

微通道板选通 X 射线皮秒分幅相机 曝光时间的均匀设计^{*}

杨文正¹, 侯洵^{1,2}, 白永林¹, 白晓红¹, 田进寿¹, 刘百玉¹,
赵军平¹, 秦君军¹, 欧阳嫻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 西安交通大学 电信学院, 西安 710049)

摘 要:将均匀设计法应用于微通道板选通 X 射线皮秒分幅相机(MCP—XPFC)曝光时间的研究工作中, 目的是找到一个简单高效的试验预估方法来指导分幅相机的研制和试验工作. 基于分幅相机皮秒动态选通理论模型, 建立了采用 0.5 mm 厚、长径比 40 的 MCP 的皮秒分幅相机选通脉冲参量与曝光时间之间的快速预估模型. 利用这一模型得出了相机的曝光时间随选通脉冲脉宽和幅值分别呈抛物线变化, 且脉宽和幅值对曝光时间具有交互影响作用. 在试验参量范围内, 此预估模型能够精确地代替相机理论模型和高效地指导实验. 通过实验验证了预估模型, 并分析了影响结果的因素.

关键词:微通道板; X 射线分幅相机; 曝光时间; 均匀设计

中图分类号: TB872 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2008)03-0439-5

0 引言

微通道板 (Microchannel Plate, MCP) 选通 X 射线皮秒分幅相机(MCP—XPFC)是惯性约束聚变(ICF)、同步辐射、Z 箍缩等离子体、直线型加速器的光束测量等研究的重要的高时空超快诊断设备, 其时、空分辨能力是最受关注的两项指标. 它主要受选通脉冲的宽度、幅度、形状以及 MCP 特性的影响和制约^[1-4]. 文献[4]根据所建立的理论模型定性地探讨了高斯型选通脉冲的脉宽和幅值对曝光时间的影响, 认为在峰值电压不变的条件下, 减少脉宽可以缩短曝光时间, 但并非线性变化. 在电脉冲较宽时, 增益窄化效应更强; 电脉冲宽度在 400 ps 以下时, 提高峰值电压有利于缩短曝光时间. 但是该文并没有讨论非线性变化的实质、脉宽和幅值对曝光时间是否具有交互作用, 以及它们对曝光时间的获得有何影响. 如果将两因素各分为 20 个试验点, 则至少需要进行 $20^2=400$ 次数值计算, 计算工作量很大, 使用试验来预估分幅相机的最佳工作参量更是不可能的.

均匀设计 (Uniform Design) 是一种试验设计方法. 它由方开泰教授和数学家王元在 1978 年共同提出, 属于近 30 年发展起来的“伪蒙特卡罗方法”的范

畴, 是只考虑试验点在试验范围内均匀散布的一种试验设计方法, 适用于多因素、多水平的试验设计场合. 将均匀设计法应用于试验预估中, 首先将试验输入参量分成 n 个水平 (通常大于 10), 设计出 n 组不同的输入参量, 按照系统模型 (理论或实验模型) 精确算出输出参量, 利用多元统计分析方法 (例如回归分析), 在输入和输出参量之间建立一种简单的预估关系, 通过这个关系, 可以极其快速地算出输出参量, 并达到要求准确度, 从而将一个复杂的工程问题简单化^[5]. 试验设计的目的是揭示变量 (Y) 与各因素之间的定性关系, 二是寻求最优的工艺条件. 回归方程的建立能够同时达到这两个目的^[5].

如果将均匀设计法用于 MCP—XPFC 的曝光时间研究中, 找到一个简单高效的试验预估方法, 在减少计算工作量的同时又能获得一个最优的分幅相机工作参量方程, 得到最优解, 并根据方程探讨各参量对曝光时间的直接影响以及参量之间的相互影响, 这对分幅相机的研制和试验工作具有重要的指导意义.

