

文章编号: 1002-2082(2004)05-0025-05

# 微通道板及其主要特征性能

潘京生

(北方夜视技术股份有限公司 南京分公司, 江苏 南京 210006)

**摘要:** 简要描述了微通道板的工作原理, 介绍了微通道板的主要特征性能及其工作参数, 包括厚度、开口面积比、增益及增益均匀性、动态范围、噪声、工作寿命和空间分辨率等, 阐述了这些特征性能和参数彼此间的相互关联和相互制约的特殊关系。在此基础上, 对影响和制约微通道板各个特征性能和参数的特殊关系及因素作了详细分析。这项工作对进一步认识和协调处理微通道板的各种特征性能和参数有着非常积极的作用。

**关键词:** 微通道板; 增益; 噪声因子; 像增强器

**中图分类号:** TN223

**文献标识码:** A

## Microchannel Plates And Its Main Characteristics

PAN Jing-sheng

(North Night Vision Technology Ltd. Co., Nanjing Branch, Nanjing 210006, China)

**Abstract:** The working principle of microchannel plate (MCP) is described briefly. The main performance characteristics and its working parameters are introduced, including thickness, open area ratio, gain uniformity, dynamic range, working life and resolution etc. The relationship between these performances characteristics and parameters is presented. On the basis of the presentation mentioned above, a specific relationship and factors, which affect parameters, is analysed. The further understanding and processing of the relationship between MCP'S main characteristic performances and parameters are more significant for the MCP's production and application.

**Keywords:** MCP; gain; noise figure; image intensifier

### 引言

微通道板是于20世纪60年代末开发成功的一种简单紧凑的电子倍增器件, 可以探测带荷粒子、电子、X射线和UV光子, 具有低功耗、自饱和、高速探测和低噪声等优点, 并以多种形式应用于各类探测器中。

微通道板的形状如一聚集了上百万个细微的平行空心玻璃管的薄圆片, 每一空心管通道的作用犹如一个连续的打拿极倍增器, 薄片两端面镀有镍铬金属薄膜。外环为一圈镀有镍铬金属薄膜但没有通道的实体边, 用于提供良好的端面接触以便施加电压。微通道板必须工作于真空环境中, 因其工作原理是利用通道内表层产生二次电子, 在薄片两端加上电压。当电子或其它粒子以一定能量撞击低

电势输入面的通道内壁时产生二次电子, 二次电子在场强的作用下沿着通道加速前进。重复多次碰撞过程, 最后在高电势的输出端面产生大量的电子, 这个过程被形象地比喻为“电子雪崩”, 如图1所示。

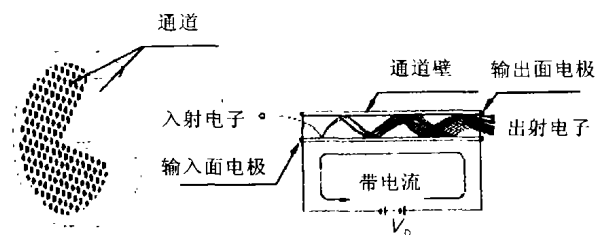


图1 微通道板工作原理示意图

**Fig. 1** Schematic diagram of working principle for MCP. 这个倍增器件的增益取决于施加的电压值、长径比和通道内壁材料的二次电子发射特性。通过

收稿日期: 2003-04-18; 修回日期: 2003-08-10

作者简介: 潘京生(1965-), 男, 北京人, 高级工程师, 主要从事微通道板和光纤倒像器的设计开发和制作工作。

调节微通道板端面间的电压,可以控制这个倍增器的增益。由于增益取决于长径比而非通道的绝对尺寸,所以微通道板的尺寸及孔径可以做得很小而不改变其基本性能。在提供信号倍增的同时,还可以获得良好的空间分辨能力。因此,微通道板主要应用于微光像增强器。

微通道板的工作特性取决于它的增益和噪声因子以及空间分辨能力。微通道板的几个主要特性参数在相应工作条件下相互影响并相互制约着。巧妙处理这些参数即可达到所要求的工作效果。

