论文

纳米粒子薄膜热电子发射性能

刘燕文*, 王小霞, 田宏, 朱虹, 张明晨, 李玉涛, 孟鸣凤, 陆玉新,
谷兵, 方荣

中国科学院电子学研究所, 北京 100190

* 通信作者. E-mail: liuyanwen58@sina.com

收稿日期: 2014-05-12; 接受日期: 2014-09-11; 网络出版日期: 2014-12-16

国家自然科学基金 (批准号: 61072025)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2013CB328900)、国家高技术研究发展计划 (批准号: 2013AA8035040C) 资助项目

摘要 微波真空电子器件广泛应用于雷达、卫星通信、电子加速器及未来军事前沿的高功率微波武器等方面, 担当电子发射的阴极是微波真空电子器件中最为核心的部分. 纳米材料具有许多不同于块体材料的物理化学特性, 利用纳米材料对传统的扩散阴极进行表面改性, 制备出热电子发射性能良好的新型阴极, 对于推动高功率微波真空电子器件的发展具有十分重要的意义. 本文采用直流磁控溅射复合金属靶的方法制备出粒径分布均匀的直径为 20 nm 的金属纳米粒子, 并测试研究了纳米粒子薄膜的热稳定性. 采用飞行时间质谱 (ToFMS) 测试了真空本底和纳米粒子薄膜阴极、传统覆膜阴极等各种阴极蒸发物的成分, 测试结果表明飞行时间质谱仪具有很高的灵敏度, 比较了不同阴极蒸发速率的大小, 发现纳米粒子薄膜阴极比普通覆膜阴极的蒸发速率降低约 30%. 研究了覆纳米粒子薄膜钨钨阴极的发射特性, 阴极直流发射电流密度达到 31.4 A/cm^2 , 且拐点非常明显, 寿命超过 600 小时; 阴极的脉冲发射电流密度达到 108 A/cm^2 , 寿命达到 1500 小时.

关键词 微波真空电子器件 纳米粒子薄膜 热阴极 发射电流 蒸发 寿命

1 引言

纳米材料尺寸很小, 可与电子的超导相干波长、德布罗意波长等相比拟; 尺度的下降使得纳米体系包含的原子数大大降低, 宏观固定的准连续能带消失, 而表现为分立的能级, 量子尺寸效应十分明显; 这使得纳米材料具有许多不同于块体材料的物理化学特性^[1,2], 如纳米粒子的表面效应特性^[3]、小尺寸效应^[4]、高的辐射系数^[5]等等. 微波真空电子技术是一个历史悠久, 充满活力, 且发展潜力巨大的研究领域, 它广泛应用于雷达、卫星通信、电子加速器、全球定位、可控热核聚变及未来军事前沿的高功率微波武器等方面^[6], 其独特的功能和优越的性能, 特别是在大功率和高频段的情况下, 是其他固态器件所不能取代的. 随着现代高技术微波器件的发展, 对微波信号的功率、频率、带宽等工作特性不断提出新的需求. 这些需求主要表现在要求更高的频率、更大的功率、更宽的频带、更高的效率和新的工作特性, 从而微波真空电子器件及支撑技术的发展面临新的挑战和发展机遇^[7-9]. 担当电子发射的阴极又是微波真空电子器件中最为核心的部分, 其性能好坏将直接影响微波源的输出性能和

引用格式: 刘燕文, 王小霞, 田宏, 等. 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, doi: 10.1360/N112013-00201

图 1 金属纳米粒子薄膜的制备系统

Figure 1 The nanoparticle film deposition system

寿命, 进而影响雷达及高功率微波源的性能和寿命. 因此研究满足高功率和宽频带微波源的高性能新型阴极, 对于推动高功率微波真空电子器件等技术的发展具有十分重要的意义^[10]. 此外电子发射现象涉及物理、化学、材料和电子学等多学科领域, 因此进一步研究许多尚不十分清楚的发射机理问题也具有十分重要的学术价值^[11,12].