1 微通道板分幅相机皮秒动态选通模型

应用均匀设计法, 首先需要建立一个系统模型, 即 MCP—XFC 的皮秒动态选通模型. MCP—XPFC 的曝光时间主要是指 MCP 分幅管在皮秒短脉冲的选通作用下的增益时间曲线的半高全宽值 (FWHM), 在不考虑 MCP 特性参量的情况下, 曝光时间主要受选通脉冲的脉宽和幅值的影响^[4].

1.1 阴极光电子的蒙特卡洛统计

^{*} 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项目 (批准号: 2003AA843130) 资助
Tel: 029-88887613-8623 Email: ywz@opt.ac.cn
收稿日期: 2007-05-30

对首次碰撞而言,入射电子主要是阴极产生的光电子.文献[6]证明倍增电子在通道内的碰撞次数不仅与 MCP 上所加电压 V_m 有关,而且与首次碰撞的电子(或光电子)的初能量也有直接的关系.光阴极选用 Au 阴极,文献[7]通过实验和计算给出了 X 射线所激发的 Au 阴极的光电子能量分布,如图 1.该曲线可用 $f(E_k) = A \frac{E_k}{(E_k + 3.7)^4}$ 表示. Au 阴极直接制作在微通道板输入面上,光电子没有经过加速直接进入通道,其光电子发射能量满足上式,发射角满足余弦分布.利用蒙特卡洛(Monte-Carlo, M-C)方法模拟得到 Au 阴极光电子的发射能量曲线及发射角余弦分布曲线如图 2.

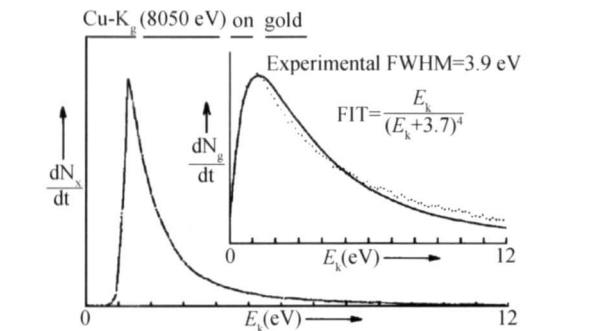


图 1 Au 阴极的光电子能量分布
Fig. 1 The electron distributions from gold photocathode

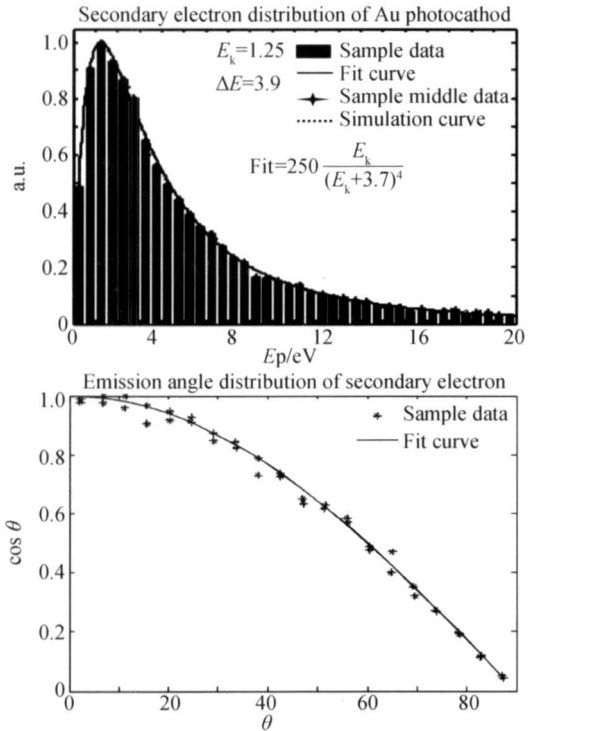


图 2 Au 阴极光电子发射的能量与发射角分布
Monte-Carlo 抽样曲线
Fig. 2 The Monte-Carlo sampling curve of the electron distribution and emission angle from gold photocathode

1.2 通道内二次电子皮秒动态倍增模型

为减少计算量,仅对阴极光电子进行 M-C 抽

样.进入通道内倍增的电子在窄脉冲的作用下,每次碰撞过程按 MCP“直流倍增模型”考虑^[8],以一个微通道为分析模型(管道长 L ,管道直径 D),如图 3.

