

· 电子源专辑 ·

# 超顺排碳纳米管场发射电子源在射频离子微推进中和器中的应用

柳 鹏<sup>1</sup>, 周段亮<sup>1</sup>, 张春海<sup>1</sup>, 潜 力<sup>1</sup>, 王昱权<sup>1</sup>, 马丽永<sup>1</sup>, 郭雪伟<sup>1</sup>,  
王福军<sup>1</sup>, 姜开利<sup>1</sup>, 范守善<sup>1</sup>, 贺建武<sup>2</sup>, 康 琦<sup>2</sup>

(1. 清华大学清华富士康纳米科技研究中心 清华大学物理系, 北京 100084;  
2. 中科院微重力重点实验室 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 本文报告了采用超顺排碳纳米管场发射电子源实现射频离子微推进器离子束流中和控制的研究工作。所报道的超顺排碳纳米管场发射电子源可以在 400~500 V 的电压下输出约数毫安的电子流, 可以满足推进器的中和任务要求, 在轨性能良好。具有发射电压低, 发射电流大, 工作稳定可靠的特点。

**关键词:** 碳纳米管; 场发射; 离子推进中和器

中图分类号: O53 文献标识码: A 文章编号: 1002-8935(2020)04-0023-05

doi:10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2020.04.03

## Application of Super-Aligned Carbon Nanotube Field Emission Electron Source in the Neutralizer of RF Ion Thruster

LIU Peng<sup>1</sup>, ZHOU Duan-liang<sup>1</sup>, ZHANG Chun-hai<sup>1</sup>, QIAN Li<sup>1</sup>, WANG Yu-quan<sup>1</sup>,  
MA Li-yong<sup>1</sup>, GUO Xue-wei<sup>1</sup>, WANG Fu-jun<sup>1</sup>, JIANG Kai-li<sup>1</sup>, FAN Shou-shan<sup>1</sup>,  
HE Jian-wu<sup>2</sup>, KANG Qi<sup>2</sup>

(1. Tsinghua-Foxconn Nanotechnology Research Center, Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
2. National Micro Gravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In this paper we report the application of super-aligned carbon nanotube field emission electron source in the neutralizer of RF ion thruster. The electron source can emit 1.5 mA current at 400~500 V to meet the neutralization requirement of the RF ion thruster, and it has excellent in-orbit performance with advantages of low emission voltage, large emission current, high stability and high reliability.

**Keywords:** Carbon nanotube, Field emission, Neutralizer of ion thruster

碳纳米管(CNT, carbon nanotube)直径在一纳米到几纳米之间, 具有非常高的力学强度和模量, 极高的导热能力和电流承载能力, 其功函数为 4.6 eV 左右, 室温下场电子发射能散为 0.11 eV, 约化亮度为  $(3 \pm 1) \times 10^9 \sim 9 \times 10^{11}$  A/(sr · m<sup>2</sup> · V), 单根碳纳米管的场电子发射电流可达微安量级, 是良好的场电子发射体<sup>[1-9]</sup>。碳纳米管的场电子发射一直以

来都是其应用研究的一个重要方向, 碳纳米管场发射体还具有可大面积制备的优点, 其应用在多种场景已经得到展示<sup>[10-12]</sup>。

空间领域是比较适合碳纳米管场电子发射应用的一个方向。首先, 外太空的高真空正好是碳纳米管场发射所需要的环境; 其次, 碳纳米管拥有比较好的力学电学等物理特性, 能够胜任外太空的苛刻环

基金项目: 科技部国家重点研发计划项目(2018YFA0208400, 2017YFA0205800); 自然科学基金项目(51672152, 51788104, 51727805); 北京未来芯片中心的项目

