

文章编号:1002-2082(2007)05-0582-05

# 微通道板(MCP)电子清刷用电子枪的设计

程宏昌, 石峰, 侯志鹏, 师宏立, 史鹏飞

(微光夜视技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为了满足 $\Phi 30$  mm MCP大束流短时间电子清刷新工艺要求,以轴向电子枪工作原理为基础,利用静电场对电子的作用理论,分析了电子的运动轨迹,并对电子的偏转进行了计算。根据计算结果,设计了电子枪的基本结构,确定了电子枪的各种参数:灯丝材料为 $\Phi 0.05$  mm的钨(75%)铼(25%)合金丝;灯丝形状为“V”字型;电子枪外径为 $\Phi 35$  mm,高度为20 mm,最大加热功率为12.6 W时,电子发射电流密度达到 $1.26 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>。用该电子枪对4块性能相近的 $\Phi 30$  mm MCP电子清刷4 h后, MCP的增益值达到 $500 \pm 50$ 。这表明:用新电子枪可以代替原RUS-A型电子枪。

**关键词:** 微通道板(MCP); 电子清刷用电子枪; 电子枪灯丝

中图分类号: TN223

文献标志码: A

## Design of electron gun for scrubbing microchannel plate

CHENG Hong-chang, SHI Feng, HOU Zhi-peng, SHI Hong-li, SHI Peng-fei

(Key Laboratory for Low Light Level Technology of Commission of Science  
Technology and Industry for National Defense, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to have great electron flux for scrubbing  $\Phi 30$  nm microchannel plate and complete the process in less time, the trace of electron was analyzed and the electron deflection was calculated, according to the operation principle of the axial electron gun and the theory of the function of electrostatic field on electron. Based on the calculation result, the structure of the new electron gun was designed and all the parameters of the electron gun were determined, the filament material was  $\Phi 0.05$  mm tungsten rhenium alloy(75%, 25%), the filament was in “V” type, the radius of the electron gun was  $\Phi 35$  mm and its height was 20 mm, and the current density of electron emission reached  $1.26 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup> while the maximum filament heating power was 12.6 W. The gain of the four microchannel plates reached  $500 \pm 50$  after being scrubbed with the electron gun for four hours. The result indicates that the old electron gun RUS-A can be replaced by the new one with better performance.

**Key words:** microchannel plate (MCP); electron gun for electron scrubbing; filament of electron gun

## 引言

微通道板<sup>[1]</sup>(MCP)电子清刷是微光像增强器研制中的关键工序之一,它是在真空系统中用电子束轰击微通道板,达到对微通道板除气、调节增益和降低噪声等目的。性能参数不同的MCP需要不

同的电子清刷工艺,不同的MCP电子清刷<sup>[2]</sup>工艺,需要相应强度的电子束流和电子清刷时间,不同强度的电子束流需要不同的电子枪来提供。根据 $\Phi 30$  mm MCP电子清刷新工艺要求, $\Phi 30$  mm MCP通过4 h的电子清刷达到原工艺24 h的清刷效果,这

要求电子枪的最大发射电流密度为  $1.2 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 。目前使用的RUS-A电子枪是轴向电子枪,其电源加热最大功率为 13.2 W,安装在直径为  $\Phi 35 \text{ mm}$ ,高为 30 mm 的真空空间,最大电流密度为  $1.9 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ,可见,它无法满足  $\Phi 30 \text{ mm}$  MCP 电子清刷新工艺要求。因此,需要一种电流密度为  $1.2 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ ,其余 2 个参数不变的新电子枪代替。因国内、外轴向电子枪产品较少,加之,灯丝最大功率为 13.2 W 的灯丝亦很少。本文在电子枪工作原理的基础上,以灯丝的加热功率、电子枪发射电流密度以及电子枪的总体尺寸 3 个要求为设计目标开展电子枪的设计制作。

## 1 电子枪工作原理

通常将产生加速及会聚高能量密度电子束流的装置称为电子枪<sup>[3]</sup>。根据枪体结构不同,可分为近距环枪、远距环枪、横向枪、轴向枪等,可用于 MCP 电子清刷并能产生强束流的只有轴向枪了。在轴向枪中,又可以分为直热式阴极电子枪和间热式阴极电子枪 2 种。其中直热式阴极电子枪的丝状阴极可直接通电加热发射电子束,适用于小功率的电子枪;间热式阴极电子枪发射电子束的阴极通常做成块状,由另一个灯丝加热阴极间接加热,它适用于大功率的电子枪。本文提供的电子枪的最大功率为 13.2 W,体积(直径  $\Phi 35 \text{ mm}$ ,高 20 mm)也很小。因此,选用直热式阴极灯丝轴向电子枪的基本结构,其工作原理如图 1 所示。

