

高性能强流脉冲电子束源关键技术研究*

荀 涛, 杨 汉 武, 张 军, 刘 列, 张 建 德

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 高功率微波技术研究所, 长沙 410073)

摘 要: 强流脉冲电子束源是高功率微波系统的核心部件之一, 针对未来应用需求, 亟需从绝缘、束流输运和热管理等多个方面提升强流束源技术性能。介绍了国防科技大学在高功率微波源用强流真空电子束源方面的研究进展。针对高功率微波管保真空需求, 基于陶瓷金属钎焊, 设计并研制了一种强场陶瓷真空界面, 耐压大于 600 kV、平均绝缘场强达到 44 kV/cm、耐受脉宽大于 80 ns、重复频率运行稳定; 研制了一种基于 SiC 纳米线的强流电子束源冷阴极, 在 90 kV/cm 的场条件下获得了 1.17 kA/cm² 的束流密度, 相比传统天鹅绒阴极, SiC 纳米线阴极的宏观电稳定性、发射均匀性及运行寿命均得到显著提高; 针对相对论返波管, 研制基于螺旋水槽型的强流电子束收集极, 克服了高比能和低流速的矛盾, 耐受热流密度达到 10¹² W/m², 能够满足系统长脉冲、高重复频率运行要求。

关键词: 高功率微波; 强流电子束源; 陶瓷真空界面; 纳米线阴极; 阳极热管理

中图分类号: TL503

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190375

Development of high performance, high-current pulsed electron beam sources

Xun Tao, Yang Hanwu, Zhang Jun, Liu Lie, Zhang Jiande

(College of Advanced Interdisciplinary studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: As a core part, the performance of a high-current electron beam source is inevitably essential for high-power sources and accelerators. The attractive features are high-electric field vacuum interface, high quality high current density electron emission, and high peak thermal load collector, which are compatible with high repetition rate operations. This paper presents an optimized ceramic insulation structure with hold-off voltage pulse of 600 kV, 100 ns, and 5 Hz. Mechanisms and surface improvements are developed. Large-scale, well-aligned SiC nano-wires as high-current, pulsed electron beam emitters are explored. They show an superior advantage on cathode lifetime and emission quality. In addition the thermal control and cooling methods for a repetitively operated high current collector are gathered, and the specially designed device can work stably with a heat flux of 10¹² W/m². These efforts make solid contributions to the HPM sources for practical use.

Key words: high-power microwave; high-current electron vacuum source; ceramic-vacuum interface; nano-wire cathode; anode thermal control

强流脉冲电子束源是高功率微波系统的核心部件之一, 用于产生强流相对论电子束^[1], 如图 1 所示。通常强流脉冲电子束源包含真空界面、阴极(发射极)以及阳极(收集极)三个方面。随着高功率微波向重复频率、长寿命发展, 强流脉冲电子束源中涉及的问题已成为系统的瓶颈。对于未来高机动、紧凑性装置, 强流束源必须同时满足绝缘、束流输运以及热管理的要求。

具体而言, 强流脉冲电子束源中的真空界面用于隔离脉冲功率驱动源中的工作介质(如去离子水、变压器油、SF₆等)及微波源中的真空环境。在强流束发射之前, 该界面通常将承受几百 kV 甚至 MV 量级的脉冲电压, 而由于沿面闪络^[2-3], 真空界面往往成为高功率流的限制因素。随着高功率微波系统的实用化进程, 要求强流束源、微波源及辐射天线组成的真空室具备脱离地面机组后、长时间保持工作真空度的能力^[4-5]。为了严格控制气源, 意味

* 收稿日期: 2019-09-23; 修订日期: 2019-12-03

基金项目: 高功率微波技术重点实验室基金项目(614260502010417); 国家自然科学基金项目(61771482)

作者简介: 荀涛(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事强流真空电子学和强场微波光子学相关技术研究; xtao_0301@hotmail.com。

着采用全封闭的微波管技术,这要求在强流束源真空界面采用陶瓷-金属封装。陶瓷材料具有出气率低、耐高温烘烤且易于和金属焊接等优点,但相比于有机高分子材料,陶瓷介电常数较高,不易加工、形状不能任意控制,这将给强流真空界面的绝缘带来很大不利。特别是针对系统结构紧凑、小型化的要求,如何增加强流束源绝缘可靠性,避免发生真空沿面闪络,是使用陶瓷需要解决的关键问题之一^[6-7]。

