

准随机矩形孔阵列透射光栅

刘钰薇 张文海 张继成 范全平 魏来 晏卓阳 赵屹东 崔明启 邱荣 曹磊峰

Quasi-random rectangular holes self-supporting transmission grating

Liu Yu-Wei Zhang Wen-Hai Zhang Ji-Cheng Fan Quan-Ping Wei Lai Yan Zhuo-Yang Zhao Yi-Dong Cui Ming-Qi Qiu Rong Cao Lei-Feng

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 074201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.074201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.074201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于 Bragg 反射面结构的衍射光栅设计与研究

[Study of the diffraction grating designed based on the Bragg reflection structure](#)

物理学报.2014, 63(19): 194209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194209>

二维光栅与周期性缝隙阵列组合薄膜结构的杂散光抑制

[Suppression of the stray light of 2-dimensional gratings combined with an array of periodic slit](#)

物理学报.2013, 62(20): 204208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.204208>

基于 Talbot 效应的掺镁铌酸锂二维六角位相阵列光栅的研究

[A study of two-dimensional hexagonal phase array grating in MgO:LN based on the Talbot effect](#)

物理学报.2013, 62(9): 094216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094216>

光频率调制法测量动态光栅瞬态反射谱特性

[Measurements of transient reflectance spectra of dynamic gratings by optical frequency modulation](#)

物理学报.2012, 61(17): 174208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.174208>

一维金属光栅的光学反射吸收

[Numerical study on the optical absorption of one dimension metallic gratings](#)

物理学报.2011, 60(11): 114213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.114213>

准随机矩形孔阵列透射光栅*

刘钰薇¹⁾²⁾ 张文海²⁾ 张继成²⁾ 范全平²⁾ 魏来²⁾ 晏卓阳²⁾
赵屹东³⁾ 崔明启³⁾ 邱荣¹⁾ 曹磊峰^{1)2)†}

1) (西南科技大学极端条件物质特性联合实验室, 绵阳 621900)

2) (中国工程物理研究院, 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

3) (中国科学院, 高能物理研究所, 北京 100049)

(2014年12月3日收到; 2014年12月18日收到修改稿)

自支撑透射光栅的周期加强筋结构在降低光栅的通光面积、减少光栅衍射效率的同时, 也影响了光栅原有的衍射模式, 致使其应用更加复杂. 为了应对这一问题, 作者提出了利用在高 Z 材料薄膜上准随机排布矩形孔实现自支撑透射光栅的技术方法. 理论分析与实验结果表明, 利用新方法制作的透射光栅较好地摆脱了周期性加强筋对透射光栅衍射模式的强加干扰.

关键词: 透射光栅, 软X射线, 激光等离子体诊断, 惯性约束聚变

PACS: 42.79.Dj, 07.85.Fv, 41.50.+h

DOI: 10.7498/aps.64.074201

1 引言

在惯性约束聚变研究、激光等离子体诊断和天文观测软X射线谱测量^[1-6]过程中得到重要应用的透射光栅, 由刻划在高 Z 材料(通常是Au)薄膜上的一系列平行狭缝构成^[1,7-9]. 实际应用中, 构成光栅的薄膜厚度一般在百纳米的量级, 光栅的线密度(每毫米狭缝的个数)通常在1000的量级^[7]. 这样的元件其自身非常脆弱, 难以实现自支撑.

为了解决以上问题, 透射光栅制作者们目前采用的通用做法是^[1,7-11]在光栅中垂直于栅条方向和平行于栅条方向各自均匀地添加与栅条材料相同的加强筋. 加强筋的引入将一块完整的光栅分割成了许多井字形的小块, 而这些规则排布的井字形的小块必定会带来新的衍射效应, 从而影响光栅原有的衍射模式, 导致光栅测谱质量的下降.

为了规避以上缺点, 本文提出了一种应用于软

X射线波段的新型准随机矩形孔自支撑透射光栅. 通过将传统黑白光栅原有的透光狭缝保留一定比例的透光区域, 并将其均匀地分成一定数量的透光小孔随机地分布在原有透光狭缝上, 从而实现自支撑, 并在谱分辨方向保持原有的方波透过率函数从而保持原有的衍射模式. 在对新光栅进行理论分析的基础上, 对其衍射模式进行了计算机模拟. 结果表明, 这种新的光栅不仅能够很好地实现自支撑, 而且能够很好地消除加强筋衍射效应对光栅原有衍射模式的影响.

