



离子束表面处理对光电阴极发射的影响

王国建 刘燕文 李芬 田宏 朱虹 李云 赵恒邦 王小霞 张志强

Effect of ion-beam surface treatment on photocathode emission

Wang Guo-Jian Liu Yan-Wen Li Fen Tian Hong Zhu Hong Li Yun Zhao Heng-Bang Wang Xiao-Xia Zhang Zhi-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 218503 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210587

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210587>

当期内容 View table of contents: <https://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

反射式变掺杂负电子亲和势GaN光电阴极量子效率研究

Quantum efficiency for reflection-mode varied doping negative-electron-affinity GaN photocathode

物理学报. 2017, 66(6): 067903 <https://doi.org/10.7498/aps.66.067903>

真空沟道结构GaAs光电阴极电子发射特性

The electron emission characteristics of GaAs photocathode with vacuum-channel structure

物理学报. 2020, 69(10): 108501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191893>

低能离子对高温超导YBa₂Cu₃O₇-薄膜的表面改性和机理

Low-energy ion beam modified surface property and mechanism of high temperature superconductor YBa₂Cu₃O₇- thin film

物理学报. 2018, 67(3): 036103 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20170822>

光学共振增强的表面铯激活银纳米结构光阴极

Optical resonance enhanced Cs activated nano-structured Ag photocathode

物理学报. 2020, 69(6): 068501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191420>

表面形貌对热阴极电子发射特性的影响

Effect of surface topography on emission properties of hot-cathode

物理学报. 2019, 68(3): 037901 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181725>

强脉冲离子束辐照金属材料烧蚀产物特性分析

Characteristics of metal ablation product by intense pulsed ion beam irradiation

物理学报. 2017, 66(5): 055202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.055202>

离子束表面处理对光电阴极发射的影响*

王国建¹⁾²⁾ 刘燕文^{1)†} 李芬¹⁾ 田宏¹⁾ 朱虹¹⁾
 李云¹⁾ 赵恒邦¹⁾ 王小霞¹⁾ 张志强¹⁾

1) (中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2021年3月29日收到; 2021年5月14日收到修改稿)

为研制大电流密度光电阴极, 提出了一种制备铯铷光电阴极的新方法, 采用专门的离子轰击技术使无氧铜表面纹理化, 提高其吸附性能和光的吸收率, 从而相对于未经处理的无氧铜可以大幅提高光电发射的性能. 研究了表面处理前后的无氧铜基体铯铷光电阴极的发射特性. 利用扫描电子显微镜分析了其表面结构, 处理后的无氧铜为表面无颗粒、坚固、结构均匀的全金属结构体, 使用此工艺无需修改无氧铜加工、焊接或其他光电阴极常规制造工艺. 实验中, 获得的无氧铜基体处理前后的光电阴极稳定发射的最大的光电发射电流密度分别为 60.5 和 146.0 mA/cm², 计算出相应的量子效率分别为 2.67×10^{-3} 和 1.71×10^{-2} , 可知量子效率提高了 5.41 倍. 分析认为, 表面改性后的光电阴极的量子效率提高的主要原因来自于光吸收率的提高以及发射表面积增大.

关键词: 光电阴极, 离子束表面改性, 激光驱动, 量子效率

PACS: 85.60.Ha, 85.45.-w, 61.30.Hn

DOI: 10.7498/aps.70.20210587

1 引言

真空微波器件在卫星通信、粒子加速器等方面具有广泛的应用^[1]. 现代微波技术对功率、频率、带宽等工作特性提出了新的需求^[2,3], 研究满足微波源的新型电子发射体, 对卫星通信、微波器件等技术的发展具有重要的意义^[4,5].

目前, 应用在电真空微波器件中的电子源主要以热阴极为主, 包括钨酸盐阴极^[6,7]、氧化物阴极^[8,9]、覆膜阴极^[10,11]. 覆膜阴极仍是现在研究应用最多的电子源^[12,13]. 但覆膜阴极工作温度比较高、材料蒸发比较大. 因此场致发射阴极吸引了研究人员的目光^[14,15], Spindt 场致发射阴极已实现了在 X/Ku 波段行波管中的应用, 取得了很大进步^[16], 但这种

阴极的发射不均匀、稳定性差. 因此, 本课题组提出研究用于微波器件的光电阴极^[17].

光电阴极的重要应用是光电变换装置, 如光电管、像增强器、摄影管等^[18]. 多碱阴极的发现, 让光电阴极更广泛地应用于军事等高科技领域, 如辐射探测、摄影等^[19]. 光阴极注入器的出现, 使光阴极得以广泛的应用于加速器等方面^[20]. 目前, 主要有金属、金属化合物、半导体光电阴极用于脉冲激光驱动^[21], 以含碱金属的半导体光电阴极的应用最为广泛^[22]. 此外, 还有对氧化钡^[23]、钨酸盐^[24]、砷化镓^[25]、外延生长的 III-V 族氮化物半导体等光电阴极进行了研究^[26]. 李雅瑶等^[27]研制了光电神经突触器件. 郝广辉等^[28]对真空沟道结构 GaAs 光电阴极进行了研究.

