

文章编号: 1001-4322(2005)11-1721-04

# 碳纤维阴极发射均匀性的实验研究\*

邓 潘, 张 军, 葛行军, 文建春, 刘 列

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 分别用自制浸渍碘化铯(CsI)针式环状碳纤维阴极和环状不锈钢阴极所产生的电子束轰击尼龙目击靶,研究碳纤维阴极发射均匀性。在碳纤维阴极电子束轰击的目击靶上得到了均匀的烧蚀痕迹,而不锈钢阴极电子束轰击的目击靶上烧蚀痕迹不均匀,表明碳纤维阴极发射电子束的均匀性优于不锈钢阴极。分析认为两阴极不同的发射机制及其所特有的材料性质和结构导致其发射电子束均匀性的差异。用光学显微镜和电子显微镜对不锈钢阴极尖端和碳纤维阴极尖端和侧面进行扫描,发现不锈钢阴极仅尖端处被烧蚀,而碳纤维阴极尖端和侧面都有烧蚀痕迹,验证了碳纤维阴极由场发射和表面闪络共同作用的发射机制的假设分析。

**关键词:** 碳纤维阴极; 电子束; 发射均匀性

**中图分类号:**                   **文献标识码:** A

电子束质量的好坏对高功率微波源的束波转换效率、微波输出功率和微波脉宽有着重要的影响,评价电子束质量好坏的标准之一是电子束发射的均匀性。现阶段,各国学者都在积极探索各种有效途径来提高阴极发射电子束的均匀性。

Ya. E. Krasik<sup>[1]</sup>等人对电子束发散进行了相关的实验研究,采用多针孔的诊断方法测量了金属陶瓷阴极、碳毡阴极、碳纤维阴极、以及天鹅绒阴极产生的电子束发散度,发现碳毡阴极与碳纤维阴极的电子束发散度较小,在 $2.15^{\circ}\sim 4.3^{\circ}$ 之间,说明它们产生的电子束质量较高、均匀性好。Shiffler<sup>[2]</sup>等人用碘化铯(CsI)浸渍碳纤维阴极,发现阴极的发射均匀性得到了进一步提高。Ya. E. Krasik 和 Yuri. M. Saveliev<sup>[3]</sup>等人在对阴极光斑拍摄中,也得出碳纤维阴极发射较均匀的结论。

电子束的均匀性指的是电子空间分布上的均匀性和电子动量分布的均匀性。空间上的均匀性表现为电子密度在束流横截面上的分布均匀程度;电子动量分布的均匀性则表现为,电子动量在电子束流的横截面上,其大小和方向的分布均匀程度。综合以上两个方面,可以把电子束的均匀性看成束流中的电子在横向和纵向空间上的分布均匀程度。

电子发射均匀是碳纤维阴极主要优点之一,对其研究具有较大的发展潜力和研究价值。我们主要通过环状阴极实验,研究碳纤维阴极的发射均匀性,分析验证阴极的物理发射机制。另外,我们在制备碳纤维阴极和研究碳纤维阴极特性两方面具有自己的特色<sup>[4]</sup>。

## 1 实验及结果

为了阐述碳纤维阴极电子束的均匀性,我们进行了环状阴极对比实验。针式环状碳纤维阴极如图 1 所示,其采用外环直径 $\phi 75$  mm、内环直径 $\phi 61$  mm 的石墨基座,浸渍碘化铯(CsI)的针状碳纤维束均布于基座直径 $\phi 68$  mm 的圆环上,针直径 $\phi 1.5$  mm,间距 6 mm,长 4 mm。

针式环状碳纤维阴极发射的电流与环状不锈钢阴极发射的电流相近,我们采用环状不锈钢阴极做对比实验。环状不锈钢阴极外环直径 $\phi 68$  mm,内环直径 $\phi 65$  mm,厚 1.5 mm。

采用自制的针式环状碳纤维阴极与环状不锈钢阴极在本实验室 Spark-05 脉冲驱动源上进行测试,对目击靶进行轰击。二极管电压均为 570 kV 左右,脉宽 40 ns,电流均为 9 kA,实验电流密度约为 $2.7\text{ kA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;机械泵和分子泵抽取真空,气压范围为 $2.5\times 10^{-5}\sim 3.5\times 10^{-5}$  Pa,目击靶均为尼龙靶。

