

面向深空探测任务的长寿命碳纳米管阴极研究

陈泽宣, 肖东阳, 杜欢欢, 宋培义

(华中科技大学 物理学院引力中心, 武汉 430074)

摘要: 针对深空探测对长寿命碳纳米管场发射阴极的应用需求, 从CNTs场发射阴极失效的机制分析出发, 提出了长寿命CNTs场发射阴极的性能优化方案。采用图形化设计的CNTs发射簇结构可有效降低CNTs发射体表面的场强屏蔽效应, 提升阴极的有效发射面积, 避免电流集中于部分CNTs从而引起热量累积。提出一种转移键合工艺, 将CNTs发射体与衬底的接触由分子力维持转变为金属层熔融键合, 提高阴极的机械稳定性并降低了电/热阻抗。在高真空环境下对样机进行性能测试, 优化后的CNTs场发射阴极样机实现了0~1 mA的电流范围、<2 μ A的电流分辨率与1 μ A/Hz^{1/2}@0.01~1 Hz的噪声水平, 并通过了>550 h的连续发射试验, 证明了阴极优化后的长周期稳定性。

关键词: 碳纳米管; 场发射阴极; 阵列化设计; 边缘效应; 转移键合工艺

中图分类号: V19

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)02-0124-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230152

引用格式: 陈泽宣, 肖东阳, 杜欢欢, 等. 面向深空探测任务的长寿命碳纳米管阴极研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11 (2): 124-131.

Reference format: CHEN Z X, XIAO D Y, DU H H, et al. Research on long life carbon nanotube cathodes for deep space exploration missions[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11 (2): 124-131.

引言

阴极作为一种电子源器件, 是多种深空探测航天器的重要载荷。在电推进系统中, 阴极向羽流发射电子以实现电中和, 避免航天器电位抬升对系统造成损坏^[1]。太阳风帆利用阴极向外发射电子以维持其表面的高电势, 从而与太阳风中的质子相互作用产生推力。电动绳装置通过阴极发射电子并与导体绳形成电流回路, 导体切割地磁场产生洛伦兹力推动卫星运动。根据电子不同的发射原理, 可分为热发射阴极与场发射阴极。热发射阴极通过对材料施加高温使内部电子穿过表面势垒形成电子发射, 热发射阴极结构简单、制作工艺成熟, 可实现较高的发射电流和长寿命, 被广泛应用于航天推进领域。但热发射阴极也存在体积大、效率低和响应慢的缺点, 尤其是其发热特性限制了其应用场景。场发射阴极通过在发射体与栅极之间施加电压, 降低发射体表面的势垒, 使电子通过量子隧穿效应逸出发射体, 最后在静电场引导下透过栅极发射。场发射阴极具有功耗低、响应快、无热效应的优势。在场发射体材料的选择中, 碳纳米管(Carbon NanoTubes, CNTs)具有高长径比、低功函数、高电

导率和热导率及稳定的机械与化学性质^[2], 成功应用于航天阴极器件。2016年, 美国Busek公司研制的CNTs场发射阴极在100 μ A的恒定电流下实现连续工作13 000 h, 其在大电流(>1 mA)下亦可连续工作6 000 h, 并于2016年由Lisa-Pathfinder卫星搭载实现了在轨验证^[3]。2017年, 日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace eXploration Agency, JAXA)发射的HTV-6卫星搭载的CNTs阴极在电动力绳系统实现了在轨测试^[4]。2019年, 清华大学研制的超顺排CNTs阴极于“太极一号”(Taiji-1)引力波探测卫星搭载验证, 为电推进系统提供离子中和^[5]。

近年来, 随着空间引力波、小行星等深空探测任务的布局与开展, 对卫星载荷提出了更为严苛的性能指标需求。在此类任务中阴极作为电推进系统中中和器, 需实现长达上万小时的连续稳定运行, 并维持宽可调范围、高分辨率与低噪声特性。在此场景下, CNTs阴极的主要失效机制为发射体损毁引起的发射效率下降并最终导致发射中断^[6], 其中发射体损毁的机制主要包括振动剥离、过热烧蚀和电弧轰击。本团队基于理论与试验研究结果表明, 发射体的损毁过程难以通过系统结构优化消除, 其核心问题在于: 通过化学

收稿日期: 2023-10-31 修回日期: 2023-12-30

基金项目: 国家重点研发计划课题(2020YFC2201004); 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(11927812)

气相沉积工艺加工的CNTs与基底呈“虚接触”, 导致其界面电阻/热阻较高, 同时键合强度较低, 在大电流连续发射界面处易积累大量的热量使CNTs损毁^[7]; 扁平CNTs结构存在较强的边缘效应, 且CNTs的高度不一致均导致CNTs表面电场分布不均匀, 使得只有少部分处于较强电场的碳纳米管发射, 而对其它CNTs形成强烈的屏蔽效应, 不仅在尖端处极易产生电弧放电, 轰击器件结构, 而且部分碳纳米管承担了过大的电流亦使得热量在发射体局部累积, 最终破坏发射体形貌^[8]。

