



·脉冲功率技术·

# 微秒长脉冲有磁场高功率微波二极管真空界面设计

杨汉武, 荀涛, 高景明, 张自成

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

**摘要:** 介绍了一种微秒长脉冲有磁场的真空二极管界面的设计和实验结果。采取了三种措施来抑制沿面闪络: 一是阴极电子束挡板, 用来拦截来自阴极和电子束漂移管的回流电子束; 二是接地屏蔽板, 使电场等势线和界面成约 45°角, 使阴极三结合点处发射的电子远离绝缘板; 三是降低阴极三结合点处的场强, 并使用一悬浮电位的金属环阻止电子倍增过程。计算了二极管内电场、磁场分布和电子束的运动轨迹并据此优化了真空界面的结构, 实验验证了该二极管真空界面可以在 400 kV、800 ns 条件下正常工作, 可以支持长脉冲高功率微波器件的研究。

**关键词:** 脉冲功率; 高功率微波; 真空界面; 表面闪络; 真空二极管

中图分类号: TN787

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210472

## Design of a vacuum interface of a microsecond timescale HPM diode with guiding magnetic field

Yang Hanwu, Xun Tao, Gao Jingming, Zhang Zicheng

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

**Abstract:** Long pulse high power pulse driver in the microsecond range is an important platform for conducting high power microwave (HPM) device studies and one of the key technologies is to prohibit surface flashover of the vacuum diode interface under the conditions of long pulse duration and the presence of guiding magnetic field. We report a design of a vacuum interface which works in the microsecond timescale with guiding magnetic field. Three measures are adopted to suppress the surface flashover. First is a cathode electron beam blocker, which intercepts the electron beam from the cathode and electron beam drift tube; Second is a grounded plate field shaper, which makes the electric field equipotential line and the interface form an angle of about 45°, so that the electrons emitted from the triple junction are directed away from the insulator; Third is a floating metal ring, which prevents the electron multiplication if emission from cathode stalk triple junction does occur. The electric field and magnetic field in the diode and the trajectory of electron beam are calculated, and the geometry of the vacuum interface is optimized. Experiments show that the vacuum interface of the diode can work at voltage of 400 kV and pulse width of 800 ns, which allows the study of long pulse high power microwave tubes.

**Key words:** pulsed power, high power microwave, vacuum interface, surface flashover, vacuum diode

高功率微波技术的发展方向之一是提高微波脉冲能量, 通常途径是提高峰值功率, 但在有些场合, 如辐射口面尺寸受限时, 峰值功率提高后微波辐射会受窗口功率容量限制, 这时就只能通过提高脉冲宽度来增加脉冲能量。近年来, 高功率微波脉冲缩短问题得到了一定程度的解决<sup>[1]</sup>, 100 ns 的高功率微波产生已经实现。为了更高能量微波脉冲的产生研究, 国防科技大学建造了一台  $\mu\text{m}$  级长脉冲高功率微波驱动源, 它利用金属氧化物压敏电阻 (MOV) 将 Marx 发生器的输出脉冲整形为准方波<sup>[2]</sup>, 可以输出接近  $\mu\text{s}$  的脉宽。在高功率微波驱动源中, 真空界面既是高压馈入结构, 也是发射阴极的支撑结构。因为沿面闪络场强远低于固体介质的击穿场强, 故此真空界面通常是电子束加速器中绝缘最薄弱的环节。在脉冲宽度从 ns 到 100 ns 尺度下的真空沿面闪络已经开展了大量研

\* 收稿日期: 2021-11-08; 修订日期: 2022-01-25  
联系方式: 杨汉武, yanghw@nudt.edu.cn。

究<sup>[3-13]</sup>,但 $\mu\text{s}$ 尺度下的真空绝缘子研究较少,按已有研究外推,脉宽延长后沿面闪络概率增加。另外,在存在导引磁场时,远离界面的电子也可能顺磁场线运动到绝缘子表面导致闪络发生,也需要设计特殊结构来避免。本文对比了两种径向真空绝缘子结构,给出了可在 $\mu\text{s}$ 级长脉冲和有导引磁场条件下工作的真空二极管界面的设计和实验结果。

