激光驱动的新型光电阴极

刘燕文^{1*}, 王国建^{1,2}, 田宏¹, 李芬¹, 石文奇^{1,2}, 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

* 通信作者. E-mail: liuyanwen58@sina.com

收稿日期: 2020-09-08; 修回日期: 2020-10-18; 接受日期: 2020-11-26; 网络出版日期: 2021-09-17

总装预研基金项目 (批准号: 31512010404-1) 和国家自然科学基金项目 (批准号: 61771454) 资助

摘要 本文研究了一种用于微波真空电子器件的铯钨光电阴极的新型制备方法. 首先采用钨海绵扩散阻挡层作为发射材料的蒸发源, 代替传统的镍管加热提供发射物质的方法, 使发射材料蒸发缓慢而均匀, 提供受控的光电发射层. 然后利用纳米粒子薄膜对阴极基体表面进行改性, 提高其吸附性能和光的吸收率. 研究了作为发射物质扩散阻挡层的钨海绵基体的新型处理工艺, 将钨铜合金基体直接放入真空室内高频加热到 1900 K, 从而使其中的铜迅速蒸发而沉积到冷凝器上. 结果表明去铜后的钨海绵表面非常光洁, 避免了传统方法去铜不彻底、时间长、污染环境等缺点. 利用直流磁控溅射的方法, 在光电阴极基体表面制备出直径为 50 nm 金属钨纳米粒子薄膜, 研制出带有钛泵的光电阴极发射实验二极管, 管内真空度可以达到 5×10^{-8} Pa. 对基体上沉积钨金属膜和钨金属纳米粒子薄膜光电阴极发射性能进行了对比测试. 实验中获得稳定发射的最大激光功率分别为 0.416 和 0.193 W, 测试的光电发射电流密度分别为 40.8 和 53.9 mA/cm², 并计算出量子效率分别为 1.80×10^{-3} 和 5.13×10^{-3} . 由此可以推断覆 Os 纳米粒子薄膜光电阴极的光吸收率是覆 Os 金属薄膜的 2.16 倍, 量子效率是 2.85 倍, 由此分析认为覆 Os 纳米粒子薄膜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.

关键词 微波真空电子器件, 光电阴极, 纳米粒子薄膜, 钨海绵, 激光驱动, 量子效率

1 引言

微波真空电子器件应用非常广泛, 在粒子加速器、通信卫星等领域都有重要的应用^[1]. 随着电真空微波技术的发展, 对器件性能的要求也越来越高^[2,3]. 研究满足微波器件的高性能电子源, 对于卫星通信等技术领域的意义十分重大^[4,5].

目前, 应用的主要电子源有氧化物阴极^[6,7]、含钨阴极^[8,9]、浸渍阴极^[10,11]等热发射电子源. 而研究的最多的热阴极是覆膜浸渍阴极^[12,13]. 但这种阴极的材料蒸发大、工作温度高等缺陷. 所以研究

引用格式: 刘燕文, 王国建, 田宏, 等. 激光驱动的新型光电阴极. 中国科学: 信息科学, 2021, 51: 1575–1586, doi: 10.1360/SSI-2020-0281
Liu Y W, Wang G J, Tian H, et al. A new type of photocathode driven by a laser (in Chinese). Sci Sin Inform, 2021, 51: 1575–1586, doi: 10.1360/SSI-2020-0281

人员又把目光转向场致发射阴极^[14,15], Spindt 阴极已经实现了在 X/Ku 波段行波管中的应用^[16], 但由于它的发射稳定性差、发射不均匀等缺点, 所以这种阴极实际应用还比较困难. 因此本文提出了光电阴极用于微波真空电子器件的研究.

光电阴极最初的重要应用是各种光电变换装置, 如光电管和像增强器等方面^[17]. 碱金属半导体光电阴极的出现, 使光电阴极应用在更广泛的军事、辐射探测等领域^[18]. 光阴极从技术上得到很大的发展, 还是从第 1 台光阴极注入器的研制成功开始^[19]. 用于激光驱动的光阴极主要有金属光电阴极、金属化合物光电阴极、碱金属光电阴极^[20,21]. 此外, 有许多研究人员还研究了氧化钡光电阴极^[22]、钨酸盐光阴极^[23]、砷化镓负电子亲和势光电阴极^[24]. Luo 等^[25]进行了 III-V 族氮化物光电半导体外延生长的研究. Li 等^[26]研究了光电神经突触器件.