强流电子束源阴极直接影响甚至决定着高功率微波器件的技术性能^[8-15]。在单次运行的高功率微波系统中,对强流电子束源的要求是能够提供 kA/cm^2 量级的束流密度且发射均匀即可^[16];而实现高功率微波源重复频率且长时间运行^[17],就要求强流电子束源不仅具备较高的束流发射品质,还要能耐烧蚀、放气量小、寿命长,能够在重复频率下稳定可靠^[18-19]。制备和研究高电流密度、高稳定性的强流电子束源阴极尤为迫切和关键。

由阴极产生的强流电子束经过束波作用区后将一部分动能转换为微波能量,最后到达收集极^[11,20-24]。目前,绝大多数高功率微波源的能量效率不及 30%,这意味着到达收集极的电子束仍具有较高的能量。高的热流密度将使收集极材料表面温度骤然升高,引起材料表面吸附气体热脱附甚至材料表面的蒸发汽化,蒸发物质被电子束碰撞电离会引起二次电子以及不必要等离子体的形成^[25-26]。更为严重的是,当高功率微波源以一定重复频率连续运行时,如果不能在脉冲串间隔期内把热量迅速散开,甚至会导致收集极局部温度超过材料熔点而发生熔蚀,成为高功率微波系统可靠运行的瓶颈。

基于此,本论文通过高频电磁场有限元仿真和实验验证,获得了对真空三结合点屏蔽和对陶瓷沿面匀场控制的技术措施,解决了高电场梯度陶瓷绝缘子的设计难题,相比传统电真空封装器件,在陶瓷直径不超过 40 cm 的前提下,陶瓷绝缘子的耐受电压等级达到 600 kV。其次,本文将纳米材料引入强场发射阴极中,在明确 SiC 纳米线纳米效应、阴极微观形貌与束流发射品质内在联系的基础上,研制获得了束流发射密度达到 kA/cm^2 量级、运行寿命大于 10^5 个脉冲的 SiC 纳米线阴极。此外,本文还提出了一种基于双螺旋结构的水冷收集极,实验表明该收集极能够承受 $10^{12} \text{ W}/\text{m}^2$ 的热流密度,满足重复频率高功率微波源的长时间运行。

1 陶瓷真空界面

对于陶瓷真空界面而言,首先应通过调整结构位型减小陶瓷沿面电场,并使其尽可能均匀;其次应严格控制阴、阳极三结合点区域场强,使其在允许值以下;对于陶瓷-金属封接部件,由于需要可伐作为匹配金属,对焊料的屏蔽值得关注。针对上述要求,图 2 给出了一种针对磁绝缘线振荡器、基于陶瓷-金属封接的真空界面结构,陶瓷两侧分别为去离子水液体介质和真空。为了验证该结构的有效性,采用 ANSYS 进行了静电场分析,重点关注了沿面电场分布和阴、阳极三结合点区域的平均电场幅值。

模拟中,取阴极电压为 -600 kV ,阳极为零电位;氧化铝陶瓷介电常数取 8.8,真空取 1.0,去离子水取 81。由于模型具有轴对称性,取 1/2 平面进行计算,其中底边线为对称轴。

图 3 给出了典型模拟结果。其中,图 3(a) 给出了包含微波产生器件局部结构的陶瓷真空界面电场分布;图 3(b) 为等势线分布。陶瓷沿面电场分布较为均匀,600 kV 外加电压时,总场强最大值小于 $90 \text{ kV}/\text{cm}$,沿面分量最大值小于 $60 \text{ kV}/\text{cm}$ 。

将上述陶瓷真空界面与微波源装配后共同构成真空强流负载,并在重复运行的 30 GW 级脉冲功率源平台上开展了耐压测试。脉冲功率驱动源主要构成包括充电电源、原边电容、初级触发开关、脉冲变压器、脉冲形成线、主开关、变阻抗传输线及相关诊断和测量设备,输出脉宽约 80 ns,形成线最大工作电压大于 1 MV,重复频率 1~10 Hz 可调,能够满足真空界面的测试要求。使用电容分压器测量二极管电压,罗氏线圈测量二极管电流。5 Hz, 50 个脉冲的典型初级放电电流波形、形成线充电电压波形以及二极管电压波形如图 4 所示。