本文利用聚焦离子束加工技术制作了一块线密度为1000 lines/mm的准随机矩形孔透射光栅, 并在北京同步辐射装置上对该光栅的衍射性能进行了表征. 实验结果验证了我们的观点. 利用准随机矩形孔实现自支撑透射光栅的技术手段将有效裨益于这种软X射线色散元件在其各相关技术领域的应用.

* 国家重大仪器设备开发专项(批准号: 2012YQ130125)和国家自然科学基金(批准号: 11375160)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: leifeng.cao@caep.cn

2 周期加强筋结构对透射光栅衍射模式的影响

对于平面波正入射到透射光栅上, 根据弗朗禾费衍射理论^[12], 其远场衍射模式为

$$\begin{aligned}
 U(\xi, \eta) &= \frac{A_0 \exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}(\xi^2 + \eta^2)\right] \\
 &\times \iint t(x, y) \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda z}(\xi x + \eta y)\right] dx dy \\
 &= \frac{A_0 \exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}(\xi^2 + \eta^2)\right] \\
 &\times F\{t(x, y)\}|_{f_\xi=\frac{\xi}{\lambda z}, f_\eta=\frac{\eta}{\lambda z}}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中 A_0 为入射波的振幅, (x, y) 是光栅平面, (ξ, η) 是衍射接受屏平面. 由(1)式可知, 光栅的远场衍射模式是由光栅的透过率函数 $t(x, y)$ 决定的, 即 $t(x, y)$ 的傅里叶变换. 特别地, 当 $\xi = 0$ 时,

$$\begin{aligned}
 U(0, \eta) &= \frac{A_0 \exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}\eta^2\right] \\
 &\times \iint t(x, y) \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda z}\eta y\right] dx dy,
 \end{aligned}$$

令 $t(y) = \int t(x, y) dx$, 则沿 η 轴的衍射模式为透过率函数 $t(y)$ 的傅里叶变换

$$\begin{aligned}
 U(0, \eta) &= \frac{A_0 \exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}\eta^2\right] \\
 &\times \iint t(y) \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda z}\eta y\right] dy \\
 &= \frac{A_0 \exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}\eta^2\right] F\{t(y)\}|_{f_\eta=\frac{\eta}{\lambda z}}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

同理, 令 $\eta = 0$ 和 $t(x) = \int t(x, y) dy$, 可得沿 ξ 轴的衍射模式为透过率函数 $t(x)$ 的傅里叶变换

$$\begin{aligned}
 U(\xi, 0) &= \frac{A_0 \exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}\xi^2\right] \\
 &\times \iint t(x) \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda z}\xi x\right] dx \\
 &= \frac{A_0 \exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}\xi^2\right] F\{t(x)\}|_{f_\xi=\frac{\xi}{\lambda z}}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

所以, 在弗朗禾费衍射条件下, 光栅沿 ξ 轴和 η 轴的远场衍射模式分别由透过率函数 $t(x)$ 和 $t(y)$ 决定.

传统黑白光栅如图 1(a) 所示, 其透过率函数为

$$t_1(x) = \begin{cases} 1, nd < x < nd + a, \\ 0, nd + a < x < (n + 1)d, \end{cases} \quad (4)$$

$$t_1(y) = a/d, \quad (5)$$

其中 d 为光栅周期常数, a 为一个周期内透光部分的宽度.

对光栅的透过率函数作傅里叶展开, 光栅的衍射项与展开项一一对应^[13], 即得到光栅的衍射模式

$$\begin{aligned}
 t_1(x) &= \frac{a}{d} + \sum_{n \neq 0} \frac{a \sin(n\pi a/d)}{n\pi a/d} \\
 &\times \exp(f_n 2\pi i x)|_{f_n=n/d}, \\
 n &= \pm 1, \pm 2, \dots \\
 F\{t_1(x)\} &= \frac{a}{d} + \sum_{n \neq 0} \frac{a}{d} \\
 &\times \sin c(f_\xi \pi a)|_{f_\xi=\xi/\lambda z=n/d}, \\
 n &= \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6)
 \end{aligned}$$

光栅在 x 轴方向存在 $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 等多个衍射级次. 由于 $t_1(y)$ 是一个常数, 因此理想的黑白光栅在接收屏的 η 轴方向不会有衍射, 只会沿着 ξ 轴方向衍射.