激光驱动的光电阴极具有许多特点, 如低发射

* 国防预研究基金 (批准号: 31512010404-1) 和国家自然科学基金 (批准号: 61771454) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuyanwen58@sina.com

度、高亮度、易控制、快的响应速度等,有望成为下一代高频率、小型化电真空微波器件及理想电子源,可有效地提高这些器件的反应速度,进而提升装备的性能和快速反应能力.本课题组已开展了一种应用于毫米波、太赫兹器件的高量子效率的实用光电阴极的研究^[29,30].基于前期的研究基础,本文提出采用离子束表面处理技术对光电阴极基体表面进行改性处理,以此来提高其吸附性能和光的吸收率,进而提高光电阴极的发射电流密度.

NASA Lewis 研究中心及其他一些实验证明,通过离子束处理后的材料表面会出现纳米尺寸的毛刺,以此来降低材料的二次电子发射系数^[31,32].这些纳米毛刺的尺寸很小,与电子的德布罗意波长相当;尺度的下降使得宏观固定的准连续能带消失,表现为分立的能级,由此量子尺寸效应十分明显,这使得纳米材料具有表面效应特性^[33]、小尺寸效应^[34]等许多不同于块体材料的物理化学特性^[35].对纳米粒子薄膜的发射特性的研究,已成为国际研究领域的一个热点^[36,37].本课题组对纳米粒子薄膜的热发射均匀性^[38]和热辐射特性^[39,40]研究发现,这种材料具有很好的发射均匀性和非常强的热辐射特性.目前通过离子束表面处理来增大光电阴极的发射电流密度的研究还未见报道,本文将利用光电发射的基本理论,研究离子束表面改性技术在光电子发射特性方面的应用,这对光电子发射的理论和应用以及拓展离子束表面改性技术应用研究领域都具有十分重要的学术价值和应用价值.

2 光电阴极制备

2.1 光电阴极结构

由于可以采用较低光子能量的可见光波长的激光激发铯铷(Cs_3Sb)光电阴极产生光电子,并且这种阴极具有较高的量子效率,制备工艺也相对简单,因此选择 Cs_3Sb 光电阴极进行改进研究.碱金属铯化物阴极的结构一般有两类,即立方型和六角形结构,前者具有较好的光发射特性,而后者较差.这是因为立方型晶体比六角形晶体的原子密度大,原子密度大的晶体的电子浓度也大,而光吸收和光电激发都与电子浓度成正比,所以现在实用的碱金属铯化物阴极的晶体结构都是立方形的.本文研究的 Cs_3Sb 阴极材料为体心立方结构,其晶格常数为 0.9128 nm ^[41,42].同时发现 Cs_3Sb 阴极是一种结

晶学上十分确定的材料,其铯铷原子的比率为3:1.传统的反射式 Cs_3Sb 光电阴极是先在光电阴极基体表面沉积铯膜,阴极基体一般选用无氧铜;然后加热碱金属源,射向光电阴极表面的碱金属蒸汽与铯膜作用^[43].

但加速的残余气体的离子或激光会很容易让这种阴极中的碱金属脱附,造成光电阴极的稳定性变差,寿命变短.为解决这些问题,满足大电流密度光电阴极的需要,提出利用离子束表面处理技术对光电阴极基体表面进行改性处理,提高其光的吸收率和吸附性能.本文研究的反射式 Cs_3Sb 光电阴极的结构如图1所示.

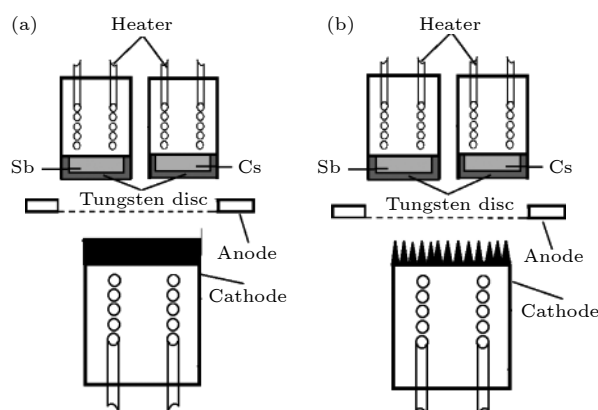


图1 反射式 Cs_3Sb 光电阴极的制备结构简图 (a) 未处理无氧铜基体; (b) 离子束处理的无氧铜基体
Fig. 1. Schematic diagram of reflective Cs_3Sb photocathode: (a) Untreated copper plates; (b) ion-textured copper plates.

光电阴极包括用于加热激活的热子、碱金属铯源、无氧铜阴极基体、阳极、铯源等.铯源采用纯度为99.999%的铯粉末,铯源是铯盐(Cs_2CrO_4)与还原剂的混合粉末;阳极采用栅网结构;阴极基体由无氧铜材料加工制成筒状,在其表面进行离子束表面改性处理.