针对空间引力波探测计划微牛级电喷推力系统阴极的需求, 本团队对长寿命CNTs场发射阴极开展了研制工作, 目标是实现微量级工作电流与上万小时的稳定发射寿命。因此高稳定、长寿命的CNTs场发射阴极是本文的研究重点。主要围绕提升CNTs场发射阴极的界面性能优化与边缘效应抑制策略展开研究, 结合机理分析优化CNTs场发射阴极的结构设计, 提升阴极的发射稳定性和可靠性。本文对CNTs材料的场发射机理进行建模, 分析CNTs在连续发射过程中的失效机制, 并确定系统优化方案; 针对CNTs发射体在边缘处集中并由发射带来的热烧蚀问题, 基于阵列化发射体的设计思路, 通过物理场仿真对CNTs场发射体簇的尺寸、阵列间距等参数开展优化设计, 降低阵列之间屏蔽效应对整体场发射性能的影响; 针对场发射过程中界面热效应对发射体形貌破坏的问题, 提出一种CNTs的热压转移键合工艺, 并通过沉积浸润性金属和金属粘附层改善CNTs和阴极衬底的接触方式, 降低界面热电阻, 采用热压的方法完成键合。完成原理样机装配后, 在高真空环境对原理样机进行了性能测试, 结果证明可实现0~1 mA电流范围、<2 μ A电流分辨率与1 μ A/Hz^{1/2}@0.01~1 Hz噪声水平, 以及>550 h的连续稳定发射。

1 CNTs场阴极系统设计

场发射是通过施加外加电场, 使电子通过量子隧穿克服材料表面势垒的电子发射过程。通过在栅极和载有发射体的阴极之间施加静电场, 降低势垒高度, 同时减小势垒宽度。当表面势垒宽度降低至接近或小于电子波长时, 由于量子隧穿效应, 部分电子会从材料表面逸出。场发射原理如图1(a)所示。电子场发射的相关理论最早由Murphy等^[9]提出。在量子力学理论的基础上, Fowler等^[10]基于金属自由电子理论提出了关于电子场发射现象的理论解释。他们给出了场发射过程中电子发射密度和外电场强度之间的理论关系, 提出了关于冷金属的半经典场发射理论, 即Fowler-Nordheim理论(简称F-N理论)。在该理论中, 将场发射系统中的发射体模型化为表面功函数为 ϕ 的一维有限深量子势阱, 将外加电场近似为强度为 E 的线性势, 推导得到F-N方程

$$J = A \frac{\mu^2}{[(\mu + \phi)\phi]^{\frac{1}{2}}} (\beta E)^2 \exp\left(-B \frac{\phi^{\frac{3}{2}}}{\beta E}\right) \quad (1)$$

其中: J 为场发射电流密度; A 和 B 为常数; β 为电子场发射增强系数; μ 为费米-狄拉克统计中电子分布参数; ϕ 为发射体材料的表面势垒功函数。其中, β 表现为发射体局部增强电场和外电场的比值, 是衡量发射体对于外加电场局部场增强能力的系数。通常在连续发射的过程中, 外加电场强度 E 会保持相对恒定, 因此在不改变电场的情况下, 场发射电流强度一般取决于场增强系数 β 以及材料的表面功函数 ϕ 。基于此理论计算得到, 电场强度 10^9 V/m是CNTs的电子场发射阈值。为了增加局部场强, 通常将发射体制作为几何上呈现出尖锐形貌的尖端。

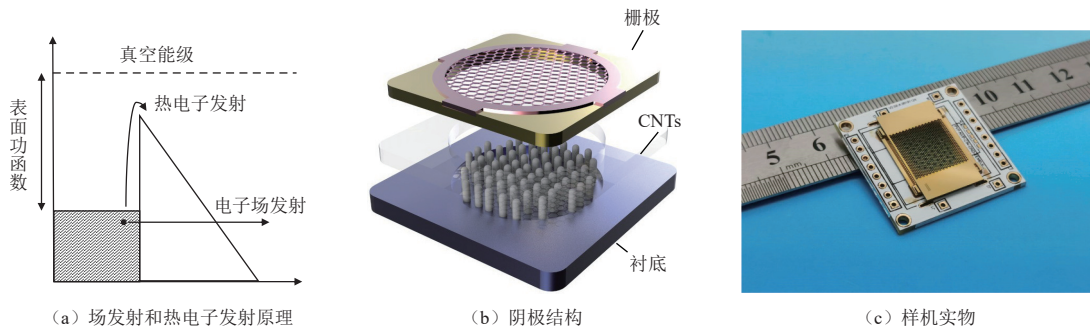


图1 场发射和热电子发射原理图、阴极结构及样机实物

Fig. 1 Diagram of field emission and thermionic emission cathode structure and engineering prototype