当二极管运行在 600 kV 电压等级时,在置信度为 90% 时,该绝缘结构总体可靠度下限超过 97%。

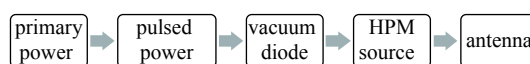


Fig. 1 Typical layout of high-power microwave system

图 1 典型高功率微波系统组成

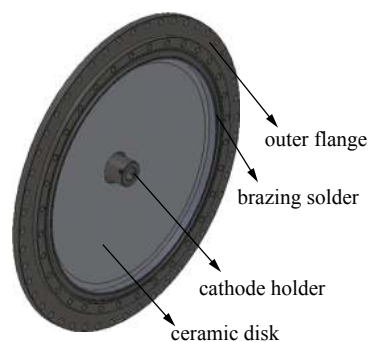


Fig. 2 A disk type ceramic-metal interface with coaxial power supply

图 2 一种同轴馈电型陶瓷真空界面

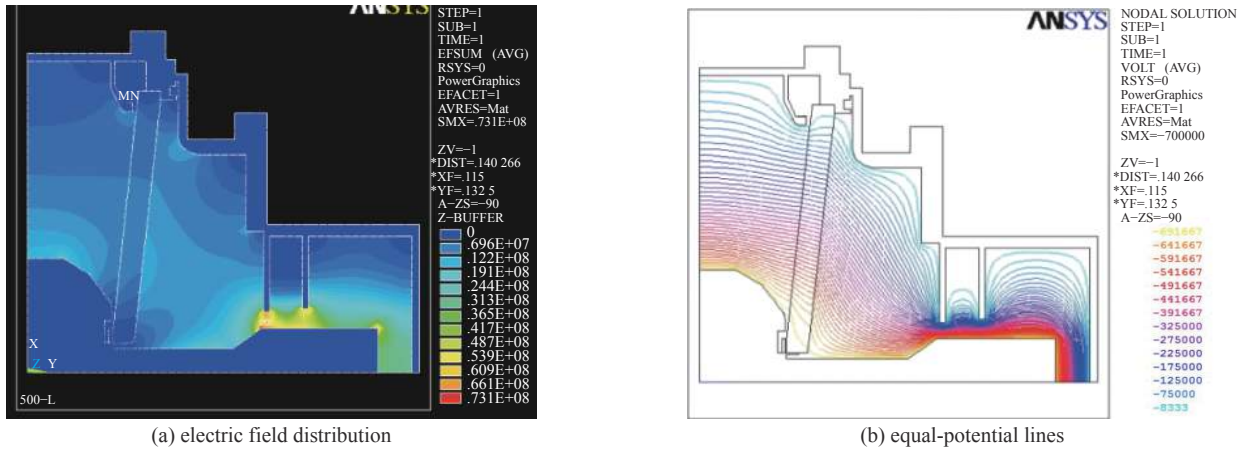


Fig. 3 Electro-static simulation results of the insulation structure

图 3 驱动微波源负载的绝缘结构模型及静电场模拟结果

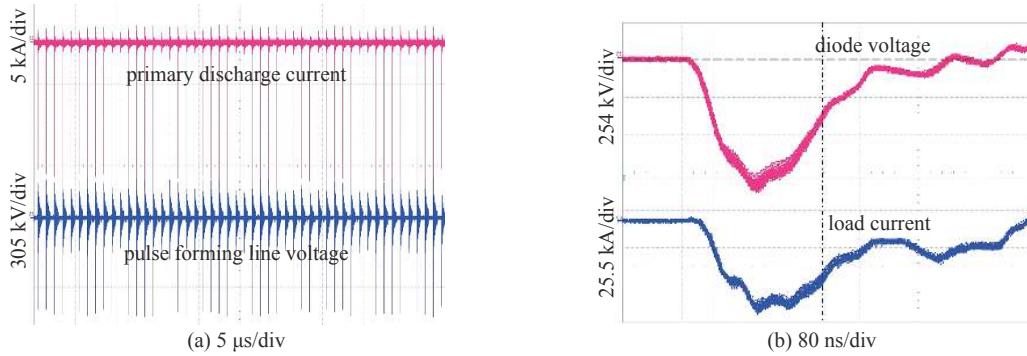


Fig. 4 Typical repetitive results of the ceramic insulation structure

图 4 陶瓷真空界面典型重复频率测试结果

2 SiC 纳米线强流电子束源冷阴极

SiC 纳米线是一种宽带隙半导体材料，具有纳米级发射尖端、大长径比、高熔点、高导热率、高击穿电压以及很好的热稳定性和化学稳定性等优点^[27]。SiC 纳米线微观结构及阴极实物如图 5 所示。