2.2 离子束表面改性处理

离子的溅射率与材料的溅射系数关系很大,当一定能量的离子轰击1个溅射系数高的材料表面时,同时在该表面上沉积一定量的溅射系数低的另一种材料,就有可能形成一种高度织构的表面,这种织构的表面呈现为具有一定间距和高度的毛刺.当无氧铜表面受到离子轰击时,沉积一定量的铜原子就会形成这种织构.因为铜原子的溅射系数相对无氧铜较低,无氧铜表面上形成了铜原子的微小

聚集区域, 这些微小聚集区域起着掩模的作用, 而其周围的铜原子则被离子较快的溅射掉, 从而形成毛刺结构.

利用已有的试验装置进行了无氧铜光电阴极基体的离子束轰击表面改性处理, 通过工艺试验, 调整钼靶和样品之间的距离, 同时进行加热器、样品台、钼靶及模具的改进, 研制出光电阴极无氧铜基体离子束表面改性的设备, 如图 2 所示.

离子束表面改性处理设备的主要作用是提供一定束流密度和能量的溅射离子束, 并沉积一定速

率的钼原子. 我们选择了束能 2.0 keV, 6 cm 直径的考夫曼离子源, 它同时起到溅射和沉积的作用. 离子源位于真空室的顶部, 环形钼靶置于样品台上方. 设计的样品台具有行星转动功能, 且可加热到 600 °C. 为了控制和调整钼原子的沉积速率, 将钼靶设计成齿状结构并与水平面成一定角度. 调整齿翼与环总面积之比可以有效地调整钼原子的沉积速率.

当真空抽至 5×10^{-4} Pa 时, 在系统中充入与金属不发生反应的气体如氩气, 压强可从 0.01 Pa 上升至 1 Pa, 调节溅射速率和充气压强可改变毛刺的尺寸与间距. 本文选用了二次电子发射系数较低的处理工艺参数来制备光电阴极基体, 图 3 展示了处理前后的无氧铜表面的照片.

图 3(a) 说明未处理无氧铜表面除了有些车纹外, 比较平整光滑. 图 3(b) 是压强为 0.02 Pa、加热温度 400 °C、高压为 1.4 kV、溅射靶材为钼的条件下, 经过离子束表面改性后的无氧铜表面, 呈现织构的形貌, 表面形成致密阵列, 毛刺的直径在 150 nm 左右, 特征高度在 400 nm 左右, 间隔在 200 nm 左右. 图 4 给出了处理前后无氧铜阴极基体表面的对比图.



图 2 离子束表面改性专用设备图
Fig. 2. Photo of ion-texturing apparatus.

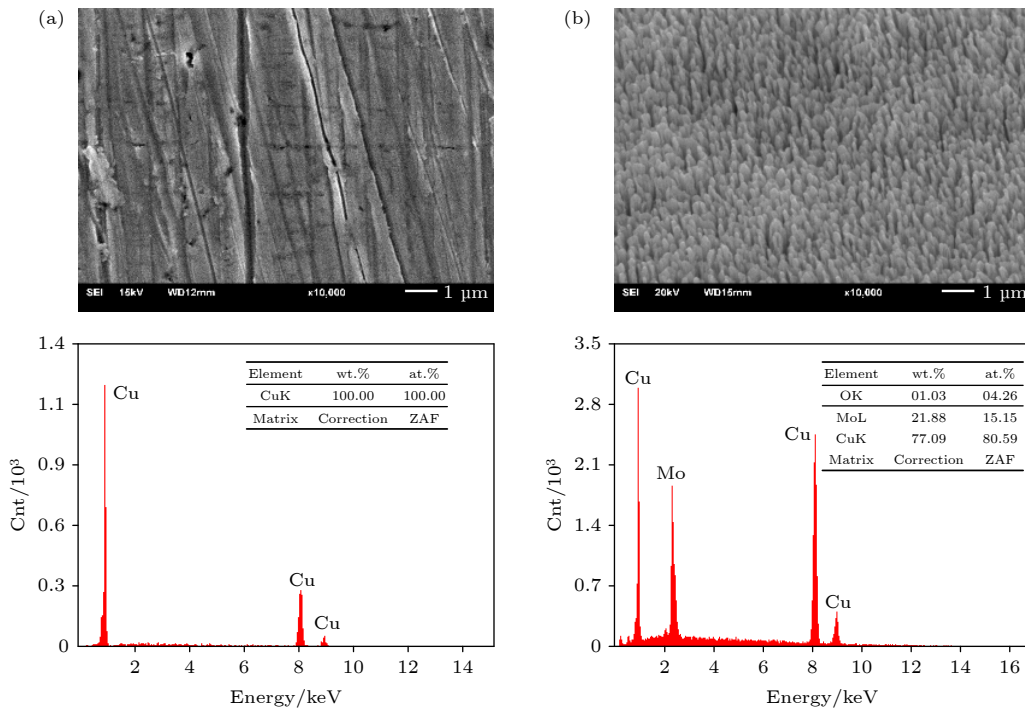


图 3 无氧铜基体电子显微镜照片及成分 (Cnt 是能谱仪收集的元素特征 X 射线强度) (a) 未处理无氧铜表面; (b) 离子束处理的无氧铜表面

Fig. 3. Scanning electron microscope (SEM) images and energy dispersive X-ray (EDX) spectra (Cnt is the X-ray intensity obtained by EDX): (a) Untreated copper surface; (b) ion-textured copper surface.