激光驱动的光电阴极具有低发射度、快的响应速度、高亮度、易控制等特点, 是下一代高频率、小型化真空微波器件及其他微波真空电子器件的理想电子源, 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. 我们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^[27]. 为此, 我们基于前期的研究基础, 提出一种光电阴极制备的新方法^[28], 即采用钨海绵扩散阻挡层作为发射材料的蒸发源, 代替传统的镍管加热提供发射物质的方法, 使发射材料蒸发缓慢而均匀, 提供受控的光电发射层. 然后在光电阴极基体表面沉积一层金属纳米粒子薄膜, 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.

纳米材料尺寸很小, 与电子的德布罗意 (de Broglie) 波长等相比拟, 从而使得纳米材料具有许多不同于块体材料的物理化学特性^[29], 如纳米粒子的表面效应特性^[30]、小尺寸效应^[31]等. 纳米粒子薄膜是由尺寸小于 100 nm 的粒子为主体形成的薄膜. 这种材料的发射特性研究, 已成为国际研究领域的一个热点^[32,33]. 我们对纳米粒子所组成薄膜的热辐射特性^[34]、热发射均匀性^[35,36]进行了研究, 发现这种材料具有非常强的热辐射特性和很好的发射均匀性. 本文将利用光电发射的基本理论, 研究这种新型电子发射体的发射性能, 这对拓展纳米材料应用研究领域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

目前电真空微波器件方面用的光电阴极研究还较少^[27], 铯铟 (Cs_3Sb) 光电阴极具有较高的量子效率, 其制备工艺也相对比较简单, 因此它成为我们的首选研究对象. 一般采用镍、无氧铜等金属作为传统的反射式光电阴极的基体. 即首先在基体表面沉积一层铯膜, 然后加热金属镍管, 使其中的碱金属盐的混合物反应, 生成的碱金属原子与铯膜作用^[37].

但由于激光或加速的残余气体的离子作用, Cs_3Sb 阴极中的碱金属很容易被脱附, 造成阴极的稳定性变差. 为此, 我们研究了 Cs_3Sb 光电阴极的制备工艺, 提出一种光电阴极制备的新方法, 具体采用钨海绵蒸发扩散阻挡层作为金属蒸发源, 代替传统的镍管加热提供发射物质的方法, 使发射材料蒸发缓慢而均匀, 使光电发射层受控, 代替蒸发损失的活性物质. 然后利用纳米粒子薄膜对阴极基体表面进行改性, 提高其吸附性能和光的吸收率. 本文研究的反射式 Cs_3Sb 光电阴极结构如图 1 所示.

光电阴极结构, 包括铯源、碱金属铯源、钨海绵层、用于加热激活的热子、阳极、钼金属桶等. 铯源采用铯粉或铯粉与镍粉、钨粉等混合放入钨海绵金属筒内, 进行压制后, 放入钼金属筒内, 然后将铯源与钼筒进行焊接; 铯源是铯盐 (Cs_2CrO_4) 与还原剂 (如锆铝粉) 装在钨海绵金属室内, 进行压制后, 放入钼金属筒内, 然后将铯源与钼筒进行激光焊接; 阳极采用钨栅网结构; 阴极基体由钼金属材料加

图 1 反射式光电阴极结构

Figure 1 Schematic of reflective Cs_3Sb photocathode

图 2 钨海绵制备工艺流程图

Figure 2 Flow chart of tungsten sponge substrate

工制成, 在光电阴极基体表面沉积一层钨金属膜或钨金属纳米粒子薄膜.

2.2 钨海绵扩散阻挡层的制备

发射材料的扩散阻挡层采用多孔的钨海绵, 一般制备工艺如图 2^[38]所示. 钨海绵基体制备工艺就是对钨粉进行处理、压制成形、烧结、浸铜、化学去铜、高温去铜等工艺, 最终形成光电阴极扩散阻挡层.

但这种传统方法的化学去铜过程中, 会有一些杂质沉淀在基体上, 这些杂质即使经过高温去铜其表面也会有一些残留^[39], 采用这样的钨海绵制备光电阴极扩散阻挡层, 必将会影响阴极的光电发射特性. 图 3(b) 给出了 $\phi 50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 阴极钨铜合金基体经过数百小时化学去铜后, 再经过氢气氛下, 高温去铜后的表面照片及成分.

