

一种Sc₂O₃掺杂Y-Gd-Hf-O压制式直热式阴极发射特性研究

王兴起^{*①③} 王小霞^① 罗积润^{①③} 漆世锴^② 李云^①

^①(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100190)

^②(九江学院电子工程学院 九江 332005)

^③(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 为了提高Y-Gd-Hf-O阴极耐电子轰击能力, 该文通过高能球磨、压制和高温氢气烧结, 制备了一种Sc₂O₃掺杂Y-Gd-Hf-O压制式直热式阴极。该阴极在1550 °C工作温度下, 经过10 W电子连续轰击480 h后, 发射电流密度下降至初始值的87.5%, 表现出良好的耐电子轰击能力。阴极表面的微观形貌、成分组成分析表明, 压制后氢气气氛烧结, 阴极表面呈陶瓷状结构形态, 有利于提高阴极的耐电子轰击能力; 经高温烧结、激活后表面形成了n型半导体Y₂O_{3-x}层, 对改善阴极表面导电性、降低逸出功和提高热发射有促进作用。

关键词: 阴极热发射; 磁控管; 逸出功; 耐电子轰击

中图分类号: O462.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)04-1382-06

DOI: 10.11999/JEIT210111

Investigation on Thermionic Emission Characteristics of Pressed Sc₂O₃ Doped Y-Gd-Hf-O Directly-heated Cathode

WANG Xingqi^{①③} WANG Xiaoxia^① LUO Jirun^{①③} QI Shikai^② LI Yun^①

^①(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(School of Electronic Engineering, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China)

^③(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To improve the Y-Gd-Hf-O cathodes anti-electron bombardment ability, a scandia doped cathode is prepared by a pressing technique combined with sintering in hydrogen atmosphere. The tested result shows that the emitting current from the cathode operating at 1550 °C can remain to 87.5% of the initial one after continuous electron bombardment of 10 W for 480 h, reflecting a better anti-electron bombardment capability. The surface microstructure analysis result indicates that a cermet structure has been formed. A n-type semiconductor Y₂O_{3-x} layer has generated on the cathode surface after being sintered and activated at high temperature, which is favorable for enhancing the thermionic emission, improving the surface conductivity, and lowering the work function.

Key words: Cathode thermionic emission; Magnetron; Work function; Anti-bombing

1 引言

磁控管作为一种重要的微波电真空器件, 输出功率大, 体积小, 成本低, 是目前效率最高的大功率电子器件^[1]。发展到现在, 磁控管应用范围已经从导航、雷达等军事领域逐步扩展到医用、杀菌、微波加热等民用领域。阴极作为磁控管的“心

脏”, 工作环境恶劣, 存在着许多阴极发射降低的机制。正常工作时阴极发射出去的一部分电子在偏转磁场作用下返回阴极表面, 造成对阴极的回轰, 使其过热发射不稳定, 寿命大大缩短。随着磁控管向着高功率、高频率工作模式及长寿命方向的发展, 提高阴极的热发射性能与热效率, 增强阴极的耐电子轰击能力, 延长其使用寿命, 是磁控管阴极亟待解决的关键问题之一。

目前, 中小功率磁控管中主要使用氧化物阴极和钡钨阴极^[2], 氧化物阴极具有较大的热电子发射能力和良好的工作稳定性, 且工作温度低。然而, 由于其热阻效应, 且在正常工作时发射出去电子

收稿日期: 2021-02-01; 改回日期: 2021-07-01; 网络出版: 2021-08-24

*通信作者: 王兴起 15650703108@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61771454)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61771454)

对阴极进行回轰,使阴极过热,加速表面活性物质的分解与蒸散,难以长时间保持最佳活性状态,寿命大大缩短,限制了在大功率、高温环境中工作^[3];钽-钨阴极在工作中同样受电子的不断回轰,表层的BaO-Ba层在很短的时间内被溅射掉,活性层得到补充前阴极长时间处于去激活状态^[4]。在大功率连续波磁控管中,主要使用纯钨阴极及其合金阴极、碳化钽-钨阴极等。合金阴极工作温度往往超过1800 °C,导致热效率较低^[5];碳化钽钨阴极,不仅含有放射性元素钽,且碳化工艺复杂,也一定程度限制了其大规模应用^[6]。

