

# 微通道板皮秒选通特性的数值模拟

常增虎

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室 710068)

**摘要** 运用“能量正比假设”对微通道板在皮秒高压脉冲下的特性进行了模拟,发现光电子的倍增次数与光子的入射时刻有关,不能被视为常数.研究了快门脉冲的幅度,宽度和反向偏压对选通特性的影响.曝光时间最终受到选通图象信噪比的限制.

**关键词** 微通道板;皮秒;分幅摄影

## 0 引言

微通道板(MCP)可以作为快门元件用于高速摄影变象管中<sup>1~6</sup>,当对MCP加上一定电压时,电子图象即通过它,曝光时间与电压脉冲的宽度有关.与阴栅快门、偏转快门等其它实现电子图象瞬时曝光的方法相比,用MCP快门易于获得更高的空间分辨率、极小的图象几何畸变和很高的时间分辨率.近年来采用微带线结构对MCP施加皮秒高压电脉冲,已发展了曝光时间约100ps的实用化皮秒分幅相机<sup>7</sup>.

对激光核聚变等物理现象的研究要求分幅相机具有更高的时间分辨率,虽然用特种MCP在实验室得到30ps的曝光时间,但信噪比差<sup>7</sup>.为了进一步改善实用化相机的性能,在保持较高的信噪比的前提下缩短曝光时间,必须对MCP在ps高压脉冲下的选通特性有深入的了解.已见到的基于“能量正比假设”<sup>8</sup>.对此特性的数值模拟<sup>7,9</sup>都假定电子倍增次数恒定.然而这一假定缺乏充分的依据.本文没有作这样的假定,而是直接运用“能量正比假设”,通过追踪入射光子在通道入口产生的光电子以及光电子在通道内的倍增过程,研究了MCP的选通特性.

## 1 模拟方法

用MCP作快门的ps分幅管主要由MCP和荧光屏构成,MCP与荧光屏之间加有恒定电压,使得从MCP出来的电子近贴聚焦到荧光屏上,在MCP的输入面镀有对X射线敏感的反射式光阴极,ps高压脉冲通过以MCP为电介质的微带线加在MCP的两个面上.

MCP快门的曝光量和曝光时间可由其增益随时间的变化 $G(t)$ 表示, $t$ 是以高压脉冲的峰值所对应的时刻为参考点的光子入射时间.设光电子在通道内每次倍增的二次发射系数为 $\delta_i$ ,则

$$G(t) = \prod_{i=1}^n \delta_i \quad (1)$$

其中 $n$ 为倍增次数, $i=1$ 对应于光子与MCP的作用, $\delta_1$ 对应于光阴极的量子产额,它与光子的能量有关.在以下的模拟中取 $\delta_1=1$ ,这样计算的结果很容易折算到不同光子能量的情况.

当 $i>1$ 时

$$\delta_i = (V_i/V_c)^k \quad (2)$$

式中 $V_c$ 和 $k$ 为与MCP材料和制作工艺有关的常数. $V_i$ 为电子碰撞通道壁的能量,如果能计算出 $V_i$ ,则可得到 $G(t)$ .

收稿日期:1994-06-03

假定 MCP 的厚度为  $L$ , 单通道直径为  $D$ , 输入面镀有金阴极, 入射光子的能量在  $0.1 \sim 10 \text{keV}$ , 则光电子的初能量最可几值为  $1.3 \text{eV}$ , FWHM 值为  $3.8 \text{eV}$ , 且光电子的初能量分布可近似表示为

$$N(E_1) = 6W^2 E_1 / (E_1 + W)^4 \quad (3)$$

其中  $E_1$  为光电子的能量,  $N$  为归一化光电子数,  $W = 3.7 \cdot 10^{-10}$  为简化运算, 假设所有光电子和二次电子都垂直于通道壁表面发射.

