

# 微通道板增益模型的首次碰撞问题

常增虎

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

**摘要** 研究了入射电子首次碰撞微通道板(MCP)所产生的二次电子的初能量对基于“能量正比假设”的 MCP 增益模型的影响, 给出的增益公式与实验结果在很大的电压范围内符合较好。

**关键词** 微通道板(MCP); 增益; 首次碰撞

## 0 引言

微通道板(MCP)由上百万个直径为  $10\mu\text{m}$  左右、长度约为  $0.5\text{mm}$  的空心管侧向相互粘接而成, 它是一种兼有图像传递功能的电子倍增元件, 在象增强器、光电倍增管以及高速摄影变象管等器件中获得了广泛应用<sup>1</sup>, 近年来作为快门元件在皮秒分幅摄影中受到了重视<sup>2,3</sup>。对于其增益特性的理论研究, 有人借助于计算机蒙特卡洛模拟<sup>4,5</sup>, 也有用解析法<sup>6,7</sup>。后者的优点是物理图象更清晰, 其中 Eberhardt 提出的“能量正比假设”解析模型与实验结果吻合较好<sup>7</sup>。

“能量正比假设”认为: 在 MCP 的电子倍增过程中, 由于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  $V_{or}$  正比于入射电子碰壁时的能量  $V_z$ , 即

$$V_{or} = V_z / (4\beta^2) \quad (1)$$

其中  $\beta \approx 3$ , 确切值与 MCP 材料和制作工艺有关。由此 Eberhardt 推导出, 电子碰壁次数与 MCP 上所加电压无关, 且 MCP 电子增益与所加电压的关系在双对数坐标下呈直线<sup>7</sup>。

分析文献 7 中上述结论的推导过程发现, 从外电子源入射到 MCP 中的电子与通道壁的碰撞(即首次碰撞)与随后的碰撞没有被区分开来, 所有各次碰撞产生的二次电子的径向初能量  $V_{or}$  均相同。然而区分这两类碰撞却是很必要的, 这是因为式(1)中的入射电子能量  $V_z$  对于首次碰撞和随后的碰撞可能并不相同, 因而  $V_{or}$  也就可能不同。以下的分析表明, 正是这一  $V_{or}$  的差异导致了上述结论在严格意义上的不成立。本文在考虑首次碰撞特殊性的条件下研究了 MCP 的增益特性。

## 1 首次碰撞

这里主要讨论电子首次碰撞 MCP 所产生的二次电子的初能量问题, 它对“能量正比假设”模型的结果有直接影响。MCP 可以用作多种粒子的探测器<sup>1</sup>, 对于不同的用途, 入射到 MCP 上粒子可能是光子(紫外光、X 射线及  $\gamma$  射线)、电子和离子等。

当入射到 MCP 上的是光子时(ps 分幅管等), 所激发出的光电子的初能量及其分布与 MCP 上镀的阴极材料及入射光子的能量有关。例如, 当 MCP 的入射面镀金时, 对 X 射线, 光电子初能量的 FWHM 值为  $6.8\text{eV}$ , 最可几值为  $1.5\text{eV}$ 。<sup>8</sup>

对于电子入射的情况(象增强器、光电倍增管及 MCP 电子增益测量等), 到达 MCP 的电子能量取决于电子源(例如光阴极)到 MCP 的加速电压, 一般在  $0\sim 10\text{keV}$  范围内。如果直接应用“能量正比假设”, 则二次电子的初能量可由式(1)求得。但当加速电压较大时, 所得到的  $V_{or}$  也很大, 例如, 对于  $\beta=3$

收稿日期: 1994-05-03

的 MCP, 当  $V_z = 5\text{keV}$  时,  $V_{or} = 139\text{eV}$ . 而很多测量都表明, 大多数二次电子的初能量小于  $20\text{eV}$ .

这是因为当入射电子的能量较大时, 射入 MCP 壁内的深度较深, 逸出表面的电子在材料内经多次非弹性碰撞, 能量已大大减小. 由此可以推测“能量正比假设”可能仅适用于入射电子能量较小的情况. 这里提出对式(1)的一种修正,

$$V_{or} = V_s / (4\beta^2) * (-\exp(-V_z/V_s)) \quad (2)$$

式中的  $V_s$  也是与 MCP 材料及制作工艺有关的常数. 当  $V_z \ll V_s$  时, 式(2)与式(1)的结果相近. 而当  $V_z \gg V_s$  时,  $V_{or}$  接近于一个常数. 与文献 7 一样, 这里不考虑二次电子能量的统计特性.