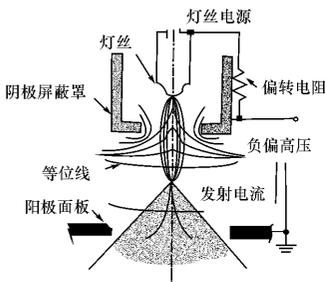


图 1 直热式轴向电子枪工作原理图

Fig. 1 Working principle of directly-heated axial electron gun

从图 1 可见,该电子枪由灯丝、灯丝电源、偏转电阻、负偏高压和阴极屏蔽罩 5 部分构成。它们的功能和作用如下。

### 1.1 灯丝

因灯丝工作于负电位,故又称为阴极灯丝。电

子枪工作时灯丝处于高温状态,它向真空系统发射电子。灯丝材料和灯丝直径对灯丝加热功率、灯丝发射电流密度有着决定性的作用。

### 1.2 灯丝电源

提供灯丝工作时的恒定电压和电流,保证灯丝正常工作。

### 1.3 偏转电阻

用于调节灯丝工作时的电流值,在灯丝电源与灯丝工作电流匹配较差时使用。

### 1.4 负偏高压

它可使发射到真空中的电子发生偏转并向阳极加速运动,到达 MCP 时具有一定能量。

### 1.5 阴极屏蔽罩

用于限制真空系统中电子加速方向直线运动的电子束流,使之达到一定的束斑。

## 2 电子枪设计

### 2.1 设计思路

在直热式轴向电子枪工作原理的指导下,根据静电场对电子的偏转和加速作用,对电子的运动轨迹进行计算。根据计算结果和工作经验设计了电子枪的基本结构和灯丝材料,并用实验方法确定灯丝直径,最后对该电子枪的性能进行了实验验证。

### 2.2 电子枪灯丝形状的确定

电子枪灯丝形状有:“V”字型、“Z”字型、蚊香型和“—”字型等多种形式,本文根据加工工艺的难易程度以及设备内部状况,决定选用“V”字型灯丝。

### 2.3 电子枪设计

电子枪设计是在电子枪灯丝形状确定的基础上,设计电子束聚焦结构,从而设计出适用的电子枪。根据直热式轴向电子枪工作原理可知,该电子枪是利用静电场的作用实现电子的偏转和聚焦的,使电子束能够均匀地达到 MCP 表面,实现对 MCP 的电子清刷。该电子枪的电子运动轨迹见图 2。

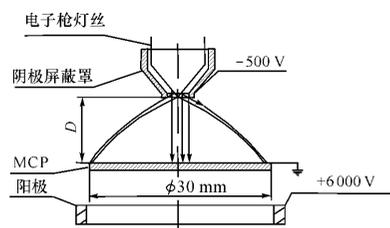


图 2 电子运动轨迹示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electron moving path

由图 2 可见,当给灯丝通电达到灯丝的发射温度后,它将向各个方向发射电子,而安装在阴极屏蔽罩内的灯丝与阴极屏蔽罩处于等电位,向水平方向发射出电子运动到阴极屏蔽罩上时,会在静电平衡作用下被吸收掉。与水平方向有一定夹角的电子束,有的射出阴极屏蔽罩孔,在加速电场的偏转作用下向 MCP(阳极)运动;向竖直方向发射的电子会受到阴极屏蔽罩的限束作用,只有孔径为  $\phi 4\text{ mm}$  的阴极罩孔的电子束会在加速电场作用下向 MCP 运动。在阴极屏蔽罩限束孔径、阴极与 MCP 之间距离确定的条件下,可通过控制阴极屏蔽罩与 MCP 之间的相对电势,达到控制这几部分电子,使它们以一定量到达 MCP 表面。整个过程中电子束的最大偏转情况可以通过图 3 所示的示意图进行计算。图中  $a$  为阴极屏蔽罩的长度,  $d$  为阴极屏蔽罩的聚焦孔半径,  $A$  为最大偏转电子束的反向延长线与电子枪中心的夹角,  $y$  为偏转电子束在阴极屏蔽罩聚焦孔处竖直方向的位移,  $D$  为电子竖直方向的最大位移,  $L_1$  为聚焦孔到 MCP 面的水平距离,  $L_2$  为偏转电子束中心到 MCP 的水平距离。此电子枪的电子聚焦偏转方式是利用 2 个平行静电场使电子束偏转,最终使一定范围平面电极上的电子束达到均匀。