目前, 在微波真空电子器件上应用最多的是覆膜阴极, 它具有发射电流密度大, 抗离子轰击能力强, 且在高压下不易打火等优点^[13,14]. 但是, 随着微波器件对电子束质量要求的进一步提高, 对阴极的要求也越来越高, 例如要求阴极的发射均匀性要好^[15], 以免电子注的层流性变差而降低微波器件的通过率; 要求阴极蒸发要小, 以免降低电子枪的绝缘性能而影响微波器件的可靠性和寿命等特性^[16]. 因此研究人员又把目光转向场发射阴极^[17,18]. 场发射阴极的发射电流密度较大, 但由于它的总电流偏小, 且发射不均匀, 稳定性差, 以及制备复杂等因素, 从而大大限制了它的应用. 为此, 在基于覆膜阴极研究工作的基础上, 我们提出了一种新型阴极的思路, 即在钨钨基体表面沉积一层厚度为 100~1000 nm 的金属纳米粒子薄膜, 以此来降低钨钨基底表面的逸出功, 进而提高电子发射体的发射电流密度^[19,20]. 纳米结构薄膜是由颗粒尺寸为小于 100 nm 的粒子为主体形成的薄膜. 纳米材料的发射特性研究, 已成为国际研究领域的一个热点^[21,22]. 我们对纳米粒子所组成薄膜的热辐射特性和发射均匀性进行了初步的研究^[23,24], 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. 本论文将利用热电子发射的基本理论并结合最新覆膜电子发射体发射理论, 研究这种新型电子发射体的发射机理, 对电子发射的理论和应用以及拓展纳米材料应用研究领域都具有十分重要的学术和应用价值.

2 实验装置及实验方法

2.1 金属纳米粒子薄膜制备系统

图 1 给出了金属纳米粒子薄膜的制备系统.

金属纳米粒子薄膜的制备系统包括直流和射频磁控溅射系统、样品加热系统、监控金属纳米粒子薄膜厚度的石英晶体测厚仪、充气系统 (充气压强由流量计和真空计控制)、此系统还包括离子刻蚀系统 (见图 1 中右侧真空室), 以便对钨钨阴极表面进行离子清洗. 这是由于钨钨阴极在浸渍发射材料后, 表面需车制加工, 其表面的孔度发生了变化, 同时表面存在残留的发射材料, 所以对其表面必须进行离子清洗以清除残留的发射物质和打开由于车制而封闭的开孔. 图 2 给出了进行离子清洗和未进行离子清洗的阴极表面宏观和微观形貌.

从图 2 可看出阴极表面车制加工后存在许多车痕, 比较粗糙. 进行离子清洗的阴极表面车痕消失,

图 2 进行离子清洗 (a) 和未进行离子清洗 (b) 的阴极表面照片和扫描电镜形貌图

Figure 2 The photo and SEM image of the cathode surface. (a) After ion cleansing, (b) before ion cleansing

图 3 阴极 — 热子组件结构图

Figure 3 The structure of the cathode-heater module

比较光滑, 阴极表面封闭的孔洞被打开.

2.2 金属纳米粒子薄膜阴极制备

金属纳米粒子薄膜阴极采用热子组件浸渍钡钨阴极, 其结构如图 3 所示.

钡钨阴极是由发射物质和钨海绵体组成的. 将摩尔比为 4:1:1 的氧化钡、氧化钙、氧化铝铝酸盐发射物质均匀地填充在孔度为 25% 的钨海绵体的孔隙中, 从发射物质还原出来的金属钡和氧化钡沿海绵孔道不断地扩散到阴极表面, 从而降低表面逸出功. 在工作期间表面上的钡和氧化钡损耗可以不断地得到补充.

热子组件就是将钨丝或钨钼丝绕制的加热体埋在氧化铝等绝缘介质中, 这样一方面避免了振动等造成的热子短路, 提高了热子的可靠性, 另一方面又提高了热子的加热效率.

本实验采用直流溅射合成靶的方法制备合金金属薄膜, 然后高温烧结 (500~1500°C) 去掉低熔点金属即可在钡钨阴极表面形成金属纳米粒子薄膜, 通过控制合成靶的比例可形成不同尺寸的金属纳米粒子. 合成靶选取对阴极发射没有影响的低熔点材料 (如铝、铜等) 与传统覆膜阴极常用的钨、铌等高熔点金属材料合成. 图 4 给出了钨 — 铝合成靶制备的纳米粒子薄膜.