境中工作;同时,碳纳米管还具有质量轻、体积小等优点,能满足空间发射任务对载荷的要求。

空间引力波探测是当前科研的一个重大前沿。引力波是物质和能量的剧烈运动和变化所产生的一种物质波,一个世纪前爱因斯坦基于广义相对论预言了引力波的存在,双黑洞并合产生的引力波已于2015年首次在地面被直接观测到。引力波提供了有别于电磁波的一个全新的观测宇宙的重要窗口,成为人类探索和认识宇宙的新的途径和手段<sup>[13]</sup>。不同频率引力波反映了宇宙的不同时期和不同的天体物理过程。有别于地基探测,在空间能够探测到中低频段的引力波信号,可以发现天体质量更大、距离更遥远的引力波波源,揭示更为丰富的天体物理过程。由于引力波信号极其微弱,实施空间引力波探测挑战巨大,需要突破目前人类精密测量和控制技术的极限,所涉及的核心技术包括高精度超稳激光干涉仪、引力参考传感器、超高精度无拖曳控制、微牛级推进器、超稳超静卫星平台等。“太极一号”瞄准这一重大科技前沿,对这些核心技术的可行性和实现途径进行在轨验证<sup>[14]</sup>。

射频离子微推技术具有推力可控性强、分辨力高、噪声低、响应速度快、寿命长等优点,中和器是超高精度射频离子微推进系统的必备组件。离子喷出之后,需要采用中和器发射电子中和剩余的电荷,保证系统的稳定与安全。场发射中和器具有体积小、质量轻、功耗低、反应快等优点,同时不需要消耗工质;外太空的高真空条件还为场发射提供了良好的环境;场发射中和器非常适合于微型离子电推进器的电中和任务。

## 1 中和器研制及交付

本研究的场发射中和器的发射体采用了清华大学拥有独立知识产权技术生长的超顺排碳纳米管。超顺排碳纳米管具有宏观尺寸,方便加工和处理,其中的碳纳米管性能比较均匀一致,有利于碳纳米管优异性质的体现和组合,是一种理想的碳纳米管形式<sup>[15-17]</sup>;以这种碳纳米管制作的发射体可以保证发射性能的均匀一致稳定。基于作者所在的研究组在碳纳米管的场发射基本特性、碳纳米管场发射体的制备与集成、及其多种场景的应用等方面的研究基础,本研究中开展了碳纳米管场发射中和器的研发工作<sup>[7,11-12,18-28]</sup>。

超顺排碳纳米管经多层压实及高温处理,并进一步处理与激活,前期研究表明所制备碳纳米管具

有优异的电子发射能力<sup>[16,29]</sup>。图1(a)和(b)是制备的碳纳米管场发射体的扫描电子显微镜(SEM, scanning electron microscope)照片;图1(c)是单个发射单元的结构;图1(d)是四个发射单元组成一个中和器。电子由施加在阴栅之间的电场拉出,透过栅极后实现中和的功能。

中和器研制经过模样件、鉴定件、正样件多个步骤,按期交付卫星总体集成。为满足卫星发射及工作过程中的各项严苛的技术要求,研制过程包括了方案确定、发射体组装、处理、连接、栅极设计、绝缘与屏蔽、长寿命稳定测试、储存与运输等一系列步骤。图2是中和器样品地面寿命测试的结果,测试工作在恒流模式。在加速(10倍以上工作电流)条件下,100 h内样品性能随时间逐渐变得稳定,随后的100 h测试过程中电压升高仅10 V,考虑系统工作参数范围,这种稳定性可以满足卫星寿命的要求。组装后还经过正弦、随机、冲击震动等力学实验,以及高低温储存、高低温循环等环境实验,中和器组件满足卫星的各项要求。图3为组装在卫星上的碳纳米管场发射中和器(箭头所指为碳纳米管中和器)。