实验结果如图 2、图 3 所示。从图 2、图 3 可以看出:针式环状碳纤维阴极产生的电子束轰击目击靶后,靶上烧蚀的痕迹分布很均匀,烧蚀的程度基本一致;而环状不锈钢阴极产生的电子束轰击的目击靶上,有的地方

\* 收稿日期:2005-04-25; 修订日期:2005-09-08

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:邓 潘(1981—),女,硕士研究生,研究方向为脉冲功率技术;E-mail:dengpan89@sina.com。

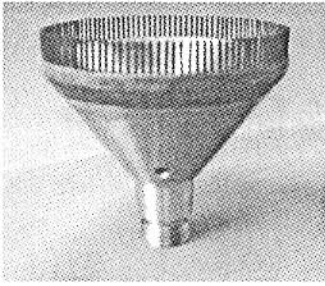


Fig. 1 Needle-shaped annular carbon fiber cathode

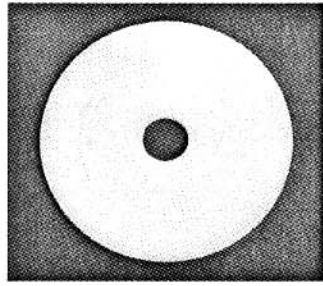


Fig. 2 Target bombarded by the electron beams from carbon fiber cathode

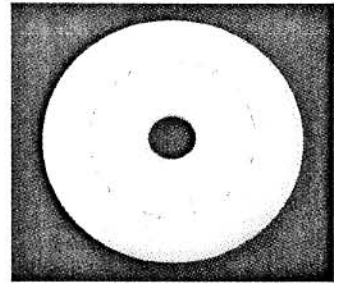


Fig. 3 Target bombarded by the electron beams from stainless steel cathode

图 1 针式环状碳纤维阴极

图 2 针式环状碳纤维阴极电子束轰击的目击靶

图 3 环状不锈钢阴极电子束轰击的目击靶

烧蚀得比较严重,有的地方烧蚀较弱,有的地方似乎没有被电子轰击,这说明了碳纤维阴极产生的电子束在相空间上分布均匀。

碳纤维阴极为针式的,在纤维束之间有一定的缝隙间隔,但是从电子束轰击的目击靶结果可以看出碳纤维阴极电子发射发生在整个阴极环面上,并没有因为纤维束间隔的存在而导致发射的空间不连续性,没有影响发射的均匀性,分析认为这跟碳纤维的表面闪络电子发射机制有关。

## 2 分析及讨论

从环状阴极的实验结果可以看出,碳纤维阴极发射的电子束在空间分布和能量分布上,明显比不锈钢阴极发射电子束均匀。我们认为这种均匀性的差异主要与两种阴极发射电子的物理机制有关,同时也跟其材料本身特有的性质和构造有关。

不锈钢阴极的发射机制是爆炸电子发射,其存在一定的不均匀性和随机性,发射阈值高,一般为数百  $\text{kV} \cdot \text{cm}^{-2}$ <sup>[5]</sup>,电子发射主要在阴极表面场强比较集中的地方,例如阴极表面尖端。由于金属阴极发射面上的微观均匀性难以得到保障,即不是所有尖端同时产生等离子体,因而在阴极表面形成等离子体均匀性差,这必然导致阴极表面等离子体不均匀,从而影响了电子束流的均匀性。基于这一思想,建立了金属阴极发射机制示意图,见图 4。



Fig. 4 Proposed emission mechanism of annular stainless steel cathode

图 4 环状不锈钢阴极发射机制示意图

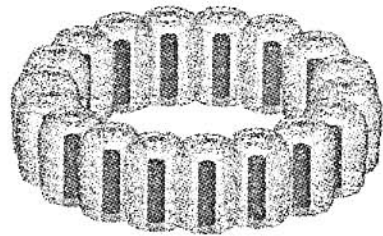


Fig. 5 Proposed emission mechanism of needle-shaped annular carbon fiber cathode

图 5 针式环状碳纤维阴极发射机制示意图

碳纤维阴极的电子发射是场发射与表面闪络共同作用的结果,即电子发射不仅仅局限于纤维束尖端的场发射,侧面也伴随着表面闪络。这种合成的发射机制使得整个阴极表面产生更均匀的等离子体,从而产生了更均匀的电子束。另外碳纤维发射阈值较低,一般约为  $10 \sim 30 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ <sup>[2]</sup>,这样绝大多数的纤维束都有等离子体产生,最终形成阴极表面等离子体层的均匀分布。碳纤维阴极表面的等离子体形成模型示意图如图 5 所示。