从图 4 可看出经过加热处理后纳米粒子的尺寸在 20 nm 左右, 纳米粒子的晶界清晰. 这种新型钨钨电子发射体属于热电子发射体, 其工作温度可达 1000°C 左右, 因此一般金属纳米粒子有可能发生凝聚, 生长成大颗粒, 从而失去纳米结构特性, 因此纳米结构材料的热稳定性是一个十分重要问题, 它关系到纳米材料优越性能究竟能在什么样的温度范围使用. 能在较宽的温度范围获得热稳定性好的 (颗

图 4 钼—铝合成靶纳米粒子薄膜. (a) 加热前图像; (b) 900 °C 加热 1 小时后图像

Figure 4 SEM image of an Os-Al nanoparticle film. (a) Before the heat treatment; (b) heating at 900 °C for 1 h

图 5 铱纳米粒子薄膜 SEM 图像. (a) 加热前; (b) 1200 °C 加热 1 小时

Figure 5 Effect of the heat treatment on an Ir nanoparticle film. (a) Before the heat treatment; (b) heating at 1200 °C for 1 h

粒尺寸无明显长大) 纳米结构材料是纳米材料研究工作者急需解决的关键问题之一. 纳米结构材料庞大比例的界面一般能量较高, 这就为颗粒长大提供了驱动力, 它们通常处于亚稳态. 通常加热退火过程将导致纳米微晶的晶粒长大, 与此同时, 纳米微晶物质的性能也向通常的大晶粒物质转变.

对熔点较低的铱纳米粒子薄膜的退火实验进一步观察到其颗粒尺寸在相当宽的温度范围内并没有明显长大, 图 5 给出了采用高压法制备的铱纳米粒子经过加热处理前后的扫描电镜图像.

从图 5 可看出铱纳米粒子薄膜 1200 °C 加热 1 小时后, 铱纳米粒子形貌发生了一定变化, 但铱纳米粒子薄膜加热后其粒子大小仍小于 100 nm, 因此铱纳米粒子薄膜加热后仍然会保持纳米材料的特性, 本文研究的纳米粒子薄膜阴极性能都是这种新型发射体加热一定时间后的发射性能.

将制备好的浸渍钨钨阴极放入纳米粒子制备系统, 在其表面沉积上厚度为 1000~5000 Å 的薄膜, 在氢气中 1200 °C 烧结 10 分钟, 即完成纳米粒子薄膜阴极的制备. 在下面的各项研究中阴极直径为 2.5 mm, 薄膜厚度为 400 nm 左右. 图 6 给出了钼纳米粒子薄膜阴极与常规覆膜阴极的对比图.

从图 6 可看出纳米粒子薄膜阴极与常规覆膜阴极相比其表面呈黑色, 这是由于纳米粒子薄膜具有很强的光吸收能力造成的.

图 6 纳米粒子薄膜阴极与常规覆膜阴极对比

Figure 6 N-type cathode and M-type cathode

图 7 阴极蒸发和发射测试系统

Figure 7 The test of evaporation and emission

2.3 阴极发射和蒸发测试

阴极蒸发和发射测试是在超高真空室内进行, 如图 7 所示. 设备由三维样品架 (可同时放入 3 个以上样品)、观察窗、400 L/s 溅射离子泵、烘烤系统、飞行时间质谱仪和水冷阳极等组成. 采用水冷阳极是为了在测试发射电流时避免因阳极温度过高造成阳极出气而影响阴极发射. 真空系统本底极限压强低于 5×10^{-8} Pa. 实验过程中真空度在 10^{-7} Pa 范围内.

用于研究阴极蒸发的飞行时间质谱仪的工作原理是: 在离子源中产生的正离子, 通过接有负脉冲电压的栅极引出, 然后经由接有负高压的加速极加速, 进入漂移区域, 经过漂移路程 L 后, 离子到达探测器, 探测器按漂移时间进行选择, 使给定的 M/e 的离子通过, 而由接收器接收. 质量为 M 的离子飞行时间 T 与其质荷比 M/e 的关系为

$$T = \frac{L}{\sqrt{2V}} \sqrt{\frac{M}{e}}, \quad (1)$$

V 是飞行时间质谱仪的加速电压. 这样测量离子的飞行时间就可求出离子的质荷比, 从而进行样品成分分析. 根据相同时间内到达探测器的离子数就可计算出该种成分在样品中的含量.