图 4 无氧铜光电阴极基体表面处理前后的照片

Fig. 4. Photo of untreated copper surface and treated copper surface.

从图 4 可看出, 处理后的无氧铜阴极基体表面比未处理的表面暗得多, 其表面呈黑色, 这是由于纳米毛刺的织构具有很强的光吸收能力造成的. 因此采用离子束轰击技术对光电阴极基体表面进行改性将会改善阴极的发射性能.

2.3 光电阴极制备

将光电阴极基体、铍源、铯源等焊接在测试装置中的电极法兰上, 其结构如图 5 所示.



图 5 光电阴极测试装置

Fig. 5. Photograph of the photocathode test device.

光电阴极制备结构装置包括光输入窗、热电离规管、光电阴极、电极、阳极、钛离子溅射泵及排气口. 电离规管应在真空中进行电子轰击除气, 其可以测量封离装置内的真空度^[44]. 阴极和阳极固定在同一法兰上, 就可以方便地控制阴阳极之间的距离和平行度; 阴极直径为 5.9 mm, 采用钨片做阳极, 其中间有 1 个直径为 5 mm 的圆孔, 孔上焊接 1 个栅网, 透光率可以达到 95% 以上, 阴阳极的距离为 1 mm, 这样就可以减少阴极边缘发射对阴极发射的影响.

将光电阴极制备装置接到排气设备上, 排气过程中进行烘烤. 真空系统包括离子泵、分子泵等, 其极限真空度可以达到 3.0×10^{-8} Pa, 装置如图 6 所示.

光电阴极制备装置经过 450 °C, 40 h 排气, 其极限真空度可以达到 4.8×10^{-8} Pa. 封离后, 打开

抽气钛泵并打开真空计, 真空度为 6×10^{-8} Pa, 获得了光电阴极制备装置在工作过程中所需的真空度, 这时可以进行光电阴极的制备.



图 6 光电阴极制备装置

Fig. 6. Schematic of the preparation of photocathode.

首先将光电阴极无氧铜基体加热到 600 °C, 1 h, 使光电阴极基体表面杂质蒸发, 降温致 130—150 °C 左右; 然后加热铍源使铍蒸发到阴极基体表面形成薄膜; 最后加热铯源使铯蒸汽向阴极表面蒸发, 与铍膜作用. 通过监视白光光电流, 调节铯源温度, 控制铯流蒸发速率, 使光电流缓慢上升, 0.5 至 1 h 可达到峰值.

3 光电阴极发射性能测试结果及讨论

利用光电阴极发射测试系统测试光电发射性能. 本实验采用半导体泵浦固体激光器, 这是因为其具有低功耗、寿命长、性能可靠、输出光束质量好等特点^[45], 激光波长是 532 nm, 光束直径为 1 mm.

打开激光器, 激光通过光路输入窗并通过阳极栅网照射在阴极表面. 在阴极和阳极之间缓慢加高压, 最终加到 500 V, 实验过程中真空度在 10^{-7} Pa 量级.

图 7 给出了光电发射电流密度与激光功率的关系. 从图 7 可以看出, 光电发射电流密度与激光功率成正比, 基体处理前后的光电阴极获得稳定发射的最大激光功率分别为 $P_1 = 416$ mW, $P_2 = 157$ mW, 得出 $P_1/P_2 = 2.65$.

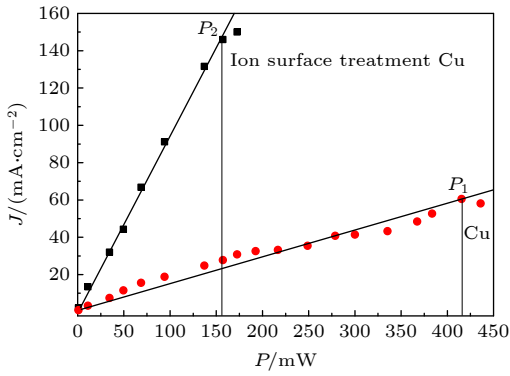


图 7 光电发射电流密度与激光强度的关系

Fig. 7. Photoelectric current density versus the laser intensity.

影响铯钨光电阴极稳定性的主要原因是温度和真空度. 阴极材料中铯会随着温度升高而分解或解吸. 真空中残余的气体也会对阴极材料的产生毒害. 本实验中, 装置的真空度在 1×10^{-7} Pa 左右, 所以本实验中的光电阴极发射电流衰减的主要原因应该是激光造成的温度升高的影响. 由此可以认为离子束表面改性后的光电阴极的光吸收率比未改性的光电阴极的光吸收率提高了 1.65 倍.

