

Y₂O₃-Gd₂O₃-HfO₂ 掺杂 W 基直热式 阴极的热发射及耐电子轰击特性

漆世锴^{1,2}, 王小霞¹, 罗积润¹, 胡明炜^{1,2}, 李 云¹

(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: 为了提高大功率磁控管阴极的耐电子轰击性能, 首次采用 Y₂O₃-Gd₂O₃-HfO₂ (Y-Gd-Hf-O) 掺杂金属 W 粉制备大功率磁控管用直热式阴极。对不同质量分数 Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基直热式阴极的热发射及耐电子轰击特性进行了研究。实验结果显示, 50% Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基直热式阴极具有较大的热发射能力, 1500 °C 工作温度下即可提供 1.0 A/cm² 的拐点发射电流密度。10% Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基直热式阴极具有较好的耐电子轰击性能, 经过 14 W/cm² 电子连续轰击 200 h 后, 热发射电流密度仅下降 0.1 A/cm²。最后, 对 Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基直热式阴极热发射及耐电子轰击机理进行了有益的探讨。

关键词: 直热式阴极; 磁控管; 热发射; 耐电子轰击; 发射机理

中图分类号: O462

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)12-3784-05

大功率磁控管在正常工作时, 其阴极表面发射的热电子在正交电磁场的作用下将会回轰阴极, 从而产生次级电子发射^[1,2]。通常大功率磁控管阳极电流中 90% 以上^[3]都是由次级电子发射电流组成。当磁控管阴极的热发射一定时, 如果次级电子发射系数足够大, 那么磁控管在启动之后, 靠电子回轰作用对阴极加热就可以维持磁控管的正常功率输出, 有时候由于电子回轰作用太强, 甚至需要冷却阴极才能使磁控管正常工作。15 kW 磁控管在正常工作时, 其阴极表面受到的电子回轰功率一般在 80~400 W/cm²^[3]之间, 较大的电子回轰功率将会导致传统磁控管用阴极的工作温度过高, 表面蒸发过快, 寿命大大缩短。

为了研究电子轰击对磁控管阴极次级电子发射系数的影响, 文献[4,5]中采用 La₂O₃-Y₂O₃-Mo 来制备大功率脉冲磁控管用阴极, 该阴极在 1100 °C 工作温度下, 经过 1000 h 连续电子轰击后, 次级电子发射系数依然能够稳定在 2.5 左右, 这说明该阴极具有较好的耐电子轰击能力。但是在大功率磁控管中, 阴极工作温度往往超过 1400 °C, 上述文献仅对阴极工作在 1100 °C 时电子轰击对其次级电子发射系数的影响进行了研究。

本研究首次采用含稀土氧化物难熔盐 Y₂O₃-Gd₂O₃-

HfO₂ (Y-Gd-Hf-O)^[6]与金属 W 粉按一定质量分数掺杂来制备大功率磁控管用直热式阴极, 简称该阴极为 Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极, 并在相同实验条件下制备 Y-Gd-Hf-O 浸渍 W 基阴极作为对比。从而研究该 Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极的热发射特性, 以及当工作温度超过 1400 °C 时, 该直热式阴极的耐电子轰击性能。

1 实 验

关于 Y-Gd-Hf-O 浸渍 W 基直热式阴极的制备过程在文献[6]中已经有详细的介绍, 本实验仅将文献[6]中的 W 丝换成 W 带, 然后依次在 W 带表面烧结 W 海绵, 浸渍 Y-Gd-Hf-O 活性物质, 即完成该浸渍 W 基直热式阴极的制备。本实验主要对 Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极的制备过程进行详细介绍。

选取纯度为 99.9% (质量分数) 平均粒度为 2~10 μm 的 Y₂O₃、Gd₂O₃、HfO₂ 按质量分数为 45%~50%: 5%~10%: 45%~50% 混合后放入带球的玛瑙罐中。在玛瑙罐中倒入 2/3 体积的分析纯无水乙醇或去离子水, 在球磨机上球磨混合 24 h 以上, 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, 在油压机上以 400 N/cm² 压力下压制成直径为 10 mm, 高为 1~2 mm 的饼状形;

收稿日期: 2017-12-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) (2013CB328901); 国家自然科学基金 (11305177)

作者简介: 漆世锴, 男, 1987 年生, 博士生, 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, E-mail: kaishiqi@126.com