首先，SiC 纳米线微观形貌具有较大的长径比，高电压加载时，发射点的场增强因子较大，其表面势垒降低和变窄就更明显，电子则更容易通过隧穿进入真空形成电流。每根纳米线在阴极表面引起局部场增强点，这类似于场致发射阵列内发射极端头所产生的场增强点，而且沿表面的这些点具有相当高的密度，预示了这种阴极具有在较低的平均电压而电流密度很高的条件下工作的潜力。其次，碳化硅纳米线在制备过程中经过高温处理，在 1 800 ℃ 以下的 Ar 气流中退火后没有明显的形貌变化，具有很好的热稳定性。在发射过程中，不会产生天鹅绒阴极的熔蚀现象，纳米线尖端尺寸变化不大，可以保持发射性能稳定和长寿命运行。另外，基于 SiC 材料良好的热稳定性和化学稳定性，在多脉冲或高重复频率运行时由于焦耳热而发生的材料降解以及表面气体的高温脱附导致的真空度降低将得到抑制或缓解，阴极脉冲放气量和高功率微波源连续运行时的二极管真空度将有可能提高和改善。

纳米线阴极测试的脉冲功率源输出电压 300~500 kV 可调，二极管阴、阳极间距为 50 mm，电压和电流测量分别采用电容分压器和罗氏线圈。高速相机曝光时间为 3 ns。

基于爆炸电子发射和表面闪络原理工作的强流电子束冷阴极的本质是一种等离子体源，阴极等离子体的产生、发展以及造成的影响决定了其工作性能。基于此，在相同二极管结构中通过对比研究常规天鹅绒阴极和 SiC 纳米线阴极的等离子体特性，包括阴极启动过程、阴极等离子体膨胀、宏观稳定性以及真空兼容性等方面系统分析 SiC 纳米线的强流发射特性。典型电压、电流波形及二极管阻抗演化规律如图 6 所示。

结果表明，SiC 纳米线阴极的电子发射阈值场强为 (17 ± 3) kV/cm，约为常规天鹅绒阴极的 2/3；电场强度上升率相同时，SiC 纳米线阴极比常规天鹅绒阴极启动时间段 12~17 ns。

