

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/279422730>

# Measurement of diffraction properties of photon sieves applied to spectroscopy for soft X-ray

Article in *Qiangguang Yu Lizishu/High Power Laser and Particle Beams* · February 2011

DOI: 10.3788/HPLPB20112302.0387

CITATIONS

6

READS

17

10 authors, including:



**Leifeng Cao**

Research Center of Laser Fusion China Acad ...

129 PUBLICATIONS 651 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Yuqiu Gu**

China Academy of Engineering Physics

304 PUBLICATIONS 1,262 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Spectrum diagnosis [View project](#)



Single-order diffraction grating [View project](#)

All content following this page was uploaded by **Leifeng Cao** on 17 July 2016.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

# 软 X 光谱学光子筛衍射特性的实验表征<sup>\*</sup>

魏 来<sup>1,2</sup>, 曹磊峰<sup>2</sup>, 范 伟<sup>2</sup>, 臧华萍<sup>2</sup>, 高宇林<sup>2</sup>,  
朱效力<sup>3</sup>, 谢长青<sup>3</sup>, 谷渝秋<sup>2</sup>, 张保汉<sup>2</sup>, 王晓方<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 近代物理系, 中国科学院基础等离子体物理重点实验室, 合肥 230026;

2. 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防科技重点实验室, 四川 绵阳 621900;

3. 中国科学院 微电子研究所 纳米加工与新器件集成技术实验室, 北京 100029)

**摘 要:** 概述了谱学光子筛的设计原理, 计算了其透射率, 并对设计的软 X 光谱学光子筛的衍射模式在光学波段进行了模拟计算和实验表征。结果表明, 这种新型色散元件具有良好的、与设计预期一致的单级衍射特性, 3 级及以上的高级衍射能被有效抑制。与传统的透射光栅和以前设计的单级衍射光栅相比, 新设计的软 X 光谱学光子筛更易于实现自支撑, 可望在极紫外和软 X 光谱测量过程中得到广泛应用。

**关键词:** 软 X 光; 光子筛; 衍射光栅; 衍射特性

**中图分类号:** O436.1

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3788/HPLPB20112302.0387

衍射光栅是光谱分析的重要元件<sup>[1-2]</sup>, 基于透射衍射光栅的软 X 光透射光栅谱仪更是激光聚变实验中的重要诊断设备, 可以提供激光惯性约束实验(ICF)中重要的黑腔辐射软 X 光谱。然而, 传统的黑白光栅具有多级衍射的特征<sup>[3]</sup>, 因此, 长期以来, 应用于 ICF 研究的光栅谱仪一直受到高级衍射干扰的影响<sup>[4-5]</sup>, 测谱精度受到很大限制。2002 年, 我们提出了二值化正弦光栅的概念, 提供了一种研制 X 光单级衍射光栅的基本技术思路。在此基础上, 我们于 2005 年发明了量子点阵衍射光栅(QDADG)<sup>[6]</sup>, 并在随后的工作中对 QDADG 的单级衍射特性进行了理论和实验验证<sup>[7-9]</sup>。QDADG 由一系列准随机排列的量子点构成, 量子点的数密度在光栅表面沿 1 维呈随机分布, 沿另外 1 维呈正弦分布。量子点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, 量子点尺寸根据实际需要决定。但是, 在制造上, 由于 QDADG 一些地方的支撑非常脆弱, 要实现自支撑非常难, 必须要加上衬底。而一般的衬底(如聚酰亚胺), 对软 X 波段的吸收强烈, 在黑腔辐射软 X 光谱诊断中是很不利的。这一问题制约了 QDADG 在惯性约束聚变研究中的推广应用。为了实现 X 光单级衍射光栅的自支撑, 我们在 2009 年发明了软 X 光谱学光子筛: 在不透明的基底挖出一系列准随机分布的圆孔, 圆孔的透过率和光栅基底的透过率呈二值跃迁变化, 圆孔的透过率为 1, 基底的透过率为 0。这种结构由于孔与孔之间并不紧贴, 所以可以妥善实现自支撑, 消除了衬底对 X 光谱的影响。本文介绍了软 X 光谱学光子筛的基本概念, 严格计算了它的透射率, 在光学波段通过计算机模拟和实验两种手段验证和表征这种新型元件的单级衍射特性, 并简要讨论了这种元件应用于 X 光波段的可行性。