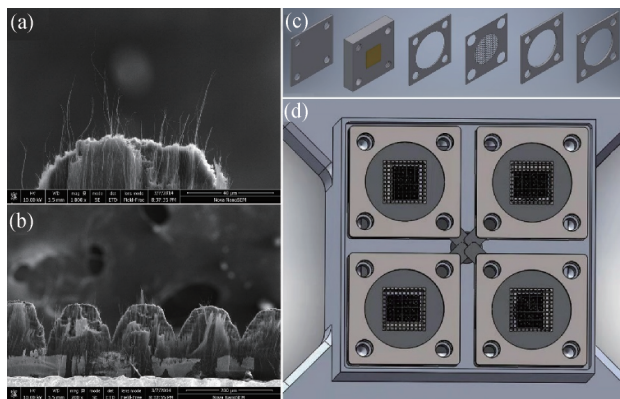


图1 超顺排碳纳米管电子发射体及中和器

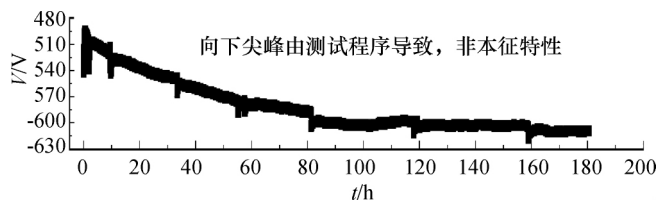


图2 老化寿命测试

## 2 在轨性能分析

卫星于2019年8月31日在酒泉卫星发射中心成功发射。

根据星上测量数据,可以对中和器的在轨工作的性能进行评估。两个中和器的发射特性曲线如图4(a)和(b)所示,表现了较好的参数一致性,同时

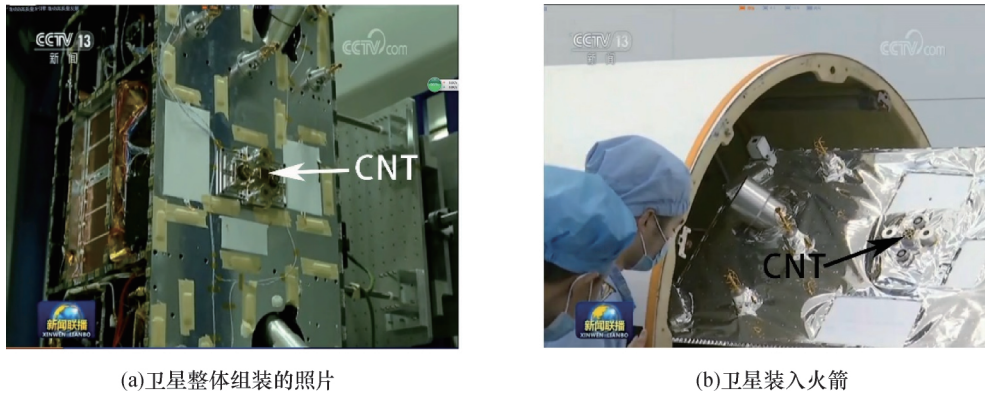


图3 组装在卫星上的碳纳米管场发射中和器照片

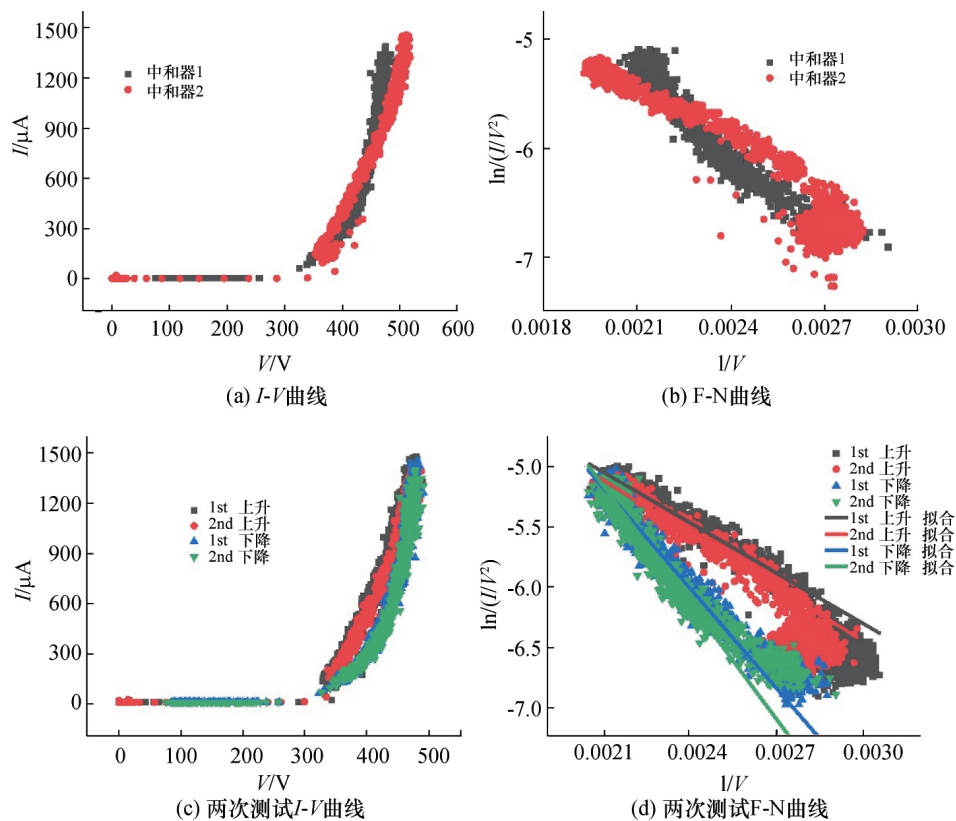


图4 碳纳米管阴极中和器在轨性能

还研究了不同时间测量时中和器的性能。图 4(c) 和(d) 展示了中和器 1 两次不同测试的  $I-V$  和 Fowler-Nordheim (F-N) 曲线, 曲线表现了良好的一致性。需要注意的是当对中和器进行性能测试时, 电压上升阶段和电压下降阶段的曲线并不重合, 相同发射电流情况下, 电压上升阶段比电压下降阶段的发射电压更低, 在多次测量中都呈现了这种现象。推测这可能反映了在轨状态下仍然存在一定的吸附脱附现象, 吸附状态的逸出功略小于脱附状态。根据轨道参数可以估计出所处的气体压强约为  $10^{-6}$  Pa, 这一真空度下仍然难以实现完全脱附。图