针对上述阴极存在的问题,为了提高磁控管的输出功率,延长使用寿命,文献^[7]通过改进磁控管能量输出器和纯钨阴极的结构,使2450 MHz的连续波磁控管单管输出功率可达30 kW。文献^[8]通过改进钽-钨阴极的碳化工艺,使2 kW连续波磁控管平均使用寿命超过6000 h。文献^[9]报道的 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 多元稀土复合金属陶瓷阴极,在1100 °C下经过1000 h连续电子轰击后,次级电子发射系数从初始的3.35下降并稳定保持在2.5,表现出良好的耐电子轰击性能。

本文作者实验室在2016年首次提出Y-Gd-Hf-O稀土金属氧化物作为活性物质浸渍W基直热式阴极,阴极在1500 °C下能够提供4.0 A/cm²的饱和发射电流密度^[10];为了进一步提高该阴极的次级电子发射能力和耐电子轰击性能,通过在上述活性物质中分别掺杂20%的铼和钨后,阴极次级电子发射系数分别提高到2.76和3.06^[11];为了提高阴极的热发射性能,在此基础上掺杂重量比为5%的 Sc_2O_3 ,制备的热阴极在1500 °C下能够提供5.3 A/cm²的饱和发射电流密度^[12]。

为了进一步提高 Sc_2O_3 掺杂Y-Gd-Hf-O浸渍阴极的耐电子轰击能力,延长使用寿命,本文通过改进阴极制备工艺,对含有活性物质的阴极采用常温压制后,经过高温氢炉烧结,制备 Sc_2O_3 掺杂Y-Gd-Hf-O压制式直热式阴极,并对其热发射特性、耐电子轰击性能及其发射机理进行研究。

2 试样制备与性能测试

2.1 Sc_2O_3 掺杂Y-Gd-Hf-O直热式阴极制备

(1) Y-Gd-Hf-O前驱体制备。将纯度为99.99%、平均粒径2~10 μm的稀土氧化物 Y_2O_3 , Gd_2O_3 , HfO_2 按摩尔百分比45%~50%, 5%~10%, 45%~50%混合后,加入2/3体积的无水乙醇进行高能球磨100 h以上,然后将混合均匀的悬浊液烘干后,得到的混合粉末在油压机上以200 MPa的压力压制成2 mm×φ10 mm的饼状,然后在大气气氛

中1350~1450 °C烧结2~4 h。最后将烧结好的饼状物充分地研磨得到发射活性物质前驱体(Y-Gd-Hf-O)。

(2) 发射活性物质的制备。称取一定量制备好的发射活性物质前驱体Y-Gd-Hf-O,按重量比5%加入纯度为99.99%、平均粒径为2~3 μm的 Sc_2O_3 粉末,进行充分的研磨,得到 Sc_2O_3 掺杂Y-Gd-Hf-O发射活性物质。

(3) Sc_2O_3 掺杂Y-Gd-Hf-O压制式阴极制备。选取纯度为99.99%、平均粒径为1~3 μm的钨粉,与有机粘结剂充分混合成悬浊浆料,均匀涂敷在 $d \times h$ (0.3 mm×0.2 mm)钨-铼带基底表面。随后将阴极基底在氢炉中1200 °C高温烧结10~15 min,完成钨海绵的制备,以增加活性物质对基底的附着。采用特定的模具将发射活性物质压制在含有多孔钨海绵的钨-铼基底上,再次在氢气气氛中1300 °C高温烧结3~5 min(预处理),完成压制式 Sc_2O_3 掺杂Y-Gd-Hf-O压制式直热式阴极的制备,其示意结构如图1所示。



