

文章编号: 1002-2082(2008)06-0895-05

微通道板动态特性的数值模拟

蔡厚智, 刘进元, 牛丽红, 廖 华, 周军兰

(深圳大学 光电子学研究所, 广东 深圳 518060)

摘 要: 对皮秒高压脉冲驱动下微通道板中电子的渡越时间特性和增益特性进行了数值模拟, 在电压脉冲波形分别为高斯形、三角形和梯形时, 得到了电子渡越时间与电压脉冲宽度、幅度的关系曲线。在考虑入射电子为一高斯电子脉冲的情况下, 获得了增益曲线的半峰全宽和峰值随脉冲电压幅度、宽度的变化规律。分析结果表明: 当微通道板两端所加电压为梯形波时, 微通道板中电子的渡越时间特性和增益特性较加三角波和高斯波要好。

关键词: 微通道板; 渡越时间; 曝光时间; 分幅相机

中图分类号: TN365

文献标志码: A

Numerical simulation of MCP dynamic characteristics

CAI Hou-zhi, LIU Jin-yuan, NIU Li-hong, LIAO Hua, ZHOU Jun-lan

(Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: The transit time and gain characteristics of electrons which travel in the micro-channel plate gated by picoseconds high voltage pulse were simulated. The curves of the transit time versus the voltage pulse width and the voltage amplitude are obtained when the waveforms of the voltage pulse are Gauss, triangle and trapezoid. The variations of the FWHM and peak of the gain curves with width and amplitude of the voltage pulse are obtained when the incident electrons have a gauss distribution. The results indicate that the transit time and gain characteristics of electrons are better when the voltage applied to the MCP is trapezoidal wave, compared to those of triangular wave or Gaussian wave.

Key words: micro-channel plate; transit time; exposure duration; framing camera

引言

微通道板(micro-channel plate, 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皮秒分幅摄影中受到高度重视^[3]。1979 年, Eberhardt 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^[4]。所谓“能量正比假设”是指在 MCP 的电子倍增过程中, 电子是以近似于掠入射的角度与通道壁相碰

撞, 所产生的二次电子的径向初能量正比于入射电子碰壁时的能量。由此, Eberhardt 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^[4]。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, 原因是首次碰撞时, 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^[5]。在首次碰撞与随后的碰撞被区分开来后得到: 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

收稿日期: 2008-07-14; 修回日期: 2008-08-20

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工作。

E-mail: caihzrobby@sohu.com

结论,并数值模拟了在MCP两端加高斯电压时的MCP选通特性^[6]。以上研究结果都是在一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电子为一电子脉冲时的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 电子在微通道板内的运动过程分析

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。

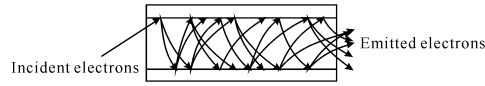


图1 微通道板中电子倍增的示意图

Fig. 1 Schematic diagram for multiplication of electronics in MCP

若MCP端面所加电压为 $V_{MCP}(t)$,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

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

式中: e, m 分别为电子电荷量和质量; $eV_{//}$ 为二次电子平行于微通道板轴线方向的初能量; 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(1)式中第一项远小于第二项^[4],因而 ΔZ 可用如下的近似公式求出:

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

电子被加速 ΔZ 长度后,其能量增量^[6]为

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

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

2 数值模拟过程

MCP端面所加电压为 $V_{MCP}(t)$,MCP长度为 $L = 0.5 \text{ mm}$,单通道直径 $D = 12.5 \mu\text{m}$ 。由“能量正比假设^[4]”可得电子第*i*次碰撞通道壁后打出的二次电子初能量为

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

式中 $\beta \approx 2.91$,其确切值与MCP材料和制作工艺有关^[5]。

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 t_i 为二次电子与通道壁第*i*次碰撞的时刻; Z_i 为二次电子第*i*次碰壁时的轴向位置。

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 ,则有关系式

$$\delta_i = (E_{K_i} / E_C)^K \quad (7)$$

式中: E_{K_i} 为电子第*i*次碰撞通道壁时的能量; $E_C = 25.27 \text{ eV}$,该值对应于二次电子发射系数为1时的碰撞能量; $K (= 0.49)$ 为与MCP材料和制作工艺有关的常数^[5]。

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 $Z_1 = 0, \delta_1 = 1$,这样的结果很容易折算到首次碰撞增益不为1的情况。

由(3)~(7)式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(8)式可得到不同时刻入射电子的增益。(8)式中的 $G(t)$ 为入射电子数为1时的增益。由于实际测量曝光时间时,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,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一高斯分布:

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

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。本文中电子分布的半峰全宽取30 ps,最大电子数取100。

T 时刻入射的电子经MCP增益后,出射时的

总电子数可近似为

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

T 时刻入射的电子脉冲,其单个电子的平均增益可近似为

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

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^[7],而本文则考虑了入射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 结果与分析