## 2 碰撞次数和电子增益

设 MCP 的厚度为  $L$ , 单个通道的直径为  $D$ , 长径比  $\alpha = L/D$ , 开口比为  $\gamma$ , MCP 两面间所加电压为  $V_{MCP}$ , 则 MCP 的电子增益  $G$  为

$$G = \prod_{i=1}^n \delta_i \quad (3)$$

式中  $\delta_i$  为  $i$  次碰壁的二次发射系数,  $n$  为总碰壁次数. 当每次碰壁的能量较小时, 二次发射系数可表示为

$$\delta_i = (V_{zi}/V_c)^k$$

式中  $V_c$  对应于二次发射系数为 1 时的碰撞能量,  $k$  为常数.

如果知道每次碰壁的能量  $V_{zi}$  值, 则可求得增益  $G$ . 对于首次碰撞,  $V_{z1}$  即加速电压  $V_{in}$ , 其二次电子的初能量  $V_{or1}$  可由式(2)求得. 由  $V_{or1}$  可得到第二次碰撞时的  $V_{z2}$

$$V_{z2} = Z_1 * V_{MCP}/L$$

式中  $Z_1$  为二次电子沿通道轴向的位移,

$$Z_1 = V_{MCP} * D^2 / (4V_{or1}L) \quad (4)$$

故有

$$V_{z2} = (V_{MCP}/(2\alpha))^2 / V_{or1} \quad (5)$$

由于  $V_{z2}$  和以后各次的碰撞能量较小, 其二次电子的初能量可由式(1)求得.

$$V_{or2} = (V_{MCP}/(2\alpha))^2 / (4V_{or1}\beta^2) \quad (6)$$

同法可得

$$Z_2 = 4\beta^2 V_{or1} L / V_{MCP} \quad (7)$$

$$V_{z3} = 4\beta^2 V_{or1} \quad (8)$$

$$V_{or3} = V_{or1} \quad (9)$$

式(9)表明, 第三次碰撞的二次电子的初能量与首次碰撞二次电子的初能量相等. 依此类推可知, 所有奇次碰撞的  $V_{or_i}$ ,  $Z_i$ ,  $V_{z_{i+1}}$  都相等, 等于偶次碰撞二次电子的相应值; 所有偶次碰撞的  $V_{or_i}$ ,  $Z_i$ ,  $V_{z_{i+1}}$  也相等, 且与第十次碰撞的二次电子的相应值相等. 由此还可进一步推出, 所有奇次碰壁(不包括首次碰壁)的  $\delta_i$  都相等, 其值与第三次碰壁的二次发射系数相等; 所有偶次碰壁的  $\delta_i$  值相等, 且与第二次碰壁的值相等.

碰壁的总次数

$$\begin{aligned} n &= (L/Z_1 + L/Z_2)/2 \\ &= 8\alpha^2 / (V_{MCP} * (1/V_{or1} + (r\alpha\beta/V_{MCP})^2 * V_{or1})) \end{aligned} \quad (10)$$

该式表明, 碰壁次数不仅与 MCP 上所加电压  $V_{MCP}$  有关, 而且与首次碰撞的二次电子(或光电子)的初能量  $V_{or1}$  也有直接关系. 这与文献 7 中有关碰壁次数为常数, 与 MCP 所加电压及入射电子能量都无关的结论是不同的.

如果令

$$V_{or1} = V_{MCP} / (4\alpha\beta) \quad (11)$$

代入式(10)可得

$$n = \alpha/\beta \quad (12)$$

此即文献 7 的结果. 但是, 由于首次碰撞的二次电子的初能量取决于外来电子(光子)的能量及 MCP 输入面的材料特性, 与 MCP 上所加电压无关, 不随其变化, 故式(11)不能对所有的  $V_{MCP}$  值都成立, 因而也就得不到式(12).

MCP 的增益

$$G = \delta_1 \delta_2^{n/2} \delta_3^{n/2-1}$$

将以上结果代入得

$$G = \gamma(V_{in}/V_c)^k ((V_{MCP}/(2\alpha))^2 / (V_{or1} V_c))^{kn/2} * (4\beta^2 V_{or1}/V_c)^{k(n/2-1)} \quad (13)$$

即增益与 MCP 上所加电压有关, 故在双对数坐标中  $G$  随  $V_{MCP}$  的变化不是直线, 只在  $n$  随  $V_{MCP}$  缓变的  $V_{MCP}$  区近似呈直线. 故文献 7 中关于  $\log(G)$  随  $\log(V_{MCP})$  线性变化的结果严格讲也不成立. 虽然在式(11)的条件下, 可得到文 7 的这一结果, 但如上所述, 此条件是无法对所有的  $V_{MCP}$  满足的.