## 1 常见真空绝缘子结构

常见的真空绝缘子有轴向绝缘和径向绝缘两种结构,其中轴向绝缘结构在如Z等大型脉冲功率装置中得到了广泛应用,并且有相对可靠的经验公式来指导设计<sup>[14]</sup>。径向绝缘结构经常应用在一些小型的脉冲功率装置上,其优点是结构简单、尺寸紧凑、加工成本低。径向绝缘的缺点在于电场沿径向分布不均匀:越靠近轴线场强越高,需要解决阴极杆三结合点的电场屏蔽难题。

真空绝缘子界面附近无外加磁场时,其设计已经比较成熟<sup>[4-7]</sup>,主要依据表面闪络的二次电子倍增理论。通常控制阴极三结合点场强小于 $30\text{ kV/cm}$ ,并且让电场方向约和绝缘子表面成 $45^\circ$ 角,这样即使有电子在三结合点附近产生,其运动轨迹也是远离绝缘子表面的,不会轰击到绝缘子表面。当二极管阻抗较低时,较强的电子束电流造成的角向磁场也能使电子远离绝缘子表面,进一步起到自磁绝缘的效果。

在微波源有导引磁场时,电子会沿磁场线做回旋运动,这样远离真空界面的电子也有可能轰击到绝缘子表面。常见的解决方法是在阴极杆位置处放置一个电子束挡板,用来阻挡阴极和电子束漂移管内的电子束回轰,这样的结构一直在俄罗斯大电流电子学研究所的SINUS系列加速器的真空界面上得到应用<sup>[15]</sup>。

## 2 最初设计和实验结果

实验最初使用了如图1(a)所示的真空界面。图中左侧接气体绝缘的Marx发生器的输出,高分子聚乙烯(PE)绝缘子隔开气体和真空。左侧的场屏蔽结构的作用是防止气体中的沿面闪络,且同时降低了真空侧三结合点的场强。在阴极杆的右侧安装了电子束挡板铝盘,用于阻挡来自阴极和电子束漂移管的电子回流。