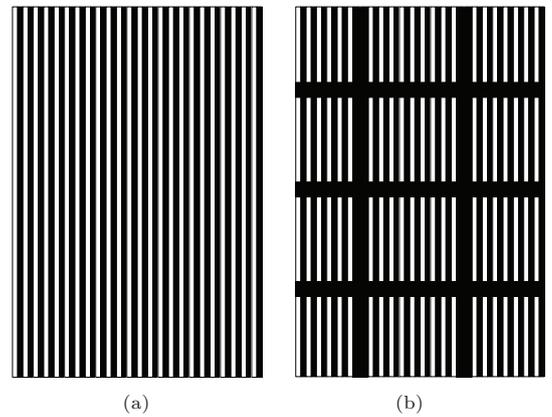


图 1 光栅结构示意图 (a) 传统理想黑白光栅; (b) 加强筋光栅

由于普通的衬底对 X 射线吸收严重, 因此图 1(a) 所示结构只适用于制作可见光透射式光栅和反射式光栅, 制作应用于软 X 射线波段的透射光栅的常规方法是采用如图 1(b) 所示的镂空结构, 在光栅中垂直于栅条方向和平行于栅条方向各自均匀地添加与栅条材料相同的加强筋, 使之实现自支撑. 在加入加强筋之后, 光栅透过率函数变为

$$t_2(x) = \begin{cases} 1 - c_y/L_y, & nd < x < nd + a \text{ 其在加强筋区域外,} \\ 0, & nd + a < x < (n + 1)d \text{ 或在加强筋区域内,} \end{cases} \quad (7)$$

$$t_2(y) = \begin{cases} a/d - c_x/L_x, & \text{在加强筋区域外,} \\ 0, & \text{在加强筋区域内,} \end{cases} \quad (8)$$

其中, c_x 和 c_y 分别为 x 方向和 y 方向加强筋的总宽度, L_x 和 L_y 分别是光栅 x 方向和 y 方向的总长度. 对比 (7) 式和 (4) 式可知, 图 1 (b) 所示的光栅在 ξ 轴方向的衍射模式是两种模式的叠加, 一种与图 1 (a) 所示光栅衍射模式是一致的, 且各衍射项的振幅有所下降, 另一种是加强筋的周期结构所导致的衍射, 由光栅方程 $\sin \theta = n\lambda/d$ 可知, 对于同一波长的光, 加强筋的周期结构将导致在光栅原有的 0 级与 1 级间产生对应的衍射峰, 并且还有可能造成短波的高级衍射与长波的一级衍射叠加在一起. 由 (8) 式可知, 图 1 (b) 所示的常规加强筋光栅在 y 轴方向的透过率函数为一个周期方波函数, 因此该光栅在 η 轴方向也会有衍射. 因此, 在实际应用中, 加强筋不仅减少了光栅的透光面积, 降低了光栅的 1 级绝对衍射效率, 而且加强筋带来的衍射效应会影响光栅的功能, 对光谱测量带来干扰.

3 准随机矩形孔透射光栅及其衍射

3.1 光栅设计及衍射模式理论推导

为了解决图 1 (b) 中光栅加强筋结构衍射对光谱测量的干扰, 同时又保证光栅的自支撑结构, 我们提出了一种新型的光栅设计方案——准随机矩形孔透射光栅, 如图 2 所示.