本研究中, 扩散阻挡层采用将钨海绵铜合金基体直接放入真空室内的加热坩埚中^[39], 利用高(中)频加热线圈对坩埚进行局部加热, 将钨铜合金基体加热, 其中的铜会迅速蒸发并沉积到坩埚上方的冷凝器上. 与传统的化学去铜方法相比, 直接进行真空高温去铜工艺方法具有时间短、对高温炉无污染、去铜彻底、表面没有残留污渍、对环境无污染等优点. 图 3(c) 给出了 $\phi 50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 钨铜合金基体直

图 3 (网络版彩图) 阴极基体及其成分. (a) 钨海绵铜合金基体; (b) 经过化学去铜和高温去铜; (c) 经过真空高温去铜

Figure 3 (Color online) Photograph and EDS of tungsten sponge substrate. (a) Untreated W-Cu alloy; (b) after chemical and high temperature treatment; (c) after heating to 1900 K in vacuum chamber directly

图 4 (网络版彩图) 钨海绵筒及其表面的扫描电镜形貌图

Figure 4 (Color online) (a) Optical and (b) SEM image of tungsten sponge substrates

接进行真空高温 (1900 K, 2 h) 去铜后钨海绵基体的表面照片及其断面成分.

从图 3 可以看出直接进行真空高温去铜后, 作为扩散阻挡层的钨海绵基体表面非常光洁, 没有任何污渍和杂质. 与传统化学去铜方法相比, 新方法制备的钨海绵扩散阻挡层截面上的 Cu 更少, 说明新方法超过了传统化学去铜后再高温去铜的效果, 新的方法更加环保, 更节省时间.

图 4 给出了作为扩散阻挡层的钨海绵筒及其表面的扫描电镜形貌图. 从图 4 上可以看出钨海绵表面具有几微米的孔洞, 这些孔洞可以使光电发射物蒸发缓慢而均匀, 使光电发射层受控, 代替蒸发损失的活性物质, 进而使光电阴极得以从中毒过程中恢复, 延长阴极的寿命.

2.3 金属纳米粒子薄膜制备

图 5 给出了金属及金属纳米粒子薄膜的制备设备. 该设备包括离子束刻蚀系统、直流磁控溅射系统、充气系统等, 利用离子束刻蚀系统对基体表面进行离子清洗, 这是因为基体表面车制加工后, 其表面有许多车痕, 所以对其表面必须进行离子清洗, 以便清除由于车制而造成的车痕及残留的吸附杂质.

实验中采用直流磁控溅射的方法, 溅射靶材选用镀膜热阴极常用的钨金属靶. 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 (如氮气), 压强可以在 0.1~1000 Pa 之间进行调节, 压强较低时, 溅射出的金属原子与气体分子的碰撞几率很小, 其在达到样品表面时仍为金属原子,

图 5 (网络版彩图) 薄膜的制备系统

Figure 5 (Color online) The film deposition system

图 6 (网络版彩图) 钽纳米粒子薄膜

Figure 6 (Color online) SEM image of Os nanoparticle film

图 7 (网络版彩图) 覆金属钽膜与覆钽纳米粒子薄膜的阴极基体

Figure 7 (Color online) Os film and Os nanoparticle film photocathode

图 8 光电阴极测试结构图

Figure 8 Schematic of the preparation of photocathode

形成金属薄膜. 充气压强较高时, 气体分子与金属原子的碰撞几率增加, 使金属原子在达到样品表面时成为金属纳米粒子, 调节溅射速率和充气压强就可调节金属纳米粒子的尺寸.

图 6 给出了充气压强为 200 Pa 条件下钽纳米粒子薄膜的扫描电镜图像. 可以看出, 钽纳米粒子的尺寸在 50 nm 左右, 纳米粒子属于密实的堆积结构, 间距很小.

将车制好的光电阴极钼基体放入薄膜制备系统, 在其表面沉积上厚度为 100~500 nm 的薄膜, 即完成金属和金属纳米粒子薄膜阴极的制备. 光电阴极基体直径为 5.9 mm, 薄膜厚度为 400 nm 左右. 图 7 给出了覆金属钽膜与钽纳米粒子薄膜光电阴极基体表面的对比图. 从图 7 中可看出覆纳米粒子薄膜光电阴极基体与覆金属膜的基体相比, 其表面呈黑色, 这是由于纳米粒子具有很强的光吸收能力造成的.

2.4 光电阴极制备

将基体覆上金属膜和金属纳米粒子薄膜的光电阴极放入测试装置中, 其结构如图 8 所示. 光电阴极测试结构装置包括光电阴极、阳极、真空规、钛离子溅射泵、光路输入窗、电极、排气口等. 在测试装置上安装一个 DL-7 热电离真空规管, 可以测量装置内的真空度, 电离规管应在超高真空中进行

图 9 (网络版彩图) 光电阴极制备装置

Figure 9 (Color online) Preparation device of photocathode

图 10 光电发射性能测试系统

Figure 10 Test system of the photocathode driven by laser

电子轰击除气^[40]. 阳极是钼片, 钼片中间的圆孔上焊接一个栅网, 透光率可以达到 95%, 阴极直径为 5.9 mm, 阴阳极之间的距离为 1 mm.

