

文章编号: 0253-2239(2005)12-1611-5

# X 射线编码孔径成像中的一种高精度图像重构方法\*

胡家升<sup>1</sup> 程丽红<sup>1,2</sup> 曹磊峰<sup>3</sup> 董建军<sup>3</sup> 丁永坤<sup>3</sup>

1 大连理工大学电子与信息工程学院, 大连 116024  
2 大连海事大学数理系, 大连 116024  
3 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900

**摘要:** 在惯性约束聚变实验的过程诊断研究中,采用环形编码孔径成像技术可以同时获得高的空间分辨力和时间分辨力。获得高的空间分辨力的关键之一是如何准确地获得目标的点扩展函数。通常采用直接投影法。但这种方法忽略了 X 射线的衍射效应,因此限制了分辨力的提高。依据光的标量衍射理论,考虑 X 射线的衍射效应,导出了环形编码孔径的点扩展函数。并在此基础上制作了维纳滤波器。在激光等离子体重点实验室,用内直径为 250  $\mu\text{m}$ ,外直径为 260  $\mu\text{m}$  的环形孔径板,对惯性约束聚变(ICF)的过程进行成像实验,得到了靶标的编码图像。采用以衍射为基础的维纳滤波器进行重构,获得的重构图像明显的优于用直接投影法得到的结果。

**关键词:** X 射线光学; 图像处理; 图像编码及解码技术; X 射线成像; 维纳滤波器; 点扩展函数

中图分类号: O438 文献标识码: A

## Image Reconstruction with High Resolution in X-Ray Coded Aperture Imaging

Hu Jiasheng<sup>1</sup> Cheng Lihong<sup>1,2</sup> Cao Leifeng<sup>3</sup> Dong Jianjun<sup>3</sup> Ding Yongkun<sup>3</sup>

1 School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024  
2 Department of Mathematics and Physics, Dalian Maritime University, Dalian 116026  
3 Laser Fusion Research Center of China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900

**Abstracts:** In the processing diagnosis of the inertial confinement fusion (ICF), the ring coded aperture imaging technique is applied to gain high-space and time resolutions simultaneously. The key of acquiring high-spatial resolution is to obtain the point spread function of the imaging system correctly. The common method, firsthand projection method, neglects the X-ray diffraction effect, so the resolution of reconstructed image is decreased. Considering the X-ray diffraction effect the point spread function (PSF) of the ring coded aperture is derived from the scalar diffraction theory. And the Wiener filter is fabricated on the basis of the PSF. In National Key Laboratory of Laser Fusion, the imaging experiment on the diagnosis of ICF is completed using a ring coded aperture plate with inner diameter  $d_1=250 \mu\text{m}$  and outer diameter  $d_2=260 \mu\text{m}$ . The obtained coded image is processed by the Wiener filter where the diffractive effect is considered. The acquired reconstructive image by author's method is better than the image by the firsthand projection method.

**Key words:** X-ray optics; image processing; coded and decoded imaging technology; X-ray imaging; Wiener filter; point spread function

## 1 引 言

在惯性约束聚变(Inertial confinement fusion, ICF)研究中,内爆压缩区域成像诊断具有重要意义。通过内爆压缩区域成像,可以获得驱动辐射源

的对称性、均匀性,以及内爆压缩等离子体流体力学不稳定性增长等重要物理信息<sup>[1]</sup>。

内爆靶丸被压缩时,压缩区域具有很高的等离子体密度和温度,产生强烈的 X 射线辐射。需要采

\* 国家自然科学基金(19874010)资助课题。

作者简介: 胡家升(1941~),男,辽宁人,大连理工大学电子与信息学院教授,博士生导师。主要从事光电工程和图像处理等方面的研究。E-mail: jshu@dlut.edu.cn

收稿日期: 2005-01-05; 收到修改稿日期: 2005-05-06

用 X 射线成像技术记录内爆压缩区域的空间和时间特性,并且要求具有高的空间和时间分辨力,以便更深入的了解惯性约束聚变的过程。

常规的 X 光针孔成像虽然具有较高的分辨力,但集光立体角很小,对低通量 X 射线辐射成像不是十分有效<sup>[2~5]</sup>。采用掠入射反射成像技术,例如 Wolter 型 X 射线显微镜<sup>[6]</sup>、KB 或 KBA 型 X 射线显微镜等<sup>[7]</sup>可以大幅度地提高集光效率,可望获得高分辨、高信噪比的 X 射线图像,但这类装置技术难度较大,制作成本也很高。

