

微通道板及其应用 (I)

潘 广 炎

(中国科学院物理研究所)

一、微通道板的工作原理和发展历史

微通道板是从光电倍增管、通道电子倍增器发展而来的。什么是光电倍增管 (photomultiplier 简称为 PM)、通道电子倍增器 (channel electron multiplier 简称为 CEM) 和微通道板 (microchannel plate 简称为 MCP) 的工作原理呢? 这必须从 1905 年爱因斯坦^[1] 提出的光电效应讲起, 著名的爱因斯坦光电方程是:

$$\frac{1}{2} m v^2 = h \nu - P, \quad (1)$$

式中 $h \nu$ 是光子能量, P 是电子的逸出功, $\frac{1}{2} m v^2$ 是电子离开金属表面后所具有的能量。也就是说, 入射光子的能量大于电子逸出功时, 就有一个具有能量为 $\frac{1}{2} m v^2$ 的光电子从金属表面跑出来。爱因斯坦的光电效应理论曾被著名的物理学家密立根^[2] 的大量实验事实所证实。

1. 光电倍增管 (PM)

它是一种光敏真空管, 由光阴极、光电子电光学收集系统、和用来发射二次电子的一级或多级打拿极以及阳极组成。打拿极位于光阴极和阳极之间。光电倍增管通常用于探测随时间变化的光信号, 它的增益 G 很高, 一般 $G > 10^6$ 。详细介绍见本刊 1982 年第 11 卷第 7, 9 两期李禄华的文章。

2. 通道电子倍增器 (CEM)

1930 年, 美国的 Farnsworth 提出了连续式打拿极电子倍增器的专利^[3]。后来, 苏联的

Oschepkov、美国 Bendix 研究实验室的 Goodrich, Wiley 和英国 Mullard 研究实验室的 Adam, Manley 等进行了大量实验工作, 在他们科学论文中描述了在氢气气氛中, 由高温加热处理 (250—450°C) 所得到的电阻性表面的铅玻璃, 可以获得高增益的二次电子发射。这就是后来发展成为通道电子倍增器的重要材料。一种直线形的通道电子倍增器示于图 1^[3], 图 1(a) 为打拿极的示意图, 图 1(b) 为直线形通道即连续式打拿极的示意图。

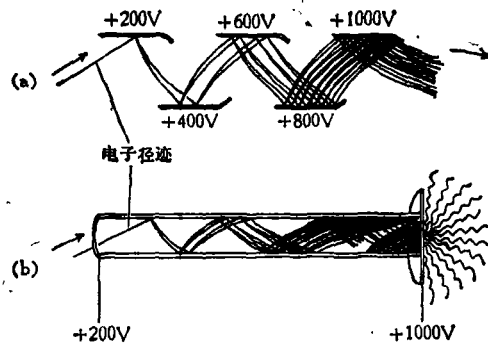


图 1 直线形通道示意图

CEM 是一种具有合适的电阻和良好二次电子发射材料的管子。在管子两端可加几千伏的电压, 它应该在 10^{-4} 托或者更低真空条件下工作, 因为气压较高会增加本底而且会缩短寿命。在气压大于 10^{-4} 托的情况下, 加高压会产生电弧, 使 CEM 遭到破坏。

当一个具有足够能量的光子或者粒子, 入射在 CEM 孔径的内表面时, 引起二次电子发射。二次电子在通道内被静电场加速, 继续轰击通道的内表面, 则有更多的二次电子产生。

这种过程在一个通道电子倍增器中出现 10—20 次，这主要取决于设计者和使用者的要求。

当增益超过 10^4 时，直线形的通道电子倍增器就变得不稳定了。这种不稳定的主要原因是出现了正离子反馈现象。因为 CEM 工作时，会有大量的电子通过这个通道到达输出端，这些电子在通道内电离剩余气体分子的几率很高。这样，由电离所产生的正离子被加速到相反方向的输入端，使通道的增益大大降低。这些离子的一部分会轰击通道内壁，发射电子被倍增加入原来的电子行列，使输出脉冲不能代表真正的输入信号，即存在着噪声。另外，这些正离子从 CEM 输入端跑出来，会使所研究的材料和光阴极遭到破坏。