为了证实上述模型,用光学显微镜拍摄的发射电子束后的针状不锈钢阴极扫描照片,见图 6。从图中可见,不锈钢阴极尖端有严重的烧蚀现象,而侧面很光滑。这说明在发射过程中,阴极尖端有很大的物质损耗,推测不锈钢阴极电子发射主要集中在阴极尖端部分,而

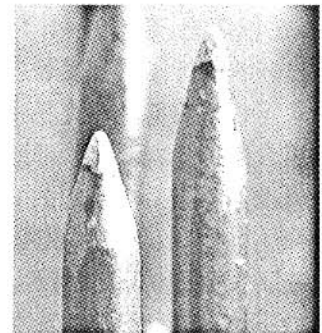


Fig. 6 Photo of needle-shaped stainless steel cathode after emission

图 6 发射后的不锈钢阴极针电子扫描照片

侧面没有电子束发射。即阴极尖端的点爆炸发射形成等离子体,这与设想的金属电子发射机制相符合。

图 7 是电子显微镜下拍摄的发射前后碳纤维尖端处的对比照片,图 8 是发射前后碳纤维侧面的对比照片。从图 7(b)和图 8(b)中可以看出碳纤维阴极的尖端和侧面都有被烧蚀的痕迹,可以推测在发射过程中不仅碳纤维的尖端有电子发射,而且侧面也有表面闪络(随纹)产生。此外,文献[1,6]中用碳纤维阴极进行实验研究过程中发现碳纤维的顶端有光辐射,在侧表面也有发光的现象,说明了我们与国外的实验结果一致,实验结果验证了我们假设的碳纤维阴极电子发射机制的正确性。

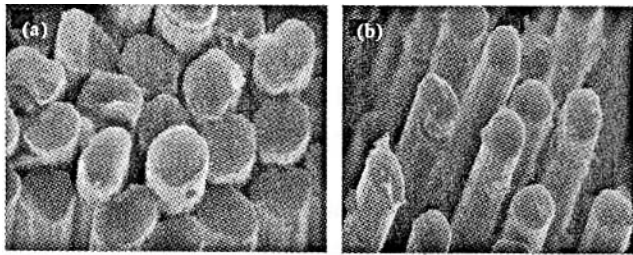


Fig. 7 Photos of the tip of carbon fiber before emission(a) and after emission(b)

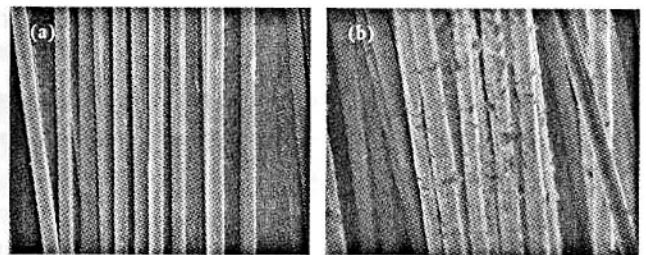


Fig. 8 Photos of the flank of carbon fiber before emission(a) and after emission(b)

图 7 发射前(a)后(b)碳纤维顶端的电子扫描照片

图 8 发射前(a)后(b)碳纤维侧面的电子扫描照片

在不同的条件下,碳纤维阴极的两种发射机制侧重点不同。在某种情况下可能是场发射起主要作用,也可能是表面闪络起主要作用,合成电子发射机制的存在提高了碳纤维阴极的发射性能,这有待于进一步的实验验证。此外,碳纤维阴极的发射均匀也可能与碳纤维阴极表面纤维定向排列整齐有关。