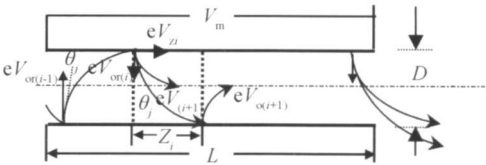


图 3 微通道中电子倍增模型
Fig. 3 Model of electron gain in micro channel pore
模型认为:在 MCP 的电子倍增过程中,电子在掠入射条件下,二次电子运动的平均径向发射能量 eV_{or} 和轰击的电子能量 eV 成正比关系

$$eV_{or} = eV/4\beta^2 \tag{1}$$

其中 β 是无量纲的比例常量,确切值与 MCP 材料和制作工艺有关.

设 MCP 上施加高斯型高压选通电脉冲 V_m (峰值为 V_{mp} ,脉冲的半高全宽 FWHM 为 T_n),即

$$V_m(t) = V_{mp} \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{t - T_n}{T_n} \right)^2 \right]$$
$$t \in [0, 2T_n] \tag{2}$$

首次二次电子发射为阴极产生的光电子, ϵ 为光电子能量分布 M-C 抽样值,发射角余弦值为 $j_{\cos}$,正弦值为 $j_{\sin}$

$$\text{首次径向发射能量 } V_{or(1)} = \epsilon \cdot j_{\cos} \tag{3}$$

$$\text{首次轴向发射能量 } V_{ax(1)} = \epsilon \cdot j_{\sin} \tag{4}$$

t_0 为光子入射到 MCP 入射面的时刻,以下讨论均忽略光电子和二次电子产生的时间.

$$\text{碰撞时刻有 } t_1 = t_0 + D / \sqrt{2V_{or(1)}/m} \tag{5}$$

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, $V_{or(i-1)}$, $V_{ax(i-1)}$ 分别表示第 $i-1$ 次碰撞产生的二次电子的径向发射能量和轴向发射能量, $V_{r(i)}$, $V_{z(i)}$ 分别表示第 i 次碰撞时的径向碰壁能量和轴向碰壁能量, e 和 m 分别表示电子的电荷量和质量,如图 3,则对第 i 次碰撞有

$$\text{电子径向碰壁能量 } V_{r(i)} = V_{or(i-1)} \tag{5}$$

$$\text{电子轴向碰壁能量}$$

$$V_{zi} = \frac{1}{2} m \left[\left(\sqrt{\frac{2V_{or(i-1)}}{m}} + \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{e}{mL} V_m(t) dt \right)^2 \right] \tag{6}$$

$$\text{碰壁总能量为 } V_i = \sqrt{V_{or(i-1)}^2 + V_{zi}^2} \tag{7}$$

$$\text{碰壁时刻 } t_i = t_{i-1} + D / \sqrt{(2V_{or(i-1)}/m)} \tag{8}$$

此次碰撞产生的二次电子发射系数

$$\delta_i = (V_i/V_e)^k \tag{9}$$

V_e 表示微通道板第一跨越电位, k 表示整个工作电压范围内的二次电子发射曲线速率.

轴向位移为

$$Z_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \sqrt{\frac{2V_{\text{oe}(i-1)}}{m}} dt + \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{e \int_{t_{i-1}}^{t_i} V_m(t) dt}{mL} t dt \quad (10)$$

碰撞产生的第 $i+1$ 次二次电子发射能量为

$$V_{\text{o}(i+1)} = V_i / 4^\beta \quad (11)$$

为方便计算,二次电子的发射角选取同光电子同样的余弦分布 M-C 抽样.