阴极蒸发速率 V 与离子峰强度 I 的关系为 [25]

$$\nu = aI, \quad (2)$$

式中 a 为常数. 阴极蒸发速率与离子峰强度成正比, 离子峰强度越大则阴极蒸发速率越大.

这种方法的优点是能够分析阴极蒸发物的成分, 仪器的分析部分只是一支漂移管, 机械结构简单;

图 8 阴极发射寿命测试装置
Figure 8 Testing of cathode's lifetime

图 9 阴极发射电流衰减与时间的关系曲线
Figure 9 The rate of emission decrease as a lifetime

仪器的性能指标主要依靠调节电参数而获得, 机械调整方面不多, 因此使用方便; 能实现快速扫描, 可用于监控极短的瞬时事件; 在短时间内纪录任意反应过程的全部质谱, 给出反应的全部信息。

2.4 阴极寿命测试

微波器件的可靠性和寿命在很大程度上取决于阴极的可靠性和寿命。阴极寿命评估方法可分为两种: 一种是正常寿命实验; 一种是加速寿命实验。正常寿命实验是指阴极在正常应力下 (一定的温度和一定的阴极负荷) 连续监测阴极性能的变化直至寿命终了。这种方法所得数据可靠, 但费时太长。而加速寿命实验虽没有正常寿命实验结果准确, 但花费少, 时间短, 只要实验方案合理、技术路线正确, 所获得的数据对评估阴极的可靠性仍具有重要意义。鉴于实验中发射电流密度比较大, 温度较高, 故选用正常寿命实验较为合适。

阴极的寿命实验可在多种不同的结构中进行, 如平板型二极管, 带有阴极护环和网状阳极的二极管、微波管整管等。我们采用的平板型的结构。阴极装入带有水冷阳极和钛泵的实验二极管中, 图 8 给出了带有水冷阳极和钛泵的实验二极管。

阴极的寿命以发射电流随寿命时间变化的规律进行推算, 划出阴极发射电流衰减与时间的关系曲线, 如图 9。

当发射电流降至初始值的 90 % 时即为阴极寿终, 即阴极发射下降 10 % 作为阴极寿命终了的标准。

对于长寿命阴极来说要满足以下要求: (1) 工作温度低, 这样降低了活性物质的蒸发并减轻了热子的负担; (2) 逸出功小, 这样可在较低工作温度下提供所需发射电流; (3) 足够的活性物质的储存, 以保证在有效的工作期间内源源不断补充由于蒸发和中毒所造成的活性物质的损失。

3 实验结果及分析

3.1 阴极蒸发测试结果及分析

用飞行时间质谱 (ToFMS) 测试了真空本底、覆膜阴极及覆纳米粒子薄膜阴极蒸发物的成分和强度。图 10 给出了阴极未加热时, 真空度在 2×10^{-7} Pa 的条件下, 真空本底的飞行时间质谱图。

从图 10 可看出真空在 2×10^{-7} Pa 的条件下, 飞行时间质谱仪也能测试出其中的 H_2 , H_2O , N_2 或 CO , CO_2 , 并具有非常强的离子流强度, 说明飞行时间质谱仪具有很高的灵敏度。

图 10 真空本底质谱图

Figure 10 Mass spectra of the vacuum background

图 11 普通覆膜阴极 (a) 与覆纳米粒子薄膜阴极 (b) 在 1120 °C 时的质谱图

Figure 11 Mass spectra of the evaporants from cathode. (a) M-type cathode working at 1120°C; (b) N-type cathode working at 1120 °C

图 11 给出了普通覆膜阴极和覆纳米粒子薄膜阴极在 1120 °C 时蒸发成分的质谱图. 结合图 10 和图 11 可看出两种阴极蒸发的主要成分是 Ba, BaO 及少量的 C 和 Ar, 与普通覆膜阴极相比覆纳米粒子薄膜阴极 Ba 和 BaO 的蒸发约降低了 30%. 这是由于纳米材料表面原子数明显增多, 表面原子配位不饱和度高, 表面张力大, 因此, 这些表面原子具有较高的活性, 很容易与其他原子结合, 以降低其表面张力, 因此覆纳米粒子薄膜阴极比普通覆膜阴极的蒸发要小.

