

## “之”字形光栅衍射特性的数值模拟研究\*

臧华平<sup>1)2)</sup> 曹磊峰<sup>1)†</sup> 王传珂<sup>1)2)</sup> 蒋刚<sup>2)</sup> 魏来<sup>1)</sup> 范伟<sup>1)</sup> 周维民<sup>1)</sup> 谷渝秋<sup>1)</sup>

1) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 高温高密度等离子体物理国家重点实验室, 绵阳 621900)

2) (四川大学原子与分子物理研究所, 成都 610065)

(2010年4月28日收到; 2010年5月23日收到修改稿)

新近提出的光学色散元件“之”字形光栅具有优越的衍射特征, 在光谱测量和分析中具有重要的应用价值. 本文基于卷积定理, 采用一种新的数值计算方法对应用于 X 射线波段的“之”字形光栅的衍射模式进行了模拟计算, 并将其衍射模式与传统光栅以及正弦光栅的衍射模式进行了对比研究, 结果表明: “之”字形光栅可以将高级衍射抑制到低于一级衍射四个量级的水平, 具有比传统光栅优越得多的衍射模式, 与理论预期结果一致. 在此基础上, 又分析了实际应用过程中吸收体对 X 射线的吸收情况给“之”字形光栅衍射模式带来的影响, 最终证实了“之”字形光栅具有较强的实际应用可行性. 研究结论为“之”字形衍射光栅的物理设计提供了一种技术手段, 该光栅有望代替传统黑白透射光栅应用于软 X 射线谱测量中.

**关键词:** “之”字形光栅, 卷积定理, 衍射模式, 光谱测量

**PACS:** 42.79.Dj

## 1. 引言

黑白透射光栅在惯性约束聚变、加速器物理和天体等离子体物理等领域应用广泛<sup>[1-8]</sup>, 主要用于诊断高温物理原子与分子过程中产生的软 X 射线光谱, 借以研究高温物体的性质和状态<sup>[9-11]</sup>. 黑白透射光栅由不透明板上的一系列平行狭缝构成, 具有黑白相间的周期结构, 其透过率函数为一个方波. 由光栅方程可知, 黑白光栅具有多级衍射的特征<sup>[12, 13]</sup>, 衍射谱和波长并不是一一对应的关系. 在光谱诊断中, 只有一级衍射是实验测量所需要的. 单色光经黑白光栅调制后, 会产生多级衍射, 各高级衍射将叠加在一级谱上, 使测量谱偏离诊断对象真正的发射谱, 从而给光谱诊断带来较大的误差. 因此, 长期以来, 衍射光栅在光谱诊断领域的应用一直受到高级衍射的干扰<sup>[3-8]</sup>, 虽然可以通过解谱在一定程度上排除高级衍射的干扰, 但测谱精度受到很大制约, 数据置信水平受到很大限制.

振幅型正弦光栅只存在 0 级和  $\pm 1$  级衍射, 其衍射模式比传统透射光栅优越的多, 可以排除黑白透射光栅高级衍射所带来的困扰. 但是, 根据 X 射

线在介质中的传播理论可知, 很难研制出具有高空间频率且对 X 射线的透过率函数在一维方向上呈正弦变化的金属材料透射光栅<sup>[13-15]</sup>.

2002 年, Kipp 等人提出了“光子筛”的概念<sup>[16]</sup>, 并将其应用于菲涅耳波带板的设计, 研究表明这种新型波带板可以形成对软 X 射线的有效衍射. 2005 年, 文献[17]中提出了量子点阵光栅的概念, 此后又对量子点阵光栅的衍射原理进行了理论证明<sup>[14]</sup>, 为软 X 射线谱测量学应用中摆脱高级衍射的干扰提供了一种重要技术手段. 这种光栅由一系列准随机排列的针孔(量子点)构成, 针孔的数密度在光栅表面沿一维呈随机分布, 沿另一维呈正弦分布, 针孔正弦分布的一个周期对应于传统光栅阶跃变化的一个周期. Wang<sup>[15, 18, 19]</sup>, Zhao 等人<sup>[20]</sup>采用微加工技术, 研制了适用于光学波段的量子点阵光栅, 并通过实验证实了其具有单级衍射的特性. 但是, 由于设计的量子点阵光栅的量子点尺寸很小, 对制作工艺精度要求非常高, 因此很难制作出应用于软 X 射线谱诊断的衍射光栅. 同时, 由于量子点阵光栅的量子点是随机排列的, 因此无法解决光栅的自支撑问题. 为了解决上述问题, 文献[21]提出了“之”字形光栅的概念, 该光栅是一种基元连续性强、制

