

影响 X 射线像增强器分辨率的因素分析

潘俊杰^{1,2}, 赵宝升¹, 赛小锋¹, 王俊锋¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:对采用双近贴聚焦成像结构的 MCP(Micro Channel Plate)-X 射线像增强器的工作原理与结构进行了分析,对影响其空间分辨率的主要因素进行了研究.影响 X 射线成像系统分辨率的因素主要有 X 射线源焦斑的大小和 X 射线像增强器自身的分辨率,而影响 X 射线像增强器分辨率的因素主要有 MCP 输出面到荧光屏之间的距离、MCP 输出面与荧光屏之间的电压差以及 MCP 自身的分辨率.通过对两种具有不同参量的 X 射线像增强器分辨率的理论计算及分辨率测试实验,将理论计算结果与测试实验结果对比,验证了分辨率计算公式及影响分辨率因素分析的正确性.

关键词:X 射线像增强器;空间分辨率;MCP

中图分类号:TN144

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2008)06-1116-3

0 引言

X 射线像增强器是一种将低照度的 X 射线图像转换为可见光图像的器件,被广泛用于医学 X 射线检查设备以及工业探伤设备等^[1].

近年来高分辨率的 X 射线像增强器被用在了电子组装质量检查领域.自动 X 射线检测技术(Automated X-Ray Inspection, AXI)就是这其中的典型代表. AXI 技术对 X 射线像增强器的空间分辨率提出了更高的要求.因此,分析影响 X 射线像增强器分辨率的因素,进而提高其分辨率,就变得非常必要.本文理论分析了影响 X 射线像增强器空间分辨率的主要因素,通过实验实测具有不同结构参量的 X 射线像增强器的空间分辨率,并将理论分析和实验结果进行了对比,得出了要提高 X 射线成像系统分辨率必须将像增强器及射线源综合考虑的结论.

1 MCP-X 射线像增强器结构及工作原理

MCP-X 射线像增强器具有简单的成像链,与传统的倒像式 X 射线像增强器相比具有体积小、结构简单、可成与物体等大小的正立像、分辨率高等优点,结构见图 1.

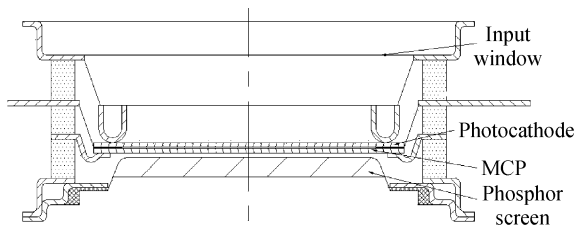


图 1 MCP-X 射线像增强器剖面结构

Fig. 1 Cross section of the X-ray image intensifier

MCP-X 射线像增强器成像原理^[1]是:X 射线图像透过输入窗入射到光电阴极上,光电阴极被 X 射线激发产生光电子,光电子入射进入 MCP 并被 MCP 倍增,倍增后的电子在加速电场的作用下打到荧光屏上产生光学图像.

本文实验所采用的是有效直径分别为 25 mm、75 mm 的 MCP-X 射线像增强器.

2 影响 X 射线成像系统分辨率的因素

影响 X 射线成像系统的分辨率有两个主要因素:X 射线像增强器自身的分辨率及 X 射线源焦斑的大小.

2.1 X 射线像增强器在理想射线源下分辨率的计算

在理想 X 射线源(源焦斑直径为零)下,对于 MCP-X 射线像增强器,其分辨率与以下几个部分的分辨率有关:第一近贴(光电阴极到 MCP 部分)、MCP、第二近贴(MCP 到荧光屏部分)、荧光屏.若像增强器总体分辨率为 D ,第一近贴分辨率为 R_1 ,第二近贴分辨率为 R_2 ,MCP 分辨率为 R_m ,荧光屏分辨率为 R_s ,则其总体分辨率满足公式^[2]

$$R^{-2} = R_1^{-2} + R_2^{-2} + R_m^{-2} + R_s^{-2} \quad (1)$$

式中

$$R_1 = 0.4L_1^{-1}(V_1/U_1)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$R_2 = 0.3L_2^{-1}(V_2/U_2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$R_m = 1000/\sqrt{3D} \quad (4)$$

