

## 用于强流离子源的几种阴极

O462.5

胡立群

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

(收稿日期 1996-01-03)

## SEVERAL CATHODES FOR HIGH CURRENT ION SOURCE

Hu Liqun

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031)

**Abstract:** Four cathodes (tungsten, oxide coated barium, LaB<sub>6</sub>, LaMo) for high current ion source are described in this paper, their emission characteristics, discharge characteristics and other performances are also compared here.

**Keywords:** Cathode, High current ion source.

**摘要:** 介绍了适用于强流离子源的四种种阴极(钨阴极、氧化物阴极、六硼化镧阴极、镧钼阴极)的特点,并比较了它们的发射性能、放电性能及其它特性。

**关键词:** 阴极、强流离子源。

离子源

阴极是离子源的关键部件。随着离子源在各领域应用的开拓及深入,特别是随着核聚变装置加热主要手段的高能粒子中性注入器的迅速发展,对其心脏强流离子源的要求愈来愈高,相应地对源重要部件阴极的要求也愈来愈苛刻。不仅要求其工作温度低、发射能力强、耐返流离子轰击(因为工作在充气状态),而且要求其发射稳定性好、不中毒、污染小、寿命长、加工制作容易等。显然,完全满足上述条件的理想完美阴极是难以找到的,强流离子源所用的几种阴极也只是尽可能满足其主要要求,但各自具有突出的优越性能。迄今为止,强流离子源阴极发展经历了三个阶段:第一代是纯金属阴极即钨阴极;第二代是氧化物阴极;第三代是六硼化镧和镧钼阴极。本文综述了这三个阶段的阴极特点,并对其性能进行了比较。

## 1 强流离子源的阴极发展

从强流离子源发展初期至70年代中期,普遍采用纯金属阴极,主要是钨阴极。因为纯金属阴极最简单,对其研究得最彻底,技术最成熟而且制作简单。对当时运行的离子源而言,效果还是较好的。到了70年代后期,核聚变的发展要求离子源能产生几十安长脉冲离子束流,这就要求离子源中的等离子体有足够离子供引出,即离子源气体放电电流应足够强,可达几十安甚至上千安。显然阴极也必须要有如此大的发射电流能力,且可长脉冲运行(几秒~几十秒)。这时纯金属阴极发射效率低、工作温度高的缺点日渐显著。如阴极高温辐射使电极热负载过大而变形,影响离子源的离子光学性能,热阴极蒸发、溅射污染电极,加热后发脆,使用寿命短,离子源气效率及电效率均低等。这就促使人们去寻找更好的阴极来取代钨阴极,这就是70年代末和80年代初普遍使用的氧化物阴极。它和普通氧化物阴极有很大差别,具有发射电流密度大、发射效率高、工作温度低及使用寿命长等优点。不足的是脉冲时间超过500 ms后,发射出现衰

竭。而且暴露大气后会中毒,导致发射性能变坏。在几百~千安放电电流下,严重的返流离子轰击会使大部分的活性材料没有起作用就被溅射掉。同时,活性材料本身蒸发与扩散不匹配也造成活性材料大量损失,在长脉冲运行时情况将更为严重。所有这些都促进了第三代阴极,即六硼化镧和镧钼阴极的发展。LaB<sub>6</sub>材料虽发现较早<sup>[1]</sup>,70年代就广泛用于电子显微镜等电子光学系统。但由于极其坚硬、熔点高、低杂质、低气孔率的大块材料难以加工,而且在高温下极易同难熔金属起化学反应而难以支撑。直到70年代中期,这些问题解决后,才开始应用于强流离子源,并在80年代得到广泛应用。镧钼(LaMo)<sup>[2]</sup>则是为了解决LaB<sub>6</sub>阴极难加工及难支撑的问题,于70年代末期出现的新型阴极。其特点在于展延性好,便于机械加工,用后不发脆,高温下不会和支撑材料发生化学反应。但由于优良发射体的制造存在困难,工作不可靠,往往开始使用时工作良好,但工作一段时间后性能变坏,故目前尚未被广泛采用。

## 2 纯金属阴极

低场强下,阴极发射电流密度 $J_e$ (A/cm<sup>2</sup>)由Richardson公式决定

$$J_e = A \bar{D} T^2 \exp(-\phi/kT) \quad (1)$$

式中, $A$ 为热电子发射常数; $\bar{D}$ 为阴极表面平均电子透射系数,理论值为120 A/cm<sup>2</sup>·K<sup>2</sup>,实际值因材料而异,通常小于1,大多数金属 $\bar{D}$ 约为0.5; $T$ 为阴极的热力学温度(K); $\phi$ 为表面逸出功,即电子逸出阴极所需的最低能量(eV); $k$ 为波尔兹曼常数, $8.6 \times 10^{-5}$  eV/K。

由此可知,并非所有的金属都可用作阴极材料。一般逸出功小、熔点愈高即工作温度愈高的材料愈有利,而且工作温度下蒸发率要小,有适当的机械性能和展延性。在诸多可用作阴极的纯金属材料中,钨是最理想的。具有高熔点、低逸出功及低蒸发率、发射稳定、耐离子轰击、制作容易等特点。但钨阴极化学稳定性差,极易同水蒸气起反应,发射效率低。为提高发射电流密度,就要求极高的工作温度(~2500 K),显然这不适应强流离子源长脉冲、大电流的需要。不仅热阴极的蒸发、溅射及高温辐射会导致源的可靠性变差,而且钨阴极经高温加热后会变脆(在氢工作气体中),极易中毒,高蒸发率使得使用寿命变短。同时离子源的电效率及气效率都很低,所有这些都限制了纯金属阴极的进一步使用。

## 3 氧化物阴极<sup>[3]</sup>

和普通氧化物阴极不同,在基金属与氧化物涂层之间增加了热膨胀系数接近于涂层的钼网层。以增加活性物质储量及涂层机械强度,增加涂层热导率和电导率。减小涂层与基底金属之间的层电阻来提高涂层耐返流离子轰击的能力,从而提高阴极工作寿命。同时控制基金属中杂质含量、涂层成分及阴极制作工艺、工作条件,使涂层表面产生并维持较佳的自由钡量(表面产生的超额Ba是发射电子的根源),从而得到较大的稳定的电子发射。为了消除直热式阴极本身加热电流产生的磁场阻止发射电子离开灯丝区域的能力,将灯丝绕成双螺旋。这样两分支加热电流产生的磁场对电子的影响相互抵消,同时灯丝各部分螺距也不等,中间疏两头密,以使灯丝温度分布均匀。

由于氧化物在空气中不稳定,所以实际涂层采用氧化物对应的硫酸盐形式。使用前在真空中“激活”,即加热使其分解成氧化物,因而对激活过程即激活温度、时间、程序有较严格的要求。激活完毕后,阴极灯丝即可使用,每次用后阴极均需保存在高真空状态,以免暴露大气而中

毒,每次使用时都需热激活,以消除系统残余气体对阴极的影响。

当然,再激活温度、时间均小于第一次。当需要短时间打开真空室,可事先充入氮气以减小阴极中毒程度。氧化物阴极因涂层电阻大,直流工作时难以发射大电子流(小于  $0.5 \text{ A/cm}^2$ ),通常用于脉冲工作状态(停息时间/脉冲宽度大)。

改进后的氧化物阴极性能虽大大提高,但仍不可避免地具有下述缺点:暴露大气要中毒;长脉冲时,发射出现衰减,大电流长脉冲工作相当困难;电火花及阴极工作温度直接影响阴极的长脉冲发射,同时,中间层及表层电阻也影响阴极电子发射。

#### 4 六硼化镧和镧钼阴极<sup>[4,5]</sup>

钨和氧化物阴极都缺乏一种有效的调节作用来保证活性材料的扩散速度恰好补充蒸发损失而产生扩散过剩,使活性材料损耗加快而限制了寿命。六硼化镧( $\text{LaB}_6$ )和镧钼( $\text{LaMo}$ )材料本身即可克服上述缺点,具有良好的热稳定性及化学稳定性、良好的电导率及热导率、材料抗中毒、耐返流离子轰击、可发射大电子流、长脉冲下运行稳定等特点。

$\text{LaB}_6$  和  $\text{LaMo}$  作为强流离子源有效的电子发射体,存在着各自的优点与缺陷。尽管  $\text{LaB}_6$  中结合很紧的 B 八面体骨架将 La 包围屏蔽于其中,减小了 La 的氧化机会而使其性能稳定。但  $\text{LaB}_6$  在高温下极易同难熔金属起化学反应,使硼框架崩溃,失去原有的自动调节活性材料蒸发功能,导致阴极毁坏,因而对发射体支撑、相连部件有严格要求。而且  $\text{LaB}_6$  材料极坚硬,加工相当困难,在热冲击下容易断裂,其使用寿命往往受到表面生成的化合物杂质限制(与发射体周围所使用的金属材料有关),这些杂质难熔,阻止表面电子发射。 $\text{LaMo}$  则不存在这些问题,易加工成各种形状,用后不发脆。但当其温度超过约  $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,发射电流密度反而下降。为了弥补发射电流密度的不足,通常采用复杂形状来得到大的发射面积。 $\text{LaMo}$  电子发射能力取决于其表面细粒结构是否合适,不合适的表面细粒结构会导致表面电子发射间断,这主要取决于其生产工艺,也是目前尚未完全解决的问题。大部分  $\text{LaMo}$  发射体都会出现发射间断现象。

在强流离子源中,为得到大的阴极发射电流,通常采用大面积阴极结构,并且还将发射体置于阴极罩内(见图1)。通过小孔或缝与低等离子体密度的阴极放电室相连,孔用来限制和维持罩内发射体附近气体密度及相应的等离子体密度比阴极罩外高一个量级以上,以提供所需的电子流。即提高了因空间电荷限制流而产生的发射体发射电流密度临界值,从而得到大的发射电流密度  $J_e$ ,而又使阳极室处于较佳放电状态。

这两种阴极由于材料电阻率小,通常采用间接加热方式,故结构比较复杂、成本高。特别是  $\text{LaMo}$  阴极,由于其发射比相对较小,要求的发射功率稍大,所以必须改进热屏蔽来提高加热效率,减小热传导和热辐射造成的热量损耗,但必须考虑材料的热承受能力和改善冷却等。同时,由于工作时要求的进气较大,故气体效率较低,相应也增加了离子引出区域的气压,增加了该区域击穿、打火的危险性。

#### 5 阴极性能比较

表1总结了这些阴极的发射特点,现分别评述如下。



图1 提高阴极发射电流密度  $J_e$  的措施

表1 发射体性能比较

| 阴极类型<br>性能                         | 钨           | 氧化物         | 六硼化镧            | 钨钼                       | 备注   |
|------------------------------------|-------------|-------------|-----------------|--------------------------|--|
| 工作温度 /K                            | 2 450~2 650 | 1 000~1 200 | 1 800~1 900     | 1 700~1 900              | —  |
| 逸出功 / (eV)                         | 4.44~4.63   | 1.0~1.1     | 2.6~2.8         | 见备注                      | 国内尚无有关数据                                     |
| $\bar{D} / (A / (cm^2 \cdot K^2))$ | 20~120      | 0.1~2       | 28~32           | 见备注                      | 见式(1)Richardson 方程                           |
| 发射电流密度<br>$j_e / cm^2$             | ~0.5        | 4~10        | 10~40           | 8~12                     | —  |
| 加热比功率<br>$P_f / (W/cm^2)$          | 70~84       | 2.8~50      | 100~150         | 50~100                   | $P_f = \frac{\text{阴极加热功率}}{\text{阴极表面积}}$   |
| 发射效率<br>$\eta / (mA/W)$            | 4~10        | 400~600     | 100~300         | 30~80                    | $\eta = \frac{\text{阴极发射电流}}{\text{阴极消耗功率}}$ |
| 辐射功率<br>$\rho / (W/cm^2)$          | 70~80       | 3~4         | ~40             | ~40                      | —  |
| 发射层                                | W 层         | 超钡 Ba       | La 层            | La 层                     | —  |
| 寿命 /h                              | 几百          | ~200        | ~1 000          | >1 000                   | —  |
| 耐高压性能                              | 好           | 差           | 好               | 好                        | —  |
| 中毒后恢复                              | 好           | 差           | 好               | 好                        | —  |
| 材料机械加工                             | 简单、易做       | 简单、易做       | 坚硬、难加工、<br>用后发脆 | 展延性好,易<br>机械加工,用<br>后不发脆 | 国内尚不能生产优良<br>性能的 LaMo 材料                     |
| 阴极结构                               | 简单、成本低      | 简单、成本低      | 复杂、成本高          | 复杂、成本高                   | —  |

5.1 发射体性能<sup>[1,4]</sup>

## 5.2 阴极发射特性

如图2可知,LaB<sub>6</sub>随温度的升高,发射电流密度几乎是呈线性增加,仅在温度低的区域,发射性能不如氧化物阴极和LaMo阴极。但氧化物阴极容易中毒,蒸发快,不能连续长时间发射大电流密度,LaMo阴极在温度超过某值后突然很快下降。只有LaB<sub>6</sub>阴极在最低温度下可提供最大发射电流,使用前也不必激活,加热后去气即可发射电子。

## 5.3 蒸发率与溅射率

在相同阴极发射电流密度下,蒸发率由大到小依次为:W—氧化物—LaB<sub>6</sub>—LaMo;溅射率由大到小依次为:氧化物—W—LaMo—LaB<sub>6</sub>。

#### 5.4 阴极品质因素 $F^{[6]}$

通常以实验数据丰富的材料的熔点作为阴极的最高使用温度。由图3可知,氧化物的品质因素 $F$ 为最好,依次为LaB<sub>6</sub>、W。

#### 5.5 阴极放电特性

这四种阴极放电特性是相似的,阴极温度、弧压对弧流有明显影响,在给定的阴极工作温度下,随弧压增加弧流出现饱和。氧化物阴极放电波形最为光滑,W阴极放电波形噪声较严重,但弧流随气压变化不大明显。LaB<sub>6</sub>及

LaMo 阴极气效率低于钨阴极和氧化物阴极,而且存在进气量最低阈值。

#### 5.6 使用寿命

W 及氧化物阴极寿命决定于活性材料的蒸发及返流离子的轰击。LaB<sub>6</sub> 阴极的寿命取决于表面化合物杂质的生成,这些污染物抑制了LaB<sub>6</sub> 阴极的电子发射,导致其发射性能下降,缩短其使用寿命。LaMo 阴极在高温下不易被污染,但由于其发射比不大,要求的工作温度高,导致阴极表面蒸发和溅射加剧,其实际使用寿命取决于材料的蒸发及溅射。

综上所述,这四种阴极各有其优缺点。W 阴极工作温度最高,阴极热辐射及蒸发最严重,导致阴极寿命最短,源可靠性差;氧化物阴极虽品质因素最好,但容易中毒,不能发射长脉冲电流;LaB<sub>6</sub>、LaMo 阴极虽发射性能好、耐离子轰击,但结构复杂、成本高。所以,选用何种阴极要视所用的场合,在要求的长脉冲大电流场合,首选LaB<sub>6</sub> 阴极,但如高性能LaMo 材料加工问题国内解决了,则选LaMo 阴极。

#### 参 考 文 献

- 1 Ahamed H, Broers A N. Lanthanum hexaboride electron emitter. J. Appl. Phys., 1979, 43(5): 2185
- 2 Goebel D M, Forrester A T. La-Mo emitters in hollow cathode, 1980, 51 (11): 1468
- 3 胡立群. 直热式钨基钼网氧化物灯丝特性研究. 真空与低温, 1995, 1(4): 192
- 4 Hu Liqun, Wang Shaohuo. Indirectly heated lanthanum hexaboride hollow cathode. ASIPP/144, 1992
- 5 陶小平. 强流离子源新型LaMo 阴极研究(硕士论文). 中国科学院等离子体物理研究所, 1995
- 6 Shigeaki Z, Hiroshi A. On the promising cathode materials for a high brightness electron beam—the figure of merits. Japan J. of Vacuum, 1981, 24 (12): 660

**作者简介:** 胡立群, 博士。1984年毕业于西安交通大学电子工程系。1987年、1993年在中国科学院等离子体研究所先后获得硕士、博士学位。参加过15 cm 双潘宁离子源、弹丸注入器、中空阴极、HT-7 托卡马克分子束注入装置及软X射线起伏阵列测试系统的研制工作。

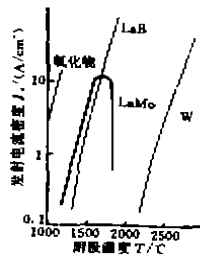


图2 阴极发射电流密度 $J_e$ 和温度的关系曲线

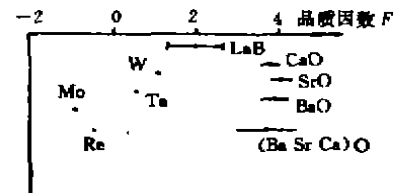


图3 品质因素 $F$ 示意图<sup>[6]</sup>