## 1 厚度

微通道板的厚度取决于通道直径。通常情况下,长径比  $L/d$  ( $L$  为微通道板厚度即通道长度,  $d$  为通道直径) 在 40~55 之间。微通道板增益与微通道板的长径比在不同电压条件下的对应关系如图 2 所示。由图可见,要获得最大增益,要求微通道板厚度满足最佳长径比。微通道板的厚度薄到一定程度会严重降低其机械强度,操作处理时极易损坏,并且增加了制造难度,所以应在权衡工艺制造难度的同时,尽量选择相对合适的长径比参数,使之接近于最佳长径比,以获得相对较为满意的微通道板增益。

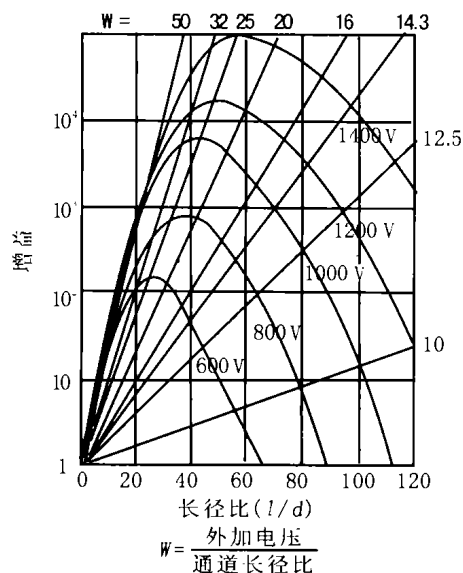


图 2 微通道板增益与通道长径比的对应关系

Fig. 2 Correspondence relationship of gain and length diameter ratio of microchannel plates

另外,微通道板的通道与微通道板两端面的垂

直轴线存在一定的角度,这个角度称为微通道板的斜切角,通常的斜切角为  $5^\circ$ ,  $8^\circ$  和  $12^\circ$ 。斜切角可以增加入射电子撞击通道内表面的几率,减少离子反馈,还可以避免作为输出窗口荧光屏上的光线直接反射到输入端的光阴极面上。

## 2 开口面积比

开口面积比为微通道板工作区的通道开口面积与整个工作区面积之比。开口面积比决定微通道板的探测效率,并在一定程度上影响微通道板的噪声因子。微通道板的开口面积比可用下式计算:

$$\text{OAR} = 0.907(d_c/P)^2$$

式中, OAR 为开口面积比;  $d_c$  为通道直径;  $P$  为通道中心距(大的开口面积比可获得大的入射效率,从而提高探测效率)。但若完全考虑追求大的开口面积比参数,会给微通道板的工艺制造带来非常大的困难。通常微通道板的开口面积比为 58%~63%。但也有将微通道板输入面的通道口处理成漏斗状,使开口面积比达到 70% 甚至 80% 的。美国的 Galileo 公司曾进行过这方面的工作,但由于工艺难度大,这项技术没有进入实质性应用。

微通道板的实际探测效率比其开口面积比约高出 20%。这是由于撞击在非开口区域的电子受场强作用将有很大部分再进入相邻通道。但是三代像增强器由于使用的是有离子阻挡层的微通道板,使微通道板探测效率有所降低。

## 3 增益

微通道板的增益主要取决于微通道板输入面与输出面的电势差和微通道板的输入电流密度。通过增加施加于微通道板端面间的电势差及通道内电子的撞击能量,可以获得更多的二次电子,从而使微通道获得更大的增益。

由于微通道板特殊的制造过程,使得通道内部通常附着大量残余气体,如  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  和  $\text{NO}_2$  等。在实际应用中,微通道板首先要经过烘烤排气和一定剂量的电子清刷等处理。电子冲刷过程将降低微通道板通道内壁工作面的二次电子发射能力,从而降低微通道板的增益。经过清刷处理之后,仍

然还会有一定量的气体分子残留下来。一些吸附在靠近通道出射端的残余气体,在电场或电子撞击作用下,产生电离或脱附。反馈离子可降低光阴极的量子转换效率。这些反馈离子在通道内反向加速并在撞击邻近入射端的通道壁时还会产生额外的电子增益,形成背景噪声。离子反馈的发生取决于残余气体压力和电子密度。有外来污染物的微通道板还有可能产生自发射。为了尽量降低微通道板产生的背景噪声,微通道板最大工作电压不得超过 1 000 V,通常推荐的最佳工作电压为 700 V。