消除离子反馈不稳定性的方法，就是给通道以曲率。曲率会限制离子向倍增器输入端运动的距离。离子反馈的消除，可使设计合理的 CEM 工作增益超过 10^8 。曲线形的通道电子倍增器如图 2 所示。

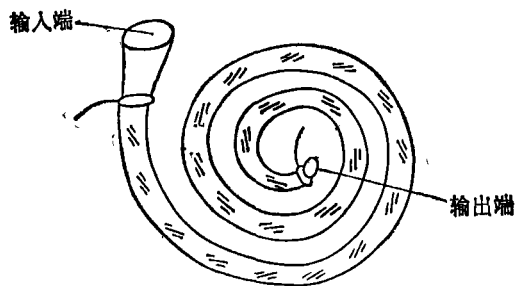


图 2 曲线形的通道电子倍增器

但是必须指出，CEM 往往用于探测随时间变化的信号。有关 CEM 特性的详细介绍见“真空技术”杂志 1976 年第 3 期。

3. 微通道板 (MCP)

自从通道电子倍增器进入实验室之后，由于 CEM 的体积要比 PM 缩小了几十到几千倍，人们就设想：CEM 不仅可用来探测随时间变化的信号，而且也可以用来探测随空间变化的信号，于是就把许多个 CEM 排成一个阵列。实践证明 CEM 的几何尺寸仍然太大，而且使用电源也很不方便，因此，人们继续进行大量实验，使通道进一步缩小。

后来的研究表明^[3]：通道电子倍增器的大部分电学性能既不是通道长度 l 的单变量函数，也不是通道直径 d 的单变量函数，而仅仅是比值 $l/d = \alpha$ 的函数。这样不论怎样缩小尺寸都是可能的了。缩小尺寸可以采用拉玻璃纤维的技术来实现。这就为微通道板的诞生奠定了基础。第一个微通道板的运转是 1959 年至 1961 年间在美国的 Bendix 研究实验室进行的。它是由几千个单通道电子倍增器（一个通道直径约为 $150\mu\text{m}$ ）装配而成的，是用低熔点焊料或烧结的玻璃把它们束缚在一起的。

目前所用的微通道板是由 10^4 — 10^7 个微型化的通道电子倍增器互相平行定向组成的一个阵列（见图 3）^[4]。通道直径约在 10 — $100\mu\text{m}$ 之间，它的长度和直径比值 α 在 40 和 100 之间，增益曲线见图 4。通道轴与微通道板入射面的法线有一个小偏角（ $\sim 8^\circ$ ）。通道矩阵通常是由铅玻璃制成的，每个通道都进行过二次电子发射特性最佳化处理。这样，每个通道可以看成是连续打拿极结构，它有自己的打拿极电阻链。通常用镍铬铁合金涂在微通道板的前表面和后表面上，分别作为输入和输出的电极。电极之

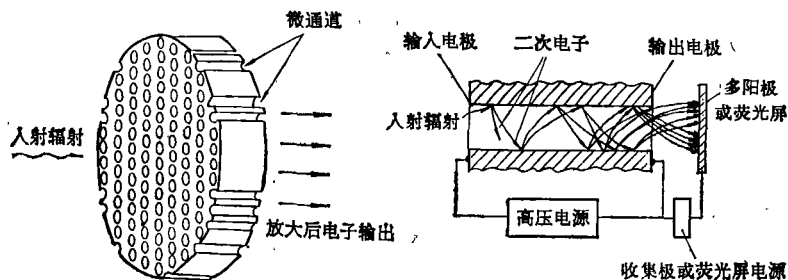


图 3 微通道板示意图

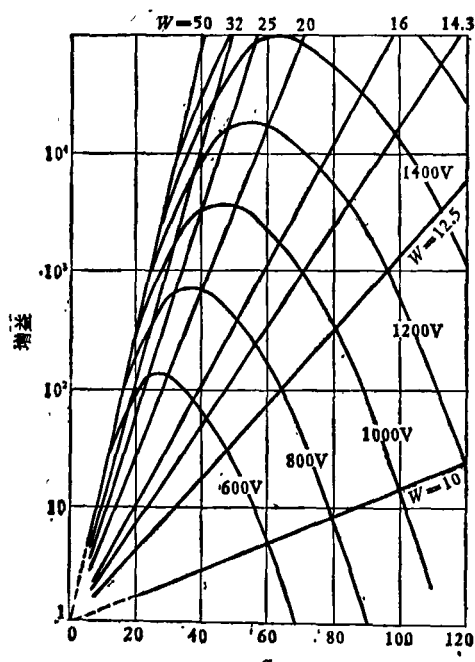


图4 微通道板的增益曲线
($W = V/\alpha$; 初始电子能量为 2000 eV)