此外，还对两种阴极在重复频率运行时的稳定性进行了对比，如图 7 所示。

固定重复频率 20 Hz，连续运行 120 发次后，SiC 纳米线宏观形貌未发生明显变化，束流由 1.3 kA/cm² 下降至

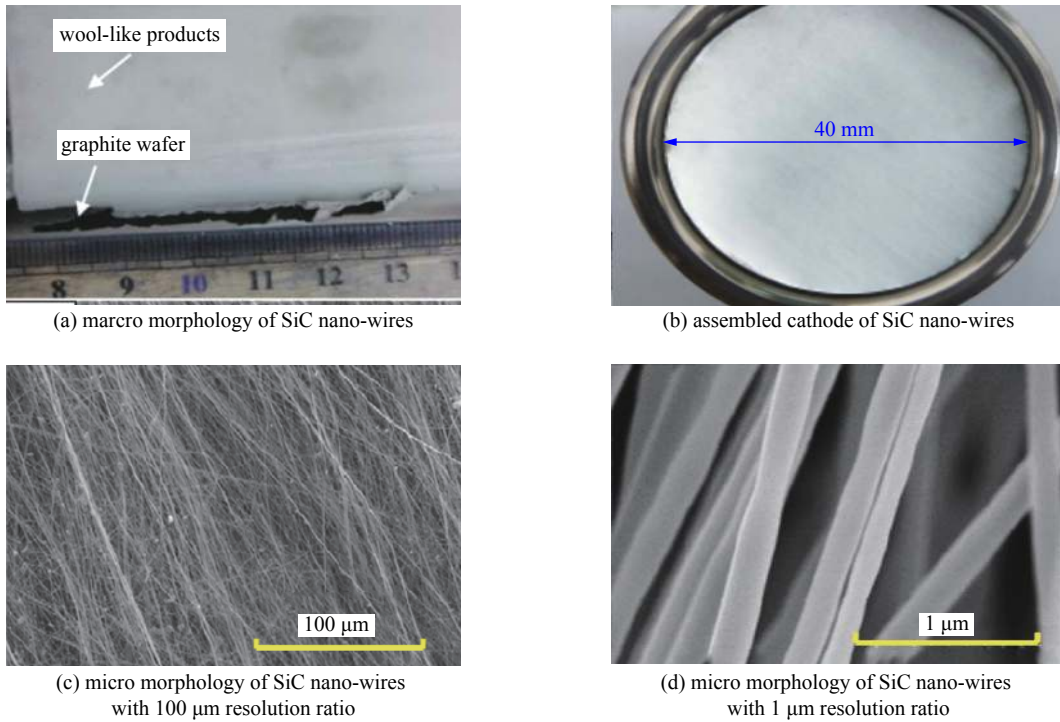


Fig. 5 Structure of SiC nano-wire
图 5 SiC 纳米线微观结构及阴极实物

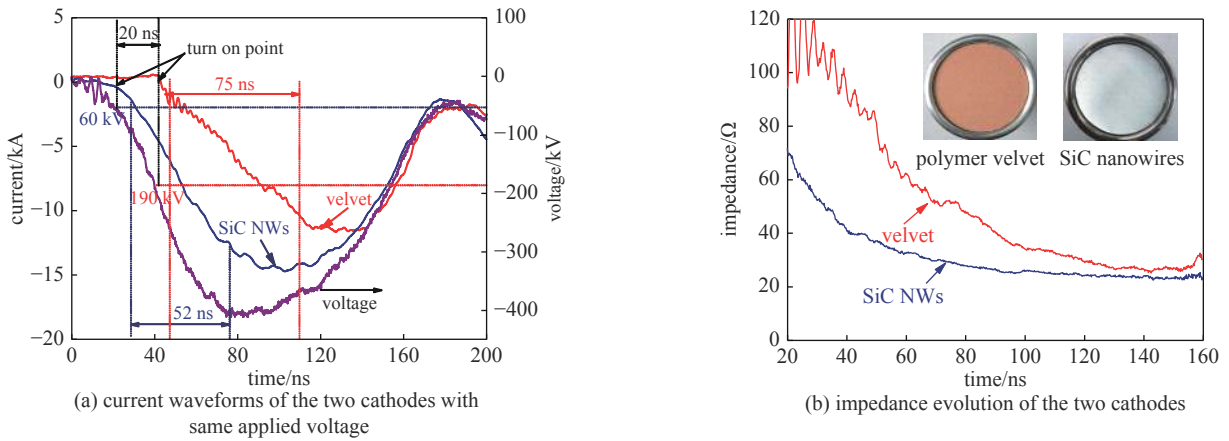


Fig. 6 Comparison of SiC nano-wires and velvet cathodes
图 6 SiC 纳米线阴极与常规阴极典型比较结果

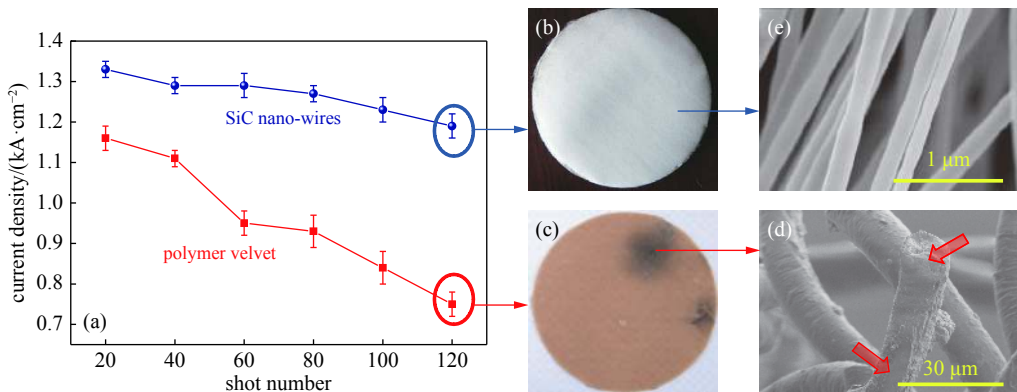


Fig. 7 Comparison of stability of the two cathodes under repetitive operation
图 7 两种阴极重复频率运行稳定性比较

1.2 kA/cm²; 相对的, 天鹅绒阴极表面形貌发生畸变, 纤维表面弯曲、碳化, 甚至脱落。阴极烧蚀是一个复杂的等离子体化学过程, 影响因素主要包括电流密度、电子轰击以及阳极溅射等。由实验结果可以看出, 研制的 SiC 纳米线阴极相比传统阴极, 耐烧蚀程度明显优于传统阴极, 同时具备 kA/cm² 束流发射量级的能力。目前, 研制的 SiC 纳米线阴极已累积运行 10⁵ 发次, 该阴极的研制成功有望为低阻高功率微波源的重复频率运行提供满足应用需求的强流电子束源。

