

覆膜浸渍扩散阴极表面微区电子发射像研究

阴生毅^① 任峰^{①②} 卢志鹏^{①②} 张永清^① 张申金^③
杨峰^③ 卫东^④ 邯娇^① 李阳^①

^①(中国科学院电子学研究所高功率微波源与技术实验室 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100039)

^③(中国科学院理化技术研究所功能晶体与激光技术重点实验室 北京 100190)

^④(北京中科科仪股份有限公司 北京 100190)

摘要: 覆膜对浸渍扩散热阴极表面电子发射的影响一直是热阴极研究领域的重点课题。该文采用最新研制的深紫外激光光发射电子显微镜/热发射电子显微镜(DUV-PEEM/TEEM), 对一半覆膜、另一半未覆膜的浸渍扩散阴极试样作了1150 °C×2 h激活, 并对其表面微区的热电子发射像及其随温度的变化作了比较。结果发现, 两种阴极的热电子发射均主要位于孔隙及其邻近颗粒边缘; 随温度升高, 未覆膜阴极发射主要集中于孔隙内及周边有限区域内, 发射面积增量较小, 覆膜则使阴极有效发射区域得以由孔隙及其边缘向距孔隙更远的区域延伸, 发射面积大幅增加。上述结果首次给出了覆膜浸渍扩散阴极微区的电子发射特征, 对于理解该类型阴极发射机理有一定参考价值。

关键词: 覆膜浸渍扩散阴极; 电子发射; 微区; 光发射电子显微镜

中图分类号: O462

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)10-2535-06

DOI: 10.11999/JEIT171000

Study on Electron Emission Phenomenon of the Surface Micro Area of Coated Impregnated Dispenser Cathode

YIN Shengyi^① REN Feng^{①②} LU Zhipeng^{①②} ZHANG Yongqing^①
ZHANG Shenjin^③ YANG Feng^③ WEI Dong^④ HAN Jiao^① LI Yang^①

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

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

^③(Key Laboratory of Functional Crystals and Laser Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^④(KYKY Technology Co., Ltd, Beijing 100190, China)

Abstract: The impact on impregnated cathode electronic emission, when it is coated by films, is an important studied content in the field of thermionic cathode. A cathode sample is evenly split by impregnated dispenser cathode and coated impregnated dispenser cathode. The sample is activated at 1150 °C in the Deep UltraViolet laser Photo- and Thermal- Emission Electron Microscope system (DUV-PEEM/TEEM) for 2 hours. In this system, the micro- electron emission phenomenon of two cathode and its changes with temperature are compared and studied directly. The results show that the electronic emission of both impregnated cathode and coated impregnated cathode are mainly located at the pores and the edge of the adjacent particles; Along with the rise of cathode's temperature, the cathode emission without coating anything is still mainly focused on the pores and nearby narrow regions on cathode surface, that the emission area changed a little. However, for the coated impregnated dispenser cathode, the effective emission area is extended from the pores and its edge to the

收稿日期: 2017-10-25; 改回日期: 2018-06-14; 网络出版: 2018-07-30

*通信作者: 阴生毅 ysy210@163.com

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ120048)

Foundation Item: The National Instrumentation Program of China (2012YQ120048)

area far away from the pores. These results for the first time give the electron emission characteristics for impregnated cathode coated with film, which have certain reference value to understand the emission mechanism of this cathode.