将饼块放入高温马弗炉中,在空气或者 CO₂ 气氛中进行烧结,烧结温度为 1450±50 °C,保温时间 2~4 h。然后,将烧结好的饼块放入玛瑙钵中进行研磨 2 h 以上,直至研磨到合适颗粒大小为止,获得 Y-Gd-Hf-O 活性物质。之后将该 Y-Gd-Hf-O 按一定质量分数掺杂金属 W 粉,并与质量分数为 1.5% 的硝棉溶液在玛瑙钵中研磨混合 1~2 h 直至均匀后,利用喷枪将溶液均匀喷涂在 W 带表面,然后将完成喷涂的 W 带放置于红外灯下烘烤,直至硝棉溶液完全蒸发,最后放入高温氢炉中在 1500±10 °C 下烧结 3~5 min 完成该直热式阴极的制备。如图 1 所示为该 Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基直热式阴极结构示意图。

图 2 为直热式阴极热发射及耐电子轰击特性测试装置结构示意图。由图可知,该装置由高真空接口、吸气剂、Ba-W 阴极、W 带阴极(Y-Gd-Hf-O 掺杂/浸渍 W 基直热式阴极)、Mo 片阳极及导电芯柱等部分组成。图中 Ba-W 阴极被用来作为电子轰击源,该阴极直径为 13 mm,阴极到 Mo 片阳极之间的距离小于 2 mm。W 带阴极长度约为 10 mm,宽度为 0.3 mm,位于 Ba-W 阴极和 Mo 片阳极之间。考虑到 W 带阴极的宽度和 Ba-W 阴极的直径相比可以忽略不计,因此不考虑 W 带阴极对阴阳极之间电场的影响。测试过程中将高真空接口接入真空系统中(由机械泵、分子泵、离子泵等组成),以此来保证测试时装置内部始终处于高真空环境下(优于 10⁻⁶ Pa)。测试完毕后,高真空接口将会被密封,吸气剂将继续用来维持装置内部的高真空度,以方便下一次重复实验。

热发射及耐电子轰击特性测试前,先将该装置在 500 °C 下保温 1~1.5 h,然后依次在 50、80 mA 高频电流下去气 5~10 min、2~5 min,然后对 Ba-W 阴极及 W 带阴极进行高温去气。最后,在真空度优于 10⁻⁶ Pa 时,分别对 Ba-W 阴极及 W 带阴极激活 0.5~1.5 h。经过上述步骤处理之后即可开始直热式阴极热发射及耐电子轰击特性测试。

图 3 为上述直热式阴极热发射及耐电子轰击特性测试装置等效电路示意图。当 W 带阴极热发射特性测试时,将 Ba-W 阴极作为接收热电子的阳极,利用光学温度计对 W 带阴极的工作温度进行测量,最终获得

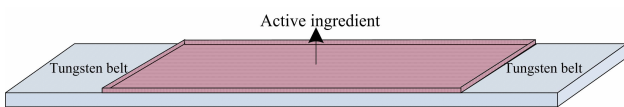


图 1 Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基直热式阴极结构示意图

Fig.1 Schematic of Y-Gd-Hf-O doped W base directly-heated cathode

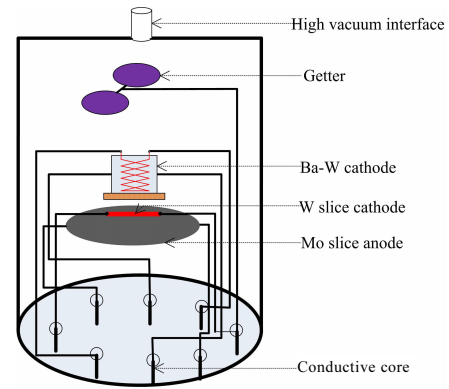


图 2 直热式阴极热发射及耐电子轰击特性测试装置结构示意图

Fig.2 Schematic of the vacuum diode system for thermionic emission and anti-electron-bombing testing

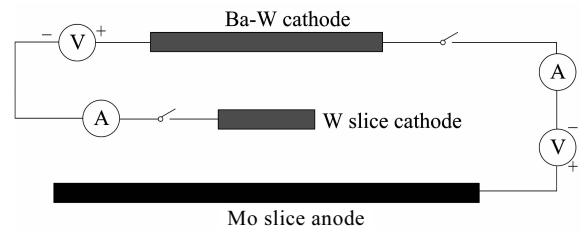


图 3 热发射及耐电子轰击测试装置等效电路示意图

Fig.3 Equivalent circuit schematic of the vacuum diode system for thermionic emission and anti-electron-bombing testing