4(d) 拟合了电压上升和电压下降过程的 F-N 曲线斜率。若假设两种过程中碳纳米管场发射尖端状态保持稳定, 可以给出吸附状态的功函数约为脱附状态的  $2/3$ 。

与已报道的国际同类中和器比较, 如 Busek 公司提供给欧空局 LISA Pathfinder NASA 技术验证载荷 ST7-DRS 胶体推进器碳纳米管中和器的工作参数为工作电压  $250 \sim 800$  V, 发射电流  $10 \mu\text{A} \sim 1$  mA, 寿命  $13236 \text{ h} @ 100 \mu\text{A}, 6433 \text{ h} @ 1.0 \text{ mA}$ <sup>[30]</sup>; 德累斯顿工业大学所报道的中和器工作参数为工作电压  $500 \sim 3000$  V, 发射电流  $250 \mu\text{A}$  ( $8 \text{ mm} \times$

8 mm)<sup>[31]</sup>。本工作所研制的由超顺排碳纳米管作为发射体的中和器可以实现低电压工作,电流高于上述报道。

### 3 结论

本研究制备了基于超顺排碳纳米管厚膜的场发射电子源及其中和器,在轨测试表明中和器工作性能稳定。与国际同类结果相比,本研究的碳纳米管场发射电子源具有发射电压低、发射电流大的特点。该中和器与射频离子推进器联动实现了卫星所需要的射频微推功能,实现了微推进器亚微纳级分辨率推力输出。我们的工作实现了碳纳米管场发射电子源在轨正常工作,对于促进碳纳米管场发射阴极在空间的应用有重要意义。