\* 国家自然科学基金(批准号: 10727504)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: liaode\_2002@yahoo.com.cn

作方法简单、并能够较好实现自支撑的新型光学衍射元件,同时也能够有效地抑制高级衍射。

本文利用卷积定理,采用一种新的计算方法模拟研究了“之”字形光栅的衍射模式,并将其衍射模式与黑白光栅和正弦光栅的衍射模式进行了比较。研究表明:“之”字形光栅可以将高级衍射抑制到低于一级衍射四个量级的水平,具有比传统黑白透射光栅优越得多的衍射模式。在软 X 射线谱测量中,利用这种新型的色散元件替代黑白光栅可以有效摆脱高级衍射的干扰,从而得到干净的衍射谱,对提高光谱诊断精度具有积极的意义,并且该光栅有望在软 X 射线光谱诊断中得到广泛应用。

### 2. “之”字形光栅简介

文献[21]提出的“之”字形光栅的组成线条呈“之”字形,线条的积分长度沿与线条垂直的方向呈正弦(或余弦)变化,线空比为 1:1,该光栅的一个正弦(或余弦)分布周期对应于传统黑白光栅阶跃变化的一个周期,图 1 为“之”字形光栅示意图。与黑白光栅相比,“之”字形光栅在光栅表面与线条垂直方向可以有效的抑制高级衍射。以这种“之”字形结构衍射光栅替代现有的衍射光栅应用于光谱测量或者光束单色化,可以摆脱高级衍射带来的干扰或污染,从而提高光谱测量的精度或者单色光束的纯度。



图 1 “之”字形衍射光栅示意图

### 3. “之”字形光栅衍射模式的数值计算

原则上来讲应该在 Fresnel-Kirchhoff 公式基础

上通过积分的方法计算光栅在远场的衍射振幅,但是由于直接对“之”字形这种图样比较复杂的光栅进行积分工作量比较大,个人计算机难以承受,因此本文在卷积定理基础上,运用一种计算速度较快的方法计算了“之”字形光栅在远场的衍射振幅分布。下面对这种计算方法的原理进行详细介绍。

考虑透过率函数为  $t(x,y)$  的平面波  $A_0 \exp(2\pi jz/\lambda)$  正入射到光栅上,根据经典傅里叶光学理论,在图 2 所示坐标系中远场的衍射图样场强分布可写为

$$U(\xi, \eta) = 1/(i\lambda z) \exp(ikz) \exp[ik(\xi^2 + \eta^2)/(2z)] \times F\{t(x,y)\}_{f_\xi = \xi/(\lambda z), f_\eta = \eta/(\lambda z)}, \quad (1)$$

其中  $\lambda$  为入射光波长,  $z$  为衍射屏到观察屏的距离,波束是  $k = 2\pi/\lambda$ 。

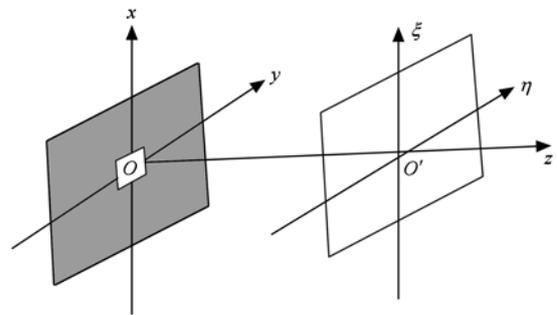


图 2 坐标系示意图

由(1)式可知,观察屏上的场强分布  $U(\xi, \eta)$  正比于光栅透过率函数  $t(x,y)$  的傅里叶变换,频率取值与观察平面坐标关系为 ( $f_\xi = \xi/(\lambda z)$ ,  $f_\eta = \eta/(\lambda z)$ ), 因此,求解光栅透过率函数是计算光栅远场场强分布的一个重要的步骤。