则第 i 次二次电子径向发射能量为

$$V_{\text{or}(i+1)} = V_{\text{o}(i+1)} j_{\cos} \quad (12)$$

轴向发射能量为 $V_{\text{oz}(i+1)} = V_{\text{o}(i+1)} j_{\sin}$ (13)

此时,第 j 个抽样光电子产生的 MCP 的倍增增益为 $G_j = \prod_{i=1}^j \delta_i$ (14)

n 个抽样光电子产生的 MCP 的平均总增益为

$$\bar{G} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n G_i \quad (15)$$

此模型计算中,MCP 的特征参量选取参考文献

[8]的数值: $\beta=2.4, V_e=29.4 \text{ eV}, k=0.75, L=0.5 \times 10^{-3} \text{ m}, D=12.5 \times 10^{-6} \text{ m}$,并且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,则电子渡越出 MCP.

由此可依次计算出各级倍增过程中的碰撞时刻、碰撞时的轰击能量、碰撞产生的二次电子初能量、二次电子发射系数、碰撞的轴向位移以及电子总增益等参量.

2 微通道板分幅相机的均匀设计模型

基于上述微通道板分幅相机皮秒选通理论模型,选通脉冲脉宽(水平 1)参考 MCP 中电子渡越时间及其弥散量,选取 $170 \text{ ps} \sim 255 \text{ ps}$,幅值(水平 2)参考 MCP 分幅管实验参量,选取 $700 \text{ V} \sim 1\,200 \text{ V}$,均分为 18 个试验水平,设计目的是计算 MCP—XPFC 的时间分辨率.均匀设计表选择文献[5]

表 1 微通道板皮秒选通分幅相机工作参量均匀设计表																		
次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
水平 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
脉宽/ps	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235	240	245	250	255
水平 2	8	16	5	13	2	10	18	7	15	4	12	1	9	17	6	14	3	11
幅值/V	925	1 125	850	1 050	775	975	1 175	900	1 100	825	1 025	750	950	1 150	875	1 075	800	1 000
时分/ps	53.65	52.99	57.47	56.29	61.49	59.72	60.85	63.45	63.99	67.31	67.32	71.36	70.84	73.12	74.55	76.29	78.44	79.65

A1.20U₁₈*表($D=0.077\,9$),总共进行 18 次计算.

采用二元逐步回归法,建立关于曝光时间的回归方程(14)

$$Y = 98.467\,732\,3 - 0.139\,894\,6 \times T - 0.100\,883\,7 \times V + 6.472 \times 10^{-4} \times T^2 + 1.842 \times 10^{-4} \times T \times V + 2.88 \times 10^{-5} \times V^2 \quad (14)$$

相关系数 $R^2=0.999\,9$,标准差 $S=0.094\,6$,检验阈值 $F=0.01$.

表 2 回归方程拟合值和残差值表									
次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
拟合值	53.642 18	52.970 32	57.464 22	56.293 97	61.462 79	59.794 13	60.826 32	63.470 81	64.004 59
残差值	0.007 82	0.019 68	0.005 78	−0.002 97	0.027 21	−0.074 13	0.023 68	−0.020 81	−0.014 59
次数	10	11	12	13	14	15	16	17	18
拟合值	67.324 00	67.359 39	71.353 72	70.890 70	73.128 52	74.250 64	76.337 95	78.482 87	79.723 89
残差值	−0.014 00	−0.039 39	0.006 28	−0.050 70	−0.008 52	0.299 36	−0.047 95	−0.042 87	−0.073 89