将光电阴极制备装置接到排气设备上烘烤排气. 排气设备真空系统由干泵、分子泵、离子泵等真空获得设备组成, 其装置如图 9 所示. 经过 450°C, 40 h 的排气后, 封离装置, 打开装置上的抽气钛泵, 极限真空度可以达到 6×10^{-8} Pa.

光电阴极测试装置通过排气工艺, 光电阴极制备装置获得了使用过程中所需要的真空度后, 开始进行光电阴极制备. 首先, 将光电阴极基体在 800°C 下加热 1 h, 净化阴极基体表面, 再缓慢降温至 130~150°C; 然后加热铈源, 使铈从扩散阻挡层的钨海绵孔洞中蒸发到阴极基体表面形成薄膜; 最后加热铯源, 使铯蒸汽蒸发到阴极表面, 与铈膜反应. 监视光电发射电流, 调节铯源温度, 缓慢升高光电发射电流, 一小时左右可达到峰值.

3 光电阴极发射性能测试

光电阴极发射性能采用发射测试系统测试, 测试系统如图 10 所示. 激光器采用波长为 532 nm 的半导体泵浦固态激光器, 它具有光束质量好等特点^[41], 光束直径由光阑控制, 光阑直径为 1 mm. 打开激光器, 激光通过光阑照射在光电阴极表面. 阴阳极之间加高压到 500 V, 实验过程中真空度应控制在 10^{-7} Pa 量级.

4 实验结果及分析

图 11 给出了光电发射电流密度与激光强度的关系. 从图 11 的曲线可以看出光电发射流密度与激光强度成正比, 获得稳定发射的最大激光功率分别为 $P_1 = 0.416$ W, $P_2 = 0.193$ W, 得出 $P_1/P_2 = 2.16$.

影响铈铯光电阴极稳定性的主要原因是真空度和温度. 真空中残余气体被电离成的离子轰击会造成光电发射层的破坏, 残余的氧元素也会对阳极造成毒害. 温升会造成材料中铯的分解与解吸或阴极晶格的重构. 本实验过程中, 光电发射电流衰减的主要因素应该是光电阴极吸收激光能量造成的温升影响, 因为激光作用时的真空度比较高, 在 10^{-7} Pa 量级, 由此可以认为覆 Os 纳米粒子薄膜光电阴极的光吸收率比覆 Os 金属薄膜光电阴极的光吸收率提高了 1.16 倍.

从图上可以看出, 激光功率为 0.193 W 时, 它们的发射电流密度分别为 21.4 和 53.9 mA/cm², 就是说在同样的激光功率作用下, 覆 Os 纳米粒子薄膜光电阴极比覆 Os 金属薄膜光电阴极的发射电流

图 11 (网络版彩图) 光电发射电流密度与激光功率的关系

Figure 11 (Color online) Photoelectric current density versus laser intensity

图 12 (网络版彩图) 光电阴极表面的形貌和成分. (a) 覆金属铱膜; (b) 覆铱纳米粒子薄膜

Figure 12 (Color online) SEM image and EDS spectrum of the photocathode. (a) Os film; (b) Os nanoparticle film

密度提高了 1.52 倍, 由此证明覆 Os 纳米粒子薄膜光电阴极的发射电流密度提高的主要原因来自于光吸收率的提高. 发射电流密度提高的另一个原因应该来自于表面积增大.

利用扫描电镜分析了光电阴极激活后表面的成分和形貌, 见图 12. 可以看出, 阴极表面主要含有钼、铯、铷、锑及空气中的氧等成分, 覆铱纳米粒子薄膜的阴极表面铯的原子多于覆金属铱膜阴极, 说明前者具有较强的吸附能力. 从电镜的形貌像可以看出覆金属铱膜阴极表面比较平滑, 而覆铱纳米粒子薄膜的阴极表面具有几十纳米尺度的颗粒, 据此可以画出它们的结构示意图, 如图 13 所示.

目前的实验表明, 阴极钼基体上蒸发铱膜与没有蒸发铱膜相比, 其光电发射并无明显区别, 因此金

图 13 光电阴极表面结构示意图. (a) 覆金属钌膜; (b) 覆钌纳米粒子薄膜

Figure 13 Schematic of the photocathode surface structure. (a) Os film; (b) Os nanoparticle film

属钌膜厚度及阴极基体表面的粗糙度对光电发射的影响不是很大, 光电发射性能只与阴极基体表面的微观形貌和光电发射层的厚度有关. 本实验之所以制备了金属钌膜, 主要是为了与金属钌纳米粒子薄膜相比较, 目的是为了减少基体材料本身性能对光电发射的影响.