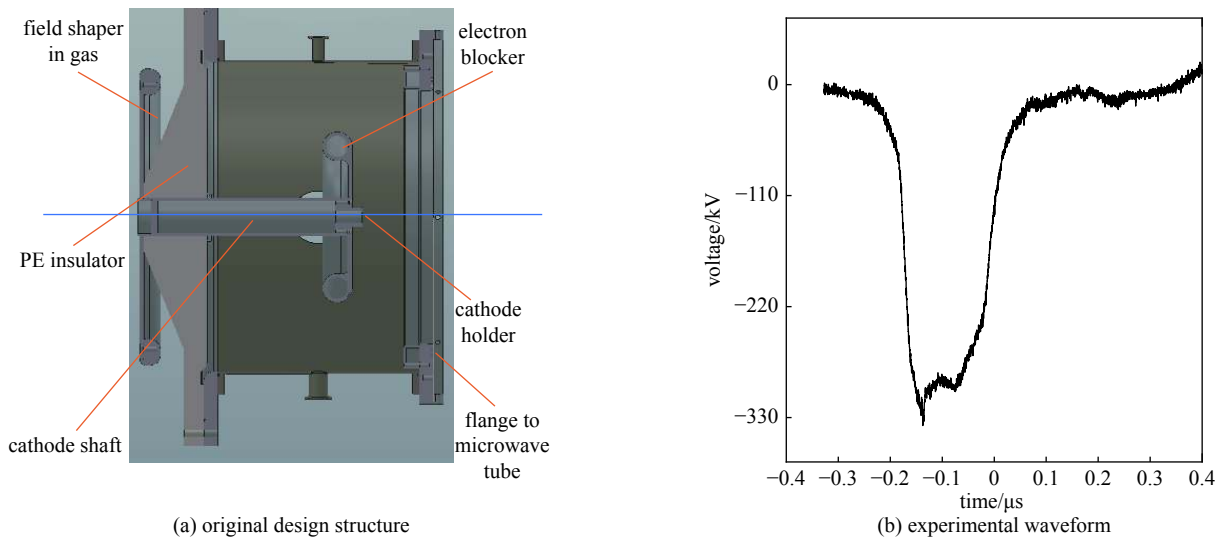


Fig. 1 Original design of the vacuum interface and experimental result

图1 最初设计的真空二极管结构和实验结果

这种结构曾成功应用于约 $500\text{ kV}$ 、数十 $\text{ns}$ 的场合。但在 $300\text{ kV}$ 微秒级长脉冲实验中经常出现沿面闪络现象,出现真空二极管短路,限制了电子束脉宽不足 $200\text{ ns}$ ,而在电阻假负载上该加速器输出脉宽可达 $800\text{ ns}$ 以上。图1(b)所示的实验中电压脉宽只有约 $180\text{ ns}$ ,电压后沿迅速归零。这些现象说明了在更长脉冲条件下对抑制沿面闪络的设计要求更加苛刻,最初的真空界面需要进一步优化。

## 3 改进设计

为了解决在更长脉冲宽度下真空界面沿面闪络问题,在不增加轴向尺寸的条件下,对原有的真空界面结构进行了修改。图2给出了新结构的几何轮廓和静电场等势线分布图,其主要思路是尽量降低三结合点场强和避免电子轰击到绝缘子表面。首先将图1所示的绝缘板锥面方向置入真空侧,然后采取了3种措施来加强抑制沿面闪络

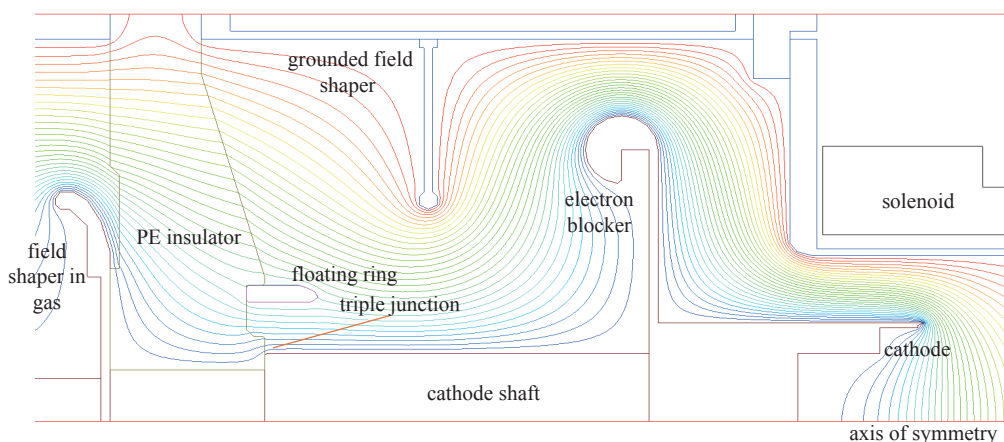


Fig. 2 Improved design of the vacuum interface structure

图 2 改进设计的真空二极管结构

的初始电子产生和倍增:(1)优化调整原有阴极电子束挡板铝盘的位置,拦截来自阴极和电子束漂移管的回流电子;(2)在电子束挡板和塑料绝缘子之间增加接地屏蔽铝板,使电场等势线和界面成约 45°角,使阴极三结合点处发射的电子远离绝缘板;(3)在靠近阴极三结合点附近增加一悬浮电位的金属环阻止二次电子倍增。

### 3.1 静电场计算

图 2 给出了改进设计的真空界面附近静电场分布的计算结果,计算中设阴极电势为 400 kV。从图 2 可以看出,接地屏蔽铝板将等势线推向中心轴线,真空侧沿绝缘子表面的电场分布比较均匀,使绝缘子表面均近似与电场等势线成 45°角,没有等势线和绝缘子表面垂直的现象,这种电场分布的静电场力能够使倍增电子远离绝缘表面。悬浮电位小屏蔽环外侧表面沿面场强小于 30 kV/cm。阴极杆与绝缘子三结合点处场强较高,达到 60 kV/cm,但由于悬浮电位的屏蔽环的作用,预期二次电子倍增能被阻止。