我们将光栅每个周期内的透光狭缝分为很多大小相等的透光矩孔, 一个狭缝内总的透光面积与原来透光面积比为 $p(p < 1)$, 矩形孔的宽与原来透光狭缝宽度相等, 即为 a , 矩形孔的数目为 m , 则每个矩形孔的长度为 $w = L_y p/m$, 矩形孔在一个狭缝内满足相邻矩形孔不相交的情况下, 在原透光狭缝的高 Z 材料薄膜上随机分布 (当然, 考虑到实际微加工工艺也可适当设定一个最小距离下限):

$$y_q = \text{rand}(w/2, L_y - w/2), \quad (9)$$

$$y_{q+1} - y_q > w \text{ or } w + \Delta_{\min}, \quad (10)$$

其中 $q \in [1, m]$, Δ_{\min} 为设定的最小距离下限, y_q 为矩形孔的中心纵坐标. 因为 $t(x) = \int t(x, y) dy$,

$t(y) = \int t(x, y) dx$, 故新设计的准随机矩形孔光栅的透过率函数为

$$t_3(x) = \begin{cases} p, & nd < x < nd + a, \\ 0, & nd + a < x < (n + 1)d, \end{cases} \quad (11)$$

$$t_3(y) = pa/d. \quad (12)$$

当光栅参数确定之后, p 是一个已知常数, 则对比 (11), (12) 式和 (4), (5) 式可知,

$$\begin{aligned} t_3(x) &= p \cdot t_1(x), \\ t_3(y) &= p \cdot t_1(y). \end{aligned} \quad (13)$$

两者透过率函数形式一样, 而在夫琅禾费衍射条件下, 轴向衍射模式只与透过率函数有关, 所以准随机矩形孔透射光栅 ξ 轴方向的衍射模式与理想的黑白光栅完全一致, 也不会带来 η 轴方向的衍射.

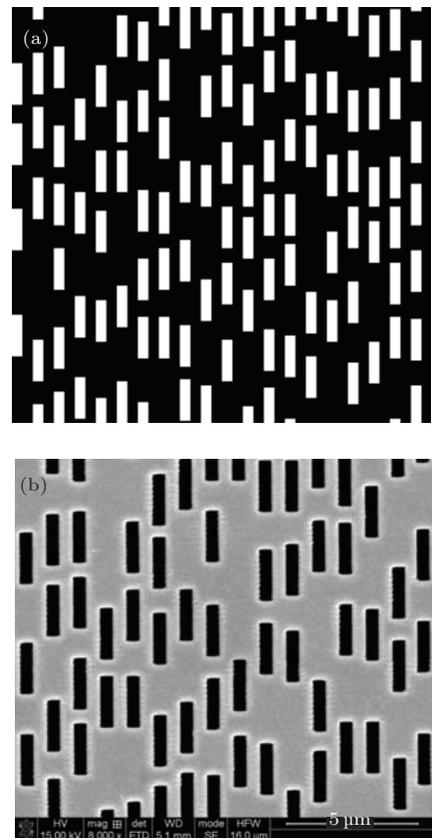


图 2 准随机矩形孔透射光栅图 (a) 准随机矩形孔光栅结构示意图; (b) 样品光栅电镜扫描图 (1000 lines/mm)

对于普通黑白光栅而言, 光栅透过率函数傅里叶展开的系数平方即为对应级次的绝对衍射效率, 由(13)式和(6)式可得, 准随机矩形孔透射光栅的绝对衍射效率 E_{abs} 为

$$E_{\text{abs}} = \begin{cases} (p \cdot a/d)^2, & n = 0, \\ \left(\frac{p}{n\pi}\right)^2, & n \text{ 为奇数}, \\ 0, & n \text{ 为非零偶数}. \end{cases} \quad (14)$$

3.2 衍射模式计算机模拟

因为弗朗禾费衍射理论是采用的远场近似, 从实际角度出发, 我们采用更普遍的基尔霍夫衍射理论^[12], 采用数值计算的方法, 对单色平行光垂直入射加强筋光栅和随机矩形孔光栅的远场衍射模式进行了计算机模拟. 计算机模拟中假定入射光强度相同(令为单位1), 模拟所用的具体模拟参数如

表1所示.