设在 MCP 两面间加上峰值为  $V_p$ 、FWHM 值为  $\Delta t$  的高斯型脉冲电压  $V_{\text{MCP}}(t) = V_p * \exp[-4 \ln 2 (t/\Delta t)^2]$ , 并加有直流偏置电压  $V_d$ , 则光电子经通道内电场加速后碰撞 MCP 壁的能量为

$$V_2 = 0.5 e^2 / (mL^2) \left[ \int_{t_1}^{t_2} (V_{\text{MCP}}(t) + V_d) dt \right]^2 \quad (4)$$

式中  $e$  和  $m$  分别为电子的电荷量和质量,  $t_1$  为光子入射到 MCP 输入面的时刻,  $t_2$  为光电子与通道壁相撞的时刻, 即

$$t_2 = t_1 + D / \sqrt{(2E_1/m)} \quad (5)$$

取 MCP 输入面为轴向位置座标的起始点, 则光电子碰壁时的轴向的位置为

$$Z_2 = e / (mL) \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} (V_{\text{MCP}}(\tau) + V_d) d\tau dt \quad (6)$$

应用“能量正比假设”可得到光电子打出的二次电子的初能量

$$E_2 = V_2 / (4\beta^2) \quad (7)$$

$\beta$  是由 MCP 决定的常数.

由此可计算出二次电子碰壁的能量、时间和轴向位置以及随后各次倍增过程的相应值, 直至二次电子射出 MCP. 将每次碰撞的电子能量值代入式(2)算出二次发射系数, 再把后者代入式(1)即可得到不同时刻入射光子的增益.

## 2 模拟结果

我们使用的微通道板的厚度  $L = 0.5 \text{mm}$ , 通道直径  $D = 12.5 \mu\text{m}$  (长径比  $\alpha = 40$ ), 斜切角  $\varphi = 10^\circ$ . 在直流情况下测得的不同电压下的增益如图1所示, 从电子源来的电子到达 MCP 的能量  $V_1$  为  $800 \text{V}$ . 在模拟时首先要选取 MCP 的特片参数  $\beta$ 、 $V_c$ 、 $k$  和  $V_s$ , ( $V_s$  用于入射电子能量较大时对能量正比假设的修正, 即当  $V_1$  较大时要计算  $E_1$ , 则式(7)应由

$$(E_1 = V_s / (4\beta^2) (1 - \exp(-V_1/V_s)))$$

取代<sup>11)</sup>用上述模拟方法先计算直流下的增益, 对实验数据进行拟合. 选定的值和拟合结果也见图1.

针对这种参数的 MCP, 计算出的一个典型的加选通电压后的增益曲线如图2所示, 可以看出, 增益曲线的宽度比电压脉冲的宽度要窄得多, 这是由于 MCP 的增益随电压增加呈非线性增长所引起的. 另外, 由于 MCP 中的电子渡越时间效应, 增益曲线的峰值所对应的时间超前于电压脉冲峰值的时间.

图3给出了与图2相同条件下得到的电子倍增次数与光子入射时间的关系, 先到的光子对应的倍增次数少, 倍增次数曲线的形状与电压波形的左半部相似. 引言部分已指出, 在文献7、9的模拟中假设倍增次数恒定不变, 这是不合适的. 事实上, 即使在直流情况下, 倍增次数也是随板电压而变的<sup>11)</sup>.

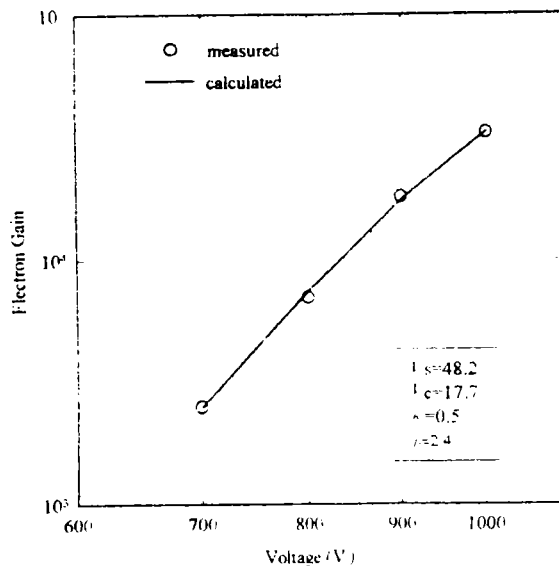


图1 针对  $\alpha=40$ 、 $\varphi=10^\circ$  MCP 计算出的静态增益随板电压的变化(实线)与入射能量  $V_1=800\text{eV}$  下实测值(用  $\circ$  标出)的比较

