

文章编号: 1007-4627(2019)02-0218-06

基于微通道板的二维位置灵敏像探测器 X 射线成像研究

李卫敏¹, 马占文¹, 彭少华¹, 韩超¹, 白晓厚¹, 姚泽恩^{1,2,†}

(1. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000;

2. 兰州大学中子应用技术教育部工程研究中心, 兰州 730000)

摘要: 研制了一套基于微通道板的二维位置灵敏像探测器, 开展了 X 射线成像实验研究。对游标卡尺构建的狭缝成像显示, 狭缝图像清晰可见, 图像的边缘分辨率能达到约 500 μm 。对组合样品进行了成像测试, 在 X 射线机靶流为 1 mA 的条件下, 像探测器系统在 1 ms 内即可实现成像, 且成像结果清晰。采用中值滤波与锐化、盲反卷积、维纳滤波等方法, 对游标卡尺的成像结果进行了初步的图像处理。结果显示, 三种方法都能改善图像的质量, 其中维纳滤波法效果最优, 相比原图边缘分辨率提高了约 7%。

关键词: 微通道板; 像探测器; X 射线成像; 空间分辨

中图分类号: TL816^{+.1} **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.02.218

1 引言

X 射线成像在工业、医学、国土安全等领域有着重要的应用。常见的 X 射线成像探测器有胶片探测器、基于图像传感器(电荷耦合器件 CCD, 互补型氧化物金属半导体 CMOS)的探测器以及基于 TFT 阵列的平板探测器等, 其中胶片成像是最早使用也是应用最广的 X 射线成像方法^[1-4]。胶片成像具有图像分辨率较好、价格低廉等优点, 但是胶片成像无法实现数字成像且 X 射线利用率较低。采用新型固态探测器可以实现 X 射线数字成像, 其中基于 CCD 相机和闪烁体的探测器空间分辨可以达到约 100 μm , 成像时间约 10 s^[5]; 基于 CMOS 的探测器可以实现 200 μm 的空间分辨率, 成像时间约 30 ms^[6]。

微通道板(MCP)是一种具有高二维位置分辨的电子倍增器件, 其具有面积大、成本相对较低、探测效率高、信噪比高等优点^[7-8]。20 世纪 70 年代, Parkes 等^[9]提出了将微通道板用于 X 射线成像的构想。随后, Yin 等^[10]将碘化铯放置于微通道板前作为光电阴极并进行了 X 射线成像。2003 年, Shikhaliev 等^[11-12]发现 X 射线从微通道板的侧面入射也能实现成像, 但由于微通道板厚度有限(1 mm 左右), 这类型探测器在工作时需要不断移动样品才能实现成像, 导致成像时间较长而且无法对较大的样品进行成

像^[12]。2014 年, 美国阿贡国家实验室研制出了面积为 400 cm^2 (20 cm \times 20 cm)的微通道板, 并以此制成了较大面积的像探测器^[13]。Blase 等^[14]于 2015 年研究了微通道板对电子和 X 射线的探测效率, 结果表明微通道板对低能 X 射线的探测效率约为 0.3%^[15]。此外, Tremsin 等^[16]研制了对热中子敏感的微通道板并广泛应用于热中子照相。国内研制生产 MCP 的厂家主要是南京北方夜视集团公司, 2010 年起, 清华大学、长春理工大学以及北方夜视达成合作开展 MCP 的研究, 成功研制出了掺杂 3 mol% Gd_2O_3 的中子敏感 MCP, 清华大学将此类 MCP 用于热中子成像实验和 X 射线成像实验, 结果显示 MCP 探测器能实现 33% 的热中子探测效率, 热中子成像空间分辨率达到 170 μm , 对于 15 kV 的 X 射线具有 65 μm FWHM 的位置分辨率^[17-20]。

本文介绍兰州大学研制的一套基于 MCP 的二维位置灵敏像探测器以及进行低能 X 射线成像实验的情况, 同时给出对成像结果的初步处理, 为将来发展大面积高效率 X 射线像探测器积累了经验。

2 基于 MCP 的像探测器的结构及原理

如图 1 所示, 用于 X 射线成像的微通道板二维像探测器由真空室、微通道板(MCP)、荧光屏(SCR)、反射镜、CCD 相机等组成。其中, 组成 MCP 的各元素及其

收稿日期: 2018-09-15; 修改日期: 2018-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11375077); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(lzujbky-2018-bt09); 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ40861)

作者简介: 李卫敏(1994-), 女, 山西晋中人, 硕士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: liwm17@lzu.edu.cn

† 通信作者: 姚泽恩, E-mail: zeyao@lzu.edu.cn.