采用孔径编码成像方法不仅可以获得较高的能量,而且还能保持单针孔的高分辨力,结构简单,成本较低,是一种可取的方法。

在 X 光编码孔径成像中,采用环形编码孔径<sup>[8]</sup>。目前所用的重构方法是利用直接投影法得到的点扩展函数来重构图像。由于忽略了衍射效应,分辨力较低,所以重构效果不好。本文基于标量衍射理论,考虑 X 射线的衍射效应,推导出了环形编码孔径的点扩展函数(Point spread function, PSF),制作维纳(Wiener)滤波器,对编码图像进行了重构处理,得到了高分辨力的重构像。采用直接投影法求点扩展函数<sup>[9]</sup>,同样采用维纳滤波的方法来重构图像。两厢对比可以明显地看出,采用以衍射为基础的点扩展函数来重构图像,得到的结果明显优于用直接投影法重构的图像。

## 2 图像编码原理

环形编码孔径成像是一种两步成像过程:第一步是目标信息获取和编码过程,利用编码孔径收集目标的信息。第二步是解码过程,对采集到的图像信息进行滤波和重建,以便获得高分辨力的可视目标像。图 1 表明了环形编码孔径成像的第一步,即目标信息获取和编码过程。

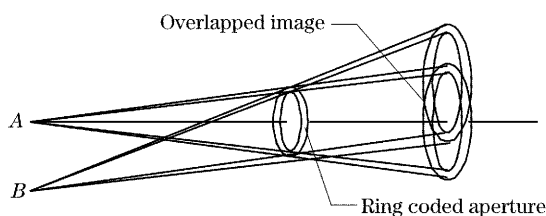


图 1 环形编码孔径成像原理图

Fig. 1 Scheme of ring coded aperture imaging

设目标函数为  $o(x, y)$ ,  $h(x, y)$  为环形编码孔径系统的点扩展函数,  $n(x, y)$  为系统的无关噪声函数,则编码孔径所形成的像函数  $i(x, y)$  可以用一个

卷积积分来描述为

$$i(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x', y') h(x, y, x', y') dx' dy' + n(x, y), \quad (1)$$

上式也可写成

$$i(x, y) = o(x, y) * h(x, y) + n(x, y), \quad (2)$$

式中  $*$  为卷积符号。对上式进行傅里叶变换,可得频谱分布表达式

$$I(u, v) = O(u, v) H(u, v) + N(u, v), \quad (3)$$

式中  $I(u, v)$ ,  $O(u, v)$  分别为图像和目标的频谱,  $H(u, v)$  为环形编码孔径的调制传递函数,它是点扩展函数  $h(x, y)$  的傅里叶变换。

为了得到目标的真实空间(二维或三维)分布,需要对接收平面上得到的编码图像(实际上是重叠像)进行必要的解码处理,即需要利用光学或数字图像处理技术对编码图像进行恢复和重构。其任务就是从已知的编码图像中,根据系统的传递函数,噪声等某些先验知识和信息,对真实目标作出最佳估值。主要图像恢复方法是:先采用数字图像处理技术对编码图像进行去噪,然后利用该系统的点扩展函数制作维纳滤波器,对图像进行解码,从而得到重构图像。

首先对所获得的 X 光编码图像做快速傅里叶变换(FFT),得到该重叠像的频谱分布。关于该系统的点扩展函数,最常采用的方法是直接投影法,即根据点目标通过环孔成像,利用投影关系求出点扩展函数。这种方法简单易行,但由于忽略了衍射效应,精度不够高,降低了重构图像的分辨力。另一种方法是根据光的标量衍射理论,在考虑衍射效应的情况下推导出点扩展函数。这种方法虽然数学推导比较复杂,实现起来比较困难,但是由于考虑了光的衍射效应,得到的点扩展函数精度很高,可提高重构图像的分辨力。本文根据光的标量衍射理论,推导出了环形编码孔径的点扩展函数,并在此基础上制作了维纳滤波器来重构图像,得到高分辨力目标图像。