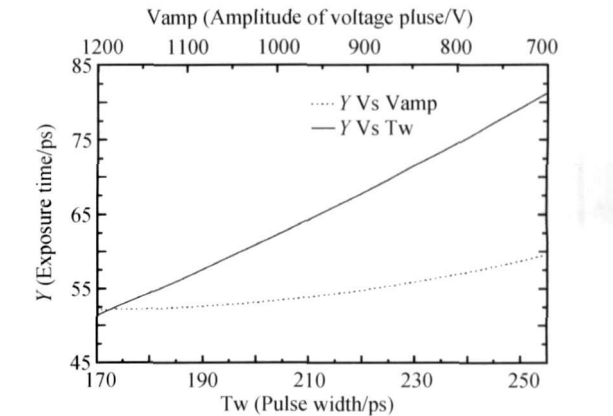
由上表可知预估模型与理论模型计算值的残差值在 ± 0.3 范围内.该方程仅在试验范围内成立,寻求最优模型等价于在这个范围内求方程中 $\hat{Y}$ 的极值.求曝光时间 $\hat{Y}$ 的极小值,得到最优条件为 $T_{\min}=170 \text{ ps}$, $V_{\max}=1\,175 \text{ V}$ 时,得到最优解为 $Y_{\min}=51.345\,2 \text{ ps}$,分别取最优条件 $T_{\min}$ 和 $V_{\max}$ 时,做 $\hat{Y}$ 随另一变量的变化曲线,如图 4.

$V_{\max}=1\,175 \text{ V}$ 时, $Y_T = 19.691\,384\,8 + 7.654\,04 \times 10^{-2} \times T + 6.472 \times 10^{-4} \times T^2$ (15)

$T_{\min}=170 \text{ 时}, Y_V = 94.170\,030\,3 - 0.069\,569\,7 \times V + 2.88 \times 10^{-5} \times V^2$ (16)

可见文献[4]所说的非线性变化实质是抛物线

型变化.令 $R_1 = \left| \frac{d^2 Y_T}{dT^2} \right| = 12.944 \times 10^{-4}$, $R_2 = \left| \frac{d^2 Y_V}{dV^2} \right| =$



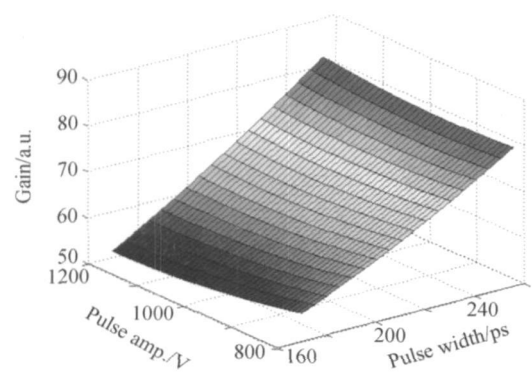


图 4 曝光时间 $\hat{Y}$ 的变化 2D、3D 图
Fig.4 2D and 3D change curve of the exposure time

0.576×10^{-4} , R_1 和 R_2 表示了抛物线变化的缓急, 值越大表示曲线变化愈快. 在试验条件范围内 $R_1 > R_2$, 可知降低脉宽相比增大脉冲幅值对提高曝光时间更显著. 但是两值都非常小, 说明抛物线变化非常缓慢.

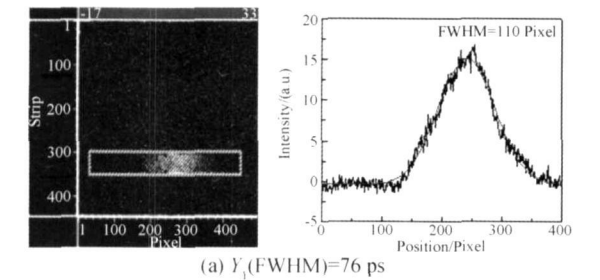
除了上述在一定的试验水平下单变量的抛物线型变化趋势之外, 回归方程中还含有二阶 $T \times V$ 项, 这表明两因素对回归模型的 Y 响应还具有交互影

响作用. 说明脉宽所引起的曝光时间变化的大小与脉冲幅值取什么试验水平有关. 反之, 脉冲幅值的变化对曝光时间的影响也与脉宽取什么试验水平有关.

