

# MCP 中单通道电子倍增参数的 Monte Carlo 模拟计算

韦亚一

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

**摘要** 本文用 Monte Carlo 方法对电子在 MCP 单通道中传输, 碰撞和次级发射的整个过程进行了模拟。给出了 MCP 中次级电子能量分布表达式。计算了 MCP 中单通道电子倍增的有关参数, 并对比实验数据讨论了模型及其结果的合理性。

**关键词** 微通道板; Monte Carlo 方法; 次级电子发射; 电子倍增

## 一、引言

微通道板(MCP)是一种具有连续打那极的电子倍增器件,其主要材料为高铅硅酸盐玻璃。由于玻璃成分的多样性和结构的复杂性,特别是经一定温度烧氢还原后,通道内壁表面的化学组成发生了变化,形成了元素浓度分布的分层结构<sup>[1]</sup>。给通道内壁次级发射性能的定量研究带来了一定的困难。本文用 Monte Carlo 方法,对电子在通道中传输,碰撞和次级发射的整个过程进行模拟。首先根据已有的实验数据和公式建立通道电子倍增的数学模型,然后模拟计算。最后用计算得的结果来检验所建模型的正确性。

## 二、模型和计算方法

电子进入通道在加速电场的作用下运动,碰撞,激发次级电子的倍增过程如图1所示。

(1) 设通道两端电压为  $U$ , 通道内径为  $D$ , 长为  $L$ , 在计算中我们取通道中的电场  $E$  为均匀电场, 方向沿轴向。

(2) 进入通道的原初电子方向按余弦分布, 电子在通道端面上的人射点为均匀分布。人射能量为某一确定值。

(3) 由于次级发射材料为高铅硅酸盐玻璃, 根据文献 [2] 的报道, 次级电子的平均逸出深度为  $33 \text{ \AA}$ , 而且实际使用中次级电子产额  $\delta$  最大不超过 5。因此 MCP 的次级电子发射过程基本上发生在富  $\text{SiO}_2$  层中。考虑到表面弹性电子, 取次级电子能量范围从 0 到  $eV_p$ ,  $eV_p$  为人射电子能量。根据 MCP 的实验数据<sup>[1,3,4]</sup> 作者认为次级电子能量 (eV) 近似为瑞利分布, 分布几率函数  $P(eV)$  如图 2 所示。

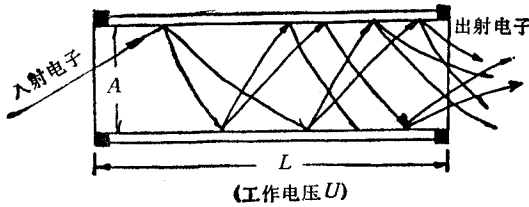


图 1  
(图中 A 应为 D)

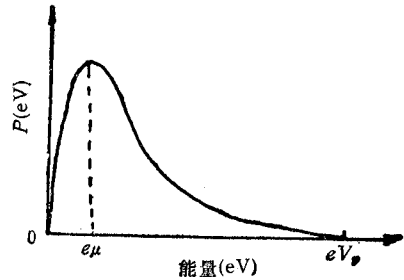


图 2

其中  $e\mu$  为最可几能量, 一般仅为几个电子伏。计算中取  $e\mu = 3eV$

$$P(eV) = \begin{cases} \frac{V}{e\mu^2} \exp\left(-\frac{V^2}{2\mu^2}\right), & V \in (0, V_p) \\ 0, & V \leq 0 \end{cases}$$

(4) 次级电子产额是以

$\delta = \delta_{m(0)} [(V_0/V_{m(0)}) \sqrt{\cos\theta}]^\beta \cdot \exp[\alpha(1 - \cos\theta) + \beta(1 - (V_p/V_{m(0)}) \sqrt{\cos\theta})]$  为平均值的泊松分布<sup>[5]</sup>。其中,  $\alpha = 0.62$ ;  $\beta$  取在 0.25—0.65 之间均匀分布<sup>[6]</sup>;  $\delta_{m(0)}$  为垂直入射时的最大次级电子产额;  $eV_{m(0)}$  是与  $\delta_{m(0)}$  相对应的人射电子能量;  $\delta_{m(0)}$  和  $eV_{m(0)}$  由次级发射材料的性质决定, 根据目前的实验数据<sup>[3]</sup>,  $\delta_{m(0)} = 3.4$ ,  $eV_{m(0)} = 300eV$ ;  $eV_p$  为人射电子能量;  $\theta$  为入射角。

(5) 次级电子方向按余弦分布, 面向通道内<sup>[7]</sup>, 其方向余弦:

$$\begin{aligned} \cos(\alpha) &= (y \times \mu_1 - x \times \mu_3) / (x^2 + y^2)^{1/2} \\ \cos(\beta) &= -(x \times \mu_1 + y \times \mu_3) / (x^2 + y^2)^{1/2} \\ \cos(\gamma) &= \mu_2 \end{aligned}$$