## 1 谱学光子筛简介

### 1.1 正弦光栅简介

传统的光栅在空间上具有周期结构, 它的振幅透射系数为复数, 振幅透射系数的模表示振幅透过率, 辐角表示相位变化。对于黑白光栅, 振幅透射系数的辐角为常数, 空间无限大的黑白光栅的透过率为

$$t(x) = \begin{cases} 1, & mw < x \leq mw + a \\ 0, & mw + a < x \leq (n+1)w \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $a$  是构成光栅的每一条狭缝的宽度;  $w$  是光栅的周期宽度;  $n=0, 1, 2, \dots$ 。将式(1)作傅里叶展开, 得

$$t(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi ma/w)}{\pi m} \cos(2\pi mx/w) \quad (2)$$

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2010-03-30; 修订日期: 2010-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(10727504); 中国科学院创新项目

作者简介: 魏来(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为激光等离子体诊断; future72@mail.ustc.edu.cn。

通信作者: 曹磊峰(1967—), 博士, 研究员, 主要研究领域为强场物理、激光等离子体诊断和 X 光光学; liaode\_2002@yahoo.com.cn。

王晓方(1967—), 博士, 教授, 主要研究领域为强场物理、X 光光学; wang1@ustc.edu.cn。

考虑一个振幅为  $A_0$ 、波长为  $\lambda$  的平面波入射到光栅面上,作远场近似并结合式(2),则远场衍射模式沿  $\xi$  轴方向的光场分布为

$$U(\xi, 0) = A_0 \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left(\frac{ik\xi^2}{2z}\right) \left[ \frac{a}{w} \delta\left(\frac{\xi}{\lambda z}\right) + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta\left(\frac{\xi}{\lambda z} + \frac{m}{w}\right) \right] \quad (3)$$

式中:  $k$  为波数;  $\delta(\cdot)$  为狄拉克函数;  $\xi$  是接收面的横坐标; 接收面的纵坐标  $\eta=0$ 。由此,我们可以看到衍射模式的各级分别对应于透射率的傅里叶展开的各级。如果光栅的透射率满足

$$t(x) = \frac{a}{w} + \frac{a}{w} \frac{\sin(\pi a/w)}{\pi a/w} \left[ \exp\left(\frac{i2\pi x}{w}\right) + \exp\left(-\frac{i2\pi x}{w}\right) \right] \quad (4)$$

即称为正弦光栅,那么与之对应的衍射模式就只剩下 0 级和  $\pm 1$  级衍射,这样就可以成功消除高级衍射模式。由式(4)可以看出,利用正弦光栅作为衍射元件,可以消除传统黑白透射光栅高级衍射所带来的影响,对 ICF 实验研究精密化诊断具有极其重要的意义。然而,迄今为止尚未研制出具有高空间频率(大于 1 000 lp/mm),对 X 光的透过率函数在 1 维方向上正弦变化的金属材料的透射光栅。

## 1.2 谱学光子筛概念

谱学光子筛是由 2 维随机分布的圆孔阵列组成,见图 1(a)。每一个基元是一个方格,边长为  $d$ ,方格内有一个圆孔,圆孔直径为  $d/2$ ,圆心坐标是随机的。设透射率为  $t(x, y)$ ,  $x$  方向透射率  $t(x) = \int t(x, y) dy$ 。假设光栅沿  $y$  方向有  $N$  个方格,则

$$t(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_i 2 \sqrt{(d/4)^2 - (x - x_i)^2}}{Nd} \quad (5)$$