对于发射体阵列中的单个发射体, 场发射增强系数的大小会受到尖端曲率半径的影响, 尖端曲率半径

越小, 则场发射增强能力越强^[11]。而对于由多个发射体构成的发射体阵列, β 值会受到发射体阵列单元之间

的距离影响。若发射体分布的密度较小,阵列的场发射位点较少,场增强能力降低;若发射体分布较为密集,则发射体之间的屏蔽效应会降低发射体阵列整体的场发射能力^[12]。其中,屏蔽效应是指多根CNT共同工作的情况下,由于相邻CNT的场发射电场彼此影响,出现局部电场减弱的屏蔽效果,从而导致CNTs阵列的场发射增强系数远低于单个CNT^[13]。此外,阵列化的发射体中存在不一致的尖端形貌,会导致发射能力较强的尖端对其它发射体产生屏蔽的同时自身频繁发射,严重影响电流的稳定性,产生的热效应也会对发射体形貌产生破坏。

此外,在阴极装配过程中,CNTs与栅极间距同样会影响阴极的场发射增强系数,适当减少发射体与栅极间距可提升场发射器件的发射能力^[14]。综上,为获得稳定的发射电场,提升使用寿命,需调控CNTs发射体阵列的排布方式,提升CNTs发射体的形貌一致性,减少屏蔽效应和尖端发射现象对阴极场发射性能的影响,并改善阴极结构、优化加工工艺,降低发射过程中热效应对场发射性能的影响。

本文提出一种阵列化的簇状CNTs发射体形貌,阴极上方布置栅极以实现电压偏置。栅极为规则六边形栅格排布形成的栅网结构,引导电子均匀发射。CNTs场发射阴极的器件结构图和样机实物图分别如图1(b)和图1(c)所示。

对于长期连续发射的阴极而言,过高的阴极界面热电阻、发射体单元存在边缘效应及发射体形貌的不一致,都会直接或间接限制阴极的使用寿命。因此,针对CNTs阴极的失效机制,本文提出了设计与工艺优化的策略。关于发射体形貌一致性问题,可采用图形化设计处理CNTs,形成均匀分布的发射阵列,削弱单根CNT对于整体场发射电场的影响,并结合仿真模拟,合理调控阴极阵列的分布尺寸,减少边缘效应产生的影响。在工艺上,采用等离子体预处理技术对发射体阵列进行预处理,此举可有效地去除阵列中发射体形貌突出的部分及发射体中存在的杂质,达到纯化CNTs的目的^[15]。

针对界面热效应,降低发射过程中产热和增强界面散热能力是两种可行的优化思路。其中发射体产热主要来源为发射体和衬底之间的接触电阻。根据不同金属和CNTs之间产生的接触电阻不同^[16],选择接触电阻较低、浸润性较强的金属可以很好地减少接触电阻带来的产热影响。另外,场发射阴极的表面一般选择热稳定性较强且可导通的金属作为衬底材料,直接生长的CNTs与衬底的接触方式为分子力接触。在微观层

面二者的接触存在间隙,间隙中的空气填充则会导致较大的接触热阻,因此增大二者的接触面积可很好地降低表面热阻。通过增加浸润性金属层的厚度与面积,并施加外力提升CNTs与浸润性金属层的接触程度,可减小空气填充的间隙,降低界面热阻^[17]。

此外,在金属衬底直接生长CNTs,得到的CNTs根部和衬底直接连接由范德华力维持,这是点与面小面积的接触,会形成肖特基势垒,造成比较大的接触电阻。为解决这一问题,研究人员提出了CNTs转移-键合的方法^[18-19]。避免直接生成CNTs过程中大量产热对于碳纳米管的影响,还为衬底材料和金属层材料提供了更大的选择空间。结合图形化设计的工艺方法,可以很好地维持CNTs的垂直形貌结构的同时,实现对阵列结构精准调控。

2 CNTs边缘效应和设计优化

单根CNT无法提供较大的发射电流,因此常采用制备簇状发射体的方法,通过多根CNTs发射体共同作用,保证充足的场发射位点和整体场发射电场的稳定性。然而,多根CNTs发射体组成的簇状发射体具有扁平状结构,场强的边缘效应成为了难题。

在施加电压之后,阴极发射体尖端形成均匀的电场增强,形成稳定的发射电流。由于边缘处发射体的形貌曲率半径更低,对应的场发射增强系数更高,因此在相同的电压条件下,场发射能力更强。场增强效应较强的尖端会对其它发射体产生严重的屏蔽效应,优先其它CNTs进行电子发射,并且会抑制其它CNTs的场发射。Comsol的仿真结果如图2(a)所示,边长1440 μm的正六边形块状发射体各点局部电场均不相同。若边缘处电场达到场发射阈值,那么发射体大部分并不进行发射。若继续增大电压使更多CNTs启动发射,则边缘处CNTs由于更高的场强易产生热量累积,严重时造成形貌损毁,表现为CNT尖端变钝,整体场发射能力减弱直至无法发射,使电流产生波动。因此,屏蔽效应会严重影响阴极的工作性能,造成阴极发射稳定性降低和寿命减短^[20]。

此外,发射体阵列间距过近也将产生电场屏蔽效应。结合建模和仿真可知,阵列间距和发射体高度共同决定了簇状发射体阵列的屏蔽效应强弱。Wong团队^[21-22]的研究结果证明,簇状发射体阵列间距越大,屏蔽效应影响越弱,场发射能力越强。由图2(b)的仿真测试结果可知,当阵列间距增大,阵列之间的屏蔽效应逐渐降低,当阵列间距和高度的比值大于5时,可认为屏蔽效应消除,表现为电流大小趋于饱和。

