

文章编号: 1001-4322(2009)10-1542-05

微通道板中电子时间倍增特性的数值模拟*

蔡厚智, 刘进元, 牛丽红, 廖 华, 周军兰

(光电子器件与系统(教育部、广东省)重点实验室, 深圳大学, 深圳 518060)

摘 要: 对微通道板的动态特性进行了数值模拟,得到了电子的渡越时间与入射时刻的关系曲线。获得了光电子的倍增次数随入射时刻而变化,并在考虑了入射电子为一高斯电子脉冲的情况下,分析了选通脉冲的幅度、宽度和波形对选通特性的影响。结果表明:随着倍增次数增多,渡越时间越大;当电压幅度不同时,增益曲线的峰值所对应的电子入射时刻也不同。

关键词: 微通道板; 渡越时间; 入射时刻; 曝光时间; 分幅相机; 惯性约束聚变

中图分类号: TN223 **文献标志码:** A

对激光核聚变等物理现象的研究要求分幅相机具有很短的曝光时间,为了研究缩短曝光时间的方法,必须对微通道板(MCP)在 ps 高压脉冲下的选通特性有深入的了解,因而本文对 MCP 中电子的时间倍增特性进行了数值模拟。MCP 于 1958 年由 G. W. Goodrich 和 W. C. Wiley 首先研制成功并发展起来^[1],由于具有很高的电子增益,它被广泛应用于微弱信号的测量中^[2],特别是近年来作为快门元件在 ps 分幅摄影中受到高度重视^[3-5]。1979 年, E. H. Edward 提出了基于“能量正比假设”的 MCP 增益模型,该解析模型与实验结果吻合较好^[6],由此推导出:电子碰壁次数与 MCP 两端所加电压无关,且 MCP 增益与所加电压的关系在双对数坐标下呈直线^[6]。随后,常增虎提出“能量正比假设”可能仅适用于入射电子能量较小的情况,由于首次碰撞时, X 射线光子的能量很大,因此该假设不再适用,并给出了一个修正公式^[7]。在首次碰撞与随后的碰撞被区分开来后,得出碰壁次数与 MCP 上所加电压有关,且与首次碰撞的二次电子的初能量也有直接关系的结论,并数值模拟了在 MCP 两端加高斯电压时的 MCP 选通特性^[8]。以上的研究结果都是在 1 个入射电子或光子的情况下获得的。本文基于“能量正比假设”,对 MCP 中电子的渡越时间特性和入射的电子为高斯电子脉冲时的 MCP 倍增特性作了讨论,得到了渡越时间曲线和增益曲线,并给出了相关的结论。

1 MCP 中电子的运动过程分析

MCP 内电子的运动过程如图 1 所示。在 MCP 两端施加电压时,从通道负电压端入射的电子轰击通道内壁产生二次电子。这些二次电子在通道内电场的加速作用下沿着通道向前传输并再次与通道内壁发生碰撞,产生新的二次电子,并重复该过程直至从通道出口端射出。

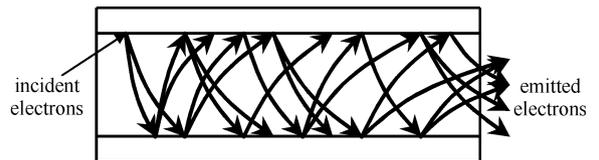


Fig. 1 Schematic diagram of multiplication of electrons in MCP
图 1 微通道板中电子倍增的示意图

若 MCP 端面所加电压为 V_{MCP} ,对于运动轨迹与微通道板轴线相交的电子来说,在与 MCP 相邻的 2 次碰撞间,其在 MCP 内运动的轴向长度为

$$\Delta z = \sqrt{2eV_{//} / m} (t_{i+1} - t_i) + \frac{e}{mL} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \int_{t_i}^{\tau} (V_{MCP} + V_d) dt d\tau \quad (1)$$