Fig. 1 Calculated MCP gain vs. voltage (solid lines) and measured data (plotted points) at  $V_1=800\text{eV}$  for MCP of  $\alpha=40$  and  $\varphi=10^\circ$

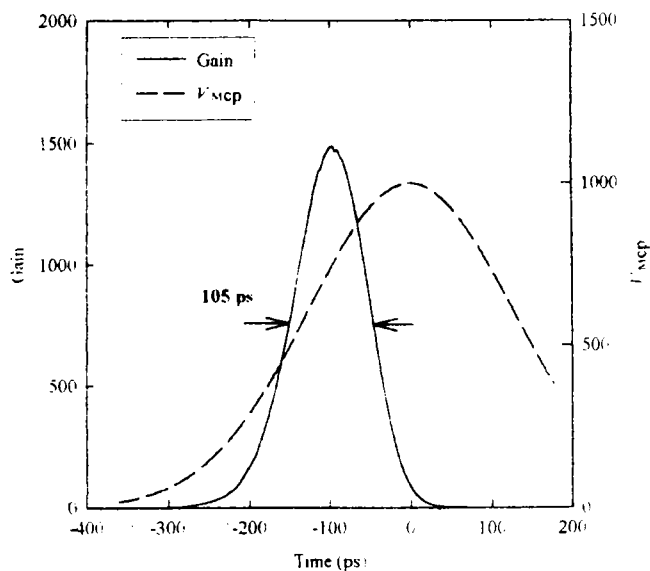


图2 MCP 动态增益与所加电压脉冲的比较, 电脉冲的宽度(FWHM)值为300ps

Fig. 2 Comparison of the dynamic gain with the voltage pulse applied on the MCP, the FWHM of the voltage pulse is 300ps

从定性分析的角度不难预计,减小选通电压的宽度可以缩短曝光时间.不同峰值电压下的曝光时间与电脉冲宽度的关系如图4所示,其规律与定性分析预计的并不矛盾.从图中可以发现,随着电脉冲的变窄,曝光时间的减小并不是线性的,在电脉冲较宽时,曲线的斜率大,增益压窄效应更强.在相同电压脉冲宽下,峰值电压对曝光时间也有一定影响,当电脉冲的宽度在400ps以下时,提高峰值电压有利于缩短曝光时间.

必须指出的是,虽然减小电脉冲的宽度可以缩短曝光时间,但这也会导致峰值增益的降低,如图5所示.由于渡越时间效应,当电脉冲短到一定程度后,增益降低的斜率变陡.在分幅相机中,MCP的增益不

能太低,否则萤光屏后的图象记录胶片上不能得到足够的感光.如果在作为快门的MCP后再放一块加直流电压的MCP<sup>4,7,9</sup>用于图象增强,快门MCP的增益也不能太低,否则穿过快门MCP的X射线在后一块MCP上产生的光电子的数目将会和从快门MCP来的二次电子数目相当,导致图象信噪比变差<sup>7</sup>.在图5中标出了MCP对两种光子能量的X射线的透过率(也用增益表示,100%的透过率等效于增益等于1),可见对于9.88eV的X射线,要得到信噪比优于10:1的图象,快门MCP的增益不能低于2.