由傅里叶光学中包含脉冲函数的卷积性质可知,任意函数  $f(x,y)$  与  $\delta$  函数卷积的得出的是函数  $f(x,y)$  本身,卷积的结果是将函数  $f(x,y)$  平移到脉冲所在的空间位置,即

$$f(x,y) * \delta(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi, \eta) \delta(\xi - x, \eta - y) d\xi d\eta = f(x,y). \quad (2)$$

将(2)式做简单推导可得

$$f(x,y) * \delta(x - x_0, y - y_0) = f(x - x_0, y - y_0). \quad (3)$$

由(3)式可知,  $f(x,y)$  与多个脉冲函数卷积,可在每个脉冲所在位置产生  $f(x,y)$  的图形。这一性质有助于描述“之”字形光栅这种具有周期重复性结构衍射元件的透过率函数。

求解多周期“之”字形光栅的透过率函数是比较复杂的,而根据任意函数与脉冲函数卷积的这种性质,可将如图 3(c)所示“之”字形光栅的透过率函数  $t(x,y)$  表示为一个如图 3(a)所示“之”字形光栅基元的透过率函数  $t_1(x,y)$  和如图 3(b)所示的点阵的透过率函数  $t_2(x,y)$  的卷积,即

$$t(x,y) = t_1(x,y) * t_2(x,y), \quad (4)$$

其中图 3(b)所示点阵的周期与“之”字形光栅的周期相同.

由于卷积定理可表示为

$$\begin{aligned} F\{g(x,y) * h(x,y)\} \\ = F\{g(x,y)\} \cdot F\{h(x,y)\}. \end{aligned} \quad (5)$$

因此,结合(1)式,可以得到“之”字形光栅远场的衍射图样分布为

$$\begin{aligned} U(\xi,\eta) &= A \times F\{t(x,y)\} \\ &= A \times F\{t_1(x,y) * t_2(x,y)\} \\ &= A \times F\{t_1(x,y)\} \cdot F\{t_2(x,y)\} \\ &= A \times U_1(\xi,\eta) \cdot U_2(\xi,\eta), \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $A = 1/(i\lambda z) \exp(ikz) \exp[ik(\xi^2 + \eta^2)/(2z)]$ ,  $U_1(\xi,\eta)$  正比于具有如图 3(a)所示的透过率函数的“之”字形光栅基元在远场的衍射振幅,  $U_2(\xi,\eta)$  正比于一个与“之”字形光栅周期相同的点阵在远

场的衍射振幅.

最终,“之”字形光栅在远场的衍射图样振幅分布可以通过求解“之”字形光栅基元在远场的衍射振幅和一个与“之”字形光栅周期相同的周期点阵在远场的衍射振幅的乘积得到. 为了更加直接的比较基于 Fresnel-Kirchhoff 公式基础上的积分方法和本文所用计算方法的计算速度,假设用  $1000 \times 1000$  的矩阵大小来表示整个光栅大小,并且光栅周期数为 10,那么由于用前一种方法计算需对整个光栅积分,因此要计算 1000000 次;相比之下,本文用的计算方法由于仅需对相对于整个光栅来讲面积小得多的光栅基元以及一个周期点阵进行积分,因此总共只需计算 300 次;由此可知,与基于 Fresnel-Kirchhoff 公式的积分方法相比,此时采用本文的计算方法计算速度可以提高 3000 多倍.

综上所述,这种基于卷积定理以及任意函数与脉冲函数卷积性质的数值计算方法可以普遍地应用于光栅元件衍射模式的计算中,这不仅可以在较大程度上提高计算速度,而且可以根据实际所需光栅尺寸和记录介质电荷耦合器 (CCD) 像素对光栅的衍射模式进行数值计算.