式中: e, m 分别为电子的电荷量和质量; $eV_{//}$ 为二次电子平行于微通道板轴线方向的初始能量; τ 为积分变量,表示一个时刻 t_i, t_{i+1} 分别为电子第 i 次,第 $i+1$ 次与通道壁相碰的时刻; L 为微通道板长度; V_d 为微通道板两端所加直流偏置电压。

由于式(1)中,第一项远远小于第二项^[6],因而 Δz 可用如下的近似公式求出

$$\Delta z \approx \frac{e}{mL} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \int_{t_i}^{\tau} (V_{MCP} + V_d) dt d\tau \quad (2)$$

电子从 t_i 到 t_{i+1} 时,其能量增量为^[8]

* 收稿日期:2008-10-16; 修订日期:2009-05-09
作者简介:蔡厚智(1983—),男,江西大余人,博士研究生,主要从事光电子学与超快诊断技术的研究;caihzrobby@sohu.com。

$$E_{i+1} = \frac{0.5e^2}{mL^2} \left[\int_{t_i}^{t_{i+1}} (V_{MCP} + V_d) dt \right]^2 \quad (3)$$

由于 $E_{i+1} \gg eV_{\perp}$, eV_{\perp} 为二次电子垂直于微通道板轴线方向的初始能量, $E_{i+1} \gg eV_{\parallel}$, 因此, 电子第 $i+1$ 次与通道壁相碰时, 可认为其能量为 E_{i+1} 。

2 理论模型

由“能量正比假设”^[6]可得电子第 i 次碰撞通道壁后打出的二次电子初始能量为

$$eV_{\perp i} = E_i / (4\beta^2) \quad (4)$$

式中: β 为一常数, 确切值与 MCP 材料和制作工艺有关^[7]。假设所有二次电子都垂直于通道壁表面发射, 则由同一入射电子所激发的二次电子第 $i+1$ 次与通道壁相碰的时刻及轴向位置分别为

$$t_{i+1} = t_i + D/\sqrt{2eV_{\perp i}/m} \quad (5)$$

$$z_{i+1} = z_i + \Delta z \quad (6)$$

式中: z_i 为二次电子第 i 次碰壁时的轴向位置; D 为通道直径。设入射光电子在通道内第 i 次倍增的二次发射系数为 δ_i , 则

$$\delta_i = (E_i/E_c)^K \quad (7)$$

式中: E_c 对应于二次电子发射系数为 1 时的碰撞能量, K 为与 MCP 材料和制作工艺有关的常数^[7]

t 时刻入射的光电子与微通道板碰撞 n 次后, 总的增益为

$$G(t) = \prod_{i=1}^n \delta_i \quad (8)$$

取 MCP 输入面为轴向方向的坐标原点, 并假设第一次碰撞时 $z_1 = 0$, $\delta_1 = 1$, 这样的结果很容易得出首次碰撞增益不为 1 的情况。

由式(3)~(7)可计算出二次电子的初能量, 二次电子碰壁时的能量、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; 由式(8)可得到不同时刻入射电子的增益。式(8)中的 $G(t)$ 为入射电子数为 1 时的增益, 由于实际测量曝光时间, 入射的电子为一电子脉冲, 为了与曝光时间的实际测量方法更接近, 我们考虑某时刻 T 入射的电子为一电子脉冲, 假设其电子数分布为高斯分布

$$n(t) = n_p \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{t-T}{\Delta t} \right)^2 \right] \quad (9)$$

式中: T 为电子入射时刻; Δt 为电子分布的半峰全宽; n_p 为最大电子数。则, T 时刻入射的电子脉冲经 MCP 增益后, 出射时的总电子数可近似为

$$N(T) = \int_{T-0.5\Delta t}^{T+0.5\Delta t} n(t)G(t) dt \quad (10)$$

那么, T 时刻入射的电子脉冲, 其单个电子的平均增益可近似为

$$\overline{G(T)} = N(T) / \int_{T-0.5\Delta t}^{T+0.5\Delta t} n(t) dt \quad (11)$$