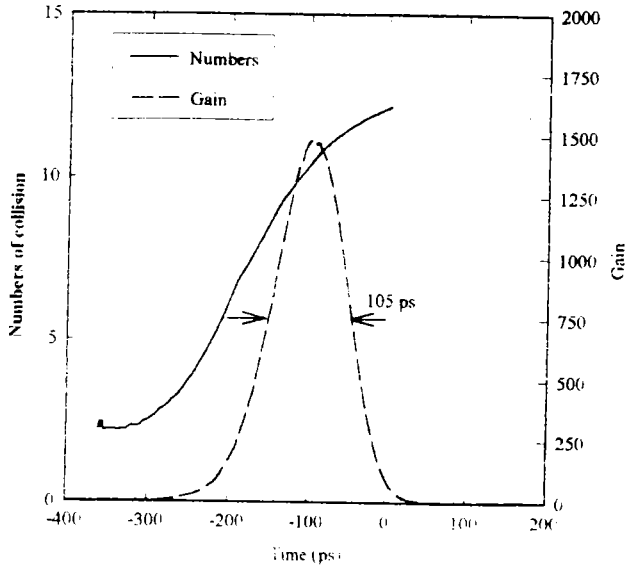


图3 300ps(FWHM)选通电脉冲下电子倍增次数与光子入射时刻的关系

Fig. 3 Numbers of electron collision on the channel wall of the MCP which is gated by the voltage pulse of 300 ps (FWHM)

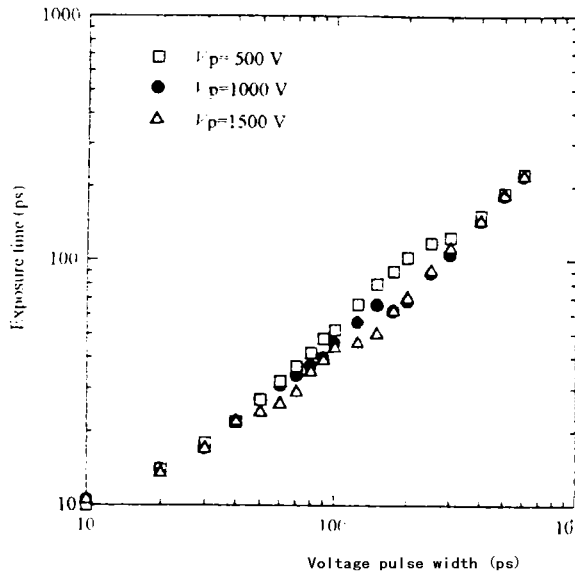


图4 不同峰值电压 $V_p$ 下曝光时间随电脉冲宽度的变化

Fig. 4 Exposure time vs. the width of the voltage pulses applied on the MCP,  $V_p$  is the peak amplitude of the pulses

提高峰值电压可增加峰值增益,这一点不难理解.但图5显示出随着电脉冲宽度的减小,不同峰值电压下峰值增益的差别也减小.因此,依靠缩短电脉冲宽度的方法来缩短曝光时间,最终将受到输出信号的强度和信噪比的限制.

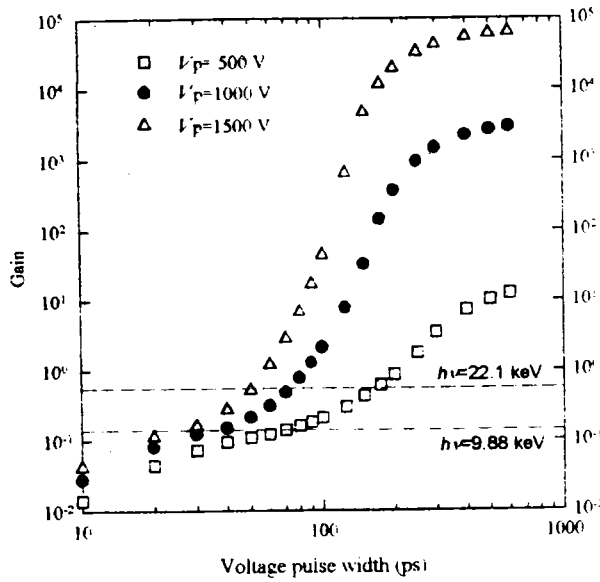


图5 不同峰值电压  $V_p$  下峰值增益随电脉冲宽度的变化, 两条直线标出的是两种不同光子能量 ( $h\nu$ ) 的 X 射线对 MCP 的透过率

Fig. 5 Gain vs. the width of the voltage pulses applied on the MCP,  $V_p$  is the peak amplitude of the pulses. The two straight lines show the transimission of X-ray through the MCP,  $h\nu$  is the photon energy of the X-ray.