间的总电阻为 $10^9 \Omega$ 量级。这样的微通道板的电子倍增系数可达 $10^4 \sim 10^7$ ，并且耦合是超长时间分辨的 (< 100 ps)，而空间分辨仅仅由通道的截面和通道间隔的空间所限制，典型单通

道的直径是 $12 \mu\text{m}$ ，相邻通道中心的间距是 $15 \mu\text{m}$ 。这样，就可探测既随时间变化又随空间变化的信号了。而且空间分辨率是很高的。它不仅可探测一维空间信号，而且可以探测二维空间信号。这就是微通道板的优越性所在。

二、微通道板的结构

微通道板的详细制作过程见文献[3]，其中译文发表在“科学”上。这里只对与结构有关的部分作一简要介绍。微通道板同光学纤维的制造方法非常相似(见图5)^[7]。首先把一根可以被腐蚀的玻璃棒套在一根含有氧化铅的直径为 40 mm 的通道玻璃里，当这两根玻璃组合时要非常小心，不要使可腐蚀的玻璃棒在加工过程中扩散到通道玻璃中去。然后进行第一次拉制玻璃纤维，使其直径缩小 40 倍，得到直径为 1 mm 的第一次拉出来的纤维。接着，把这些拉出来的玻璃纤维堆积成尺寸大约 40 mm 的六角形阵列，并熔凝在一起。然后又进行第二次拉制，使其直径又缩小 40 倍，这样使原来直径为 40 mm 的通道玻璃的直径缩小 1600 倍，而得到直径为 $25 \mu\text{m}$ 的通道孔。最后再把第二次拉

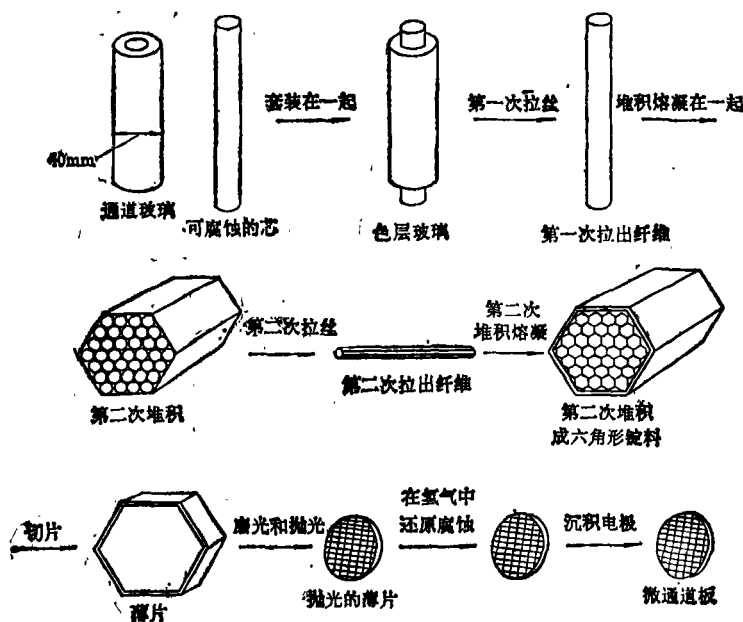


图5 微通道板的制作过程

来的玻璃纤维堆积成所需要的截面为六角形的阵列，并熔凝在一起。由这一步得到的半成品叫做锭料或称为膜片。把这些锭料切成 1 mm 厚度的薄片，然后抛光，并且腐蚀掉玻璃而形成微通道板的结构。

把这种结构在氢气氛中进行加热处理而产生半导体层，使微通道壁上的二次电子发射系数在 1.1—3.5 范围。然后，对微通道板的两面进行真空沉积而得到镍铬铁电极。最后，为了清洗去气，要在 300℃ 烘烤大约 10 小时。

