

新型筒状双层闪络板等离子体枪^{*}

赵 莹¹, 严 萍¹, 王 珏¹, 邵 涛¹, 王晓明²

(1. 中国科学院 电工研究所, 北京 100080; 2. 哈尔滨工业大学 电气工程系, 哈尔滨 150001)

摘 要: 提出了新型筒状双层闪络板等离子体枪及其驱动电路的设计方案。枪内层接脉冲高压, 均布 160 个电弧点, 每个电弧点由中心焊盘及填充 TiH_2 粉末的外围凹槽组成, TiH_2 粉末用硅酸钠粘接于凹槽中; 通过 $100\ \Omega$ 电阻连接每个高压焊盘与接地端, 电极间隙中产生等离子体。通过放电实验得出: 当由 $3\ \text{kV}$, $20\ \mu\text{F}$ 电容器驱动时, 脉宽为 $1.5\ \mu\text{s}$ 、幅值约 $150\ \text{A}$ 的电流通过枪, 产生的等离子体密度为 $10^{13} \sim 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$, 存在时间 $0.5\ \mu\text{s}$, 等离子体定向速率达到 $5\ \text{cm}/\mu\text{s}$ 。实验证明: 该闪络板等离子体枪可靠性强, 可重复产生均匀等离子体。

关键词: 闪络板等离子体枪; 双层闪络板; 氢化钛; 等离子体; 表面闪络

中图分类号: TM910 **文献标志码:** A **doi:** 10.3788/HPLPB20102203.0461

闪络板等离子体枪是一种基于表面闪络的等离子体注入器, 常作为等离子体源用于等离子体断路器 (POS)。POS 的工作模式, 除了受等离子体本身的物理特性和所导通电流大小的影响之外, 还会随等离子体枪注入开关区域的等离子体密度的变化而改变^[1]。作为导体存在的等离子体, 其密度往往会在 POS 电流导通区内呈不均匀分布, 这种不均匀性很大程度上主导了 POS 的断路过程。对于大面积尺寸, 如几十 cm^2 或更大时, 等离子体的密度高于 $10^{13}\ \text{cm}^{-3}$, 需要利用闪络板作为等离子体源, 闪络板产生的等离子体具有高定向速率 (达到 $30\ \text{cm}/\mu\text{s}$) 的优点, 远比 Mendel 等人所描述的电缆枪高 (达到 $3\ \text{cm}/\mu\text{s}$)^[2]。闪络板等离子体枪最早于 1987 年首先在 PBFA II 上使用^[3], PBFA II 的等离子体开关实验中导通电流大 (约 $7\ \text{MA}$), 预计至少需要 120 个碳等离子体枪来为之提供等离子体, 随之而来的时间同步性将很难解决, 而改用闪络板等离子体枪较好地解决了大电流实验中需要相对较高密度等离子体的问题。在后来的长导通等离子体开关实验中, 因同样需要较高密度等离子体作为注入源, 很多实验采用了闪络板等离子体枪。如在 Hawk 发生器上开展的 POS 实验曾经使用了 18 个闪络板, 二极管负载上产生的功率达到了 $0.7\ \text{TW}$ ^[4]。本文研制了一种适于大面积尺寸、高等离子体密度的新型筒状双层闪络板等离子体枪, 并对其击穿特性、等离子体运动过程进行了理论分析。该高枪由 160 个相对均布的电弧点同时闪络放电, 促使 TiH_2 粉末释放氢等离子体, 具有可靠性强、均匀性好等特点。

1 闪络板等离子体枪工作原理

闪络板等离子体枪是利用电极间隙中一连串的表面闪络放电提供等离子体。当高压脉冲加载到一个电极上, 电极会发射出电子, 电子加速向低压电极运动。当这些电极电子碰撞表面时, 会形成密集等离子体, 这就是闪络过程。在下一个闪络间隙中, 低压电极变成高压电极, 直到所有间隙发生闪络。闪络过程十分迅速, 只持续不到 $10\ \text{ns}$ 的时间。根据 POS 结构可将闪络板制成平板状或圆筒状: 平面 POS 采用平板状闪络板, 同轴柱状 POS 则或将多块平板状闪络板沿圆周排列、或将一块闪络板弯成圆筒状。通常在闪络板表面涂上一层化合物用来产生预期的等离子体^[5]。