3 强流电子束收集极热管理

收集极热量是由一定密度的电子束打到收集极内表面而产生, 在施加热载荷时首先要将进入收集极的电子束功率密度换算成热流密度。高能电子束轰击材料表面由于碰撞、电离及韧致辐射引起的能量净损失由 dE/ds 表征, 单位为 MeV·cm²·g⁻¹, 其中 E 为电子能量, 定义 $s=x\rho$, x 为电子穿透深度, ρ 为材料密度^[28]。

以 700 keV, 7 kA 为例, 对于不锈钢材料, 其能量净损失 dE/ds 为 1.376 MeV·cm²·g⁻¹, $x\rho$ 为 0.395 2 g/cm²。重复频率 30 Hz 脉冲加载时的不同对流换热条件下的典型升温模拟结果以及 10 s 冷却后的全过程温度历史曲线如图 8 所示, 连续运行 10 s 后的温度分布云图如图 9 所示。

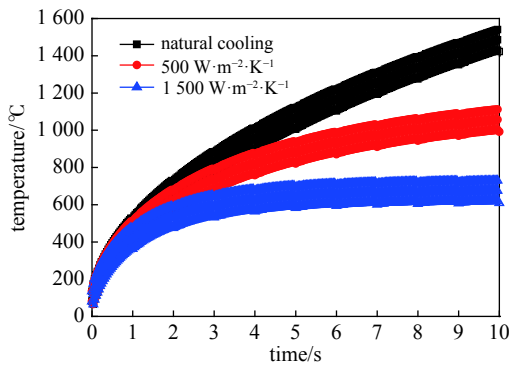


Fig. 8 Temperature evolution of the collector

图 8 收集极典型温度历史曲线模拟结果

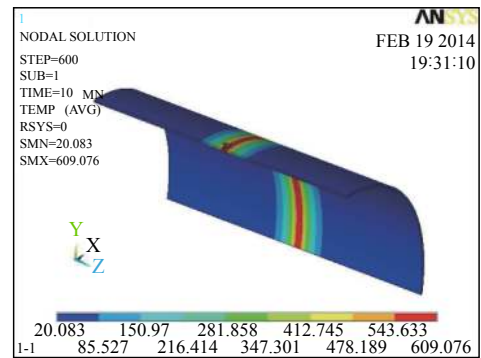


Fig. 9 Temperature distribution after 10 s continuous operation

图 9 连续运行 10 s 后的温度分布 ($h_c=3000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)

由上述模拟结果可以看出, 对流换热系数的改变对散热效果有着显著的影响。鉴于此, 改进了原有收集极冷却道结构, 让流体沿规定轨道运行, 确保被冷却区域有均匀的流速, 从而提供相应的对流换热能力。典型的螺旋水道流线和压力分布如图 10 所示。