式中 L_1 为光电阴极到 MCP 输入面的距离, V_1 为光电阴极与 MCP 间的电压差, U_1 为光电阴极发射电子的最可几初能量, L_2 为 MCP 到荧光屏输出面之间的距离, V_2 为 MCP 与荧光屏间的电压差, U_2 为 MCP 输出面电子出射的最可几初能量, D 为 MCP 相邻两条通道中心的间距.其中 MCP 分辨率与其

中心距 D 、长径比、斜切角、通道量子效率等有关,主要决定参量为 $D^{[3]}$.

由于荧光屏的分辨率 R_s 通常很高,因此对于整体的分辨率影响不大. 而对于第一近贴分辨率,由于光电阴极直接蒸镀在 MCP 输入面上 L_1 非常小,因此 R_1 很高,对整体的分辨率影响也不大. L_2 与 L_1 相比要大得多,因此 R_2 相对较小,是限制总体分辨率的瓶颈,不可忽略. 因此式(1)可简化为

$$R = R_2 R_m / \sqrt{R_2^2 + R_m^2} \quad (5)$$

由以上分析可知,对 X 射线像增强器的分辨率有重要影响的参量有:MCP 输出面到荧光屏之间的距离、MCP 输出面与荧光屏之间的电压差及 MCP 自身的分辨率.

MCP-X 射线像增强器(不考虑 MCP 的影响)光学传递函数^[4]为

$$\text{MTF} = \exp\left(\pi^2 * f^2 * L_2^2 * \frac{U_2}{9V_2}\right) \quad (6)$$

式中, f 为 MCP 输出面到荧光屏之间的空间分辨率,即为第二近贴的分辨率 R_2 .

本文所述的 $\Phi 25$ 高分辨率 X 射线像增强器 $L_2 = 1.0 \text{ mm}$, $U_2 = 2.5 \text{ eV}$, $V_2 = 4\ 500 \text{ V}$, 作为对比的 $\Phi 75$ X 射线像增强器 $L_2 = 2.0 \text{ mm}$, $U_2 = 2.5 \text{ eV}$, $V_2 = 5\ 000 \text{ V}$. 计算它们的光学传递函数图像如图 2.

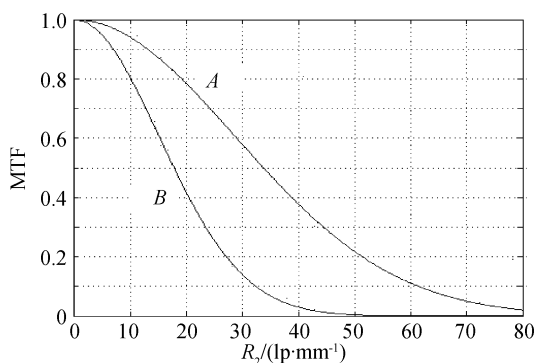


图 2 X 射线像增强器光学传递函数图像

Fig. 2 MTF of the X-ray image intensifier

曲线 A 为 $\Phi 25$ X 射线像增强器光学传递函数图像,曲线 B 为 $\Phi 75$ X 射线像增强器光学传递函数图像. 通常 $\text{MTF} = 0.1$ 时所对应的分辨率为其极限分辨率. 由上图可知, $\Phi 25$ X 射线像增强器第二近贴分辨率为 $R_2 = 61 \text{ lp/mm}$. $\Phi 75$ X 射线像增强器第二近贴分辨率为 $R_2 = 32 \text{ lp/mm}$.

$\Phi 25$ X 射线像增强器采用的 MCP 丝径间距 $D = 12.5 \mu\text{m}$, 由式(4)得 $\Phi 25$ X 射线像增强器 MCP 分辨率 $R_m = 46 \text{ lp/mm}$. $\Phi 75$ X 射线像增强器采用的 MCP 丝径间距 $D = 25 \mu\text{m}$, 由式(4)得 $\Phi 75$ X 射线像增强器 MCP 分辨率 $R_m = 23 \text{ lp/mm}$. 由公式(5)计算出在理想 X 射线源下 $\Phi 75$ X 射线像增强器与

$\Phi 25$ X 射线像增强器分辨率分别为 18.6 lp/mm 和 36.71 lp/mm .