三、微通道板的一些主要特性

1. 离子反馈问题

由直线形通道组合成的微通道板的增益限制在大约 10^4 ，这种增益受限制的主要原因同样来自正离子反馈^[4]。

正离子反馈噪声依赖于增益、气压、剩余气体的性质和通道壁的表面特性。单微通道板的增益在 10^4 — 10^5 范围时就产生正离子反馈（见图 6），这时引起的噪声放大是非常明显的，正离子反馈响应曲线急剧上升。

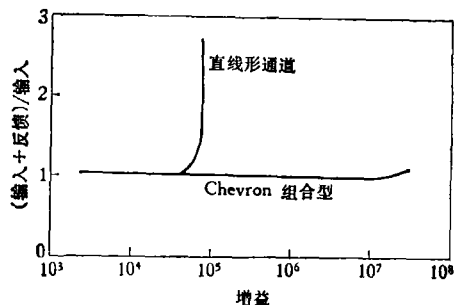


图 6 直线形和 Chevron 组合型通道的正离子反馈响应曲线

两片微通道板的通道构成“人”形时，称为“Chevron”组合型（见图 7），这样，就可以大大减小正离子反馈噪声。使第一块作为输入端的微通道板的通道制成同第二块作为输出端的微通道板的通道有一个小角度。由图 7 可以看出，对于电子或者离子来说，都没有直线通道存在。通道角度的选择，要使得正离子具有低的初始能量，并在同通道壁碰撞之前仅能传输很

物理

短的距离，同时要对二次电子的通过没有明显的抑制作用。这样可以使得增益达到 10^7 或更多，而又没有离子反馈产生的噪声。

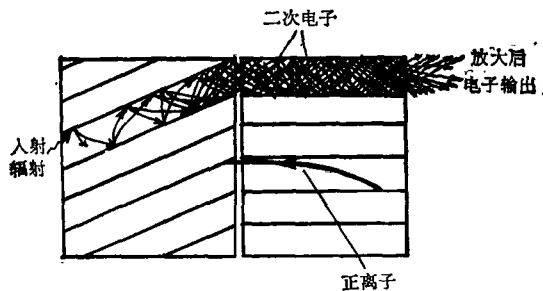


图 7 两片微通道板构成 Chevron 组合型示意图

正离子反馈也能由曲线形的微通道板来抑制，这种类型的微通道板首先是由法国的物理应用和电子技术实验室^[4]制造的。已经证明，曲线形微通道板在许多特性上都超过直线形的。它具有较高的增益和较低的统计涨落，并且其本底噪声也大为降低。

七十年代初，已成功地由三片不同定向的通道板制成高增益微通道板，这称为“Z 组合式”的微通道板。这种组合形式的增益值大于 10^6 ，没有正离子反馈。

目前大多数 Z 组合式的微通道板，其通道与通道板表面的法线之间构成 5° — 8° 角。这样，可以减少离子反馈，增加入射辐射和通道表面的碰撞几率，在将这种组合形式的微通道板用于显象时，并能减少荧光屏输出的直接光反馈。

2. 增益和饱和

直线形和曲线形单微通道板，以及由两片微通道板组合成的 Chevron 板，在一定长度和直径比 (L/d) 情况下，所加电压和增益关系的特性曲线如图 8 所示^[4]。给出这些特性的条件是：对于直线形通道板和 Chevron 组合板，输入信号的电流密度为 10^{-12}A/cm^2 ，电子能量为 300 eV。沿通道壁的总电流是 $0.8 \mu\text{A}$ 。直线形通道板的入射偏角为 5° ，Chevron 组合板的前后通道的偏角是 15° ，曲线形通道板的入射偏角为 25° 。

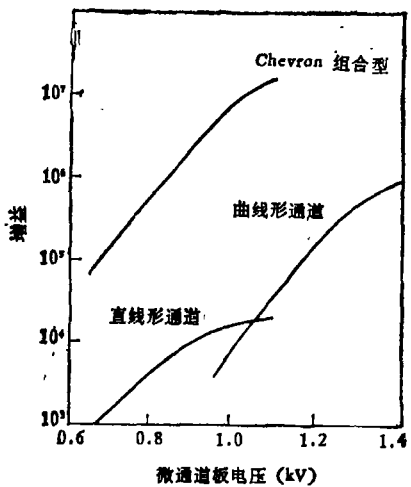


图 8 微通道板的增益与电压关系曲线

(对直线形单微通道板和 Chevron 组合的微通道板, $L/d = 44$, $d \pm 38 \mu\text{m}$; 对曲线形单微通道板, $L/d = 80$, $d \pm 40 \mu\text{m}$)