图 11 中的 C 主要来自于阴极浸渍的发射物质. Ar 是由于覆膜时采用 Ar 造成的. 这是因为在成膜过程中, 高能惰性气体原子以及离子入射到膜层表面, 当它们所带的能量比膜表面原子间的势能大时, 会钉扎在膜层中.

3.2 阴极发射和寿命测试结果及讨论

采用空间电荷偏离点电流作为标准来检验阴极的发射能力, 因为空间电荷限制电流在微波器件使用中具有实际意义. 图 12 给出了覆纳米粒子薄膜阴极的直流发射特性和寿命曲线.

从图 12 可以看出阴极直流发射电流密度 (1150°C) 达到 31.4 A/cm², 且拐点非常明显, 说明覆纳

图 12 覆纳米粒子薄膜阴极的直流发射特性曲线 (a) 和寿命曲线 (b)

Figure 12 (a) DC I-V behaviors in logarithm; (b) lifetime

图 13 覆纳米粒子薄膜阴极脉冲发射电流的示波图

Figure 13 Oscillograph of pulse emission current

米粒子薄膜阴极在高的直流发射电流密度的情况下与低温低电流密度一样^[20], 具有良好的发射均匀性. 目前直流发射电流密度达到 30 A/cm^2 实用热阴极未见报道. 实验进行 600 小时后热子烧断而阴极并未达到寿命终了. 这是因为阴极支取的发射电流密度很大, 因此阴极温度下降的非常大^[26](下降约 300°C), 为了维持阴极的工作温度必须增加热子的负荷, 从而造成热子寿命大大缩短.

对阴极的脉冲 (50 Hz, 100 μs) 发射电流进行了测试, 图 13 给出了覆纳米粒子薄膜阴极脉冲发射电流的示波图. 从图 13 可以看出覆纳米粒子薄膜阴极脉冲发射电流波形与脉冲发射电压波形非常一致.

图 14 给出了覆纳米粒子薄膜阴极脉冲发射电流的 I-V 曲线和寿命曲线. 从图 14 可以看出阴极脉冲发射 (1120°C) 达到 108 A/cm^2 , 寿命达到 1500 小时.

目前脉冲发射电流达到 100 A/cm^2 的阴极主要集中在钨酸盐阴极^[27], 但由于钨酸盐阴极发射的不均匀性 (没有明显的拐点) 及抗离子轰击能力差等缺点, 限制了这种发射体在高功率微波器件中的应用. 覆纳米粒子薄膜阴极可以用于高功率微波真空电子器件中, 这种新型阴极已成功应用于一种电子束斑直径达到 1 米, 对束流密度、均匀性和稳定性都有非常高的要求的发散式电子枪, 并通过了测试鉴定.

填充在钨海绵体孔隙中的发射物质被钨还原出金属钡和氧化钡原子, 这些原子沿钨海绵孔道不断地向阴极表面扩散, 对于传统覆膜阴极, 钡原子和氧化钡原子从钨海绵孔道附近的多晶金属薄膜中的晶粒间界扩散到阴极表面, 然后再沿多晶金属薄膜表面横向徙动, 构成覆盖多晶金属薄膜的原子层, 这

图 14 覆纳米粒子薄膜阴极脉冲发射电流的 I-V 曲线 (a) 和寿命曲线 (b)

Figure 14 (a) Pulse I-V behaviors in logarithm; (b) lifetime

种阴极的逸出功依赖于其表面的多晶金属薄膜^[28]. 而对于纳米粒子薄膜阴极, 钡原子和氧化钡原子沿纳米粒子薄膜内部的纳米粒子空隙纵向和横向向薄膜表面移动, 钡原子和氧化钡原子就均匀地分布于纳米粒子的表面, 覆纳米粒子薄膜阴极的表面是由纳米粒子组成的, 而纳米粒子表面覆盖了一层钡原子和氧化钡原子, 这种阴极的逸出功强烈地依赖于其表面的纳米粒子.