图1 Y-Gd-Hf-O压制式直热式阴极示意图

2.2 Sc_2O_3 掺杂Y-Gd-Hf-O压制式阴极性能测试

图2为直热式阴极热性能测试二极管装置结构示意图。由图可知,该装置由吸气剂、钽-钨阴极、钨-铼带阴极、钼片阳极、导电芯柱以及其他支撑部件组成。在进行耐电子轰击测试时,钽-钨阴极作为轰击源的电极,为待测阴极提供持续轰击的电子束;在进行热发射测试过程中作为阳极接收来自待测阴极发射的电子;钨-铼带阴极到钼片与钽-钨阴极距离控制在2 mm左右。考虑到实验阴极的宽度,近似忽略其对轰击电场的影响。在进行测试前,对阴极进行加热去气、激活、老炼等一系列

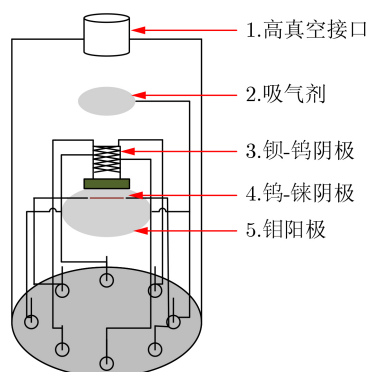


图2 阴极热发射测试二极管结构示意图

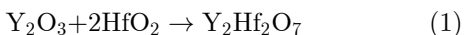
工序,使阴极处于最佳活性状态。整个测试过程中都保持在 10^{-6} Pa高真空状态。

采用国家能谱中心Smart-lab高功率转靶多晶型X射线衍射仪(X-Ray Diffraction, XRD)对制备的活性物质进行物象结构分析,采用JSM-6510型扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)对样品进行显微形貌分析。热电子发射测试在自行设计的二极管排气系统中进行,阴极发射端面温度用KELLER PV11光学高温计测量。

3 实验结果与讨论

3.1 Sc₂O₃掺杂Y-Gd-Hf-O压制式阴极物象形貌分析

图3是阴极发射活性物质经压制、高温预处理前后的XRD结果图谱。由图可知,活性物质主要包含Y₂O₃和Y₂Hf₂O₇等。其中Y₂Hf₂O₇的形成是在前驱体制备过程中,稀土氧化物Y₂O₃和HfO₂在高温下发生式(1)反应



而且可以发现,经高温预处理后(图3(b)),各活性物质衍射峰强度变大,峰形尖锐且窄,表明高温氢炉烧结有利于晶粒发育,增加结晶度。

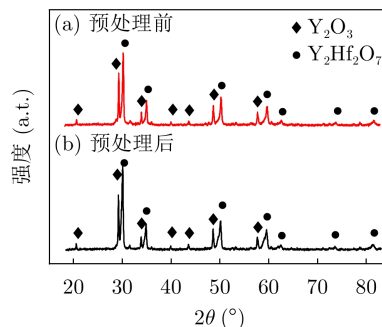


图3 阴极发射活性物XRD图

图4是阴极预处理前后的表面形貌图。预处理前(图4(a))稀土氧化物形态为大小均匀的球形颗粒,有利于粉末颗粒的密实烧结。压制后经高温预处理,发射端面更加平整、密实,阴极表面孔洞减少,致密程度更高,这种陶瓷状结构有利于提高阴极的耐电子轰击能力,如图4(b)所示。此外,可以发现经过预处理后,晶粒尺寸更加细小,粒径在0.3~1.2 μm,呈亚微米级,孔洞分布均匀,孔隙结构良好(图4(c)),不仅为阴极激活和热发射过程中活性物质的传输与补充提供了通道,同时增加阴极的电导率,也有利于提高发射均匀性。