式中:  $x_i$  是圆心坐标。因为圆孔是限制在方格内的,所以  $x_i \in [d/4, 3d/4]$ 。随着  $N$  的增大,  $x_i$  将取遍区间  $[d/4, 3d/4]$  的所有值,这时  $N = d/2\Delta x_i$ ,  $\Delta x_i$  是圆孔间平均间隔,式(5)变成

$$t(x) = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \frac{\sum_i 4 \sqrt{(d/4)^2 - (x - x_i)^2}}{d^2} \Delta x_i = \frac{4}{d^2} \int \sqrt{(d/4)^2 - (x - x_i)^2} dx_i \quad (6)$$

当  $x \in [0, d/2]$ , 积分区间为  $[d/4, x + d/4]$ ; 当  $x \in [d/2, d]$ , 积分区间为  $[x - d/4, 3d/4]$ , 最后积分可得

$$t(x) = \begin{cases} [\pi/2 - \arcsin(1 - 4x/d) - (1 - 4x/d) \sqrt{1 - (1 - 4x/d)^2}]/8, & x \in [0, d/2] \\ [\pi/2 + \arcsin(3 - 4x/d) - (3 - 4x/d) \sqrt{1 - (3 - 4x/d)^2}]/8, & x \in [d/2, d] \end{cases} \quad (7)$$

容易看出,  $t(x)$  的表达式是关于直线  $x = d/2$  对称的,  $t(x)$  的分布图像见图 1(b)。对  $t(x)$  作傅里叶展开, 得到

$$t(x) = 0.1963 - 0.1804 \cos(2\pi x/d) - 0.009965 \cos(6\pi x/d) - 0.002693 \cos(10\pi x/d) - 0.001147 \cos(14\pi x/d) - 0.0006086 \cos(18\pi x/d) + \dots \quad (8)$$

由式(8)可得相对衍射效率(1 级和 0 级光强比)为 21%, 1 级和 3 级光强比为 328, 1 级和 5 级光强比为 4 488; 因此, 与式(2)给出的传统光栅相比, 光子筛的高级衍射可以被有效抑制。

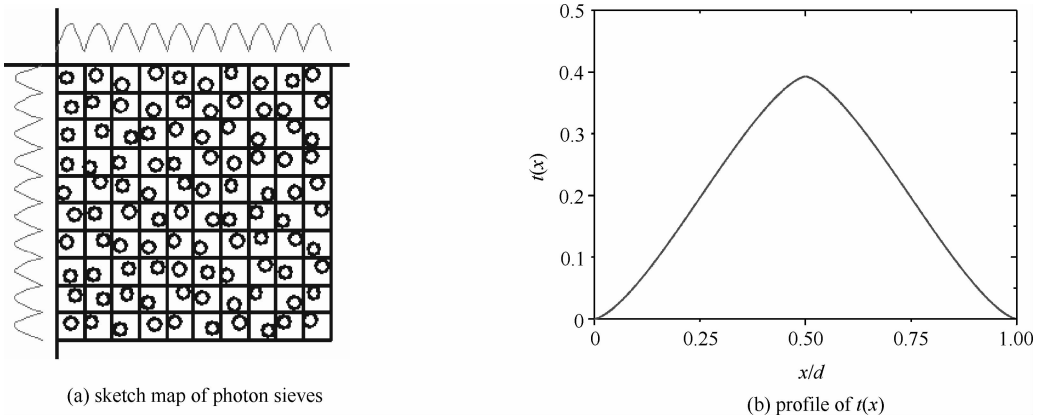


Fig. 1 Sketch map of the photon sieves applied to spectroscopy and profile of  $t(x)$