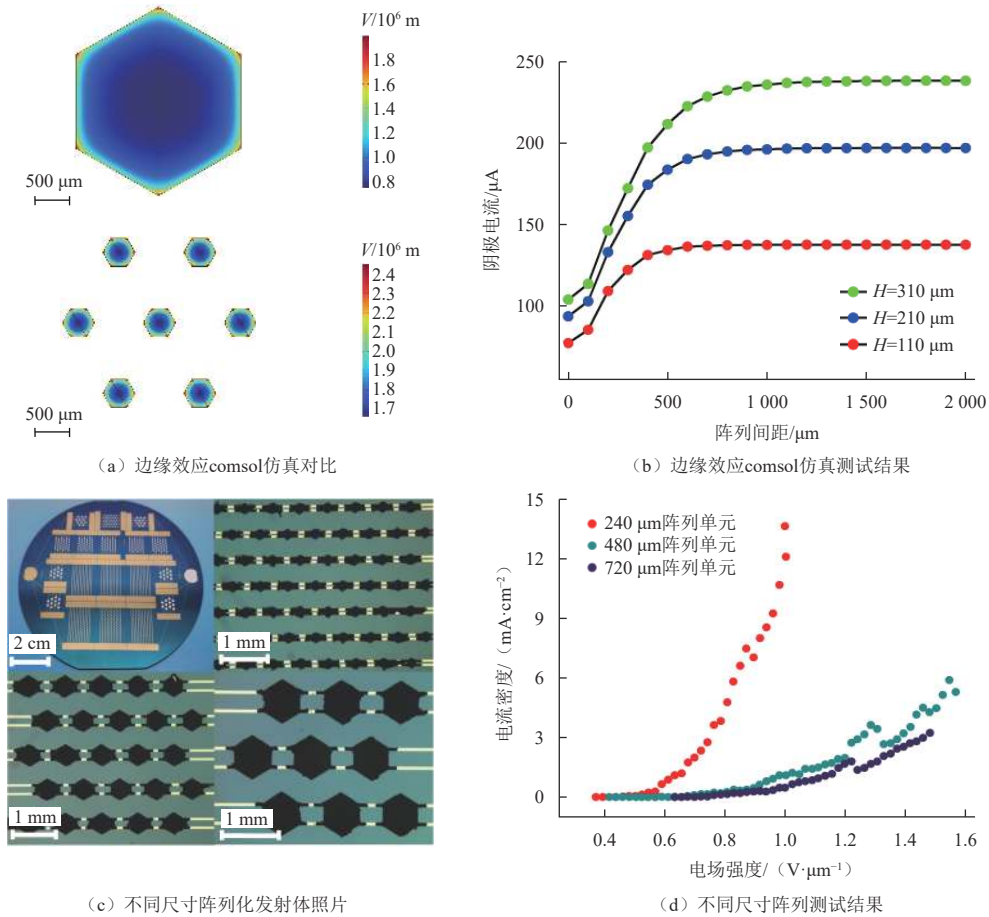


图2 阴极边缘效应comsol仿真对比与测试结果、不同尺寸阴极阵列实物及测试结果对比

Fig. 2 Edge effect comsol simulation comparison and test results of the cathode, diagram and test results of cathode arrays of different sizes arrays

由于边缘效应的影响, 面积较大的发射体中间区域电场强度较低, 有效发射面积集中于边缘。本文提出一种增大有效发射面积的思路, 将单个块状发射体以六边形的方式进行切割, 能够获得较小边长的多个发射单元, 可有效提升单个发射体的电场均匀性。其中, 将同样面积边长为 $1\ 440\ \mu\text{m}$ 的块状发射体切分成数个边长为 $240\ \mu\text{m}$ 的小阵列可增加处于边缘的发射体面积。仿真结果表明, 在总面积相同的情况下, 多发射阵列的有效发射面积增加, 对比效果见图2(a)。缩小阵列尺寸意味着相同面积的阴极能进行有效发射的阵列边长更长, 整体发射位点更多, 增强了电子的发射能力。在此基础上, 研究采用图形化的设计方案, 实现对CNTs阵列结构的精准调控。研究分别选取并加工了如图2(c)所示的 $240\ \mu\text{m}$ 、 $480\ \mu\text{m}$ 和 $720\ \mu\text{m}$ 3种不同尺寸的CNTs发射体阵列, 并在真空环境中对这3种尺寸的阵列单元进行场发射性能的测试。测试过程中逐步增加测试电压, 在每个电压点进行1 min的电流数据采集, 完成后取中间数据段求取期望, 得到的测试结果如图2(d)所示。结果表明, 在相同电压条

件下, $240\ \mu\text{m}$ 阴极单元具有更强的电子发射能力, 通过适当缩小CNTs发射阵列尺寸的方式, 可有效抑制场发射中屏蔽效应的影响。结合CNTs阵列间距对于屏蔽效应的影响, 适当增加各阴极阵列间距, 在保证足够的场发射位点的同时, 最大程度降低发射体之间屏蔽效应对整体场发射能力的影响。