Key words: Impregnated dispenser cathode; Electron emission; Surface micro area; Photoemission electron microscope

1 引言

在浸渍扩散阴极发射面沉积一定厚度的贵金属或合金薄膜可以降低阴极表面功函数,提高阴极发射性能,降低阴极工作温度^[1-3]。近年来,国内外研究者致力于改进覆膜浸渍扩散阴极的薄膜成分和结构来改善阴极的发射性能,随着阴极发射能力与稳定性的不断提高,该类型阴极的应用愈加广泛^[4-10]。

然而,关于覆膜浸渍扩散阴极表面微区电子发射像的研究却少见报道,导致难以从微观角度了解覆膜对浸渍扩散阴极表面电子发射产生的影响。出现这种情况主要与分析仪器水平低和热电子发射图像分辨率不高有关。早期,国外采用发射式电子显微镜用于研究浸渍扩散阴极的激活过程^[11],近年来,类似装备仍被用于研究在钨基体上覆金属氧化物膜的电子发射情况,以探索阴极的发射机理^[12,13],国内研究者也曾采用发射式电子显微镜获得了阴极表面热电子发射像和阴极蒸发物的热电子发射像^[14-16]。传统热电子发射仪器的有效放大倍数低于500倍,而阴极基体钨颗粒尺度为3~10 μm,要清楚地看到这些区域钨颗粒及孔隙的发射,仪器放大倍数至少需要达到2000倍以上。另外,在传统热电子发射图像上,电子发射区显示为亮区,不发射电子区显示为暗区,除了能看到明暗相间之外,尚无法将发射区、不发射区与阴极表面的微结构联系起来。

深紫外激光光发射电子显微镜/热发射电子显微镜(DUV-PEEM/TEEM),是在国家重大科学仪器设备开发专项的支持下,研制出的一套适合阴极使用的新型分析仪器,该显微镜具备纳米级热电子成像空间分辨能力,并可实现光电子+热电子联合成像^[17]。利用该显微镜,可以获得热阴极电子发射微区的准确位置和微细的发射特征。

本文重点开展了4个方面的工作:首先利用DUV-PEEM/TEEM显微镜的UV-PEEM功能,对激活后覆膜阴极/未覆膜阴极试样进行了紫外光发射电子成像,对比了其表面功函数的分布差异;其次,利用显微镜的TEEM功能,原位观察和对比了两种阴极表面微区的动态发射过程;第三,利用显微镜的DUV-PEEM功能,获得阴极表面热电子发射微区的DUV-PEEM像,接着将DUV-PEEM像和TEEM像进行比对,对覆膜阴极表面微区的发射特

点进行了分析;最后,对阴极微区发射特征与活性物质的关系进行了讨论。

2 实验方法

2.1 试样制备

分析所用阴极样品尺寸为Φ10 mm×1 mm。试样自钨铜棒料(基体孔度约为25%)上取下,之后作以下处理:对一侧端面作抛光;真空去铜;高温浸渍6BaO:CaO:2Al₂O₃铝酸盐;离子清洗;对试样一半进行遮挡,另一半离子束溅射沉积WReOs三元合金膜,膜厚约0.25 μm。这种对半覆膜,可保证覆膜与未覆膜两种阴极样品在分析时具有一致的激活及电子成像条件。

为便于比较阴极的宏观发射性能,还制备了直径Φ2.5 mm的浸渍612阴极与覆WReOs膜阴极,所用材料、覆膜工艺及激活条件均与以上Φ10 mm试样相同。

2.2 阴极激活、表面多种电子成像、发射性能测试

阴极激活在样品预处理室中进行。利用EBH300对试样进行电子束轰击加热激活,激活规范为1150 °C×2 h。采用德国KELLER公司的PV11AF1光学测温仪监测样品温度,激活过程中预处理室内的真空度优于1×10⁻⁷ mbar。

完成激活并待样品冷却后,将样品转移至分析室,分析室真空度始终优于1×10⁻⁸ mbar,接下来依次完成不同的电子成像:采用紫外灯光入射不加热的样品,获得阴极表面紫外光发射光电子像(UV-PEEM像),此电子像主要用于分析阴极样品表面的功函数;之后,对阴极样品加热,并采用CIT-2M2红外温度计监测阴极的实时温度,获得阴极表面热电子像(TEEM像),此电子像主要用于了解阴极表面的热电子发射情况;接下来,锁定样品位置,阴极冷却至常温,引入深紫外激光入射样品表面,获得阴极的原位深紫外激光光电子形貌(DUV-PEEM像),此电子像主要用于确定热发射电子区在阴极表面的位置。

