光栅制作工艺

变栅距全息光栅制作的工艺流程包括:(1)确定记录参数;(2)搭建和调试曝光系统;(3)基底清洗;(4)匀胶;(5)曝光;(6)显影等。

#### 3.1 记录参数确定及曝光系统搭建

使用改进的局部优化方法得到记录参数,如表 1 所示。据此搭建的球面波曝光系统如图 6 所示。掠入射记录角度为  $\gamma = -1.544$  rad,考虑到曝光光路的实际调试难度,需要对其可行性进行分析。在掠入射条件下,曝光光路调试需要考虑两个问题,即扩束镜及滤波器的可调试性与两束光强均匀分布的可调试性。

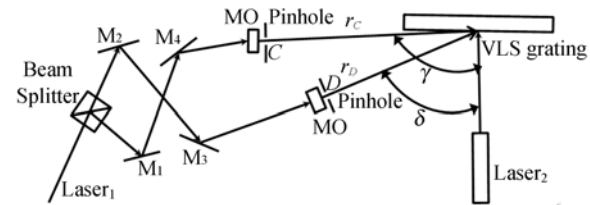


图 6 球面波曝光光路示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of spherical wavefront holographic recording system

##### 3.1.1 扩束镜及滤波器的可调试性

由表 1 可知,两束光的记录臂长  $r_C = 1 463.88$  mm,  $r_D = 1 322.60$  mm,记录角度  $\gamma = -1.544$  rad,  $\delta = -0.825$  rad。根据以上参数计算 C, D 两束光在 X-Y 轴坐标系下的空间距离,点 C 和 D 在 X-Y 轴坐标系下的空间位置如图 7 所示。

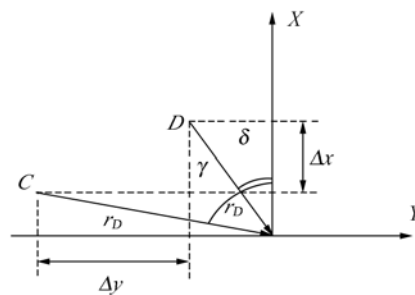


图 7 扩束镜及滤波器空间位置示意图  
Fig. 7 Spatial locations of beam expander and filter

根据计算可知点 C 和 D 在 X 方向和 Y 方向的距离分别为:

$$\begin{aligned} \Delta x &= r_C \cdot \cos[\pi/2 - \text{abs}(\gamma)] - r_D \cdot \cos[\pi/2 - \text{abs}(\delta)] = 491.83 \text{ mm}, \\ \Delta y &= r_D \cdot \sin[\pi/2 - \text{abs}(\delta)] - r_C \cdot \sin[\pi/2 - \text{abs}(\gamma)] = 858.10 \text{ mm}. \end{aligned}$$

作为扩束镜用的显微物镜、空间滤波器的针孔及其调整架所占空间面积为 100 mm × 100 mm,远小于 C, D 两点光源在 X-Y 轴的空间距离,因此,曝光系统中显微物镜以及针孔的调试空间充足,可以实现曝光光路的调试。

### 3.1.2 两束光强均匀分布的可调性

由表 1 的记录角度可知,点 C 和 D 的记录角度分别为  $\gamma = -1.544 \text{ rad}$  和  $\delta = -0.825 \text{ rad}$ ,即 CO 与光栅基底法线之间的夹角为  $-88.46^\circ$ ,DO 与光栅基底法线之间的夹角为  $-47.27^\circ$ 。两束光路在曝光系统下的俯视图如图 8 所示。

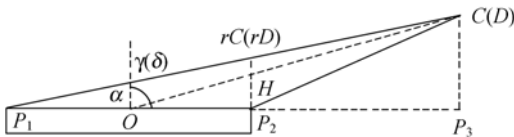


图 8 曝光光路俯视图  
Fig. 8 Layout of recording system

由实际光路调试可知,由于两束光记录臂长均大于 1 000 mm,因此选择 10 倍的显微物镜作为扩束镜。由图 6 可知,对于点光源 C 有:

$$\tan \alpha_C = \frac{r_C \cdot \sin(\pi/2 - \text{abs}(\gamma))}{15 + r_C \cdot \cos(\pi/2 - \text{abs}(\gamma))} = \frac{H_C}{30}, \quad (9)$$

其中:

$$H_C = 30 \cdot \frac{r_C \cdot \sin(\pi/2 - \text{abs}(\gamma))}{15 + r_C \cdot \cos(\pi/2 - \text{abs}(\gamma))} = 0.789 \text{ mm},$$