2 闪络板等离子体枪结构设计及制作工艺

闪络板等离子体枪采用双层结构如图 1 和图 2 所示。闪络板用刚性电路板弯成圆筒状, 由 160 个电弧点组成, 如图 3 所示顶层闪络板的正面展开图。每个电弧点是焊盘位于中心, 周围凹槽填充 TiH_2 粉, 粉末用硅酸钠粘接于凹槽中。选择 TiH_2 是为了产生负极性的氢。电流通过 $100\ \Omega$, $0.25\ \text{W}$ 的电阻器经过每个电弧点。闪络板的总电阻为 $0.6\ \Omega$ 。这种排列确定了在闪络板区域上电路电流均匀的分布。采用规格为 300 目的氢化钛作为氢等离子体的储氢材料, 用硅酸钠溶剂作为氢化钛粉末的粘接剂, 把硅酸钠溶剂与氢化钛粉末充分搅拌

^{*} 收稿日期: 2009-11-08; 修订日期: 2009-12-04

作者简介: 赵 莹 (1979—), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向为脉冲功率技术; zhao_ying2001@mail. iee. ac. cn.

混合,达到一定的粘度后填充到凹槽中,低温烘干。

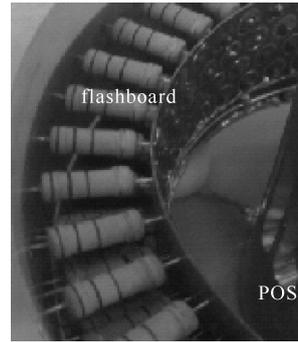
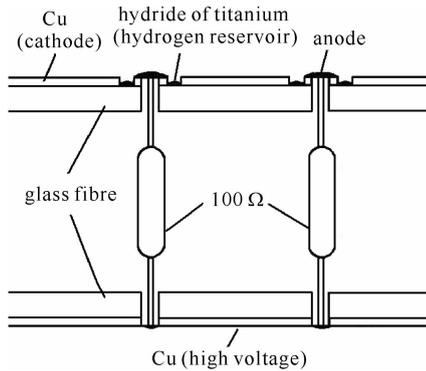


Fig. 1 Basic structure of double-layer flashboard plasma gun

Fig. 2 Picture of flashboard plasma gun

图 1 双层闪络板等离子体枪设计图

图 2 闪络板等离子体枪实物照片

闪络板放置在 POS 阳极外侧,当闪络板上加高压时,经过纳秒级的时间,表面闪络形成,闪络板表面有大电弧流过,电弧给表层氧化物加热,使表层氧化物温度升高,在电弧的作用下产生等离子体,等离子体在电弧电流的自磁场作用力($J \times B$)下离开闪络板表面,垂直喷出。