阴极发射性能测试,在带有水冷阳极二极管的真空测试台中进行。

3 实验结果

3.1 阴极表面紫外光发射电子形貌

图1给出了浸渍612阴极(下简称未覆膜阴极)与

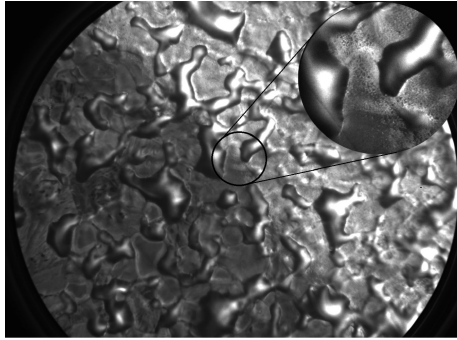


图1 未覆膜阴极与覆膜阴极分界处UV-PEEM图像

覆WReOs膜阴极(下文称覆膜阴极)激活后的表面紫外光发射电子形貌, 视野范围为 $100\ \mu\text{m}$, 图中左下侧区域为未覆膜阴极, 右上侧区域为覆膜阴极, 图中放大区域给出了两种阴极交界处的覆膜侧的情况。

如图1所示, 紫外光电子图像常用于表征样品表面局域功函数差异。在该阴极样品表面光电子图像中, 覆膜阴极表面整体亮度相对较高且分布较左下侧的未覆膜阴极均匀, 表明阴极经过激活后, 覆膜阴极表面的功函数低于未覆膜阴极。

3.2 阴极表面微区热电子发射像及深紫外光发射电子形貌

图2(a)和图2(c)分别给出了未覆膜阴极与覆膜阴极在相同条件下的表面微区TEEM像, 图2(b)与

图2(d)分别为未覆膜阴极和覆膜阴极相应区域的DUV-PEEM像。综合对比发现:

(1) 热电子发射图像中, 未覆膜的阴极整体亮度相对较暗, 亮斑分布不是很均匀。阴极表面存在的亮斑小部分尺寸很大, 但多数亮斑尺寸却很小; 覆膜后, 阴极表面整体亮度变亮了一些, 亮斑分布也变得相对均匀且亮斑的平均尺寸明显变大了。

(2) 采用单色深紫外激光后, 因波长更短、光子能量更高且为单色, 与采用汞灯紫外光相比(如图1), 给出的阴极表面结构更趋于立体(如图2(c)和图2(d))。凸起处为钨颗粒或覆膜后的钨颗粒, 下凹处对应孔隙和活性浸渍物质或覆膜的活性浸渍物质。

(3) 无论浸渍阴极还是覆膜浸渍扩散阴极, 其热发射所对应的亮斑位置和形状与阴极表面孔隙所在位置和形状十分吻合, 这说明这两种阴极的发射是与阴极孔隙及孔隙中的活性物质密切相关的。

(4) 未覆膜阴极发射区主要集中于位于表面孔隙及孔隙中的活性物质上; 覆膜后, 覆膜阴极发射区不仅位于覆膜的表面孔隙及孔隙中的活性物质上, 而且沿孔隙向覆膜钨颗粒中心扩展了一定距离, 发射面积明显增加。

3.3 两种阴极表面微区热电子发射动态过程

图3分别给出了未覆膜阴极和覆膜阴极在 $660\ ^\circ\text{C}$ ~ $690\ ^\circ\text{C}$ 下表面同一区域的TEEM像, 视野范围均为 $50\ \mu\text{m}$ 。需要说明的是, 由于覆膜阴极的电子产

