

微通道板行波选通 X 射线皮秒分幅相机 动态空间分辨率的优化*

杨文正^{1,2}, 田进寿¹, 侯洵^{1,3}, 白永林¹, 白晓红^{1,2},
刘百玉¹, 秦君军¹, 欧阳娴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)

(3 西安交通大学 电信学院, 西安 710049)

摘 要:通过微通道板皮秒脉冲选通动态模型结合近贴聚焦系统的空间调制传递函数理论模型, 研究了微通道板 X 射线分幅相机系统的动态空间分辨能力与屏压, 近贴距离, 皮秒选通脉冲的幅值与宽度等参数的关系. 计算了常用参数下的微通道板行波选通 X 射线皮秒分幅相机的系统动态空间分辨率, 讨论了提高相机动态空间分辨率的措施, 提出了优化相机结构参数的方法.

关键词:超快现象诊断; 微通道板(MCP); X 射线分幅相机(XFC); 空间调制传递函数(SMTF); 空间分辨率

中图分类号: TB872

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)12-2209-6

0 引言

X 射线皮秒分幅相机(XFC)作为一种二维图像测量装置, 广泛应用于涉及 X 射线超快现象诊断, 其范围涵盖了核物理学、生物医学光子学、等离子体物理学、强场物理学等新兴学科, 例如应用于惯性约束聚变、同步辐射、Z 箍缩等离子体、直线性加速器的光束测量等^[1-6]. 近年来, 采用微通道板(Microchannel Plate, MCP)行波选通实现皮秒分幅摄影(MCP-XFC)的技术获得了很大进展和广泛应用, 其优点是动态空间分辨率高、动态范围大、几何畸变小、时间分辨率也很高^[5-6], 然而随着前述诸领域研究的深入, 特别是惯性约束聚变精密化的进展, 这种相机正承受着提高时间和空间分辨率的双重压力.

MCP-XFC 的时、空分辨能力是最受关注的两项指标, 主要受选通脉冲的宽度、幅度、形状以及 MCP 的厚度、孔径比、开口面积等诸多因素的影响和制约, 其理论模型都是建立在一些假设基础上^[8-12], 并且对空间分辨率的研究和测试主要集中在静态状态下^[4-5, 7], 未见有关于相机在短脉冲选通状态下的动态空间分辨率的研究的报导. 本文希望通过通过对 MCP-XFC 的皮秒选通下的空间分辨率的理

论模型的分析 and 基于多个参数的数值模拟, 为进一步通过改进相机结构及其参数来提高相机的动态时空分辨能力提供支撑.

1 微通道板选通 X 射线分幅相机系统空间分辨率理论分析

MCP-XFC 主要由成像针孔阵列、MCP 分幅管、高压脉冲发生器为主的驱动电路和图像记录系统构成. 在 MCP 的输入面镀有 X 射线光电阴极, 选通电脉冲通过微带线加在 MCP 上. X 射线像经针孔在 MCP 的输入面产生相应的光电子图像, 只有快门脉冲所在的一段微带区域的光电子像将会被 MCP 增强, 并到达近贴的荧光屏形成输出图像, 并用紧贴在光纤面板上的图像采集系统记录^[4].

MCP-XFC 的空间分辨率由 MCP 分幅管、针孔、图像记录系统的像增强器与 CCD 相机等光学及电子光学系统的空间分辨率所决定, 因为成像针孔、像增强器与 CCD 的空间分辨率与使用条件有关, 所以一般所说分幅相机的空间分辨率都指的是 MCP 分幅管的空间分辨率, 其空间分辨率主要受其各部分组成元件的特性及其结构的影响. 若忽略光电子的初能量和初角度分布、空间电荷效应、噪声等组成元件特性的影响, 只考虑结构对相机的影响, 并假设系统各部分相对针孔处的放大率为 1, 则分幅管的静态空间分辨率 N 可表示为

$$\frac{1}{N^2} = \frac{1}{N_{PC \rightarrow MCP}^2} + \frac{1}{N_{MCP}^2} + \frac{1}{N_{MCP \rightarrow PS}^2} + \frac{1}{N_{PS}^2} + \frac{1}{N_{FOP}^2} \quad (1)$$

*国家自然科学基金(中国工程物理研究院联合基金, 批准号: 10376041)和国家 863 高技术研究发展计划(2003AA843130)资助

Tel: 029-88887613 Email: ywz@opt.ac.cn

收稿日期: 2006-11-22

式中 $N_{PC \rightarrow MCP}$ 是光电阴极到 MCP 输入面的近贴聚焦电子光学系统的空间分辨率, N_{MCP} 是 MCP 的空间分辨率, $N_{MCP \rightarrow PS}$ 是 MCP 输出面到荧光屏的近贴聚焦电子光学系统的空间分辨率, N_{PS} 是荧光屏的空间分辨率, N_{FOP} 是光纤面板的空间分辨率.

1.1 $N_{PC \rightarrow MCP}$

由于该相机采用反射式金(Au)光阴极,它直接镀制在MCP的输入面上,因而省略了近贴聚焦,提高了整个相机系统的空间分辨能力和光阴极的效率.

1.2 N_{MCP}

MCP 的微孔是六角形紧密排列的, d 为通道孔的中心间距. 若采用 $\Phi 56$ 、微孔直径 $12.5 \mu\text{m}$ 、开口面积 60% 的 MCP, 其孔中心间距约为 $15 \mu\text{m}$. 则在微通道板任意方向上的极限分辨能力(仅考虑几何参数)^[13]

$$N_{MCP} = \frac{1\ 000}{15\sqrt{3}} \text{ lp/mm} \quad (2)$$

1.3 $N_{MCP \rightarrow PS}$

1.3.1 近贴静电聚焦系统

在近贴聚焦系统中, 电子的轨迹呈抛物线. 由于电子初能量和出射角度不同, 由 MCP 输出面一点出射的电子在荧光屏形成半径为 Δr 的散射圆, $\Delta r_{\max} = 2W \sqrt{V_i/V_p} \sin \theta$, (θ 为电子出射与轴线的夹角). 在一定出射能量下, 当电子出射方向与电子光学系统轴线的夹角为 $\pi/2$ 时, 弥散半径 Δr 达到最大^[13-14]

$$\Delta r_{\max} = 2W \sqrt{V_i/V_p} \quad (3)$$

V_i 为电子逸出能量的等效电位, V_p 和 W 分别为两电极间的电位差及间距. 通常可以用此式来作为近贴聚焦电子光学系统像差的衡量指标. 为获得较好的成像应减小电极间距 W 及提高极间电位差 V_p .

对于皮秒脉冲选通的 MCP 分幅相机, 其成像质量并不仅仅受静态电子光学系统的影响. 施加的皮秒高压脉冲在 MCP 通道两侧形成一个高斯型交变电场, 在不同时刻 MCP 通道内倍增的电子由于通道内加速电场的变化而最终会影响二次电子的出射能量, 对 MCP 分幅相机系统的像差引入直接的影响.

1.3.2 微通道板皮秒动态选通模型的建立

MCP 中电子倍增过程的基本解析模型是 Eberthardt 提出的“能量正比假设”模型^[15]. 以一个微通道为分析模型(管道长 L , 管道直径 D), 见图 1. 模型认为: 在 MCP 的电子倍增过程中, 电子在掠入射条件下, 二次电子运动的平均径向发射能量 eV_{or} 和轰击的电子能量 eV 成正比关系.

$$eV_{or} = eV/4\beta^2 \quad (4)$$

式中 β 是无量纲的比例常数, 确切值与 MCP 材料和制作工艺有关. 首次轰击通道壁的电子能量来自光电子. MCP 的皮秒选通特性的模型也是基于此模型. 为简化运算, 均没有考虑二次电子能量的统计特性, 并假设所有光电子和二次电子垂直于通道壁表面发射, 并只考虑轨迹通过通道轴线的电子^[10].

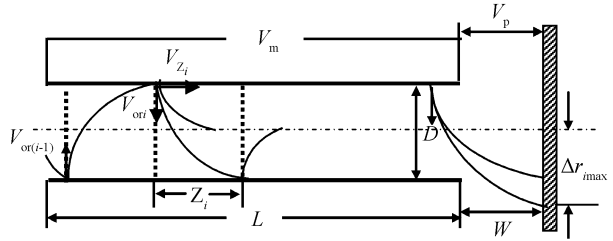


图 1 微通道中电子倍增模型

Fig. 1 Model of electron gain in micro channel pore 设 MCP 上施加高斯型高压选通电脉冲 V_m (峰值为 V_{mp} , 脉冲的全宽半高 FWHM 为 T_n), 可表示为

$$V_m(t) = V_{mp} \exp\left[-4\ln 2 \left(\frac{t}{T_n}\right)^2\right] \quad (5)$$

分析 MCP 通道内第 i 次碰撞, t_i 表示第 i 次二次电子与通道壁相碰撞的时刻, t_{i-1} 为第 $i-1$ 次碰撞产生二次电子的时刻, 由于假设所有光电子和二次电子垂直于通道壁表面发射, $V_{or(i-1)}$ 为第 $i-1$ 次碰撞产生的二次电子的径向初能量, e 和 m 分别表示电子的电荷量和质量, 则

$$t_i = t_{i-1} + D / \sqrt{(2V_{or(i-1)}/m)} \quad (6)$$

对第 i 次碰撞有, 轰击电子轴向能量

$$V_{Z_i} = \frac{1}{2} m \left[\left(\frac{e}{mL} \int_{t_{i-1}}^{t_i} V_m(t) dt \right)^2 \right] \quad (7)$$

碰壁能量为

$$V_i = \sqrt{V_{or(i-1)}^2 + V_{Z_i}^2} \quad (8)$$

碰撞产生的二次电子径向初能量为

$$V_{ori} = V_i/4\beta^2 \quad (9)$$

碰撞的轴向位移可表示为

$$Z_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{e \int_{t_{i-1}}^{t_i} V_m(t) dt}{mL} t dt \quad (10)$$

对首次碰撞而言, t_0 为光子入射到 MCP 入射面的时刻, t_1 为光电子与 MCP 通道壁首次相碰撞的时刻. 在 MCP1 的输入面镀有金阴极, 当入射光子的能量在 $0.1 \sim 10 \text{ KeV}$ 时, 光电子初始能量的最可几值 $\epsilon = 1.3eV$ ^[17-18].

对第一次碰撞有

$$t_1 = t_0 + D / \sqrt{2\epsilon/m} \quad (11)$$

计算中选取参数为 $\beta = 2.4$, $L = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$, $D = 12.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ 的 MCP, 仅考虑通道内每次倍增的二次发射系数 $\delta_i \geq 1$ 的情况. 当 $\sum_{i=1}^n Z_i$ 大于 L 时,

电子飞出 MCP. 由此可依次计算出各级倍增过程中的碰撞时刻、碰撞时的轰击电子能量、二次电子发射系数、此次碰撞的轴向位移的相应值以及碰撞产生的二次电子初能量等参数.

1.3.3 微通道板分幅管近贴聚焦系统的空间调制传递函数(SMTF)理论

对于近贴聚焦系统的空间分辨率的评定,通常是以像面上最大弥散圆直径的倒数来量度, $R = (2 |\Delta r|_{\max})^{-1}$. 仅考虑二次电子由于皮秒电脉冲选通而导致从 MCP 输出面出射动能的不同,则系统的空间分辨率应以像面上最大弥散圆的均方根直径的倒数来表示, $\bar{R} = (2 \sqrt{\Delta r_{\max}^2})^{-1}$. 并可用指数函数形式近似表示系统的 MTF^[13-14]

$$MTF(f) = \exp[-(\pi \sqrt{\Delta r_{\max}^2} f)^2] \quad (12)$$

$$\Delta r_{\max}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2L \sqrt{V_{i\max}/V_p})^2.$$

1.3.4 分幅管近贴聚焦系统的空间调制传递函数(SMTF)曲线

根据 MCP 皮秒选通模型以及 SMTF 理论,讨

论 MCP-XFC 在皮秒选通状态下的 SMTF 与屏压 V_p , 近贴距离 W , 微带线上作用的选通脉冲的幅度 V_{mp} 与宽度 T_n 等参数的关系. 由于电脉冲存在固有晃动,需考虑激光与电脉冲作用的不同时刻产生的二次倍增电子最终的出射动能的统计特性. 其 t_0 取值区域为电脉冲前沿上部 150 ps 区域. 激光脉冲与电脉冲作用的时序关系数值计算曲线如图 2, 不同参数下的 MCP 选通分幅管的 SMTF 数值计算曲线如图 3.

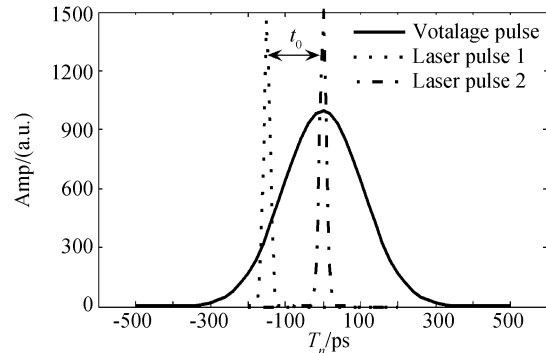
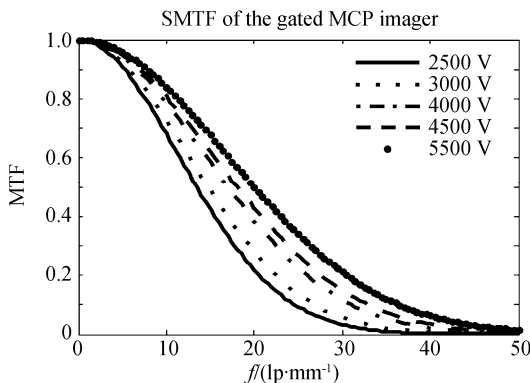
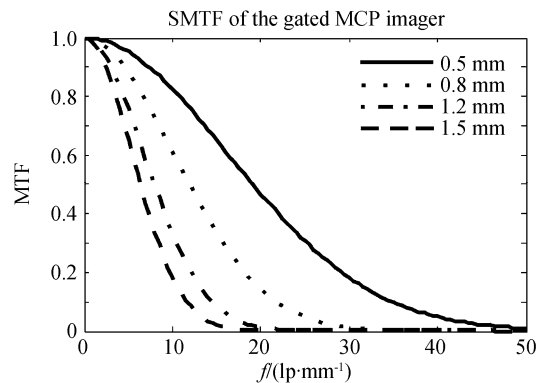


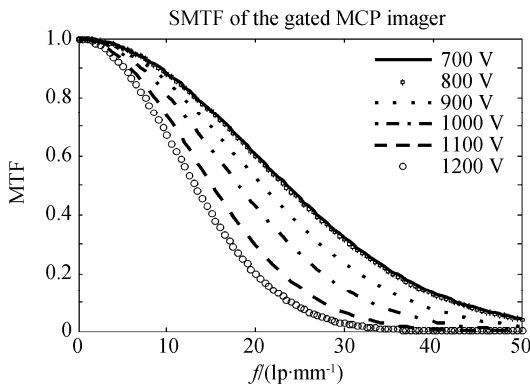
图 2 激光脉冲与选通电脉冲作用时序图
Fig. 2 The scheduling of laser and votalge pulse



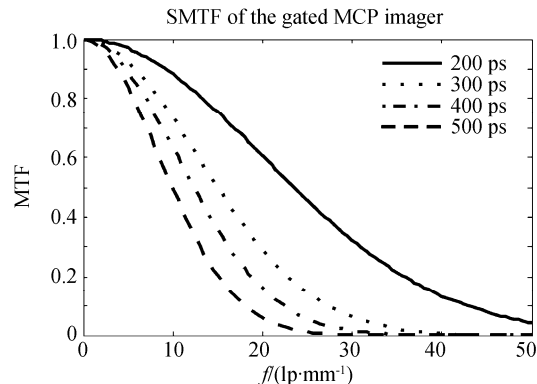
(a) $V_p=2500\text{ V}-5500\text{ V}$, $W=0.5\text{ mm}$, $V_{mp}=1000\text{ V}$, $T_n=250\text{ ps}$



(b) $V_p=4500\text{ V}$, $W=0.5-1.5\text{ mm}$, $V_{mp}=1000\text{ V}$, $T_n=250\text{ ps}$



(c) $V_p=4500\text{ V}$, $W=0.5\text{ mm}$, $V_{mp}=700\text{ V}-1200\text{ V}$, $T_n=250\text{ ps}$



(d) $V_p=4500\text{ V}$, $W=0.5\text{ mm}$, $V_{mp}=1000\text{ V}$, $T_n=200\text{ ps}-500\text{ ps}$

图 3 在不同参数下的 MCP 选通变像管的空间调制传递函数数值计算曲线

Fig. 3 SMTF of the gated MCP imager with different parameters

图 3 的(a)和(b)中曲线体现了提高 SMTF 值必须减少 W 及提高 V_p 的关系. 但在实际应用中,这两个参数的选择要保证相机处于稳定工作状态(MCP 与荧光屏之间不打火击穿),由于制作工艺上

的限制,一般选择屏压范围 2 500 V~4 500 V,近贴距离控制在 0.5 mm~1.2 mm.

图 3 的(c)和(d)中曲线表明了选通脉冲的形状不同,对成像质量也有影响. 选通脉冲的电压愈低,

脉冲愈窄则 SMTF 特性愈好. 根据式(8)~(9), 电脉冲电压愈低, 电子从 MCP 输出端逸出时的径向动能愈小, 造成像弥散愈小, 但是其电子增益的降低同样会影响成像质量. 图 3 的(c)中, 峰值电压为 700 V 的选通脉冲和 800 V 时的 MTF 曲线几乎重合, 但是前者的图像增益远小于后者, 综合考虑还是选通脉冲峰值 800 V 时的成像质量要优于 700 V 时.

对于选通脉冲的宽度而言, 根据式(7)~(9), 脉冲幅度一样时, 电脉冲作用区域愈窄, 则平均电压愈低, 则电子从 MCP 输出端逸出动能愈小. 但是不能忽略电子在通道中的电子渡越时间, 0.5 mm 厚的 MCP 中电子渡越时间约 150 ps~250 ps, 在保证有效的电子增益的前提下, 要求 0.5 mm 厚的 MCP 上施加的选通脉冲宽度一般不低于 200 ps.

1.4 N_{PS}

荧光屏的分辨率受其粉粒的大小和屏厚度的影响. 其空间调制函数 MTF 可用经验公式表示^[18]

$$MTF(f) = \exp\left[-\left(\frac{f}{46}\right)^{1.1}\right] \quad (13)$$

式中 f 为表示空间分辨率.

由式(13)计算得出的 MTF 曲线如图 4, MTF 为 10% 时, $f=98$ lp/mm; MTF 为 5% 时, $f=125$ lp/mm.

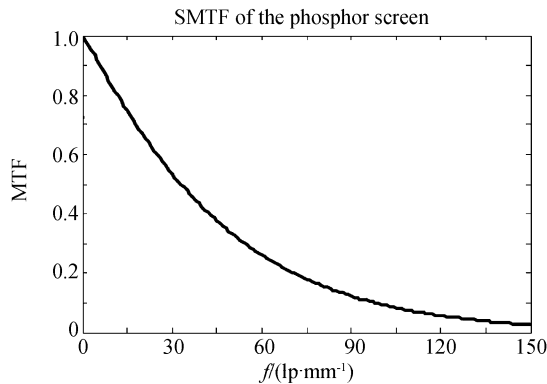


图 4 荧光屏的空间调制传递函数曲线

Fig. 4 SMTF of the phosphor screen

1.5 N_{FOP}

光纤面板的空间分辨率取决于单根光纤直径、排列方式和光纤中心距^[19]. 对于采用六角形紧密排列的光纤面板, 有效传光面积可达 91% 以上, 若所用光纤面板的单根光纤直径为 $6 \mu\text{m}$, 可认为光纤中心距为 $6 \mu\text{m}$, 则光纤面板极限分辨率 $N_{FOP} = \frac{1000}{6\sqrt{3}}$ lp/mm.

2 模拟结果

表 1 给出了常用实验参数下, 近贴聚焦系统和 MCP 分幅相机的空间分辨率理论计算值. 实际上,

除了结构参数和动态实验参数外, 光电子的初能量与初角度分布、二次电子的能量和角度的分布、微通道板电子噪声以及空间电荷效应等均会影响动态空间分辨率.

表 1 近贴聚焦系统和 MCP-XPFC 的动态空间分辨率理论值

| 参数 (V_p, W, V_{mp}, T_n) | MTF 值 | | $N_{MCP-PS}/(\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1})$ | |
|----------------------------------|-------|------|---|------|
| | 10% | 5% | 10% | 5% |
| 4 500 V, 0.5 mm, 800 V, 250 ps | 42.0 | 48.0 | 26.2 | 27.9 |
| 4 500 V, 0.8 mm, 800 V, 250 ps | 26.5 | 30.0 | 20.8 | 22.6 |
| 3 000 V, 0.5 mm, 800 V, 250 ps | 34.7 | 39.5 | 24.1 | 25.9 |
| 3 000 V, 0.8 mm, 800 V, 250 ps | 21.7 | 24.8 | 18.2 | 20.1 |
| 4 500 V, 0.5 mm, 1 000 V, 250 ps | 33.0 | 38.0 | 23.5 | 25.5 |
| 4 500 V, 0.8 mm, 1 000 V, 250 ps | 21.5 | 24.0 | 18.1 | 19.7 |
| 3 000 V, 0.5 mm, 1 000 V, 250 ps | 27.0 | 30.0 | 21.0 | 22.6 |
| 3 000 V, 0.8 mm, 1 000 V, 250 ps | 17.5 | 20.0 | 15.5 | 17.3 |

由于 0.5 mm 厚度的单 MCP 的 XFC 的时间分辨率一般在 60 ps~100 ps 范围内, 动态空间分辨率较难测试. 一般只进行静态空间分辨率测试. 静态空间分辨率测试是通过在 MCP 分幅变像管的输入面贴一块鉴别率板, 用紫外光均匀照明光阴极, 用近贴相机或是 CCD 相机采集记录荧光屏上的图像. 图 5 (a) 是曾经用近贴相机拍摄的当屏压 3 000 V, 近贴距离 0.5 mm 时的系统最高静态空间分辨率的测试图^[7], 采用 4 号鉴别率板. 图 5(b) 是将第 25 组图案局部放大图, 对应的分辨率值为 25 lp/mm.

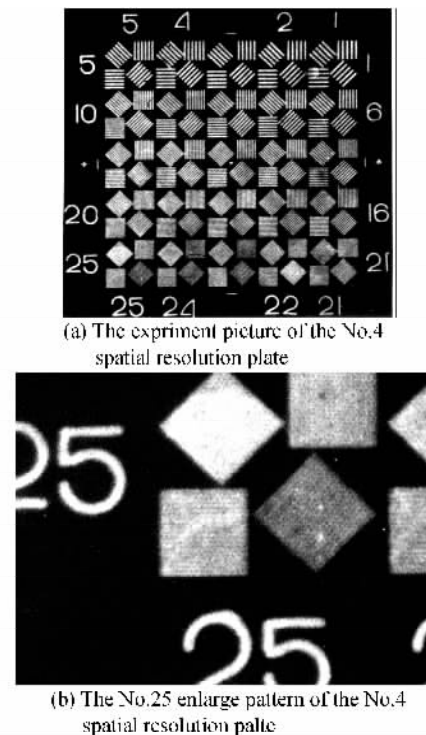


图 5 MCP 分幅相机静态空间分辨率测试图

Fig. 5 The experiment picture of static spatial resolution of MCP framing camera

3 提高相机空间分辨率的措施

根据讨论, 如果选择合理的参数匹配, 将在一定

程度上提高相机的动态空间分辨能力。

1)在满足增益的前提下,可以选择更薄的面板,减少电子在微通道内的电子渡越时间,从而可以作用更窄的电脉冲;2)可以选择微孔孔径更小的 MCP,提高 MCP 的空间分辨能力;3)采用新型荧光屏制作工艺,来进一步提高 MCP 与荧光屏之间的加速电压和减少近贴距离;如采用高效透明导电膜制作工艺^[20],透明导电膜的导电性好,可以作为电极使用。高压时相比铝膜荧光屏,两者增益相当,但由于没有蒸镀铝膜时容易形成的孔洞和微小突起,所以不易引起高压打火,可以提高加速电压和减少近贴距离;4)采用在 MCP 的输出端匹配一定输出阻抗的电极。既保证电脉冲的传输特性,又使输出面端口一段有镀层的通道壁失去发射二次电子的特性。这可对出射电子具有准直效应因而可以减少输出电子在屏上落点的弥散,从而提高了极限分辨率。

如选用厚度 0.4,孔径 $8\mu\text{m}$ 的 MCP,微带传输线上的选通脉冲宽度 180 ps,峰值电压 1 000 V,屏压 5 000 V,近贴距离 0.5 mm,光纤面板单根光纤孔径 $6\mu\text{m}$ 的参数, t_0 取值区域为电脉冲前沿上部 100 ps 区域。理论计算得相机动态空间分辨率 $N=31\text{ lp/mm}$ (10%调制度), $N=34\text{ lp/mm}$ (5%调制度)。可见由于结构参数和实验参数的改变,系统的空间分辨率可提高不少。

4 结论

通过 MCP 皮秒脉冲选通动态模型结合近贴聚焦系统的空间调制传递函数理论,计算了 MCP-XFC 系统的动态空间分辨率(不考虑针孔装置的空间分辨率)与屏压,近贴距离,选通脉冲的幅值与宽度等实验参数的关系,得出了系统在接近实际使用条件下的动态空间分辨率优于 24 lp/mm (10%调制度),与曾测试过的静态测试结果相符。并讨论了进一步改善 MCP 分幅相机动态空间分辨率的措施,这对今后 MCP 皮秒分幅相机在惯性约束聚变、同步辐射、Z 箍缩等离子体等领域的应用有一定参考价值。

参考文献

- [1] BRADLEY D K, BELL P M, KILKENNY J D, *et al.* High-speed gated X-ray imaging for ICF target experiment (invited) [J]. *Rev Sci Instrum*, 1992, **63**(10):4813-4817.
- [2] ZE F, KAUFFMAN R L, KILKENNY J D, *et al.* A new multichannel soft X-ray framing camera for fusion experiments [J]. *Rev Sci Instrum*, 1992, **63**(10):5124-5126.
- [3] YANG Jia-min, DING Yao-nan, ZHENG Zhi-jian, *et al.* Diagnostic technology of time- and space-resolved soft-x-ray spectra[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(6):1427-1431.
杨家敏,丁耀南,郑志坚,等.时空分辨软 X 射线谱诊断技术研究[J]. *物理学报*, 2003, **52**(6):1427-1431.
- [4] CHANG Zeng-hu, SHAN Bing, LIU Xiu-qin, *et al.* Picosecond X-ray framing camera using gated MCP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(6):501-508.
常增虎,山冰,刘秀琴,等.微通道板选通 X 射线皮秒分幅相机[J]. *光子学报*, 1995, **24**(6):501-508.
- [5] SHAN Bing, CHANG Zeng-hu, LIU Jin-juan, *et al.* Gated MCP picosecond X-ray framing camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(5):449-455.
山冰,常增虎,刘进元,等.四通道 X 射线 MCP 行波选通分幅相机[J]. *光子学报*, 1997, **26**(5):449-455.
- [6] KATAYAMA M, NAKAI M, YAMANAKA T, *et al.* Multiframe X-ray imaging system for temporally and spatially resolved measurement of imploding inertial confinement fusion targets[J]. *Rev Sci Instrum*, 1991, **62**(1):124-129.
- [7] SHAN Bing, CHANG Zeng-hu, LIU Xiu-qin, *et al.* Gated MCP framing camera with 60 ps exposure time[C]. *SPIE*, 1995, **2549**:53-59.
- [8] YANG B K F, STEWART R E, WOODWORTH J G, *et al.* Experiment demonstration of a 100 ps microchannel-plate framing camera[J]. *Rev Sci Instrum*, 1986, **57**(11):2729-2732.
- [9] FAILOR B H, GORZEN D F, AMENTROUT C J, *et al.* Characterization of two-gated microchannel-plate framing cameras[J]. *Rev Sci Instrum*, 1991, **62**(12):2862-287.
- [10] CHANG Zeng-hu. Numerical simulation of picosecond voltage pulse gated microchannel plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(4):347-352.
常增虎.微通道板皮秒选通特性的数值模拟[J]. *光子学报*, 1995, **24**(4):347-352.
- [11] BRADLEY D K, BELL P M, LANDEN O L, *et al.* Development and characterization of a pair of 30-40 ps X-ray framing cameras[J]. *Rev Sci Instrum*, 1995, **66**(1):716-718.
- [12] ITO M, KUME H, OBA K. Computer analysis of the timing properties in micro channel plate photomultiplier tube[J]. *IEEE Transaction on Nuclear Science*, 1984, **31**(1):408-412.
- [13] ZOU Yi-song. Vacuum imaging devices (part one) [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1980:46-71.
邹异松.真空成像器件(上册)[M].北京:北京工业学院, 1980:46-71.
- [14] XIANG Shi-ming, NI Guo-qiang. The principle of photoelectronic imaging devices [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999:129-148.
向世明,倪国强.光电子成像器件原理[M].北京:国防工业出版社, 1999:129-148.
- [15] EBERHARDT E H. Gain model for microchannel plates[J]. *App Opt*, 1979, **18**(9):1418-1423.
- [16] BURTON L H, JEREL A S. 0.1 ~ 10-keV X-ray-induced electron emissions from solids-models and secondary electron measurements[J]. *Journal of Applied Physics*, 1977, **48**(5):1852-1866.
- [17] BURTON L H, KANUER J P, PREMARATNE K. The characterization of X-ray photocathodes in the 0.1 ~ 10-keV photon energy region[J]. *Journal of Applied Physics*, 1981, **52**(3):1509-1520.
- [18] XU Da-lun. High speed photography based on image convert