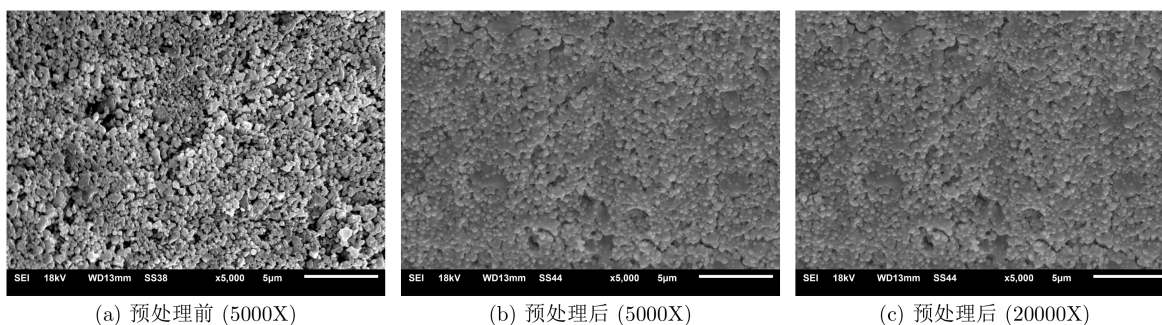


图4 阴极预处理前后表面微观形貌SEM

表1是对阴极预处理前后不同区域的元素EDS(Energy Dispersive Spectrometer)分析结果。预处理前后阴极表面Y, Gd, Hf, Sc等稀土原子分布相对均匀,且经过预处理后,元素Hf和Sc含量上升,元素Y和Gd一定程度地降低。

表1 阴极氢炉烧结前后EDS原子含量(%)

元素	烧结前		烧结后	
	区域A	区域B	区域A	区域B
Y	24.08	24.39	23.23	23.99
Gd	3.22	2.94	2.96	2.95
Hf	14.51	14.46	14.80	15.38
Sc	5.08	5.07	5.44	5.36
O	53.11	53.13	53.57	52.32

3.2 阴极热发射性能测试

(1)阴极热发射特性测试。图5(a)是Sc₂O₃掺杂Y-Gd-Hf-O压制式阴极在不同温度下的热发射伏安特性曲线(I-V曲线)。由图可知,当阴极温度为1250, 1300, 1350, 1400, 1450, 1500, 1550, 1600 °C时,阴极的饱和发射电流密度J_e分别为0.28, 0.48, 0.64, 0.88, 1.2, 1.6, 2.08, 2.56 A/cm²。考虑到实验装置中阳极热容量问题,没有施加更大的加速电压,将阳极电压限制在300 V之内。

(2)阴极的逸出功。图5(b)为阴极不同温度下的lg J_e-U^{1/2}曲线。根据Schottky公式: lg j_e = lg j₀ + 0.191√α√U/T,当阴极的温度为1400, 1450, 1500, 1550 °C时,求得的零场电流密度分别为0.41, 0.45, 0.49, 0.59 A/cm²。利用Richard直线法,将上述零

场电流密度代入公式： $\lg(j_0/T^2) = \lg A_0 - 5040\phi/T$ ，由直线斜率计算得到热力学零度逸出功为1.28 eV，且拟合直线与Richard直线基本平行，如图6所示。利用Richard发射方程 $j_e = AT^2e^{-\phi/KT}$ ，计算得到该阴极在1400, 1450, 1500, 1550 °C下的有效逸出功分别为2.82, 2.89, 2.94, 2.99 eV。纯钨阴极工作温度通常高于2500 K，逸出功高达4.52 eV，在2400 K发射电流密度仅约为1 A/cm²[13]，相比于纯钨阴极，该压制式阴极在1450 °C就可以提供1.2 A/cm²的热发射电流密度，工作温度不仅可以降低770 K，且有效逸出功降低至2.89 eV。

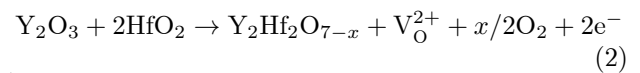
(3)阴极耐电子轰击性能测试。图7是Sc₂O₃掺杂Y-Gd-Hf-O压制式热阴极发射电流密度随电子轰击时间的变化曲线。实验中将阴极加热到1550 °C，在10 W连续电子轰击下，阴极工作288 h时，下降到初始电流密度值的93.75%，在经过480 h后，发射电流仍能够保持在原来的87.5%。而未掺杂的普通浸渍型Y-Gd-Hf-O阴极经过200 h电子连续轰击后发射电流密度下降至初始值的26.7%^[10]。相比之下，本文制备的压制式阴极的耐电子轰击能力有大幅度的提高。

