

微通道板行波选通分幅相机动态空间分辨率的 Monte-Carlo 模拟^{*}

邹峰^{1,3}, 侯洵^{1,2}, 杨文正^{1,3}, 田进寿¹, 白永林¹, 刘百玉¹

(1 中科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 西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049)
(3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:本文采用 Monte-Carlo 法对电子在 V 型微通道板行波选通分幅相机微通道板单通道中传输、碰壁及二次电子发射的整个过程进行了模拟. 模拟结果印证了微通道板孔径、屏距、屏压等参量对相机动态空间分辨率影响的定性分析, 揭示了斜切角以及微通道板 II 上电压 V_2 对相机空间分辨率的影响. 计算还结果表明, 对于 V 型微通道板分幅相机, 可以不区分动、静态空间分辨率.

关键词:微通道板; 分幅相机; Monte-Carlo 方法; 动态空间分辨率

中图分类号: TB872 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2008)12-2369-5

0 引言

近年来, 采用微通道板 (Micro-Channel Plate, MCP) 行波选通实现皮秒分幅摄影的技术取得了很大进展, 已广泛应用于惯性约束核聚变、同步辐射、Z-pinch 等离子体等测量中, 该技术具有诸多优点和广阔的发展前景.

动态空间分辨率是微通道板行波选通分幅相机的重要指标, 它受很多参量的影响和制约. 目前, 对分幅相机的理论研究主要基于电子在通道中的直流增益理论模型和 MCP 在直流电场作用下的特性分析集中在静态下^[1-6], 未见采用 Monte-Carlo 方法对相机在电脉冲选通状态下空间分辨率进行研究的报道. 本文用 Monte-Carlo 法对从光子入射到电子打到荧光屏的整个过程进行了模拟, 找出了影响相机动态空间分辨率的主要因素, 并据此提出能进一步改善相机动态空间分辨率的措施.

1 模型和计算方法

进行 Monte-Carlo 模拟的结构模型如图 1, 两块 MCP 呈“V”型连接, 设 MCP 厚度为 L , 孔径为 d , 斜切角为 θ . MCP₁ 上加高斯型选通脉冲 V_1 , 选通脉冲峰值为 V_{p1} , 脉冲半高宽 (Full Width Half Maximum, FWHM) 为 T , MCP₂ 上加恒定电压 V_2 , 主要起电子倍增作用. MCP₂ 输出面与荧光屏之间

距离为 l , 电压为 V_3 , 电场强度 $E_3 = V_3/l$. 在 MCP 的两个面镀一定厚度的 Au, 在输入端它既是反射式光阴极, 又是电极; 在输出端, 它不仅是电极, 因为 Au 的二次电子发射系数很小, 使通道壁失去发射二次电子的特性, 具有准直效应, 能够提高相机的空间分辨率. 设 MCP₂ 输出端电极浸没深度为 w .

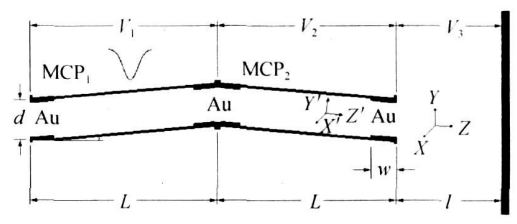


图 1 Monte-Carlo 模拟示意
Fig. 1 Scheme of the framing camera being stimulated by Monter carlo method

1) 在 MCP₁, MCP₂ 内部及 MCP₂ 与荧光屏之间均存在电场. 在 MCP₁ 和 MCP₂ 内部, 电场沿轴向, 在 MCP₂ 和荧光屏之间, 电场垂直于荧光屏, 电子在这类区域做加速运动; 镀有 Au 电极的区域为等势区, 这类区域的电场为零, 电子做匀速直线运动. 为简单计, 不考虑界面处的电场畸变, 在界面处进行坐标变换.

2) 取光电阴极的浸没深度为 10 μm , 则光电子的初位置在 $[0, 10 \mu\text{m}]$ 上均匀分布, 光电子的初能量分布服从分布函数 $f(E_x) = A E_x / (E_x + 3.7)^4$, 式中 $E_x \in [0, 100 \text{ eV}]$, 且光电子的产生时间很短, 这里忽略不计^[7].

3) 通道内的次级电子发射方向按 Lambert 分布 (余弦分布), 次级电子能量服从瑞利分布^[8-10], 取最可见值为 1.4 eV^[11].