表1中, λ 为入射平面波的波长; d 为光栅常数; a 为一个周期内透光部分的宽度; Δ_{min} 表示准随机矩形孔透射光栅中矩形孔纵向相邻边之间的最小间距; 对于加强筋光栅, w 和 Δ_{min} 对应的是纵向(y 方向)参数, w 为 $8 \mu\text{m}$, Δ_{min} 为 $2 \mu\text{m}$, 表示每隔 $8 \mu\text{m}$ 的透光孔加入一条 $2 \mu\text{m}$ 的加强筋, 加强筋光栅在横向(x 方向)的大周期为 $10 \mu\text{m}$, 宽度为 $2.5 \mu\text{m}$, p 是加强筋光栅的透光面积与原来不加加强筋的理想1:1黑白光栅的透光面积比. 对于准随机矩形孔透射光栅, w 表示矩形孔的纵向宽度; $L_x \times L_y$ 表示光栅尺寸; z 为光栅到衍射屏的距离. 模拟中, 衍射接收屏 x 方向取了1400个像素, y 方向取了600像素, 每个像素为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$. 模拟结果如图3所示.

表1 各种类型光栅的模拟参数

光栅类型	λ/nm	$d/\mu\text{m}$	$a/\mu\text{m}$	$w/\mu\text{m}$	$p/\%$	$L_x \times L_y/\mu\text{m}^2$	z/m	$\Delta_{\text{min}}/\mu\text{m}$
加强筋光栅	5	1	0.5	8	64	100×100	0.5	2
准随机矩形孔透射光栅	5	1	0.5	2	50	100×100	0.5	0.2

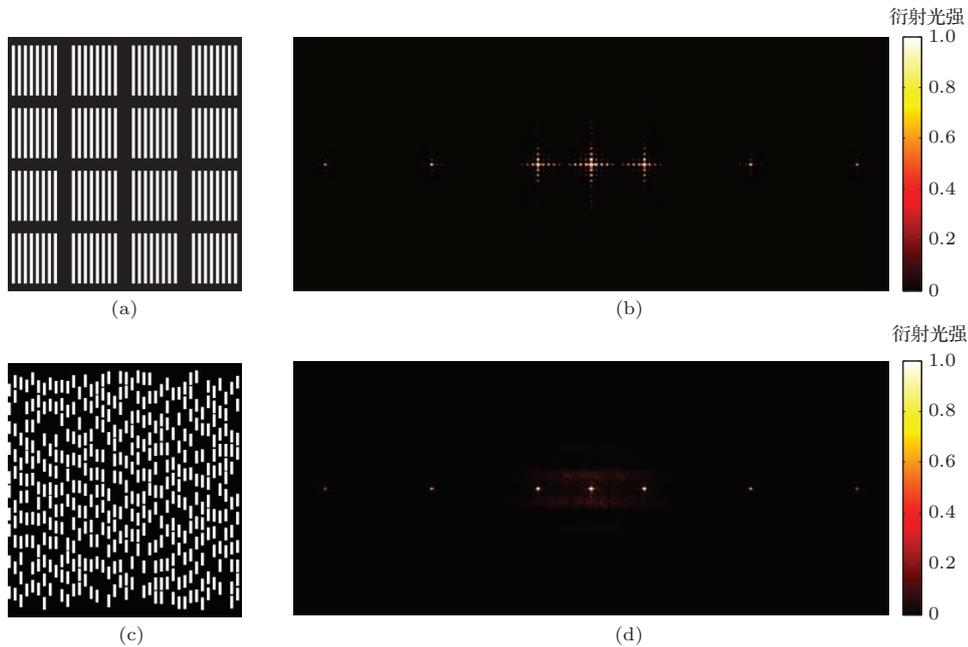


图3 (网刊彩色) 各光栅衍射模式计算机模拟结果 (a) 模拟参数下的加强筋光栅图(局部); (b) 加强筋光栅的衍射模式; (c) 模拟参数下的准随机矩形孔透射光栅图(局部); (d) 准随机矩形孔透射光栅的衍射模式

图3(a)和(b)是加强筋光栅及其衍射模式, 可以看出加强筋光栅不仅在 ξ 轴方向有0级、 ± 1 级、 ± 3 级等衍射级次, 而且在0级和1级间、1级和3级间存在纵多干扰级次, 并且在 η 轴方向同样存在亮

度较高的衍射, 在实际应用中会对所测光谱带来较大影响. 同(5)式和(6)式比较可知, 计算机模拟结果和我们的理论预计一致. 此处我们在纵向设定的透光长度与加强筋长度为 $8 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$, 加强筋周