## 3 由标量衍射理论推导编码孔径的点扩展函数

在图 2 中,点光源 Q(球面波中心)位于坐标原点。衍射屏  $S_0$  上的直角坐标为  $x_0, y_0$ , 中心有一个环形编码孔径。观察屏 S 上的直角坐标为  $(x, y)$ , 在它上面观察到的是编码孔径的点扩展函数。观察屏和衍射屏在球面波中心的同一侧,点光源 Q 到屏  $S_0$  的距离为  $L$ , 屏  $S_0$  与屏 S 之间的距离为  $Z$ 。

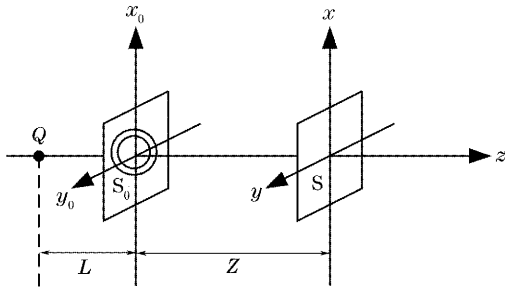


图 2 菲涅耳衍射的光路图

Fig. 2 Sketch of Fresnel diffraction

由位于光轴上的点光源  $Q$  发出的光是发散的球面波,在到达编码孔径的前表面时的复振幅分布为

$$U_0(x_0, y_0) = \frac{a_0}{L} \exp(jkL) \exp\left[\frac{jk(x_0^2 + y_0^2)}{2L}\right], \quad (4)$$

式中  $a_0$  为球面波前距离球心单位距离处的振幅。球面波经过编码孔径在其后表面上的复振幅分布为

$$U_\Sigma(x_0, y_0) = U_0(x_0, y_0)t(x_0, y_0),$$

其中  $t(x_0, y_0)$  为编码孔径的透过率函数。如果设

$$C = \exp\left[\frac{jk(x_0^2 + y_0^2)}{2L}\right],$$

$$D = \exp\left\{\frac{jk[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]}{2Z}\right\},$$

则由菲涅耳衍射公式可得出成像面上的复振幅分布为

$$U(x, y) = \frac{a_0}{j\lambda LZ} \exp[jk(L + Z)] \times \iint_{-\infty}^{\infty} CDt(x_0, y_0) dx_0 dy_0. \quad (5)$$

对于非相干成像系统,有意义的量是光强的点扩展函数。由于  $\exp(jkL)$  和  $\exp(jkZ)$  为常数相位因子,因此可得出用标量衍射理论计算出的该系统的点扩展函数表达式为

$$f_{\text{PSF}} = \left(\frac{a_0}{j\lambda LZ}\right)^2 \left| \iint_{-\infty}^{\infty} CDt(x_0, y_0) dx_0 dy_0 \right|^2. \quad (6)$$

由于研制的硬件是环形编码孔径 X 射线成像系统,因此着重讨论环形编码孔径的点扩展函数。圆孔的透过率函数为

$$t(x_0, y_0) = \text{circ}\left[\frac{(x_0^2 + y_0^2)^{1/2}}{R}\right] = \begin{cases} 1, & 0 \leq (x_0^2 + y_0^2)^{1/2} \leq R \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $R$  为圆孔的半径。成像面上的复振幅分布为

$$U(x, y) = \frac{a_0}{j\lambda LZ} \exp(jkL) \exp(jkZ) \iint_{\Sigma} CD dx_0 dy_0, \quad (8)$$

式中  $\Sigma$  代表编码孔径的面积。在  $(x_0, y_0)$  和  $(x, y)$  平面分别取极坐标  $(\rho_0, \phi_0)$  和  $(\rho, \phi)$ , 利用贝塞尔函数的性质和分部积分法可求出菲涅耳圆孔衍射复振幅的级数表示为

$$U(\rho, \phi) = 2\pi E \frac{j u}{k} \exp\left(\frac{jk}{2F} R^2\right) \times \sum_{n=1}^{\infty} \left(-\frac{jk}{2F} R^2\right)^n \frac{2^n J_n(vR)}{(vR)^n}, \quad (9)$$