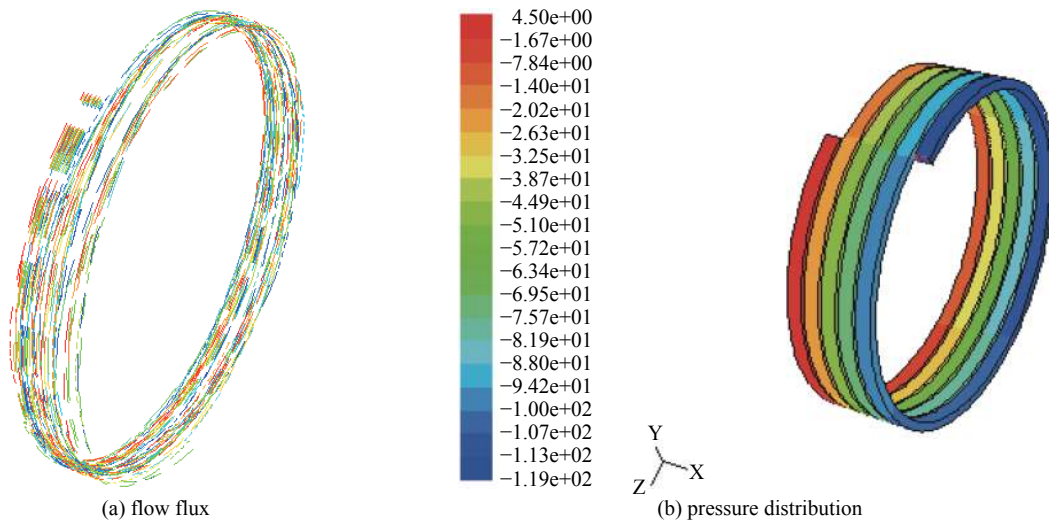


Fig. 10 Typical fluid simulation results of the spiral flow channel

图 10 螺旋水道典型流体模拟结果

基于 GW 级、重复频率长脉冲功率源实验平台(输出电压 300~700 kV、脉宽 150 ns、重复频率 1~30 Hz 可调, 连续运行时间不小于 30 s), 开展了金属收集极的初步重复频率运行测试。在前期研究中, 二极管强流束为空心环状, 相应地, 收集极结构为中空的圆筒状。图 11 给出了重复频率脉冲驱动源在 30 Hz、运行 10 s 时的典型电压、电流波形。

4 结 论

高功率微波系统中的强流脉冲电子束源衔接了脉冲功率源和微波源,通常包含三个方面的内容,真空界面(绝缘子)、阴极(发射极)以及阳极(收集极)。对于未来高机动、紧凑性装置,真空界面必须是经过专门设计,同时满足绝缘、机械、束流输运以及真空要求的材料、结构和位型;阴极材料及其发射技术更是关乎微波产生器件性能优劣的关键部件;而收集极热管理则是 GW 级重复频率微波器件长寿命运行、迈向实战应用的重要环节。

本文工作紧密围绕高功率微波系统的实用化需求,在强流束源真空绝缘方面,提出了一种同轴馈电型陶瓷真空界面,在 600 kV, 80 ns 重复脉冲加载条件下,该陶瓷真空界面平均绝缘场强达到 44 kV/cm,运行稳定;采取 (0-1) 分布对实验结果进行了统计分析,在置信度为 90% 时,该绝缘结构总体可靠度下限大于 97%,相关设计原则和方法可供其他形状和结构参数的陶瓷真空界面参考。在强流电子束源冷阴极方面,将新型纳米材料融入强场发射体,使冷阴极的发射束流密度达 kA/cm^2 量级,束流品质优于目前常规天鹅绒阴极,将为未来低阻高功率微波器件的实用化奠定重要基础。在重复频率收集极热管理方面,提出了一种双螺旋水道结构的水冷收集极结构,使得其耐受热流密度达 $10^{12} \text{ W}/\text{m}^2$,能够满足微波源长脉冲、重复频率 30 Hz 运行的需求,解决了重复频率、高脉冲能量微波器件向样机转化的瓶颈问题。

未来,综合新材料、新工艺以及新的诊断和设计方法,将进一步提升强流真空电子束源的性能指标,为高功率微波的实用化奠定重要基础。

参 考 文 献:

- [1] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E. High power microwaves[M]. 3rd ed. London: Taylor & Francis Group, 2015.
- [2] Walter J W, Lynn C F, Dickens J C, et al. Operation of a sealed-tube-vircator high-power-microwave source[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2012, 40(6): 1618-1621.
- [3] Xun Tao, Yang Hanwu, Zhang Jiande, et al. A ceramic radial insulation structure for a relativistic electron beam vacuum diode[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79: 063303.
- [4] Xun Tao, Zhang Jiande, Yang Hanwu, et al. A distributed pumping model for a repetitively operated magnetically insulated transmission line oscillator[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113: 164505.
- [5] Xun Tao, Fan Yuwei, Yang Hanwu, et al. A vacuum-sealed, giga-watt class, repetitively pulsed high-power microwave source[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121: 234502.
- [6] Xun Tao, Zhang Jiande, Yang Han-Wu, et al. Hydrodynamic loading of ceramic components due to pulsed discharge in water[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2009, 37(10): 1975-1979.
- [7] Xun Tao, Yang Hanwu, Zhang Jiande. A high-vacuum high-electric-field pulsed power interface based on a ceramic insulator[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2015, 43(12): 4130-4135.
- [8] Krasik Y E, Yarmolich D, Gleizer J Z, et al. Pulsed plasma electron sources[J]. *Physics of Plasmas*, 2009, 16(5): 7103.
- [9] Liu Guozhi, Sun Jun, Shao Hao, et al. Research on an improved explosive emission cathode[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(12): 5204-5209.
- [10] Zhang Jun, Jin Zhenxing, Yang Jianhua, et al. Recent advance in long-pulse HPM sources with repetitive operation in S-, C-, and X-bands[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2011, 39(6): 1438-1445.
- [11] Shiffler D, Haworth M, Cartwright K, et al. Review of cold cathode research at the Air Force Research Laboratory[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2008, 36(3): 718-728.
- [12] Levine J S, Harteneck B D. Repetitively pulsed relativistic klystron amplifier[J]. *Applied Physics Letter*, 1994, 65: 2133-2135.
- [13] Xun Tao, Yang Hanwu, Zhang Jiande, et al. Effects of vacuum pressures on the performance of a velvet cathode under repetitive high-current pulse discharges[J]. *Vacuum*, 2010, 85: 322-326.
- [14] Xun Tao, Zhang Jiande, Yang Hanwu, et al. Characteristics of a velvet cathode under high repetition rate pulse operation[J]. *Physics of Plasmas*, 2009, 16: 103106.
- [15] Xun Tao, Zhao Xuelong, Li Gongyi, et al. High-current, pulsed electron beam sources with SiC nanowire cathodes[J]. *Vacuum*, 2015, 125: 81-84.
- [16] Xun Tao, Zhang Jiande, Li Gongyi, et al. Performance of a SiC-nanowire-based explosive-emission pulsed plasma electron source[J]. *Applied Physics Express*,