在单通道电子倍增探测器中,离子反馈被倍增器件的弯曲螺旋形状所阻止,所有离子只能在一个很短的行程内运动并撞击通道壁。由于缺乏足够的撞击能量,因而反馈离子不能产生二次电子。因此,单通道电子倍增器在不受到空间电荷效应限制的情况下,其增益可达到 $10^8$ 。弯曲通道微通道板的设计由此得到启发,弯曲通道的微通道板可以获得 $10^6$ 的增益并可有效抑制离子反馈和由此引发额外增益而产生的背景噪声。因此,虽然弯曲通道微通道板应用效果非常不错,但是其制造工艺难于控制,至今仍然无法转化为批量生产和应用。

为了在不增加噪声的前提下获得更高的增益,通常采用两片微通道板的“V”型叠加或三片微通道板“Z”型叠加方法,如图3所示。“V”型叠加微通道板组件工作电压范围为1 000 V~1 800 V,可获得的增益为 $10^6 \sim 10^7$ ,输出噪声暗点数可维持在一个相对满意的范围。“Z”型叠加微通道板组件工作电压范围为1 500 V~2 700 V,可以获得 $10^7 \sim 10^8$ 的增益并且维持良好的信噪比,但是,这两种叠加方式都将损失探测器件的空间分辨率。

入射电子的撞击能量和开口面积比与增益也有着很大关系。有效提高第一次电子撞击通道内壁概率及第一次撞击的二次电子产额将大大提高倍增器件的增益。在三代像增强器中,为了保护Ⅲ-V族负电子亲和势的半导体光阴极不受反馈离子的损害,在微通道板的输入面镀有一层厚度为3~5 nm的多孔状氧化铝膜,用于阻止能量低于200 eV的电子穿越,以此来阻止正离子从通道反馈而出(但这并不能阻止反馈离子在反馈过程中撞

击内壁产生额外电子增益而形成的背景噪声)。这不仅降低了微通道板的探测效果,还减小了入射电子的撞击能量,因此也在一定程度上降低了微通道板的增益。

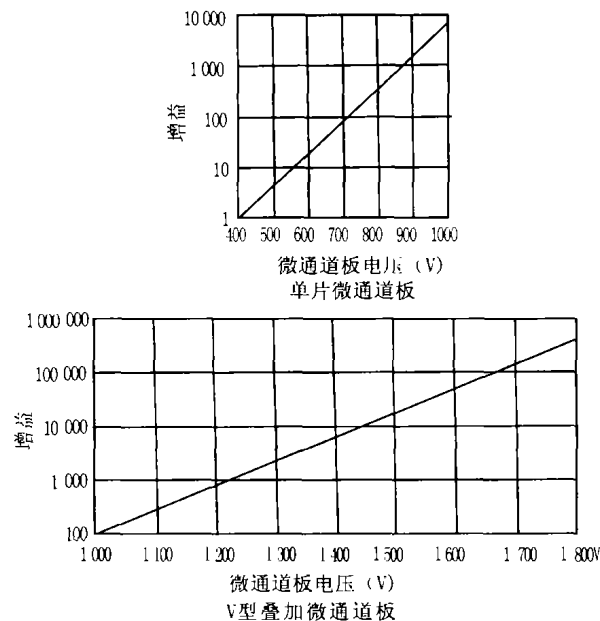


图3 微通道板电压与增益的对比关系

Fig. 3 Voltage versus gain of MCP

微通道板的输入电流密度对增益也有很大影响。当工作电压低于700 V时,微通道板的增益即输出电流密度随工作电压增加而成比例增加,此时输入电流密度对增益没有影响。工作电压超过700 V时,微通道板的增益在一定范围内随着输入电流密度的增加而成比例增加,但当输出电流密度超过输入电流密度的5%后,输出电流密度将不再随之成比例增加,这就是微通道板的“自饱和现象”。因此,低电阻微通道板将起到提高微通道板的增益饱和起点和扩大微通道板动态范围的作用。

#### 4 增益均匀性

由于微通道板是众多通道的熔合阵列,因此阵列中部分区域间在通道直径上的偏差将造成相应区域间增益的不同,在像增器的应用中就形成了输出像的固定图案噪声,严重时荧光屏上呈现非常明显的亮区或暗区,如部分零星通道的损坏、污染及坏死,在荧光屏上表现为细小的暗点或亮点,严重时可表现为发射点。而最常见的增益不均发生在复丝间的交界处,这种现象称为复丝边界噪声或“鸡