不同温度下,W 带阴极热发射电流密度随阳极电压变化的关系。当 W 带阴极耐电子轰击特性测试时,为了尽可能的模拟大功率磁控管阴极真实的工作环境,将 W 带阴极加热到 1600 °C,以 Ba-W 阴极作为电子轰击源,即提供热电子发射的阴极,在 Mo 片阳极端加载高压,对 W 带阴极进行轰击。轰击一段时间后,将 W 带阴极恢复到热发射特性测试时的温度和阳极电压,对该阴极被电子轰击后的热发射特性进行测试。

直热式阴极耐电子轰击测试时,将 Ba-W 阴极的工作温度设置在 1100 °C,Mo 阳极片上的加载电压设置在 300 V 左右,实际得到 Ba-W 阴极的发射电流在 60 mA 左右,等效的电子轰击功率约为 14 W/cm²。

2 结果与讨论

2.1 Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极的热发射特性

图 4、5、6 分别为 50%、30%、10% Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极的伏安特性曲线。由图 4 可知,50%掺杂 W 基阴极在 1500 °C 时即能提供 1.0 A/cm² 的拐点电流密度^[7](偏离点电流密度),1600、1700、1800 °C

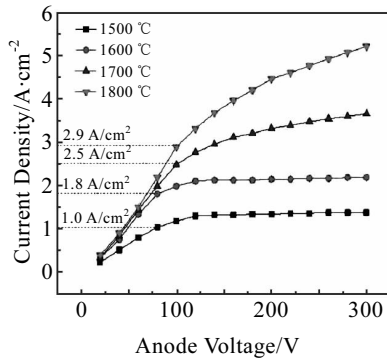


图 4 50% Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极伏安特性曲线

Fig.4 I-V curves of the 50% Y-Gd-Hf-O doped W base cathode

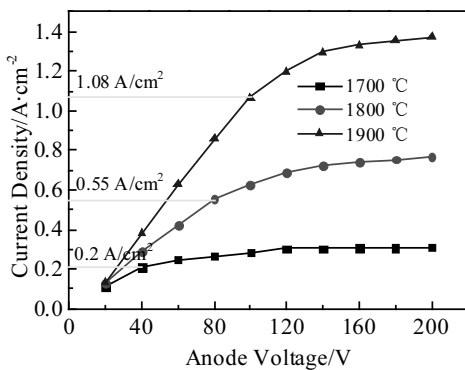


图 5 30% Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极伏安特性曲线

Fig.5 I-V curves of the 30% Y-Gd-Hf-O doped W base cathode

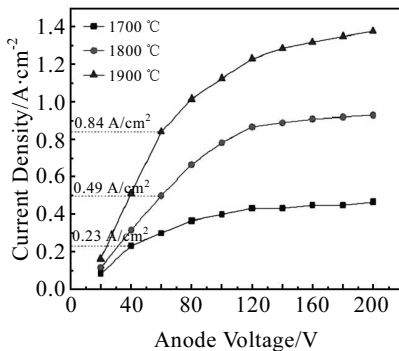


图 6 10% Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极伏安特性曲线

Fig.6 I-V curves of the 10% Y-Gd-Hf-O doped W base cathode

工作温度下,可以分别提供 1.8、2.5 及 2.9 A/cm² 的拐点电流密度。随着 Y-Gd-Hf-O 掺杂质量分数的下降,如图 5 所示,当工作温度为 1700、1800、1900 °C 时,30%掺杂 W 基阴极仅分别能够提供 0.2、0.55 及 1.08 A/cm² 的拐点电流密度。相比于 50%掺杂 W 基阴极,30%掺杂 W 基阴极热发射能力下降剧烈。如图 6 所示,当 Y-Gd-Hf-O 掺杂比下降到 10%时,在 1700、1800、1900 °C 工作温度下,该阴极分别仅能够提供 0.2、0.49

及 0.84 A/cm² 的拐点电流密度。本实验中测试获得的 Y-Gd-Hf-O 浸渍 W 基阴极的热发射性能数据与文献[6]中的结果相同,即该浸渍阴极在 1300、1400、1500、1600、1700 °C 时,分别可以提供超过 0.4、1.0、4.0、7.7 及 10.5 A/cm² 的热发射电流密度。