4 Sc₂O₃掺杂Y-Gd-Hf-O压制式直热式阴极热电子发射机理探讨

本实验对制备的Sc₂O₃掺杂Y-Gd-Hf-O压制式

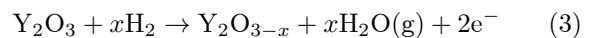
直热式阴极热发射性能和耐电子轰击能力进行了研究，并对其机理进行了如下探讨：

(1)根据发射活性物质XRD结构分析，在高温烧结过程中，混合物Y₂O₃和HfO₂按式(1)发生反应，生成一定量的Y₂Hf₂O₇。由此可知Y₂Hf₂O₇是阴极主要发射活性物之一。根据文献[14]报道，结合XRD图谱的分析，掺杂的发射活性物质在高温烧结过程中，发生如式(2)反应



在高温烧结过程中，Y₂O₃与HfO₂发生离子置换反应，HfO₂中的两个Hf²⁺被两个Y³⁺置换，为保持晶体结构呈电中性，晶格中会产生一个氧空位V_O²⁺，相应的产生两个自由电子，如果自由电子不在氧空位上，则V_O²⁺会显示正电性，使发射活性物的表层与基底之间形成电位差，降低了电子发射的内逸出功，加速了基底电子向阴极表面电子空穴补充。该种结构可以缩短阴极在真空环境中的激活时间，因为阴极表面已经存在一定含量的自由电子e⁻，在加速电场的作用下，促进了热电子发射。

阴极的高温预处理也可以产生一定含量的n型半导体Y₂O_{3-x}，如式(3)所示



相比于未经过预处理的阴极，经过高温氢气烧

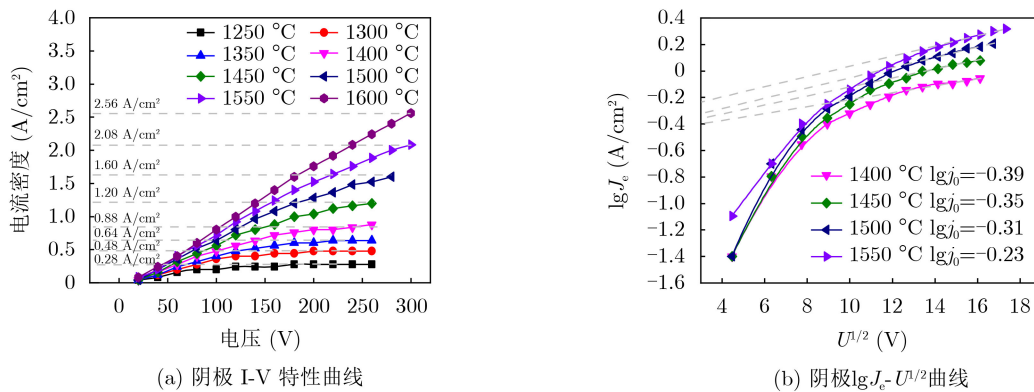


图5 阴极热发射性能曲线

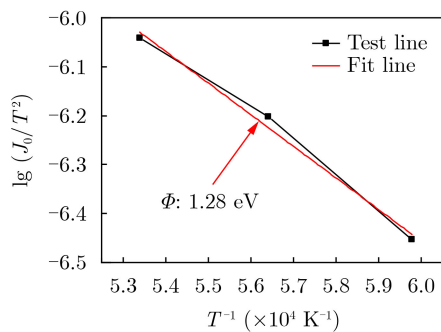


图6 Richard 曲线

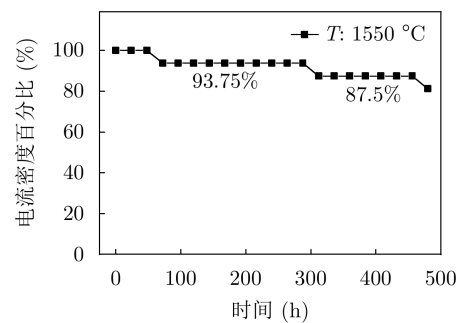
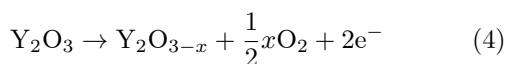


