

MCP 噪声因子的理论分析

韦亚一 陶兆民

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

摘要 本文从理论上分析了 MCP 对输出信号信噪比的影响, 推导了噪声因子的表达式, 作了相应的数值计算。根据计算结果指出了降低 MCP 噪声因子的有效途径。

关键词 MCP; 信噪比; 噪声因子

1. 引言

MCP 是一种被广泛应用的二维电子倍增器件。由于电子在 MCP 通道中倍增是随机过程, 因此 MCP 本身就会对倍增的信号产生附加噪声。此噪声可以用 MCP 的噪声因子 F 来表示。有关系式 $(s/n)_{out} = (s/n)_{in}/\sqrt{F}$ 。 F 表征了 MCP 噪声性能的好坏, 是衡量 MCP 性能的一个重要参量。 $F \geq 1$, F 越小越好。

H. Pollehn 等^[1]推导出

$$F = (1/\gamma)(1 + D^2/\bar{K}^2) \quad (1)$$

其中 γ 为 MCP 的开口面积比; D^2 是 MCP 输出电子数分布的方差; \bar{K} 为 MCP 的平均增益。

本文在 H. Pollehn 工作的基础上, 首先推导出 MCP 输出电子数的分布公式, 然后根据此分布公式求得 D^2 和 \bar{K} , 最后推出 F 的表达式, 并进行数值计算, 指出减小 F 的可能途径。

2. 理论推导

把 MCP 通道中电子倍增的过程分成两步: (1) 阴极产生的原初电子进入 MCP 通道, 在入口处激发出第一代次级电子; (2) 被激发出的第一代次级电子在通道中电场的作用下进一步激发次级电子直至逸出通道。

输入一个电子在出口处得到 K 个电子的几率是

$$S(K) = \sum_{\sigma_1=0}^{\infty} P(\sigma_1) q_{\sigma_1}(K) \quad (2)$$

其中 $P(\sigma_1)$ 是原初电子在 MCP 入口处激发产生 σ_1 个第一代次级电子的几率, 符合 Poisson 分布^[2], 即 $P(\sigma_1) = (\bar{\sigma}_1^{\sigma_1}/\sigma_1!) \exp(-\bar{\sigma}_1)$ ($\bar{\sigma}_1$ 是第一代次级电子数的平均值);

1992.07.17 收到, 1993.01.15 定稿。

韦亚一 男, 1965 年生, 硕士, 主要研究光电器件。现在中国科学院上海技术物理所红外物理国家实验室攻读半导体物理与器件博士学位。上海 200083。

陶兆民 男, 1924 年生, 研究员, 主要从事光电器件研究。

$q_{\sigma_1}(K)$ 是 σ_1 个第一代次级电子产生 K 个输出电子的几率。

由实验数据^[2]可知,单级电子输入时通道输出电子数的分布近似为负指数分布,即

$$L(x) = (1/\bar{x})\exp(-x/\bar{x}) \quad (3)$$

\bar{x} 为平均输出电子数, $L(x)$ 是输出得到 x 个电子的几率。

当 $\sigma_1 = 1$ 时,输出端获得 K 个电子的几率 ($K \geq 1$) 为

$$q_1(K) = (1/\bar{K}_1)\exp(-K/\bar{K}_1)$$

其中 $\bar{K}_1 = \bar{K}/\sigma_1$, \bar{K} 是 MCP 平均增益。

当 $\sigma_1 = 2$ 时,输出端获得 K 个电子的几率为

$$q_2(K) = \sum_{V=1}^K q_1(V)q_1(K-V)$$

同理得

$$q_{\sigma_1}(K) = C \cdot \frac{K^{\sigma_1-1}}{\bar{K}_1 \cdot \sigma_1} \exp(-K/\bar{K}_1) \quad (4)$$