在 MCP 增益特性的理论分析中, 为了简化分析, 大多数文献都假设入射的电子数为 1^[9], 而本文则考虑了入射的电子为一电子脉冲后的 MCP 增益特性, 其结果更具统计规律, 与曝光时间的实际测量方法更接近。

3 模拟结果及分析

本文的模拟参数如下: MCP 厚度 $L = 0.5$ mm, 通道直径 $D = 12.5$ μ m, 斜切角 $\theta = 6^\circ$, $\beta = 2.91$, $E_c = 25.37$ eV, $K = 0.49$, $\Delta t = 30$ ps, $n_p = 100$ 。

3.1 MCP 两端所加电压 V_{MCP} 半峰全宽变化时, 增益与电子入射时刻的关系曲线

当所加电压为梯形波, 幅值为 1 000 V, 上升沿和下降沿均为 200 ps, 半峰全宽分别为 250, 300, 350, 400 ps 时, 电压曲线及增益曲线如图 2 所示。由图 2 可得: (1) 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致。(2) 增益曲线的峰值所对应的时间超前于电压脉冲峰值中心的时间, 这是由于 MCP 中的电子渡越时间效应引起的。(3) 增益曲线的峰值所对应的时刻几乎一样, 这是由于电压宽度的改变对电子渡越时间的影响较小。(4) 电压脉冲的宽度减小, 曝光时间也减小, 但峰值增益也降低, 电压脉冲的宽度小到 150 ps 时, 增益几乎为 0。

3.2 MCP 两端所加电压 V_{MCP} 幅值变化时, 增益与电子入射时刻的关系曲线

当所加电压为高斯波形, 半峰全宽为 300 ps, 幅值分别为 900, 1 000, 1 100, 1 200 V 时, 电压曲线及增益曲线如图 3 所示。由图 3 可得: 随着电压幅值的变化, 增益曲线的幅值变化很大。如幅值为 900 V 时, 增益峰值为 169.2, 1 200.0 V 时, 增益峰值变为 1 618。电压幅值增大, 曝光时间减小。幅值越大, 其增益曲线的峰值越靠近电压曲线的峰值。这是由于电压幅值的改变对电子渡越时间的影响较大, 幅值越大, 渡越时间越小。