从图中可以看出,超过一定的增益值,直线形通道板的离子反馈就会很快引起增益饱和。离子反馈导致重复性的电子雪崩,使得通道饱和,并且由于壁上累积电荷而引起电场的畸变。两者的效应导致通道板增益变小。但是,在离子反馈引起增益饱和之前,曲线形通道板已有足够高的增益。

根据微通道板的工作方式不同,可能由于玻璃的电导率有限,电流增大到一定程度,会使输出电流饱和而引起增益饱和,或者由于通道壁上正电荷累积,使得电荷饱和而引起增益饱和。从这种饱和效应可以看到微通道板的电流传输特性(见图 9)^[4]。

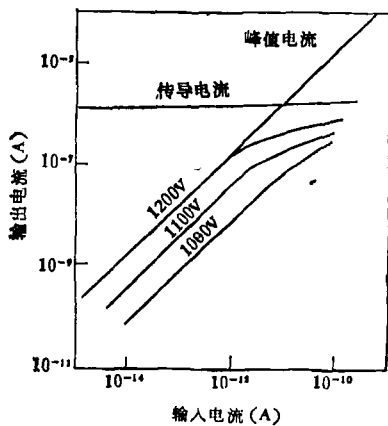


图 9 在不同的微通道板电压情况下,曲线形微通道板输出电流和输入电流关系曲线

3. 脉冲高度分布

(1) 单微通道板

微通道板的输出脉冲高度分布近似于指数函数(见图 10)^[8],公式如下:

$$n(q) = n_0 \exp(-q/\bar{q}), \quad (2)$$

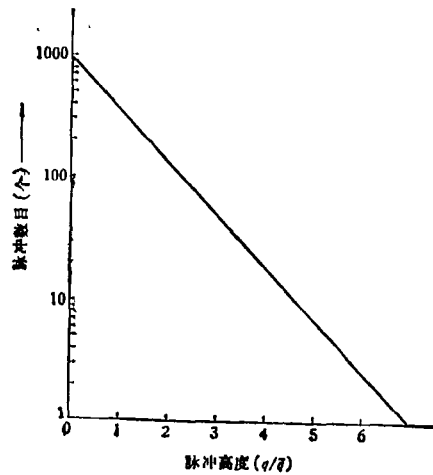


图 10 单微通道板的脉冲高度分布

这里 $n(q)$ 是脉冲高度为 q 的脉冲数目, n_0 是归一化系数。 \bar{q} 为脉冲高度的平均值,它是微通道板所加电压的函数。平均增益作为电压 V 的函数曾由 Galanti 于 1971 年和 Wiza 于 1979 年测量过^[9],典型的结果如图 11 所示。通常,

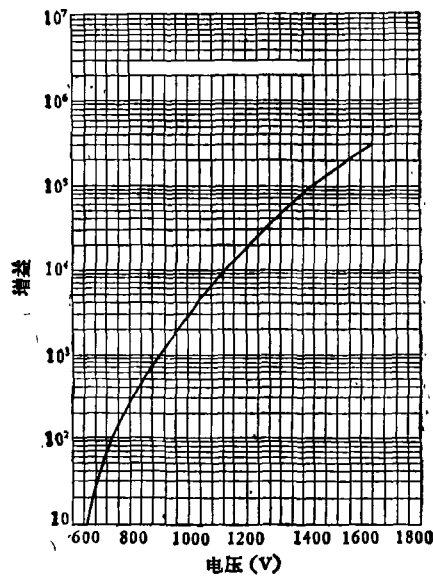


图 11 电流增益和所加电压关系曲线 (初始电子能量为 500 eV)