3 CNTs与衬底界面工艺优化

在金属衬底上直接生长形成的CNTs与衬底之间的接触方式为点-面接触, 呈由分子力维持的“虚接触”, 二者接触面积较小。点与面的小面积接触方式导致二者之间费米能级失配, 形成肖特基势垒, 导致CNTs与界面之间存在较大的接触电阻^[23]。二者之间的接触力为较弱的分子间作用力, CNTs垂直形貌和衬底之间的连接在冲击振动或长期发射过程中很容易遭到破坏。并且, 在衬底上直接生长需要较高的生长温度, 易破坏器件结构, 而低温生长的方法目前还不够成熟, 需要在形成的CNTs质量做出一定取舍。针对此问题研究人员提出了转移CNTs的方案, 不仅很好地解决了CNTs

生长对于温度的依赖问题, 还可扩充衬底材料和界面材料的选择范围。在转移的过程中施加适当的热压, 可使CNTs根部与浸润性金属层更充分接触, 减少接触界面的填充间隙, 有效减少接触热阻。

现在常用的CNTs生长方法有电弧放电和化学气相沉积两种方法, 在生长过程中都需要持续提供碳原子, 并且保证稳定、足够持久的生长环境。电弧放电法对温度要求较高, 所得的CNTs形貌可控性较低, 且冷却沉积形成的CNTs会存在较多的结构缺陷或杂质^[24]。化学气相沉积法对温度的需求较低, 为700 °C, 更符合研究需求。在工艺上, 选择热化学气相沉积法 (Thermal Chemical Vapor Deposition, TCVD) 作为生长方法。该生长方法先在衬底上沉积一层由Al₂O₃构成的缓冲层, 以Fe作为催化剂, 在高温环境下通入碳源气体和还原物气体进行还原反应, 得到垂直排列的碳纳米管 (Vertically Aligned Carbon Nanotubes, VACNTs)。VACNTs具有高长径比和低尖端曲率半径的特点, 有较强的场增强能力, 且形貌分布均匀, 有利于进行场发射工作。

金属Au是与CNTs之间接触电阻较低的金属材料之

一, 具有良好的导电性, 并且在高电压和高温环境下依旧可保持稳定, 是导电层的合适选择。然而Au具有较高的熔点, 在过高温度下CNTs的形貌结构容易遭到破坏, 直接转移较为困难。金属Sn具有较低的熔点和较好的粘附性, 和Au共同作用会形成Au/Sn合金, 可作为转移的金属粘附层。因此可在衬底的Au层表面电镀Sn, 实现均匀的Au-Sn键合。并在待转移的CNTs末端沉积Au, 在压强为30 kPa、温度为300 °C的热压作用下完成转移。工艺上, 采用芯片热压机完成转移操作, 芯片热压机可以稳定提供均匀可调控的压力和温度, 使得CNTs和Au/Sn合金充分接触。装置可以保证整个转移流程的稳定性、可重复性和一致性。

在此优化方案的基础上, 通过微机电系统 (Micro ElectroMechanical System, MEMS) 工艺实现了CNTs阴极加工。CNTs场发射阴极阵列的工艺流程图如图3 (a) 所示。如图3 (b) 所示, 通过扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscopy, SEM) 观察到阴极VACNT发射体的垂直排列形貌, CNTs图形化转移的优化方案很好地提升了阵列内CNTs的结构和一致性。