碳纤维阴极电子发射是一种面发射过程,这延长了阴极的寿命。而金属阴极尖端处的点发射造成尖端处大量的物质损耗,导致了阴极寿命的下降,所以金属阴极需要反复地修复,以维持阴极的性能。

碳纤维表层由石墨构成,因此碳纤维无液态,直接由固态升华到气态,耐高温,结构稳定。纤维表面吸附的气体不易挥发,碳纤维阴极的出气率较低、有较好的稳定性、可重复性高。尤其是浸了 CsI 之后<sup>[2,7]</sup>。根据 Benford 与 Dehope 的观点——较重离子的产生会降低阴极等离子体膨胀速度<sup>[8]</sup>,碳纤维阴极电子发射过程中形成了大量的碳离子,从而减缓了等离子体膨胀速度,延长了二极管的闭合时间,有效地增加了脉冲宽度。

### 3 结 论

通过针式环状碳纤维阴极和环状不锈钢阴极产生的电子束轰击目击靶实验,可以明显看出碳纤维阴极产生的电子束均匀,比不锈钢阴极产生的电子束均匀性好;通过对碳纤维阴极和不锈钢阴极尖端和侧面发射前后进行微观扫描,我们认为碳纤维阴极电子发射由纤维尖端场发射和其侧面表面闪络共同组成;而金属阴极电子发射仅限于尖端的爆炸发射。

碳纤维阴极特有的电子发射机制及其碳纤维材料本身的结构和性质使碳纤维阴极具有发射均匀、阴极等离子体膨胀速度慢、寿命长等优点,具有广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] Krasik Y E, Dunaevsky A, Krokmal A, et al. Emission properties of different cathodes at  $E \leq 105 \text{ V/cm}$ [J]. *J Appl Phys*, 2001, **89**(7): 2379—2382.
- [2] Shiffler D A, LaCour M J, Sena M D, et al. Comparison of carbon fiber and cesium iodide-coated carbon fiber cathodes[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, **28**(3):517—522.
- [3] Saveliev Y M, Sibbett W, Parkes D M. Current conduction and plasma distribution on dielectric(velvet) explosive emission cathodes[J]. *J Appl Phys*, 2003, **94**(12):7416—7418.
- [4] Liu L, Wan H, Zhang J, et al. Fabrication of carbon-fiber cathode for high-power microwave application[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, **32**(4):1742—1746.
- [5] Feeny R K, Chapman A T, Keener B A. High field electron emission from oxide-metal composite material[J]. *J Appl Phys*, 1975, **46**(4): 1841—1975.
- [6] Krasik Y E, Dunaevsky A, Felsteiner J. Plasma sources for high-current electron beam generation[J]. *Physics of Plasma*, 2001, **8**(5): 2466.
- [7] Shiffler D A, Lacour M, Golby K, et al. Cathode Testing at the Air Force Research Laboratory[A]. Proc of SPIE[C], 2000, **4031**:144—

153.

- [8] Benford J N, Price D, Dehope W. Extension of HPM pulse duration by cesium iodide cathodes in crossed field devices[R]. AFRL-DE-PS-TR, 1998. 1019.

## Experimental investigation on emission uniformity of carbon fiber cathode

DENG Pan, ZHANG Jun, GE Xing-jun, WEN Jian-chun, LIU Lie

*(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)*

**Abstract:** The electron beams produced by the needle-shaped annular carbon fiber-coated cathode soaked with cesium iodide (CsI) salt and annular stainless steel cathode were separately used to bombard the nylon targets. There was a uniform round mark on the target bombarded by the electron beam generated by the carbon fiber cathode, but there was a nonuniform mark on the target bombarded by the annular stainless steel cathode. It was believed that the different mechanism, characteristics and configuration between the carbon fiber cathode and the stainless steel cathode caused the difference of emission uniformity. Scanning with optics microscope, it was found that only the tips of the needle-shaped steel was destroyed. With electron microscope, it was found that both the tips and flanks of the carbon fiber were destroyed. Therefore, it was testified that the emission mechanism of metal cathode was explosive electron emission and the emission mechanism of carbon fiber cathode included both field-explosive electron emission and surface flashover.

**Key words:** Carbon fiber cathode; Electron beams; Emission uniformity