C 是归一化常数。

$$C \cdot \int_{K=0}^{\infty} \frac{K^{\sigma_1-1}}{\bar{K}_1 \cdot \sigma_1} \cdot \exp(-K/\bar{K}_1) dK = 1$$

$$C = 1/(\sigma_1 - 1)! \quad (5)$$

将(4),(5)式代入(2)式得到

$$S(K) = \frac{e^{-\bar{\sigma}_1} \cdot \exp(-\bar{K} \cdot \bar{\sigma}_1/K)}{K} \cdot \sum_{\sigma_1=1}^{\infty} \frac{(\bar{\sigma}_1 \cdot K/\bar{K})^{\sigma_1}}{\sigma_1! (\sigma_1 - 1)!} \quad (6)$$

令

$$\phi(K) = C'S(K) \quad (7)$$

C' 为归一化常数

$$C' = 1/\sum_K S(K) \quad (8)$$

3. 数值计算和讨论

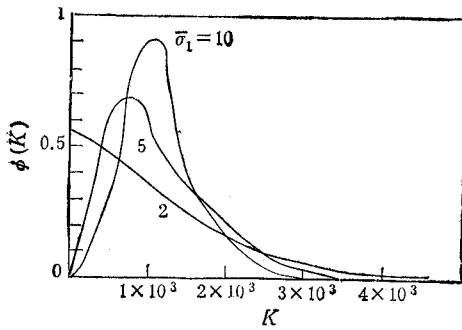
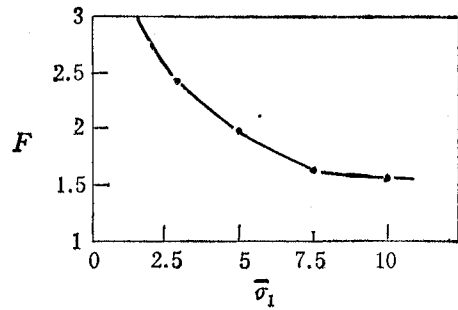
由(6),(7),(8)式可见 $S(K), \phi(K)$ 是以 $\bar{\sigma}_1, \bar{K}$ 为参量的函数。取 $\bar{K} = 10^3$ 对(8)式做数值计算,分别计算了 $\bar{\sigma}_1 = 2, 5, 10$ 时的 $\phi(K)-K$ 曲线,结果如图 1 所示。

由图 1 可见,随着 $\bar{\sigma}_1$ 的增大,输出电子数分布曲线逐步由负指数分布趋向类似于 Poisson 分布。由于

$$D^2 = \sum_K (K - \bar{K})^2 \phi(K) \quad (9)$$

将(6)~(8)式代入(9)式,可见 $F(\bar{\sigma}_1)$ 是以 γ, \bar{K} 为参量的函数。这就把噪声因子与第一代次级电子产额联系起来。取 $\bar{K} = 10^3, \gamma = 0.7$ (这是常规情况下的值),进行数值计算得到 $F-\bar{\sigma}_1$ 曲线如图 2 所示。由图 2 可见, F 随 $\bar{\sigma}_1$ 的增大而逐步减小。当 $\bar{\sigma}_1$ 取 10 左右时, F 近似达到最低。此时再增大 $\bar{\sigma}_1, F$ 的减小并不显著。 $F(10) \approx 1.6$ 。

事实上,我们也可以根据(1)式从图 1 的计算结果来进行定性的分析。考虑单电子入射时的情况:(1)如果 MCP 没有倍增作用,即认为在前面假设的两步中没有第二步,则

图1 $\bar{K} = 10^3$ 时的 $\phi(K)$ - K 曲线图2 $\bar{K} = 10^3, \gamma = 0.7$ 时的 $F(\bar{\sigma}_1)$ 曲线