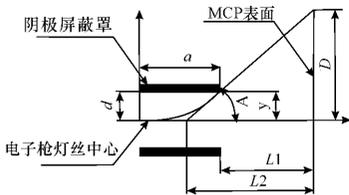


图 3 平面平行板静电场下的电子偏转

Fig. 3 Electron beam deflection in parallel plane electrostatic field

在工作中,将阴极屏蔽罩作为电子束的限流装置,对其出射电子进行限束,在阴极屏蔽罩下方的平面和 MCP 两个平面平行板上加上恒定的电压  $U$ ,就构成了一个电子偏转的静电场。根据静电场理论,电子在竖直方向的运动方程<sup>[5]</sup>可以写成:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = m \frac{dv_y}{dt} = eE_y \quad (1)$$

忽略边缘效应,就可认为平行板间电场强度是恒定的并等于  $U/d$ , ( $U$  是平板间的电位差,  $d$  是板间距离)。将(1)式积分,就可以找出平板电场出口处电子在竖直方向的位移数值,即

$$y_1 = \frac{1}{4} \frac{a^2 U}{U_a d} \quad (2)$$

式中:  $a$  为阴极屏蔽罩的长度;  $U_a$  为电子枪中 MCP 表面的电压。电子离开偏转作用区域时的偏转角可以由下式确定:

$$\tan A = \left( \frac{dy}{dz} \right)_{z=a} = \frac{1}{2} \frac{a U}{U_a d} \quad (3)$$

电子束到达 MCP 表面上的位移由偏转板间的位移和偏转板到 MCP 的空间位移两部分叠加而成。第二项为  $L_1 \cdot \tan A$ , 其中  $L_1$  为阴极屏蔽罩到 MCP 表面的距离。于是, MCP 表面电子的最大位移为

$$D = y_1 + L_1 \cdot \tan A = \frac{1}{2} \frac{a U}{U_a d} + \frac{1}{4} \frac{a^2 U}{U_a d} \left( \frac{a}{2} + L_1 \right) \quad (4)$$

$$\text{即 } D = \frac{a \left( \frac{a}{2} + L_1 \right)}{2 U_a d} U \quad (5)$$

由此可见,在其他参数确定的条件下,电子束的偏转位移与 2 个电极之间的电压成正比。通过控制 2 个电极之间的电压达到控制电子束的偏转,从而使不同能量的电子到达 MCP 表面。据此原理,在设计时首先根据经验值确定一个基本结构,然后通过实验验证基本结构的具体尺寸,并根据验证结果进行修改。设计结果是:灯丝有效长度为 45 mm,总长度为 60 mm,“V”字型结构,设计的电子枪灯丝结构如图 4 所示(图中尺寸为 mm)。

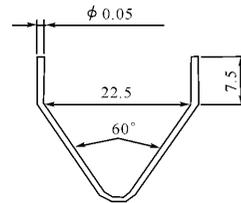


图 4 电子枪灯丝结构图

Fig. 4 Structure of filament for electron gun

电子枪阴极罩选用无磁不锈钢材料制作,其目的是控制电子束发射方向。另外,给其施加负偏压,从而使逸出电子在真空中运动时具有足够能量,使之到达 MCP 表面时能够实现对 MCP 清刷除气,其结构如图 5 所示。

将电子枪灯丝和阴极荫罩按照图 6 所示装配成电子枪系统,装配时保证灯丝的下沿与阴极荫罩相平,以保证电子束的大小;另外灯丝的 2 个冷端一端与阴极荫罩接通,另一端通过陶瓷与阴极屏蔽罩绝缘,以保证电子枪系统的正常工作。