期等效为 $10\ \mu\text{m}$, 由光栅方程可知, 当入射波长一定时, 加强筋周期越大, 则 η 轴方向各级衍射角越小, 则对 η 轴各级衍射的干扰也越大。

图 3(c) 和 (d) 是准随机矩形孔透射光栅及其衍射模式, 通过图 2(d) 与 (b) 的对比可知, 模拟结果表明, 与夫琅禾费衍射理论预期一致, 准随机矩形孔透射光栅在 ξ 轴的衍射只有 0 级、 ± 1 级、 ± 3 级等衍射级次, 在各级次之间没有干扰级次, 在 η 轴方向也没有如加强筋光栅一样明显的与 ξ 轴亮度相当的衍射。由此可知, 新光栅可以有效解决加强筋光栅在 ξ 轴和 η 轴的衍射干扰问题, 为光栅的实际应用带来很大益处。

在计算中, 我们选取的参数对应的加强筋光栅和准随机矩形孔透射光栅的透光面积与原 1 : 1 黑白光栅的透光面积比分别为 64% 和 50%, 在实际应用和加工中, 加强筋光栅的加强筋面积有可能比模拟给出的参数更大, 而准随机矩形孔透射光栅的透光面积可以根据实际应用需求而适当调节 p 和 w 而提高透光面积比, 从而提高光栅的衍射效率 (14) 式。

4 准随机矩形孔透射光栅的制作及其性能表征

为了验证理论推导结果和计算机模拟结果的正确性, 我们采用聚焦离子束加工工艺 [3,14,15], 制作了一块 1000 lines/mm 的样品光栅, 光栅尺寸为

$100\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$ 方向为光栅谱分辨方向, 基元矩形孔的尺寸为 $2\ \mu\text{m} \times 0.5\ \mu\text{m}$, 光栅的透光面积比 p 为 50%, 镀的挡光高 Z 材料是 500 nm 厚的 Au 膜。图 2(b) 给出了样品光栅的电镜扫描图。

我们在北京同步辐射装置 4B7B 软 X 射线束线站对上述样品光栅的衍射模式进行了实验标定, 实验装置示意图如图 4 所示。其中, 样品光栅到 CCD 接收面的距离约为 50 cm, CCD 接收面尺寸为 1300 像素 (pixel) \times 1340 像素 (pixel), 每个像素大小为 $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 。

典型的实验结果如图 5 所示, 图 5(a) 是 200 eV 光子能量下 ($\lambda = 6.2\ \text{nm}$) 的测量结果, 图 5(b) 是沿光栅衍射轴方向的衍射强度积分图。对比图 5(a) 与图 3(d) 可知, 实验结果与计算机模拟结果符合得很好, 准随机矩形孔透射光栅在 ξ 轴方向存在 0 级、 ± 1 级和 ± 3 级等衍射级次, 在 η 轴方向则没有如加强筋光栅一样的衍射级次存在。因此, 准随机矩形孔透射光栅在实现完全自支撑的同时, 可以消除加强筋光栅在纵向对光栅原有衍射模式的干扰, 提高透射光栅所测光谱的质量。

仔细观察图 3(d) 和图 5(a) 可以发现, 在平行于光栅谱分辨方向靠近 0 级衍射的区域存在一定的背景噪声, 大约为 0 级衍射的 1% 左右, 对光栅的实际应用影响不大。经过初步分析, 此背景噪声可能通过调节光栅参数从而得到进一步改善, 我们将在后续工作就此进行进一步分析。