### 3 应用举例

选用文献 7 拟合过的实验数据<sup>4,6</sup>, 并选择  $\beta, k, V_c, V_s$  的值, 用式(13)进行拟合, 结果见图 1. 从图 1 可以看出, 计算值与实验值符合较好, 特别是在高电压端, 实验值已明显偏离直线, 该拟合的误差仍很小, 而文献 7 的拟合偏差较大. 另外, 从该图也可以看出, 在相当大的电压范围内, 式(13)的结果在双对数坐标下近似呈直线, 这是由于碰壁次数在此范围变化不大, 如图 2 所示. 在图 2 中也给出了假如式(11)得到满足时的碰壁次数, 即文献 7 结果, 可见它给出的实际上是式(10)所计算出的曲线的最大值, 且上述准直线段的电压区就在与该最大值对应的电压值附近. 当 MCP 上所加电压偏离此值较大时, 碰撞次数减少, 增益随电压的变化变缓, 整个增益曲线呈 S 型. 这表明即使 MCP 不出现电流饱和效应

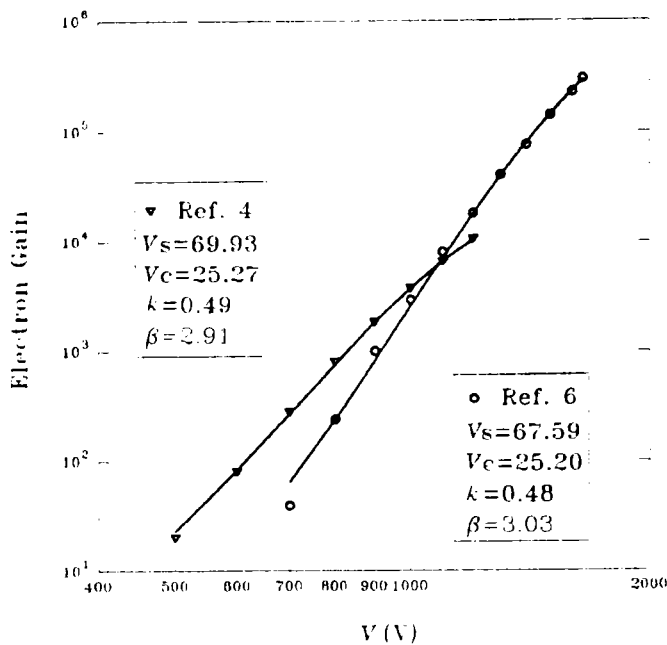


图 1 不同电压下 MCP 增益的计算值(实线)与实测结果的比较.  $\nabla$ 和 $\circ$ 符号表示的实测数据分别引自文献 4 和 6. 计算时所用的 MCP 参数见图中所列.

Fig. 1 Calculated MCP gain vs. voltage (solid lines) and measured data (plotted points) from ref. 4 ( $\alpha=40, V_{in}=2000$ ) and ref. 6 ( $\alpha=60, V_{in}=5000$ ). The MCP parameters used for computing the gain are listed in the boxes.

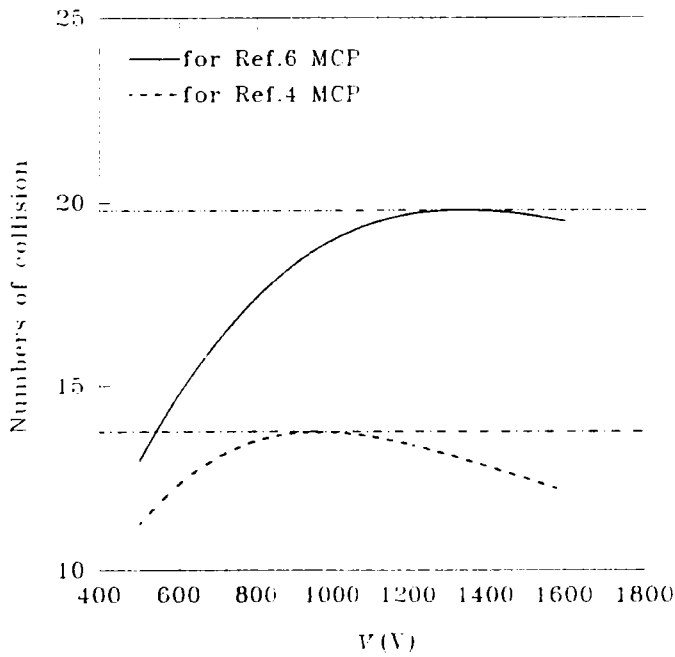


图 2 针对文献 4 和 6 的 MCP 计算出的电子碰撞通道壁的次数. 所用 MCP 的参数见图 1.

图中的上下两条直线是由式(12)算出的分别对应于文献 6 和 4 的 MCP 的碰壁次数.