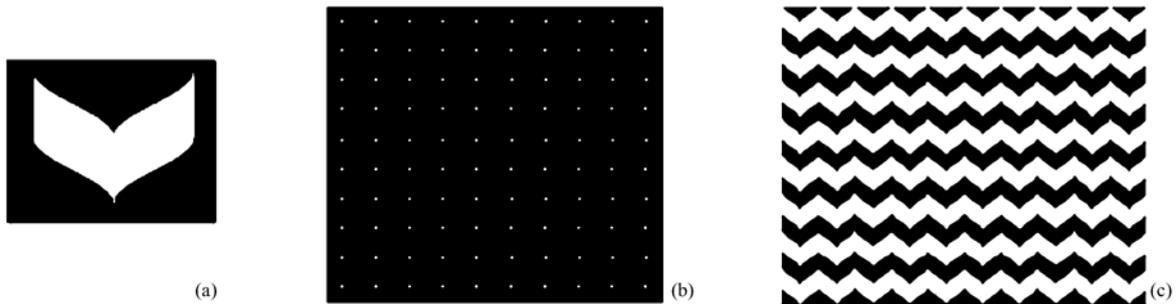


图 3 “之”字形光栅基元、周期点阵及多周期“之”字形光栅的透过率函数示意图

## 4. 结果与讨论

### 4.1. 黑白光栅、正弦光栅和“之”字形光栅的衍射模式比较

采用前文所述数值计算方法,对传统黑白光栅、正弦光栅和“之”字形光栅的衍射模式进行了数值模拟计算,模拟计算采用的参数见表 1.

表 1 传统光栅、正弦光栅和“之”字形光栅衍射模式模拟参数

$\lambda/\text{nm}$	$d/\mu\text{m}$	$T$	$Z/\text{m}$	$\Delta x/\mu\text{m}$	$M \times N$
0.3	1	30	1	50	$256 \times 128$

注: $\lambda$  为入射光波长, $d,T$  分别为光栅周期长度和模拟选用的光栅周期数, $Z$  为衍射屏到接受屏的距离, $\Delta x$  为接受屏采样点像素, $M,N$  分别为接受屏两个轴向的采样点数.

首先对传统黑白光栅和正弦光栅衍射模式进行了数值模拟研究,模拟结果分别表示在图 4(a), (b)中. 从图中可以看出黑白光栅衍射模式具有多级衍射特征;而正弦光栅在其光栅表面与线条垂直

方向仅有 0 级和 ±1 级衍射级. 所得模拟结果与理论预期结果一致, 验证了所用数值计算方法的正确性. 在此基础上, 用这种方法对“之”字形光栅的二维衍射图样进行了模拟, 结果表示在图 4(c) 中, 从图 4(c) 中可以看出, 在光栅表面与线条垂直轴线方向(即图中箭头所示方向)上, “之”字形光栅可以将高级衍射抑制到很低的水平.