在一定的温度 T 下, 阴极饱和发射电流密度 J 由理查森方程确定^[29], 即

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right), \quad (3)$$

其中 A 为常数, k 为玻尔兹曼常数, ϕ 为逸出功.

纳米粒子逸出功, 根据 Plieth^[30] 给出的纳米粒子的逸出功 Φ_{oc} 与块体的逸出功 Φ_{ob} 之差可表示为

$$\Phi_{oc} - \Phi_{ob} = -\frac{\mu_c - \mu_b}{ZC_F} + \frac{3e^2}{8r}, \quad (4)$$

式中, μ_c 是纳米粒子化学势; μ_b 是块体化学势; Z 是荷电电子数; C_F 是法拉第常数; r 是纳米粒子半径. 进一步近似考虑 $(\mu_c - \mu_b)$ 与纳米粒子尺寸有关, 由 Gibbs-Thomson 方程得到

$$\Phi_{oc} - \Phi_{ob} = -\frac{2M}{ZC_F m} \frac{F}{r} + \frac{3e^2}{8r}, \quad (5)$$

式中, M 是摩尔质量; Z 是电荷数; m 是纳米粒子质量; F 是纳米粒子表面自由能. 式 (4) 和 (5) 右边第 2 项为镜像力的贡献. 由以上两式可见, 随纳米粒子尺寸 r 的减小, 其逸出功 E_{oc} 减小. 当纳米粒子尺寸 r 较大时, 逸出功的减小接近于线性关系; 而 r 较小时, 偏离线性关系, 有振荡行为.

结合式 (3) 和 (5) 可知覆纳米粒子薄膜阴极逸出功较低, 因此这种阴极的发射电流密度较高.

4 结论

本文研究了一种应用于高功率微波器件的新型阴极, 即在浸渍钨钨基体表面沉积金属纳米粒子薄膜, 这种薄膜可以降低钨钨阴极表面逸出功、增强表面张力, 从而改善其电子发射特性.

利用直流磁控溅射合成金属靶的方法制备出粒径分布均匀的直径为 20 nm 金属纳米粒子薄膜; 利用扫描电子显微镜分析研究了铱纳米粒子薄膜的热稳定性, 实验观察到其颗粒尺寸在相当宽的温度范围内有一定的长大, 经过加热处理后纳米粒子的晶界更加清晰.

利用阴极蒸发和发射测试超高真空系统研究了阴极蒸发, 质谱 (ToFMS) 测试表明飞行时间质谱仪具有很高的灵敏度, 即使真空度在 2×10^{-7} Pa 的条件下, 飞行时间质谱仪也能测试出其中的 H_2 , H_2O , N_2 或 CO , CO_2 等本底成分并具有很强的离子流强度. 发现覆纳米粒子薄膜阴极比普通覆膜阴极的蒸发速率降低约 30%, 两种阴极蒸发的主要成分是 Ba, BaO 及少量的 C 和 Ar, 从理论上对质谱测试结果进行了分析.

采用带有水冷阳极和钛泵的实验二极管对覆纳米粒子薄膜阴极发射和寿命进行了测试, 结果表明阴极直流发射 (1150°C) 达到 31.4 A/cm^2 , 且拐点非常明显, 说明覆纳米粒子薄膜阴极在高的直流发射电流密度的情况下也具有好的发射均匀性, 寿命超过 600 小时. 阴极的脉冲 (50 Hz, 100 μs) 发射电流密度 (1120°C) 达到 108 A/cm^2 , 寿命达到 1500 小时.