从图 7 还可以看出, 在激光功率为 157 mW 时, 基体处理前后的光电阴极的发射电流密度分别为 27.8 mA/cm^2 和 146.0 mA/cm^2 , $J_2/J_1 = 5.25$.

这就是说在同样的激光功率作用下, 离子束表面改性后的光电阴极比未处理的光电阴极的发射电流密度提高了 4.25 倍.

光电阴极激活后阴极表面的形貌和成分如图 8 所示. 从图 8 成分图可以看出, 阴极表面的主要成分有 Cu, Cs, Sb, Mo 以及从空气中吸附的 O, 基体处理前的光电阴极表面 Cs 和 Sb 的原子百分比为 26.53% 和 14.75%, 即 Cs 和 Sb 的原子比例为 1.80, 基体处理后的光电阴极表面 Cs 和 Sb 的原子百分比为 25.34% 和 8.23%, 即 Cs 和 Sb 的原子比例为 3.08. 这说明处理后的无氧铜表面具有更强的吸附铯的能力. 这是因为纳米毛刺具有大的比表面和表面原子配位不足, 与相同材料的块体材料相比较, 有较强的吸附性. 因此, 处理后的无氧铜阴极基体表面具有较强的吸附铯的能力, 从而降低铯的脱附. 作为半导体的铯钨光电阴极, 铯与钨的比例近似为 3—4 时, 光电阴极具有较高的量子效率.

从图 8 电子显微镜的形貌像可以看出, 未处理的阴极表面比较平滑, 而离子束表面改性后的阴极表面具有 200 nm 尺度的起伏, 据此可以建立不同结构的阴极表面模型, 如图 9 所示.

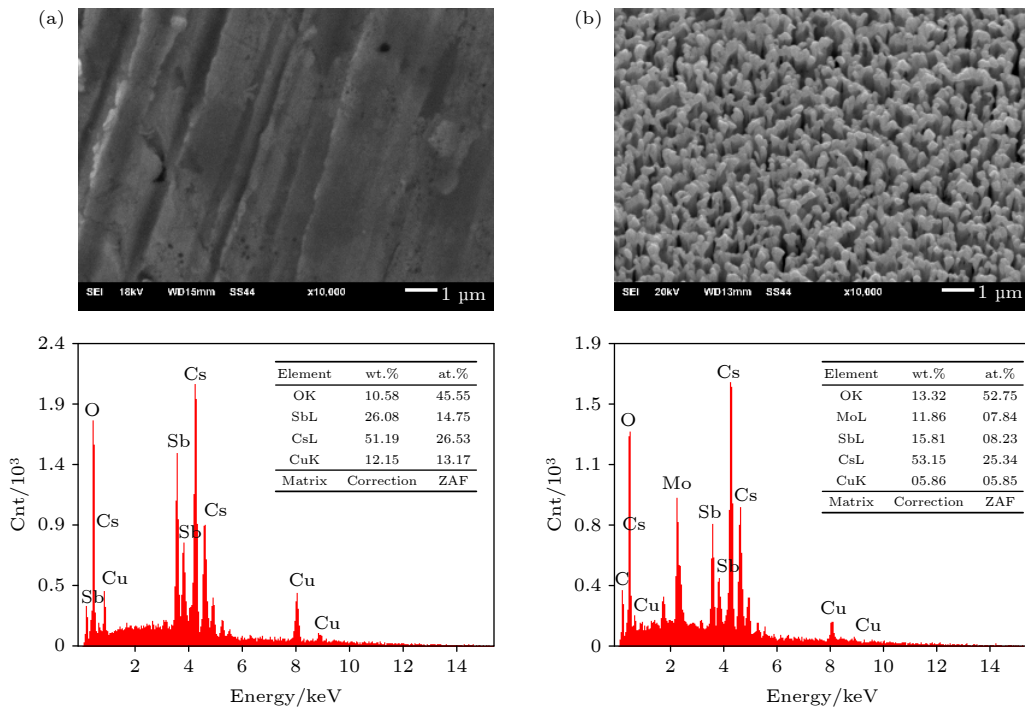


图 8 光电阴极表面的形貌和成分 (a) 未处理无氧铜表面; (b) 离子束处理的无氧铜表面

Fig. 8. SEM image and EDX spectrum of the photocathode: (a) Untreated copper surface; (b) ion-textured copper surface.

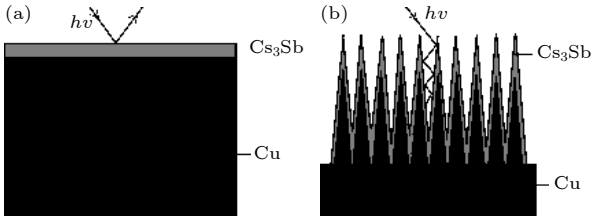


图9 光电阴极表面结构模型示意图 (a) 未处理无氧铜; (b) 离子束处理的无氧铜
Fig. 9. Schematic of the photocathode surface structure: (a) Untreated copper; (b) ion-textured copper.