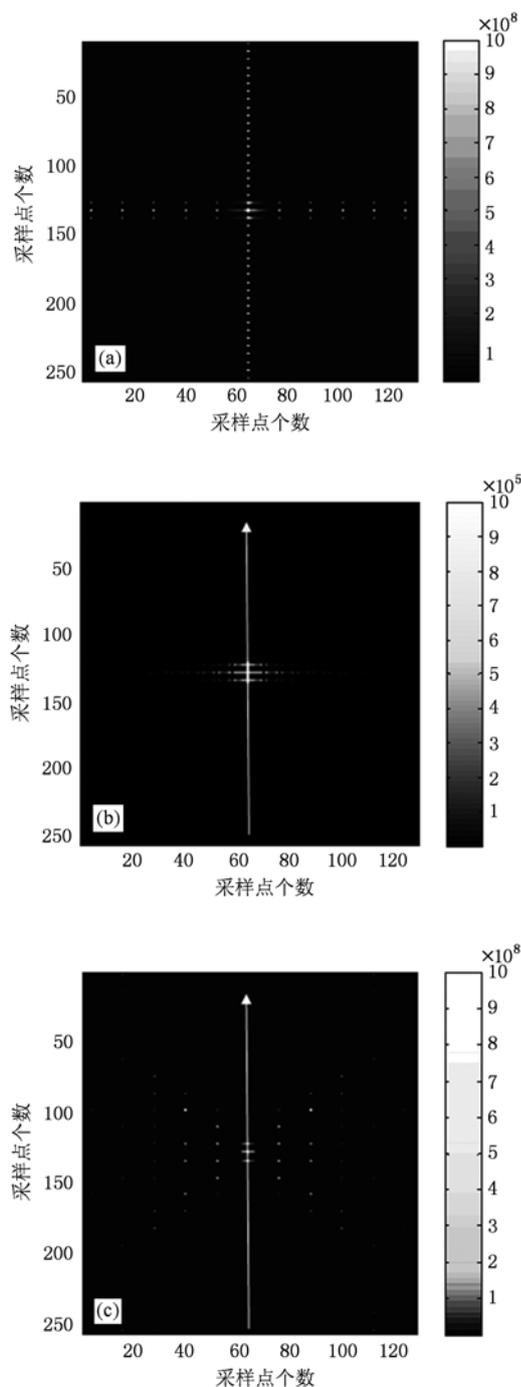


图 4 (a) 传统光栅的衍射模式; (b) 正弦光栅的衍射模式; (c) “之”字形光栅的衍射模式

图 5 给出了黑白光栅、正弦光栅以及“之”字形光栅的衍射强度积分模拟图, 对 X 射线谱学测量中采用“之”字形光栅的优越性进行了比对研究. 由图 5 可以看出, “之”字形光栅在其沿光栅表面与线条垂直方向的特定轴线上可以将高级衍射抑制到低于一级衍射强度四个量级的水平, 而传统黑白透射光栅明显受到高级衍射的干扰. 由此可见, 在 X 谱学测量研究中, “之”字形光栅具有比传统透射光栅优越得多的衍射模式, 因此, 利用“之”字形光栅这种光学元件替代传统黑白透射光栅从事 X 射线谱学测量研究将排除高级衍射干扰, 进而能够大幅度提高 X 射线谱学测量研究的精度和信噪比.

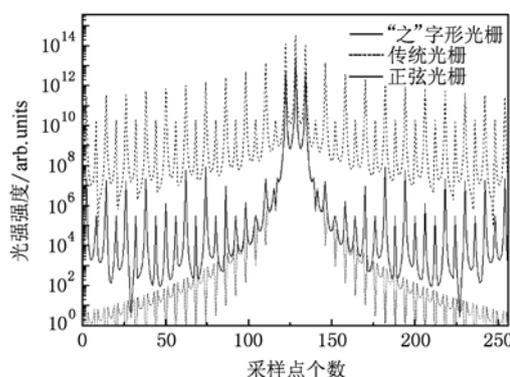


图 5 传统光栅、正弦光栅和“之”字形光栅沿其表面与线条垂直方向上衍射强度积分比较图样

#### 4.2. X 射线波段“之”字形光栅实际应用可行性分析

在前文的模拟中, 图 1 所示黑色区域被看作是可以完全吸收照射到其上的 X 射线, 但是在实际制作过程中, 通常用高 Z 材料作为吸收体代替图 1 所示黑色区域, 当 X 射线照射到吸收体上时, 由于 X 射线具有强穿透性, 高 Z 材料仅能吸收部分 X 射线<sup>[22, 23]</sup>, 而未能吸收的 X 射线将会穿透高 Z 材料区域, 因此, 有必要考虑吸收体对入射 X 射线的吸收给“之”字形光栅的衍射模式带来的影响. 此时“之”字形光栅的透过率函数可以表示为

$$t'(x, y) = t(x, y) + [1 - t(x, y)] \times \exp[-i(2\pi\delta/\lambda)\tau] \times \exp[-(2\pi\beta/\lambda)\tau], \quad (7)$$

其中  $t(x, y)$  为具有理想吸收区域时“之”字形光栅的透过率函数,  $1 - t(x, y)$  为其互补部分的透过率函数.  $\delta$  和  $\beta$  为金属材料的光学常量, 分别代表电磁波在介质中传播时引起的相移和吸收项<sup>[24-27]</sup>,  $\tau$  为

光栅线条(吸收体)厚度.

首先对  $\beta = 0$  和  $\beta = \infty$  这两种极限情况进行讨论,当  $\beta = 0$  时,由(7)式可知,“之”字形光栅的吸收区域变为完全透光的,也就是说在这种情况下入射 X 射线经过“之”字形光栅的调制后,振幅不会衰减,仅带来一个相位差  $\Delta\phi$  ( $\Delta\phi = (2\pi/\lambda)\delta t$ );当  $\beta = \infty$  时,由(7)式可知  $t'(x,y) = t(x,y)$ ,此时照射到“之”字形光栅线条上的入射 X 射线可被高 Z 金属区域完全吸收,光栅具有如图 1 所示的二值化特征.