3.1 增益曲线与电压曲线的比较

当 MCP 端面分别加不同波形的电压时,电压波形及相应的增益曲线如图 2 所示。所用高斯脉冲、三角脉冲和梯形脉冲的半峰全宽均为 300 ps,幅值均为 1 000 V,梯形脉冲的上升时间为 200 ps,并考虑了入射电子为一高斯电子脉冲。由图 2 可得: 1) 增益曲线的半峰全宽(即曝光时间)比电压脉冲的半峰全宽要窄得多,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(梯形波为峰值中心)的时间,这是由 MCP 中的电子渡越时间效应所引起的; 3) 相同半峰全宽和幅值时,梯形波的增益最大; 4) 梯形波的曝光时间最小,高斯电压居中,三角波最大; 5) 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之故。

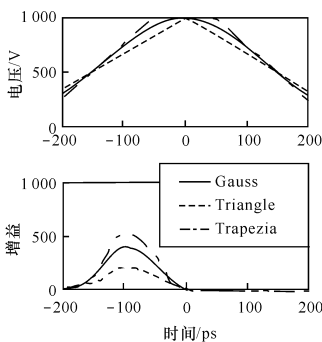


图 2 $V_{MCP}(t)$ 为不同波形时的增益曲线

Fig. 2 Gain curves when $V_{MCP}(t)$ is different waveform

3.2 曝光时间与选通脉冲宽度的关系

当 MCP 端面分别加不同波形的电压时,曝光时间随选通脉冲宽度变化的关系曲线如图 3 所示。

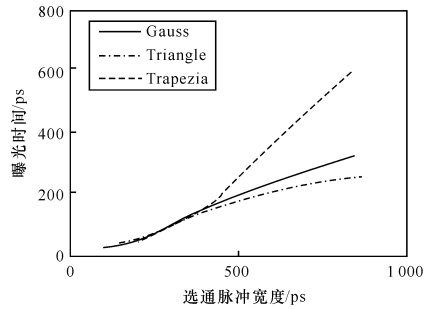


图 3 曝光时间与选通脉冲宽度的关系曲线

Fig. 3 Exposure duration versus gate length

实验中所加高斯、三角和梯形电压的幅值均为 1 000 V。从图 3 可以看出: 1) 随着选通脉冲宽度的减小,曝光时间并不随之线性减小; 2) 选通脉冲宽度较小(小于 350 ps)时, MCP 两端加梯形电压,曝光时间较高斯和三角电压要小,这与图 2 的结论一致; 3) 对于电压波形为高斯波和三角波,当脉冲宽度相同时,其曝光时间相差不是很大。曝光时间近似为选通脉冲宽度的 1/3; 4) 对于梯形波,当电压脉冲宽度较大(大于 600 ps)时,曝光时间近似等于脉冲宽度与脉冲上升时间之差,即选通脉冲宽度很大时,曝光时间与脉冲宽度近似相等。

3.3 峰值增益与选通脉冲宽度的关系

当 MCP 所加电压的宽度变化时,其所对应增益曲线的峰值大小也随之变化,峰值增益与脉冲宽度的关系曲线如图 4 所示。脉冲宽度越小,曲线斜率越大,增益变化越快。选通脉冲宽度较大时,增益变化将很小,当选通脉冲为梯形波,且脉冲宽度大于 400 ps 时,其峰值增益将不再变化。由图 3 可知,

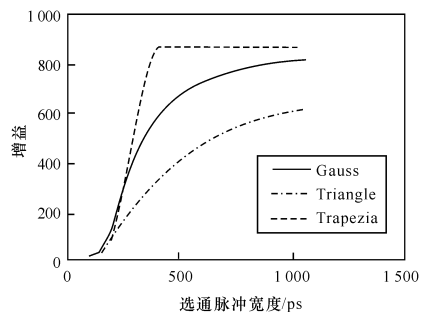


图 4 峰值增益与选通脉冲宽度的关系曲线

Fig. 4 Peak gain versus gate length

减小选通脉冲的宽度可以缩短曝光时间,但从图4可以看出,脉冲宽度的减小将降低峰值增益,输出信号的强度将变弱。因而,用减小选通脉冲宽度的方法缩短曝光时间将受到输出信号强度的限制。

3.4 峰值增益与选通脉冲幅度的关系

峰值增益随选通脉冲幅度变化的关系曲线如图5所示。所加高斯、三角和梯形电压的宽度均为300 ps。随着所加电压脉冲幅度的变化,增益变化很大,电压脉冲幅度越大,曲线斜率越大,增益变化越快。要获得较大的增益,可在MCP 两端所加电压允许的范围内,适当增大电压。