丝”(Chickenwire),这是由于复丝交界处的通道与复丝内部的通道在形状或形成的物理化学过程不完全相同而造成彼此间在增益上的一定差别。

通过控制降低通道孔径公差,可以有效抑制增益不均匀现象的产生。如果微通道板通道几何形状偏差控制在 $\pm 2\%$ 的范围内,当其增益低于10 000时,输出增益的不均匀性可小于 $\pm 5\%$ ,即目视几乎观察不出有增益不均匀的现象。

微通道板工作于很高的输入电流密度状态下时,可以看见轻微的“鸡丝效应”。这种现象常见于工作于增益饱和状态时的微通道板,因此适当扩大微通道板的动态范围可在一定程度上减轻“鸡丝效应”。

## 5 动态范围

微通道板的动态范围是指在不改变倍增器特性的情况下从最弱信号到最强信号的探测范围。微通道板的动态范围在一定程度上受制于通道内壁导电层对二次电子发射层的电子补偿能力(如前所述,微通道板输出电流密度超过输入电流密度5%以上时,微通道板会逐渐出现增益饱和现象)。因此,适当提高微通道板的输入电流密度可以加强通道内二次电子发射层的电子补偿能力。由此可知,适当降低微通道板的电阻可以扩大微通道板的动态范围。但在实用中,有些探测器件本身对微通道板功耗所产生的焦耳热有所限定,如像增强器一般要求微通道板的带电流不得高于10 mA,以免过高功耗产生的热量影响光阴极的正常工作。因此,像增强器用的微通道板的电阻一般要求在100 M $\Omega$ 以上。但在其它一些应用中,微通道板的带电流可以允许达到20  $\mu$ A,甚至更高。降低微通道板电阻可以采取调整玻璃成份或增加处理时间等方法。美国Galileo公司的HOT微通道板就是这种概念的微通道板。

## 6 噪声

微通道板的背景噪声通常来自倍增器的暗电流和等量电子输入。在微通道板无输入信号的状态下,施加工作电压而产生的输出电流称为暗电流。

等效电流输入即为相同电压值条件下倍增器暗电流密度与倍增器增益的比值。对于像增强器,还有一个指标——等量背景照度。它指在像增强器中施加工作电压的情况下光阴极无光照输入时荧光屏上所能看见的背景亮度(等量背景照度并不完全来自于微通道板的暗电流)。

微通道板的背景噪声主要来自于通道内部的吸附气体及通道内部的外来污染物在电场作用下的电离或者电子撞击作用下的发射;其次为玻璃本身即微通道板的通道内壁二次电子发射层本身的一些低原子序数原子(如钠)在电场作用下的电迁移和电子撞击下的受激脱附,以及玻璃中含有天然同位素的成份(如钾的天然同位素 $^{40}\text{K}$ ),但前者应是噪声的主要来源。

在不同的微光条件下,决定像增强器目标分辨能力的重要参数为信噪比。像增强器输出窗口荧光屏上的信噪比取决于下式:

$$S/N(out) = k \times \sqrt{\frac{S/N(in)}{Nf}}$$

式中,  $S/N(out)$  为像增强器输出信噪比;  $k$  为与美军标测试条件相对应的常数;  $S/N(in)$  为输入信噪比;  $Nf$  为微通道板的噪声因子<sup>[1]</sup>。微通道板的噪声因子主要与微通道板的探测效率有关,可用下式描述:

$$Nf = (D_{OAR})^{-0.5} \{1/\delta[1 + (\alpha^x/M^x)^2] + 1 + b\}$$

式中,  $D_{OAR}$  为微通道板探测效率;  $\delta$  为微通道板通道内壁材料的二次电子发射系数;  $\alpha^x$  为微通道板首次电子撞击所产生的二次电子标准偏差;  $M^x$  为二次电子平均产额;  $b$  为描述微通道板二次电子发射分布状态的一个参数。大多数还原铅硅酸盐玻璃微通道板内壁工作面的二次电子发射系数 $\delta$ 一般在1.5~2.0之间。