4) MCP 的二次电子发射系数服从平均值的泊

^{*}国家自然科学基金 (中国工程物理研究院联合基金, 10376041) 和国家 863 高技术研究发展计划项目 (2003AA843130) 资助
Tel: 029-88204271 Email: peakzo@163.com
收稿日期: 2007-04-13

松分布

$$\delta = \delta_m(0) [(V_0/V_m(0)) \sqrt{\cos \theta}]^\beta \exp [\alpha(1 - \cos \theta) + \beta(1 - (V_0/V_m(0)) \sqrt{\cos \theta})]$$
式中, $\alpha = 0.62$, β 取 $[0.25, 0.65]$ 上的均匀分布^[10-11], V_0 为入射电子能量, θ 为入射角, $\delta_m(0)$ 为垂直入射时的最大二次电子发射系数, $V_m(0)$ 是与 $\delta_m(0)$ 相对应的入射电子能量, 二者由二次电子发射材料决定, 这里取 $\delta_m(0) = 3$, $V_m(0) = 300 \text{ eV}$ ^[8].

5) 电子在快速变化电场中的运动不是匀加速运动, 为保证计算准确度, 采用四阶龙格库塔法进行计算.

6) 模拟中取微通道板厚度 $L = 0.5 \text{ mm}$, 通道内径 $d = 6 \sim 12 \text{ }\mu\text{m}$, 斜切角 $\theta = 6 \sim 14^\circ$, 输出端电极浸没深度 $w = 10 \sim 30 \text{ }\mu\text{m}$; 取 V_1 为高斯型脉冲, 分幅相机实验中最常用的选通脉冲参量为脉冲峰值电压, 值为 $V_{p1} = 600 \sim 1000 \text{ V}$, 脉冲半高宽 $T = 200 \sim 300 \text{ ps}$; 取 $V_2 = 800 \sim 1200 \text{ V}$, 屏距 $l = 0.2 \sim 1.3 \text{ mm}$, $E_3 = 2000 \sim 8000 \text{ V/mm}$.

7) 调节光电子的发射数量, 使出射电子数不少于 100 000 个, 统计这些电子在荧光屏上的落点坐标, 分别画出电子在 x 轴和 y 轴上的统计直方图, 采用三次样条插值的方法拟合出电子分别在 x 轴和 y 轴上的落点曲线, 最后计算出两条曲线的 FWHM, 作为微通道板行波选通分幅相机动态空间极限分辨率的量度. 通过比较不同条件下的计算结果, 找出影响相机动态空间分辨率的主要因素, 并据此提出改善相机动态空间分辨率的措施.

2 模拟结果和讨论

根据模型, 影响相机动态空间分辨率的因素主要有: 选通脉冲 V_1 的峰值 V_{p1} 和半高宽 T , 微通道板斜切角 θ 、微通道孔径 d , MCP_2 上的电压 V_2 、输出端电极浸没深度 w , MCP_2 与荧光屏之间的距离 l 以及电场 E_3 .

1) 选通脉冲对相机的动态空间分辨率的影响
选通脉冲 V_1 的峰值 V_{p1} 和半高宽 T 对相机动态空间分辨率的影响见图 2. 图中 $L = 0.5 \text{ mm}$, $d = 12 \text{ }\mu\text{m}$, $\theta = 10^\circ$, $w = 10 \text{ }\mu\text{m}$, $V_2 = 1000 \text{ V}$, $E_3 = 6000 \text{ V/mm}$.

从图 2 可见, 不同选通脉冲 V_1 下, 相机的动态空间分辨率几乎不变, 其影响可以忽略, 这说明对“V”型行波选通双 MCP 分幅相机来说, 在峰值 $600 \sim 1000 \text{ V}$ 和半高度 $200 \sim 300 \text{ ps}$ 的常用选通脉冲作用下, 其动态空间分辨率和静态空间分辨率基本相同.

2) 微通道板斜切角对相机的动态空间分辨率的影响

从图 2 可见, 电子在 x 轴和 y 轴上的分布不同, y 轴上电子分布的半高宽更大, 这是因为:

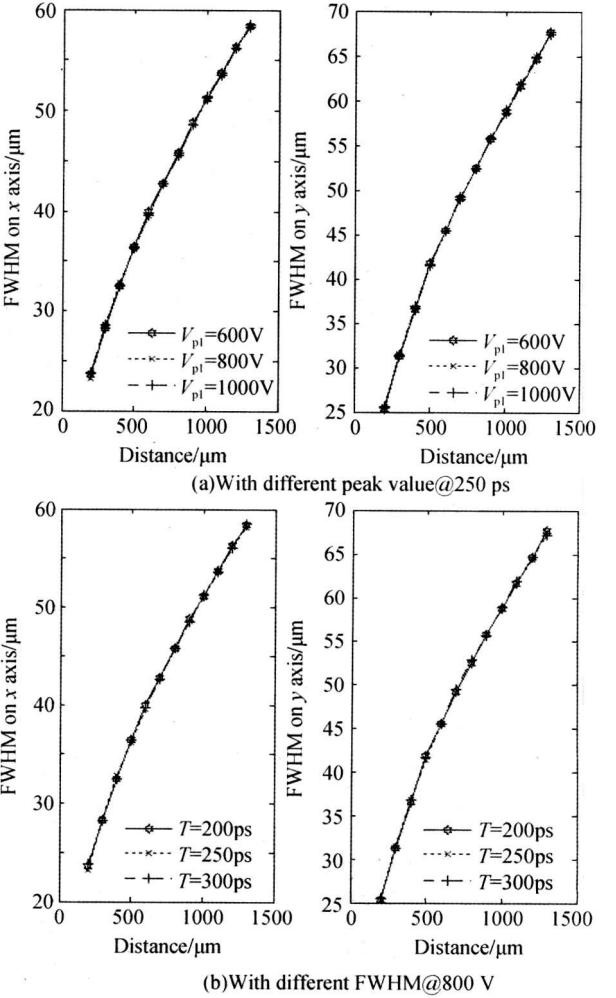


图 2 不同选通脉冲峰值以及相同选通脉冲半高度下, 电子在荧光屏上的空间分布半高宽随屏距的变化
Fig. 2 Electron distribution on phosphor screen vs. the distance from MCP_2 to the screen with different peak value and different FWHM

a) 由于斜切角的关系, MCP_2 的输出面的孔径不是一个圆, 而是一个以 y 轴为长轴的椭圆, 见式(1)

$$\begin{aligned} x &= x' \\ y &= y' / \cos \theta \end{aligned} \tag{1}$$

b) 由于存在斜切角的关系, 电子从 MCP_2 的输出面出射时, 进行如下坐标变换

$$\begin{aligned} v_x &= v_{x'} \\ v_y &= v_{y'} \cos \theta - v_{z'} \sin \theta \\ v_z &= v_{z'} \cos \theta + v_{y'} \sin \theta \end{aligned} \tag{2}$$

由于电子沿 MCP_2 轴向的速度 $v_{z'}$ 很大, 所以电子出射后 y 向速度 v_y 比 x 向速度 v_x 分布更宽, 这两个原因一起导致了相机空间分辨率在荧光屏 x 向和 y 向的不同. 斜切角 θ 对相机空间分辨率的影响

响见图 3. 图中 $L=0.5\text{ mm}$, $d=12\text{ }\mu\text{m}$, $w=30\text{ }\mu\text{m}$, $V_2=1\text{ }000\text{ V}$, $E_3=6\text{ }000\text{ V/mm}$. 图 3 表明,斜切角对 x 轴的空间分辨率影响很小,五条曲线几乎重合在一起,但斜切角对 y 轴的空间分辨率影响很大,随着斜切角的增加,电子在 y 轴上的分布越来越宽.

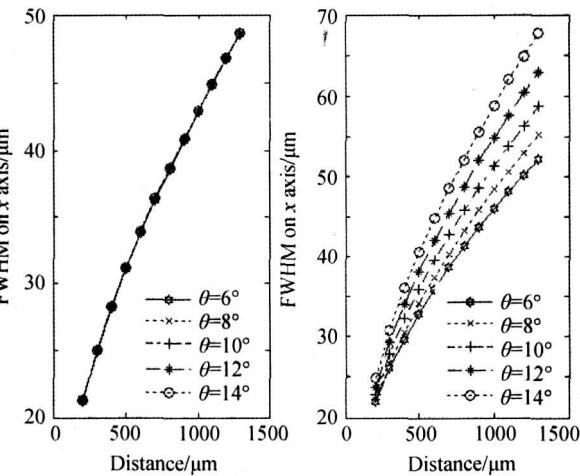


图 3 不同斜切角 θ 下,电子在荧光屏上的空间分布半高宽随屏距的变化
Fig.3 FWHM of the electron distribution on phosphor screen vs. the distance from MCP₂ to the screen, θ is the chamfer angle of the MCP

虽然影响 MCP 相机静态空间分辨率的因素较多,但本模拟表明斜切角对相机空间分辨率的影响不容忽视.