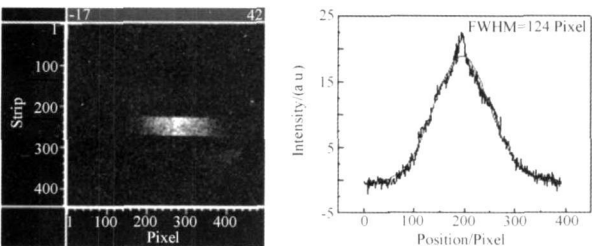
3 微通道板分幅相机动态选通实验结果

选取选通电脉冲 V_1 (250 ps, -2.5 kV) 和 V_2 (170 ps, -2.8 kV), 微带线阻抗 15 欧姆, 实际加载在分幅相机 MCP 微带线上的脉冲幅值, V_1 脉冲约 1 200 V, V_2 脉冲约 1 400 V, 代入回归方程分别得到曝光时间 $Y_1 = 79.612$ ps, $Y_2 = 52.44$ ps.

实验激光光源是西北核技术研究所 KrF₂ 准分子激光器, 波长 248.8 nm, 脉宽 500 fs, 能量 2~4 mJ, 重复频率 0.5~2 Hz 可调. 图像记录系统为美国普林斯顿仪器公司 (PI) 的 Very Array 2 048×2 048 型 CCD. 根据选通脉冲在微带上的传输速度, 计算知 CCD 采集图像上 1 个像素代表 0.694 ps (1 Pixel = 0.694 ps). 加载不同选通脉冲获得的曝光时间图像及其强度曲线与高斯拟和结果如图 5、图 6.

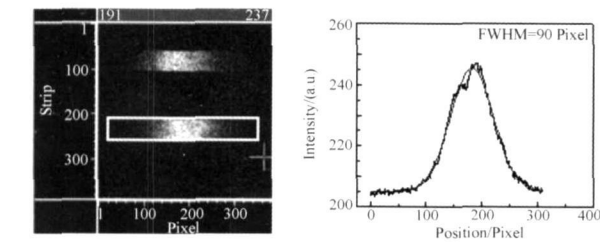


(a) Y_1 (FWHM)=76 ps

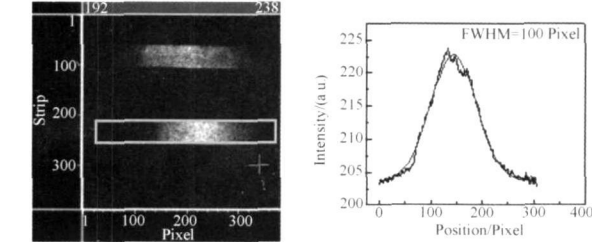


(b) Y_1 (FWHM)=86 ps

图 5 加载选通脉冲 V_1 获得的曝光图像及其强度曲线与高斯拟合曲线
Fig.5 Experimental image and intensity curves acquired by gating pulse V_1



(a) Y_2 (FWHM)=62 ps



(b) Y_2 (FWHM)=69 ps

图 6 加载选通脉冲 V_2 获得的曝光图像及其强度曲线与高斯拟合曲线
Fig.6 Experimental image and intensity curves acquired by gating pulse V_2

长脉冲实验结果和理论计算结果基本吻合, 但短脉冲两者差异较大. 误差总的来说可能受以下因素的影响:

- 1) 理论模型中 MCP 选取的特性参量 β , V_c , k 和实验使用的 MCP 的参量不一致;
- 2) 理论仿真中抽样的光电子的数目恒定, 能量满足给定的分布, 实验中激光的均匀性和能量起伏对分幅相机的曝光时间有一定的影响;
- 3) 实验采用 248.8 nm 的激光做为光源, 其产生的阴极二次电子能量分布和理论模型采用的是 X 射线轰击 Au 阴极产生二次光电子能量分布不完全

- 一致;
- 4) 电脉冲的动态传输过程中会有一定程度的幅度衰减和波形的展宽;
- 5) 实验中, 首次电子碰撞时间点 t_0 是由激光光源的脉宽 (500 fs) 和选通脉冲的同步时间决定; 而理论模型中 t_0 在 $[0, 2T_n]$ 内, 这会导致选通脉冲在整个积分区域内的平均选通电压值和实际加载电压值不符;
- 6) 由于 0.5 mm MCP 中的电子渡越时间弥散约 60~80 ps, 因此电子渡越时间弥散对 170 ps 的窄脉冲影响更大, 它限制了相机的最小时间分辨率.