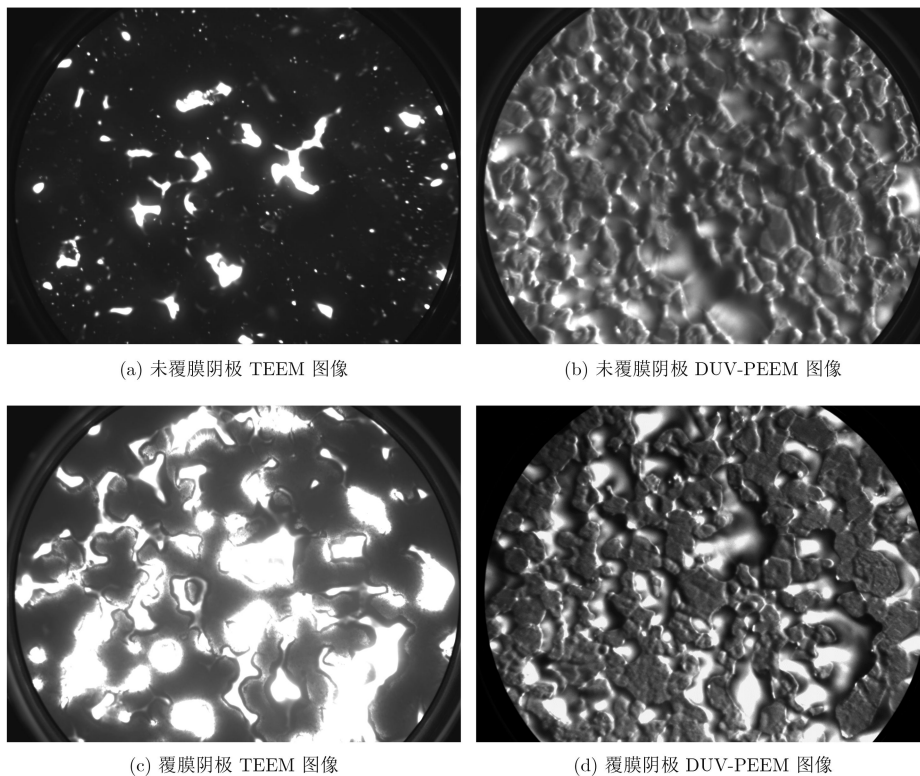
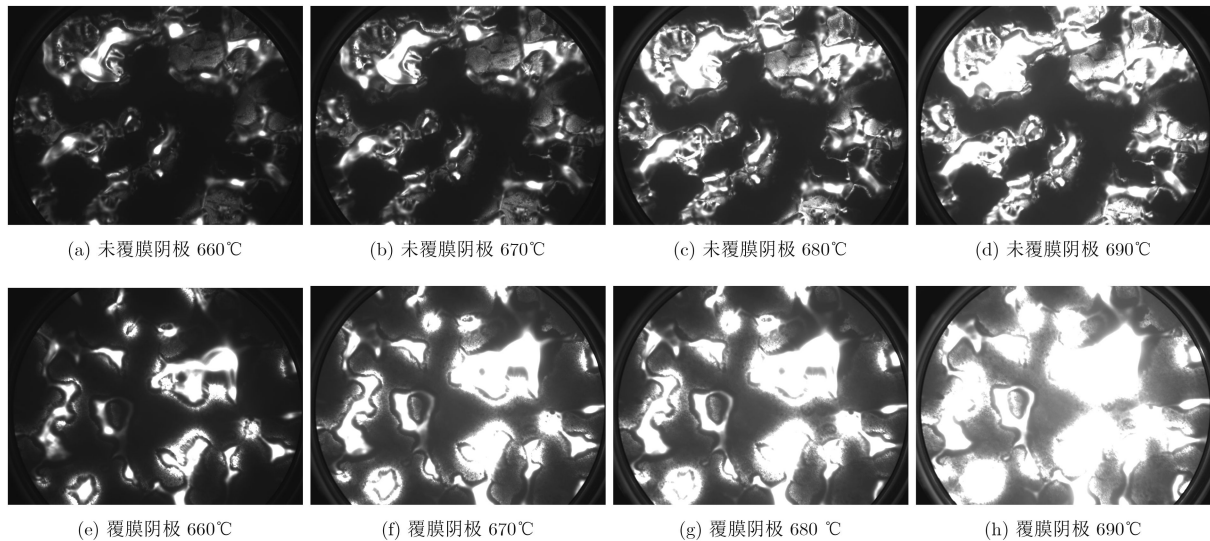