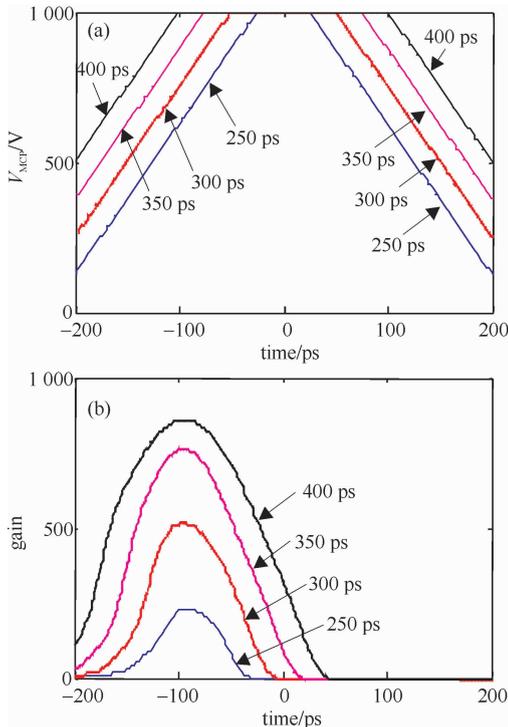


Fig. 2 Trapeziform voltage curves with different FWHM and the gain curves

图 2 V_{MCP} 为不同宽度的梯形波时, 所加电压曲线及相应的增益曲线

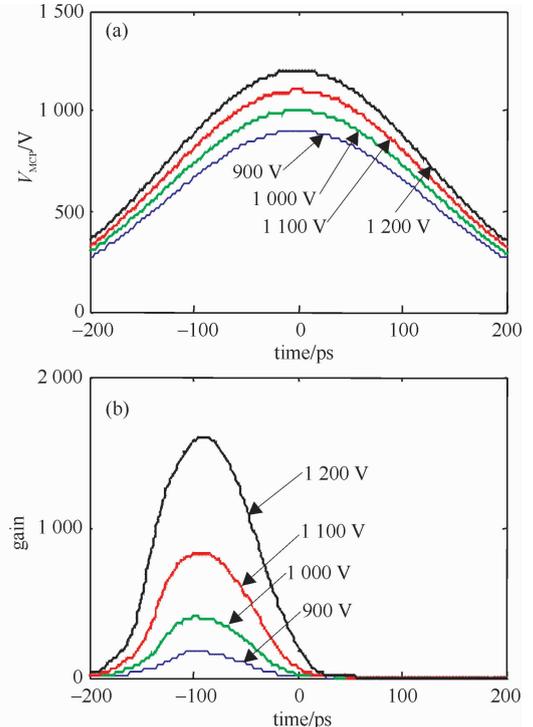


Fig. 3 Gaussian voltage curves with different amplitude and the gain curves

图 3 V_{MCP} 为不同幅值的高斯电压时, 所加电压曲线及相应的增益曲线

3.3 MCP 端面所加电压为不同波形时, 增益与电子入射时刻的关系曲线

当 MCP 端面分别加不同波形的电压时, 其电压曲线及相应的增益曲线如图 4 所示。所用高斯波、三角波和梯形波的半峰全宽均为 300 ps, 幅值 1 000 V, 梯形波的上升沿和下降沿均为 200 ps。由图 4 可得: (1) 相同半峰全宽和幅值时, 梯形波的增益最大。(2) 曝光时间不同, 梯形波的曝光时间最小, 高斯波其次, 三角波最大。(3) 3 条增益曲线的峰值所对应的时刻几乎相同, 这是由于电压波形的改变对渡越时间的影响较小。因此, 我们可以得出, 当 MCP 端面加梯形波时, 选通特性较加三角波和高斯波时要好。

3.4 电子渡越时间

假设电子在通道内与通道壁碰撞 n 次后才从通道的出射端射出, 则电子在通道内的总渡越时间 $t_{tot} = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i + \Delta t_n$ 。其中, Δt_i 为第 i 次和通道壁相碰撞与第 $i+1$ 次和通道壁相碰撞之间的时间间隔, Δt_n 为最后一次和通道壁碰撞后和射出 MCP 出射端时的时间间隔。

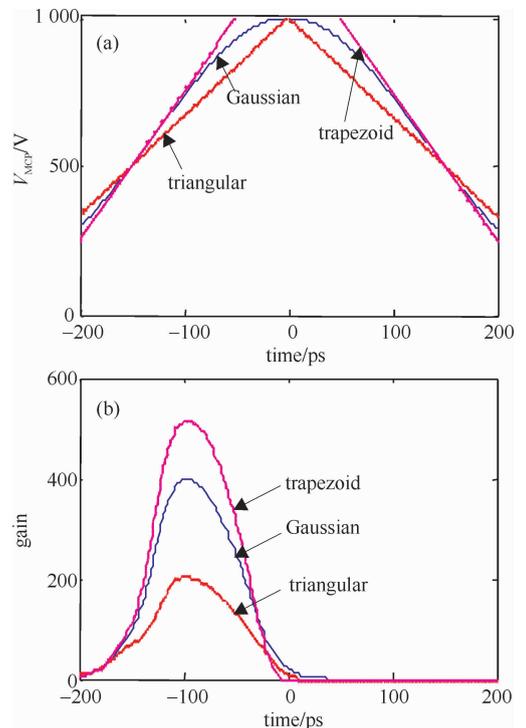


Fig. 4 Different voltage waveforms and the gain curves

图 4 V_{MCP} 为不同波形时的增益曲线

当 MCP 两端加幅值为 1 000 V, 宽度为 300 ps 的高斯电压时, 不同时刻入射的电子与通道壁碰撞次数及电子渡越时间如图 5 所示。当入射时刻先于 -260 ps 时, 电子碰壁次数为 0, 其渡越时间为电子直接通过 MCP 时所需的时间, 且入射时刻越接近 -260 ps, 电子渡越时间越小, 因为入射时刻越往后, 电子运动时的加速电压越大。入射时刻为 -260 ps 的电子, 其渡越时间最小。随后入射的电子, 因其与通道壁碰撞的次数逐渐增多, 电子的渡越时间将逐渐增大。对于入射时刻大于 20 ps 的电子, 因电子在 MCP 内运动的过程中电压逐渐减小至 0, 因而电子将不能从 MCP 输出面射出。