考虑到实际光栅制作过程中通常是将高 Z 材料 Au 作为吸收体,并且对于前文所模拟的 X 射线波长  $\lambda = 0.3 \text{ nm}$  时,Au 的光学常量为  $\delta = 1.75 \times 10^{-4}$ , $\beta = 5.17 \times 10^{-5}$ ,此时由(7)式可知,吸收体 Au 会吸收部分照射到其上的 X 射线,而未被吸收的 X 射线将会穿透光栅的吸收区域.下面对这种情况下的“之”字形光栅的衍射模式进行了数值模拟研究,结果表示在图 6(a),(b)中.此时,吸收体厚度  $\tau = 500 \text{ nm}$ ,其他模拟参数见表 1.

由图 6(a)可以看出,尽管照射到“之”字形光栅线条上的 X 射线并不是完全被高 Z 金属 Au 吸收,但“之”字形光栅仍可以有效地抑制高级衍射;同时由图 6(b)可以看出,与图 4(b)模拟结果相比,由于此时会有部分入射 X 射线穿透吸收体,因此“之”字形光栅衍射图样中各级衍射的光强强度增强了,但光栅各级衍射的衍射位置并无改变,并且沿光栅表面与线条垂直方向高级衍射仍然可以被抑制到低于一级衍射四个量级水平,与理论预期结果一致.由此可见,实际制作过程中用高 Z 金属替代图 1 所示的二值化“之”字形光栅的黑色区域时,虽然使衍射图样中各级衍射的光强强度增强了,但并不影响“之”字形光栅对高级衍射的抑制效果,此时“之”字形光栅仍可以将高级衍射抑制到低于一级衍射四个量级水平.此外,根据目前国内的微加工技术水平,采用电子束光刻和 X 射线光刻的方式已经可以制备出 10000 线/毫米的自支撑 X 射线透射光栅<sup>[28]</sup>,因此,制作出满足实际需求的线对数为 1000 线/毫米的软 X 射线波段“之”字形光栅也是可行的.综上所述,“之”字形光栅在软 X 射线谱测量中具有十分广阔的应用前景.

### 5. 结 论

利用卷积定理,将光栅衍射振幅的计算简化为

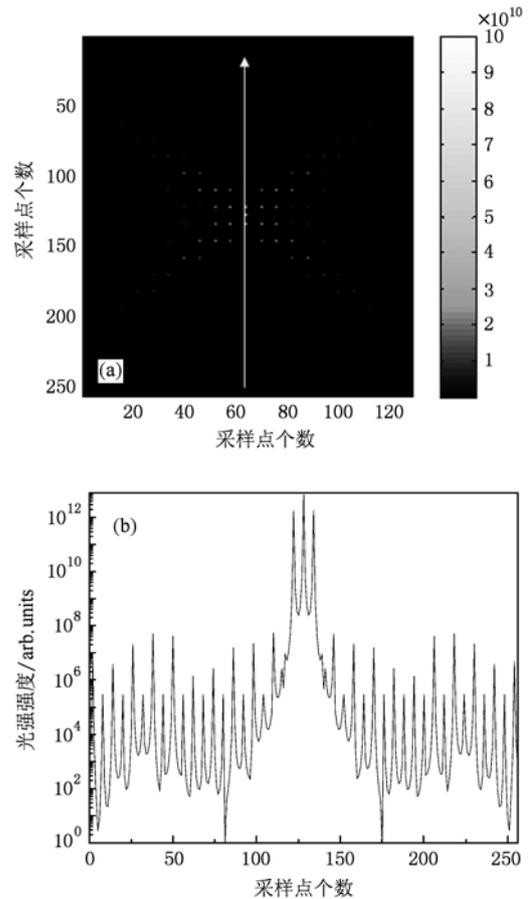


图 6 (a)考虑到吸收体对 X 射线是部分吸收时“之”字形光栅的衍射模式;(b)考虑到吸收体对 X 射线是部分吸收时“之”字形光栅沿其表面与光栅线条垂直方向衍射强度积分模拟图样