其中,  $(x, y, z)$  为发射点的坐标

$$\mu_1 = \cos\varphi \times \sin\theta, \quad \mu_2 = \sin\varphi \times \sin\theta, \quad \mu_3 = \cos\theta$$

$\cos\theta, \sin\theta, \cos\varphi, \sin\varphi$  均由随机数产生得到。

(6) 设相邻两碰撞点坐标  $(x_0, y_0, z_0), (x_1, y_1, z_1)$ , 入射电子速度  $v_0$ , 方位角  $(\theta_0, \varphi_0)$  如图 3, 图 4 所示, 则

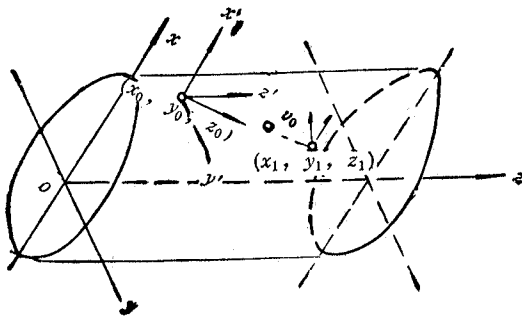


图 3

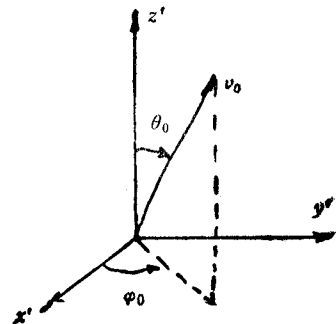


图 4

$$x_1 = x_0 + v_{0x} \times \Delta t, \quad y_1 = y_0 + v_{0y} \times \Delta t, \quad z_1 = z_0 + v_{0z} \times \Delta t + (1/2)(Ee/m)\Delta t^2$$

其中  $v_{0x} = v_0 \times \sin \theta_0 \times \cos \varphi_0$ ,  $v_{0y} = v_0 \times \sin \theta_0 \times \sin \varphi_0$

$$v_{0z} = v_0 \times \cos \theta_0, v_{0xy} = v_0 \times \sin \theta_0$$

$$\Delta t = \frac{1}{v_{0xy}} \{ y_0 \sin \varphi_0 + x_0 \cos \varphi_0 + [(y_0 \sin \varphi_0 + x_0 \cos \varphi_0)^2 - (x_0^2 + y_0^2 - D^2/4)]^{1/2} \}$$

当  $x_0^2 + y_0^2 = D^2/4$  时,  $\Delta t = |2(y_0 \sin \varphi_0 + x_0 \cos \varphi_0)/v_{0xy}|$

(7) 各种实验标明 MCP 的次级发射的时滞很小,可以忽略不计。

程序设计使用 FORTRAN 语言,采用了分代计算的办法,即次级电子按代化分,每代作为一个整体循环计算产生下一代电子。当电子的碰壁点坐标  $z > L$  时电子就逸出了通道,停止跟踪。每个电子的状态用 7 个参数描述,即能量  $eV(i)$ ,发射点坐标  $(x(i), y(i), z(i))$ ,速度方向余弦  $\cos \alpha(i), \cos \beta(i), \cos \gamma(i)$ <sup>[8]</sup>。对 0—1 之间均匀分布的伪随机数抽样,就可以得到模拟时需要的余弦分布,泊松分布,瑞利分布<sup>[9]</sup>。

本文计算是在 VAX-11/780 机上进行的。

### 三、结果和讨论

取原初电子能量为 500eV,通道长  $L = 0.5\text{mm}$ ,通道内径  $D = 10\mu\text{m}$ ,通道两端电压  $U = 800\text{V}$ ,这些都是目前 MCP 使用的典型参数。共模拟了 1000 个原初电子入射。

(1) 经通道倍增输出的电子能量分布,如图 5 所示。输出电子中能量小于 20eV 的电子占总数的 35.1%;能量小于 40eV 的占 63.5%;能量小于 60eV 的占 68.8%。

计算过程中发现,在 300—800eV 范围内改变原初电子的入射能量,对输出电子的能量分布影响不大。这种现象可以从 MCP 倍增的机理上得到解释。原初电子进入通道碰撞产生的第一代次级电子的能量和原初电子的能量之间的依赖关系很弱(只是统计关系)。这样经数次倍增后出射电子的能量分布就基本上与原初电子能量无关,而主要依赖于通道自身的次级发射性能和几何尺寸。