### 3.2 磁场分布计算

图 3 给出了所用导引磁场分布的计算结果。图中着重标出了 3 处磁场线。上面第一条是电子束漂移区没有慢波结构(图中 SWS 仅为局部示意)时由漂移管边界所限制的电子轨迹,即在该线上方属于电子不能轰击到的范围(外壳阳极不发射电子)。中间一条是电子束挡板所能阻挡的电子轨迹上限,当漂移管存在慢波结构(和阳极等电位)时,在该线上方也属于电子束轰击不到的范围。最下方一条磁场线是阴极发射电子的典型轨迹。可见正常情况下,来自阴极和电子束漂移管内的电子束不会直接轰击到绝缘子表面。只有界面和阴极电子束挡板之间的阴极杆表面发射的电子才有可能顺磁场线轰击到绝缘子表面。但阴极杆表面的场强最大值不足 70 kV/cm,小于不锈钢的发射阈值。根据图 2 的计算结果,靠近三结合点处的阴极杆场强相对强一些,若有电子束发射应该会被悬浮电位的屏蔽环阻挡。

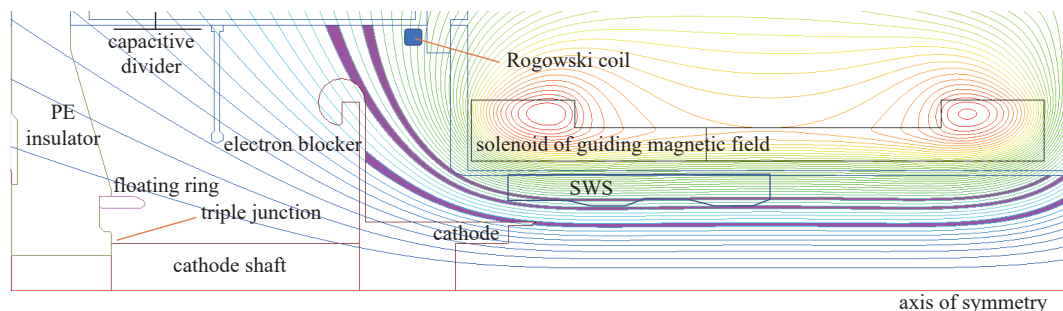


Fig. 3 Magnetic field lines near the vacuum interface and the diode

图 3 二极管和真空界面附近的磁场线分布

### 3.3 阴极发射电子束轨迹计算

电子沿磁场线运动是一个定性规律,在磁场较强时是成立的。图 4 给出了部分阴极发射电子运动轨迹的计算结果,图中阴极尖端处磁场强度为 0.3 T。从图中电子轨迹可以看出,既有从阴极尖端向右传输的,也有一部分向左传输的,但在阴极电子挡板处被反射,它们均不会对界面的绝缘造成威胁。由于电子的回旋运动,电子束轨迹有

一定的宽度,但总体上沿磁场线传输。

#### 4 改进后实验结果

利用改进后的二极管真空界面开展了长脉冲电子束传输实验。实验中利用 Rogowski 电流线圈监测了二极管电流信号,利用电容分压器监测了二极管电压信号,得到的典型电压、电流波形结果如图 5 所示。其中,通道 1 二极管电流信号,尽管由于电流线圈不够理想,波形中存在较大干扰,但可以看出大体趋势是随着二极管等离子体扩散造成的阻抗降低,电子束电流在逐渐增加,波形平顶电流约 8 kA。通道 2 是二极管电压信号,稳定在 400 kV 附近。本次实验中,电压半高宽约 800 ns,上升沿约 35 ns。已利用该脉冲驱动源开展了长脉冲高功率微波研究,获得了 300 ns 以上的高功率微波输出。