图2 阴极微区 $680\ ^\circ\text{C}$ TEEM像与相应的DUV-PEEM像, 视野范围均为 $100\ \mu\text{m}$

图3 阴极表面TEEM像, 视野范围均为 $50\ \mu\text{m}$

率较高, 其成像时所采用探测电压较未覆膜阴极要低 $200\ \text{V}$ 。

分析图3看出, 两种阴极的热电子发射均起源于表面孔隙及其周边邻近的颗粒边缘, 随阴极温度的升高, 阴极表面热电子发射的各个微区亮度持续增加, 表明阴极的电子发射能力都在持续增强; 当温度升高同样幅度时, 覆膜阴极表面各发射微区的面积和亮度与未覆膜阴极相比均大幅增加, 热电子发射的范围由基体孔隙边缘向钨颗粒中心扩展延伸, 并出现热电子发射微区彼此局部连通的现象。如果再考虑到覆膜阴极的探测电压要比未覆膜阴极低 $200\ \text{V}$, 不难想象, 覆膜的确是使阴极的热电子发射能力得到了极大加强。

3.1节和3.3节给出的某一个温度或温度在升高过程中覆膜阴极微区的发射图像, 颠覆了多数阴极工作者的想象, 长期以来, 普遍认为浸渍扩散阴极在覆膜后其表面的发射是十分均匀的。然而, 实际上, 不仅覆膜后阴极表面的发射依然不是很均匀, 而且同浸渍扩散阴极一样, 阴极表面的发射仍聚集在孔隙或活性物质的附近。

3.4 阴极热发射性能

图4给出了直径 $\Phi 2.5\ \text{mm}$ 的未覆膜阴极与覆膜阴极的直流伏安特性曲线。发射电流密度采用偏离点方法得到。在 $1000\ ^\circ\text{C}$ 下, 未覆膜阴极的直流发射电流密度为 $2.68\ \text{A}/\text{cm}^2$, 覆膜阴极的直流发射电流密度为 $9.00\ \text{A}/\text{cm}^2$ 。后者的发射能力为前者的3.3倍。

为了直观比较两种阴极发射能力的大小及均匀性, 把显微镜的放大倍数降至最低。图5给出了阴极试样分界位置的 $700\ ^\circ\text{C}$ TEEM图像, 视野范围为 $320\ \mu\text{m}$ 。在此视野下, 两种阴极表面的热发射电子成像可观察到清晰的分界, 左下侧的未覆膜阴

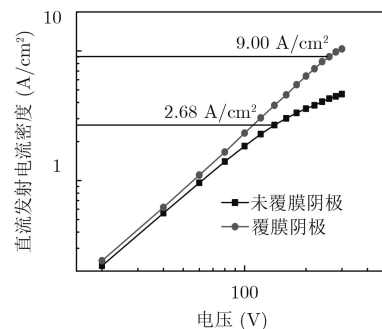
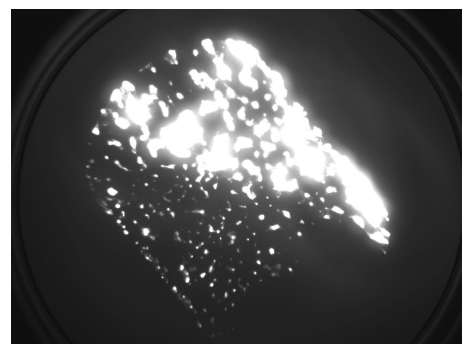