(2) 对 1000 个原初电子入射模拟计算取平均求得通道电子产额为 2874。电子在通

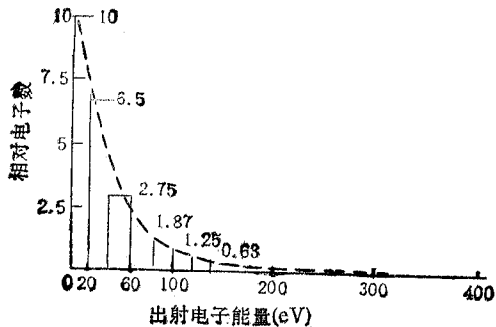


图 5

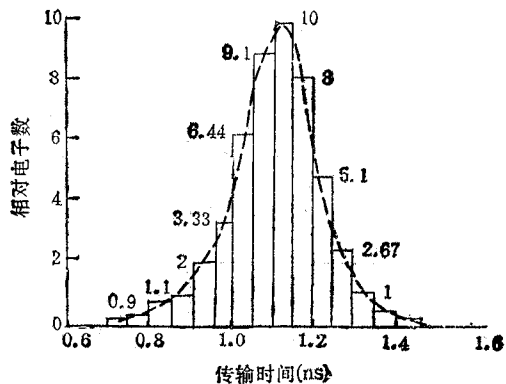


图 6

道中的平均碰撞次数为 10.1 次(实际上可认为是 10 次)。这两个数据可计算出经烧氢还原后的 MCP 通道内壁的平均次级电子发射系数  $\delta = (2874)^{1/10.1} \approx 2.2$ 。计算结果表明,通道电子产额和平均碰撞次数对入射的原初电子能量变化不敏感而对电压的变化很敏感。

(3) 电子在通道内传输时间的分布如图 6 所示。电子在通道内的传输时间是指某一出射电子与入射电子之间的时间差。计算得平均传输时间为 1.15ns。当工作电压  $U$  升高时,峰向左移。

(4) 关于  $\delta_{m(0)}$  和  $eV_{m(0)}$  的讨论 (a)  $\delta_{m(0)}$  和  $eV_{m(0)}$  在本计算中是作为一个初始参量给定的,它实际上表示了材料的次级发射性能,是衡量 MCP 增益的一对重要参数。可以认为,同样材料、同样工艺的 MCP 工作在不同的电压下,其  $\delta_{m(0)}$  和  $eV_{m(0)}$  是相同的。基于这一思想,作者计算了  $U = 1000V, 900V$  和  $800V, L/D = 50$  的条件下 MCP 的增益  $G$ , 平均碰撞次数  $N$ , 并由此求得平均次级电子发射系数  $\delta$ , 结果列于表 1。

表 1

$U(V)$	1000	900	800
$G$	3290	3071	2874
$N$	9.6	9.8	10.1
$\delta$	2.32	2.26	2.2

(b) 近几年美国 Galileo 光学公司制作出了长寿命、高增益 MCP。当  $U = 900V$  时,  $G = 4000$ ; 当  $U = 1000V$  时,  $G$  可达 10000。对此我们也进行了计算, 计算结果表明, 当  $\delta_{m(0)} = 3.51 \sim 3.61, eV_{m(0)} = 250 \sim 300eV$  时, 算得的倍增参数与报道的基本一致。这说明要制作性能达到 Galileo 水平的 MCP, 就必须在目前 MCP 的材料和工艺方面作进一步的研究, 使得成型后的 MCP 的  $\delta_{m(0)}$  和  $eV_{m(0)}$  达到本文计算的结果。

#### 四、结 论

以上结果与已有的对应实验值基本一致, 由此可推知前面提出的 MCP 次级发射数学模型的合理性。在计算中我们试用过其它的次级发射模型, 但从计算结果与实验值的一致性来看, 本文模型为最佳。此外利用此模型还可以计算出目前实验尚无法直接测量的量, 如平均碰撞时间, 平均传输时间等, 使 MCP 倍增性能的定量研究成为可能。

本工作得到了导师陶兆民研究员的指导和帮助, 在此表示衷心的感谢!

#### 参 考 文 献

- [1] G.E. Hill, *Advanced Electronics and Electronic Physics*, 140A, (1976), pp. 153—165.
- [2] 汪金祥, 特种玻璃, 3(1986)3, 20—25.
- [3] 国营旭光仪器厂, 旭光情报, 1984年, 第1期, 第100—140页.
- [4] 汪金祥, 高速摄影与光子学, 1986年, 第4期, 第29—33页.
- [5] A.J. Guest, *Acta Electronica*, 14(1972)1, 99—110.

- [6] 邹异松,电真空成像器件及理论分析,国防工业出版社,北京,1990.  
[7] 胡汉泉等,真空物理与技术及其在电子器件中的应用(下册),第12章,国防工业出版社,北京,1985年.  
[8] M. Brown et al., *Vacuum*. 25(1975)2, 61—63.  
[9] 刘德贵等,Fortran 算法汇编,第二分册,国防工业出版社,北京,1983年.

## MONTE CARLO SIMULATION AND COMPUTATION OF SINGLE CHANNEL MULTIPLYING PARAMETERS IN MCP

Wei Yayi

(*Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

**Abstract** Monte Carlo method is used to simulate the whole courses of electronic transportation, collision and secondary emission in a single channel of MCP. The energy distribution formula of secondary electron of MCP is derived. Each parameter of a single channel in MCP is calculated and discussed.

**Key words** MCP (microchannel plate); Monte Carlo method; Secondary electron emission; Electron multiplying