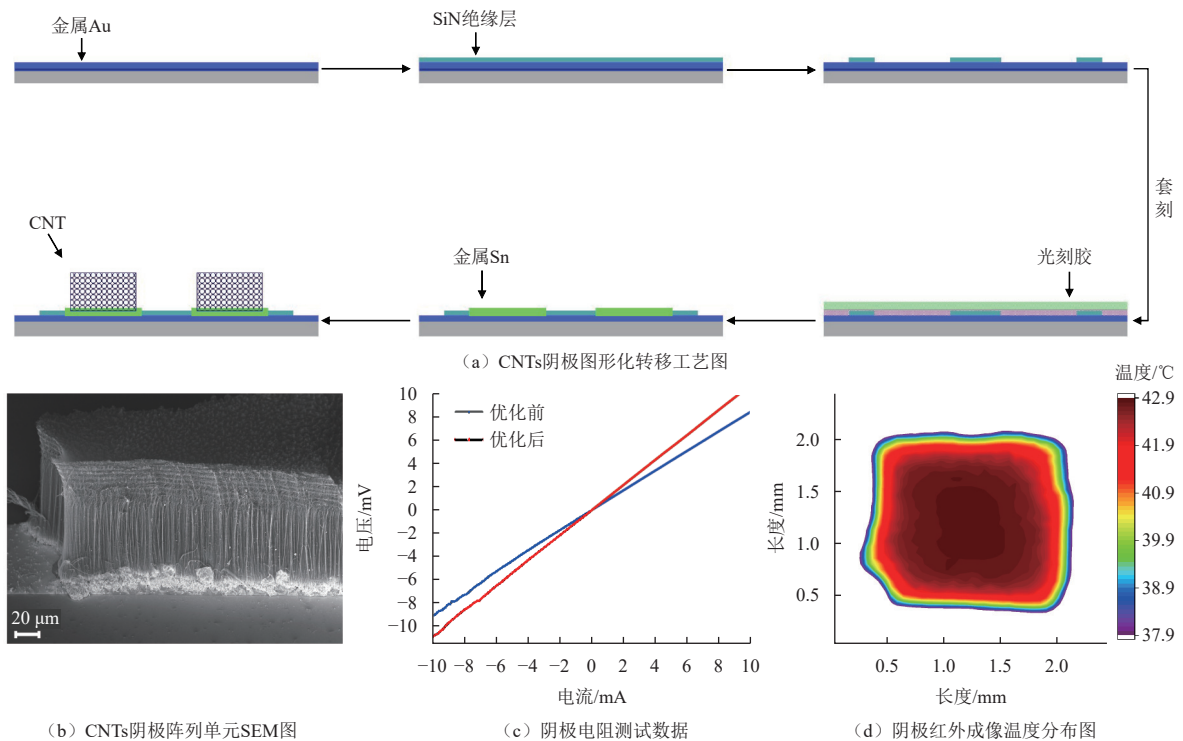


图3 CNTs场发射阴极图形化转移工艺流程、发射阵列单元SEM图、阴极电阻测试数据及红外成像温度分布

Fig. 3 Process flow diagram of CNTs cathode graphical transfer, scanning electron microscopy diagram of CNTs cathode array unit, test data of cathode resistance and temperature profile of cathode infrared imaging

完成CNTs的图形化转移流程后, 本文采用金属Cu板代替硅片, 构造了“三明治结构” (衬底-界面材

料-CNTs-界面材料-衬底), 对转移后阴极电阻开展测试。分别在两端Cu板连接导线, 并接通电源, 形成

多个“金属-CNTs-金属”并联的结构, 测得的电阻数据如图3(c)所示。结果显示, 图形化转移得到的整体结构电阻较优化前更小, 电阻值为 $0.8714 \pm 0.0016 \Omega$, 可很好地减少长期电子发射的产热。此外, 通过红外成像技术, 采用热源加热衬底, 同时记录阴极表面的温度分布情况, 得到了图3(d)所示的温度分布图以分析器件的传热特性。温度分布图显示, 阴极表面温度分布一致性较好, 导热速率更快, 接触热阻更小。

4 原理样机性能测试

为表征优化后的CNTs场发射阴极性能, 在真空腔内对CNTs阴极进行电流发射测试。测试前首先对CNTs阴极进行冲击、振动及冷热循环的环境模拟测试, 并分别采集环境模拟前后的测试数据进行对比, 将中和器件的阴极连接高压负压电源, 阳极连接低压负压源, 使二者之间形成电压偏置, 当偏置电压强度大于

开启电压, CNTs阴极启动电子发射; 采用镀金极板作为测试极并接地, 在真空环境下通过静电计分别测试并采集阳极和测试极的电流数据, 测试整体的真空条件为 1×10^{-6} Pa, 阴极和阳极间距 $500 \mu\text{m}$ 。环境模拟前后电子透过率(阳极电流/测试极电流)的数据对比如图4(a)所示, 得知在环境模拟之后, 阴极的电子透过率并未发生明显变化, 器件维持了较好的发射能力。

通过阶梯式升高偏置电压, 每个电压都进行1 min的电流数据采集, 采集频率3 Hz, 取中间段30 s的电流数据求取均值, 得到场发射电流与电场强度关系曲线图如图4(b)所示。结果表明, 当外加电压达到150 V左右时, 阴极启动电子发射, 发射电流随电压增加而逐渐增大, 测试的最高电流达到1 mA量级, 相应场发射电流密度达到了 $17.5 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 。