单微通道板工作电压范围为 500—1200 V，对应的增益为 10^3 — 10^4 ，增益上限取决于离子反馈的产生。

(2) Chevron 组合型通道板

Chevron 组合型通道板如图 12 所示。它是用来抑制离子反馈和保持高增益脉冲输出的方法之一^[8]。

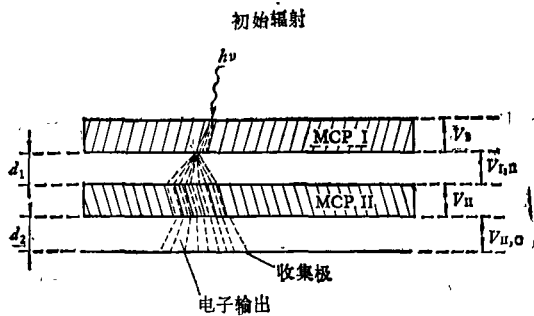


图 12 两块微通道板的 Chevron 装置

两块通道板之间的距离是 d_1 (约 50—150 μm)，第二块板和收集板之间的距离是 d_2 。第一和第二块通道板上所加的电压分别为 V_1 和 V_2 ，这两块板之间的偏压为 $V_{1,2}$ ，第二块板同收集板之间的电压为 $V_{2,c}$ 。

V_1 和 V_2 大约为 1 kV，在这种情况下，所得到的每块通道板的平均增益为 10^3 。对于这种增益水平，第一块通道板 (MCP I) 不可能产生“电荷饱和和脉冲”。然而，来自第一块微通道板的许多电子可以触发第二块微通道板 (MCP II) 的每个通道 (见图 12)，这时第二块

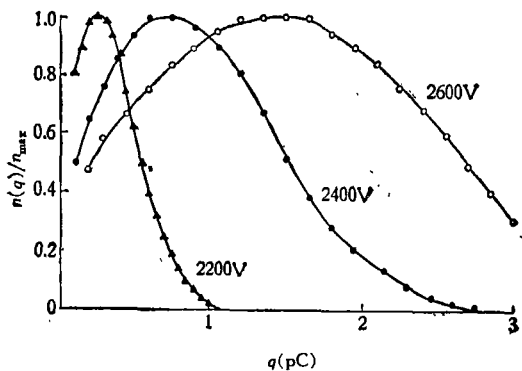


图 13 串级微通道板的脉冲高度分布

- △——所加电压为 2200 V
- 所加电压为 2400 V
- 所加电压为 2600 V

微通道板的输出脉冲出现了饱和现象。这就使得组合成 Chevron 形的微通道板同单微通道板比较，会得到完全不同的脉冲高度分布。典型的 Chevron 装置的脉冲高度分布如图 13 所示^[8]，增益峰值约为 10^7 ，脉冲高度分布是相当宽的。

分辨率 $\Delta\eta$ 的定义是脉冲高度分布的宽度和增益峰值之比。可表达为

$$\Delta\eta = \frac{a}{b} \times 100\% \quad (3)$$

式中 a 为脉冲高度分布的宽度， b 为增益率值，如图 14 所示。

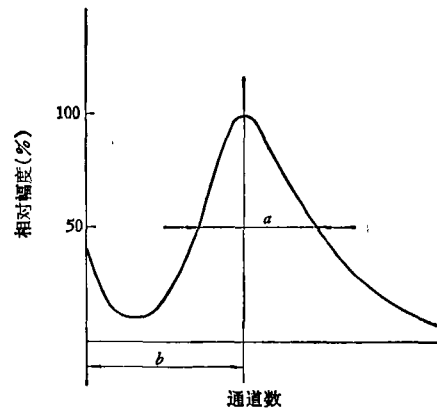


图 14 分辨率 $\Delta\eta$ 的定义

Wiza 于 1979 年^[5]曾测量了增益峰值和分辨率 $\Delta\eta$ 随两块通道板之间电压 $V_{1,2}$ 的变化，结果如图 15, 16 所示。