在选通 MCP 时, 同时叠加反向恒定偏置电压等效于缩短电脉冲的宽度, 因而也可以减小曝光时间. 图6给出了不同峰值电压下半宽度为300ps 的电脉冲叠加偏压对曝光时间的影响. 有意思的是, 曝光时间随偏压的变化并不是单调的, 这是因为增大偏压的另一个效应是等效于峰值电压的减小, 而图4已表明曝光时间与峰值电压也有关. 增大偏压也引起增益的下降, 如图7所示.

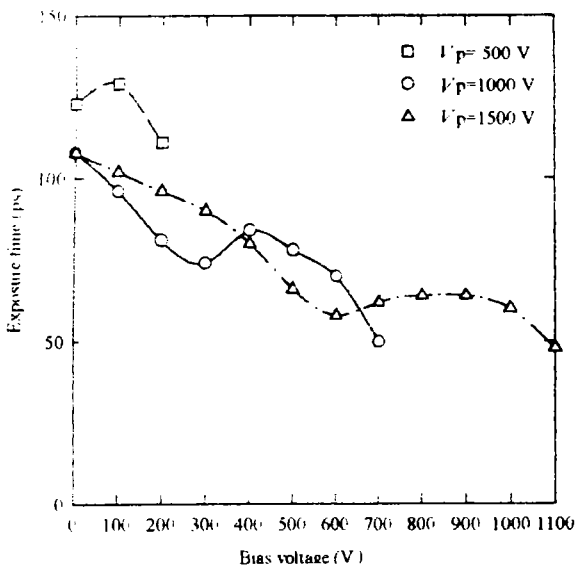


图6 不同脉冲峰值电压(300ps 宽度)下曝光时间与反向直流偏置电压的关系

Fig. 6 Exposure time vs. bias voltage applied on the MCP

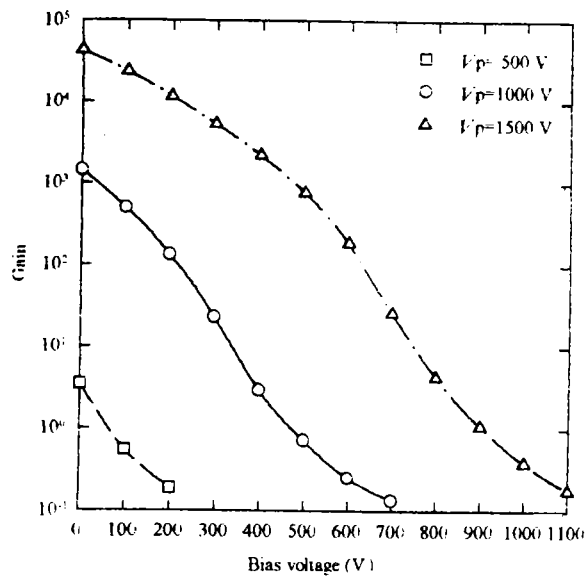


图7 不同脉冲峰值电压(300ps 宽度)下峰值增益与反向直流偏置电压的关系

Fig. 7 Gain vs. bias voltage applied on the MCP, the width of the voltage pulse is 300ps

对于这种 MCP,可获得的最短曝光时间受到电脉冲产生技术的水平、MCP 上微带结构的频率响应、MCP 的脉冲击穿电压和要求的图象信噪比的限制.应当注意到,MCP 上微带的特性阻抗比较低,对于上述 MCP,当微带的宽度为6mm 时,特性阻抗等于 $12.5\Omega$ ,其电压幅度为 $50\Omega$  传输线上的一半.现在用半导体器件已经可以在 $50\Omega$  负载上产生幅度达到3.8kV,宽度65ps 的高压脉冲<sup>12</sup>.模拟表明,如果把这样的脉冲加到 MCP  $12.5\Omega$  的微带上,电压幅度为1.9kV,能得到曝光时间为27ps,对9.88keV 的 X 射线信噪比为35(假定入射光足够强,统计噪音可忽略了.在加200V 反向偏压后,曝光时间可短至15ps,但信噪比将降低到10.这基本上是用这种 MCP 所能得到的最短曝光时间.虽然用半导体光电开关技术有可能产生更高更窄的电脉冲,但对触发光有严格要求,不便于实际应用.