图4 未覆膜阴极与覆膜阴极的I-V曲线

图5 未覆膜阴极与覆膜阴极分界处的 $700\ ^\circ\text{C}$ TEEM图像, 视野范围 $320\ \mu\text{m}$

极发射能力明显低于右上侧的覆膜阴极。

由图5可见, 在相同条件下, 左侧的亮区小且较为分散, 而右侧亮区呈较大片状且相对连续, 这些亮暗区域大小与分布表明, 覆膜阴极表面的发射区域面积至少高出未覆膜阴极两倍, 热电子发射能力及均匀性随之得到提升。这说明, 热电子成像显现出的结果与热电子发射性能测试结果在变化趋势上是一致的。

4 讨论与分析

前面对阴极试样所作的DUV-PEEM/TEEM观察和分析,证实了覆膜阴极与未覆膜阴极的发射,均显现出于阴极孔隙及其邻近区域集中的特征。本文认为,出现这样的特征,是活性物质在阴极表面的分布所使然。

根据文献[14],将浸渍铝酸盐阴极置于高真空环境中,高温激活时,基体孔隙内的浸渍物便会经过系列的物理化学反应形成具有活性的发射物质,并通过孔隙迁徙到孔隙顶端以及孔隙边缘。在一定的工作温度下,到达阴极表面孔隙边缘的物质部分会留下,但部分因蒸发失去。假如要使活性物质越过阴极孔隙向附近钨颗粒中央扩散,这显然需要更高的工作温度,以确保高的扩散能力,但这样做,将使得活性物质的蒸发急剧增加,因此博弈的结果,对于浸渍阴极而言,活性物质只能最大尺度地保留在阴极的孔隙中和孔隙的边缘。

对于覆膜阴极而言,激活过程中阴极表面除了发生浸渍阴极的上述物理化学过程外,特殊成分覆膜层还使得阴极表面吸附活性物质的能力得到大幅提高。笔者在采用同步辐射光电子谱仪对覆钨膜阴极表面研究时发现^[18],覆Os膜阴极表面Os元素具有易氧化和其氧化物易分解的物理特性,在阴极激活或工作过程中,覆Os膜阴极表面氧化物的分解蒸发可使阴极表面生成更多的低结合能吸附氧(O⁻),正是这种低结合能的吸附氧(O⁻)对具有金属性的Ba⁺具有强烈的吸附作用,因此经过高温激活后覆Os膜阴极表面能捕获更多的超额钡。WReOs三元合金膜除具有Os膜的特性外,其被发现可以吸附更多的BaO。正是由于三元合金膜在阴极激活过程中,可以吸附更多的活性物质(Ba⁺和BaO),因此它使得活性物质在激活过程中可以扩散迁徙到距离孔隙边缘更远的位置,而不会被直接蒸发掉。

5 结论

采用新研制的深紫外激光光发射电子/热发射电子显微镜(DUV-PEEM/TEEM)和阴极性能测试台,在视野范围为320 μm至50 μm的范围内,对浸渍G12阴极与覆WReOs膜阴极作了比较研究。得到以下主要结论:

浸渍阴极、覆膜浸渍扩散阴极热电子发射所形成的亮斑,其位置和形状与皆以阴极表面孔隙所处位置和形状为中心,显示出其热电子发射与阴极孔隙及孔隙中的活性物质密切相关;未覆膜阴极发射区主要集中于位于表面孔隙及孔隙中的活性物质上,覆膜阴极发射区不仅位于覆膜的表面孔隙及孔