求解光栅基元和一个与光栅周期相同的点阵分别在远场的衍射振幅相乘的过程,这种新的数值计算方法可以在较大程度上提高光栅衍射模式的计算速度.本文采用这种数值计算方法对新近提出的色散元件“之”字形衍射光栅的衍射模式进行了数值模拟研究,同时将该光栅的衍射模式与传统光栅和正弦光栅的衍射模式进行了比较,研究结果表明,“之”字形光栅能够将高级衍射抑制到低于一级衍射四个量级的水平,具有比传统黑白透射光栅优越得多的衍射模式.此外,就应用过程中考虑到光栅吸收体对 X 射线的吸收情况给“之”字形光栅衍射模式带来的影响进行了分析,分析得出,吸收体为 Au 时,在 X 射线波段“之”字形光栅仍然可以有效抑制高级衍射的特征,并且根据国内目前微加工技术完全可以制作出满足实际需求的软 X 射线波段“之”字形光栅,最终证实了“之”字形光栅具有较强的实际应用可行性.综上所述,应用于软 X 射

线波段的“之”字形光栅的研制将对改进和发展软 X 射线谱学诊断技术、提高 ICF 研究精密化都具有积极的意义,该光栅有望代替传统黑白光栅在软 X

射线谱测量中得到应用. 研制具有高空间频率的“之”字形衍射光栅,将是我们下一步工作的研究方向.

- [1] Eidmann K, Kishimoto T 1986 *Appl. Phys. Lett.* **49** 377
- [2] Chaker M, Bareau V, Kieffer J C, H Pepin, Johnston T W 1989 *Rev. Sci. Instrum.* **60** 3386
- [3] Schriever G, Lebert R, Naweed A, Mager S, Neff W, Kraft S, Scholze F, Ulm G 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 3301
- [4] Fill E, Stephan K H, Predehl P, Pretzler G, Eidmann K, Saemann A 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 2597
- [5] Weaver J L, Holland G, Feldman U, Seely J F, Brown C M, Serlin V, Deniz A V, Klapisch M 2000 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 108
- [6] Blagojevic B, Stutman D, Finkenthal M, Moos H W, Kaita R, Majeski R 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1988
- [7] Yang J M, Ding Y K, Zhang W H, Zhang J Y, Zheng Z J 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 4268
- [8] Eagleton R T, James S F 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3969
- [9] Yang J M, Ding Y N, Zheng Z J, Wang Y M, Zhang W H, Zhang J Y, Liu J Y, Shan B, Gao S C, Ren Y L, Liu X Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1427 (in Chinese) [杨家敏、丁耀南、郑志坚、王耀梅、张文海、张继彦、刘进元、山冰、高盛琛、任有来、刘秀琴 2003 物理学报 **52** 1427]
- [10] Liu Y Q, Zhang J, Chen Z L, Peng X Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1433 (in Chinese) [刘运全、张杰、陈正林、彭晓昱 2004 物理学报 **53** 1433]
- [11] Xie X H, Liu Y Q, Fan P Z, Li R X 2004 *Chin. Phys.* **13** 1826
- [12] Zhao K H, Zhong X H 2004 *Optics* (Volume 2) (Beijing: Beijing University Press) p1—14 (in Chinese) [赵凯华、钟锡华 2004 光学(下册)(北京:北京大学出版社)第1—14页]
- [13] Attwood D 1999 *Soft X-ray And Extreme Ultraviolet Radiation: Principles And Applications* (New York: Cambridge University Press) p55
- [14] Cao L F, Förster E, Fuhrmann A, Wang C K, Kuang L Y, Liu S Y, Ding Y K 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 053501
- [15] Wang C K, Kuang L Y, Wang Z B, Liu S Y, Ding Y K, Cao L F, Foerster E, Wang D Q, Xie C Q, Ye T C 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 053503
- [16] Kipp L, Skibowski M, Johnson R L, Berndt R, Adelung R, Harm S, Seemann R 2001 *Nature* **414** 184
- [17] Cao L F Patent CN200410081499 [2005-07-27] (in Chinese) [曹磊峰 专利号 CN200410081499 [2005-07-27]]
- [18] Wang C K, Kuang L Y, Wang Z B, Cao L F, Liu S Y, Ding Y K, Wang D Q, Xie C Q, Ye T C, Hu G Y 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 123502
- [19] Wang C K, Kuang L Y, Wang Z B, Cao L F, Liu S Y, Ding Y K, Wang D Q, Zhu X L, Xie C Q 2008 *High Power Laser And Particle Beams.* **20** 607 (in Chinese) [王传珂、况龙钰、王哲斌、曹磊峰、刘慎业、丁永坤、王德强、朱效立、谢常青 2008 强激光与粒子束 **20** 607]
- [20] Zhao M, Zhu X L, Chen B Q, Xie C Q, Liu M, Niu J B, Kuang L Y, Cao L F 2008 *Optical. Engineering* **47** 058001
- [21] Cao L F Patent CN200610022736 [2010-02-03] (in Chinese) [曹磊峰 专利号 CN200610022736 [2010-02-03]]
- [22] Xie C Q, Zhu X L, Jia J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8062 (in Chinese) [谢常青、朱效立、贾佳 2009 物理学报 **58** 8062]
- [23] Liu X, Guo J C, Niu H B *Chin. Phys. B* (accept)
- [24] Huang W X, Yuan Q X, Tian Y L, Zhu P P, Jiang X M, Wang J Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 677 (in Chinese) [黄万霞、袁清习、田玉莲、朱佩平、姜晓明、王寓越 2005 物理学报 **54** 677]
- [25] Zhang D, Li Zheng, Huang Z F, Yu A M, Sha W 2006 *Chin. Phys.* **15** 1731
- [26] Li C, Li Z, Yu A M, Li C Q 2007 *Chin. Phys.* **16** 2319
- [27] Chen B, Zhu P P, Liu Y J, Wang J Y, Yuan Q X, Huang W X, Ming H, Wu Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1576 (in Chinese) [陈博、朱佩平、刘宜晋、王寓越、袁清习、黄万霞、明海、吴自玉 2008 物理学报 **57** 1576]
- [28] Zhu W Z, Wu Y Q, Guo Z, Zhu X L, Ma J, Xie C Q, Shi P X, Zhou H J, Huo T L, Tai R Z, Xu H J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6386 (in Chinese) [朱伟忠、吴衍青、郭智、朱效立、马杰、谢常青、史沛熊、周洪军、霍同林、郇仁忠、徐洪杰 2008 物理学报 **57** 6386]