图 1 谱学光子筛示意图和  $t(x)$  分布图

2 谱学光子筛衍射模式的计算机模拟

根据卷积定理,在夫琅和费衍射的情况下,光子筛的衍射模式等于点阵的衍射模式和圆孔的衍射模式的乘积,由此,用 MATLAB 编程分别对  $5\times 5,10\times 10,15\times 15,20\times 20,25\times 25,30\times 30$  的准随机圆孔阵列的衍射模式作模拟,具体的模拟参数见表 1。图 2 是模拟得到的衍射图。为了观察是否存在高级衍射,同时兼顾计算速度,只在 1 维方向取了较大的范围。由图 2 可以看出,谱学光子筛具有明显的单级衍射特点,只存在 0 级与 $\pm 1$  级衍射。随着点阵列的扩大,谱学光子筛的单级衍射特性越来越明显,能量向 0 级和 $\pm 1$  级衍射斑集中。因此,阵列越大,谱学光子筛的单级衍射特性越好,说明我们的理论是正确的。

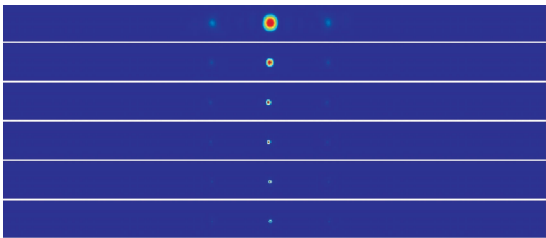


Fig. 2 Diffraction patterns of  $5\times 5,10\times 10,15\times 15,20\times 20,25\times 25,30\times 30$  quasi-random hole arrays(from top to bottom)

图 2 从上到下依次为  $5\times 5,10\times 10,15\times 15,20\times 20,25\times 25,30\times 30$  的准随机圆孔阵列的衍射模式

表 1 模拟参数

Table 1 Simulation parameters

diameter of hole	period of photon	diffraction distance	wavelength	pixel of CCD	CCD array
/mm	sieve/mm	/m	/nm	/ $\mu\text{m}$	
0.01	0.02	0.5	650	70	$128\times 3\,000$

图 2 中  $30\times 30$  的准随机圆孔阵列的衍射图样见图 3。由图 3(a)可以清楚看出, $30\times 30$  的准随机圆孔阵列已经能明显消除高级衍射。为了观察到衍射模式的全貌,我们以  $30\times 30$  的准随机圆孔阵列为例,改变接收屏的阵列为  $3\,000\times 3\,000$ ,模拟得到它的 2 维衍射模式,见图 3(b),它有 9 个衍射斑,中间最亮的是 0 级斑,上下和左右较亮的是 4 个 $\pm 1$  级斑,4 个角点强度最弱。图 3(b)在 2 维方向衍射模式上是对称的,计算可得到相对衍射效率(每个 1 级和 0 级光强之比)为 24%,1 级和 3 级峰值光强比为 380。和理论值间存在误差的原因是:理论值是在圆孔无穷多时得到的结果,而实验中光子筛圆孔约为 900 个。

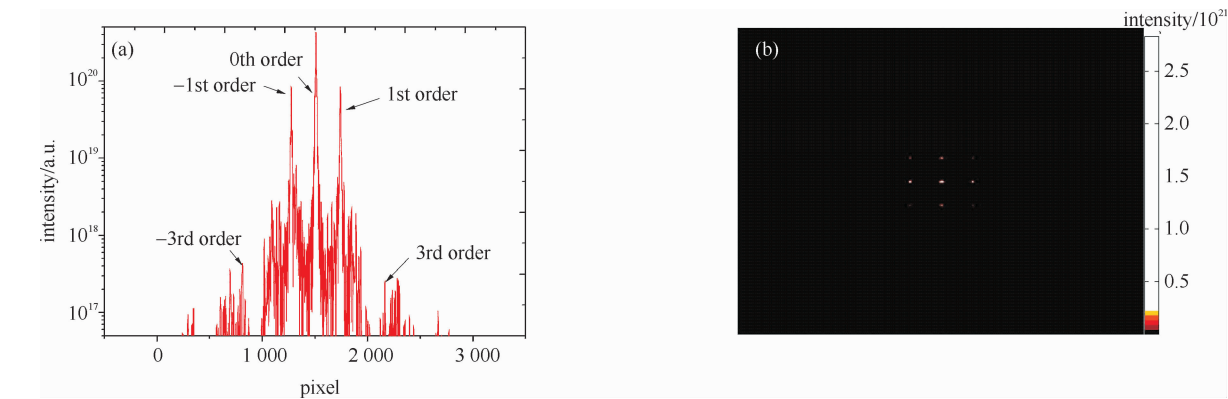


Fig. 3 One-dimension and two-dimension diffraction patterns of  $30\times 30$  quasi-random hole array