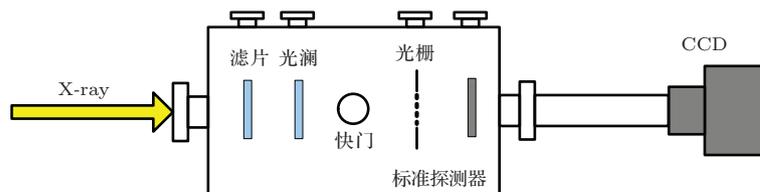


图 4 (网刊彩色) 实验装置示意图

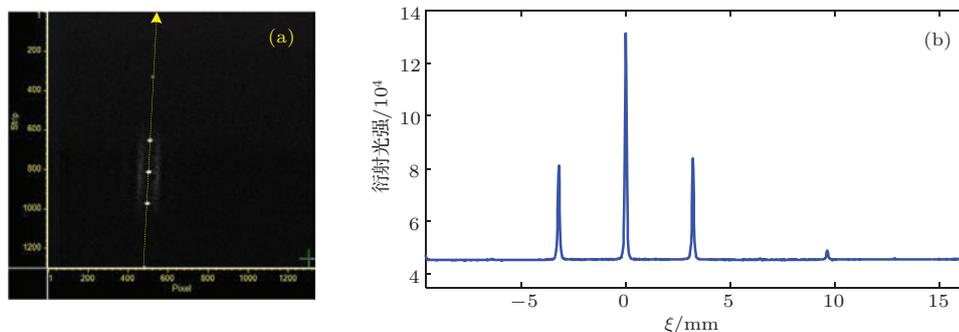


图 5 (网刊彩色) 200 eV 标定实验结果原图及实验结果处理 (a) 200 eV 标定实验结果原图; (b) 沿衍射轴方向衍射强度积分结果

5 结 论

为了解决加强筋结构对X射线透射光栅衍射模式产生的影响,我们提出了一种新型的准随机矩形孔透射光栅.我们利用在高 Z 材料薄膜上准随机排布矩形孔实现透射光栅的自支撑,我们基于标量衍射理论对新光栅的衍射模式进行了理论分析和计算机模拟,并且采用聚焦粒子束直写技术制作了一块1000 lines/mm的样品光栅,在北京同步辐射装置上对光栅的衍射模式进行了软X射线波段的验证.理论分析、计算机模拟和实验结果均证明随机矩形孔透射光栅不仅能够很好地实现自支撑,而且能够有效地消除由均匀添加的加强筋对其原有衍射模式的干扰.利用准随机矩形孔实现自支撑透射光栅的技术手段将有效裨益于这种软X射线色散元件在其各相关技术领域的应用.下一步,我们将对准随机矩形孔透射光栅设计参数进行进一步优化,降低不必要的背景噪声.

感谢北京同步辐射装置4B7B束线的工作人员以及中国工程物理研究院激光聚变研究中心易荣清、朱托、熊刚和尚万里为光栅标定实验提供帮助,感谢同西南科技大学黄成龙和清华大学田超的有益讨论.