从钌纳米粒子薄膜的 SEM 形貌图可以看出, 纳米粒子属于密实的堆积结构, 间距很小. 光电发射特性与纳米粒子的尺寸有关, 钌纳米粒子的尺寸应在 50~200 nm 之间. 尺寸过大, 光电阴极表面则失去纳米材料的特性, 既不会具有很强的光吸收能力, 也不会具有很强的吸附特性. 尺寸过小, 则光电阴极基体表面不能制备相对较厚的光电发射层, 否则也会使光电阴极表面失去纳米材料的特性; 如果制备光电发射层比较薄, 则光子会透过发射层打到金属钌纳米粒子上, 虽然金属纳米粒子的逸出功低于块体金属, 但仍远远高于可见光光子的能量, 因此这部分光子不能产生光电子, 从而降低光电发射效率.

阴极材料的光电发射能力常用量子效率 Y 来描述, 量级从 10^{-8} 到 1. 半导体光电阴极产生光电发射的量子效率 Y 由下式确定:

$$Y = n_e/n_{ph}, \quad (1)$$

其中 n_{ph} 是光子数, n_e 是光电子数, 分别由式 (2) 和 (3) 确定:

$$n_e = Q/e = It/e, \quad (2)$$

$$n_{ph} = E/h\nu. \quad (3)$$

由此得出

$$Y = Ih\nu/Pe = 2.34I/P. \quad (4)$$

本实验中光斑直径 $\phi = 1$ mm, 获得稳定发射的最大激光功率分别为 $P_1 = 0.416$ W, $P_2 = 0.193$ W, 由此计算出光电发射电流密度分别为 $J_1 = 40.8$ mA/cm², $J_2 = 53.9$ mA/cm², 通过式 (4), 计算出量子效率分别为 $Y_1 = 1.80 \times 10^{-3}$, $Y_2 = 5.13 \times 10^{-3}$, 覆纳米粒子薄膜光电阴极的量子效率提高了 1.85 倍.

虽然阴极的光电发射电流密度还不是很大, 但从图 12 可以看出 Cs:Sb 的比例远未达到 Cs₃Sb 光电阴极最佳发射的 3:1 比例, 这个可以通过增大铯源扩散阻挡层的钨海绵孔度来调节, 使 Cs:Sb 的比例达到 Cs₃Sb 光电阴极最佳发射的比例. 另外考虑制备热稳定性更好的 Na₂KSb 光阴极及采用热导率更高的无氧铜作基体, 光电发射电流将会大大提高.

5 结论

本文对铯钨光电阴极的制备工艺进行了改进, 采用一种新方法制备光电阴极. 首先采用钨海绵扩散阻挡层作为发射材料的蒸发源, 代替传统的镍管加热提供发射物质的方法, 使发射材料蒸发缓慢而

均匀,使光电发射表面材料受控,以代替蒸发损失,从而可以延长阴极的寿命.然后利用纳米粒子薄膜对阴极基体表面进行改性,提高其吸附性能,降低逸出功并提高光的吸收率.

研究了钨海绵基体的新型处理工艺,将钨铜合金基体直接放入真空室内坩埚中,利用高频加热使其达到 1900 K,并保温 1~3 h,从而使其中的铜迅速蒸发并沉积到冷凝器上,结果表明去铜后的钨海绵表面非常光洁,没有任何杂质和污渍沉淀在基体表面上,避免了传统方法去铜时间长、不彻底、污染环境等缺点.

利用直流磁控溅射的方法制备出粒径为 50 nm 且分布均匀的钨金属纳米粒子薄膜,研制出带有钛泵的光电阴极发射实验二极管,管内真空度可以达到 5×10^{-8} Pa.

对基体上沉积钨金属膜和钨金属纳米粒子薄膜光电阴极发射性能进行了对比测试.实验中获得稳定发射的最大激光功率分别为 0.416 和 0.193 W,由此可以认为覆 Os 纳米粒子薄膜光电阴极的光吸收率比覆 Os 金属薄膜光电阴极的光吸收率提高了 1.16 倍.测试的光电发射电流密度分别为 40.8 和 53.9 mA/cm²,据此可以计算出量子效率分别为 1.80×10^{-3} 和 5.13×10^{-3} ,覆钨金属纳米粒子薄膜光电阴极量子效率比金属钨膜的光电阴极提高了 1.85 倍.分析认为覆 Os 纳米粒子薄膜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,发射电流密度提高的另一个原因应该来自于发射表面积增大.这种光电阴极有望成为微波电真空器件的理想电子源.