图 3  $30\times 30$  的准随机圆孔阵列的 1 维和 2 维衍射模式

3 谱学光子筛衍射模式的实验测量

3.1 实验布局

研制的光学波段谱学光子筛如图 4 所示。光子筛由分布于不透明金箔上的大量圆孔构成,圆孔直径为  $10\,\mu\text{m}$ ,周期为  $20\,\mu\text{m}$ ;光栅大小为  $2\,\text{mm}\times 9\,\text{mm}$ ,约包含 900 个周期;每个周期内的圆孔圆心坐标在 2 维方向均随机分布。

光学波段实验布局如图 5 所示。用波长  $650\,\text{nm}$  的激光器作单色光源,通过一个扩束器使光束均匀和准直地入射到所研制的谱学光子筛上。光子筛后放置透镜 1,对衍射图样聚焦。因为 CCD 的阵面较小,只有  $2\,\text{cm}\times 2\,\text{cm}$ ,衍射图样过大则无法完全收集,所以在透镜 1 的焦平面后,放

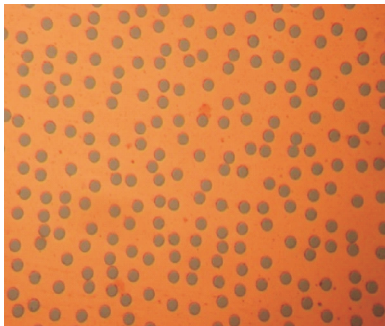


Fig. 4 Microstructure of photon sieves

图 4 谱学光子筛微观结构

置透镜 2,将衍射图样缩小,调节各光具的相对位置,使 CCD 收集的衍射斑强度最强,这时可以认为透镜 2 的像面与 CCD 阵面重合。使用图像处理软件 Winview 和 Matlab 对 CCD 记录的衍射模式进行处理,可以得到谱学光子筛的 0 级与 1 级的位置和光强,以及相对衍射效率。为减小背景光的影响,降低本底光强,实验安排在晚上并关掉一切光源的极暗环境下进行。

### 3.2 实验结果分析

图 6 是实验测得的谱学光子筛的衍射模式,以及它在  $\xi$  方向和  $\eta$  方向的衍射图样。实验与模拟得到的衍射模式很吻合,中心最亮的是 0 级衍射斑,上下和左右较亮的是  $\pm 1$  级斑,4 个角点最弱;光谱实验数据信噪比达到 105。实验时,在 CCD 的阵面上留出了足够的面积记录可能存在的 2 级和高级衍射,但实验中没有发现高级衍射的存在。理论和模拟都指出 3 级衍射并未完全抑制,而实验并未观测到 3 级衍射。这是因为实验信噪比为 105,我们的 CCD 动态范围是  $1 \sim 65\,536$ ,当零级达到饱和和光强 65 536 时,取相对衍射效率为 21%,1 级和 3 级光强比为 329,可以得到 3 级光强约为 42,而本底信号为 624,这样,3 级信号会淹没在本底噪声中,无法观测到。实验测出的相对衍射效率为 29%,高于理论值的 21%和模拟值的 24%。其原因在于:实验中由于环境噪声和 CCD 自身本底不可避免,相对衍射效率提高。