其中

$$E = \frac{a_0}{j\lambda LZ} \exp\left[jk\left(L + Z + \frac{\rho^2}{2Z}\right)\right],$$

$$F = \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{Z}\right)^{-1}, \quad v = \frac{k\rho}{Z}.$$

设环形编码孔径的两圆半径分别为  $r_1$  和  $r_2$  ( $r_1 \geq r_2$ ), 根据巴比涅原理得到振幅解析表达式为

$$U(\rho, \phi) = 2\pi E \frac{jF}{k} B_1 \exp\left(\frac{jk}{2F} r_1^2 + \beta_1\right) - 2\pi E \frac{jF}{k} B_2 \exp\left(\frac{jk}{2F} r_2^2 + \beta_2\right), \quad (10)$$

$B_1$  和  $\beta_1$  分别是复数  $\sum_{n=1}^{\infty} \left(-\frac{jk}{2F} r_1^2\right)^n \frac{2^n J_n(vr_1)}{(vr_1)^n}$  的模与复角,  $B_2$  和  $\beta_2$  分别是复数  $\sum_{n=1}^{\infty} \left(-\frac{jk}{2F} r_2^2\right)^n \frac{2^n J_n(vr_2)}{(vr_2)^n}$  的模与复角。若令

$$B \exp(j\beta) = B_1 \exp\left(\frac{jk}{2F} r_1^2 + \beta_1\right) - B_2 \exp\left(\frac{jk}{2F} r_2^2 + \beta_2\right),$$

则振幅为

$$U(\rho, \phi) = 2\pi E \frac{jF}{k} B \exp(j\beta), \quad (11)$$

因此环形编码孔径的点扩展函数为

$$h(\rho, \phi) = B^2 \left(\frac{a_0}{L + Z}\right)^2. \quad (12)$$

## 4 X 光环孔编码成像实验

激光引爆的惯性约束聚变的过程诊断的目的在于通过等离子体辐射和聚变反应产物的特性测量,揭示靶标等离子体的状态与行为,使人们能更深入的了解激光能量吸收机制及其规律性,从而为激光与靶标最佳耦合设计提供依据。目前用得最多的方法是内爆的方法,其基本概念是,被压缩的靶芯特征畸变将反映靶球表面通量分布的扰动。靶丸内通常充有高压气体,被压缩的气体在靶壳“迟滞”期将产生 1~2 keV 的电子等离子体温度和 3~5 keV 的离子等离子体温度。这时,靶芯内的等离子体强烈的发出 2~

4 keV 的 X 射线辐射,这些辐射将被用于相应的 X 射线成像诊断。为了有助于更全面的内爆诊断,人们还经常在靶丸内充一些示踪气体(如 Ar)。

靶芯辐射出来的 X 射线,将首先要穿过被压缩的靶壳和辐射烧蚀形成的“冕区”,从而部分的被吸收。用来做成像诊断用的 X 射线辐射因此体现了弱光辐射的特征。另外,考虑到需要与其它的背景 X 射线(它们辐射的 X 射线波长往往较长)相区分,人们还必须在探测器前加相应的滤光片,进一步减弱了成像所用的辐射通量。这种情况下利用编码成像设备或者类似于沃耳特(Wolter)显微镜一类的掠入射反射装置可以获得与单针孔成像技术相比信噪比好得多的图像。而编码孔径成像装置的好处是具有简单得多的几何图样,同时更易于与时间分辨记录探测器进

行配接。

成像系统是时间积分的环形编码孔径显微镜。其中的关键部件是委托中国科学院高能物理研究所 LIGA 站制作的以聚酰亚胺为基底的金质环孔。环孔厚度  $10\ \mu\text{m}$ ,基底厚度约为  $7\ \mu\text{m}$ 。环孔贴于显微镜的针孔头上。为了保护环孔,在环孔的前面加了  $5\ \mu\text{m}$  的铝(Al)膜。