3)微通道板孔径对相机空间分辨率的影响
图 4 印证了减小微通道板的孔径有助于提高相机的空间分辨率这一结论. 图中 $L=0.5\text{ mm}$, $\theta=10^\circ$, $w=30\text{ }\mu\text{m}$, $V_2=1\text{ }000\text{ V}$, $E_3=6\text{ }000\text{ V/mm}$.

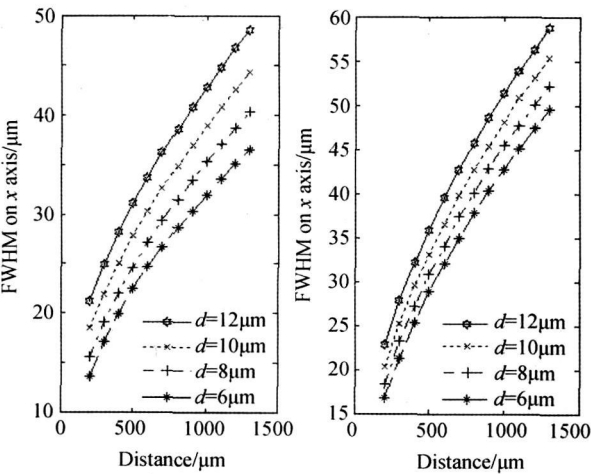


图 4 不同微通道孔径 d 下,电子在荧光屏上的空间分布半高宽随屏距的变化
Fig.4 FWHM of the electron distribution on phosphor screen vs. the distance from MCP₂ to the screen, d is the diameter of the channel

4) V_2 对相机空间分辨率的影响

计算表明,降低 V_2 有利于空间分辨率的提高,见图5. 图中 $L=0.5\text{ mm}$, $d=12\text{ }\mu\text{m}$, $\theta=10^\circ$, $w=30\text{ }\mu\text{m}$, $E_3=6\text{ }000\text{ V/mm}$, 电子在荧光屏上的弥散斑大小取决于:电子束斑的初始大小(MCP 孔径)、出射电子的侧向速度 v_x 、 v_y 以及电子在 MCP₂ 输出面与屏间渡越时间. 由于微通道孔径不变, V_2 对空间分辨率的影响主要通过出射电子侧向速度 v_x 、 v_y 以及电子在屏间渡越时间. 定性分析预期,随着 V_2 的提高,电子的轴向速度增加,电子在 MCP₂ 输出面与屏间的渡越时间减少. 计算表明,由于大部分 MCP₂ 的出射电子能量较低, V_2 的提高只能稍微减少出射电子在 MCP₂ 输出面与屏间的渡越时间. 由于电子在等势区做匀速直线运动,出射电子能量的增大使其在等势区的渡越时间减少,浸没电极对电子束的准直作用下降,使电子的侧向速度 v_x 、 v_y 的分布变宽. 因此,提高 V_2 有利于降低电子在 MCP₂ 输出端与荧光屏之间的渡越时间,但使电子的侧向速度分布变宽,前者有利于提高相机的空间分辨率,而后者刚好相反. 但对于大部分的低能电子来说,后者所起到的作用更大. 综合两种因素,提高 V_2 不利于空间分辨率的提高. 但该结论的前提是 MCP₂ 输出端电极浸没深度 $w\geq 2d$, 此时镀有电极的区域才能被视为等势区. 但即使满足 $w\geq 2d$ 的条件,镀有电极的区域仍然存在一定的电场,只是此时电场较小,其影响有限,此时降低 V_2 有利于提高相机的空间分辨率. 当 $w<2d$, 相机的空间分辨率随着 V_2 的降低获得的改善更小,甚至会由于电子在 MCP₂ 与荧光屏之间的渡越时间的增加而变差.