由此说明 C 光路中仅需要  $\varphi = 0.789 \text{ mm}$  的光斑即可覆盖整个基底。

对于点光源 D 有:

$$\tan \alpha_D = \frac{r_D \cdot \sin(\pi/2 - \text{abs}(\delta))}{15 + r_D \cdot \cos(\pi/2 - \text{abs}(\delta))} = \frac{H_D}{30}, \quad (10)$$

其中:

$$H_D = 30 \cdot \frac{r_D \cdot \sin(\pi/2 - \text{abs}(\delta))}{15 + r_D \cdot \cos(\pi/2 - \text{abs}(\delta))} = 27.29 \text{ mm},$$

由此说明 D 光路需要  $\varphi = 27.29 \text{ mm}$  的光斑来覆盖整个基底。

两路光路均使用 10 倍的显微物镜,光斑如图 9 所示。通过分束镜及  $M_1 \sim M_4$  反射镜的激光经过 10 倍的显微物镜以及针孔后,光斑能量分布较均匀。由于 C 光路的光斑口径较小,仅为 D 路光

斑的 1/34,而 C, D 两路光斑的能量比  $E_C : E_D = \varphi_1 : \varphi_2 = 1 : 34$ ,所以光路能量对比度较差,难以形成对比度较好的明暗条纹。

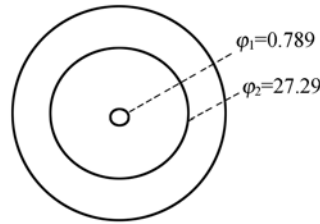


图 9 激光光斑  
Fig. 9 Laser facula

为制作质量较高的光栅,可以通过调节初始入射光的能量对比度来解决能量分布不均的问题。由图 6 可知,调节初始入射光能量的最直接方法即为调试分束镜。订制一个分束镜,在此分束镜上镀增反膜,使得反射光能量强于透射光能量,从而调节两束初始入射光的能量比,使其光强比  $E_{C0} : E_{D0} = 1 : 34$ ,两束光再通过显微物镜以及针孔,到达光栅基底时能量比约为  $E_C : E_D = 1 : 1$ ,满足曝光条件,能制作出对比度较好的明暗条纹光栅。

### 3.2 基底清洗及匀胶

首先使用丙酮清洗光栅基底,去除基底表面明显的脏迹,再使用沾有丙酮的长绒棉擦拭基底,去除基底表面的细小痕迹。为了去除在清洗过程中的水分,将基底放入  $120^\circ\text{C}$  的烘箱 30 min。冷却至室温后使用高速离心旋转匀胶机对基底进行匀胶,光刻胶为 Shipley 的 S1805,在  $90^\circ\text{C}$  的烘箱放置 30 mins。

### 3.3 全息曝光及显影

根据两束相干光束在基底表面的光强选择曝光时间,在基底的光刻胶上形成对比度较好的干涉条纹。曝光后使用 0.036% 的 NaOH 显影溶液对它显影,得到光栅掩模。

## 4 实验验证

根据本文所述的方法搭建球面波曝光光路。光栅制作示意图如图 6 所示,其中  $M_1 \sim M_4$  为反射镜,BS 为分束镜,以波长为 441.6 nm 的 He-Cd 激光器(laser<sub>1</sub>)作为记录光源,波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器(laser<sub>2</sub>)作为定位光源,选择 10 倍的显微物镜(MO)扩束,用 20 μm 的针孔(pinhole<sub>1</sub>,

pinhole<sub>2</sub>)进行空间滤波,分束镜的分束比为 34 : 1,实际搭建的曝光光路如图 10 所示。

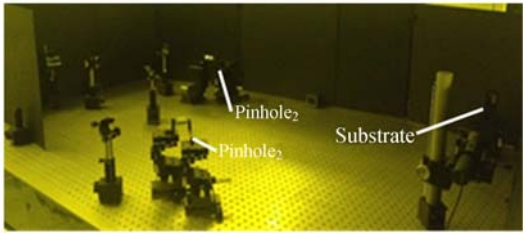


图 10 曝光光路图  
Fig. 10 Recording system

光路搭建完成后,经过曝光显影一系列工艺制作出占宽比为 0.46 的变栅距光刻胶光栅,图 11 为该光栅的原子力显微镜(AFM)测试图。

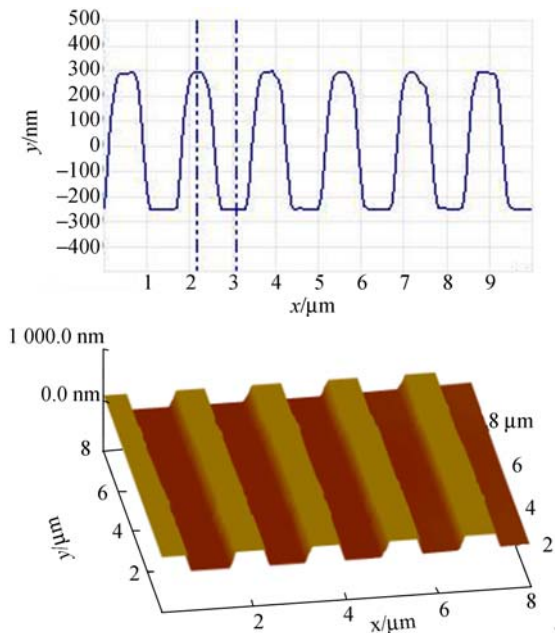


图 11 平面变栅距全息光栅的 AFM 测试图  
Fig. 11 Atomic Force Microscopy(AFM) image of plane VLS grating