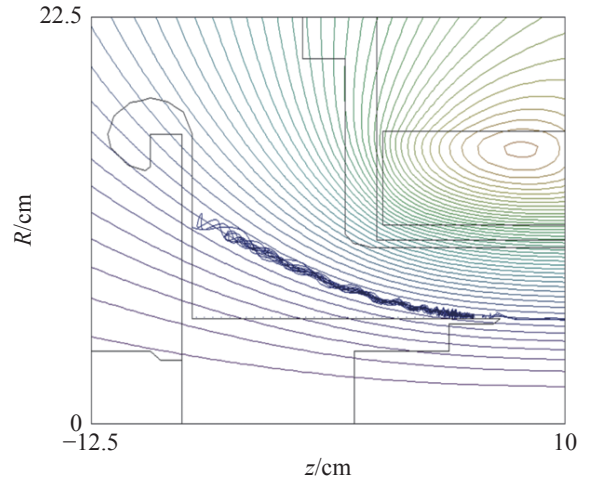


Fig. 4 Electron trajectories at the cathode region

图 4 阴极区域电子束轨迹

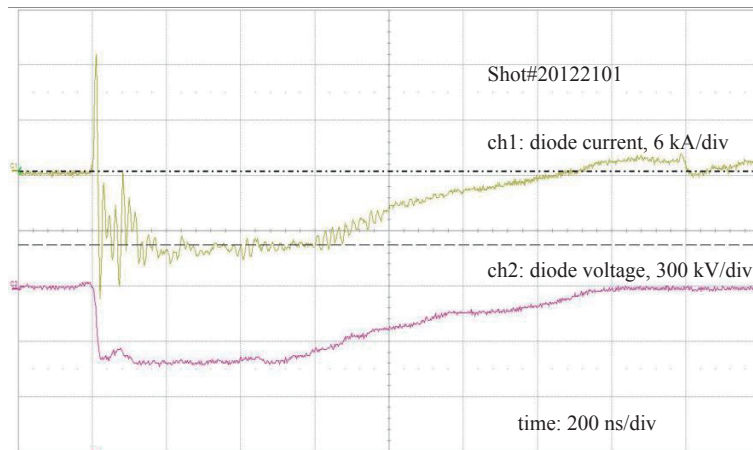


Fig. 5 Current and voltage waveform of the diode load

图 5 二极管负载实验电压和电流波形

#### 5 低场强区电子发射的影响

在初步实验中上述设计改进后的真空界面结构可以正常工作,但以上只考虑了阴极的电子束发射,未考虑电子束挡板后部阴极杆等低场强区域的电子发射。本文认为,尽管阴极杆表面场强较低,但在长脉冲条件下,由于表面的微观污染或晶须突起,仍有一定概率会发生电子发射造成界面闪络。图 6 给出了假设阴极杆处有发射时的电子束轨迹和磁场线分布计算结果,其中磁场强度  $B$  为阴极尖端位置的场强。其中图 6(a)为无磁场( $B=0\text{T}$ )的电子束轨迹,接地屏蔽环使电子远离绝缘表面,图 6(b)~(f)分别为阴极尖端处磁场  $B=0.15\sim 0.9\text{T}$  时的轨迹,并且图 6(f)中还显示了考虑绝缘子表面有二次电子发射时的轨迹。结果显示:(1)悬浮电位屏蔽环能够拦截三结合点处发射的电子;(2)真空界面处的磁场强度整体低于阴极尖端处,故此磁场较低时阴极杆表面发射的电子轨迹主要受电场影响,没有沿磁场线运动,如图 6(a), (b), (c)所示;(3)磁场增加时,电子开始沿磁场线运动,有些会轰击到绝缘子表面,可能引起沿面闪络,如图 6(e), (f)所示。

#### 6 结论

本文设计并实验了一种驱动有磁场无箔二极管的真空界面,采取了 3 种不增加轴向尺寸的措施来抑制沿面闪络:一是阴极电子束挡板,用来拦截来自阴极和电子束漂移管的回流电子束;二是接地屏蔽板,使电场等势线和界面成约  $45^\circ$  角,使阴极三结合点处发射的电子远离绝缘板;三是降低阴极三结合点处的场强,并使用一悬浮电位的金属环阻止电子倍增过程。计算了二极管内电场、磁场分布和电子束的运动轨迹,特别是在长脉冲条件下需要考虑阴极杆等较低场强处的场致发射电子对沿面闪络的影响,实验验证了该二极管真空界面可以在 400 kV, 800 ns 条件下正常工作,支持了长脉冲微波源器件的实验研究。