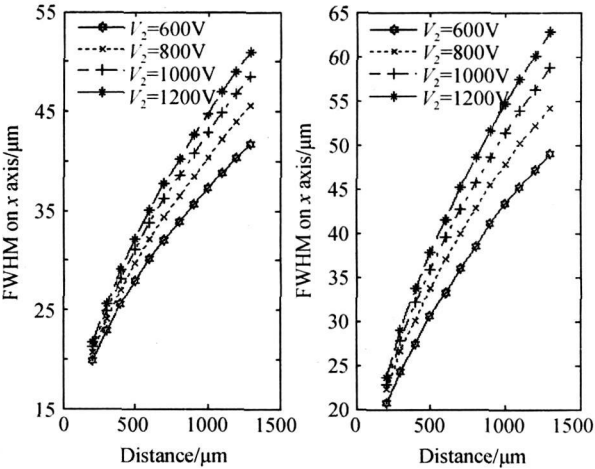


图 5 相同 V_2 下,电子在荧光屏上的空间分布半高宽随屏距的变化
Fig.5 FWHM of the electron distribution on phosphor screen vs. the distance from MCP₂ to the screen, V_2 is the voltage applied on MCP₂

5)输出端电极浸没深度 w 对相机空间分辨率的影响

输出端电极的浸没部分对电子束具有准直作用,因此增大输出端电极浸没深度 w 有利于提高相机的空间分辨率,图 6 证明了这一结论. 图中 $L=0.5\text{ mm}$, $d=12\text{ }\mu\text{m}$, $\theta=10^\circ$, $V_2=1\text{ }000\text{ V}$, $E_3=6\text{ }000\text{ V/mm}$. 从图 6 可见,随着输出端电极浸没深度的增加,相机 x 轴和 y 轴的空间分辨率都得到了显著改善.

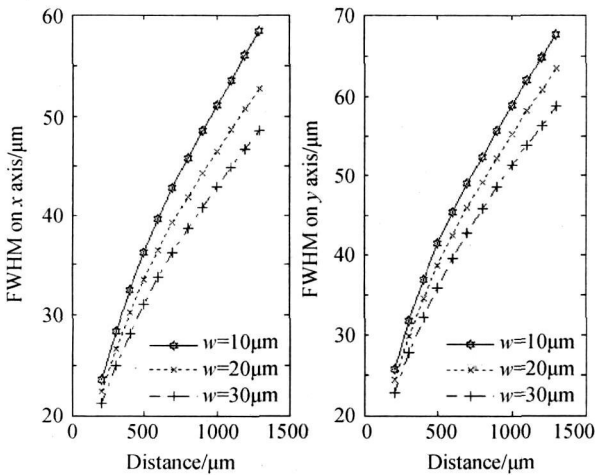


图 6 不同电极浸没深度 w 下,电子在荧光屏上的空间分布半高宽随屏距的变化
Fig. 6 FWHM of the electron distribution on phosphor screen vs. the distance from MCP₂ to the screen. w is the immersion depth of the electrode of MCP₂

6) MCP₂ 与荧光屏间电场 E_3 对相机空间分辨率的影响

从定性分析的角度不难预计,减小屏距 l 增加屏场 E_3 有助于减少电子在荧光屏上的弥散. 不同屏场 E_3 下,电子分布半高宽与屏距的关系如图 7. 图中 $L=0.5\text{ mm}$, $d=12\text{ }\mu\text{m}$, $\theta=10^\circ$, $w=30\text{ }\mu\text{m}$,

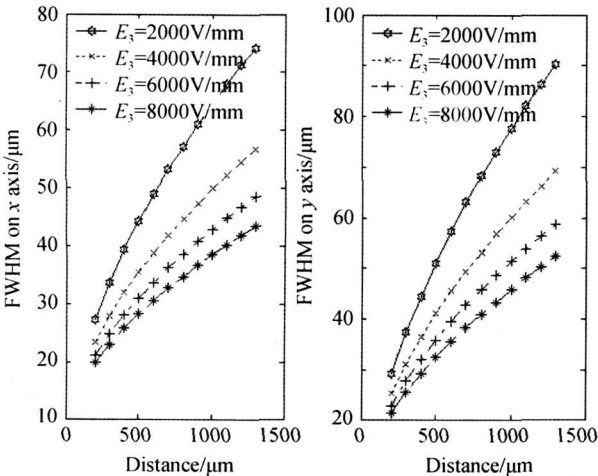


图 7 不同屏场下,电子在荧光屏上的空间分布半高宽随屏距的变化
Fig. 7 FWHM of the electron distribution on phosphor screen vs. the distance from MCP₂ to the screen. E_3 is the electronic field applied between MCP₂ and the screen

$V_2=1\text{ }000\text{ V}$,其规律与定性分析预计的相同. 从图中可以发现,随屏距的增加,电子的弥散呈抛物线状增加,这是因为电子在 MCP₂ 和荧光屏之间做抛物线运动. 随着屏场 E_3 的增加,电子的弥散并不是线性减小的,这是因为电子的弥散与渡越时间呈线性关系,而渡越时间与 $\sqrt{E_3}$ 呈近似线性关系,这导致通过提高屏场 E_3 实现空间分辨率的提高越来越困难. 从图中可见,减小屏距 W 增加屏场 E_3 对提高相机的空间分辨率具有重要意义,可以采用新型的荧光屏制作工艺,进一步减小屏距 W 增加屏场 E_3 ,以取得更好的空间分辨率.