参考文献

- 1 Liu Y W, Tian H, Lu Y X, et al. Influences of diamond material on heat dissipation capabilities of helical slow wave structures. *IEEE Trans Electron Dev*, 2019, 66: 5321–5326
- 2 Shin Y M, Barnett L R, Gamzina D, et al. Terahertz vacuum electronic circuits fabricated by UV lithographic molding and deep reactive ion etching. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 181505
- 3 Sirigiri J R, Shapiro M A, Temkin R J. High-power 140-GHz quasioptical gyrotron traveling-wave amplifier. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 258302
- 4 刘燕文, 田宏, 韩勇, 等. 支取发射电流对热阴极温度影响的研究. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2008, 38: 1515–1520
- 5 Liu Y W, Tian H, Han Y, et al. Temperature variation of a thermionic cathode during electron emission. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2008, 51: 1497–1501
- 6 Wang X X, Liao X H, Zhao Q L, et al. Performance of an oxide cathode prepared from submicrometer carbonates. *IEEE Trans Electron Dev*, 2011, 58: 3195–3199
- 7 Gärtner G, Janiel P, Raasch D. Direct determination of electrical conductivity of oxide cathodes. *Appl Surf Sci*, 2002, 201: 35–40
- 8 Raju R S, Maloney C E. Characterization of an impregnated scandate cathode using a semiconductor model. *IEEE Trans Electron Dev*, 1994, 41: 2460–2467
- 9 Wang J S, Liu W. A study of scandia-doped press cathode. *IEEE Trans Electron Dev*, 2009, 56: 799–804
- 10 Melnikova I P, Vorozheikin V G, Usanov D A. Correlation of emission capability and longevity of dispenser cathodes with characteristics of tungsten powders. *Appl Surf Sci*, 2003, 215: 59–64
- 11 Liu Y W, Liu S Y, Tian H, et al. Fabrication of high efficiency M-type cathode assembly used in space travelling wave tube. *J Vac Sci Technol*, 2006, 26: 240–242 [刘燕文, 刘胜英, 田宏, 等. 用于空间行波管高效覆膜阴极组件的研究. *真空科学与技术学报*, 2006, 26: 240–242]
- 12 Barik R K, Bera A, Raju R S, et al. Development of alloy-film coated dispenser cathode for terahertz vacuum electron devices application. *Appl Surf Sci*, 2013, 276: 817–822
- 13 Isagawa S, Higuchi T, Kobayashi K, et al. Application of M-type cathodes to high-power cw klystrons. *Appl Surf Sci*, 1999, 146: 89–96
- 14 Zhu J, Wang S L, Xie S H, et al. Hexagonal single crystal growth of WO₃ nanorods along a [110] axis with enhanced adsorption capacity. *Chem Commun*, 2011, 47: 4403
- 15 Wang H L, Hao Q L, Yang X J, et al. A nanostructured graphene/polyaniline hybrid material for supercapacitors. *Nanoscale*, 2010, 2: 2164–2170