在相同工作状态下,微通道板的探测效率主要取决于开口面积比。常规微通道板开口面积比为55%,首次撞击二次电子产量为1.5~2.5,噪声因子为2.2~1.5,如果开口面积比达到75%,微通道板的噪声因子将降到1.6以下<sup>[2]</sup>。

三代像增强器因采用镓砷光阴极而极大地提高了光阴极灵敏度,但是微通道板的反馈离子会严重降低镓砷光阴极的灵敏度。为此,在微通道板输

入面镀制阻挡离子反馈的多孔状氧化铝膜可大大降低微通道板的探测效率。三代像增强器的光阴极灵敏度通过半导体光阴极得到了极大的提高,但由于微通道板离子反馈阻挡膜大大降低了微通道板的探测效率,两者相抵,所以高性能超二代像增强器在信噪比参数上并不比三代像增强器逊色。像增强器的发展方向是在镓砷或镓砷铟半导体光阴极的基础上设法去除微通道板的离子反馈阻挡膜。

## 7 工作寿命

在连续工作状态下,微通道板增益会逐渐衰减,衰减程度与微通道板的实际工作过程有着非常大的关联。微通道板增益的衰减取决于其总输出电荷的累积量。在非常高的输出电流下工作的微通道板,其增益衰减很快。此外,微通道板的工作寿命与微通道板的前期制作及处理过程也有一定的关系。很多事例表明,洁净度不好的微通道板的工作寿命远远低于洁净度好的微通道板,后者随工作时间的加长,其增益的衰减远远小于前者。

美国 Galileo 公司曾经提出的长寿命微通道板的概念,更倾向于从微通道板玻璃成份与微通道板工作寿命之间的关联着手。为此,专门开发了一种所谓的长寿命通道板玻璃。诚然,微通道板玻璃对微通道板的工作寿命有一定的影响,特别是一些特殊玻璃制造的可以承受高温烘烤除气的微通道板,经过高温除气后,通道内气体吸附减少,相对清洁度就有了提高。

影响像增强器工作寿命的因素很多,微通道板的工作寿命并不是制约像增强器工作寿命的主要因素。像增强器的工作寿命一般定义为光阴极灵敏度下降到初始值的 50%(在标准光源下)或信噪比下降到一定值时所经历的连续工作时间。像增强器的实际工作寿命与其实际使用条件和使用状态有相当大的关系。例如,在 1 mlx 照度(星光下)与 10 mlx 照度(相当于 1/4 月光)的工作条件下,像增强器的工作寿命相差 10 倍。

## 8 空间分辨率

微通道板的空间分辨率取决于微通道板的通道尺寸。理论极限分辨率定义为每毫米内通道阵列的阵列数:

$$R = \frac{1000}{\sqrt{3} \times d_c}$$

式中,  $R$  为理论极限分辨率;  $d_c$  为微通道板的通道中心距离。

目前微通道板的通道尺寸已做到 5  $\mu\text{m}$ (直径),当然不乏某些公司走在更前面,美国 Burle 公司已经公布了 2  $\mu\text{m}$  通道直径的微通道板。

像增强器的空间分辨率取决于微通道板与荧光屏的距离和微通道板的通道中心距离。为了最大限度提高微通道板的分辨率,通常采用“末端损坏(end spoiling)”方法,即微通道板输出面金属膜层电极深入到通道内一定程度,使出射电子的掠出角减小,以便于达到会聚出射电子的目的。但是“末端损坏”损失增益,通常“末端损坏”的深度在 1.0~2.0 个通道直径之间。为了最大限度提高微通道板入射面一次电子撞击通道内壁(而不是撞击在金属电极镀层上)的概率,通常输入面电极镀层深度比输出面电极镀层深度要浅,一般约为 0.5~0.8 个通道直径。

## 9 结论

微通道板的几个主要特征性能参数彼此关联,相互制约。由于微通道板制造工艺的复杂性,因此认识和协调微通道板的特征性能参数间的彼此关系显得尤为重要。

### 参考文献:

- [1] MkGVN992—1996, Image intensifier tubes specifications philips Photonics[S].
- [2] Bruce N Laprade, *et al.* A low noise figure micro-channel plate optimized for Gen III image intensification systems[J]. SPIE, 1990, 1243: 162—172.