2.2 X 射线源焦斑对分辨率的影响

测试 X 射线像增强器所用的 X 射线源对分辨率的最终结果也有很大的影响^[5]. 由于 X 射线源焦斑范围内的任意一点都可对目标物体的同一点成像,因此物体上的一个点成像在荧光屏上便成了一个范围,如果目标物体上的两个目标点距离太近就会造成它们在屏上的像重合,不能分辨开来. 因此焦斑影响分辨率的提高,焦斑越大测得的分辨率越低^[6].

若 X 射线源焦斑直径大小为 $113 \mu\text{m}$, 焦斑到分辨率测试卡的距离为 0.2 m , 分辨率测试卡到光电阴极输入面的距离为 0.05 m , 当测试卡上两点所成虚化像的两边缘重合时可认为此两点已不可分辨. 由简单的几何计算可得测试卡上最小可分辨的两点间距离为 $22.6 \mu\text{m}$. 即分辨率为 44.25 lp/mm . 若采用焦斑直径为 $400 \mu\text{m}$ 的大焦斑源, 最小可分辨距离为 $80 \mu\text{m}$, 分辨率为 12.5 lp/mm .

2.3 MCP-X 射线像增强器非理想源的分辨率计算

综合考虑 MCP-X 射线像增强器在非理想源下的分辨率和 X 射线源焦斑对 X 射线像增强器的影响进行分辨率的理论值计算. 由公式

$$1/R_0^2 = 1/R^2 + 1/R_2^2 \quad (7)$$

式中, R_0 为 MCP-X 射线像增强器在非理想源下的分辨率, R 为其在理想源下的分辨率, R_2 为 X 射线源到阴极间的分辨率, 将 R 及 R_2 的值代入得到在 $113 \mu\text{m}$ 焦斑源下 $\Phi 75$ X 射线像增强器与 $\Phi 25$ X 射线像增强器分辨率分别为 17.11 lp/mm 和 28.2 lp/mm , 在 $400 \mu\text{m}$ 焦斑源下 $\Phi 75$ X 射线像增强器与 $\Phi 25$ X 射线像增强器分辨率分别为 10.4 lp/mm 和 11.8 lp/mm .

3 X 射线像增强器分辨率测试实验

通过实验测试 X 射线像增强器分辨率来验证上述理论计算的结果. 实验装置如图 3.

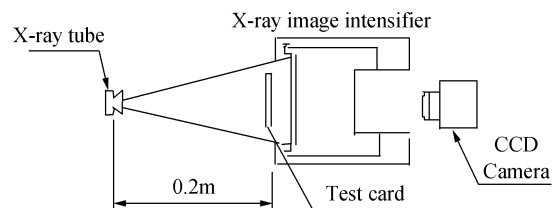


图 3 X 射线像增强器分辨率测试实验系统

Fig. 3 Setup of resolution measurement of X-ray image intensifier

实验测量了 $\Phi 75$ X, $\Phi 25$ X 射线像增强器在焦斑直径 $113 \mu\text{m}$ 和 $400 \mu\text{m}$ X 射线源下的分辨率, 如图 4~图 5.

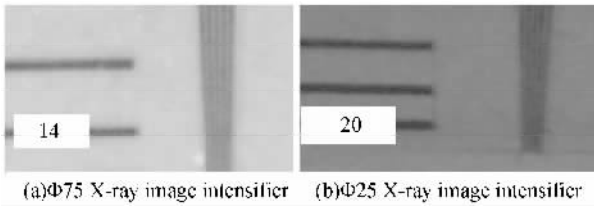


图4 焦斑直径 $113\ \mu\text{m}$ X射线源下的分辨率

Fig. 4 Resolution of X-ray image intensifier ($113\ \mu\text{m}$ focus X-ray source)