图7 阴极耐电子轰击测试曲线

结后,部分稀土氧化物 Y_2O_3 发生还原反应生成缺氧型半导体 Y_2O_{3-x} 。此外,阴极高温真空激活、老炼过程中,还存在式(4)的化学反应过程



表明直热式阴极在高温真空激活过程中,活性物质 Y_2O_3 丢失了较多的晶格氧,生成n型半导体 Y_2O_{3-x} ,产生的 O_2 在真空条件下于阴极表面耗散掉。

因此,高温氢气预处理和高温真空激活都可以产生n型半导体 Y_2O_{3-x} ,为了在阴极中得到一定数量的 Y_2O_{3-x} ,需要在高于实际工作的温度下激活。式(2)~式(4)的反应共同促进了半导体阴极 Y_2O_{3-x} 含量的增加,当阴极在激活、老炼、热发射测试过程中,会加速 V_O^{2+} 的形成,增加了自由电子的数量, V_O^{2+} 数量的增加会相应的加速电子的传输,提升了阴极的电导率,有利于阴极的热电子发射。

(2)SEM结果显示,经过预处理后,掺杂稀土原子微观尺寸减小,呈亚微米级,表现出良好的微观结构。经分析是由于在高温氢炉烧结过程中,稀土氧化物原子再结晶过程受到 Sc_2O_3 原子的钉扎作用,阻止了其晶粒的长大,导致各稀土原子晶粒尺寸减小,微小孔隙数量增加,有利于阴极表面发射活性物质的补充^[15]。

对于相比于普通的未掺杂 Sc_2O_3 的阴极发射性能较好,分析可能是当 Sc_2O_3 掺杂在涂层中时,同一族的相邻的、具有相似理化特性的铈和钇原子形成固溶体,产生的固溶体由于晶格失配产生的畸变能使阴极处于高能级的活化状态,加速式(4)化学反应的进行,提升了热发射性能。此外,处于同一族的钇原子比铈原子金属性更强,反应式(2)~式(4)生成的自由电子更容易被 Sc^{3+} 吸附,在阴极体内形成铈原子。由于内外原子化学势的差,内部的铈原子扩散到阴极表面,使阴极表面铈原子浓度增加,钇原子浓度降低,与EDS结果分析吻合。

(3)阴极经过高温氢炉烧结后,阴极表面呈现出密实、平整的金属陶瓷相结构,分析表明是由于多孔的混合压坯烧结时发生收缩,致密程度增加,同时发生形核再结晶等一系列物理、化学变化以及晶粒再结晶变化^[16]。

本实验采用压制结合高温烧结得到的阴极,相比于普通浸渍式阴极或涂敷式阴极,在高温烧结过程中,原来以点接触形式存在的、熔点较高的氧化物颗粒发生固相烧结,使固相组织之间发生一定的颗粒重排。颗粒在烧结过程中形成烧结颈的同时,涂层材料中残存的孔隙发生球化,连通的孔隙不断的消失,闭孔不断的收缩,孔隙率明显降低,涂层

致密度增加,原来疏松多孔结构中的涂层颗粒由点接触连接转变为化学键连接,反应形成的硬质相互连接更加紧密,结合强度更高,在真空中电子和离子的轰击下,半陶瓷状涂层不易被剥离,而且降低了高温时表层活性物质的蒸发率,相应地提高阴极的耐电子轰击性能。因此在10 W电子连续轰击480 h后,该压制式阴极仍能保持初始发射电流的87.5%,相比于其他类型的多元稀土化合物掺杂阴极在同等工作条件下延长了使用寿命。

5 结束语

本文研究了一种 Sc_2O_3 掺杂Y-Gd-Hf-O压制式直热式阴极的热发射性能,得到以下结论:

(1)为了提高 Sc_2O_3 掺杂Y-Gd-Hf-O阴极耐电子轰击能力,在保证热发射性能的前提下,首次采用压制后高温氢炉烧结方式制备阴极。利用XRD对发射活性物质进行物象结构研究,同时利用SEM,EDS对阴极表面的微观形貌、元素成分及含量进行了研究。结果表明,经过高温预处理,阴极发射端面更加平整、密实,而且发射活性物质晶粒更细小,分布更加均匀,提升了耐电子轰击能力。此外,经高温烧结,增加了发射活性物质的含量,氧空位增加,相应的产生更多的电子,合成氧化物释放出更多游离的Sc,促进了n型半导体 Y_2O_{3-x} 的生成,进一步使涂层电导率增加,提升了阴极的热发射性能。

(2)阴极的热发射性能测试显示,该阴极在1400, 1450, 1500, 1550 °C的高温工作条件下,能够提供0.88, 1.2, 2.08, 2.56 A/cm²的发射电流密度。利用Richard直线法求得该阴极的热力学零逸出功为1.28 eV,利用Richard发射方程得到该阴极在1400, 1450, 1500, 1550 °C温度下的零场发射有效逸出功分别为2.82, 2.89, 2.94, 2.99 eV,较低的功函数进一步说明该阴极具有较好的热发射能力。

(3)最后,对阴极耐电子轰击特性进行研究,测试结果显示,该阴极在1550 °C,轰击功率10 W的条件下,经过480 h电子连续轰击后,发射电流密度保持为初始值的87.5%,依然能够提供满足要求的热发射电流密度,表现出良好的耐电子轰击能力。

参考文献

- [1] ZHANG Xiaoke, HUA Yazhou, WANG Jinshu, *et al.* Studies of the influence of ZrH₂ addition to the impregnant on the performance of yttrium oxide-tungsten matrix Ba dispenser cathodes[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, 68(2): 829-834. doi: 10.1109/TED.2020.3045385.