2.2 Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极耐电子轰击特性

在耐电子轰击实验前,分别将 50%、30%、10% Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极以及浸渍 W 基阴极维持在相同阳极电压下,通过调节阴极的工作温度,来保证各个阴极都工作在 1.5 A/cm² 的热发射电流密度下,以此作为未受电子轰击时阴极的初始热发射状态。耐电子轰击特性测试时,首先将上述阴极都加热到相同的 1600 °C,然后以 Ba-W 阴极作为电子轰击源,即提供热发射的阴极,Mo 片作为阳极,对 W 带阴极轰击一段时间。最后,将经过电子轰击后的 W 带阴极恢复到初始热发射状态,断开 Ba-W 阴极及 Mo 阳极电源,以常温下的 Ba-W 阴极作为收集 W 带阴极热发射电子的阳极,如图 3 所示。对此时 W 带阴极热发射测试结果进行记录,作为该阴极耐电子轰击性能的参考值。

图 7 为 50%、30%、10% Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极热发射电流密度随电子轰击时间关系曲线。由图可知,3 种阴极的热发射电流密度都随着电子轰击时间的增大在逐渐下降。经过 14 W/cm² 电子连续轰击 200 h 后,50% Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极的热发射电流密度从 1.5 A/cm² 下降并稳定至 1.0 A/cm²。当掺杂量下降至 30%时,该阴极的热发射电流密度从 1.5 A/cm² 下降并稳定至 1.3 A/cm²,相比于 50% Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极,该阴极在经过相同时间的电子轰击后,其热发射比前者下降的小。当掺杂量下降至 10%时,该阴极的热发射从 1.5 A/cm² 仅下降至 1.4 A/cm²。这说明随着掺杂 W 基阴极中 Y-Gd-Hf-O 含量的下降,金

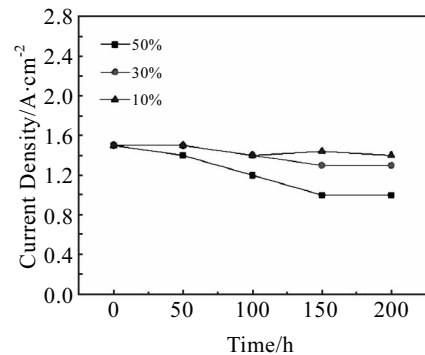


图 7 50%、30%、10% Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极热发射电流密度随电子轰击时间关系曲线

Fig.7 Current density curves as a function of bombing time of 50%, 30%, 10% Y-Gd-Hf-O doped W base cathode

属 W 元素含量的上升,在经过相同的电子轰击后, Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极的热发射下降的幅度越来越小,间接说明阴极的耐电子轰击性能提高了。

图 8 为 Y-Gd-Hf-O 浸渍 W 基阴极热发射电流密度随电子轰击时间关系曲线。由图可知,该浸渍 W 基阴极的热发射电流密度随着电子轰击时间的增大在逐渐下降。经过 14 W/cm^2 电子连续轰击 200 h 后,该浸渍 W 基阴极的热发射电流密度从 1.5 A/cm^2 快速下降并稳定至 0.4 A/cm^2 。相比于 Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极,该浸渍 W 基阴极在经过相同的电子轰击后,其热发射下降较严重。

2.3 Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极热发射及耐电子轰击特性机理探讨

本研究制备了大功率磁控管用 Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基直热式阴极,并在相同实验条件下制备 Y-Gd-Hf-O 浸渍 W 基阴极作为对比。对上述阴极的热发射和耐电子轰击特性分别进行了测试。实验结果显示, Y-Gd-Hf-O 浸渍 W 基阴极具有较大的热发射能力,但是该阴极在经过 14 W/cm^2 电子连续轰击 200 h 后,热发射电流密度从初始 1.5 A/cm^2 快速下降到 0.4 A/cm^2 ,且随着电子轰击时间的延长,热发射电流密度有进一步下降的趋势。相比于 Y-Gd-Hf-O 浸渍 W 基阴极, Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极的热发射性能差很多。如图 4、5、6 所示,随着 Y-Gd-Hf-O 掺杂比例的下降,金属 W 粉比例的上升,掺杂 W 基阴极的热发射性能还在不断下降。然而在该阴极热发射性能不断下降的同时,其耐电子轰击性能却在逐渐变好,如图 7 所示,当 Y-Gd-Hf-O 掺杂比为 50%、30%、10% 时,经过 14 W/cm^2 电子连续轰击 200 h 后,热发射电流密度分别仅下降了 0.5、0.2 及 0.1 A/cm^2 。