- 16 Whaley D, Duggal R, Armstrong C, et al. High average power field emitter cathode and tested for X/Ku-band cold cathode TWT. In: Proceedings of the 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2013. 161–162
- 17 Liu Y W, Zhang G M, Liu W M, et al. Photoemission of Na₂KSb photocathode stimulate by ultrashortpulseslaser. Acta Sci Nat Univ Pekine, 1996, 32: 96–102 [刘燕文, 张耿民, 刘惟敏, 等. 激光驱动的钠钾铋光电阴极的发射限制特性. 北京大学学报, 1996, 32: 96–102]
- 18 Somer A H. Photoemissive Materials. Beijing: Science Press, 1979 [萨默. 光电发射材料. 北京: 科学出版社, 1979]
- 19 Lee C H, Oettinger P E, Pugh E R, et al. Electron emission of over A/cm² from a pulsed-laser irradiated photocathode. IEEE Trans Nucl Sci, 1985, 32: 3045–3047
- 20 Liu Y W, Zhang G M, Liu W M, et al. Investigation on the stability of Na₂KSb photocathode stricken by laser pulses. Chin J Lasers, 1996, 23: 255–259 [刘燕文, 张耿民, 刘惟敏, 等. 钠钾铋光电阴极的稳定性研究. 中国激光, 1996, 23: 255–259]
- 21 Liu Y W, Zhang G M, Xue Z Q, et al. The high field enhancement of photoemission from Na₂KSb photocathodes. Nucl Instrum Meth Phys Res, 1996, 376: 146–147
- 22 Zhang G M, Wu Q D. Barium ultrafine particles in barium oxide crystal. Acta Sci Nat Univ Pekine, 1997, 33: 97–103 [张耿民, 吴全德. BaO 晶体中的 Ba 超微粒子. 北京大学学报, 1997, 33: 97–103]
- 23 Zhang H, Chen D B. Experimental research on photocathode for linear induction accelerator. High Power Laser Partical Beams, 2010, 22: 583–586 [张篁, 陈德彪. 直线感应加速器用光阴极实验研究. 强激光与粒子, 2010, 22: 583–586]
- 24 Du X Q, Chang B K, Qian Y S, et al. Activation technique of GaN negative electron affinity photocathode. Chin J Laser, 2010, 37: 385–388 [杜晓晴, 常本康, 钱芸生, 等. GaN 负电子亲和势光电阴极的制备工艺. 中国激光, 2010, 37: 385–388]
- 25 Luo Y, Yu W Y, Wang J. Low-temperature epitaxial technology for flexible optoelectronic devices. Sci Sin Inform, 2018, 48: 688–700 [罗毅, 于汪洋, 王健. 面向柔性光电子器件的低温外延技术. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 688–700]
- 26 Li Y Y, Wang Y, Yang D R. Recent progress on optoelectronic synaptic devices. Sci Sin Inform, 2020, 50: 892–912 [李雅瑶, 王越, 杨德仁. 光电神经突触器件研究进展. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 892–912]
- 27 Liu Y W, Tian H, Lu Y X, et al. Photocathode used as microwave vacuum electronic devices. Vacuum, 2019, 56: 7–11 [刘燕文, 田宏, 陆玉新, 等. 用于微波真空电子器件的光电阴极. 真空, 2019, 56: 7–11]
- 28 Liu Y W, Tian H, Li F, et al. Photocathode and its preparation. Chin patent, 201810512769X, 2019-12-15 [刘燕文, 田宏, 李芬, 等. 光电阴极及其制备方法. 发明专利, 201810512769X, 2019-12-15]
- 29 Ma T Y, Li W J, He X W, et al. Size control and photoluminescence properties of β -Ga₂O₃ nanomaterials. Acta Phys Sin, 2020, 69: 252–262 [马腾宇, 李万俊, 何先旺, 等. β -Ga₂O₃ 纳米材料的尺寸调控与光致发光特性. 物理学报, 2020, 69: 252–262]
- 30 Han B, Li C, Tang Z Y. The controlled synthesis and properties of functional nanomaterials. Physics, 2011, 40: 566–572 [韩冰, 李超, 唐智勇. 功能纳米材料的可控制备及性能研究. 物理, 2011, 40: 566–572]
- 31 Halperin W P. Quantum size effects in metal particles. Rev Mod Phys, 1986, 58: 533–606
- 32 Wang J S, Zhang X Z, Liu W, et al. High current density Sc₂O₃-W matrix dispenser cathode. Sci China Inf Sci, 2012, 55: 98–105
- 33 Shin Y M, Zhao J, Barnett L R, et al. Investigation of terahertz sheet beam traveling wave tube amplifier with nanocomposite cathode. Phys Plasmas, 2010, 17: 123105
- 34 Han Y, Liu Y W, Ding Y G, et al. Improvement of heat dissipation capability of vacuum device using iridium nanoparticulate film. IEEE Electron Dev Lett, 2009, 30: 820–821
- 35 Liu Y W, Wang X X, Tian H, et al. Study on emission properties of the nanoparticle films. Sci Sin Inform, 2015, 45: 145–156 [刘燕文, 王小霞, 田宏. 纳米粒子薄膜热电子发射性能. 中国科学: 信息科学, 2015, 45: 145–156]
- 36 Liu Y W, Tian H, Han Y, et al. Study on the emission properties of the impregnated cathode with nanoparticle films. IEEE Trans Electron Dev, 2012, 59: 3618–3624
- 37 Liu Y W, Zhang G M, Liu W M, et al. The study of Na₂KSb photocathode driven by laser pulses. J Vac Sci Technol, 1995, 15: 304–309 [刘燕文, 张耿民, 刘惟敏, 等. 激光驱动的光电阴极的发射特性. 真空科学与技术学报, 1995, 15: 304–309]
- 38 Liu X Q. Electronics of Cathode. Beijing: Science Press, 1980 [刘学懋. 阴极电子学. 北京: 科学出版社, 1980]

