

# 新型的覆纳米粒子薄膜阴极的研究\*

刘燕文† 田宏 韩勇 朱虹 李玉涛 徐振英 孟鸣凤 易红霞 陆玉新 张洪来 刘濮鲲

(中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

(2009 年 3 月 3 日收到, 2009 年 5 月 5 日收到修改稿)

采用直流磁控溅射的方法制备出 Ir 金属纳米粒子薄膜. 利用扫描电子显微镜分析了纳米粒子的形态和分布以及不同工艺条件对粒子粒径及形貌的影响, 表明纳米粒子的大小可通过调节溅射气体压强来控制. 在 25% 孔度的 W 海绵基体内浸入 6:1:2 钨酸盐发射物质, 然后在其表面沉积上厚度为 200—500 nm 的纳米粒子薄膜层, 最后在 H<sub>2</sub> 气氛中 1200℃ 烧结, 即制成了新型纳米粒子薄膜阴极. 利用阴极发射微均匀性测试仪对纳米粒子薄膜阴极和传统覆膜阴极的热电子发射的均匀性进行了对比研究. 采用飞行时间质谱仪测试了真空本底、纳米粒子薄膜阴极、传统覆膜阴极等各种阴极蒸发物的成分, 研究了阴极蒸发速率与阴极温度的关系, 比较了不同阴极蒸发速率的大小. 研究了 Ba-W 阴极覆上纳米粒子薄膜后的发射特性.

关键词: 纳米粒子薄膜, 热阴极, 发射均匀性, 蒸发

PACC: 7940, 6146, 8115C, 8280

## 1. 引言

高功率微波源是雷达、通讯卫星、电子加速器、自由电子激光及未来的高功率微波武器的核心, 是其最核心的电子器件. 而担当电子发射的阴极及其组件又是高功率微波源中最为核心的部分, 其性能好坏将直接影响微波源的输出性能和寿命, 进而影响雷达及高功率微波器件的性能和寿命. 因此, 研究满足高平均功率和高峰值功率微波源的高性能新型阴极, 对于推动雷达及高功率微波器件等技术的发展具有十分重要的意义. 此外, 电子发射现象涉及物理、化学、材料科学和电子学等多学科领域, 因而进一步研究许多尚不十分清楚的发射机理问题也具有十分重要的学术价值<sup>[1-3]</sup>. 目前, 应用在高功率微波源上的阴极主要有氧化物阴极<sup>[4]</sup>、钨酸盐阴极<sup>[5]</sup>和覆膜阴极<sup>[6,7]</sup>. 氧化物阴极具有工作温度低和脉冲发射功率大等特点, 因此一般应用在短脉冲、低工作比和工作电压较低的高峰值功率微波源上. 近年来, 国际上一些研究单位采用浸渍钨酸盐阴极取代氧化物阴极用于大功率微波源, 如日本 KEK 加速器实验室将钨酸盐阴极用于 S 波段 50 MW 大功率脉冲速调管, 其阴极直径为 85 mm, 工作脉冲宽度为 6 μs,

重复频率为 50 Hz, 工作温度为 900℃, 电流密度为 8 A/cm<sup>2</sup><sup>[8]</sup>. 但由于钨酸盐阴极发射的不均匀性及抗离子轰击能力差等缺点, 这些缺点限制了这种阴极在高功率微波器件中的进一步应用. 鉴于此, 目前在高功率微波器件中应用最多的是覆膜阴极, 它具有发射电流密度大、抗离子轰击能力强且在高压下不易打火等优点. 国内已有单位研究在峰值功率为 65 MW, 重复频率为 50 Hz, 脉冲宽度为 4 μs 的大功率微波源上采用覆膜阴极, 其阴极直径为 89 mm, 平均发射电流密度为 4.3 A/cm<sup>2</sup>. 中科院电子学研究所研制的平均功率为 50 kW 的大功率微波源的阴极也将采用覆膜阴极. 目前, 国际上广泛研究的大功率多注速调管也都采用覆膜阴极<sup>[9,10]</sup>. 但是, 随着微波器件对电子束质量要求的进一步提高, 对阴极的要求也越来越高, 例如要求阴极的发射均匀性要好<sup>[11]</sup>, 以免电子注的层流性变差, 要求阴极蒸发速率要小, 以免影响微波器件的可靠性和寿命等特性<sup>[12]</sup>. 为此, 基于覆膜阴极研究工作的基础上, 我们提出了一种新型阴极的思路, 即在浸渍 Ba-W 阴极基体表面沉积一层厚度为 200—500 nm 的金属纳米粒子薄膜. 这种金属纳米粒子的直径约为 10—100 nm. 由于纳米粒子具有许多不同于块体材料的物理化学特性<sup>[13]</sup> (例如纳米粒子的表面效应特性<sup>[14]</sup>、小尺寸效

\* 国家高技术研究发展计划(批准号 2007AA0055)资助的课题.

† E-mail: liuyanwen58@sina.com

应<sup>[15]</sup>等)这些特性使得沉积金属纳米粒子薄膜的阴极具有许多不同于传统覆膜阴极的特性.研究这种新型阴极的发射特性,对电子发射的理论和应用以及拓展纳米材料应用研究领域都具有十分重要的学术价值和应用价值.

## 2. 实验装置及实验方法

### 2.1. 金属纳米粒子薄膜制备系统

金属纳米粒子薄膜的制备系统包括直流和射频磁控溅射系统、样品加热系统、监控金属纳米粒子薄膜厚度的石英晶体测厚仪、充气系统(充气压强由流量计和真空计控制).此系统还包括离子刻蚀系统,以便对 Ba-W 阴极表面进行离子清洗,这是由于 Ba-W 阴极在浸渍发射材料后表面需车制加工,其表面的孔度发生了变化,同时表面存在残留的发射材料,所以对其表面必须进行离子清洗以清除残留的发射物质和打开由于车制而封闭的开孔.

### 2.2. 阴极制备

阴极采用热子组件 Ba-W 阴极,其结构如图 1 所示.

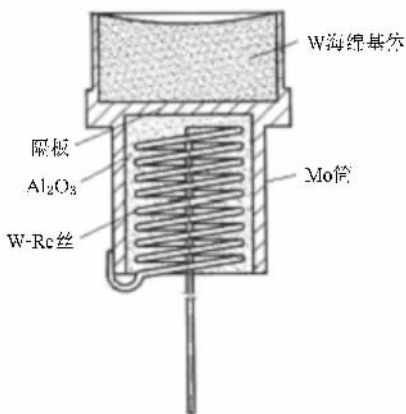


图 1 热子组件结构示意图

Ba-W 阴极是由发射物质和 W 海绵体组成.将摩尔比为 6:1:2 的 BaO、CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 铝酸盐发射物质均匀地填充在孔度为 25% 的 W 海绵体的孔隙中,从发射物质还原出来的金属 Ba 和 BaO 沿海绵孔道不断地扩散到阴极表面,从而降低表面逸出功.在阴极工作期间表面上的 Ba 和 BaO 损耗可以不断地得到补充.

热子组件就是将加热体(一般是 W 丝或 W-Re 丝)埋在绝缘介质(一般为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)中,这样一方面避免了振动等造成的热子短路,提高了热子的可靠性,另一方面又提高了热子的加热效率.目前,这种热子组件已被广泛采用.

将上述制备好的浸渍 Ba-W 阴极放入纳米粒子薄膜制备系统,在其表面沉积上厚度为 100—500 nm 的纳米粒子薄膜,即完成纳米粒子薄膜阴极的制备.

### 2.3. 阴极发射微观均匀性测试

为了研究阴极发射均匀性,我们研制了阴极发射微观均匀性测试仪,它是获得高分辨的放大的电子发射图像的仪器,是一种研究阴极发射均匀性的有效手段.它的基本结构包括超高真空系统、电子显微镜真空室、电子光学系统、三维精密样品架、观察窗、烘烤系统、操作台等.真空系统本底压强低于  $5 \times 10^{-7}$  Pa,实验过程中真空度在  $10^{-6}$  Pa 左右.

电子光学系统由阴极样品、聚焦极、阳极、光阑、静电型电子透镜、荧光屏等组成.电子光学系统的光路如图 2 所示.热阴极和聚焦极及阳极组成三电极系统,相当于一个静电透镜使得阴极发射的电子会聚.热阴极发射的电子在聚焦极和阳极(加速电压为 0.1—25 kV)的作用下,高速地穿过阳极孔和光阑,然后被静电透镜放大,最后在荧光屏上得到经二级放大的电子图像.由于阴极表面不同区域的发射电流密度不同,结果使屏上的亮度不同,从而产生一个对应于阴极上发射变化的可见图像.通过三维精密样品架( $x$  和  $y$  方向精度为  $0.5 \mu\text{m}$ , $z$  方向精度为  $0.1 \text{ mm}$ )移动阴极样品以观察阴极表面不同区域的发射情况.荧光屏上的电子图像可由数码相机记录.

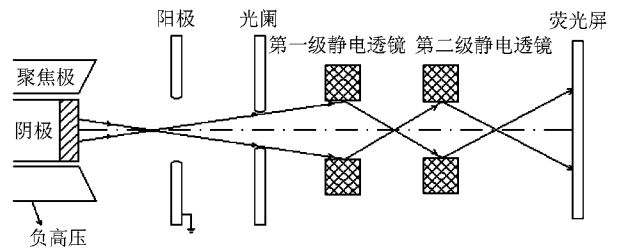


图 2 阴极发射均匀性测试仪中电子光学系统的光路图

### 2.4. 阴极蒸发及发射测试

阴极蒸发和发射测试是在超高真空室内进行,设备由三维样品架(可同时放入三个以上样品)、观

察窗、400 L/s 溅射离子泵、烘烤系统、飞行时间质谱仪和水冷阳极等组成. 采用水冷阳极是为了在测试发射电流时避免因阳极温度过高造成阳极出气而影响阴极发射. 真空系统本底极限压强低于  $5 \times 10^{-8}$  Pa. 实验过程中真空度在  $10^{-7}$  Pa 左右.

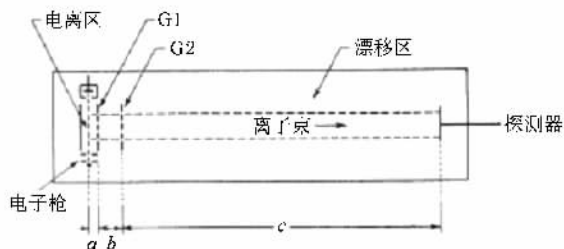


图3 飞行时间质谱仪工作原理示意图

用于研究阴极蒸发的飞行时间质谱仪的工作原理如图3所示. 在离子源中产生的正离子通过接有负脉冲电压的栅极G1引出, 然后经接有负高压的电极G2加速, 进入漂移区域, 离子经过漂移路程C后到达探测器, 探测器按漂移时间进行选择, 使给定的荷质比  $M/e$  的离子通过, 最后由接收器接收. 质量为  $M$  的离子飞行时间  $T$  与其质荷比  $M/e$  的关系为

$$T = K(M/e)^{1/2}, \quad (1)$$

其中  $K$  是与飞行时间质谱仪结构及加速电压有关的量. 这样, 通过测量离子的飞行时间就可求出离子的质荷比, 从而进行样品成分分析. 根据相同时间内到达探测器的离子数就可计算出该种成分在样品中的含量.

阴极蒸发速率  $V$  与离子峰强度  $I$  的关系为<sup>[16]</sup>

$$V = aI, \quad (2)$$

其中  $a$  为常数. 因此通过测量离子峰强度就可求出阴极蒸发速率.

这种测试方法的优点是能够分析阴极蒸发物的成分. 仪器的分析部分只是一个漂移管, 机械结构简单, 仪器的性能指标主要依靠调节电参数而获得, 机械调整方面不多, 因此使用方便. 同时, 这种测试方法还能实现快速扫描, 可用于监控极短的瞬态事件, 在短时间内纪录任意反应过程的全部质谱, 给出反应的全部信息.

阴极蒸发物的蒸发速率  $V$  与阴极表面温度  $T$  之间满足方程

$$\lg V = b - (B/T). \quad (3)$$

式中  $b$  和  $B$  均为常数. 把(2)式代入(3)式即得到离子峰强度与温度的关系

$$\lg I = A - (B/T), \quad (4)$$

即离子峰强度的对数与温度倒数呈线性关系.

## 3. 实验结果及分析

### 3.1. 纳米粒子薄膜制备

采用直流磁控溅射覆膜阴极常用的高温难熔贵金属 Ir (熔点为  $2447^\circ\text{C}$ ), 在系统中充入与金属不发生反应的气体(如  $\text{Ar}$  气), 以增加金属原子的碰撞概率, 使其在达到样品时已成为金属纳米粒子而不是金属原子, 调节溅射速率和充气压强可调节金属纳米粒子的尺寸. 图4给出了不同充气压强条件下制备得到的 Ir 纳米粒子薄膜的扫描电子显微镜 (SEM) 图像.

当压强较低时, 金属原子直接沉积在样品上, 并最终形成表面光滑的多晶薄膜<sup>[17]</sup>. 从图4可看出, 当压强为  $0.5$  Pa 时 Ir 金属薄膜非常光滑, 属于多晶薄膜, 这种薄膜覆在浸渍 Ba-W 阴极表面就是传统覆膜阴极. 随着气体压强的增大, Ir 原子与气体原子

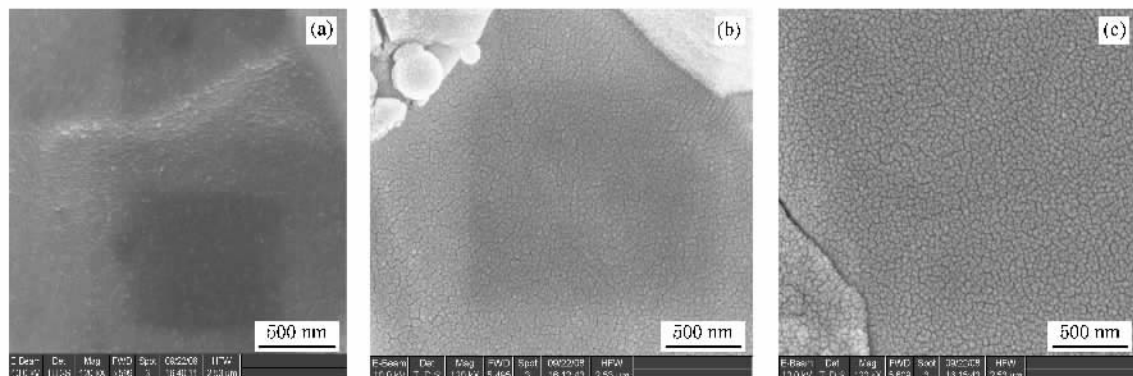


图4 不同充气压强条件下制备的 Ir 纳米粒子薄膜的 SEM 图像 (a) 0.5 Pa (b) 10 Pa (c) 30 Pa

的碰撞次数将增多,从而延长了 Ir 原子到达样品的时间和路径,增大了 Ir 原子之间的碰撞概率,使落到样品上的是纳米粒子而非原子,并最终形成纳米粒子薄膜而非多晶薄膜. 纳米粒子薄膜中纳米粒子

的粒径随着气体压强的增大而增大.

图 5 给出了纳米粒子经过加热处理前后的 SEM 图像. 从图 5 可以看出, 纳米粒子的尺寸在 50 nm 左右, 经过加热处理后纳米粒子的晶界更加清晰.

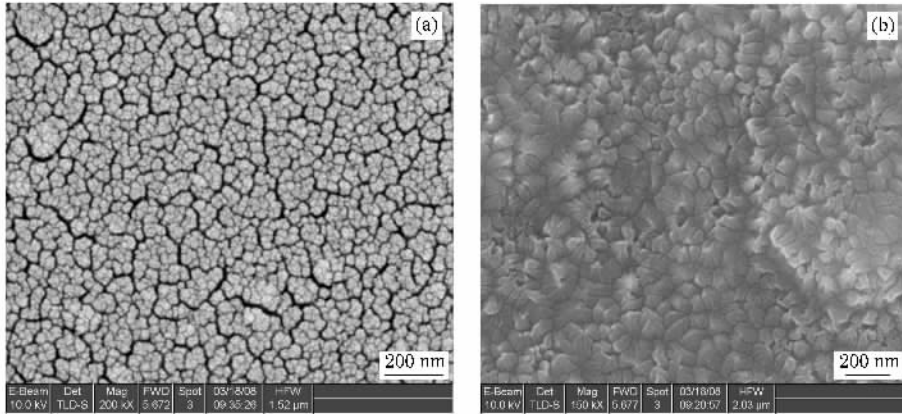


图 5 加热处理前后的 Ir 纳米粒子薄膜 SEM 图像 (a) 加热前 (b) 1200°C 加热 1 h

将制备好的浸渍 Ba-W 阴极放入纳米粒子制备系统,在其表面沉积上厚度为 100—500 nm 的纳米粒子薄膜,在 H<sub>2</sub> 气中 1200°C 烧结 10 min,即完成纳米粒子薄膜阴极的制备. 在下面的各项研究中阴极直径为 2.5 mm,薄膜厚度(包括普通薄膜和纳米粒子薄膜)为 400 nm,纳米粒子的粒径为 20 nm 左右. 纳米粒子薄膜阴极的表面形貌见图 6.

渍阴极上进行,这样就能使不同种类阴极的基体孔度和发射物质及测试温度保持相同,从而最大限度减少其他因素的影响. 阴极的表面结构如图 7 所示.

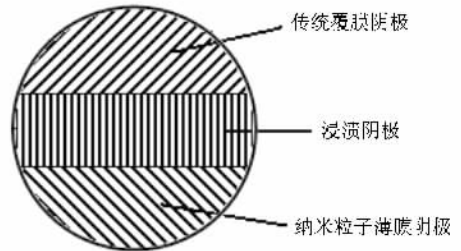


图 7 阴极表面结构示意图

阴极样品在测试之前,需要对阴极进行激活(加热 1100°C 2 h). 要获得对比明显的发射图像,必须把阴极温度降低到使电流受发射限制的温度限制区,否则荧光屏上将出现均匀的亮度而得不到对比明显的发射图像. 图 8 给出阴极发射微观均匀性测试仪测得的阴极在 800°C 时的不同阴极热电子发射的显微图像(直径为 100 μm 左右). 从图 8 可以看出,浸渍阴极的亮度最小均匀性最差,传统覆膜阴极和纳米粒子薄膜阴极的亮度和均匀性都有了很大提高,而纳米粒子薄膜阴极均匀性最好. 这说明浸渍阴极的发射电流密度最小均匀性最差,传统覆膜阴极和纳米粒子薄膜阴极的发射电流密度和发射均匀性都有了很大提高,而纳米粒子薄膜阴极发射均匀性最好.

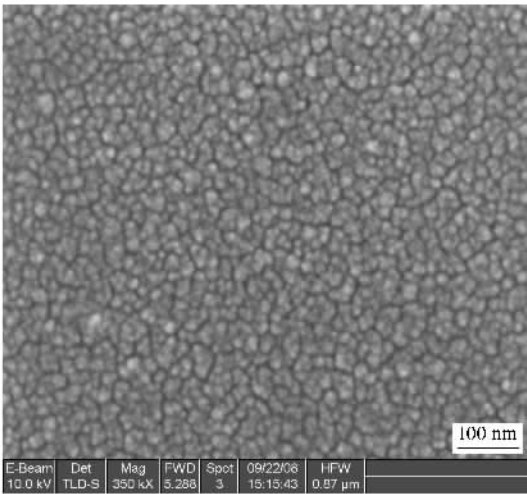


图 6 粒径为 20 nm 左右的 Ir 纳米粒子薄膜 SEM 图像

### 3.2. 纳米粒子薄膜阴极发射均匀性

为了更加精确研究浸渍阴极,传统覆膜阴极和纳米粒子薄膜阴极的发射均匀性,实验在同一个浸

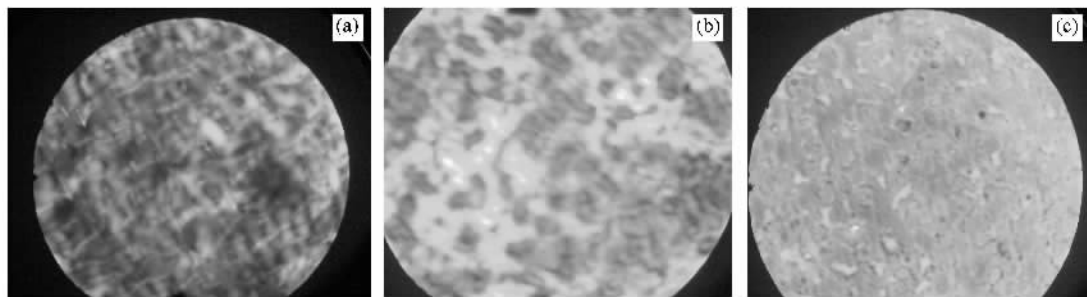


图 8 不同阴极热电子发射的显微图像 (a) 浸渍阴极 (b) 传统覆膜阴极 (c) 纳米粒子薄膜阴极

纳米粒子薄膜阴极发射均匀性好于传统覆膜阴极的原因可用图 9 来进行说明. 图 9 中阴极表面覆膜的厚度为 0.2—0.5  $\mu\text{m}$ , W 海绵孔道的直径为

0.2—2  $\mu\text{m}$ , W 颗粒的直径为 2—6  $\mu\text{m}$ , 金属多晶薄膜的晶粒尺寸为 0.1—2  $\mu\text{m}$ , 纳米粒子的直径在 10—100 nm.

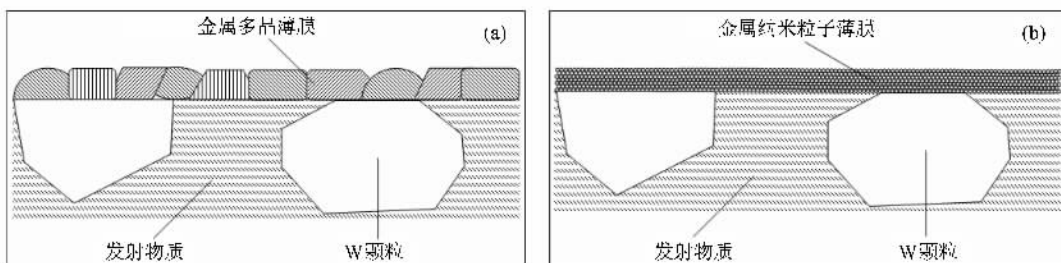


图 9 两种覆膜阴极的结构示意图 (a) 传统覆膜阴极 (b) 纳米粒子薄膜阴极

从填充在 W 海绵体孔隙中的发射物质还原出来的金属 Ba 和 BaO 分子(见图 11)沿 W 海绵孔道不断地向阴极表面扩散. 对于传统覆膜阴极, Ba 原子和 BaO 分子从 W 海绵孔道附近的多晶金属薄膜中的晶粒间界扩散到阴极表面, 然后再沿多晶金属薄膜表面横向徙动, 构成覆盖多晶金属薄膜的原子层<sup>[18]</sup>. 这样离 W 海绵孔道近的传统覆膜阴极表面 Ba 原子和 BaO 分子覆盖度较高, 离 W 海绵孔道远的阴极表面 Ba 原子和 BaO 分子覆盖度较低, 因此传统覆膜阴极的发射均匀性要差一些. 然而对于纳米粒子薄膜阴极, Ba 原子和 BaO 分子沿纳米粒子薄膜内部的纳米粒子空隙纵向和横向向薄膜表面移动, 由于纳米粒子空隙比 Ba 原子和 BaO 分子要大许多, 因此 Ba 原子和 BaO 分子在纳米粒子薄膜中能够比较自由地流动. 这样 Ba 原子和 BaO 分子就比较容易均匀地分布于纳米粒子薄膜的表面, 所以纳米粒子薄膜阴极的发射均匀性得到了很大的提高.

对阴极蒸发物质中 Ba 的离子峰强度与温度的关系进行了测试.

图 10 给出了阴极未加热时, 真空度在  $2 \times 10^{-7}$  Pa 的条件下真空本底的飞行时间质谱. 从图 10 可以看出, 在  $2 \times 10^{-7}$  Pa 的真空条件下, 飞行时间质谱仪也能测出其中的  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , CO 和  $\text{CO}_2$ , 并具有非常强的离子流强度.

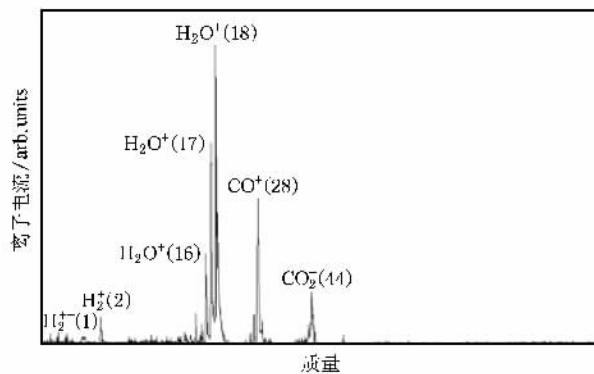


图 10 真空本底的飞行时间质谱

### 3.3. 纳米粒子薄膜阴极蒸发测试

用飞行时间质谱测试了真空本底、纳米粒子薄膜阴极、传统覆膜阴极等各种阴极蒸发物的成分, 并

图 11 给出了覆纳米粒子薄膜浸渍 Ba-W 阴极在 1100℃时蒸发成分的飞行时间质谱. 从图 11 可以

看出,覆纳米粒子薄膜浸渍 Ba-W 阴极的主要成分是 Ba 和少量的 BaO,与浸渍 Ba-W 阴极和传统的覆膜阴极是一样的. Ba 的蒸发速率约是 BaO 的 3—6 倍. 图 11 中 Ar 峰的出现是由于覆纳米粒子薄膜过程中通入 Ar 气造成的.

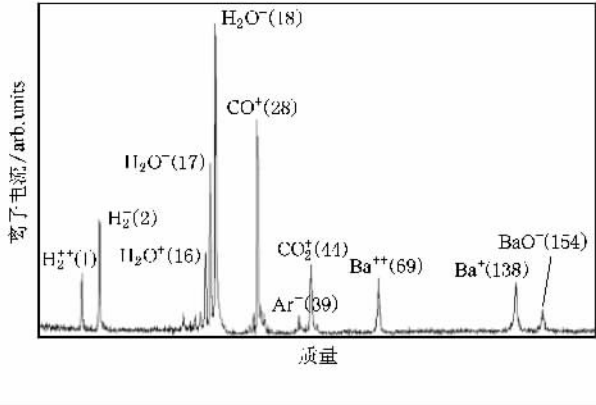


图 11 覆纳米粒子浸渍 Ba-W 阴极的飞行时间质谱

图 12 给出了浸渍 Ba-W 阴极、传统的覆膜阴极和纳米粒子薄膜阴极蒸发物质中 Ba 的离子峰强度与温度的关系. 从图 12 可以看出,阴极蒸发物的离子峰强度的对数与温度倒数呈线性关系,这与(4)式相符. 纳米粒子薄膜阴极和传统的覆膜阴极的蒸发速率都远小于浸渍 Ba-W 阴极,而纳米粒子薄膜阴极又小于传统的覆膜阴极蒸发速率. 这是因为纳米粒子在表面存在着大量的悬挂键,这些悬挂键很容易吸附外来原子,从而使阴极表面 Ba 的蒸发速率降低.

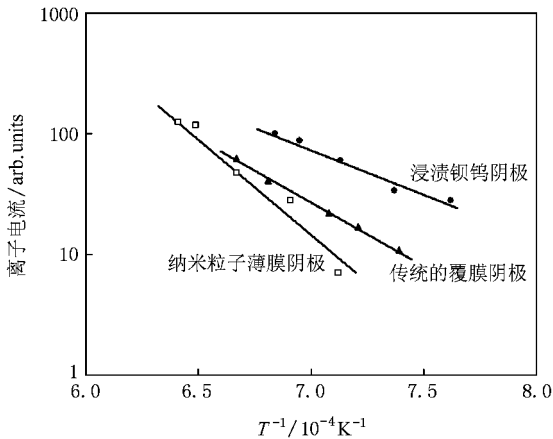


图 12 阴极蒸发成分离子峰强度与温度的关系

### 3.4. 纳米粒子薄膜阴极发射测试

阴极发射电流是在具有水冷阳极的超高真空动态系统中测试的. 阴极的温度由红外测温仪测试,试

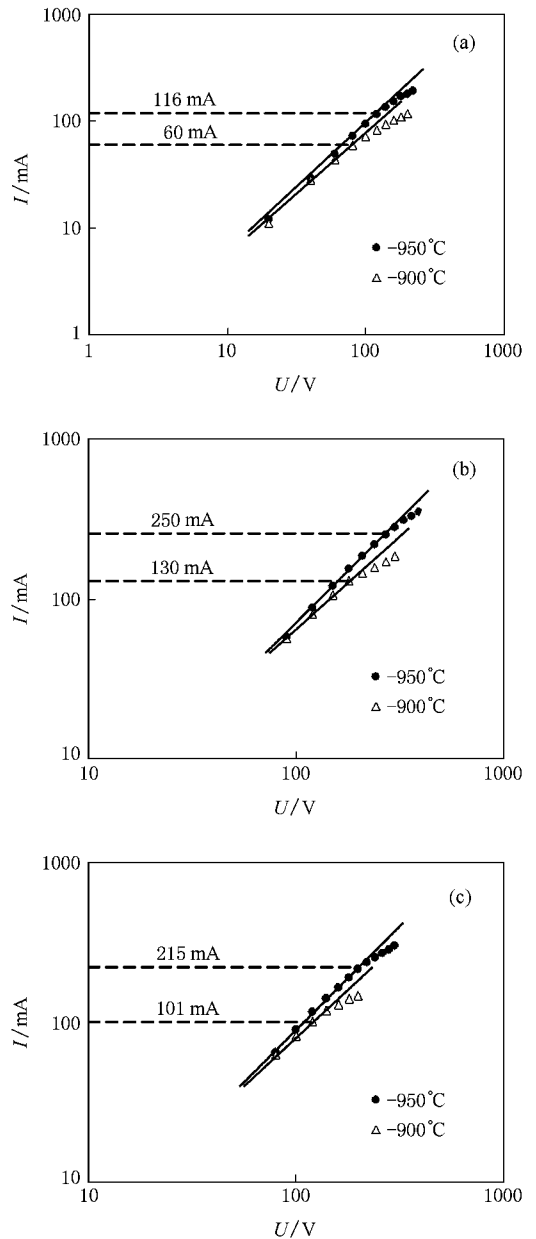


图 13 阴极直流发射电流与阳极电压的关系 (a) 浸渍 Ba-W 阴极 (b) 传统覆膜阴极 (c) 纳米粒子薄膜阴极

验阴极的温度为 900 和 950℃. 本文采用空间电荷偏离点电流作为标准来检验阴极的发射能力,因为空间电荷限制电流在微波器件使用中具有实际意义. 本文对几种阴极的直流发射电流进行了测试. 图 13 给出了浸渍 Ba-W 阴极、传统的覆膜阴极和纳米粒子薄膜阴极的发射特性的  $I-V$  对数曲线. 从图 13 可以看出,纳米粒子薄膜阴极与传统的覆膜阴极的发射水平相差不大,都比浸渍 Ba-W 阴极提高了一倍左右. 这是由于金属 Ir 薄膜对 BaO 具有较高的吸附能并不与之发生还原反应,而非覆膜阴极表面的 W

将一部分 BaO 还原成 Ba 原子,这样覆盖在覆膜阴极表面的 BaO 原子多于未覆膜阴极.由于 BaO 的逸出功为 1.60 eV,而 Ba 的逸出功为 2.52 eV,这样阴极表面含有 Ir 的阴极的发射电流密度将大于未覆膜的阴极<sup>[19]</sup>.从图 13 还可看出,纳米粒子薄膜阴极与传统的覆膜阴极相比,其发射特性并无太大的变化.这是因为阴极表面逸出功非常强地依赖表面覆盖的原子层的逸出功<sup>[20]</sup>,而 Ir 金属纳米粒子薄膜阴极表面吸附的原子种类与传统 Ir 金属多晶薄膜阴极表面吸附的原子种类不会有太大区别.这一点也可以间接从两种阴极蒸发的飞行时间质谱上看出.因此,纳米粒子薄膜阴极与传统的覆膜阴极相比,其发射均匀性和蒸发特性都得到了明显提高,而发射特性并无太大的变化.

## 4. 结 论

利用直流磁控溅射的方法制备出粒径分布均匀的金属纳米粒子薄膜.利用 SEM 分析了纳米粒子的形态和分布以及不同的工艺条件对粒子粒径及形貌的影响.研究表明纳米粒子的大小可通过调节溅射

气体压强来控制.在 25% 孔度的 W 海绵基体内浸入 6:1:2 铝酸盐发射物质,然后在其表面沉积上厚度为 200—500 nm 的纳米粒子薄膜层,最后在 H<sub>2</sub> 气中 1200℃ 烧结 10 min,即制成了新型纳米粒子薄膜阴极.利用阴极发射微观均匀性测试仪研究了纳米粒子薄膜阴极和传统覆膜阴极及浸渍阴极的热电子发射的均匀性.结果表明浸渍阴极的发射电流密度最小均匀性最差,传统覆膜阴极和纳米粒子薄膜的发射电流密度和均匀性都有了很大提高,而纳米粒子薄膜阴极发射均匀性最好.采用飞行时间质谱测试了真空本底的成分,在  $2 \times 10^{-7}$  Pa 的超高真空下,飞行时间质谱仍有较强真空本底气体的离子峰.然后分析了纳米粒子薄膜阴极的蒸发成分,发现这种阴极的主要成分是 Ba 和 BaO,Ba 的蒸发速率约是 BaO 的 3—6 倍.研究发现,阴极蒸发的速率的对数与温度的倒数呈很好的线性关系.通过比较发现,纳米粒子薄膜阴极比传统的覆膜阴极和未覆膜阴极的蒸发速率都小.Ba-W 阴极覆上纳米粒子薄膜后的发射特性的研究表明,纳米粒子薄膜阴极与传统的覆膜阴极的发射水平相差不大,都比浸渍 Ba-W 阴极提高了一倍左右.

- [1] Liu Y W, Tian H, Han Y, Xu Z Y, Meng M F, Zhang H L 2008 *Sci. China E* **38** 1515 (in Chinese) [刘燕文、田宏、韩勇、徐振英、孟鸣凤、张洪来 2008 中国科学 E **38** 1515]
- [2] Liu Y W, Tian H, Han Y, Xu Z Y, Meng M F, Zhang H L 2008 *Sci. China E* **51** 1497
- [3] Wang X X, Liao X H, Luo J R, Zhao Q L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1924 (in Chinese) [王小霞、廖显恒、罗积润、赵青兰 2008 物理学报 **57** 1924]
- [4] Wang X X, Liao X H, Luo J R, Zhao Q L, Zhang X W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1280 (in Chinese) [王小霞、廖显恒、罗积润、赵青兰、张晓伟 2009 物理学报 **58** 1280]
- [5] Wang J S, Liu W 2008 *J. Phys. Chem. Solid* **69** 2103
- [6] Li Y T, Zhang H L, Liu P K, Zhang M C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6677 (in Chinese) [李玉涛、张洪来、刘濮鲲、张明晨 2006 物理学报 **55** 6677]
- [7] Liu Y W, Liu S Y, Tian H, Zhang M C, Xu Z Y, Meng M F, Zhang H L 2006 *J. Vac. Sci. Technol.* **26** 240 (in Chinese) [刘燕文、刘胜英、田宏、张明晨、徐振英、孟鸣凤、张洪来 2006 真空科学与技术学报 **26** 240]
- [8] Wang Y M 1999 *Vac. Electron.* **2** 32 (in Chinese) [王亦曼 1999 真空电子技术 **2** 32]
- [9] Isagawa S 1999 *Appl. Surf. Sci.* **146** 86
- [10] Liu Y W, Tian H 2004 *Chin. Patent* 00123779.8 (in Chinese) [刘燕文、田宏 2004 中国发明专利 00123779.8]
- [11] Ives R L, Louis R L 2005 *IEEE Trans. Electron Dev.* **52** 2800
- [12] Chiba A, Akiyama Y 1999 *Appl. Surf. Sci.* **146** 120
- [13] Xue Z Q, Xi Z H 2004 *Vacuum* **41** 1 (in Chinese) [薛增泉、奚中和 2004 真空 **41** 1]
- [14] Ball P, Garwin L 1992 *Nature* **355** 761
- [15] Halperin W P 1986 *Rev. Mod. Phys.* **58** 532
- [16] Liu Y W, Tian H, Han Y, Lu Y X, Zhao Q L, Xu Z Y, Meng M F, Zhang X W, Wang X Y, Zhang H L 2007 *Vacuum Sci. Tech.* **27** 437 (in Chinese) [刘燕文、田宏、韩勇、陆宇新、赵青兰、徐振英、孟鸣凤、张晓伟、王小艳、张洪来 2007 真空科学与技术学报 **27** 437]
- [17] Xue Z Q, Wu Q D, Li H 1991 *Thin Film Physics* (Beijing: Electronics Industry Press) (in Chinese) [薛增泉、吴全德、李浩 1991 薄膜物理 (北京:电子工业出版社)]
- [18] Thomas R E, Gibson J W, Haas G A, Abrams R H Jr 1990 *IEEE Trans. Electron Dev.* **37** 850
- [19] Thomas R E, Pankey T 1979 *Appl. Surf. Sci.* **2** 187
- [20] Liu X Q 1980 *Electronics of Cathode* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [刘学 1980 阴极电子学 (北京:科学出版社)]

# Emission properties of impregnated cathode with nanoparticle films<sup>\*</sup>

Liu Yan-Wen<sup>†</sup> Tian Hong Han Yong Zhu Hong Li Yu-Tao Xu Zhen-Ying Meng Ming-Feng

Yi Hong-Xia Lu Yu-Xin Zhang Hong-Lai Liu Pu-Kun

( *Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China* )

( Received 3 March 2009 ; revised manuscript received 5 May 2009 )

## Abstract

The Ir nano particle thin film was grown by direct current magnetron sputtering at room temperature. Microstructure of thin films grown at different sputtering pressures were measured by scanning electron microscopy. The results show that the particle size of the films depends on the deposition rate in the nucleation stage of Ir films and the deposition rate can be well controlled by sputtering pressure. A new kind of cathodes are fabricated from 25% porous tungsten impregnated with 6:1:2-type barium calcium aluminate and coated with the nano particulate Ir thin film. The coating processes produces a film thickness of 200—500 nm and the cathodes are fired in hydrogen atmosphere for ten minutes at 1200°C to further improve the coating microstructure. The cathodes have been studied with thermal electron microscope by which the electron-optical picture of a thermal emission cathode could be obtained. Time of flight mass spectrometer(ToFMS) has been used in a study of evaporation from impregnated cathodes. The chemical composition of evaporation of various impregnated cathodes have been measured by ToFMS. The variation of ion current of evaporants from S-type cathode and M-type cathode ( coated with iridium ) and n-type cathode ( coated with iridium nano-particle thin film ) with temperature and time have been studied and discussed. Emission current characteristics have been measured as a function of voltage and temperature.

**Keywords** : nano particle films , thermal cathode , well-distributed emission , evaporation

**PACC** : 7940 , 6146 , 8115C , 8280

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Development Program of China ( Grant No. 2007AA0055 ).

<sup>†</sup> E-mail : liuyanwen58@sina.com