输出电子就是第一代次级电子,服从 Poisson 分布。对于 Poisson 分布有 $D^2 = \bar{K}$,所以 $D^2/\bar{K}^2 = 1/\bar{K}$,由于 \bar{K} 一般很大, $D^2/\bar{K}^2 \rightarrow 0$ 为最小。此时 F 也最小 ≈ 1 (此时 γ 不能计入),相当于没有 MCP,不倍增也不产生附加噪声,电子直接由阴极打到荧光屏上成像。(2)当 MCP 有倍增作用时(即第二步引入后),由于次级电子能量和方向的离散性,使得 MCP 输出电子的分布由第一代次级电子的泊松分布转化为负指数分布。对于负指数分布, $D^2 \sim \bar{K}^2$ 所以 $F \approx 2/\gamma \approx 3-4$ 。以上是单电子入射的情况。当多个电子入射时(即等效于 $\sigma_1 > 1$),使得输出电子数的分布不再是负指数分布。随着 σ_1 的增大, $\phi(K)$ 趋向于泊松分布,即 F 由 $2/\gamma \rightarrow 1/\gamma$ 。

4. 减低 F 的有效途径

由以上分析讨论可以发现,除了增大开口面积比 γ 外,还可以通过提高第一次碰撞的平均次级电子产额 σ_1 来降低噪声因子 F 。从理论上讲, σ_1 越大越好;但结合工艺的可行性和最有效的减低 F 来看,取 $\sigma_1 = 10$ 较为合适。

由于 MCP 玻璃的 $\sigma \approx 2 \sim 3$ (垂直电子入射时)远小于 10,靠增大入射倾角来提高 σ ,是很有限的。因此,我们提出:在 MCP 入口端蒸镀上一层具有高电子产额的碱金属卤化物来实现 $\sigma_1 \approx 10^{[3]}$ 。我们估算了几种高电子产额化合物,蒸镀在 MCP 入口处对 \bar{K} 和 F 的影响(相对于标准 MCP),如表 1。

表 1 几种材料对 \bar{K} 和 F 的影响

材 料	\bar{K} 的增大倍数	F 减小程度(为原值的)
CsI	3.2	1/3.0
KCl	1.8	1/1.6
MgF ₂	2.0	1/2.0
LiF	1.3	1/1.6
CsCl	3.2	1/3.0
NaCl	3.1	1/2.8

当然,这些材料的选取必须慎重,还要兼顾到其稳定性和耐高温烘烤。如有文献报道^[4] CsCl 随烘烤温度的升高,其次级电子产额有较大的变化,如图 3 所示。另外,蒸镀前的预处理^[5],如烘烤去气等,对蒸镀的可靠性也有较大的影响。

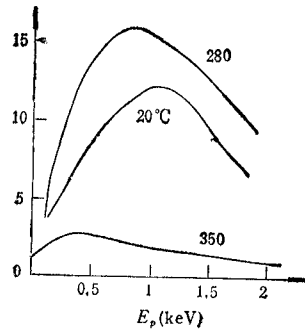


图3 CsCl 在三种温度下的次级电子产额曲线

参 考 文 献

- [1] H. Pollehn et al., *Advances in Electronics and Electronic Physics*, A40, 21 (1976).
- [2] A. J. Guest, *Acta Electronica*, 14 (1971) 1, 99—110.
- [3] H. Bruining, *Physics and Applications of Secondary Electron Emission*, Springer-Verlag, (1954) pp.120—140.
- [4] N. B. Leonov et al., *Sov. J. Opt. Technol.* 48 (1981) 8, 740—743.
- [5] 陶兆民, 韦亚一, *光电子技术*, 1992 年, 第 1 期, 第 59—64 页.

THEORETICAL ANALYSIS OF MCP NOISE FACTOR

Wei Yayi Tao Zhaomin

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

Abstract Based on the theoretical analysis, the formula of MCP noise factor is suggested. The results of numerical calculation show that the MCP noise can be reduced by increasing the yield of secondary electrons at MCP entrance. According to this results, the possibility of reducing the noise factor by depositing certain alkali-halide compounds at the entrance of the MCP channels is discussed.

Key words MCP; Signal to noise ratio; Noise factor