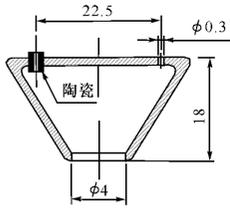


图5 电子枪阴极荫罩结构图

Fig. 5 Structure of shield for electron gun

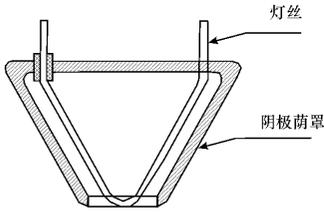


图6 电子枪结构图

Fig. 6 Structure of electron gun

## 2.4 电子枪灯丝材料的选择

在直热式阴极中,用于电子枪灯丝的材料通常为W, Ta, Mo 或W, Mo 与其他金属的合金,它们一般具有高熔点、低逸出功、小蒸发率、低热导率、良好的电导率及化学稳定性。其性能见表1所示。

表1 电子枪灯丝材料性能表

Table 1 Performance of filament materials for electron gun

参数	钨(W)	钼(Mo)	钽(Ta)	铼(Re)
逸出功/eV <sup>[4]</sup>	4.52	4.24	4.13	5.1
熔点/C	3 410	2 625	2 996	3 167
热导率/J·cm <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	0.31	0.382	0.130	
蒸发率1000 C/g·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	10 <sup>-24</sup>	2×10 <sup>-17</sup>	—	
电导率(Hg=1)	18	20	6	4.6

从表1可见,钽的逸出功和热导率最小,易于在较小功率下获得较大的电子束流,但是它的电导率很差,因此要实现光电发射需要的加热功率很大,故钽不是优先选用的材料。

比较钼和钨可见,钼蒸发率是钨的10<sup>7</sup>倍,因钼不适合在超高真空中制作电子枪,故选用钨丝比较合适。但由于纯钨不好定型,细的钨丝加工成型后,通过电流受热时会出现下垂现象,造成电子分布不均匀甚至灯丝短路,造成无法正常工作。当在高温钨中添加铼的合金时,能够消除这种现象,据此选用75%钨和25%铼形成的合金作为电子枪灯丝材料。

## 2.5 电子枪灯丝直径的确定

灯丝直径对饱和电流和电子发射密度影响极大,同时也决定着灯丝的加热功率。实验时选用直径:1.0 mm, 0.8 mm, 0.5 mm, 0.3 mm, 0.1 mm, 0.05 mm 6种规格灯丝制成有效长度为45 mm的灯丝,在10<sup>-6</sup> Pa的真空环境中,用最大加热功率为13.2 W的原电子枪灯丝加热电源进行灯丝加热功率实验,实验结果如表2所示。

表2 灯丝加热功率实验数据

Table 2 Experiment data of filament heating power

规格 Φ/mm	灯丝加热 功率/W	中心发光 尺寸/mm	现象	用/否
1.00	13.2	9	发红	否
0.80	13.2	15	微弱亮光	否
0.50	13.2	21	亮光稍强	否
0.30	13.2	27	亮光稍强	否
0.10	13.2	33	亮光稍强	否
0.05	9.6	45	发红	用
0.05	10.2	45	发亮光	用
0.05	10.8	45	亮光变强	用
0.05	12.0	45	光强且刺眼	用

从表2可见,直径0.05 mm的灯丝能够满足灯丝加热功率要求,可以作为选择对象;另外,灯丝的有效长度可以确定为45 mm。

## 3 工艺实验及结果分析

### 3.1 电子枪发射电流密度实验及结果分析

发射电流密度是电子枪的一个重要参数,电子发射饱和和电流密度由下面的经验公式来描述:

$$j_s = kT^2 \exp\left(\frac{-11610u}{T}\right) \text{ A/cm}^2 \quad (6)$$

式中:  $k$  为里查逊常数且  $k = 120 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ ;  $T$  为电子枪灯丝的热力学温度;  $u$  为阴极材料的逸出功。

由(6)式可见,电子枪发射的电流密度由电子枪灯丝材料和电子枪工作时的温度来决定。在电子枪材料及灯丝的尺寸确定后,电子枪工作时的温度由加热功率决定,加热功率越大,相同的电子枪灯丝工作时温度越高,其发射电流密度就越大。该值可以间接地用单位面积MCP输入面上收集到的电流来表征。

为对比新旧电子枪性能,按照通常的制管工艺进行真空排气,测量了各种加热功率下MCP收集到的电流大小,以此来表征电子枪发射的电子束流密度。测量结果如表3所示。

表3 不同加热功率下电子枪发射束流密度的测量结果

Table 3 Measured results of beam current density emitted by electron gun at different heating power