相比于 Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极, Y-Gd-Hf-O 浸

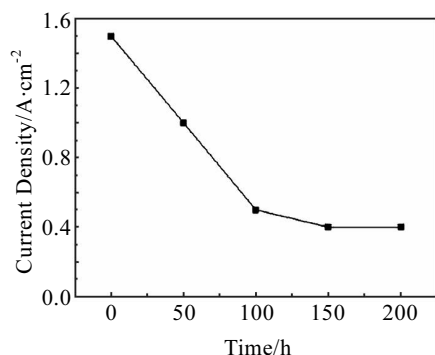


图 8 Y-Gd-Hf-O 浸渍 W 基阴极热发射电流密度随电子轰击时间关系曲线

Fig.8 Current density as a function of bombing time of Y-Gd-Hf-O impregnated W base cathode

渍 W 基阴极的耐电子轰击性能较差,这是因为 Y-Gd-Hf-O 浸渍 W 基阴极的表面主要由 Y-Gd-Hf-O 活性物质组成,在电子轰击下,阴极正常工作时表面化学状态被破坏,热发射性能随之下降严重。文献[8]中为了提高 Ba-W 阴极的耐电子轰击性能,在阴极表面覆上了一层高逸出功多元金属 W/Os/Ru 薄膜,获得了较好的耐电子轰击效果。但是若在阴极表面覆上的高逸出功金属薄膜较厚,虽然能够提高阴极的耐电子轰击性能,但是也会抑制该阴极的热发射。文献[9]中为了抑制含钨扩散阴极圆形区域外的热电子发射,在圆形区域外覆上了较厚的金属 Zr/W 的双层薄膜。实验结果显示覆有 Zr/W 双层薄膜区域的热发射保持在很低的发射水平,而未覆膜区域在 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 的工作温度下,圆形发射区域可以提供 50 A/cm^2 以上的空间电荷限制区电流密度^[1],并稳定工作 1000 h 以上。当在含钨扩散阴极表面覆上 Zr/W 双层薄膜后,其表面形成一种负电性在外的反向偶极子结构^[10],间接增大了阴极表面的逸出功,从而抑制了该阴极的热发射。

本实验制备的 Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极,相当于在该阴极表面上间接覆上金属 W 保护膜,该金属 W 保护膜在阴极表面形成了负电性朝外的反向偶极子结构,结果间接增大了阴极表面的逸出功,从而抑制了该阴极的热发射。当电子轰击该阴极表面时,在未覆有金属 W 保护膜或者保护膜较薄的地方,其表面的化学状态就可能遭到破坏,而有覆膜区域的化学状态就会相对较稳定些。

当 Y-Gd-Hf-O 掺杂含量较低,即金属 W 元素含量较高时,覆在 Y-Gd-Hf-O 浸渍 W 基阴极表面的金属 W 保护膜的面积会较大,虽然这时阴极的热发射会下降较大,但是其耐电子轰击性能却较好。随着 Y-Gd-Hf-O 掺杂含量的升高,即金属 W 元素含量较低时,覆在浸渍 W 基阴极上的金属 W 保护膜面积会相应地下降,此时阴极的热发射会逐渐增大,但是其耐电子轰击性能却会逐渐变差。

本实验中制备的 Y-Gd-Hf-O 浸渍 W 基阴极,活性物质中金属 W 元素含量为零,即相当于完全剥离掉掺杂 W 基阴极表面的金属 W 保护膜,此时浸渍 W 基阴极的热发射达到最大,但是其耐电子轰击性能也会变得最差。由上述实验结果可知,虽然 Y-Gd-Hf-O 浸渍 W 基直热式阴极在 $1700\text{ }^\circ\text{C}$ 工作温度下可以提供超过 10.5 A/cm^2 的热发射电流密度,但是该阴极在经过 14 W/cm^2 电子连续轰击 200 h 后,热发射电流密度由初始 1.5 A/cm^2 快速下降至 0.4 A/cm^2 ,相比于 Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极,该阴极热发射下降幅度最大,实验结果证实了上述的分析。

3 结 论

1) 当 Y-Gd-Hf-O 掺杂质量分数为 50% 时, 该直热式阴极在 1500、1600、1700、1800 °C 温度下分别可以提供 1.0、1.8、2.5 及 2.9 A/cm² 的拐点发射电流密度。而当 Y-Gd-Hf-O 掺杂比下降为 30%、10% 时, 该阴极在 1900 °C 工作温度下仅分别能够提供 1.08、0.84 A/cm² 的拐点发射电流密度。