从图9可以看出,对于未处理的无氧铜,光子打到其表面会有一部分反射回真空中.但对于处理后的无氧铜,射到表面的光子大部分打在“毛刺”的侧面或底部,经过数次反射很难返回真空中,从而降低光子的反射系数,这从处理的无氧铜颜色比较黑也可以证明这一点.

假设离子束表面改性后的阴极表面突起具有如图10的圆台的形状.

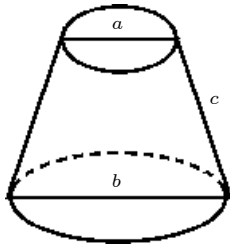


图10 离子束处理的无氧铜毛刺模型示意图
Fig. 10. Schematic diagram of the photocathode surface structure by ion-textured copper.

圆台的表面积 S_1 为

$$S_1 = \pi a^2/4 + \pi c(a+b)/2. \quad (1)$$

圆台的底面积 S_2 为

$$S_2 = \pi b^2/4. \quad (2)$$

则圆台的表面积与圆台的底面积之比为

$$S_1/S_2 = [a^2 + 2c(a+b)]/b^2. \quad (3)$$

通过控制离子轰击时间,很容易使圆台的侧面长度大于圆台底面直径,即 $c > b$,从而使 $S_1 > 2S_2$.

如果 $a = 0$,即突起为圆锥时,则

$$S_1/S_2 = 2c/b > 1. \quad (4)$$

如果 $a = b$,即突起为圆柱时,则

$$S_1/S_2 = 1 + 4c/b > 1. \quad (5)$$

由以上分析可知,离子束表面改性后的阴极表面突起具有很大的表面积,由此证明离子束表面改性后的光电阴极的发射电流密度提高的一个主

要原因来自于表面积的增加,从而增加了光电发射电流.另一方面当光子打到毛刺侧面或底部时,产生的反射光子大部分被附近的毛刺所截获,造成光吸收率的升高.

光电阴极材料的发射能力常用量子效率 Y 描述,半导体光电阴极的 Y :

$$Y = n_e/n_{ph}, \quad (6)$$

式中, n_e 是光电子数,

$$n_e = Q/e, \quad (7)$$

其中, e 为电子的电荷, Q 是时间 t 内光电子的总电荷量, Q 与光电流 I 的关系为 $Q = It$; 入射的光子数 n_{ph} 由照射在阴极上的激光能量 E 除以 1 个光子的能量 $h\nu$ 得到

$$n_{ph} = E/h\nu. \quad (8)$$

时间 t 内的激光能量 E 与激光功率 P 的关系为 $E = Pt$. 激光的波长是 532 nm, 则 $h\nu = 2.34$ eV, 所以

$$Y = Ih\nu/Pe = 2.34I/P. \quad (9)$$

本实验中,基体处理前后的光电阴极所获得的稳定发射的最大激光功率分别为 $P_1 = 416$ mW, $P_2 = 157$ mW, 光电发射电流密度分别为 $J_1 = 60.5$ mA/cm², $J_2 = 146.0$ mA/cm², 光斑直径 $\phi = 1$ mm, 通过(6)式,计算出相应的量子效率分别为 $Y_1 = 2.67 \times 10^{-3}$, $Y_2 = 1.71 \times 10^{-2}$, $Y_2/Y_1 = 6.41$, 量子效率提高了 5.41 倍.

通过调整离子轰击表面改性技术工艺和调整铽铋比例,量子效率有望进一步提高.考虑到还可以制备热稳定性更好的 Na₂KSb 光电阴极,光电发射电流密度将会进一步提高.

4 结 论

为满足高频率、小型化微波真空器件对大电流光电阴极的需求,提出了一种新型光电阴极的制备方法.利用一种专门的离子轰击技术对光电阴极基体常用的无氧铜材料进行表面改性,使其表面形成纳米尺寸的致密的毛刺阵列,提高其吸附性能和光的吸收率,从而相对于未经处理的无氧铜可以大幅提高光电发射性能.

经过离子轰击处理后的无氧铜阴极基体表面比未处理的表面暗得多,其表面成黑色,这是由于纳米毛刺的织构具有很强的光吸收能力造成的.利用扫描电子显微镜分析了其表面结构,处理后的无

氧铜表面形成了直径 150 nm 左右, 高度 400 nm 左右, 间隔较小的致密的毛刺阵列, 其为表面无颗粒、坚固、结构均匀的全金属结构体, 使用此工艺无需修改无氧铜加工、焊接或其他光电阴极常规制造工艺。