参考文献

- 1 Li D, Kaner R B. Graphene-based materials. *Science*, 2008, 320: 1170–1171
- 2 Han B, Li C, Tang Z Y. The controlled synthesis and properties of functional nanomaterials. *Phys*, 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]
- 3 Stoller M D, Park S, Zhu Y, et al. Graphene-based ultracapacitors. *Nano Lett*, 2008, 8: 3498–3502
- 4 Halperin W P. Quantum size effects in metal particles. *Rev Modern Phys*, 1986, 58: 532–603
- 5 Han Y, Liu Y W, Ding Y G, et al. Effect of the nanoparticulate metal film on heat radiation. *Acta Phys Sin*, 2010, 59: 466–470 [韩勇, 刘燕文, 丁耀根, 等. 金属纳米粒子薄膜对辐射散热的影响的研究. *物理学报*, 2010, 59: 466–470]
- 6 Liao F J. The development of high-power microwave sources. *Acta Electr Sin*, 2006, 313: 513–516 [廖复疆. 大功率微波真空电子学技术进. *电子学报*, 2006, 313: 513–516]
- 7 Shin Y M, Barnett L R, Gamzina D, et al. Terahertz vacuum electronic circuits fabricated by UV lithographic molding and reactive ion etching. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 181505-1–181505-3
- 8 Chu K R. The electron cyclotron maser. *Rev Modern Phys*, 2004, 76: 489–540
- 9 Sirigiri J R, Shaprio M A, Temkin R. High power 140 GHz quasi-optical gyrotron travelling wave amplifier. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 258302
- 10 Liu Y W, Liu S Y, Tian H. 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. 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]
- 11 Wang X X, Liao X H, Luo J R. Study on the Ni-Re-Ir Sponge Oxide Cathode. *IEEE Trans Electr Dev*, 2012, 59: 492–495
- 12 Liu Y W, Tian H. The temperature variation of a thermionic cathode during electron emission. *Sci China Ser-E Technol Sci*, 2008, 51: 1497–1501
- 13 Li Y T, Zhang H L, Liu P K, et al. Improved performance of the dispenser Cathode with a Re intermediate layer. *Acta Phys Sin*, 2006, 55: 6677–6683 [李玉涛, 张洪来, 刘濮鲲, 等. 中间层 Re 的加入对覆膜钨钨阴极性能的改善. *物理学报*, 2006, 55: 6677–6683]
- 14 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
- 15 Ives R L, Falce L R, Miram G, et al. Controlled porosity cathodes for high-current-density application. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2010, 38: 1345–1353
- 16 Chiba A, Akiyama Y. Life test evaluation of 411M cathode for highly reliable satellite TWTs. *Appl Surf Sci*, 1999, 146: 120–125
- 17 Qin J F, Zhang G M. Direct growth of tungsten oxide nanorods from heated tungsten foils. *Sci China Technol Sci*, 2012, 6: 1503–1508

- 18 David R W, Ramon D, Carter M A, et al. 100 W operation of a cold cathode TWT. *IEEE Trans Electr Dev*, 2009, 56: 896–905
- 19 Liu Y W, Liu S Y, Tian H. Chinese patent 200410101870.4, 2009-07-11 [刘燕文, 刘胜英, 田宏. 一种金属纳米薄膜浸渍钨钨阴极的制备方法. 发明专利, 0410101870.4, 2009-07-11]
- 20 Liu Y W, Tian H, Han Y. Study on the emission properties of the cathode with nanoparticle films. *Acta Phys Sin*, 2009, 58: 535–542 [刘燕文, 田宏, 韩勇. 发射均匀的覆纳米粒子薄膜阴极的研究. *物理学报*, 2009, 58: 535–542]
- 21 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
- 22 Shin Y M, Zhao J F, Larry R B, et al. Investigation of terahertz sheet beam traveling wave tube amplifier with nanocomposite cathode. *Phys Plasm*, 2010, 17: 123105-1–123105-4
- 23 Han Y, Liu Y W, Ding Y G, et al. Improvement of heat dissipation capability of vacuum device using iridium nanoparticulate film. *IEEE Trans Electr Dev Lett*, 2009, 30: 820–821
- 24 Liu Y W, Tian H, Han Y. Study on the emission properties of the impregnated cathode with nanoparticle films. *IEEE Trans Electr Dev*, 2012, 59: 3618–3624
- 25 Liu Y W, Tian H, Han Y. Time-of-flight mass spectrometer study of evaporation rate from impregnated cathodes. *J Vac Sci Technol*, 2007, 27: 437–441 [刘燕文, 田宏, 韩勇. 利用飞行时间质谱研究热阴极蒸发特性. *真空科学与技术学报*, 2007, 27: 437–441]
- 26 Liu Y W, Tian H, Han Y. Temperature variation of a thermionic cathode during electron emission. *Sci China Ser-E Technol Sci*, 2008, 38: 1515–1520 [刘燕文, 田宏, 韩勇. 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]
- 27 Wang J S, Liu W. A study of scandia-doped press cathode. *IEEE Trans Electr Dev*, 2009, 56: 799–804
- 28 Thomas R E, Gibson J W, Hass G A. Thermionic sources for high-brightness electron beams. *IEEE Trans Electr Dev*, 1990, 37: 850–861
- 29 Liu X Q. *Electronics of cathode*. Beijing: Science Press, 1980 [刘学恂. *阴极电子学*. 北京: 科学出版社, 1980]
- 30 Plieth W J. The work function of small metal particles and its relation to electrochemical properties. *Surf Sci*, 1985, 156: 530–535