Fig. 2 Calculated numbers of electron colliding the MCPs of Ref. 4 and Ref. 6. The parameters of the MCPs for the calculation are in Fig. 1. The two straight lines are calculated by equation (12), the top line for Ref. 6 MCP and the bottom line for Ref. 4 MCP

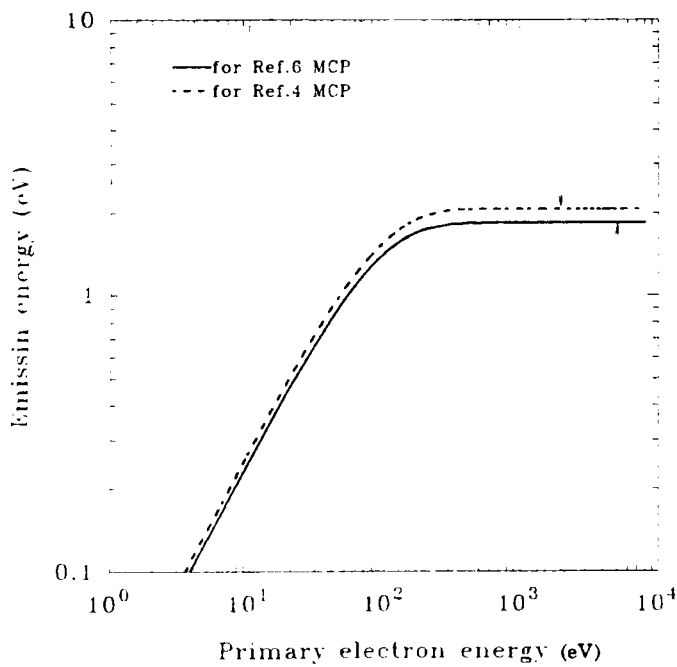


图 3 不同入射电子能量下首次碰撞的二次电子的径向初能量的计算值, 箭头所指的位置对应于文献 4 和 6 的入射能量.

Fig. 3 Radial emission energy of secondary electrons produced by the first strike, the arrows point at the values corresponding to the primary electron energies in Ref. 4 and Ref. 6

(输出电流远小于流过通道壁的电流,后者约为  $10\mu\text{A}$ ),增益曲线的斜率在 MCP 电压较高时斜率仍会变小. 根据式(2)计算出的这两种 MCP 首次碰撞产生的二次电子的初能量如图 3 所示,当入射电子的能量小于  $100\text{eV}$  时,首次碰撞的二次电子近似服从“能量正比假设”,而当入射能量增大到一定值后,  $V_{or_1}$  趋于恒定.

#### 4 结论

在考虑了首次碰撞的二次电子的初能量影响后,运用“能量正比假设”得到了 MCP 增益随板上所加电压变化的公式,其计算结果与实验值符合较好. 这表明文献 7 所提出的“能量正比假设”本身是正确的,但应用时必须考虑首次碰撞的影响才能得到合乎逻辑的结果. 基于该考虑对快速选通情况下 MCP 特性的模拟正在进行中.

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.

#### 参考文献

- 1 Wiza J L. Nuclear Instruments and Methods, 1979,162: 257~601
- 2 Young B K F, Stewart R E, Woodworth J G. Rev Sci Instrum, 1986, 57(11): 2729~2732
- 3 Katayama M, Nakai M, Yamanaka T, Izawa Y, Nakai S. Rev Sci Instrum. 1991,62(1): 124~129
- 4 Guest A J. Acta Electron, 1971, 14(1): 79~97
- 5 Ito M, Kume H, Oba K. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1984,NS-31(1): 408~412
- 6 Eschard G, Manley B W. Acta Electron, 1971,14(1): 19~39
- 7 Eberhardt E H. Applied Optics, 1979,19(9): 1418~1423
- 8 Henke B L, Smith J A, Attwood D. Journal of Applied Physics, 1977, 48(5):1852~1866

## THE FIRST COLLISION PROBLEM OF A MCP GAIN MODEL

Chang Zenghu

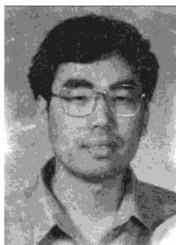
*State Key Laboratory of Transient Optics Technology,*

*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, 710068*

Received date: 1994-05-03

**Abstract** The gain versus voltage characteristics of the microchannel plate be studied analytically. "Energy proportionality hypotheses" proposed by Eberhardt is one of the model that gives some interesting results, but it did not consider the influence of the inertial energy of secondary electron of the primary electron colliding with MCP. In this paper, the effects of the first collision on the modeling results are investigated and a new gain versus voltage formula is obtained which fit the experimental results better than reported analytic models. The new models also conclude that the collision numbers change with voltage applied on the MCP, which is different from the conclusion of Eberhardt.

**Keywords** MCP; Gain; First collision



**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 post-doctor. 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.