研究了表面处理前后的无氧铜的光电发射特性, 实验中获得稳定发射的最大的光电发射电流密度分别为 60.5 mA/cm² 和 146.0 mA/cm², 计算出量子效率分别为 2.67×10^{-3} 和 1.71×10^{-2} , 量子效率提高了 5.41 倍. 结果表明, 表面改性后的无氧铜表面光电发射量子效率得到了大幅度的提高, 并且还有进一步的发展空间. 分析认为, 表面改性后的光电阴极的量子效率提高的主要原因来自于光吸收率的提高和发射表面积增大. 这种光电阴极有望成为微波真空电子器件的理想电子源。

参考文献

- [1] Liu Y W, Wang X X, Lu Y X 2019 *IEEE Trans. Electron. Devices* **66** 5321
- [2] Shin Y M, Barnett L R, Gamzina D 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 181505
- [3] Sirigiri J R, Shaprio M A, Temkin R J 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 258302
- [4] Liu Y W, Tian H 2008 *Sci. China Ser. E: Technol. Sci.* **38** 1515 (in Chinese) [刘燕文, 田宏 2008 中国科学 E 辑: 技术科学 **38** 1515]
- [5] Liu Y W, Tian H 2008 *Sci. China Ser. E: Technol. Sci.* **51** 1497
- [6] Raju R S, Maloney C E 1994 *IEEE Trans. Electron. Devices* **41** 2460
- [7] Wang J S, Liu W 2009 *IEEE Trans. Electron. Devices* **56** 799
- [8] Wang X X, Liu Y W 2014 *IEEE Trans. Electron. Devices* **61** 605
- [9] Gaertner G, Janiel P, Raasch D, et al. 2002 *Appl. Surf. Sci.* **201** 35
- [10] Liu Y W, Tian H, Han Y, et al. 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8635 (in Chinese) [刘燕文, 田宏, 韩勇, 等 2009 物理学报 **58** 8635]
- [11] Liu Y W, Liu S Y, Tian H, et al. 2006 *Chin. J. Vacuum Sci. Technol.* **26** 240 (in Chinese) [刘燕文, 刘胜英, 田宏, 等 2006 真空科学与技术学报 **26** 240]
- [12] Barika R K, Beraa A, Rajub R S, et al. 2013 *Appl. Surf. Sci.* **276** 817
- [13] Isagawa S, Higuchi T, Kobayashi K, et al. 1999 *Appl. Surf. Sci.* **146** 89
- [14] Zhu J, Wang S L, Xie S H, et al. 2011 *Chem. Commun.* **47** 4403
- [15] Wang H L, Hao Q L, Yang X J, et al. 2010 *Nanoscale* **2** 2164
- [16] Whaley D, Duggal R, Armstrong C, et al. 2013 *IEEE Proceedings of 14th International Vacuum Electronics Conference Paris, France, May 21–23, 2013* pp203–204
- [17] Liu Y W, Wang G J, Tian H, et al. 2021 *Sci. Sin. Inf.* **51** 1575 (in Chinese) [刘燕文, 王国建, 田宏, 等 2021 中国科学: 信息科学 **51** 1575]
- [18] Liu Y W, Zhang G M, W M, et al. 1996 *Acta Sci. Natur. Univ. Pekine.* **32** 96 (in Chinese) [刘燕文, 张耿民, 刘惟敏, 等 1996 北京大学学报 **32** 96]
- [19] Somer A H 1963 *Appl. Phys. Lett.* **3** 62
- [20] Lee C H 1985 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **32** 3045
- [21] Liu Y W, Zhang G M, Liu W M, et al. 1996 *Chin. J. Lasers* **23** 255 (in Chinese) [刘燕文, 张耿民, 刘惟敏, 等 1996 中国激光 **23** 255]
- [22] Liu Y W, Zhang G M, Liu W M, et al. 1996 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **376** 146
- [23] Zhang G M, Wu Q D 1997 *Acta Sci. Natur. Univ. Pekine.* **33** 97 (in Chinese) [张耿民, 吴全德 1997 北京大学学报 **33** 97]
- [24] Zhang H, Chen D B 2010 *High Power Laser Part. Beams* **22** 583 (in Chinese) [张篁, 陈德彪 2010 强激光与粒子束 **22** 583]
- [25] Du X Q, Chang B K, Qian Y S, et al. 2010 *Chin. J. Lasers* **37** 385 (in Chinese) [杜晓晴, 常本康, 钱芸生, 等 2010 中国激光 **37** 385]
- [26] Luo Y, Yu W Y, Wang J 2018 *Sci. Sin. Inf.* **48** 688 (in Chinese) [罗毅, 于汪洋, 王健 2018 中国科学: 信息科学 **48** 688]
- [27] Li Y Y, Wang Y, Yang D R 2020 *Sci. Sin. Inf.* **50** 892 (in Chinese) [李雅瑶, 王越, 杨德仁 2020 中国科学: 信息科学 **50** 892]
- [28] Hao G H, Han Y, Li X H, et al. 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 108501 (in Chinese) [郝广辉, 韩攀阳, 李兴辉, 等 2020 物理学报 **69** 108501]
- [29] Liu Y W, Tian H, Lu Y X, et al. 2019 *Vacuum* **56** 7 (in Chinese) [刘燕文, 田宏, 陆玉新, 等 2019 真空 **56** 7]
- [30] Liu Y W, Tian H, Shi W Q, et al. Chin. Patent 201810512769X [2018-05-24] (in Chinese) [刘燕文, 田宏, 李芬, 等. 中国发明专利 201810512769X [2018-05-24]]
- [31] Curren A N, Kenneth A J, Robert F R 1993 *Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting Washington, DC, USA, December 5–8, 1993* p4811091
- [32] Ding M Q, Huang M G, Feng J J 2008 *Appl. Surf. Sci.* **255** 2196
- [33] Han B, Li C, Tang Z Y 2011 *Physics* **40** 566 (in Chinese) [韩冰, 李超, 唐智勇 2011 物理 **40** 566]
- [34] Halperin W P 1986 *Rev. Mod. Phys.* **58** 533
- [35] Ma T Y, Li W J, He X W, et al. 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 108102 (in Chinese) [马腾宇, 李万俊, 何先旺, 等 2020 物理学报 **69** 108102]
- [36] Wang J S, Zhang X Z, Liu W, et al. 2012 *Sci. Sin. Inf.* **55** 98
- [37] Shin Y M, Zhao J F, Larry R B, et al. 2010 *Phys. Plasma* **17** 123105
- [38] Han Y, Liu Y W, Ding Y G, et al. 2009 *IEEE Electron. Device Lett.* **30** 820
- [39] Liu Y W, Wang X X, Tian H, et al. 2015 *Sci. Sin. Inf.* **45** 145 (in Chinese) [刘燕文, 王小霞, 田宏, 等 2015 中国科学: 信息科学 **45** 145]
- [40] Liu Y W, Tian H, Han Y 2012 *IEEE Trans. Electron. Devices* **59** I36184
- [41] Kalarasse L, Bennecer B, Kalarasse F 2010 *J. Phys. Chem. Solids* **71** 314
- [42] Wang G X, Pandey R, Moody N A, Batista E R 2017 *J. Phys. Chem.* **121** 8399
- [43] Liu Y W, Zhang G M, Liu W M, et al. 1995 *Chin. J. Vac. Sci. Technol.* **15** 304 (in Chinese) [刘燕文, 张耿民, 刘惟敏, 等 1995 真空科学与技术学报 **15** 304]
- [44] Liu Y W, Meng X Z, Tian H, et al. 2018 *Vacuum* **55** 25 (in Chinese) [刘燕文, 孟宪展, 田宏, 等 2018 真空 **55** 25]
- [45] Lang X K, Jia P, Chen Y Y, et al. 2019 *Sci. Sin. Inf.* **49** 649 (in Chinese) [郎兴凯, 贾鹏, 陈泳屹, 等 2019 中国科学: 信息科学 **49** 649]