参考文献

- [1] Shang W L, Zhu T, Xiong G, Zhao Y, Zhang W H, Yi R Q, Kuang L Y, Cao L F, Gao Y L, Yang J M, Zhao Y D, Cui M Q, Zhen L, Han Y, Zhou K J, Ma C Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 034216 (in Chinese) [尚万里, 朱托, 熊刚, 赵阳, 张文海, 易荣清, 况龙钰, 曹磊峰, 高宇林, 杨家敏, 赵屹东, 崔明启, 郑雷, 韩勇, 周克瑾, 马陈燕 2011 物理学报 **60** 034216]
- [2] Zhang Q Q, Wei L, Yang Z H, Qian F, Fan Q P, Zhang B, Gu Y Q, Cao L F 2014 *Chin. Phys. B* **23** 044215
- [3] Huang C L, Zhang J C, Diao K D, Zeng Y, Yi Y, Cao L F, Wang H B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 018101 (in Chinese) [黄成龙, 张继成, 刁凯迪, 曾勇, 易勇, 曹磊峰, 王红斌 2014 物理学报 **63** 018101]
- [4] Weaver J L, Holland G, Feldman U, Seely J F, Brown C M Serlin V, Deniz A V, Klapisch M 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 108
- [5] Eagleton R T, James S F 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3969
- [6] Yang J M, Ding Y N, Zhang W H Zhang J Y, Zheng Z J 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 4268
- [7] Schnopper H W, Van Speybroeck L P, Delvaile J P, Epstein A, Källne E, Bachrach R Z, Dijkstra J, Lantward L 1977 *Appl. Opt.* **14** 1088
- [8] Zhu X L, Ma J, Xie C Q, Ye T C, Liu M, Cao L F, Yang J M, Zhang W H 2008 *Acta Optical Sinica* **28** 1026 (in Chinese) [朱效立, 马杰, 谢常青, 叶甜春, 刘明, 曹磊峰, 杨家敏, 张文海 2008 光学学报 **28** 1026]
- [9] Li H L, Wu J, Zhu X L, Xie C Q, Liu M, Cao L F 2007 *Acta Optical Sinica* **29** 2650 (in Chinese) [李海亮, 吴坚, 朱效立, 谢常青, 刘明, 曹磊峰 2007 光学学报 **29** 2650]
- [10] Desauté P, Merdji H, Greiner V, Missalla T, Chenais-Popovics C, Troussel P 2000 *Opt. Com.* **173** 37
- [11] Wilhein T, Rehbein S, Hambach D, Berglund M, Rymell L, Hertz H M 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 1694
- [12] Nü N G 2006 *Fourier Optics 2* (Beijing: China Machine Press) pp77-93 (in Chinese) [吕乃光 2006 傅里叶光学(第2版)(北京:机械工业出版社)第77-93页]
- [13] Cao L F 2002 *Ph. D. Dissertation* (Mianyang: Chinese Academy of Engineering Physics) (in Chinese) [曹磊峰 2002 博士学位论文(绵阳:中国工程物理研究院)]
- [14] Spector S J, Jacobsen C J, Tennant D M 1997 *J. Vac. Sci. Technol. B* **15** 2872
- [15] Zhu X L, Ma J, Cao L F, Yang J M, Xie C Q, Liu M, Chen B Q, Niu J B, Zhang Q Z, Jiang J, Zhao M, Ye T C 2007 *Chinese Journal of Semiconductors* **28** 2006 (in Chinese) [朱效立, 马杰, 曹磊峰, 杨家敏, 谢常青, 刘明, 陈宝钦, 牛洁斌, 张庆钊, 姜骥, 赵珉, 叶甜春 2007 半导体学报 **28** 2006]

Quasi-random rectangular holes self-supporting transmission grating*

Liu Yu-Wei¹⁾²⁾ Zhang Wen-Hai²⁾ Zhang Ji-Cheng²⁾ Fan Quan-Ping²⁾ Wei Lai²⁾
Yan Zhuo-Yang²⁾ Zhao Yi-Dong³⁾ Cui Ming-Qi³⁾ Qiu Rong¹⁾ Cao Lei-Feng^{1)2)†}

1) (*Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology and Research Center of Laser Fusion, Mianyang 621900, China*)

2) (*Research Center of Laser Fusion, CAEP. P. O. Box 919-986, Mianyang 621900, China*)

3) (*Institute of High Energy Physics, the Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 3 December 2014; revised manuscript received 18 December 2014)

Abstract

Support-mesh structures of a self-supporting transmission grating may decrease the transmission area and diffraction efficiency, thus exert a ill effect on the original diffraction pattern of the grating and make it complicated to apply, especially in soft X-ray region. To solve this problem, we put forward a method to realize a kind of totally self-supporting transmission grating by arranging the rectangular transmission holes in a high Z foil quasi-randomly. Based on Fraunhofer's diffraction theory, we make a theoretical analysis on the diffraction pattern of this new kind of grating. We also calculate the diffraction pattern of this new kind of grating based on the Kirchhoff's diffraction theory. Further more, we fabricate a sample grating of 1000 lines/mm using a focused ion beam (FIB) technology and then test it with the beam line 4B7B on the Beijing synchrotron radiation facility. Theoretical analysis and experimental result both show that the diffraction of the transmission grating can remove the ill effect of the support-mesh structures by using this newly designed method. Such a method can profit us in applications of this kind of X-ray dispersive element to a wide extent.

Keywords: transmission grating, soft X-ray, laser-plasma diagnosis, inertial confinement fusion.

PACS: 42.79.Dj, 07.85.Fv, 41.50.+h

DOI: [10.7498/aps.64.074201](https://doi.org/10.7498/aps.64.074201)

* Project supported by the Special Program of National Major Scientific Instruments Equipments Development of China (Grant No. 2012YQ130125), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No.1137516).

† Corresponding author. E-mail: leifeng.cao@caep.cn