4 结论

将均匀设计方法引入 MCP-XPFC 的研究中,用建立的预估模型能够准确地代替理论模型,且更简便直观地揭示变量与各因素之间的定性关系以及获得最优工艺条件,最终用于指导具体工作,提高效率.其最大的优点是免去了大量繁琐的组合计算工作和试验参量的盲目选择,但是此预估模型并非普适公式,而是基于特定条件下所建立的分幅相机选通模型的,而研究分幅相机特性的模型有很多^[4,8-10],建立怎样的系统基本模型要根据具体的研究对象而定.基本模型参量、因素水平、均匀设计表等的选取要根据实际情况而定.

致谢 感谢西安近代化学研究所火炸药燃烧国防重点实验室在均匀设计方面的理论指导和帮助以及西北核技术研究所高功率激光实验室提供的激光实验条件.

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 Wen-zheng, 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的优化[J]. *光子学报*, 2007, **36**(12):2209-2214.

[4] CHANG Zeng-hu. Numerical simulation of picosecond voltage pulse gated microchannel plate [J]. *Acta Photonic 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.

[5] FANG Kai-tai. Uniform designs and uniform designs charts [M]. Beijing: Science Press, 1994:33, 77.

方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 科学出版社, 北京:1994:33, 77.

[6] CHANG Zeng-hu. The first collide question of gain model with microchannel plate[J]. *Acta Photonic Sinica*, 1995, **24**(4):318-342.

常增虎. 微通道板增益模型的首次碰撞问题[J]. *光子学报*, 1995, **24**(4):318-342.

[7] 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.

[8] EBERHARDT E H. Gain model for microchannel plates [J]. *App Opt*, 1979, **18**(9):1418-1423.

[9] BELL P M, HAMMEL B A, KILKENNY J D, et al. Modeling and measurements of sub 100 ps gating with microchannel plates[J]. *SPIE*, 1989, **1155**:415-421.

[10] ITO M, KUME H, OBA K. Computer analysis of the timing properties in micro-channel plate photomultiplier tubes [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1984, **NS-31**(1):409-412.

Uniform Design Method of the Exposure Time of X-ray Picoseconds Framing Camera with Gated Microchannel Plate

YANG Wen-zheng¹, HOU Xun^{1,2}, BAI Yong-lin¹, BAI Xiao-hong¹, TIAN Jin-shou¹,
LIU Bai-yu¹, ZHAO Jun-ping¹, QIN Jun-jun¹, OUYANG Xian¹

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

Received date:2007-05-30

Abstract: The Uniform Design method is applied for the research of the X-ray Picoseconds Framing Camera with gated MCP (micro-channel plate), shortened form MCP-XPFC. On the bases of the theoretical models of picoseconds (ps) voltage pulse gated MCP-XPFC ($L = 0.5\text{ mm}$, $L/D = 40$), the fast forecast model of exposure time of MCP-XPFC is put forward. It can accurately replace the theoretical models within the range of experimental parameter and highly enhance the work efficiency. The curves of exposure time versus the width and amplitude of picoseconds high voltage pulse respectively are all the parabola type and there are the interaction on exposure time induced by the width and amplitude of gated pulse. The forecast model is checked by using two groups gated experimental pulses and the error is analyzed at last of this paper.

Key words: Microchannel plate (MCP); X-ray framing camera (XFC); Exposure time; Uniform design



YANG Wen-zheng born in 1975. She received the B.S. degree from the Electronic Science Technology Department of the Northwest University in 1997 and the M.S. degree in physical electronics from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics (XIOPM), CAS, in 2003. Now she is working and 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.