- tube[M]. Beijing: Science Press, 1990:418.
徐大伦. 变像管高速摄影[M]. 北京: 科学出版社, 1990:418.
- [19] LIU De-shen, YIN Zong-min, ZHU Song-lai, *et al.* Fiber optics [M]. Beijing: Science Press, 1987:77.
刘德森, 殷宗敏, 祝颂来, 等. 纤维光学[M]. 北京: 科学出版社, 1987:77.
- [20] BAI Xiao-hong, LIU Jin-yuan, BAI Yong-lin, *et al.* Study of the phosphor screen with the transparent conducting film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 176-179.
白晓红, 刘进元, 白永林, 等. 高效透明导电膜荧光屏的研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(2): 176-179.

Spatially Resolved Research of Picosecond X-ray Multiframes Camera with Gated Microchannel Plate

YANG Wen-zheng^{1,2}, TIAN Jin-shou¹, HOU Xun^{1,3}, BAI Yong-lin¹, BAI Xiao-hong^{1,2},
LIU Bai-yu¹, QIN Jun-jun¹, OU-YANG Xian¹

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

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

(3 *School of Electronic and Information, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

Received date: 2006-11-22

Abstract: Picosecond X-ray framing camera with gated microchannel plate, shortened form MCP-XFC, is widely applied for some researches as a sort of very important ultrafast diagnosis instrument, such as the implosion of inertial confinement fusion (ICF) experiments, the laser-produced plasmas and Z-pinch. The dynamic spatial resolving power is discussed based on the theoretically models of picosecond (ps) voltage pulse gated MCP and spatial modulation transfer function (SMTF) with proximity focusing system. The relation is also analyzed between the dynamic spatial resolution and some parameters such as the voltage of phosphor screen, the interval of proximity focusing system, the voltage value and the pulse width of picosecond gated pulse. Under practical experiment condition, the compute value of dynamic SMTF with gated MCP-XFC is 24 lp/mm, and this value is accorded with the testing results 25 lp/mm of static spatial resolution. At last, some improved methods are put forward.

Key words: Ultrafast process diagnosis; Microchannel plate (MCP); X-ray framing camera; Spatial modulation transfer function (SMTF); Spatial resolution



YANG Wen-zheng was born in 1975. She received the B. S. degree from Electronic Science Technology Department of Northwest University in 1997 and the M. S. degree in physical electronics from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, in 2003. Now she is studying for her Ph. D. degree in XIOPM. Her major research focuses on ultrafast process diagnosis technology and the temporal, spatial resolution character of high speed camera.