最后,对制作的平面变栅距光栅刻线密度及分辨能力进行了测量及分析。使用中国科学技术大学国家同步辐射实验室搭建的刻线密度测量装置<sup>[16]</sup>对制作的 30 mm×30 mm 平面变栅距光栅进行了测量。在光栅中心线(即子午线)上测量 9 个点,测量数据如表 2 所示。

根据测量数据及式(1)的三次多项式拟合,求得光栅刻线密度的函数表达式为:

$$n_m = 599.8272 - 0.7813y + 1.04 \times 10^{-3}y^2 - 1.2572 \times 10^{-6}y^3. \quad (11)$$

表 2 变栅距全息光栅刻线密度的测量值与设计值  
Tab. 2 Designed and measured values of variable-line-spacing grating groove density

Position /mm	Designed value / (gr · mm <sup>-1</sup> )	Measured value / (gr · mm <sup>-1</sup> )	Error/%
-12	609.54	609.29	0.04
-9	607.13	606.29	0.13
-6	604.74	604.58	0.02
-3	602.36	602.21	0.02
0	600.00	599.80	0.03
3	597.64	597.45	0.03
6	595.30	595.08	0.03
9	592.97	592.76	0.03
12	590.65	590.34	0.05

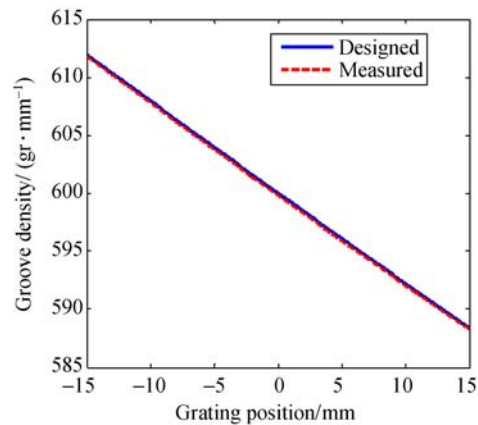


图 12 刻线密度设计与测量函数曲线  
Fig. 12 Designed and measured groove density curves of plane VLS grating

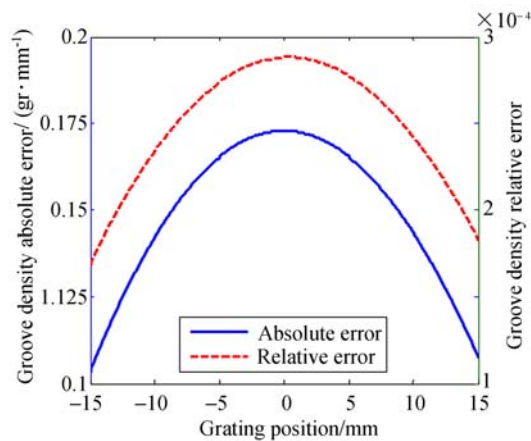


图 13 刻线密度函数设计与测量的绝对误差与相对误差曲线

Fig. 13 Absolute and relative error curves between designed and measured groove densities for plane VLS grating

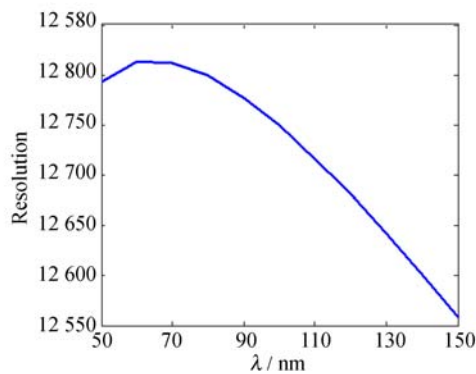


图 14 制作的平面变栅距光栅分辨能力  
Fig. 14 Resolution of plane VLS grating

图 12 和 13 分别为平面变栅距光栅刻线函数的设计值与测量值分布曲线,及设计值与测量值的误差分布曲线。图 14 为制作的平面变栅距光栅在使用波段(50~150 nm)的分辨力曲线。由图 12~14 可知,尽管制作的平面变栅距光栅的刻线密度与期望值存在 0.1~0.175 gr/mm 的误差,但制