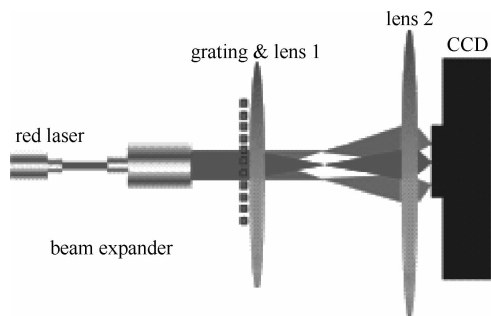


Fig. 5 Experimental arrangement

图 5 实验布置图

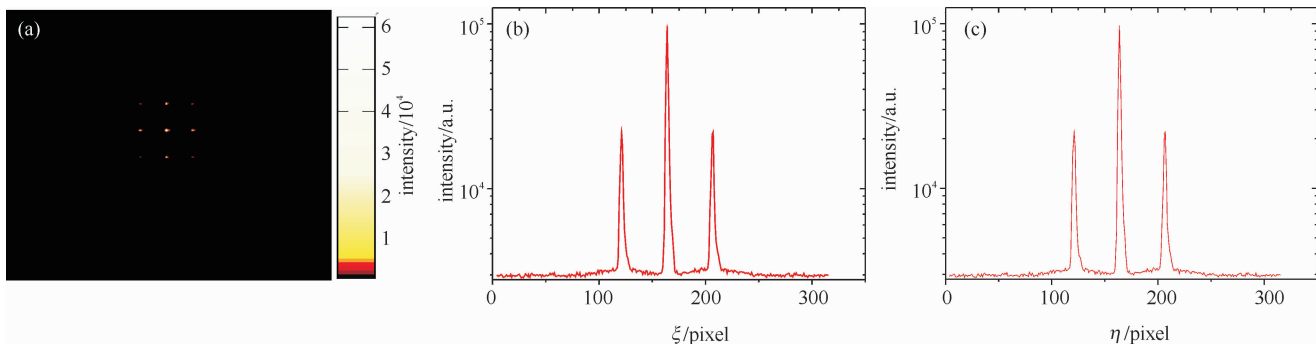


Fig. 6 Measured diffraction pattern of photon sieves applied to spectroscopy, and profiles along  $\xi$  and  $\eta$  axes

图 6 实验测得的谱学光子筛衍射模式以及  $\xi$  方向和  $\eta$  方向衍射图像

## 4 谱学光子筛应用于 X 光波段的可行性

本工作研制的谱学光子筛圆孔的半径较大,仅适用于可见光波段。X 光具有很强的穿透性,目前使用的金箔并不能将 X 光全部阻挡,部分 X 光将穿过金箔到达光子筛的另一侧。这种情况下,谱学光子筛能否应用于 X 光波段?

X 光在金属中的波矢数可以写成  $k = (1 - \alpha - i\beta)\omega/c$ , X 光在金箔上的透射率为

$$t_x = \exp(-\omega\beta h/c) \exp[-i\omega(1 - \alpha)h/c] \quad (9)$$

式中: $\omega$  是 X 光频率; $c$  是真空中光速; $h$  是光栅厚度; $\alpha$  和  $\beta$  是 X 光在金材料中的光学常数。X 光波段谱学光子筛的透射率可以写成

$$\begin{aligned} t^*(x) &= t(x) + [1 - t(x)] \exp(-\omega\beta h/c) \exp(i\alpha x h/c) \\ &\approx 0.196\,3 + 0.803\,7\tau \exp(i\phi) + [\tau \exp(i\phi) - 1] \times [0.180\,4 \cos(2\pi x/d) + 0.009\,965 \cos(6\pi x/d) + \\ &\quad 0.002\,693 \cos(10\pi x/d) + 0.001\,147 \cos(14\pi x/d) + 0.000\,608\,6 \cos(18\pi x/d)] \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\tau = \exp(-\omega\beta h/c)$ ,  $\phi = \alpha x h/c$  这里忽略了透光和不透光部分共同的相移因子  $\exp(-i\omega h/c)$ 。由式(10)可以看出,X 光波段谱学光子筛仍然具有准正弦光栅的透射率,即在 X 光波段,谱学光子筛仍可以抑制高级衍射,具有单级衍射的特性。

## 5 结 论

对新设计的软 X 光谱学光子筛的衍射模式在光学波段进行了理论和模拟计算,并做了实验表征。研究表明:谱学光子筛能够有效抑制高级衍射,其衍射模式比传统透射光栅优越得多。利用这种光学元件代替传统黑白光栅,可以排除高级衍射峰的干扰,有效提高透射光栅谱学的精度和信噪比。随着加工技术的提高,将

可以制造出适用于极紫外,X 光波段的更高空间频率的谱学光子筛。

参考文献：

[1] Schnopper H W, van Speybroeck L P, Delvaille J P, et al. Diffraction grating transmission efficiencies for XUV and soft X rays[J]. *Appl Opt*, 1977, **16**(4):1088-1091.