- [2] WANG Xiaoxia, WANG Xingqi, ZHAO Qinglan, *et al.* Research progress in new types of thermionic cathodes[C]. 13th IVESC, Bad Honnef, Germany, 2020: 18.
- [3] ROQUAIS J M and WIERSCHKE D J. Oxide cathode for electron gun with a differentially doped metallic substrate[P]. USA Patent, 522115, 2006.
- [4] GALLAGHER H E and KNAUER W. Thermionic emission cathode having reduced frontal area and enlarged emission area for ion bombardment environment[P]. USA Patent, 3439210DA, 1969.
- [5] KIRKWOOD D M, GROSS S J, BALK T J, *et al.* Frontiers in thermionic cathode research[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(6): 2061–2071. doi: [10.1109/TED.2018.2804484](https://doi.org/10.1109/TED.2018.2804484).
- [6] 毕建明. W-Y₂O₃金属陶瓷阴极的二次发射[J]. 电子与信息学报, 1982, 4(2): 132–136.
BI Jianming. Some secondary emission properties of W-Y₂O₃ cermet cathode[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 1982, 4(2): 132–136.
- [7] 朱程, 杨金生, 李会成, 等. 30 kW连续波磁控管的研制[J]. 真空电子技术, 2013(5): 110–111. doi: [10.3969/j.issn.1002-8935.2013.05.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-8935.2013.05.030).
ZHU Cheng, YANG Jinsheng, LI Huicheng, *et al.* Development of 30 kW continuous wave magnetron[J]. *Vacuum Electronics*, 2013(5): 110–111. doi: [10.3969/j.issn.1002-8935.2013.05.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-8935.2013.05.030).
- [8] 孙陵斌. 2 kW连续波磁控管阴极寿命的研究[J]. 真空电子技术, 2020(2): 51–53. doi: [10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2020.02.12](https://doi.org/10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2020.02.12).
SUN Lingbin. Study on cathode lifetime of a 2 kW continuous wave magnetron[J]. *Vacuum Electronics*, 2020(2): 51–53. doi: [10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2020.02.12](https://doi.org/10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2020.02.12).
- [9] WANG Jinshu, ZHOU Meiling, MA Shuyun, *et al.* A study on the anti-electron-bombing life of La₂O₃-Y₂O₃-Mo cermet cathode materials[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 419(1/2): 172–175. doi: [10.1016/j.jallcom.2005.06.086](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.06.086).
- [10] 漆世锴, 王小霞, 罗积润, 等. Y₂O₃-Gd₂O₃-HfO₂掺杂W基直热式阴极的热发射及耐电子轰击特性[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(12): 3784–3788.
QI Shikai, WANG Xiaoxia, LUO Jirun, *et al.* Thermionic emission and anti-electron-bombing characteristics of the Y₂O₃-Gd₂O₃-HfO₂ doped W base direct-heated cathode[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(12): 3784–3788.
- [11] 蒋鹏宇, 王小霞, 罗积润, 等. Y₂O₃-Gd₂O₃-HfO₂浸渍W基直热式阴极次级电子发射的测试[J]. 微波学报, 2017, 33(S1): 250–253.
JIANG Pengyu, WANG Xiaoxia, LUO Jirun, *et al.* Secondary electron emission of Y₂O₃-Gd₂O₃-HfO₂ impregnated W base directly-heated cathode[J]. *Journal of Microwaves*, 2017, 33(S1): 250–253.
- [12] 陈晓倩, 王小霞, 张兆传, 等. Sc₂O₃掺杂对Y₂O₃-Gd₂O₃-HfO₂难熔稀土氧化物直热式阴极热发射性能的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(2): 131–135. doi: [10.13922/j.cnki.cjovst.2019.02.07](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.2019.02.07).
CHEN Xiaoqian, WANG Xiaoxia, ZHANG Zhaochuan, *et al.* Effect of Sc₂O₃-doping on thermal emission properties of Y₂O₃-Gd₂O₃-HfO₂ thermal cathode[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2019, 39(2): 131–135. doi: [10.13922/j.cnki.cjovst.2019.02.07](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.2019.02.07).
- [13] 郭艳群, 聂祚仁, 席晓丽, 等. 钨热电子发射材料的研究进展[J]. 稀有金属, 2005, 29(2): 200–205. doi: [10.3969/j.issn.0258-7076.2005.02.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-7076.2005.02.016).
GUO Yanqun, NIE Zuoren, XI Xiaoli, *et al.* Advances in research on tungsten cathode materials[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2005, 29(2): 200–205. doi: [10.3969/j.issn.0258-7076.2005.02.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-7076.2005.02.016).
- [14] 漆世锴, 王小霞, 王兴起, 等. 大功率磁控管用新型Y₂Hf₂O₇陶瓷阴极研究[J]. 物理学报, 2020, 69(3): 037901. doi: [10.7498/aps.69.20191496](https://doi.org/10.7498/aps.69.20191496).
QI Shikai, WANG Xiaoxia, WANG Xingqi, *et al.* A novel Y₂Hf₂O₇ ceramic cathode applied to high power magnetron tube[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(3): 037901. doi: [10.7498/aps.69.20191496](https://doi.org/10.7498/aps.69.20191496).
- [15] CUI Yuntao, WANG Jinshu, LIU Wei, *et al.* Effect of Scandia on tungsten oxide powder reduction process[J]. *Journal of Rare Earths*, 2010, 28(S1): 202–205. doi: [10.1016/S1002-0721\(10\)60274-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60274-8).
- [16] 赖陈, 王金淑, 周帆, 等. 新型钨铼混合基阴极的热电子发射性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(7): 1871–1875.
LAI Chen, WANG Jinshu, ZHOU Fan, *et al.* Thermal electron emission properties of novel W-Re mixed matrix cathodes[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(7): 1871–1875.
- 王兴起: 男, 1993年生, 博士生, 研究方向为阴极电子学、新型热阴极电子发射材料。
王小霞: 女, 1976年生, 研究员, 研究方向为阴极电子学理论与技术、真空电子器件新型功能材料的开发与研制。
罗积润: 男, 1957年生, 研究员, 研究方向为大功率速调管、行波管和回旋管放大器的研制、微波毫米波材料的加工、微波能量的应用。
漆世锴: 男, 1987年生, 博士, 研究方向为阴极电子学。
李云: 男, 1986年生, 高级工程师, 研究方向为氧化物阴极的研制。

责任编辑: 马秀强