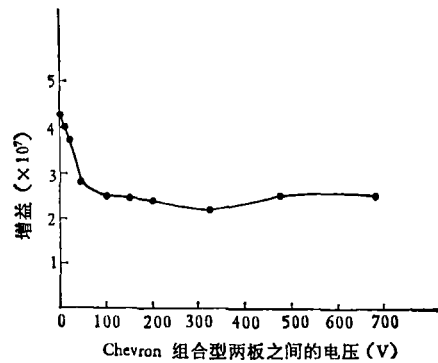


图 15 Chevron 微通道板的增益峰值和两板之间电压的关系曲线

由图 15 可以看出，在 $V_{1,2} = 100$ — 700 V 的情况下，增益峰值几乎保持常数；而由图 16

可知,分辨率 $\Delta\eta$ 在 $V_{I,II}$ 为 100 V 以上继续减少,在 $V_{I,II} = 700$ V, 或者说, $V_{I,II}/d_1 \approx 5 \times 10^6$ V/m 条件下,大约为 60%。

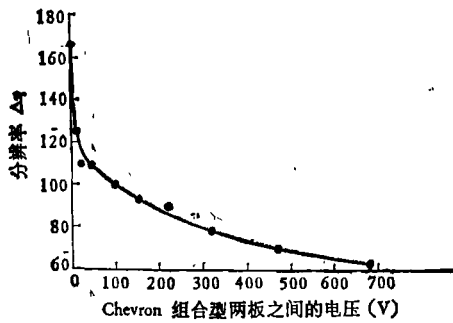


图 16 Chevron 微通道板的分辨率 $\Delta\eta$ 和两板之间电压的关系曲线

荷兰原子分子物理研究所的 D. de Bruijn 等^[8]用单色仪和 MCP 探测器对分辨率 $\Delta\eta$ 进行了测量,条件是 $V_I = V_{II} = 1$ kV 和 $d_1 = 50$ μ m。他们也发现情况与此类似。但是,它们指出,对于 $V_{I,II} > 300$ V, 或者 $V_{I,II}/d_1 > 6 \times$

10^6 V/m, 分辨率 $\Delta\eta$ 保持不变。

窄的脉冲高度分布的优点是:人们通过选择合适的甄别阈,就能容易地从前置放大器来的脉冲中去掉噪声,并且窄的分布对前置放大器、主放大器、模数转换器等所有电子学系统的动态范围要求不高。该研究所的实验证明:两块微通道板的电压大约分别为 1 kV, 两块微通道板之间距离为 50 μ m, 两块微通道板之间的电压大约为 300 V, 这时就能够得到较好的结果。在 $V_{II,C} > 100$ V 情况下,第二块微通道板 (MCP II) 与收集板之间的距离和电压,对脉冲高度分布没有影响。

Henkel 于 1978 年提出了另一种得到窄的脉冲高度分布的方法^[9], 在 Chevron 组合型的微通道板之间放一个金属网(边长为 44 μ m 的方孔)、在增益为 2×10^7 时,分辨率 $\Delta\eta$ 达到 50%。

(待续)

(上接第 49 页)

当广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] C. V. Raman et al., *Nature*, 121 (1928), 711.
 [2] S. P. S. Porto et al., *J. Opt. Soc. Am.*, 52 (1962), 251.
 [3] J. Brandmuller et al., *The Spex Speaker*, Dec. 3 (1978), 1.
 [4] C. A. Cody et al., *Inorg. Chem.*, 18 (1979), 1572.
 [5] 姜玉春等, *分析化学*, 11-4(1983), 241—245.
 [6] 王宗明等, *Proceedings of 7th International Conference on Raman Spectroscopy (ICORS)*, Ottawa, 1980, 132.
 [7] P. J. Hendra, *The Spex Speaker*, March, 1 (1974), 1.
 [8] F. Rossetti, *Z. Phys.*, 66 (1930), 646.
 [9] T. G. Spiro et al., *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 69 (1974), 2622.
 [10] M. Fleischmann et al., *Chem. Phys. Lett.*, 26 (1974), 163.
 [11] P. D. Maker et al., *Phys. Rev.*, 137A (1965), 801.
 [12] A. C. Eckbreth et al., *Proceedings 7th ICORS*, Ottawa, 1980, 644.
 [13] R. W. Terhune et al., *Phys. Rev. Lett.*, 14 (1965), 681.
 [14] E. J. Woodbury et al., *Proc. IRE*, 50 (1962), 2367.
 [15] 谢 沧等, *Proceedings 7th ICORS*, Ottawa, 1980, 674.
 [16] A. Owyong et al., *Opt. Lett.*, 1 (1977), 152.
 [17] W. J. Jones et al., *Phys. Rev. Lett.*, 13 (1964), 657.