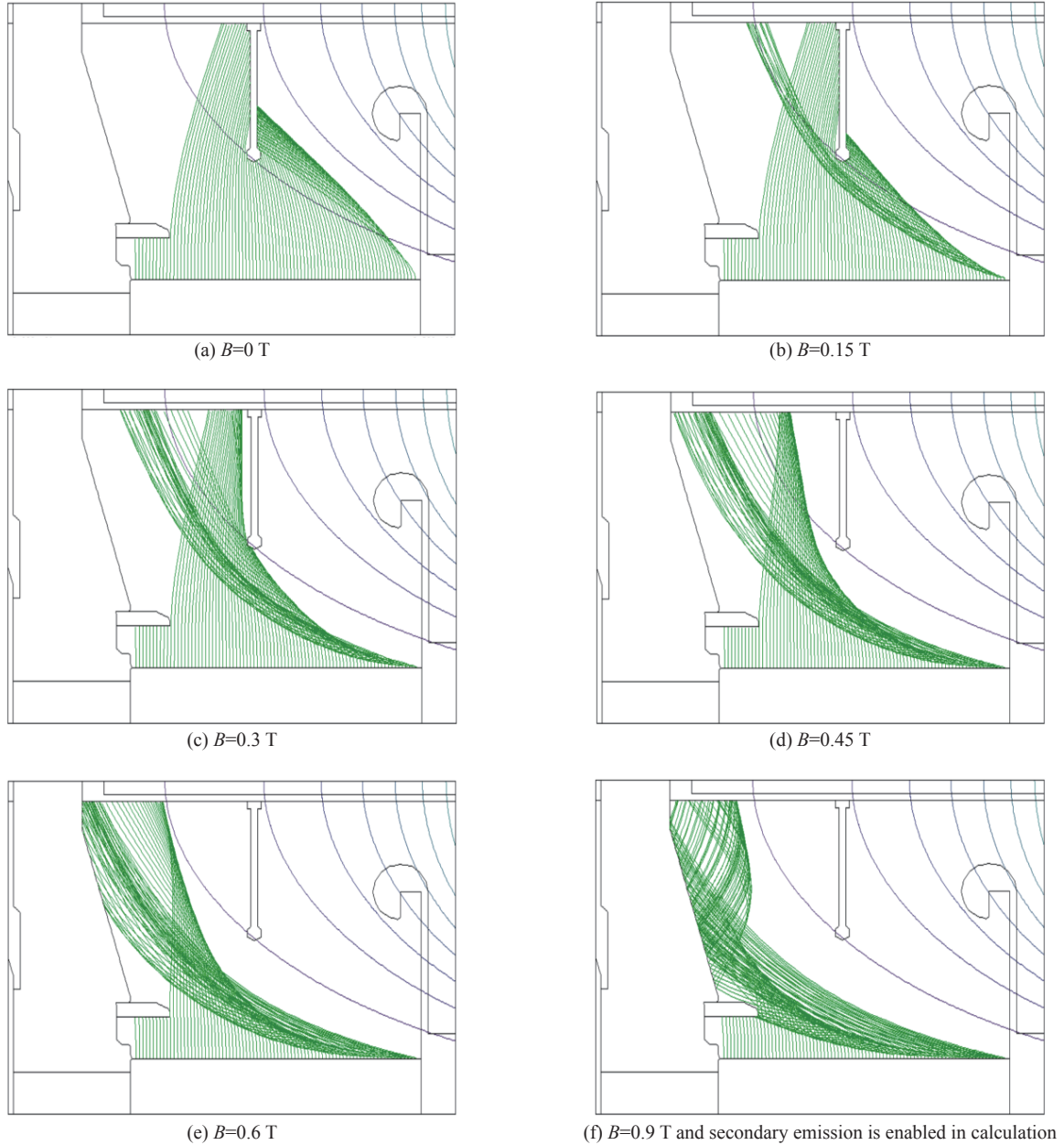


Fig. 6 Electron trajectories starting from cathode shaft at different magnetic field strength