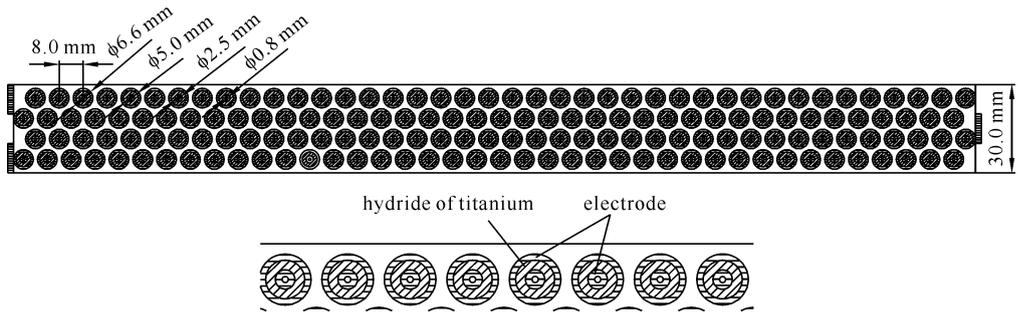


Fig. 3 Schematic diagram of expanded flashboard

图 3 闪络板等离子体枪的正面展开图

3 闪络板等离子体枪电场的 PIC 模拟

电极的几何形状对电场的分布有很大的影响,往往由于几何形状不规则引起电场在局部过于集中而导致击穿,这一点在高电压的真空产品中尤其突出。电极边缘的曲率半径大小是重要因素。一般来说,曲率半径大的电极承受击穿电压的能力比曲率半径小的大。此外,击穿电压还和电极面积的大小成反比,即随着电极面积的增大而有所降低。面积增大导致耐压降低的原因主要是放电概率增加。

本文利用电极边缘曲率半径小导致电场局部击穿在 TiH_2 表面形成闪络,电弧给表层氢化钛加热使其释放氢等离子体。模拟分为两个阶段:第一个阶段,对极间电场的局部击穿进行模拟;第二阶段,对表层氢化钛释放等离子体电子进行模拟。

3.1 闪络板等离子体枪电极间击穿电场的 PIC 模拟

图 4 为与图 3 对应的闪络板上单个电弧焊点电极结构的粒子计算模型。中心电极圆盘状阴极加载恒定电压 U_c 为 -1.5 kV,外部电极环状阳极加载恒定电压 U_a 为 1.5 kV。网格大小为 0.06 mm \times 0.06 mm。在计算中采用有限粒子(50 000 个)作为等离子体电子的代表点。

图 5 所示为极间电压等位线分布,在两极间距最小处的电场变化梯度相当大, 0.1 mm 的距离可有 30 kV/cm 电场强度的改变,这将首先诱发在该区域的电弧放电,放电 5 ns 时刻的电子空间分布如图 6 所示。

3.2 TiH_2 发射氢等离子体电子的 PIC 模拟

设定氢等离子体电子的数密度为 10^{12} cm $^{-3}$,发射电流为 200 A,电子初始温度 10 keV,等离子体发射区域 z 为 $0 \sim 0.02$ cm, x 为 $0.30 \sim 0.45$ cm 或 $0.65 \sim 0.80$ cm。图 7 所示为氢等离子体发射时的电子空间分布图。由于电流在与板平行的方向流通,在两极间距最小处电场显著增强,导致更快速的击穿,高密度的等离子体形成,产生的等离子体在电弧电流的自磁场作用下离开闪络板表面,垂直喷出的冲力更大。