致谢:感谢清华大学杜秉初教授及北京航空航天大学彭鹏教授的有益讨论和大力协助。

### 参 考 文 献

- [1] Baughman, R H, Zakhidov A A, de Heer W A. Carbon Nanotubes—the Route Toward Applications[J]. *Science*, 2002, 297 (5582): 787—792.
- [2] De Volder M F L, Tawfick S H, Baughman R H, *et al.* Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications[J]. *Science*, 2013, 6119 (339): 535—539.
- [3] Liu P, Wei Y, Jiang K L, *et al.* Thermionic Emission and Work Function of Multiwalled Carbon Nanotube Yarns [J]. *Phys Rev B*, 2006, 73 (23): 235412.
- [4] Franssen M J, van Rooy T L, Kruit P. Field Emission Energy Distributions from Individual Multiwalled Carbon Nanotubes[J]. *Appl Surf Sci*, 1999, 146 (1—4): 312—327.
- [5] de Jonge N, Lamy Y, Schoots K, *et al.* High Brightness Electron Beam from a Multi-walled Carbon Nanotube [J]. *Nature*, 2002, 6914 (420): 393—395.
- [6] Pascale-Hamri A, Perisanu S, Derouet A, *et al.* Ultra-short Single-Wall Carbon Nanotubes Reveal Field-Emission Coulomb Blockade and Highest Electron-Source Brightness[J]. *Phys Rev Lett*, 2014, 112 (12): 126805.
- [7] Wei W, Liu Y, Wei Y, *et al.* Tip Cooling Effect and Failure Mechanism of Field-Emitting Carbon Nanotubes[J]. *Nano Lett*, 2007, 7 (1): 64—68.
- [8] Purcell S T, Vincent P, Journet C, *et al.* Hot Nanotubes: Stable heating of Individual Multiwall Carbon Nanotubes to 2000 K Induced by the Field-Emission Current[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 88 (10): 105502.
- [9] Rinzler A G, Hafner J H, Nikolaev P, *et al.* Unraveling Nanotubes—Field-Emission from an Atomic Wire[J]. *Science*, 1995, 5230 (269): 1550—1553.
- [10] Heeres E C, Oosterkamp T H, de Jonge N, Size of the Localized Electron Emission Sites on a Closed Multi-walled Carbon Nanotube[J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 108 (3): 036804.
- [11] Hao H Y, Liu P, Tang J, *et al.* Secondary Electron Emission in a Triode Carbon Nanotube Field Emission Display and its Influence on the Image Quality[J]. *Carbon*, 2012, 50 (11): 4203—4208.
- [12] Liu P, Zhou D L, Zhang C H, *et al.* Carbon Nanotube Film Gate in Vacuum Electronic Devices [J]. *Nano Lett*, 2018, 18 (8): 4691—4696.
- [13] 百度百科. <https://baike.baidu.com/item/%E5%BC%95%E5%8A%9B%E6%B3%A2/726380?fr=aladdin>.
- [14] 中国科学报, [http://www.cas.cn/cm/201909/t20190920\\_4715708.shtml](http://www.cas.cn/cm/201909/t20190920_4715708.shtml)
- [15] Jiang K L, Li Q Q, Fan S S. Nanotechnology: Spinning Continuous Carbon Nanotube Yarns—Carbon Nanotubes Weave their Way into a Range of Imaginative Macroscopic Applications[J]. *Nature*, 2002, 6909 (419): 801—801.
- [16] Jiang K L, Wang J P, Li Q Q, *et al.* Superaligned Carbon Nanotube Arrays, Films, and Yarns: A Road to Applications [J]. *Adv Mater*, 2011, 23 (9): 1154—1161.
- [17] Zhang X B, Jiang K L, Teng C, *et al.* Spinning and Processing Continuous Yarns from 4-inch Wafer Scale Super-Aligned Carbon Nanotube Arrays[J]. *Adv Mater*, 2006, 18 (12): 1505—1510.
- [18] Fan S S, Chapline M G, Franklin N R, *et al.* Self-Oriented Regular Arrays of Carbon Nanotubes and their Field Emission Properties [J]. *Science*, 1999, 5401 (283): 512—514.
- [19] Liu P, Sun Q, Zhu F, *et al.* Measuring the Work Function of Carbon Nanotubes with Thermionic Method[J]. *Nano Lett*, 2008, 8(2): 647—651.
- [20] Sheng L M, Liu P, Liu Y M, *et al.* Effects of Carbon-Containing Gases on the Field-Emission Current of Multiwalled Carbon-Nanotube Arrays [J]. *J Vac Sci Technol A*, 2003, 21 (4): 1202—1204.
- [21] Liu P, Jiang K L, Wei Y, *et al.* Field Emission Behavior Study of Multiwalled Carbon Nanotube Yarn under the Influence of Adsorbents [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2010, 28 (4): 736—739.
- [22] Wei W, Jiang K L, Wei Y, *et al.* Measuring the Stress in Field-Emitting Carbon Nanotubes [J]. *Nanotechnology*, 2006, 17 (8): 1994—1998.