3.5 电子渡越时间与电压宽度, 幅度, 波形的关系

电压幅值为 1 000 V, 半峰全宽分别为 300, 350, 400, 450 ps 时的电子渡越时间曲线如图 6 所示。由图 6 可得: 当电子与通道壁碰撞次数相同时, 电压宽度越大, 电子渡越时间越小, 但渡越时间的差异较小, 如电子入射时刻为 -96 ps 时, 渡越时间依次为 208.9, 206.7, 205.1, 204.0 ps, 与用渡越时间公式计算的结果相近^[10]。

电压半峰全宽为 300 ps, 幅值分别为 900, 1 000, 1 100, 1 200 V 时的电子渡越时间曲线如图 7 所示。由图 7 可得: 当电子与通道壁碰撞次数相同时, 电压幅值越大, 电子渡越时间越小。电压幅值不同时, 电子渡越时间的差异较大, 如电子入射时刻为 -96 ps 时, 渡越时间依次为 218.8, 208.9, 199.2, 190.4 ps。

电压半峰全宽为 300 ps, 幅值为 1 000 V, 梯形波的上升沿和下降沿均为 200 ps 时, 不同波形所对应的电子渡越时间曲线如图 8 所示。由图 8 可得: 当电子与通道壁碰撞次数相同时, 梯形波的电子渡越时间最小, 高斯波的电子渡越时间次之, 三角波的渡越时间最大。