灯丝加热功率/W	电流/ $\mu\text{A}$	电流密度/ $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$
10.2	20	2.8
10.8	30	4.5
11.4	60	8.4
12.0	70	9.8
12.6	90	12.6
13.2	100	14.0

从表3可见,该电子枪在加热功率为12.6 W时,电子发射电流密度大于 $1.2\times 10^{-5}\text{A}/\text{cm}^2$ ,在加热功率最大即13.2 W时,其电子发射束流密度已达到 $1.4\times 10^{-5}\text{A}/\text{cm}^2$ ,该值完全满足工艺要求。

### 3.2 MCP 电子清刷实验

电子枪的发射性能通常用MCP清刷效果来衡量,MCP电子清刷效果用电子清刷后增益的高低来表征。本次实验选取8块性能相近的MCP,其中4块用原RUS-A型电子枪,另外4块用新研制的电子枪进行清刷对比实验,实验结果如表4所示。

表4 2种电子枪电子清刷微通道板(MCP)的实验数据

Table 4 Experimenta data of MCP scurbbed by both old and new electron guns

MCP 序号	电子枪	清刷后 MCP 增益	工艺时间 /h	灯丝最大加 热功率/W
BA6041-128-30	新	528	4	12.6
BA6231-098-36	旧	554	24	13.2
BA5063-061-40	新	492	4	12.6
BA5063-061-27	旧	508	24	13.2
BA6039-050-34	新	536	4	12.6
BA5063-061-31	旧	518	24	13.2
BA6031-098-36	新	508	4	12.6
BA6053-149-30	旧	526	24	13.2

从表4可见,采用新、旧2种电子枪对微通道板(MCP)进行电子清刷,在性能对比时,新、旧电子枪灯丝工作的最大加热功率分别为12.6 W和13.2 W,新电子枪灯丝加热功率小于旧电子枪灯丝加热功率,但能满足设备需要;另外利用新电子枪对微通道板电子清刷时仅需4 h就能达到旧电子枪24 h同样的效果,使微通道增益控制在 $500\pm$

50 范围内,满足了微光像增强器研制工艺要求,大大缩短了MCP电子清刷时间。

## 4 结束语

设计了一套灯丝材料为钨铍合金丝的“V”型灯丝结构,直径为 $\Phi 35\text{mm}$ ,高为20 mm的电子枪,并对设计的基本结构和性能进行了实验验证。结果表明:灯丝加热功率为12.6 W时,发射电流密度为 $1.2\times 10^{-5}\text{A}/\text{cm}^2$ ;用该电子枪对 $\Phi 30\text{mm}$  MCP电子清刷4 h后,MCP的增益值达到 $500\pm 50$ ,达到了原RUS-A电子枪24 h的清刷效果,缩短了MCP电子清刷时间,可满足 $\Phi 30\text{mm}$  MCP大束流短时间电子清刷工艺的要求。

### 参考文献:

- [1] 杨青,陈烽,侯洵.微通道板电子传输时间特性的理论分析[J].应用光学,2006,27(6):535-538.  
YANG Qing, CHEN Feng, Hou Xun. Theoretic analysis of channel electron time character [J]. Journal of Applied Optics, 2006,27(6):535-538. (in Chinese)
- [2] 潘京生,苏德钊,刘术林,等.一种成分优化的微通道板[J].应用光学,2007,28(1):16-19.  
PAN Jing-sheng, SU De-tan, LIU Shu-lin, et al. Microchannel plate with optimized glass composition [J]. Journal of Applied Optics, 2006,27(6):535-538. (in Chinese)
- [3] 张以忱.电子枪与离子束技术[M].北京:冶金工业出版社,2004:44-46.  
ZHANG Yi-chen. Electron gun and ion gun technology [M]. BeiJing: Melallurgical Industry Press,2004:44-46. (in Chinese)
- [4] 真空电子器件编写组.真空电子器件材料[M].北京:电子工业出版社,1984:17-20.  
Vacuum Electron Devices Writen Group. Vacuum electron devices material [M]. BeiJing: Electron Industry Press,1984:17-20. (in Chinese)
- [5] 暮良洛夫 М Я.电子束器件[M].北京:国防工业出版社,1962:53-87.  
МУЛЯРОВА М Я. Electron beam device [M]. BeiJing: Defense Industry Press,1962:53-87. (in Chinese)