### 3 结论

基于“能量正比假设”对 MCP 皮秒选通特性的模拟结果表明,电子倍增次数与光子的入射时间有关,不应视为常数.要得到短的曝光时间,在缩短电脉冲宽度的同时,要尽可能提高电脉冲的幅度,以保证选通图象的信噪比.加反偏压也是缩短曝光时间的一种途径,但最终也受到增益降低而导致的灵敏度和信噪比降低的限制.在目前的电子线路水平下,得到15ps 的曝光时间是有可能的.

本课题得到国家科委“攀登计划”“飞秒激光和超快现象”项目的资助,感谢该项目首席专家侯洵院士的大力支持.感谢和山冰同志的有益讨论.

### 参考文献

- 1 Chang Zenghu, Hou, Xun, Zhang Yongfeng, Zhu Wenhua, Niu Lihong, Liu Xiuqin. 19th International Congress on High-Speed Photography and Photonics. SPIE, 1990, 1358: 541~545
- 2 Kinoshita K, et al. Ultrahigh Speed and High Speed Photography, Photonics and Videography, SPIE, 1989, 1155: 422~429
- 3 Young B K F, Stewart R E, Woodworth J G, Bailey J. Rev Sci Instrum, 1986, 57(11): 2729~2723
- 4 Katayama M, Nakai M, Yamanaka T, Izawa Y, Nakai S. Rev Sci Instrum, 1991, 62(1): 124~129
- 5 余鸿斌. 软 X 射线皮秒焦平面行波分幅技术[硕士论文], 中国科学院西安光学精密机械研究所, 1990
- 6 Hou Xun. Symposium on High Speed Photography and photonics 1993: 37~42
- 7 Bell P M, Kilkenny J D, Landen O, et al. High-Speed Photography and Photonics. SPIE, 1992, 1801: 1140~1159
- 8 Eberhardt E H. Applied Optics, 1979, 18(9): 1418~1423
- 9 Failor R H, Gorzen D F, Armentrout C J, Busch G E. Rev Sci Instrum, 1991, 62(12): 2862~2870
- 10 Henke B L, Smith J A, Attwood D. Journal of Applied Physics, 1977, 48(5): 1852~1866
- 11 常增虎. 微通道板增益模型的首次碰撞问题. 光子学报, 1995, 24(4): 318~323
- 12 Dymoke-Bradshaw A K L, Kellett P A, Danson C N, Pepler D A. Central Laser Facility Annual Report, Rutherford Appleton Laboratory, UK, 1993, 130

## NUMERIC MODELING OF THE MCP CHARACTERISTICS GATED BY ps PULSE

Chang Zenghu

*State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute  
of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xi'an 710068*

Received date: 1994-06-03

**Abstract** The characteristics of MCP gated by ps high voltage pulse were simulated by using the "energy proportionality hypothesis", which assume that the initial energy of the secondary electron is proportional to the incident energy of the primary electron. The simulation showed that the stages of electron multiplication in the micro-channel are not a constant, but related to the arriving time of the incident X-ray photons. The influence of the amplitude and width of the voltage pulse on the exposure time and the gain of MCP were investigated, which concluded that the shortest exposure time obtainable is limited by signal to noise ratio while the noise is mainly introduced by the hard X-ray transmission through the MCP. Shortening exposure time of the MCP by applying a DC reverse bias voltage was also modeled which revealed that the exposure time does not reduce monotonously when the DC bias voltage increases.

**Keywords** Micro-channel plate; ps; Framing photograph



**Prof. Chang Zenghu** was born in 1962. After graduated from Xi'an Jiaotong University in 1982, he did M. Sc. and Ph. D. at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, where he has also spent two years as a postdoctor. Sponsored by the Royal Society of UK, he has visited Rutherford Appleton Laboratory for two years. As the vice-director of the State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Prof. Chang has interests in optronics and ultrahigh speed photography.