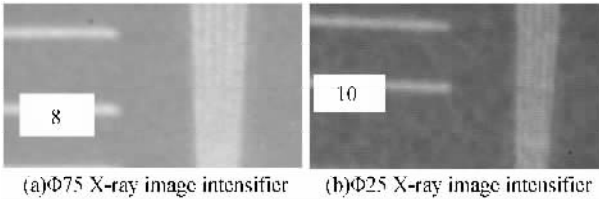


图5 焦斑直径 $400\ \mu\text{m}$ X射线源下的分辨率

Fig. 5 Resolution of X-ray image intensifier ($400\ \mu\text{m}$ focus X-ray source)

得到在 $113\ \mu\text{m}$ 焦斑源下 $\Phi 75\text{X}$ 射线像增强器与 $\Phi 25\text{X}$ 射线像增强器分辨率分别为 $14\ \text{lp/mm}$ 与 $20\ \text{lp/mm}$ (已达实验所用分辨率测试卡的极限), 在 $400\ \mu\text{m}$ 焦斑源下 $\Phi 75\text{X}$ 射线像增强器与 $\Phi 25\text{X}$ 射线像增强器分辨率分别为 $8\ \text{lp/mm}$ 与 $10\ \text{lp/mm}$.

4 结论

对比 MCP-X 射线像增强器分辨率的理论计算值及实验实测值, 二者基本符合. 在不考虑 X 射线源影响的情况下, 分辨率大小与像增强器本身的结构有关, 取决于像增强器的各个近贴之间的距离及电压大小. $\Phi 25\text{X}$ 射线像增强器由于采用了比 $\Phi 75\text{X}$

射线像增强器更小的近贴距离和更高分辨率的 MCP, 因此从实验结果看 $\Phi 25\text{X}$ 射线像增强器分辨率远远高于 $\Phi 75\text{X}$ 射线像增强器. 实验结果表明, X 射线源焦斑大小不仅极大地影响系统分辨率, 还影响着整个 X 射线成像系统的成像质量与对比度. 因此在组建 X 射线成像系统时应充分考虑各个因素的影响.

参考文献

- [1] ZHAO Bao-sheng. Image quality appraise of the X-ray image intensifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1991, **20**(3): 292-299. 赵宝升. X 射线像增强器像质评价[J]. 光子学报, 1991, **20**(3): 292-299.
- [2] XU Da-lun. Image converter tube high-speed photography [M]. Beijing: Science Press, 1990: 202. 徐大纶. 变像管高速摄影[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 202.
- [3] PAN Jing-sheng. Micro-channel plates and its main characteristics[J]. *J of Appl Opt*, 2004, **25**(5): 25-29. 潘京生. 微通道板及其主要特征性能[J]. 应用光学, 2004, **25**(5): 25-29.
- [4] CHEN Min, ZHAO Bao-sheng. Design of a multi-slit streak tube[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1309-1312. 陈敏, 赵宝升. 多狭缝条纹变像管的设计[J]. 光子学报, 2006, **35**(9): 1309-1312.
- [5] LIU Jun, CUI Wei, SHI Jiang-jun, et al. Parameters affecting the characteristic of X-ray source[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 209-213. 刘军, 崔蔚, 施将君, 等. 影响 X 光源特性的参量研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(2): 209-213.
- [6] WANG Kai-ge, NIU Han-ben, LI Ji, et al. A new protable X-ray source with micro-beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 672-676. 王凯歌, 牛憨笨, 李冀, 等. 一种新型微束 X 射线源的研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(6): 672-676.

Analysis on Influencing Factors of Resolution of X-ray Image Intensifier

PAN Jun-jie^{1,2}, ZHAO Bao-sheng¹, SAI Xiao-feng¹, WANG Jun-feng¹

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Received date: 2007-01-08

Abstract: The principle, structure and influencing factors on resolution of X-ray image intensifier with double colse focus are studied. The resolution of two X-ray image intensifiers with different parameters is measured, and their actual resolutions are obtained. Compared of actual resolutions and theoretic resolutions, it shows that the influencing factors of X-ray image intensifier's resolution, include the voltage and distance between the MCP and the screen, the focus of the X-ray source and so on.

Key words: X-ray image intensifier; Resolution; MCP



PAN Jun-jie was born in 1982. He received the B. S degree from Xi'an Jiaotong University in 2004. He is pursuing the M. S. degree at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His present interest is photoelectronic devices.