采用精细的网格作为靶目标。网格材料为 Au,厚度为  $3\ \mu\text{m}$ 。底衬材料为聚酰亚胺,厚度为  $5\ \mu\text{m}$ 。把金膜制作的网格结构贴在聚酰亚胺膜上。金膜网格的边长、间隙均为  $10\ \mu\text{m}$ ,如图 3(a)所示。物距 120 mm,像距 890 mm,得到了如图 3(b)所示的编码图像。然后用分辨力为  $945\ \text{d/cm}$ (2400 dpi)的扫描仪把图像输入到计算机中进行恢复和重构处理。

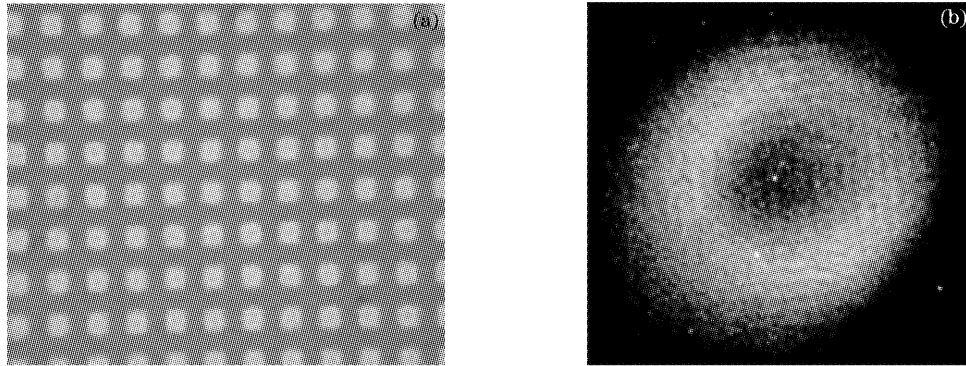


图 3 (a) 靶目标, (b) 编码像

Fig. 3 (a) The target, (b) coded image

曾经用直接投影法求得环形编码孔径的点扩展函数,用它制作维纳滤波器来重构靶标的重叠像<sup>[6]</sup>。为了与采用衍射效应得到的处理结果相比较,先利用直接投影法求得点扩展函数,而后制作维纳滤波器来

处理图 3(b)的编码图像。图 4(a)是用这种方法得到的环形编码孔径的点扩展函数,图 4(b)是用维纳滤波的方法得到的重构图像,由图可以隐约地看出靶目标的网格。

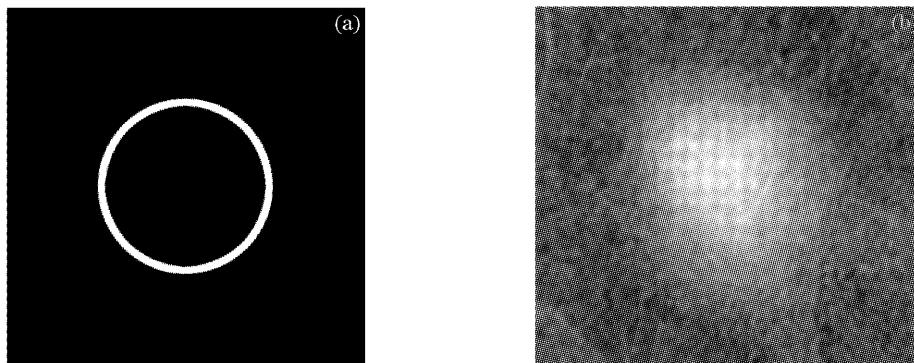


图 4 用直接投影法处理的结果。(a) 点扩展函数, (b) 解码图像

Fig. 4 The result obtained by firsthand projection method. (a) The point spread function, (b) the decoded image