Study on emission properties of the nanoparticle films

LIU YanWen*, WANG XiaoXia, TIAN Hong, ZHU Hong, ZHANG MingChen, LI YuTao, MENG MingFeng, LU YuXin, GU Bing & FANG Rong

The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

*E-mail: liuyanwen58@sina.com

Abstract Microwave vacuum devices are used in a wide variety of areas, such as radar, space technology, electron accelerators and high-power microwave weapons at the future military frontiers. The cathodes, i.e., the electron sources, are the cores of the high-power microwave sources. Nanoparticles have many physical and chemical properties that their corresponding bulk materials do not have, such as surface effect and small-size effect, etc. Based on our previous work on the M-type cathode, we have proposed a strategy to develop a new type cathode. We deposited a layer of thin film of metal nanoparticles on the traditional Ba-W dispenser cathode. Thus the N-type cathode demonstrated some features different from the traditional M-type cathode. The study of the electron emission properties of this N-type cathode would promote the understanding on the electron emission and expand the applications of the nanomaterials. Nanoparticle thin films were grown by magnetron sputtering at room temperature. The results showed that the particle size of the films depended on the deposition rate in the nucleation stage of the films. The effect of thin film characteristics on thermionic emission of dispenser cathodes has been investigated. The chemical components of the vacuum background, the evaporants from an N-type cathode and an M-type cathode were respectively analyzed using a time of flight mass spectrometer (ToFMS). The results have proved that the ToFMS is one of the best tools for studying the evaporation phenomena of

impregnated cathodes. Finally, the electron emission performance of the N-type cathodes was studied. I-V characteristics showed that the DC emission current density was 30 A/cm^2 and its lifetime was 600 h. The pulse emission current density was 108 A/cm^2 and its lifetime was 1500 h.

Keywords microwave vacuum devices, nano-particle films, thermal cathode, emission current, evaporating rates, lifetime

of multibeam klystron.

LIU YanWen was born in 1964. He received the M.Sc. and Ph.D. degrees in electronics from Peking University, Beijing. His work focuses on electron emission. Since 1996 he has been currently the Principal Research Scientist with the R&D Center for Microwave Device and Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, where he is performing research on cathode. He has succeeded in the research and manufacture of the cathode

tute of Electronics, CAS (IECAS). Since 2008, she has been an Associate Professor with the Key Laboratory of High-Power Microwave Source and Technology, IECAS.

WANG XiaoXia was born in 1976. She received the B.Sc. degree in applied chemistry from the University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, in 1998 and the M.Eng. degree in material, physics, and chemistry and the Ph.D. degree in electron physics from the Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing, in 2003 and 2006, respectively. In 1998, she joined the Key Laboratory of High Power Microwave Source and Technology, Institute of Electronics, CAS (IECAS). Since 2008, she has been an Associate Professor with the Key Laboratory of High-Power Microwave Source and Technology, IECAS.

TIAN Hong was born in 1972. She received the B.S. degree from Beijing University of Technology, Beijing. Since 1995, she has been with the R&D Center for Microwave Device and Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing. Her current research interests center on electron emission and dispenser cathodes. Her research interests center on electron emission.