图 6 不同导引磁场强度下阴极杆发射时的电子轨迹

本文的真空界面既可以工作于无磁场条件下,也可以工作在有磁场条件下。从阴极杆电子发射轨迹预测当进一步提高导引磁场时,该结构仍会可能造成沿面闪络和脉冲缩短,需要进一步开展研究,其中一个解决方法是采用类似俄罗斯 SINUS 系列加速器锥形真空绝缘子<sup>[15]</sup>,使得电子束挡板后侧的阴极杆被塑料绝缘子包围,没有暴露于真空的金属界面,缺点是会增加真空二极管的轴向长度和绝缘子的制作成本。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Jiande, Ge Xingjun, Zhang Jun, et al. Research progresses on Cherenkov and transit-time high-power microwave sources at NUDT[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2016, 1(3): 163-178.
- [2] 杨汉武, 高景明, 张自成, 等. 基于MOV的800纳秒吉瓦级脉冲驱动源[C]//第七届全国脉冲功率会议. 重庆, 2021. (Yang Hanwu, Gao Jingming, Zhang Zicheng, et al. Test of an 800 ns gigawatt pulse generator based on metal-oxide varistors[C]//Proceedings of the 7th China Pulsed Power Conference. Chongqing, 2021)
- [3] Wang Hongguang, Zhang Jianwei, Li Yongdong, et al. 2D particle-in-cell simulation of the entire process of surface flashover on insulator in vacuum[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25: 043522.
- [4] Xun Tao, Yang Hanwu, Zhang Jiande. A high-vacuum high-electric-field pulsed power interface based on a ceramic insulator[J]. *IEEE Transactions on Plasma*

- [Science](#), 2015, 43(12): 4130-4135.
- [5] Miller H C. Flashover of insulators in vacuum: the last twenty years[J]. [IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation](#), 2015, 22(6): 3641-3657.
- [6] Miller H C. Flashover of insulators in vacuum: review of the phenomena and techniques to improved holdoff voltage[J]. [IEEE Transactions on Electrical Insulation](#), 1993, 28(4): 512-527.
- [7] Krasik Y E, Leopold J G. Initiation of vacuum insulator surface high-voltage flashover with electrons produced by laser illumination[J]. [Physics of Plasmas](#), 2015, 22: 083109.
- [8] Harris J R. A tutorial on vacuum surface flashover[J]. [IEEE Transactions on Plasma Science](#), 2018, 46(6): 1872-1880.
- [9] Harris J R, Caporaso G J, Blackfield D, et al. Displacement current and surface flashover[J]. [Applied Physics Letters](#), 2007, 91: 121504.
- [10] Gleizer J Z, Krasik Y E, Dai U, et al. Vacuum surface flashover: experiments and simulations[J]. [IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation](#), 2014, 21(5): 2394-2404.
- [11] Smith I D. Flashover of vacuum interfaces with many stages and large transit times[J]. [IEEE Transactions on Plasma Science](#), 1997, 25(2): 293-299.
- [12] Sun Xiaoliang, Xun Tao, Zhong Huihuang, et al. Characterization of flashover plasma across a large-scale ceramic vacuum interface initiated by explosive electron emission[J]. [AIP Advances](#), 2018, 8: 075309.
- [13] 刘瑜, 邓建军, 王勳, 等. 外加磁场下真空沿面闪络特性数值模拟[J]. [强激光与粒子束](#), 2010, 22(10): 2501-2504. (Liu Yu, Deng Jianjun, Wang Meng, et al. Numerical simulation of vacuum surface flashover under applied magnetic field[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2010, 22(10): 2501-2504)
- [14] Savage M E, Stoltzfus B S, Austin K N, et al. Performance of a radial vacuum insulator stack[C]//Proceedings of 2015 IEEE Pulsed Power Conference. 2015: 1-6.
- [15] Mesyats G A, Korovin S D, Gunin A V, et al. Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines[J]. [Laser and Particle Beams](#), 2003, 21(2): 197-209.