2) 在经过相同功率电子连续轰击相同时间后, Y-Gd-Hf-O 浸渍 W 基阴极的热发射电流密度从初始 1.5 A/cm² 下降并稳定至 0.4 A/cm²。而 50%、30%、10% Y-Gd-Hf-O 掺杂 W 基阴极的热发射电流密度从初始 1.5 A/cm² 分别下降并稳定至 1.0、1.3、1.4 A/cm²。这间接说明随着阴极中 Y-Gd-Hf-O 含量的下降, 金属 W 元素含量的升高, 阴极的耐电子轰击性能在逐渐提高。

3) 随着 Y-Gd-Hf-O 掺杂质量分数的降低, 该掺杂 W 基阴极的热发射性能虽然在逐渐下降, 但是其耐电子轰击性能却在逐渐变好。这是因为覆在阴极表面上的金属 W 保护膜形成一种负电性在外的反向偶极子结构, 随着 Y-Gd-Hf-O 掺杂含量的降低, 金属 W 元素含量的升高, 覆盖在阴极表面的金属 W 保护膜面积也在增大, 使得该阴极表面的逸出功升高了, 从而抑制了该阴极的热发射。与此同时, 也正是由于该金属 W 保护膜的作用, 使得阴极表面化学状态变得稳定了, 从而提高了该阴极的耐电子轰击性能。

参考文献 References

- [1] Liu Xueque(刘学恣). *Cathode Electronics*(阴极电子学)[M]. Beijing: Science Press, 1980: 28, 45
- [2] Bruining D H. *Physics and Application of Secondary Electron Emission*[M]. Oxford: Pergamon Press LTD, 1954: 88
- [3] Electronic Tube Design Handbook Editorial Committee(电子管设计手册编辑委员会). *Magnetron Design Handbook*(磁控管设计手册)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1979: 211
- [4] Wang J S, Zhou M L, Ma S Y *et al.* *J Alloy Compd*[J], 2006, 419(1-2): 172
- [5] Wang Jinshu(王金淑), Liu Wei(刘伟), Cui Yuntao(崔云涛) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(12): 2191
- [6] Qi Shikai(漆世锴), Wang Xiaoxia(王小霞), Luo Jirun(罗积润) *et al.* *Acta Physica Sinica*(物理学报)[J], 2016, 65(5): 057 901
- [7] Wang X X, Liu Y W, Luo J R *et al.* *IEEE Trans Electron Devices*[J], 2014, 61(2): 605
- [8] Swartzentruber P D. *Microstructure and Work-function of Dispenser Cathode Coatings: Effects on Thermionic Emission* [D]. Kentucky: University of Kentucky, 2014
- [9] Liang Wenlong(梁文龙), Wang Yiman(王亦曼), Liu Wei(刘伟) *et al.* *Acta Physica Sinica*(物理学报)[J], 2014, 63(5): 057 901
- [10] Melngailis J. *J Vac Sci Technol B*[J], 1987, 5(2): 469

Thermionic Emission and Anti-electron-bombing Characteristics of the Y₂O₃-Gd₂O₃-HfO₂ Doped W Base Direct-heated Cathode

Qi Shikai^{1,2}, Wang Xiaoxia¹, Luo Jirun¹, Hu Mingwei^{1,2}, Li Yun¹

(1. Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve the anti-electron-bombing performance of the cathode applied in high-power magnetron tube, a method of Y₂O₃-Gd₂O₃-HfO₂ (Y-Gd-Hf-O) doped metallic W powders was used to prepare direct-heated cathode. The thermionic emission and anti-electron-bombing characteristics of Y-Gd-Hf-O doped cathode with different mass fractions were investigated. Experimental results show that the 50% Y-Gd-Hf-O doped cathode has large thermionic emission performance, which can provide 1.0 A/cm² knee-point emitted current at 1500 °C. The 10% Y-Gd-Hf-O doped cathode has good anti-electron-bombing capability, whose thermionic emission current density has merely fallen by 0.1 A/cm² after 200 h continuous 14 W/cm² electron bombing. At last, the thermionic emission and anti-electron-bombing mechanisms of the Y-Gd-Hf-O doped cathode were discussed reasonably.

Key words: directly-heated cathode; magnetron; thermionic emission; anti-electron-bombing; emission mechanism

Corresponding author: Qi Shikai, Candidate for Ph. D, Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P. R. China, E-mail: kaishiqi@126.com