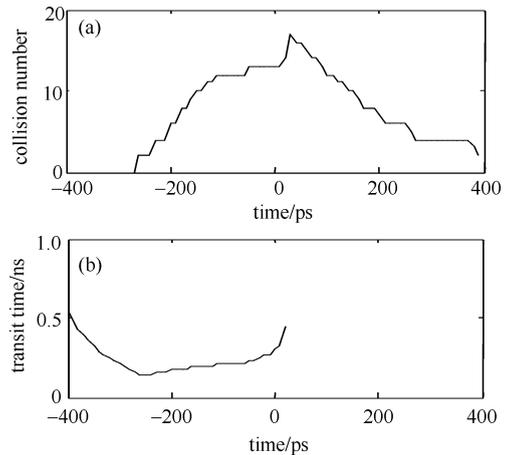


Fig. 5 Number of collisions and the transit time

图 5 碰撞次数和电子渡越时间曲线

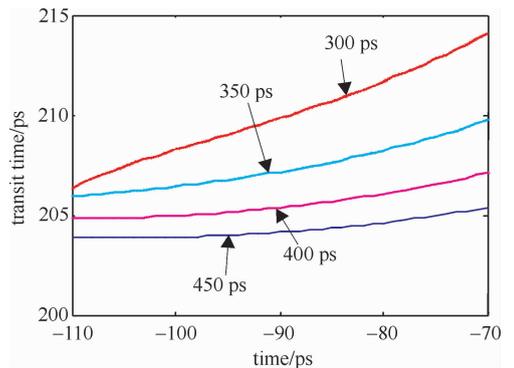


Fig. 6 Transit time varying with pulse width

图 6 不同电压宽度时的渡越时间曲线

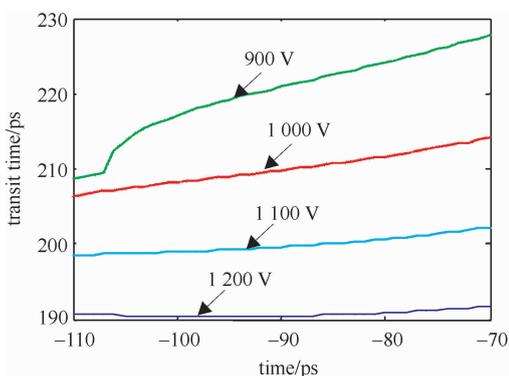


Fig. 7 Transit time varying with pulse amplitude

图 7 不同电压幅度时的渡越时间曲线

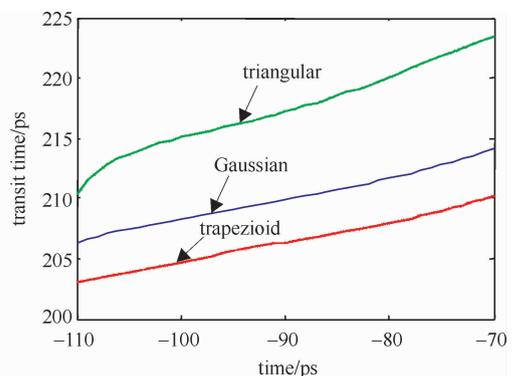


Fig. 8 Transit time varying with voltage waveforms

图 8 不同电压波形时的电子渡越时间曲线

4 结 论

由以上分析可以得出, 当 MCP 两端所加电压为梯形波时, MCP 的皮秒选通特性较加三角波和高斯波时要好。电子渡越时间随着电子与通道壁碰撞次数的增多而增大, 因此在作为高时间分辨元件时应该考虑适当增加通道板两端的电压, 以减少碰撞次数, 从而降低渡越时间, 以提高整个器件的时间分辨率。随着脉冲宽度的减小, 曝光时间减小, 但增益降低, 因而在满足增益需求的情况下, 要获得短的曝光时间, 应尽量缩短电压脉冲宽度。

参考文献:

- [1] Goodrich G W, Wiley W C. Continuous channel electron multiplier[J]. *Rev Sci Instrum*, 1962, **33**(2):762-765.
- [2] Joseph L W. Microchannel plate detectors [J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1979, **162**(11):587-601.
- [3] Liu Jinyuan. Application of a fast electrical pulse in gated multichannel plate camera[J]. *Rev Sci Instrum*, 2007, **78**:055104.
- [4] 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. (Chang Zenghu, Shan Bing, Liu Xiuqin, et al. Picosecond X-ray framing camera using gated MCP. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(6):501-508)
- [5] 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):449-456. (Shan Bing, Chang Zenghu, Liu Jinyuan, et al. MCP gated picosecond X-ray framing camera. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(5):449-456)
- [6] Edward E H. Gain model for microchannel plates[J]. *Appl Opt*, 1979, **18**(9):1418-1423.
- [7] 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):318-322. (Chang Zenghu. The first collision problem of a MCP gain mode. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(4):318-322)
- [8] 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):347-353. (Chang Zenghu. Numeric modeling of the MCP characteristics gated by ps pulse. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(4):347-353)
- [9] Apanasovich V V, Novikov E G. Mathematical model of the microchannel plate single electron impulse formation[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1995, **42**(12):2231-2235)
- [10] Kilkenny J D. High speed proximity focused X-ray cameras[J]. *Lasers and Particle Beams*, 1991, **9**(1):49-69.

Theoretical simulation of electron transit time and gain characteristics in microchannel plate

Cai Houzhi, Liu Jinyuan, Niu Lihong, Liao Hua, Zhou Junlan

(Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: The dynamic characteristics of micro-channel plate are simulated. The transit time and gain curves are obtained in the simulation. The simulation shows that the numbers of the electron collision on the channel wall of the microchannel plates (MCP) are related to the arriving time of the incident photoelectrons and the more frequently electrons collide with the channel, the longer transit time they need. The influence of the amplitude, width and shape of the driving voltage pulse on the exposure time and the gain of MCP are also studied when the incident electrons have a Gaussian distribution. It is concluded that the time of the peak value of the gain curve varies with different voltage pulse amplitude.

Key words: microchannel plate; transit time; exposure time; framing camera; inertial confinement fusion