质量分数分别为 25.8% O, 18.2% Si, 4.2% K, 47.8% Pb, 1.8% Rb, 1.3% Ba, MCP 微孔直径为 25 μm , 壁厚 6 μm , 有效工作区域直径为 75 mm, 厚度为 1 mm, 为了获得更高的增益, 将两块 MCP 组合在一起。CCD 相机的像素参数为 1344 \times 1024, 像元尺寸为 6.45 $\mu\text{m} \times$ 6.45 μm , 响应光谱范围为 300~1000 nm。由于 MCP 需工作在高真空环境, 因此真空室的真空度需保持在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Pa 量级。

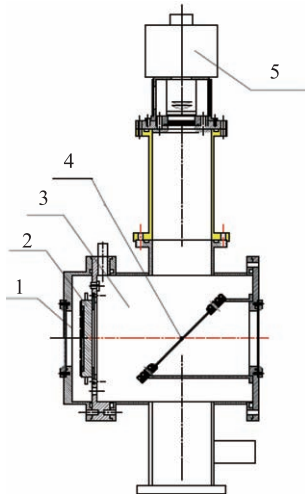


图 1 (在线彩图) 微通道板 X 射线成像像探测器示意图
1-入射窗; 2-MCP+SCR; 3-真空室; 4-反射镜; 5-CCD 相机系统。

像探测器的工作原理为: X 射线入射到 MCP 中发生光电效应、康普顿散射以及相干散射等, 产生的光电子、俄歇电子和康普顿电子等在微孔中倍增, 倍增后输出的电子轰击荧光屏发光, 光子经反射镜反射进入 CCD 相机形成图像信号, 图像信号传输到计算机并被记录处理。

3 X 射线成像实验研究

3.1 实验布局及条件

实验布局示意图如图 2 所示。其中 X 射线机采用瑞士 COMETAG 公司生产的 MXR 225/22 型 X 射线管, X 射线管的主要参数见表 1 所列, 本实验在 X 射线管管

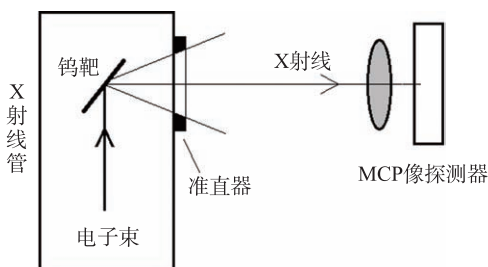


图 2 成像实验布置示意图

电压为 120 kV, 靶流为 1 mA 的条件下进行。X 射线管靶点到样品的距离为 42 cm, 样品紧贴像探测器入射窗放置, 样品距离微通道板 26 mm。

表 1 X 射线管技术参数

参数名称	参数值
管电压/kV	30~225
管电流/mA	0.1~13
焦点尺寸/mm	1.0(小焦点)
准直器张角/($^\circ$)	40

3.2 狭缝成像结果及讨论

利用游标卡尺构造了 100 μm 的狭缝并对其进行了成像测试, 曝光 20 ms 后得到的游标卡尺图像如图 3 中所示。由图可以看出, 100 μm 的狭缝和游标卡尺外边缘清晰可见。为了确定图像的边缘分辨率, 对如图 3 中方框圈出的区域沿水平方向进行了扫描得到图像的灰度值, 归一后的灰度分布函数如图 4 所示, 通常为边缘分布函数^[21], 边缘分布函数的一阶导数 (dI/dx) 随位置 x 的分布通常被称为线扩散函数, 线扩散函数的半高宽一

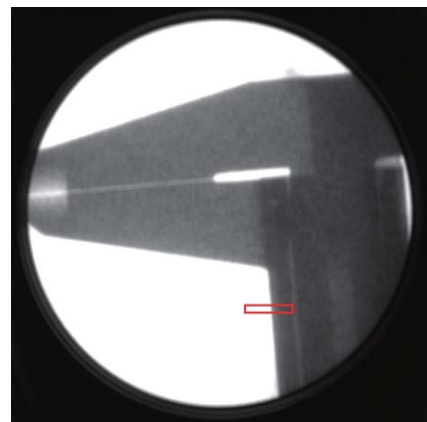


图 3 (在线彩图) 游标卡尺的 X 射线成像

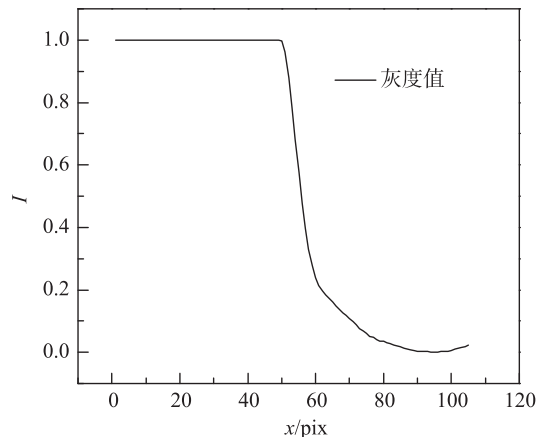


图 4 游标卡尺边缘分布函数

般被定义为图像的边缘分辨率^[21]。根据图 4 数据计算得到的线扩散函数如图 5 所示, 由此得到的边缘分辨率约为 $517.10 \mu\text{m}$, 即成像系统的空间分辨率约 $500 \mu\text{m}$ 。

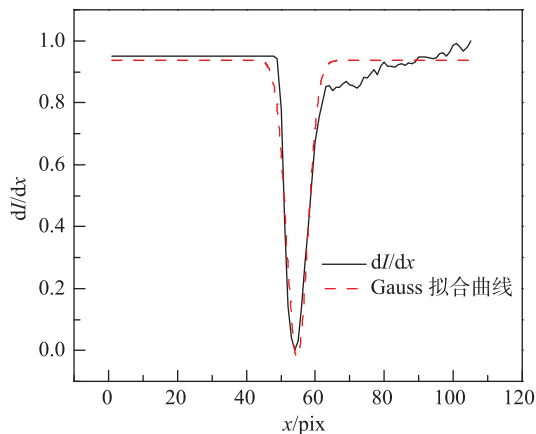


图 5 (在线彩图) 游标卡尺边缘线扩散函数

在狭缝位置沿垂直方向对图像的灰度值进行扫描, 归一化后的图像的灰度值 (I) 随位置 (x) 的分布及其高斯拟合曲线如图 6 所示。狭缝图像宽度可近似用拟合后分布曲线的半高宽描述, 拟合后分布曲线的半高宽约为 10.36 pix , 由系统成像比例尺 $72.22 \mu\text{m}/\text{pix}$ 可得, 狭缝图像宽度为 $748.19 \mu\text{m}$, 比狭缝的实际尺寸大了很多, 图像出现了失真。

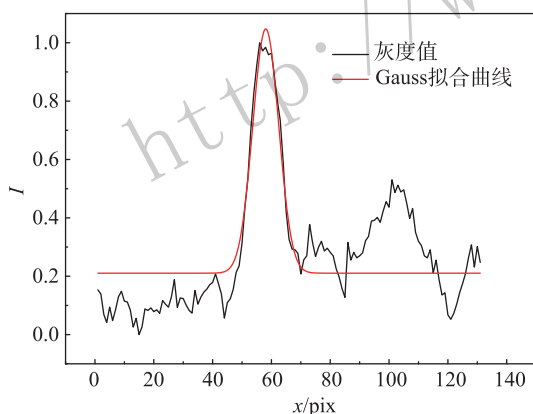


图 6 (在线彩图) 游标卡尺狭缝图像灰度随位置的分布

3.3 不同材料组合样品成像结果及讨论

对图 7 所示的不同材料组合样品进行了成像测试, 样品由聚四氟乙烯、不锈钢螺钉、铝等组成。其中, 聚四氟乙烯圆柱样品厚 12.3 mm , 直径 36.2 mm , 中心圆孔直径 6.1 mm ; 聚四氟乙烯长方体样品尺寸为 51 mm (长) \times 17 mm (宽) \times 10 mm (高); 不锈钢螺钉直径 7.7 mm , 螺纹间距为 1 mm ; 铝样品被加工为圆柱形阶梯状, 最厚处 10 mm , 最薄处 1.25 mm , 边缘一圈厚度为 5 mm , 中心孔径为 2 mm 。

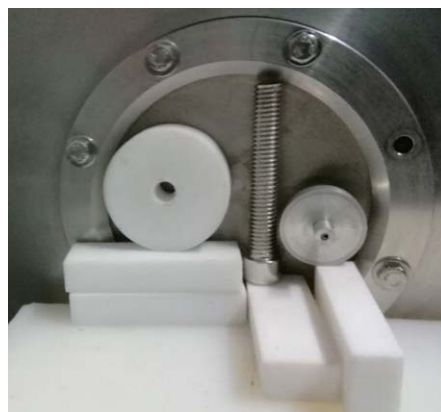


图 7 (在线彩图) 组合样品及成像实验布置

图 8 是曝光 20 ms 后的成像结果。铝和聚四氟乙烯样品图像显示, 随厚度的增加, 图像灰度值减小, 即对厚度有较好的分辨。另外, 不锈钢螺钉螺纹、样品圆孔及样品的边缘清晰, 显示了较好的二维空间分辨。

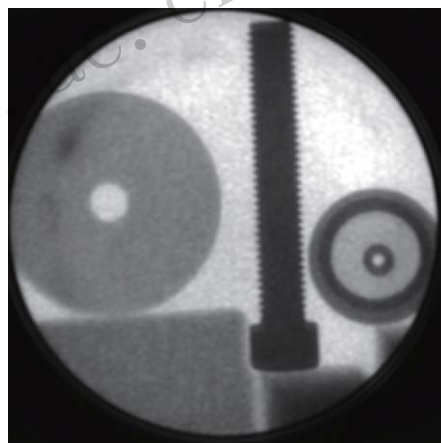


图 8 (在线彩图) 组合样品 X 射线成像

4 图像处理及重建方法初步研究

由成像比例尺 $72.22 \mu\text{m}/\text{pix}$ 可以得出光学系统成像的极限分辨率约为 $140 \mu\text{m}$, 而 X 射线成像结果显示图像的边缘分辨率约为 $500 \mu\text{m}$, 与光学系统的极限分辨率相差较大。影响边缘分辨率的因素可能有以下几点^[22-24]: (1) 微通道板出射电子云发散; (2) 荧光屏光发散; (3) CCD 相机离焦; (4) X 射线在样品上散射; (5) 实验中入射样品的 X 射线为放射状锥形束, 且靶点到样品的距离较短, X 射线束的平行度不太理想。前三个因素由设备条件决定, 无法完全消除其对图像分辨率的影响。利用 Geant4 对散射和不平行度对成像的影响进行了模拟计算, 结果表明这两个因素对成像结果影响很小。为了改善图像的质量, 采用中值滤波与锐化等图像处理方法对实验成像结果进行处理。

4.1 图像的中值滤波与锐化处理

中值滤波法是基于排序统计理论的一种能有效抑制噪声的非线性信号处理技术。中值滤波法的基本原理是把数字图像或数字序列中一点的值用该点的一个邻域中

各点值的中值代替, 让周围的像素值接近真实值, 从而消除孤立的噪声点, 以提高图像边缘的分辨率。但中值滤波法在去噪声的同时, 会引起图像的不清晰, 因此需要同时对图像进行锐化处理。

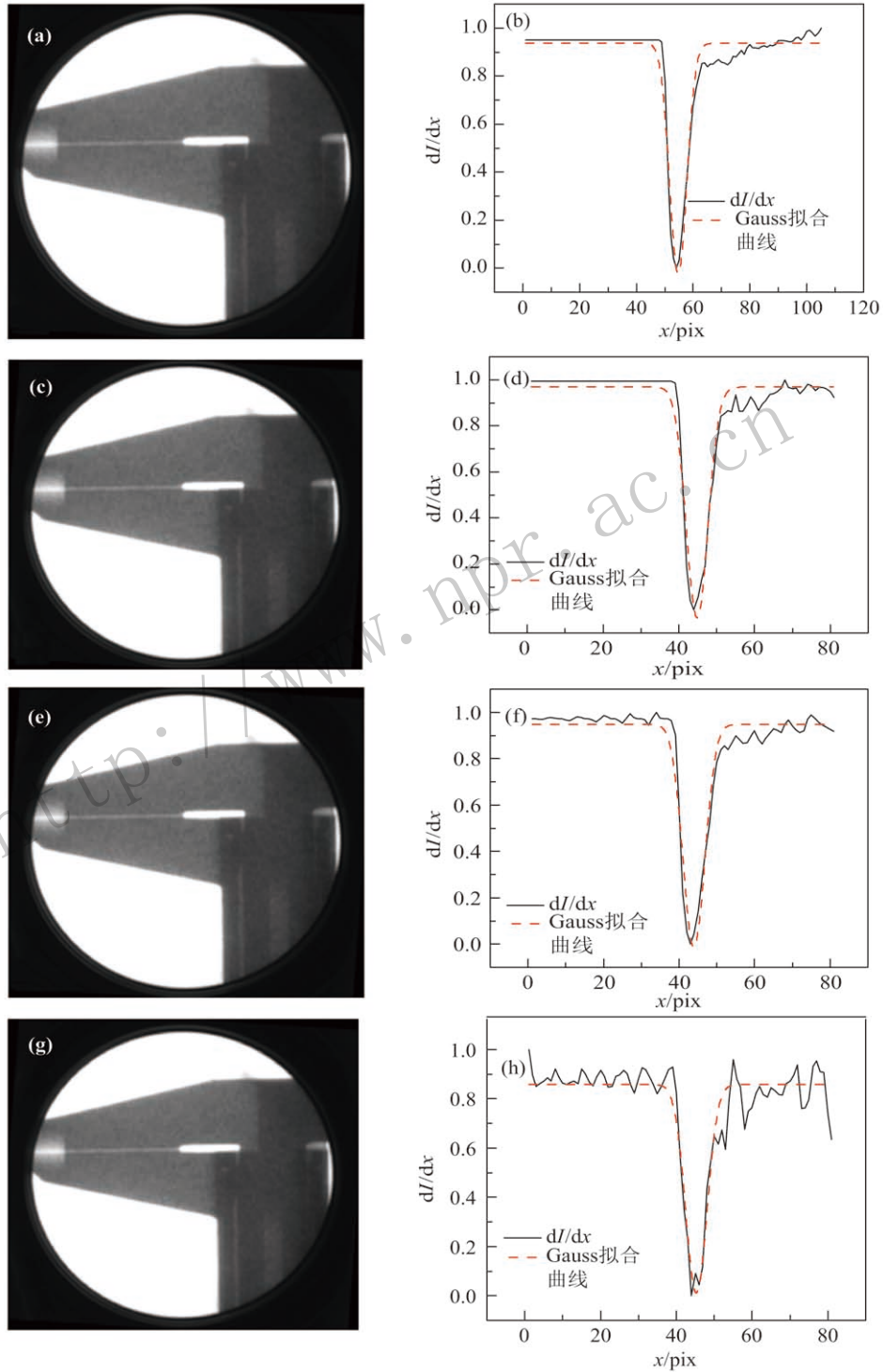


图 9 (在线彩图) 原始图像和处理图像及图像边缘线扩散函数

(a)原始图像; (b)原始图像边缘线扩散函数; (c)中值滤波和锐化后图像; (d)中值滤波和锐化后图像边缘线扩散函数; (e)盲反卷积复原图像; (f)盲反卷积复原图像边缘线扩散函数; (g)维纳滤波复原图像; (h)维纳滤波复原图像边缘线扩散函数。

针对图 3 所示游标卡尺的 X 射线图像, 采用 3×3 的窗口对原图 9(a) 进行中值滤波, 并将滤波后的图像进行锐化处理, 处理后图像见图 9(c) 所示。采用与上节相同的方法得到了相同边缘位置的线扩散函数, 结果见图 9(d) 中所示。由图可得边缘分辨率约为 $490.64 \mu\text{m}$, 和原图像的 $517.10 \mu\text{m}$ 相比, 边缘分辨率提高了约 5%。说明合适的中值滤波加锐化处理, 能有效去除噪声并优化图像质量。

4.2 基于盲反卷积的图像复原

在无法得到精确的退化点扩散函数 (PSF) 条件下, 可以通过观察图像以某种方式抽出退化信息, 采用盲反卷积方法来进行图像复原^[25-26]。传统的图像盲反卷积算法采用最小均方误差作为图像复原的评判标准, 但它很少考虑人类视觉效果。本研究使用光学成像系统中最常见的高斯退化函数作为图像的 PSF 对图像进行了重建。构建的高斯退化函数形式为

$$h(x, y) = \begin{cases} P e^{-a(x^2+y^2)} & (x, y) \in T \\ 0 & \text{其它} \end{cases}, \quad (1)$$

其中: P 为归一化常数; a 是正常数; T 是 $h(x, y)$ 的支持域。设原始图像为 $g(x, y)$, 复原后的图像为 $f(x, y)$, 则两者的关系可用下列表达式描述:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y), \quad (2)$$

其中: “*” 表示卷积运算。将原始图像先进行傅里叶变换, 并利用构建的高斯退化函数进行反卷积即可得到复原后的图像。对图 3 所示图像进行盲反卷积处理, 结果如图 9(e) 所示。采用 4.1 中相同的方法得到了相同边缘位置的线扩散函数, 结果见图 9(f) 中所示。由图 9(f) 可得边缘分辨率约为 $494.06 \mu\text{m}$, 和原图像 $517.10 \mu\text{m}$ 相比, 边缘分辨率提高了约 4.5%。结果表明盲反卷积可以对图像进行复原, 并能有效改善图像质量。

4.3 维纳滤波对离焦模糊图像的复原

使用 CCD 相机进行图像的采集时需要人工调焦, 视差会导致调焦有误差, 这会不可避免地引起 CCD 离焦现象, 导致图像模糊。为了去除离焦现象导致的图像模糊, 本研究采用维纳滤波法对图像进行了复原处理^[27]。维纳滤波傅里叶变换可用下列方程描述:

$$F(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \tau} G(u, v), \quad (3)$$

其中: $G(u, v)$ 为原图像灰度数据的傅里叶变换; $H(u, v)$ 为探测器的调制传递函数; 由探测器点扩散

函数的傅里叶变换得到^[28]; $H^*(u, v)$ 是 $H(u, v)$ 的复数共轭; τ 为图像模糊信噪比的倒数; u, v 为横纵坐标。对 $F(u, v)$ 取傅里叶逆变换, 即可得在维纳滤波意义下的最佳图像估计 $f(x, y)$ 。

采用上述方法, 对图 3 所示图像进行维纳滤波, τ 值为 0.001, 结果如图 9(g) 所示。采用 4.1 节中相同的方法得到了相同边缘位置的线扩散函数如图 9(h) 所示。由图可得出维纳滤波后图像的边缘分辨率为 $481.18 \mu\text{m}$, 与原图相比提高了约 7%。

5 总结与展望

研制了一套基于 MCP 的二维位置灵敏像探测器, 并将其应用到了 X 射线成像研究, 对游标卡尺构建的狭缝测试结果显示, $100 \mu\text{m}$ 的狭缝和游标卡尺外边缘清晰可见, 图像的边缘分辨率能达到约 $500 \mu\text{m}$ 。为了改善图像质量, 采用中值滤波与锐化、盲反卷积和维纳滤波等方法对原始图像进行了初步的处理。结果显示, 采用三种方法处理后图像质量均有所改善, 其中维纳滤波法效果最优, 采用维纳滤波法处理后图像边缘分辨率提高了约 7%。目前虽然仅对基于 MCP 的二维位置灵敏像探测器进行了初步的 X 射线成像测试, 但测试结果证明基于 MCP 的二维位置灵敏像探测器具有实现高分辨 X 射线成像的潜力, 且效率高, 曝光时间短, 是一种 X 射线成像的新方式, 值得开展进一步细致的研究。

参考文献:

- [1] HOHEISEL M. *Nucl Instr and Meth A*, 2006, **563**(1): 215.
- [2] HEJAZI S, TRAUERNICHT D P. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1996: 440.
- [3] ANTONUK L E, BOUDRY J M, ELMOHRI Y, *et al. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1994, **2163**: 118.
- [4] QIAO W, YAN H M. *Optical Instruments*, 2007, **29**(5): 80.
- [5] YE Qing, GUO Zhiping, ZHENG Yuhong, *et al. Nuclear Technology*, 2000, **23**(2): 110. (in Chinese)
(叶青, 郭志平, 郑玉红, 等. *核技术*, 2000, **23**(2): 110.)
- [6] ZENTAI G. *Comparison of CMOS and a-Si Flat Panel Imagers for X-ray Imaging*[C]. *IEEE*, 2011: 194.
- [7] MOY J P. *Nucl Instr and Meth A*, 2000, **442**(1-3): 26.
- [8] GYS T. *Nucl Instr and Meth A*, 2015, **787**: 254.
- [9] PARKES W, GOTT R, POUNDS K A. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1970, **17**(3): 360.
- [10] YIN L I, TROMBKA J I, SELTZER S M. *Nucl Instr and Meth*, 1979, **158**: 175.
- [11] SHIKHALIEV P M, DUCOTE J L, XU T, *et al. IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2005, **52**(5): 1257-1262.
- [12] POLAD M, SHIKHALIEV, SABEE MOLLOI. *Nucl Instr and Meth A*, 2003, **510**(3): 401.

- [13] CRAVEN C, BENNIS D C, BOND J L, *et al.* *PoS*, 2015, **213**: 077.
- [14] BLASE R C, BENKE R R, COOKE C M, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2015, **62**(6): 3339.
- [15] BLASE R C, BENKE R R, PICKENS K S, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2018, **65**: 1.
- [16] TREMSIN A S. *Neutron News*, 2012, **23**(4): 35.
- [17] LU N, YANG Y, LV J, *et al.* *Physics Procedia*, 2012, **26**: 61.
- [18] PAN J, YANG Y, TIAN Y, *et al.* *Journal of Instrumentation*, 2013, **8**(01): 01015.
- [19] LU N, YANG Y, LV J, *et al.* *Physics Procedia*, 2012, **26**: 309.
- [20] TIAN Y, YANG Y G, PAN J S, *et al.* *Chinese Physics C*, 2014, **38**(8): 086003.
- [21] ROSSMANN K. *Radiology*, 1969, **93**(2): 257.
- [22] ZOU Yisong. *Electrical Vacuum Imaging Device and Theoretical Analysis*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1989: 230. (in Chinese)
(邹异松. 电真空成像器件及理论分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989: 230.)
- [23] DAN Tangren, TIAN Jingquan, GAO Yanjun, *et al.* *Chinese Journal of Luminescence*, 2002, **23**(06): 615. (in Chinese)
(但唐仁, 田景全, 高延军, 等. 发光学报, 2002, **23**(6): 615.)
- [24] LAPRADE B N, REINHART S T, WHEELER M, *et al.* *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1990, **1243**: 162.
- [25] SCHMELZBACH C, SCHERBAUM F, TRONICKE J, *et al.* *Journal of Applied Geophysics*, 2011, **75**(4): 615.
- [26] RUAN Qiuqi. *Digital Image Processing*[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)
(阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 2版. 电子工业出版社, 2007.)
- [27] CHEN J, BENESTY J, HUANG Y, *et al.* *IEEE Transactions on Audio Speech & Language Processing*, 2006, **14**(4): 1218.
- [28] MA Z W, LI W M, RAN J L, *et al.* *Journal of Instrumentation*, 2018, **13**(5): 05034.

Study on X-ray Radiography of the Image Detector Based on MCP

LI Weimin¹, MA Zhanwen¹, PENG Shaohua¹, HAN Chao¹, BAI Xiaohou¹, YAO Zeen^{1,2,†}
(1. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. Engineering Research Center for Neutron Application, Ministry of Education,
Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Developed a set of two-dimensional position sensitive detector based on micro-channel plate (MCP) and conducted a series of X-ray imaging tests. Image of Vernier-caliper proves our equipment has an edge resolution of about 500 μm . Imaging tests were carried out on the composite samples. When the X-ray machine's target flow was 1 mA, the clear imaging could be realized within 1 ms. Image rebuilding has also been adapted afterwards, median filtering combined with sharpen, blind deconvolution and Wiener filtering have been used respectively to reconstruct the original image of Vernier caliper. All of the three methods have a positive effect on image's quality but wiener filtering becomes the optimal method among those three which improves the edge resolution by 7%.

Key words: MCP; image detector; X-ray radiography; spatial discrimination

Received date: 15 Sep. 2018; **Revised date:** 13 Oct. 2018

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11375077); Fundamental Research Funds for Central Universities of China(lzujbky-2018-kb09); National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project of China (2013YQ40861)

† **Corresponding author:** YAO Zeen, E-mail: zeyao@lzu.edu.cn.