[2] Lindl J. Development of the indirect-drive approach of ICF and the target physics basis for ignition and gain[J]. *Phys Plasmas*, 1995, **2**(11): 3933-4024.

[3] 王晓方, Pachtman A, 徐至展, 等. 软 X 射线透射光栅谱仪用于激光等离子体辐射特性研究[J]. 中国激光, 1991, **18**(3):186-191. (Wang Xiaofang, Pachtman A, Xu Zhizhan, et al. Laser plasma X-ray emission studies using an imaging transmission grating spectrometer. *Chinese Journal of Lasers*, 1991, **18**(3):186-191)

[4] Fill E, Stephan K F, Predehl P, et al. Transmission grating spectroscopy in the 10 keV range[J]. *Rev Sci Instrum*, 1999, **70**(6):2597-2600.

[5] Eagleton R T, James S F. Transmission grating streaked spectrometer for the diagnosis of soft X-ray emission from ultrahigh intensity laser heated targets[J]. *Rev Sci Instrum*, 2004, **75**(10):3969-3973.

[6] 曹磊峰. 量子点阵光栅: 中国, CN200410081499. X [P]. 2005-07-27. (Cao Leifeng. Quantum-dot-array diffraction grating; China, CN200410081499. X. 2005-07-27)

[7] Cao Leifeng, Förster E, Fuhrmann A, et al. Single order X-ray diffraction with binary sinusoidal transmission grating[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, **90**:053501.

[8] Wang Chuanke, Kuang Longyu, Wang Zhebin, et al. Characterization of the diffraction properties of quantum-dot-array diffraction grating [J]. *Rev Sci Instrum*, 2007, **78**:053503.

[9] Wang Chuanke, Kuang Longyu, Wang Zhebin, et al. Phase-type quantum-dot-array diffraction grating[J]. *Rev Sci Instrum*, 2008, **79**: 123502.

Measurement of diffraction properties of photon  
sieves applied to spectroscopy for soft X-ray

Wei Lai<sup>1,2</sup>, Cao Leifeng<sup>2</sup>, Fan Wei<sup>2</sup>, Zang Huaping<sup>2</sup>, Gao Yulin<sup>2</sup>, Zhu Xiaoli<sup>3</sup>,  
Xie Changqing<sup>3</sup>, Gu Yuqiu<sup>2</sup>, Zhang Baohan<sup>2</sup>, Wang Xiaofang<sup>1</sup>

- (1. CAS Key Laboratory of Basic Plasma Physics, Department of Modern Physics,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;  
2. National Key Laboratory for Laser Fusion, Research Center of Laser Fusion,  
CAEP, P. O. Box 919-986, Mianyang 621900, China;  
3. Key Laboratory of Nano-Fabrication and Novel Devices Integrated Technology,  
Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The principle of a photon sieve applied to soft X-ray spectroscopy is introduced, and the transmittance of the photon sieve is calculated. The diffraction pattern of the photon sieve is simulated and measured in visible light wave band. It is shown that the dispersive component has good single order diffraction properties, i. e. the third order and higher order diffraction can be suppressed effectively. The photon sieve applied to soft X-ray spectroscopy can realize self-sustaining easily compared with the conventional transmission grating and single-order diffraction grating designed before, and it might be employed widely for X-ray and extreme ultraviolet spectroscopic diagnoses.

**Key words:** soft X-ray; photon sieves; diffraction grating; diffraction properties