隙中的活性物质上,而且沿孔隙向覆膜钨颗粒中心扩展了一定距离,发射面积明显增加,阴极发射均匀性得到显著改善。

随阴极温度的升高,阴极表面热电子发射的各个微区亮度持续增加。当温度升高同样幅度时,覆膜阴极表面各发射微区的面积和亮度与未覆膜阴极相比均大幅增加,热电子发射的范围由基体孔隙边缘向钨颗粒中心扩展延伸,并出现热电子发射微区彼此局部连通的现象。

浸渍阴极沉积一层WReOs薄膜后,其表面电子发射能力从2.7 A/cm²,提高至9 A/cm²,阴极发射能力提高至原来的3.33倍。这一结果可以用热电子发射微区图像的分析结果作定性解释。

参考文献

- [1] ZALM P and VAN STRATUM A J A. Osmium dispenser cathodes[J]. *Philips Technical Review*, 1966, 27(3/4): 69-75.
- [2] GREEN M C, SKINNER H B, and TUCK R A. Osmium-tungsten alloys and their relevance to improved M-type cathodes[J]. *Applications of Surface Science*, 1981, 8(1-2): 13-35. doi: [10.1016/0378-5963\(81\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0378-5963(81)90004-0).
- [3] ARES FANG C S and MALONEY C E. Surface studies of Os/Re/W alloy-coated impregnated tungsten cathodes[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces & Films*, 1990, 8(3): 2329-2332. doi: [10.1116/1.576758](https://doi.org/10.1116/1.576758).
- [4] ZHANG Honglai, LIU Yanwen, ZHANG Mingchen, et al. Emission and surface characteristic of ternary alloy Ir/Re/W-coated impregnated tungsten cathodes[J]. *Applied Surface Science*, 2005, 251(1-4): 130-133. doi: [10.1016/j.apsusc.2005.03.162](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.03.162).
- [5] SWARTZENTRUBER P, BALK T J, ROBERTS S, et al. Microstructural influence of OsRu thin films on dispenser cathodes[C]. IEEE Vacuum Electronics Conference, Monterey, USA, 2012: 163-164. doi: [10.1109/IVEC.2012.6262116](https://doi.org/10.1109/IVEC.2012.6262116).
- [6] SWARTZENTRUBER P D, DETISCH M J, and BALK T J. Composition and work function relationship in Os-Ru-W ternary alloys[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces & Films*, 2015, 33(2): 021405. doi: [10.1116/1.4905499](https://doi.org/10.1116/1.4905499).
- [7] 阴生毅, 张永清, 张洪来, 等. 一种阴极三元合金膜及制备覆膜浸渍扩散阴极的方法[P]. 中国, ZL200710118004, 2007. YIN Shengyi, ZHANG Yongqing, ZHANG Honglai, et al. A kind of ternary alloy film and a method for preparing impregnated dispenser cathode coated with film[P]. China Patent ZL200710118004, 2007.
- [8] BARIK R K, BERA A, RAJU R S, et al. Development of alloy-film coated dispenser cathode for terahertz vacuum electron devices application[J]. *Applied Surface Science*,