#### 参考文献:

- [1] KIM K. Characteristics of synchrotron radiation[J]. *American Institute of Physics*, 1989,184:565-632.
- [2] DUKE P H. *Synchrotron Radiation* [M]. Oxford: Oxford University Press, 2000:13-27.
- [3] 马礼敦. 同步辐射应用概论[M]. 上海:复旦大学出版社, 2001:27-43.  
MA L D. *Introduction to Synchrotron Radiation Applications* [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2001:27-43. (in Chinese)
- [4] HOFMANN A. *The Physics of Synchrotron Radiation* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004:79-102.
- [5] 刘祖平. 同步辐射光源物理引论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2009:12-30.  
LIU Z P. *Synchrotron Radiation Physics Introduction*[M]. Hefei:University of Science and Technology of China Press,2009:12-30. (in Chinese)
- [6] DEACON D A G, ELIAS F L R, MADEY J M J, et al.. First operation of a free-electron laser[J]. *Physical Review Letters*, 1977,38(16) :892-894.
- [7] BERGMANN U, ARTHUR J, BLUHM H, et al.. Science and Technology of Future Light Sources[R]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009.
- [8] 李朝阳. 变线距光栅单色器设计及关键技术[D]. 合

作的光栅分辨能力约为 12 550~12 800,满足分辨能力为 12 000 的要求。

## 5 结 论

本文基于光程差以及像差原理制作了应用于自由电子激光器的平面变栅距光栅,利用改进的局部优化算法给出了光栅的记录参数。首先给出了搭建球面波曝光系统的方法,并根据这一方法在硅光栅基底上成功研制出中心刻线密度为 600 gr/mm 的高分辨能力平面变栅距光栅。最后对制作的光栅掩模进行了 AFM 测量、刻线密度测量及分辨能力分析。结果表明,优化方法选择得当,使用简单的球面波也可以制作高分辨率的平面变栅距光栅。在光路搭建及调试的过程中,精确分析及调节两束干涉光的空间位置及光强分布,并采用大角度入射可制作出满足自由电子激光器设计要求的高分辨率平面变栅距光栅。

肥:中国科技大学,2014.

- LI CH Y. *Variable-Line-Spacing Grating Monochromators Design and Key Techniques*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [9] 徐向东,刘正坤,邱克强,等. 角分辨光电子能谱光束线 1200line/mm 光栅研制[J]. *光学学报*,2011,31(10):1005008-1-5.  
XU X D, LIU ZH K, QIU K Q, et al.. Fabrication of 1200 line/mm laminar grating for ARPES [J]. *Acta Optica Sinica*,2011,31(10):1005008-1-5. (in Chinese)
- [10] SCHMAHL G,RUDOLPH D. *Holographic Diffraction Gratings*, in *Progress in Optics* [M]. North-Holland:Amsterdam, 1976:195.
- [11] NAMIOKA T, KOIKE M. Aspheric wave-front recording optics for holographic gratings[J]. *Applied Optics*,1995,34(13):2180-2186.
- [12] NAMIOKA T, SEYA M, NODA H. Design and performance of holographic concave grating [J]. *Japan Journal of Applied Physics*, 1976, 15: 1181-1197.
- [13] LTOU M,HARADA T, KITA T. Soft x-ray monochromator with a varied-space plane grating for synchrotron radiation; design and evaluation[J]. *Applied Optics*,1989,28(1):146-153.

- [14] 楼俊,付绍军,徐向东,等.用于位移传感器的全息平面变间距光栅设计与制作研究[J].物理学报,2006,55(12):6405-6409.  
LOU J, FU SH J, XU X D, *et al.*. Design and fabrication of holographic variable line-spacing gratings for position sensor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(12):6405-6409. (in Chinese)
- [15] 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]. 上海:上海应用物理研究所, 2010.  
TONG Y J. *Study of Precision Measurements of Monk-Gillieson Soft X-ray Grating Monochromator and Offner Imaging Spectrometer*[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, 2010. (in Chinese)
- [16] 陈镛,王秋平,余小江,等.变间距全息光栅刻线密度函数的测试精度分析[J].核技术,2001,24(7):557-563.  
CHEN Q, WANG Q P, YU X J, *et al.*. The groove density measurement of VLS plane grating by diffraction method[J]. *Nuclear Techniques*, 2001, 24(7):557-563. (in Chinese)

## 作者简介:



姜岩秀(1987—),女,吉林舒兰人,博士研究生,主要从事变栅距全息光栅的设计与制作。E-mail:jiangyanxiup@163.com

## 导师简介:



巴音贺希格(1962—),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士,研究员,博士生导师,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术的研究。E-mail:bayin888@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)