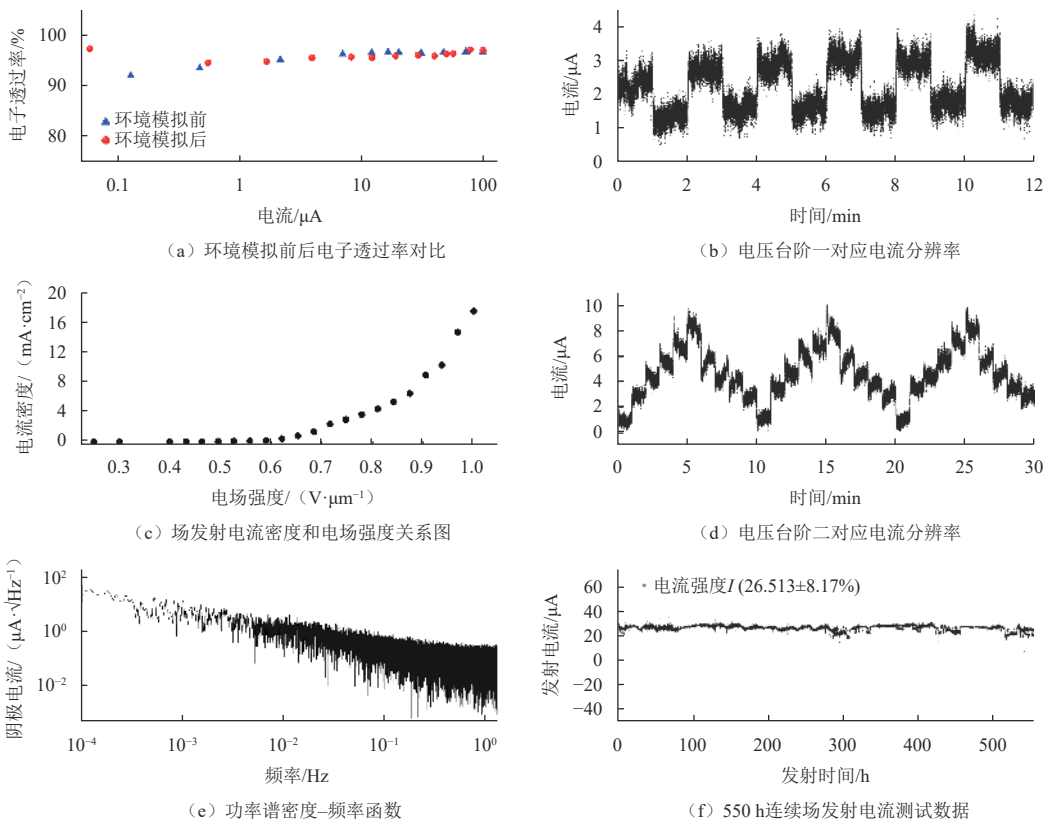


图4 环境模拟前后阴极透过率对比、场发射电流密度与电场强度关系、场发射功率谱密度-频率函数、电流分辨率以及550 h连续发射电流测试结果
Fig. 4 Comparison of electron transmittance before and after environmental verification, relationship between current density and electric field intensity of field emission, power spectral density-frequency function, resolution ratio of emission current and test data of 550-hour continuous field emission current

图4(d)和(e)显示了对连续场发射过程中电流数据进行平滑滤波处理后得到的电流分辨率图像。器件发射电流波动较小, 整体发射电流较为稳定, 测试的电流分辨率小于 $2 \mu\text{A}$ 。基于测试数据绘制的功率谱

密度-频率曲线如图4(c)所示, 反映了阴极的噪声分布情况。 $0.01 \sim 1 \text{ Hz}$ 噪声 $< 1 \mu\text{A} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 在低频区存在一定的噪声影响, 但无明显峰值, 在较高发射电流环境下, 电流波动较为平稳, 阴极整体具有较好的长期稳

定性。为验证图形化转移处理和工艺优化后的CNTs阴极的场发射长期稳定性,以电流为25 μA 的情况下实施连续550 h发射的稳定性测试,结果如图4(f)所示,场发射电流平均值与标准差为 $26.51 \mu\text{A} \pm 2.17 \mu\text{A}$,阴极开环运行下电流波动上下范围为 $\pm 8.17\%$ 。

5 结 论

针对空间引力波探测计划微牛级电喷推力系统对长寿命CNTs场发射阴极的需求,以高稳定、长寿命的CNTs场发射阴极作为研究重点,围绕提升CNTs场发射阴极的界面性能优化和边缘效应抑制展开了研究。对CNTs场发射阴极的失效机制进行分析,确定了系统的优化方案;提出采用图形化设计的CNTs场发射簇结构以提升阴极有效发射面积,通过物理仿真对CNT场发射簇结构展开优化设计,降低阵列边缘效应对整体场发射性能的影响;提出了一种基于熔融Au-Sn金属层的CNTs转移键合工艺,将CNTs发射体与衬底的接触由分子力维持转变为金属熔融键合,提高阴极的机械稳定性并降低了界面电/热阻抗。优化后的CNTs场发射阴极样机实现了0~1 mA的电流范围、 $<2 \mu\text{A}$ 的电流分辨率与 $1 \mu\text{A}/\text{Hz}^{1/2}@0.01 \sim 1 \text{ Hz}$ 的噪声水平,并通过了 $>550 \text{ h}$ 的连续发射试验,证明了阴极优化后的长周期稳定性。