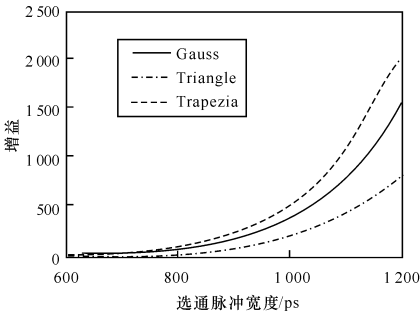


图5 峰值增益与选通脉冲宽度的关系曲线

Fig. 5 Peak gain versus gate length

3.5 电子渡越时间与直流电压的关系

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^[8] $T = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i + \Delta t_n$ 式中 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与射出 MCP 出射端之间的时间间隔。

当MCP 两端加直流电压时,我们模拟出来的渡越时间与J. D. Kilkenny^[9]计算的渡越时间随电压变化的关系曲线如图6所示。从图6发现模拟的渡越时间(图6中虚线所示)与J. D. Kilkenny 计算的渡越时间(图6中实线所示)几乎一致,差异非常小。

3.6 渡越时间与脉冲宽度、脉冲幅度的关系

当电压幅值为1 000 V,波形分别为高斯波、三角波和梯形波时,渡越时间随电压脉冲宽度的变化曲线如图7所示。由图7可知:1) 电压脉冲宽度越大,其电子渡越时间越小,宽度较大时,渡越时间将不再变化;2) 电子渡越时间受宽度的影响较小,当宽度变化较大时,电子的渡越时间变化却很小。

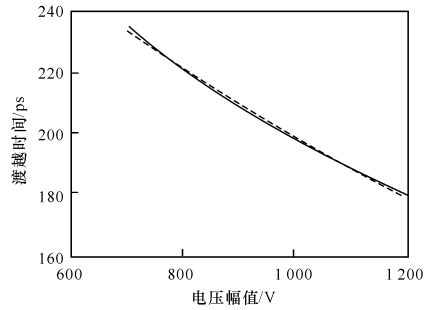


图6 渡越时间与直流电压的关系曲线

Fig. 6 Transit time versus DC voltage

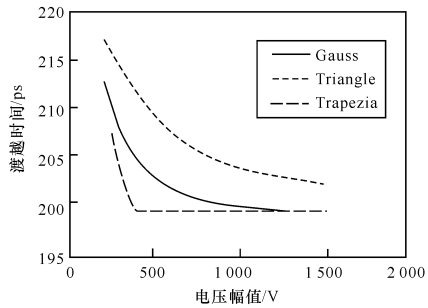


图7 渡越时间与选通脉冲宽度的关系曲线

Fig. 7 Transit time versus gate length

电压半峰全宽为300 ps时,渡越时间随电压脉冲幅度的变化曲线如图8所示。由图8可知,电压脉冲幅度越大,其电子渡越时间越小;电子渡越时间受电压幅度的影响较大,当幅度变化较大时,电子的渡越时间变化也很大。

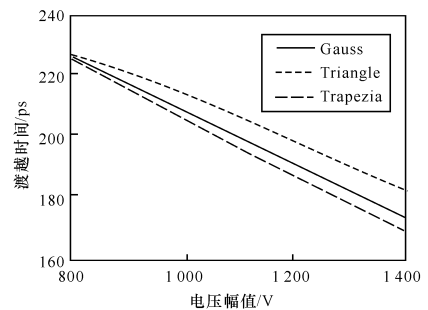


图8 渡越时间与选通脉冲幅度的关系曲线

Fig. 8 Transit time versus amplitude of gate pulse

由图7和图8均可看出:当电压宽度和幅值相同时,梯形波所对应的电子渡越时间最小,高斯波次之,三角波最大,但不同波形间的电子渡越时间差异很小。因而由此可知渡越时间受电压波形的影

响较小。

4 结束语

由以上分析可以得出, 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要好。电子渡越时间随着电压脉冲宽度及幅度的增大而减小, 因此在作为高时间分辨元件时应该考虑适当增加微通道板两端的电压, 以降低渡越时间, 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, 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] ESCHARD G, MANLEY B W. Principle and characteristics of channel electron multipliers [J]. Acta Electron, 1971, 14(1):19-39.
- [4] EDWARD E H. Gain model for microchannel plates

[J]. Applied Optics, 1979, 18(9):1418-1423.

- [5] 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 Zeng-hu. The first collision problem of a MCP gain mode[J]. Acta Photonica Sinica, 1995, 24(4):318-322. (in Chinese)
- [6] 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 Zeng-hu. Numeric modeling of the MCP characteristics gated by ps pulse[J]. Acta Photonica Sinica, 1995, 24(4):347-353. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 杨青, 陈烽, 侯洵. 微通道板电子传输时间特性的理论分析[J]. 应用光学, 2006, 27(6):535-538.
YANG Qing, CHEN Feng, HOU Xun. Theoretic analysis of channel electron time character [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(6):535-538. (in Chinese)
- [9] KILKENNY J D. High speed proximity focused X-ray cameras[J]. Lasers and Part. Beams, 1991, 9(1):49-69.