Effect of ion-beam surface treatment on photocathode emission*

Wang Guo-Jian¹⁾²⁾ Liu Yan-Wen^{1)†} Li Fen¹⁾ Tian Hong¹⁾ Zhu Hong¹⁾
Li Yun¹⁾ Zhao Heng-Bang¹⁾ Wang Xiao-Xia¹⁾ Zhang Zhi-Qiang¹⁾

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

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

(Received 29 March 2021; revised manuscript received 14 May 2021)

Abstract

To meet the needs of high-frequency, miniaturized vacuum microwave devices, a new photocathode for microwave vacuum electronic device has been studied. Untreated oxygen-free copper, commonly used for photocathode substrate, exhibits relatively high photoemission characteristics. In this paper, we describe a specialized ion-beam bombardment procedure for textured copper surfaces, thereby improving the photoemission properties relative to untreated copper. The emission characteristics of antimony cesium photocathode on oxygen-free copper substrate before and after surface treatment are studied. The photoemission and texture of post-treated oxygen-free copper surface are examined by scanning electron microscope. The results show that the treated surface has a particle-free, robust, uniformly highly-textured all-metal structure. This processing technology does not require to modify the copper machining and brazing, nor normal fabrication procedures of other photocathodes. In the experiment, the maximum photoemission current density of photocathode for the untreated substrate is 60.5 and that for the treated substrate is 146.0 mA/cm², and their corresponding quantum efficiencies are calculated to be 2.67×10^{-3} and 1.71×10^{-2} , respectively. So, the quantum efficiency is enhanced by 6.41 times. The analysis indicates that the improvement of the quantum efficiency of the treated photocathode is mainly due to the enhancement of the light absorption rate. The results show that the photoemission is enhanced significantly after the substrate has been treated, and there is still much room for improvement.

Keywords: photocathode, ion surface treatment, driven by laser, quantum yield

PACS: 85.60.Ha, 85.45.-w, 61.30.Hn

DOI: [10.7498/aps.70.20210587](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210587)

* Project supported by the National Defense Pre-Research Foundation of China (Grant No. 31512010404-1) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61771454).

† Corresponding author. E-mail: liuyanwen58@sina.com