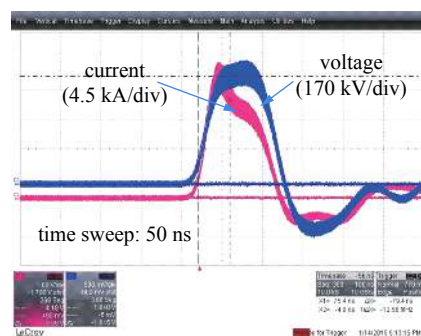


Fig. 11 The applied pulsed power on the collector (150 ns, 30 Hz, and 300 pulses)

图 11 收集极耐受长脉冲(150 ns)、30 Hz 典型电压电流波形(300 个脉冲)

- 2016, 9: 106001.
- [17] Friedman M, Myers M C, Chan Y, et al. Properties of ceramic honeycomb cathodes[J]. *Applied Physics Letter*, 2008, 92: 141501.
- [18] Dunaevsky A, KrasikYa E, Feisteiner J, et al. Electron diode with a large area ferroelectric plasma cathode[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 90(8): 3689-3698.
- [19] KrasikYa E, Gleizer J Z, Yarmolich D, et al. Characterization of the plasma on dielectric fiber (velvet) cathodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98: 093308.
- [20] 梁玉钦, 邵浩, 孙钧, 等. 引导磁场对收集极中电子能量沉积的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 25: 063010. (Liang Yuqin, Shao Hao, Sun Jun, et al. Influence of guiding magnetic field on energy deposition of electrons in collector[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 25: 063010)
- [21] 荀涛, 杨汉武, 张自成, 等. 重复频率运行强流电子束收集极热特性[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 22(11): 3064-3068. (Xun Tao, Yang Hanwu, Zhang Zicheng, et al. Thermal characteristics of repetitively operated high-current beam collector[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 22(11): 3064-3068)
- [22] 霍少飞, 孙钧, 梁玉钦, 等. 不锈钢电子束收集极的损伤能量密度阈值[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 063008. (Huo Shaofei, Sun Jun, Liang Yuqin, et al. Damage threshold of energy density of stainless steel electron beam collector[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 063008)
- [23] Ju Jinchuan, Fan Yuwei, Zhong Huihuang, et al. An improved X-band magnetically insulated transmission line oscillator[J]. *Physics of Plasmas*, 2009, 16: 073103.
- [24] Cai Dan, Liu Lie, Ju Jinchuan, et al. Simulative research on the anode plasma dynamics in the high-power electron beam diode[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22: 073108.
- [25] Mesyats G A. Cathode phenomena in a vacuum discharge: The breakdown, the spark and the Arc[M]. Moscow: Nauka, 2000.
- [26] Xun Tao, Yang Hanwu, Zhang Jun, et al. Properties of an intensive relativistic electron beam collector under repetitive pulse operation[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2016, 44(6): 957-962.
- [27] Li GongYi, Li Xiaodong, Chen Zhongdao, et al. Large areas of centimeters-long SiC nanowires synthesized by pyrolysis of a polymer precursor by a CVD route[J]. *Journal of Physics and Chemistry C*, 2009, 113: 17655-17660.
- [28] Shultis J K, Faw R E. Fundamentals of nuclear science and engineering[M]. New York: Dekker, 2002.