- 2013, 276(7): 817–822. doi: [10.1016/j.apsusc.2013.04.004](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.04.004).
- [9] 刘燕文, 王小霞, 田宏, 等. 纳米粒子薄膜热电子发射性能[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(1): 145–156.
LIU Yanwen, WANG Xiaoxia, TIAN Hong, *et al.* Study on emission properties of the nanoparticle films[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2015, 45(1): 145–156.
- [10] 王小霞, 张永清, 丁耀根, 等. 一种用于医疗加速器栅控电子枪阴极的研制[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(4): 468–473. doi: [10.13922/j.cnki.cjovst.2015.04.15](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.2015.04.15).
WANG Xiaoxia, ZHANG Yongqing, DING Yaogen, *et al.* Novel type of grid-controlled electron gun for radiation therapy accelerator[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015, 35(4): 468–473. doi: [10.13922/j.cnki.cjovst.2015.04.15](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.2015.04.15).
- [11] AURELIUS S. Activation process of impregnated dispenser cathode viewed in the large-screen emission microscope[J]. *Journal of Electronics & Control*, 1962, 13(5): 401–416. doi: [10.1080/00207216208937447](https://doi.org/10.1080/00207216208937447).
- [12] WAN C, VAUGHN J M, SADOWSKI J T, *et al.* Scandium oxide coated polycrystalline tungsten studied using emission microscopy and photoelectron spectroscopy[J]. *Ultramicroscopy*, 2012, 119(2): 106–110. doi: [10.1016/j.ultramic.2011.10.001](https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2011.10.001).
- [13] KORDESCH M E, VAUGHN J M, WAN C, *et al.* Model scandate cathodes investigated by thermionic emission microscopy[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2010, 29(4): 41–42. doi: [10.1116/1.3589442](https://doi.org/10.1116/1.3589442).
- [14] 方厚民, 苏翘秀, 苏煦春. 铝酸盐钨钨阴极的表面研究[J]. 真空科学与技术学报, 1983(2): 91–98. doi: [10.13922/j.cnki.cjovst.1983.02.004](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.1983.02.004).
FANG Houmin, SU Qiaoxiu, and SU Xuchun. A surface study of impregnated tungsten dispenser cathodes[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 1983(2): 91–98. doi: [10.13922/j.cnki.cjovst.1983.02.004](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.1983.02.004).
- [15] LIU Yanwen, TIAN Hong, HAN Yong, *et al.* Study on the emission properties of the impregnated cathode with nanoparticle films[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, 59(12): 3618–3624. doi: [10.1109/TED.2012.2219583](https://doi.org/10.1109/TED.2012.2219583).
- [16] 杨靖鑫, 阴生毅, 王宇, 等. 阴极蒸发器电子发射现象的研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(7): 1722–1726. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01219](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01219).
YANG Jingxin, YIN Shengyi, WANG Yu, *et al.* Study on electron emission phenomenon of cathode evaporator[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(7): 1722–1726. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01219](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01219).
- [17] 任峰, 阴生毅, 卢志鹏, 等. 深紫外激光光发射与热发射电子显微镜在热扩散阴极研究中的应用[J]. 物理学报, 2017, 66(18): 225–234. doi: [10.7498/aps.66.187901](https://doi.org/10.7498/aps.66.187901).
REN Feng, YIN Shengyi, LU Zhipeng, *et al.* Applications of deep ultraviolet laser photo-and thermal-emission electron microscope in thermal dispenser cathode research[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(18): 225–234. doi: [10.7498/aps.66.187901](https://doi.org/10.7498/aps.66.187901).
- [18] 阴生毅, 张洪来, 杨靖鑫, 等. 覆钨膜阴极表面同步辐射光电子谱研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 3040–3045. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.00358](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.00358).
YIN Shengyi, ZHANG Honglai, YANG Jingxin, *et al.* Study on surface of impregnated cathodes coated Os film by synchronous radiation photoelectron spectrum[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(12): 3040–3045. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.00358](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.00358).
- 阴生毅: 男, 1964年生, 研究员, 研究方向为大电流密度阴极及其发射机理.
任峰: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为热扩散阴极微区热电子发射特征及阴极发射材料.
卢志鹏: 男, 1993年生, 博士生, 研究方向为高性能热场发射阴极及其发射机理.
张永清: 女, 1965年生, 研究员, 研究方向为微波衰减材料、大功率速调管制管工艺及技术.
张中金: 男, 1978年生, 副研究员, 研究方向为全固态激光技术及非线性频率变换技术.
杨峰: 男, 1983年生, 副研究员, 研究方向为全固态激光及其频率变换技术.
卫东: 男, 1988年生, 工程师, 研究方向为电子光学.
邯娇: 女, 1986年生, 中级工程师, 研究方向为可靠性热子材料与工艺.
李阳: 男, 1990年生, 初级工程师, 研究方向为阴极制备工艺.