3 结论

采用 Monte-Carlo 方法对电子在 V 型微通道板行波选通分幅相机的单通道中传输、碰壁及二次电子发射的整个过程进行了模拟,模拟结果印证了 MCP₂ 到荧光屏之间的距离 l ,场强 E_3 ,微通道孔径 d 以及输出端电极浸没深度 w 对相机空间分辨率影响的定性分析,揭示了 MCP 斜切角以及 MCP₂ 上的电压 V_2 对相机空间分辨率的影响,这有助于进一步提高相机的空间分辨率. 计算表明, V_1 对相机空间分辨率影响很小,因此,对于 V 型 MCP 选通分幅相机,在常用选通脉冲参量 $200\sim300\text{ ps}$, $600\sim1\text{ }000\text{ V}$ 作用下,可以不区分动、静态空间分辨率.

参考文献

[1] EBERHARDT E H. Gain model for microchannel plates[J]. *Appl Opt*, 1979, **18**(9): 1418-1423.
[2] 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.
[3] SHAN Bing, CHANG Zeng-hu, LIU Jin-yuan, et al. Gated mcp picosecond X-ray framing camera [J]. *Acta Photonic 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.
[4] CHANG Zeng-hu, SHAN Bing, LIU Xi-qin, et al. Picosecond X-ray framing camera using gated MCP [J]. *Acta Photonic 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] YANG Wenzheng, TIAN Jin-shou, HOU Xun, et al. Spatially resolved research of picosecond x-ray multiframe camera with gated microchannel plate [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2007, **36**(12): 2209-2214.
杨文正,田进寿,侯洵,等. 微通道板行波选通 X 射线皮秒分幅相机动态空间分辨率优化[J]. 光子学报, 2007, **36**(12): 2209-2214.
[6] GUI Jian-bao, ZHAO Bao-sheng. A soft X-ray double-mcp proximity focused, single frame camera [J]. *Acta Photonica*

Sinica, 2004, **33**(10), 1261-1264.

桂建保 赵宝升. 用于软 X 射线光谱探测的双 MCP 近贴单幅相机[J]. 光子学报, 2004, **33**(10), 1261-1264.

[7] HENKE B L, SMITH J A. 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.

[8] HILL G E. Secondary electron emission and compositional studies on channel plate glass surface [J]. *Advances in Electronics and Electron Physics*, 1976, **40A**, 153-165.

[9] WANG Jin-xiang. Development of MCP manufacturing goass [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1986, **14**(4), 29-33.

汪金祥. 制造微通道板用玻璃的发展[J]. 光子学报, 1986, **14**(4), 29-33.

[10] GUEST A J. A computer model of channel multiplier plate performance[J]. *Acta Electronics*, 1972, **14**(1), 99-100.

[11] HOU Ji-dong. Theory of picosecond framing camera with gated Microchannel plate[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 1995, 16.

侯继东. MCP 皮秒选通相机的理论[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 1995, 16.

Monte-Carlo Simulation of Dynamic Spatial Resolution of Picosecond X-ray Framing Camera with Gated Microchannel Plate

ZOU Feng^{1,3}, HOU Xun^{1,2}, YANG Wen-zheng^{1,3}, TIAN Jin-shou¹, BAI Yong-lin¹, LIU Bai-yu¹

(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 College of Electronic and Information Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received date: 2007-04-13

Abstract: Monte-Carlo method was used to simulate the whole courses of electronic transportation, collision and secondary emission in a single channel of a picosecond X-ray framing camera with a V-type double MCP structure and by gating a microchannel plate. Influences of some parameters of the framing tube to the dynamic spatial resolution of the camera were qualitatively analyzed demonstrated. The influence of chamfer angle of MCP and the voltage applied on MCP₂ to the dynamic spatial resolution of this type of framing camera were uncovered were present. The result of this simulation demonstrates that the dynamic and static resolution of this kind of framing camera are almost the same.

Key words: Microchannel Plate; Framing camera; Monte-Carlo method; Dynamic spatial resolution



ZOU Feng was born in 1981 and received the B.S. degree from Xi'an Jiaotong University in 2004. He is pursuing his M.S. degree at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences.