

## 含稀土氧化物难熔盐浸渍 W 基直热式阴极研究

漆世锴<sup>1,2</sup>, 王小霞<sup>1</sup>, 罗积润<sup>1</sup>, 胡明炜<sup>1,2</sup>, 李 云<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 电子学研究所, 高功率微波源与技术重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 为了提高磁控管阴极的工作性能, 采用新型  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  难熔盐浸渍 W 基制备直热式阴极, 并对该阴极的热发射特性和寿命特性等进行了测试。热发射测试结果表明,  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍阴极在  $1600^\circ\text{C}$  可提供超过  $0.18\text{ A/cm}^2$  的空间电荷限制区电流密度。在同等发射电流下, 该浸渍阴极的工作温度比纯 W 阴极降低至少  $300^\circ\text{C}$ , 该阴极在  $1750^\circ\text{C}$ ,  $0.5\text{ A/cm}^2$  直流负载下, 可以连续工作 2100 h。当以  $\text{Y}_2\text{O}_3$  代替  $\text{La}_2\text{O}_3$ , 采用相同的配比制备阴极时,  $1400^\circ\text{C}$ 、 $1700^\circ\text{C}$  下即可分别提供超过  $0.6$ 、 $3.4\text{ A/cm}^2$  的空间电荷限制区电流密度。 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍阴极的工作温度比  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍阴极降低至少  $400^\circ\text{C}$ , 该阴极在  $1600^\circ\text{C}$ ,  $1.5\text{ A/cm}^2$  直流负载下, 可以连续工作 2600 h。最后, 对这两种新型含稀土氧化物难熔盐浸渍阴极的热发射机理进行了探讨。

**关 键 词:** 直热式阴极; 稀土氧化物; 热发射; 寿命; 发射机理

中图分类号: O462 文献标识码: A

## Rare Earth Oxide Refractory Metal Salt Impregnated W Based Directly-Heated Cathode

QI Shi-Kai<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-Xia<sup>1</sup>, LUO Ji-Run<sup>1</sup>, HU Ming-Wei<sup>1,2</sup>, LI Yun<sup>1</sup>

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Cathode plays an important role in the magnetron. In order to enhance the emission current, reduce the operation temperature and prolong the lifetime of the pure W cathode applied in the magnetron, a new  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  impregnated W based directly-heated cathode was developed. The thermionic emission properties of the  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  impregnated cathode were measured. The results show that the  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  impregnated cathode can provide more than  $0.18\text{ A/cm}^2$  current density for the space charge limitation (SCL) at  $1600^\circ\text{C}$ . Under the same thermionic emission level, the working temperature of the  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  impregnated cathode is at least  $300^\circ\text{C}$  lower than that of the pure W cathode. Lifetime of the  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  impregnated cathode reaches 2100 h at  $1750^\circ\text{C}$  with dc load of  $0.5\text{ A/cm}^2$ . The  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  impregnated cathode can provide more than  $0.6$  and  $3.4\text{ A/cm}^2$  current density for SCL at  $1400^\circ\text{C}$ ,  $1700^\circ\text{C}$ , respectively. Under the same thermionic emission level, the working temperature of the  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  impregnated cathode is at least  $400^\circ\text{C}$ , lower than that of the  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  impregnated cathode. Lifetime of the  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  impregnated cathode reaches 2600 h at  $1600^\circ\text{C}$  with dc load of  $1.5\text{ A/cm}^2$ . At last, the thermionic emission mechanisms of the two new impregnated cathodes are discussed reasonably.

收稿日期: 2016-01-04; 收到修改稿日期: 2016-02-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2013CB328901); 国家自然科学基金(11305177)

State Key Development Program for Basic Research of China (2013CB328901); National Natural Science Foundation of China (11305177)

作者简介: 漆世锴(1987-), 男, 博士研究生. E-mail: kaishiqi@126.com

通讯作者: 王小霞, 研究员. E-mail: xxwang@mail.ie.ac.cn

**Key words:** directly-heated cathode; rare earth oxide; thermionic emission; lifetime; emission mechanism

磁控管<sup>[1-2]</sup>是一种结构简单、体积小和效率高的真空电子管,在军用、工业及民用微波仪器设备领域,磁控管的应用越来越广泛<sup>[3]</sup>。阴极作为真空电子管的“心脏”部件,其性能将直接影响到磁控管的输出功率和工作寿命。

在正常工作中,磁控管阴极表面发射出去的电子,一部分会到达阳极,另一部分会回轰阴极。这种电子回轰作用会加热阴极,同时激发次级电子。因此,磁控管阳极电流主要由热发射电流和次级发射电流组成<sup>[4]</sup>。目前大功率磁控管常用阴极主要有氧化物阴极<sup>[5]</sup>、Ba-W 阴极<sup>[6-7]</sup>以及 Th-W 阴极<sup>[8]</sup>等。氧化物阴极具有较大次级电子发射系数<sup>[9]</sup>,但是其耐电子和离子轰击能力差,并且高电压下易于发生电火花;Ba-W 阴极虽然具有较好的耐高压能力,但是在大功率条件下,其耐电子轰击能力也比较弱,而且这种阴极制作工艺复杂;Th-W 阴极具有很好的耐电子轰击能力,但是 Th 元素是放射性元素。为了满足大功率磁控管对输出功率和寿命的要求,人们希望研发出一种既具有较大热发射,又具有较大次级电子发射系数,适合大功率磁控管工作环境新型阴极。

文献[10]采用  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$  阴极尝试代替磁控管用的  $\text{ThO}_2\text{-W}$ ,该阴极在  $1400^\circ\text{C}$  时可以提供  $0.367\text{A}/\text{cm}^2$  的直流发射电流密度,但是  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$  阴极的热发射不稳定。当采用  $\text{Y}_2\text{O}_3$  代替  $\text{La}_2\text{O}_3$  后,解决了该阴极热发射不稳定的问题。研究发现在相同的工作温度下,这两种阴极的热发射能力已经超过 Th-W 阴极,但是  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Mo}$  阴极热发射性能仍然较差。

本工作采用含稀土氧化物难熔盐( $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ )浸渍 W 基方法制备大功率磁控管用直热式阴极。考虑到实验所采用的热发射活性物质已经具有较大的次级电子发射系数<sup>[11]</sup>,本工作仅对该阴极的热发射特性、寿命特性及发射机理进行了研究。

## 1 实验方法

### 1.1 含稀土氧化物难熔盐的制备

选取  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Gd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$  按重量百分比为 (45~50)wt%:(5~10)wt%:(45~50)wt% 混合后放入带球的玛瑙罐中。在玛瑙罐中倒入分析纯无水乙醇后,在球磨机上球磨混合均匀。将上述悬浊液倒入称量瓶中置于红外灯下,烘干获得混合好的粉末,并将

粉末放入模具中压制成圆饼状,再将饼块放入马佛炉中烧结,烧结温度为  $(1450 \pm 50)^\circ\text{C}$ ,保温时间 2~4 h,降温后取出即获得活性物质。

### 1.2 浸渍 W 基直热式阴极的制备

在钨丝基底表面均匀喷覆上钨粉层后,放入高温氢炉中在  $(1600 \pm 50)^\circ\text{C}$  下保温一定时间后形成钨海绵层。制备的活性物质以溶液形式均匀浸渍在钨海绵层表面完成浸渍 W 基直热式阴极的制备。

### 1.3 性能测试

利用 KYKY-2800B 扫描电子显微镜(SEM)对活性物质表面微观结构进行观察,利用该 SEM 自身携带的能谱仪(EDS)对活性物质表层元素及含量进行分析。利用 X 射线衍射仪(XRD)对活性物质进行物相分析。利用筒状式阳极真空二极管系统进行热发射及寿命测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 浸渍 W 基直热式阴极热发射及寿命特性

图 1 为  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍 W 基阴极伏安特性曲线,由图可知,纯 W 阴极在  $1900^\circ\text{C}$  时仅能够提供  $0.13\text{A}/\text{cm}^2$  的热发射电流密度,而浸渍阴极在  $1600^\circ\text{C}$  时即可提供超过  $0.18\text{A}/\text{cm}^2$  的空间电荷限制区电流密度,  $1750^\circ\text{C}$  时可提供超过  $0.52\text{A}/\text{cm}^2$  的空间电荷限制区电流密度。

图 2 为  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍 W 基阴极与纯 W 阴极温度特性曲线,由图可知,随着温度升高,

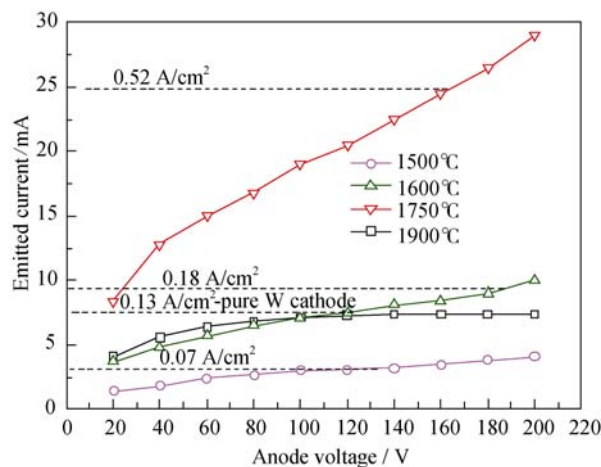


图 1  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍 W 基阴极伏安特性曲线  
Fig. 1  $I$ - $V$  dc emission characteristics curves of  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  impregnated cathode

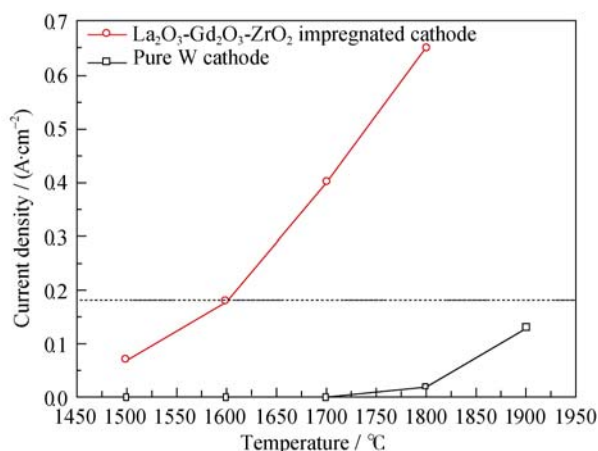


图2  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍 W 基阴极与纯 W 阴极温度特性曲线

Fig. 2 Thermionic electron emission density vs temperature of  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  impregnated cathode and pure W cathode

曲线基本上呈现指数上升趋势。在同等发射电流密度下, 该浸渍阴极的工作温度比纯 W 阴极降低至少 300℃。

图 3 为  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍 W 基阴极寿命特性曲线, 由图可知, 该浸渍阴极在 1750℃, 0.5 A/cm<sup>2</sup> 工作条件下, 寿命达到 2100 h。

## 2.2 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 浸渍 W 基直热式阴极热发射及寿命特性

图 4 为  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍 W 基阴极伏安特性曲线, 由图可知, 该浸渍阴极在 1350℃ 时即可提供超过 0.34 A/cm<sup>2</sup> 的空间电荷限制区电流密度; 在 1400℃、1500℃、1600℃、1650℃、1700℃ 时分别提供超过 0.76、1.69、2.77、3.18、3.43 A/cm<sup>2</sup> 的热发射电流密度。

图 5 为  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍阴极温度特性曲线, 由图可知,  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍 W 基阴

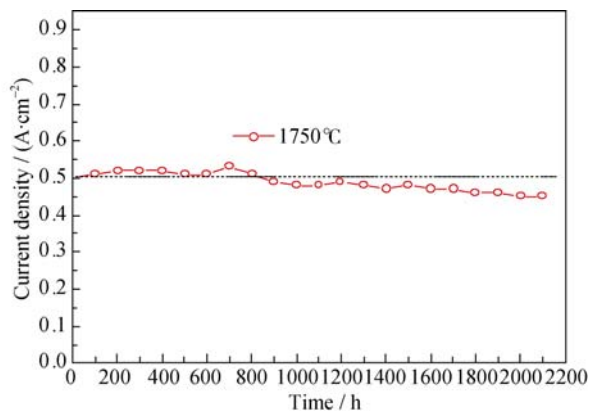


图3  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍 W 基阴极寿命特性曲线

Fig. 3 Lifetime curve of  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  impregnated W based cathode

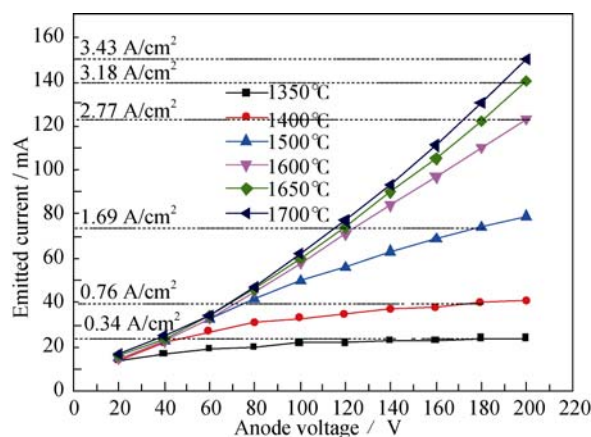


图4  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍 W 基阴极伏安特性曲线

Fig. 4  $I$ - $V$  dc emission characteristics curves of  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  impregnated W based cathode

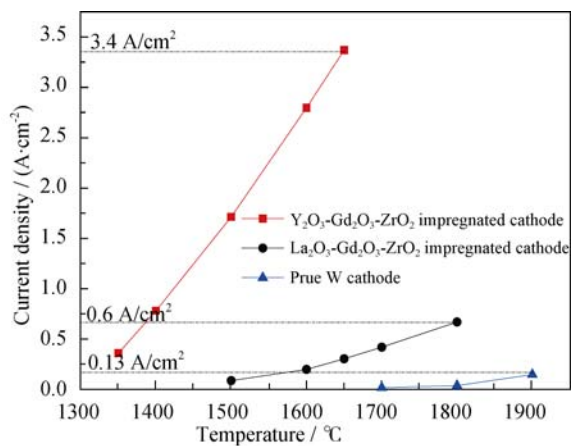


图5  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍阴极温度特性曲线

Fig. 5 Thermionic electron emission density versus temperature of  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  impregnated cathode

极在 1800℃ 时仅能够提供 0.6 A/cm<sup>2</sup> 的热发射电流密度; 而  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍 W 基直热式阴极在 1400℃ 时即可提供超过 0.6 A/cm<sup>2</sup> 的热发射电流密度, 1700℃ 时可以提供超过 3.4 A/cm<sup>2</sup> 的热发射。在相同热发射电流密度下,  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍阴极的工作温度比  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍阴极降低至少 400℃。

图 6 为  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍 W 基阴极寿命特性曲线, 由图可知, 该浸渍阴极在 1600℃, 1.5 A/cm<sup>2</sup> 直流负载下连续工作 2600 h 后, 发射电流密度没有明显衰减迹象。

## 2.3 $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 难熔盐 SEM、EDS、XRD 分析

图 7 为  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  难熔盐的 SEM 形貌及其 XRD 图谱。由图 7(a) 可知, 含  $\text{La}_2\text{O}_3$  难熔盐活性物质颗粒大小一致, 分布均匀, 直径约为 2 μm, 活性物质颗粒之间熔融较好。表 1 示出了含  $\text{La}_2\text{O}_3$



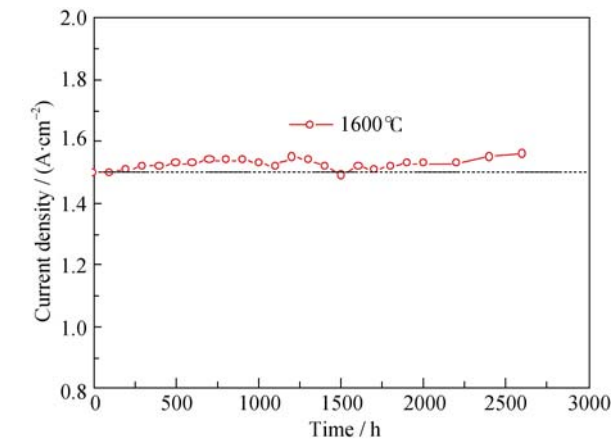


图 6  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍 W 基阴极寿命特性曲线  
Fig. 6 Lifetime curve of  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  impregnated W based cathode

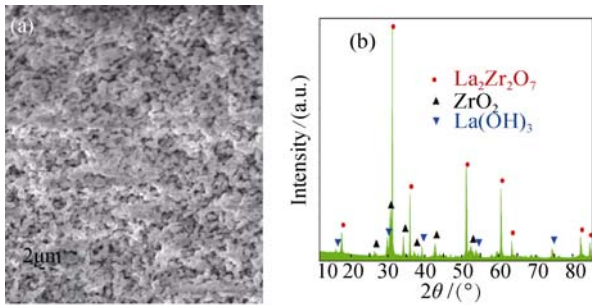


图 7  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  难熔盐的 SEM 照片(a)及其 XRD 图谱(b)  
Fig. 7 SEM image (a) and XRD pattern (b) of  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  refractory metal salt

难熔盐活性物质的元素成分及含量, 由表可知, 含  $\text{La}_2\text{O}_3$  难熔盐活性物质由 La、Gd、Zr、O 四种元素组成, 原子百分数分别为 13.95%、1.39%、20.55%、64.11%, 质量百分数分别为 38.35%、4.33%、37.01%、20.31%。四种元素的含量基本始 (45~50)wt%  $\text{La}_2\text{O}_3$ :(5~10)wt% $\text{Gd}_2\text{O}_3$ :(45~50)wt% $\text{ZrO}_2$  的配比。这说明  $\text{La}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Gd}_2\text{O}_3$  与  $\text{ZrO}_2$  混合得比较均匀。图 7(b) 示出了含  $\text{La}_2\text{O}_3$  难熔盐活性物质的 XRD 图谱, 由图可知, 烧结过程中发生了化学反应, 生成了新的物相  $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ , 图中  $\text{ZrO}_2$  衍射峰源于反应不完全的原料, 含量极少的  $\text{La}(\text{OH})_3$  可能是在送样过程中密封不好, 引入了少量  $\text{H}_2\text{O}$  所致。

表 1 含  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3$  难熔盐活性物质元素成分及含量  
Table1 Element composition of the  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$

Ele- ments	$\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$		Elements	$\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$	
	at%	wt%		at%	wt%
La	13.95	38.35	Y	17.44	35.44
Gd	1.39	4.33	Gd	1.21	4.45
Zr	20.55	37.01	Zr	17.78	36.88
O	64.11	20.31	O	63.57	23.23
Total	100.00	100.00	Total	100.00	100.00

图 8 为  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  难熔盐 SEM 形貌及其 XRD 图谱。由图 8(a)可知, 含  $\text{Y}_2\text{O}_3$  难熔盐形貌与含  $\text{La}_2\text{O}_3$  难熔盐相似, 由表 1 还可知, 含  $\text{Y}_2\text{O}_3$  难熔盐活性物质由 Y、Gd、Zr、O 四种元素组成, 原子百分数分别为 17.44%、1.21%、17.78%、63.57%, 质量百分数分别为 35.44%、4.45%、36.88%、23.23%。四种元素的含量基本符合原始 (45~50)wt% $\text{Y}_2\text{O}_3$ :(5~10)wt% $\text{Gd}_2\text{O}_3$ :(45~50)wt% $\text{ZrO}_2$  的配比。这说明  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Gd}_2\text{O}_3$  与  $\text{ZrO}_2$  混合得比较均匀。图 8(b)为活性物质的 XRD 图谱, 由图可知含  $\text{Y}_2\text{O}_3$  难熔盐活性物质主要物相为  $\text{Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{ZrO}_2$ 。

## 2.4 浸渍 W 基直热式阴极热发射机理讨论

### 2.4.1 含 $\text{La}_2\text{O}_3$ 难熔盐浸渍 W 基直热式阴极

目前关于 La 型化合物阴极的发射机理主要有两种: (1)La 型化合物阴极在高温激活过程中, La 被还原出来后覆盖在阴极表面形成薄膜, 降低了阴极的逸出功; (2)La 型化合物阴极本身就是低逸出功物质, 同金属阴极发射机理相同。

La 型化合物阴极发射的薄膜理论者发现, 实验用真空玻壳和管内各种零件上的蒸发物中多半被检测到含有金属 La。与此同时, La 型化合物阴极需要被加热到一定温度激活后, 在低温时才具有热发射。且在高温工作状态时, 阴极不需要激活就可以直接工作。此外, La 型化合物阴极中 La 元素容易被金属还原成单质, 过剩的 La 单质会在阴极表面形成正电性 La 薄膜, 从而降低阴极的逸出功。本实验中  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  浸渍 W 基直热式阴极热发射活性物质即为  $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ , 该物质熔点为  $2300^\circ\text{C}$ , 同  $\text{LaB}_6$ <sup>[12]</sup>相近。对该浸渍 W 基阴极的蒸发物质进行分析, 检测到了含量较多的 La 元素, 但是没有检测到 Zr 元素, 据此初步判定  $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  的热发射机理为: 在高温激活过程中, 浸渍 W 基阴极活性物质  $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  和 W 海绵发生化学反应, 金属 W 将活性物质中 La 还原出来, 形成单质 La。被还原的单质 La 通过迁徙和扩散的作用, 会被吸附在阴极表面, 虽

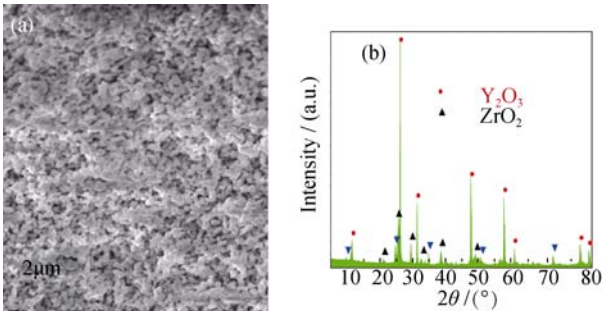
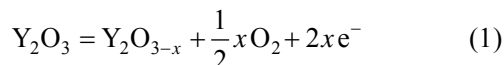


图 8  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  难熔盐的 SEM 照片(a)及 XRD 图谱(b)  
Fig. 8 SEM image (a) and XRD pattern (b) of  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  refractory metal salt

然单质 La 本身并不参与电子发射,但是它发生极化后形成的偶极矩会降低阴极的逸出功,从而增大了热发射性能。

#### 2.4.2 含 $Y_2O_3$ 难熔盐浸渍 W 基直热式阴极

高温处理过程中含  $Y_2O_3$  难熔盐浸渍阴极中  $Y_2O_3$  发生了下面的化学反应<sup>[13]</sup>:



反应式(1)说明直热式阴极在高温激活过程中,  $Y_2O_3$  丢失掉晶格 O, 变成了 n 型半导体  $Y_2O_{3-x}$ 。根据厚涂层阴极的半导体发射理论可知, 这些晶格 O 是以氧负离子空位缺陷形式存在, 这种 n 型半导体  $Y_2O_{3-x}$  越多, 含  $Y_2O_3$  难熔盐涂层导电性越好, 阴极的热发射性能越高。另外, 阴极表面施主( $Y_2O_{3-x}$ )浓度愈大, 则阴极表面能带弯曲就会变小, 导致逸出功降低, 从而增大阴极的热发射。

关于  $ZrO_2$  对阴极热发射的贡献, 文献[14]认为高温下稀土金属氧化物为杂质半导体, 而决定热发射的价电子是相同的, 当晶体结构一样时, 稀土金属氧化物相互掺杂后并没有引起晶格内部能级的显著变化, 因此稀土金属氧化物之间的掺杂对热发射并不起多大作用。如果采用过渡金属氧化物掺杂稀土金属氧化物则能改变晶格内部的能级, 降低阴极表面逸出功。本实验结果显示过渡金属氧化物  $ZrO_2$  掺杂稀土氧化物改变了晶格内部能级, 获得了较好的热发射, 间接证明了该理论的正确性。

### 3 结论

采用  $La_2O_3/Y_2O_3-Gd_2O_3-ZrO_2$  浸渍 W 基方法制备大功率磁控管用直热式阴极, 并对该阴极的热发射特性、寿命特性及机理进行了研究。

1) 含  $La_2O_3$  难熔盐浸渍能够降低纯 W 阴极的工作温度至少  $300^\circ\text{C}$ 。含  $Y_2O_3$  难熔盐浸渍能够降低含  $La_2O_3$  难熔盐浸渍阴极的工作温度至少  $400^\circ\text{C}$ 。

2) 含  $La_2O_3$  难熔盐浸渍 W 基直热式阴极在  $1750^\circ\text{C}$ ,  $0.5\text{ A/cm}^2$  直流负载下, 寿命可以达到 2100 h; 含  $Y_2O_3$  难熔盐浸渍 W 基直热式阴极在  $1600^\circ\text{C}$ ,  $1.5\text{ A/cm}^2$  直流负载下, 寿命可以达到 2600 h。

3) 含  $La_2O_3$  难熔盐浸渍阴极在工作过程中会生成单质 La, La 被吸附在阴极表面, 降低了阴极的逸出功, 从而提高了热发射性能; 含  $Y_2O_3$  难熔盐浸渍阴极在工作过程中生成了 n 型半导体  $Y_2O_{3-x}$ , 在该半导体及  $ZrO_2$  对晶格能级改变的共同作用下, 降低了阴极的逸出功, 从而提高了热发射性能。

### 参考文献:

- [1] LIU WEI, WANG JIN-SHU, GAO FEI, *et al.* Study on the secondary electron emission of rare earth-molybdenum cathodes. *Rare Metal Mater. Eng.*, 2011, **40(8)**: 1430–1433.
- [2] KAMATH G, EHIASARIAN A P. Properties of TiAlCN/VCN nanoscale multilayer coatings deposited by mixed high-power impulse magnetron sputtering (HiPIMS) and unbalanced magnetron sputtering processes—impact of HiPIMS during coating. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2010, **38(11)**: 3062–3070.
- [3] CHURYUMOV G I, FROLOVA T I, BASRAWI K M. The Two-stage Magnetron for Radar Applications. *Proceedings International Radar Symposium*, 2006: 671–672.
- [4] QI SHI-KAI, WANG XIAO-XIA, LUO JI-RUN, *et al.* Secondary Electron Emission of the Cathode in High-Power Continuous Wave Magnetron tubes. *IEEE International Vacuum Electron Source Conference (IVESC)*, 2014: 144–145.
- [5] WANG XIAO-XIA, LIU YAN-WEN, LUO JI-RUN, *et al.* Preparation and evaluation of the ammonium perrhenate impregnated Ni sponge oxide cathode. *IEEE Trans Electron Devices*, 2014, **61(2)**: 605–610.
- [6] CUI YUN-TAO, WANG JIN-SHU, LIU WEI, *et al.* Fabrication of aluminate for scandia doped dispenser cathode and emission property. *Journal of Inorganic Materials*, 2012, **27(5)**: 480–484.
- [7] WANG KAI-FENG, LIU WEI, WANG JIN-SHU, *et al.* Influence of aluminates composition on Ba-W cathode characteristics. *Journal of Inorganic Materials*, 2013, **28(12)**: 1354–1358.
- [8] ZHANG HUI, CHEN XIAO-FENG, YANG ZHI-MAO, *et al.* W-ThO<sub>2</sub> thermionic cathode activated with nanoscale oxide. *Mater Lett*, 1999, **38**: 401–405.
- [9] BRUINING D H, M B E. *Physics and Application of Secondary Electron Emission*. Oxford: Pergamon Press LTD, 1954: 88–93.
- [10] ZHANG JIU-XING, ZHOU MEI-LING, ZHOU WEN-YUAN, *et al.* Thermionic properties of Mo-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cathode wires. *Trans. Non-ferrous Met. Soc. China*, 2002, **12(1)**: 43–45.
- [11] WANG JIN-SHU, REN ZHI-YUAN, LIU WEI, *et al.* Effects of RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doping on the reduction behavior of molybdenum oxide and properties of molybdenum powder. *J. Refract. Met. Hard Mat.*, 2009, **27**: 155–158.
- [12] JACOBSON D L, STORMS E K. Work function measurement of lanthanum-boron compounds. *IEEE Trans Plasma Science*, 1978, **6(2)**: 191–195.
- [13] WANG JIN-SHU, LIU WEI, REN ZHI-YUAN. Secondary electron emission of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mo cermet cathode. *Mater Res Bull*, 2010, **45**: 324–328.
- [14] LI XIAO-QIONG, LIAO XIAN-HENG, LIU GUI-QUAN. Rare earth metal compounds as thermionic cathode material. *Acta Electronica Sinica*, 1965, **1**: 48–56.