- [23] Wei Y, Wei W, Liu L, *et al.* Mounting Multi-walled Carbon Nanotubes on Probes by Dielectrophoresis[J]. *Diam Relat Mater*, 2008, 17 (11): 1877–1880.
- [24] Wei Y, Jiang K L, Liu L, *et al.* Vacuum-Breakdown-induced Needle-Shaped Ends of Multiwalled Carbon Nanotube Yarns and their Field Emission Applications [J]. *Nano Lett*, 2007, 7 (12): 3792–3797.
- [25] Wei Y, Weng D, Yang Y C, *et al.* Efficient Fabrication of Field Electron Emitters from the Multiwalled Carbon Nanotube Yarns[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89 (6): 063101.
- [26] Yang Y C, Qian L, Tang J, *et al.* A Low-Vacuum Ionization Gauge with HfC-Modified Carbon Nanotube Field Emitters[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92 (15): 153105.
- [27] Wei Y, Xiao L, Zhu F, *et al.* Cold Linear Cathodes with Carbon Nanotube Emitters and their Application in Luminescent Tubes[J]. *Nanotechnology*, 2007, 18 (32): 325702.
- [28] Liu P, Wei Y, Liu K, *et al.* New-Type Planar Field Emission Display with Superaligned Carbon Nanotube Yarn Emitter [J]. *Nano Lett*, 2012, 12 (5): 2391–2396.
- [29] Liu P, Zhou D L, Zhang C H, *et al.* Crystalline Multi-wall Carbon Nanotubes and their Application as a Field Emission Electron Source [J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(34): 345601.
- [30] Anderson G, Anderson J, Anderson M, *et al.* Experimental Results from the ST7 Mission on LISA Pathfinder[J]. *Physical Review D*, 2018, 98 (10): 102005.
- [31] Bock D, Tajmar M. Highly Miniaturized FEED Propulsion System (NanoFEED) for Attitude and Orbit Control of CubeSats[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 144: 422–428.

收稿日期: 2019-11-29

#### 作者简介:



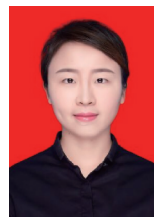
柳鹏(1980—),男,副研究员,主要研究方向为低维纳米材料真空电子学研究与应用;E-mail: pengliu@tsinghua.edu.cn。

#### (上接第 13 页)

- [59] Chen L, Tian J, Zhao T, *et al.* Simulation of the Electron Collection Efficiency of a PMT Based on the MCP Coated with High Secondary Yield Material[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2016, 835: 94–98.
- [60] Chen L, Wang X, Tian J, *et al.* The Gain and Time Characteristics of Microchannel Plates in Various Channel Geometries[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2016, 64(4): 1080–1086.
- [61] Zhu Y, Cao Y, Gao F, *et al.* The Mass Production and Batch Test Result of 20 MCP-PMTs[J]. *Nuclear Inst and Methods in Physics Research A*, 2020, 952: 162002.
- [62] Chang Y, Huang G, Heng Y. The R&D of the 20 in. MCP-PMTs for JUNO[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2016, 824: 143–144.

收稿日期: 2020-05-23

#### 作者简介:



郭乐慧(1992—),中国科学院西安光学精密机械研究所,博士,主要研究方向为电子光学设计。

通讯作者:田进寿(1970—),研究员,博士,博士生导师,中国科学院西安光学精密机械研究所条纹相机成像技术学科带头人主要从事超快诊断技术、光电成像技术、平板显示技术等方向的研究工作;E-mail: tianjs@opt.ac.cn, Tel: 18089299156。