基于标量衍射理论,考虑 X 射线的衍射效应,利用积分法导出了菲涅耳衍射的点扩展函数。再用这样方法得出的点扩展函数表达式来制作用以重构

编码像的维纳滤波器。图 5(a)是考虑衍射效应得出的点扩展函数图样,由图可看出边缘的衍射效应。图 5(b)是用该点扩展函数制作维纳滤波器,对编码

图像解码和重构后得到的复原图像,由该图可以清楚地看出靶标的网格。比较图 4(b)和图 5(b)可以

看出:考虑光的衍射效应得到的处理结果明显地优于直接投影法得到的处理结果。

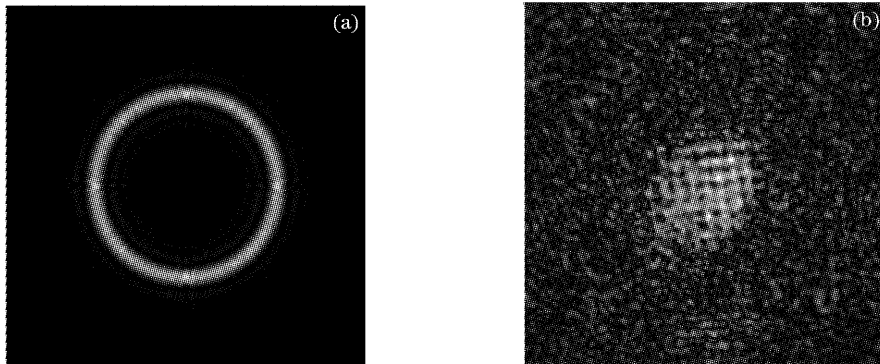


图 5 考虑衍射效应所获得的结果。(a) 点扩展函数, (b) 解码图像

Fig. 5 The obtained result considering diffraction effect. (a) The point spread function, (b) the decoded image

## 5 结 论

X 光波段的环形编码孔径成像技术既保留了单针孔成像的高分辨率,又具有较高的集光效率,况且成本又比较低,对于 X 光波段来说不失为一种行之有效的成像方法。

采用标量衍射理论,考虑光的衍射效应来计算点扩展函数,虽然数学表达稍许复杂一些,但精度高。用这种方法得到了至今未见报道的高分辨率的重构图像,图像的分辨力明显地高于用直接投影法得到的结果。

## 参 考 文 献

- 1 Cao Leifeng, Zheng Zhijian, Ding Yongkun *et al.*. Investigation of X-ray ring aperture coded imaging technique[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(8): 764~768 (in Chinese)  
曹磊峰,郑志坚,丁永坤等. X 光环孔编码成像技术研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(8): 764~768
- 2 D. Ress, D. R. Ciarlo, J. E. Stewart *et al.*. A ring coded aperture microscope for high-resolution imaging of high-energy X-rays[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(10): 5086~5088
- 3 Hu Jiasheng, Dong Yuzhi, Zhao Baoqing *et al.*. The imaging and processing technique of X-ray coded aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 1989, **9**(7): 623~629 (in Chinese)
- 4 Sun Ping, Xie Jinghui, Zhou Yuanlin. Optical tomography based on Fresnel zone plate scanning holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 110~114 (in Chinese)  
孙萍,谢敬辉,周元林. 基于菲涅耳波带板扫描全息术的光学层析成像[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 110~114
- 5 Sun Ping, Xie Jinghui, Gao Yan *et al.*. Imaging through highly scattering media using Fresnel zone plate scanning holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 619~622 (in Chinese)  
孙萍,谢敬辉,高艳等. 菲涅耳波带板扫描全息术透过高散射介质成像[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 619~622
- 6 Richard Sauneuf, Jean-Michel Dalmasso, Thierry Jalinaud *et al.*. Large-field high-resolution X-ray microscope for studying laser plasmas[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, **68**(9): 3412~3420
- 7 R. J. Ellis, J. E. Trebes, D. W. Phillion *et al.*. Four-frame gated Wolter X-ray microscope[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1990, **61**(10): 2759~2761
- 8 Cheng Lihong, Tian Xiaodong, Xie Cun. Recoded contrast of difform coded aperture in photoelectricity imaging[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(8): 947~950 (in Chinese)  
程丽红,田晓东,谢存. 光电成像中不同形状编码孔径的解码比较[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 947~950
- 9 Hu Jiasheng, Cheng Lihong, Xie Cun *et al.*. Experimental research of ring-coded aperture microscope (RAM) in X-ray imaging technology[J]. *J. Dalian University of Technology*, 2000, **40**(Suppl.): s104~s108 (in Chinese)  
胡家升,程丽红,谢存等. X 光成像中环形编码孔径显微镜实验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2000, **40**(增刊): s104~s108