参 考 文 献

- APLIN K L, KENT B J, COLLINGWOOD C M, et al. Use of coated silicon field emitters as neutralisers for fundamental physics space missions[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 48(7): 1265-1273.
- BETHUNE D S, KIANG C H, DE VRIES M S, et al. Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls[J]. *Nature*, 1993, 363(6430): 605-607.
- ZIEMER J, GAMERO-CASTAÑO M, HRUBY V, et al. Colloid micro-Newton thruster development for the ST7-DRS and LISA missions[C]//Proceedings of 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. [S. l.]: AIAA, 2005: 4265.
- OHKAWA Y, IKI K, OKUMURA T, et al. A quick review of an electrodynamic tether experiment on the H-II transfer vehicle[C]//Proceedings of 35th International Electric Propulsion Conference. Atlanta, USA: IEPC, 2017: 359.
- JIANWU H E, PENG L I U, RUNLIAN G A O, et al. Research on the neutralization control of the RF ion micropropulsion system for the 'Taiji-1' satellite mission[J]. *Plasma Science and Technology*, 2020, 22(9): 094002.
- CHENG Y, ZHOU O. Electron field emission from carbon nanotubes[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2003, 4(9): 1021-1033.
- COLLINS P G, HERSAM M, ARNOLD M, et al. Current saturation and electrical breakdown in multiwalled carbon nanotubes[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(14): 3128.
- BONARD J M, KLINKE C, DEAN K A, et al. Degradation and failure of carbon nanotube field emitters[J]. *Physical Review B*, 2003, 67(11): 115406.
- MURPHY E L, GOOD JR R H. Thermionic emission, field emission, and the transition region[J]. *Physical Review*, 1956, 2(6): 1464.
- FOWLER R H, NORDHEIM L. Electron emission in intense electric fields[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1928, 119(781): 173-181.
- JENSEN K L. Introduction to the physics of electron emission[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2017: 122-123.
- NILSSON L, GROENING O, EMMENEGGER C, et al. Scanning field emission from patterned carbon nanotube films[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(15): 2071-2073.
- JO S H, TU Y, HUANG Z P, et al. Effect of length and spacing of vertically aligned carbon nanotubes on field emission properties[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(20): 3520-3522.
- WANG X Q, WANG M, HE P M, et al. Model calculation for the field enhancement factor of carbon nanotube[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(11): 6752-6755.
- CHOI Y C, JEONG M S. Improvement of the field emission stability of carbon nanotube paste emitter by post-treatments[J]. *Carbon Letters*, 2009, 10(3): 234-238.
- VITALE V, CURIONI A, ANDREONI W. Metal-carbon nanotube contacts: the link between Schottky barrier and chemical bonding[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130(18): 5848-5849.
- MCNAMARA A J, JOSHI Y, ZHANG Z M. Characterization of nanostructured thermal interface materials-a review[C]//Proceedings of the International Symposium on Thermal and Materials Nanoscience and Nanotechnology. [S. l.]: Begel House Inc., 2011.
- BARAKO M T, GAO Y, WON Y, et al. Reactive metal bonding of carbon nanotube arrays for thermal interface applications[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2014, 4(12): 1906-1913.
- LIU J, JIANG D, FU Y, et al. Carbon nanotubes for electronics manufacturing and packaging: From growth to integration[J]. *Advances in Manufacturing*, 2013, 1: 13-27.
- JING L G. Simulation of field emission properties of carbon nanotubes [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- AHN Y, KIM S J, JEONG J W, et al. Overall control of field emission from carbon nanotube paste-emitters through macro-geometries for high-performance electron source applications[J]. *Carbon*, 2022, 189: 519-529.
- WONG Y M, KANG W P, DAVIDSON J L, et al. Array geometry, size and spacing effects on field emission characteristics of aligned carbon nanotubes[J]. *Diamond and Related Materials*, 2005, 14(11-12): 2078-2083.
- SHARMA K L. Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their applications[M]. New York: Springer, 2013: 2-6.
- AHMAD M, SILVA S R P. Low temperature growth of carbon nanotubes-A review[J]. *Carbon*, 2020, 158: 24-44.

作者简介:

陈泽宣(2001-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 场发射阴极。

通信地址: 华中科技大学物理学院引力中心A栋S529(430074)

电话: (027)87543940

E-mail: chanzx@hust.edu.cn

宋培义(1989-), 男, 副研究员, 主要研究方向: 航天微推进技术。本文通信作者。

通信地址: 华中科技大学物理学院引力中心A栋S513(430074)

电话: (027)87543940

E-mail: songpeiyi@hust.edu.cn

Research on Long Life Carbon Nanotube Cathodes for Deep Space Exploration Missions

CHEN Zexuan, XIAO Dongyang, DU Huanhuan, SONG Peiyi

(Precision Gravitational Measurement Facility, School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To meet the demand for long-life carbon nanotube field emission cathode in deep space exploration, the failure mechanism of CNTs cathode was investigated, and a long-life CNTs cathode design was introduced. Patterning the CNTs as an array of CNTs island offers a way to eliminate the shielding effects of electrical field. In this way the areas of emitting CNTs are larger, which avoids over-heating on a small emission area. A bonding technique was introduced, the contact between CNTs and substrate was maintained by molecular forces previously, melting metal was introduced as the bonding layer. The mechanical robustness of the CNTs cathode was enhanced while the electrical/thermal resistance was reduced. Performance tests were conducted on the prototype in a high vacuum environment. The prototype produced a current of 0–1 mA with a resolution less than 2 μA and the noise level was less than 1 $\mu\text{A}/\text{Hz}^{1/2}$ @ 0.01–1 Hz. The prototype was tested by over 550 hours' continuous emitting, showing good stability in long-term use.

Keywords: carbon nanotube; field emission cathode; array design; edge effects; transfer-bonding technique

Highlights:

- The failure mechanism of CNTs field emission cathode was analyzed, and it was recognized that the edge effect and interface thermal effect would lead to the reduction of the field emission performance of the cathode.
- An optimization method of arraying was proposed, and the structural design of CNTs emission clusters was optimized by using a graphical design to reduce the influence of edge effects, a transfer bonding process of CNTs based on molten.
- A transfer bonding process for CNTs based on molten Au-Sn metal layer was proposed to reduce the interface contact electrical/thermal resistance.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]