## Numeric simulation of the diffraction pattern of zigzag grating \*

Zang Hua-Ping<sup>1)2)</sup> Cao Lei-Feng<sup>1)†</sup> Wang Chuan-Ke<sup>1)2)</sup> Jiang Gang<sup>2)</sup>

Wei Lai<sup>1)</sup> Fan Wei<sup>1)</sup> Zhou Wei-Min<sup>1)</sup> Gu Yu-Qiu<sup>1)</sup>

1) (*National Key Laboratory of High-temperature and High-density Plasma Physics, Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

2) (*Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

(Received 28 April 2010; revised manuscript received 23 May 2010)

### Abstract

The zigzag grating is one of the newly proposed optical dispersive elements which has an excellent diffraction characteristics and has important applications in the spectrum measurement and analysis. The simulation results of the diffraction pattern of the zigzag grating for X ray are presented using a new numerical method based on the convolution theorem, and comparison of its diffraction pattern with those of the traditional grating and sinusoidal grating are studied. It is seen from the results that all higher order diffractions of the zigzag grating are suppressed below the level of four orders of magnitude compared with the first order diffraction, which is superior to the traditional grating, being consistent with the theoretical expectations. Moreover, the impact caused by the absorber is analyzed, which eventually confirms that the zigzag grating has perfect practical application feasibility. The conclusions provide a potential alternative for the physical design of the zigzag gating, which is expected to replace the traditional transmission grating in applications to the soft X-ray spectrum measurement.

**Keywords:** zigzag grating, convolution theorem, diffraction pattern, spectrum measurement

**PACS:** 42.79.Dj

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10727504).

† Corresponding author. E-mail: liaode\_2002@yahoo.com.cn.