- 39 Liu Y W, Wiao X X, Tian H, et al. Method of removing copper from tungsten sponge. Chin patent, 201310208189.9, 2015-07-29 [刘燕文, 王小霞, 田宏, 等. 钨海绵基体去铜的方法. 发明专利, 201310208189.9, 2015-07-29]
- 40 Liu Y W, Meng X Z, Tian H, et al. Test of ultrahigh vacuum in space traveling-wave tube. Vacuum, 2018, 55: 25–28 [刘燕文, 孟宪展, 田宏, 等. 空间行波管极高真空的获得与测量. 真空, 2018, 55: 25–28]
- 41 Lang X K, Jia P, Chen Y Y, et al. Advances in narrow linewidth diode lasers. Sci Sin Inform, 2019, 49: 649–662 [郎兴凯, 贾鹏, 陈泳屹, 等. 窄线宽半导体激光器研究进展. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 649–662]

A new type of photocathode driven by a laser

Yanwen LIU^{1*}, Guojian WANG^{1,2}, Hong TIAN¹, Fen LI¹, Wenqi SHI^{1,2},
Xiaoxia WANG¹ & Zhiqiang ZHANG¹

1. *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. *University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

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

Abstract To meet the needs of high-frequency, miniaturized vacuum microwave devices and identify suitable cathode materials and laser systems, a new photocathode for microwave vacuum electronic devices has been studied. Based on our previous work, we have proposed a strategy to develop this new type of cathode. First, a tungsten sponge diffusion barrier layer was used as the evaporation source of the emission material, instead of the traditional nickel tube heating method. This serves as the emission material by heating a layer of the emissive material storage chamber to provide a controlled photoemissive layer for replacing the evaporation loss of the active material, thereby extending the life of the cathode and enabling recovery from poisoning and exposure to the atmosphere. Then, the photocathode with Os and Osnanoparticle films were prepared. This n-type photocathode demonstrated some features that were different from those of traditional photocathodes. To overcome the drawback of chemical methods used to clean the copper, we have proposed a strategy to develop a new method. A tungsten copper alloy substrate was heated by a high-frequency heating coil crucible fired at 1900 K. The copper in the tungsten copper alloy matrix was thereby heated and it evaporated rapidly. Then the copper was deposited onto a condenser. The results show that this technology leaves no residual on the substrate surface, occurs over a short time interval, and produces little environmental pollution. A 50-nm-diameter OS metal nanoparticle film was prepared on the surface of the photocathode substrate by using a DC magnetron sputtering metal target method, and a Cs₃Sb photocathode emission experimental diode with a titanium pump was prepared. The degree of vacuum in the tube can reach 5×10^{-8} Pa. The emission performance of the Os film deposited on the substrate and the Os nanoparticle film photocathode was tested. In the experiment, the maximum laser power values for stable emission were found to be 0.416 and 0.193 W, respectively, and the photoemission current densities were 40.8 and 53.9 mA/cm², respectively. The quantum efficiencies were calculated to be 1.80×10^{-3} and 5.13×10^{-3} , respectively. It can be inferred that the light absorption rate of the Os-nanoparticle-film-coated photocathode is a factor of 2.16 higher than that of the Os metal film, and the quantum efficiency is a factor of 2.85 greater. Analysis indicates that the main reason for improvement of the quantum efficiency of the Os nanoparticle film photocathode comes from the improvement of the light absorption rate.

Keywords microwave vacuum electronic devices, photocathode, nanoparticle film, tungsten sponge, driven by laser, quantum yield

current and high-reliability cathodes.

Yanwen LIU received his M.S. and Ph.D. degrees in electronics from Peking University, Beijing, China. His work is focused on electron emission. He is currently the principal research scientist with the R&D Center for Microwave Device and Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, where he is performing research on new types of cathodes, including high-

reliability cathodes.

Guojian WANG received his M.S. degrees in mechanical engineering from Beihang University, Beijing, China. His work is focused on materials processing engineering. He is currently the principal research scientist with the R&D Center for Microwave Device and Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, where he is performing research on new types of cathodes, including high-current and high-

Hong TIAN was born in Beijing, China. She received her B.S. degree from Beijing University of Technology, Beijing, China. Since 1995, she has been with the R&D Center for Microwave Device and Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing. Her current research interests center on electron emission and dispenser cathodes.

including low secondary emission films and thermal conductivity films.

Fen LI received her M.S. degree in material processing engineering from Beijing University of Aeronautics and Astronautics, China. Her work is focused on key technology and structural analysis. She is currently an engineer with the R&D Center for Microwave Device and Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, where she is performing research on functional coatings, in-