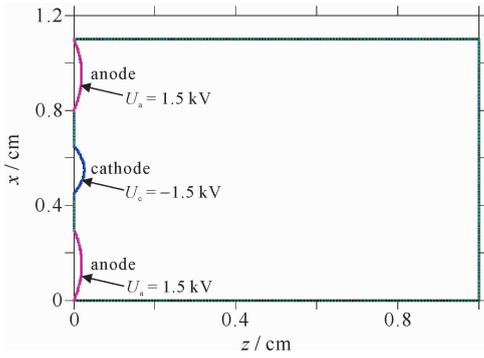


Fig. 4 Calculation model of PIC simulation

图 4 粒子模拟计算模型

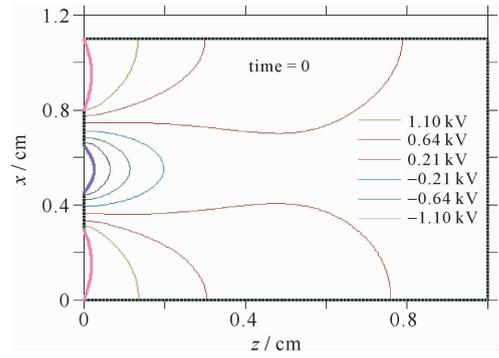


Fig. 5 Interelectrode electric potential distribution

图 5 极间电压等位线分布图

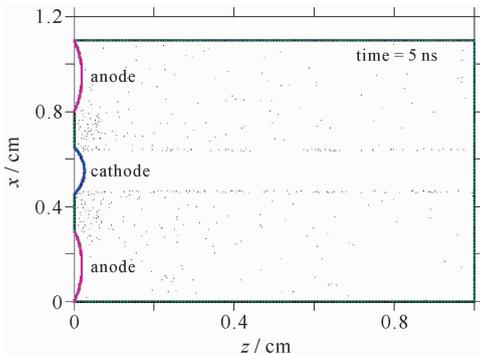


Fig. 6 Spatial distribution of electrons in arc discharge

图 6 电弧放电时的电子空间分布

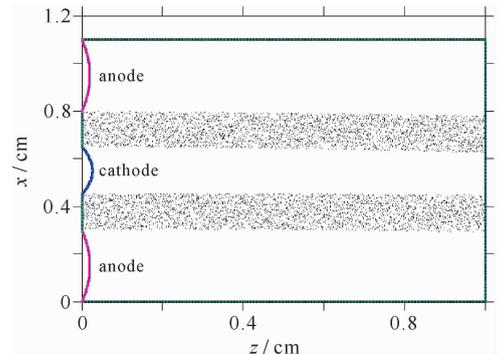


Fig. 7 Spatial distribution of electrons at hydrogen plasma emission

图 7 氢等离子体发射时的电子空间分布

4 等离子体产生后的加速运动过程分析

对等离子体产生后的加速运动过程分析如下：(1)假定被加速的等离子体的质量 m 为一个常数；(2)沿加速电极单位长度上的电感 $\partial L/\partial x$ 为常数 b ，加速电极长度为 l ，放电回路上的总电感 L_0 远大于加速电极上的电感 bl ；(3)放电回路上的电阻很小，可忽略。因而电流随时间作正弦变化，即

$$I = V_0 \sin \omega t / Z = V_0 C_0 \omega \sin \omega t \tag{1}$$

式中： Z 为特征阻抗， $Z = \sqrt{L_0/C_0}$ ； ω 为振荡角频率， $\omega = 1/\sqrt{L_0 C_0}$ ； C_0 为放电电容器的电容； V_0 为放电电容器的充电电压。对于真空中等离子体的电磁应力张量 \mathbf{F} ，真空自由能密度为

$$d\mathbf{F} = \mathbf{E} \cdot d\mathbf{D} + \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} = IdI \frac{\partial L}{\partial x} \tag{2}$$

即等离子体枪放电所产生的等离子体团所受的径向有质动力可以表示为

$$F = \frac{1}{2} I^2 \partial L / \partial x = \frac{1}{2} I^2 b \tag{3}$$

于是等离子体受到加速，并按牛顿第二定律方程运动

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{2} b V_0^2 C_0^2 \omega^2 \sin^2 \omega t \tag{4}$$

对其积分，并用 v, τ 表示等离子体团沿着加速电极加速后离开等离子体枪表面时的发射速度和时间，令 $A = bV_0^2 C_0^2 / 16m$ 得到

$$v/A\omega = 4\omega\tau - 2\sin 2\omega\tau \tag{5}$$

$$l/A = 2(\omega\tau)^2 + \cos 2\omega\tau - 1 \tag{6}$$

式(5)和式(6)给出了等离子体团发射速度 v 与参数 A, l, ω 之间的关系。对上述推导进行分析可以得出：等离子体团发射速度 v 随着加速电极长度 l 、电容 C_0 及其充电电压 V_0 的增加而增大，随着回路电感 L_0 的增加而减小；在电参量不变的情况下，等离子体团发射速度 v 随加速电极长度 l 的加长而提高；在实际放电过程中，充电电压 V_0 的变化会影响电离气体的数量及其质量。

5 闪络板等离子体枪等离子体放电实验

实验中室温 25 ℃; 实验腔真空度为 0.267×10^{-2} Pa; 采用分路器法 (0.2Ω 电阻) 测量闪络板放电电流波形, 采用 Langmuir 探针法测量等离子体密度; 柱状闪络板内径为 10.4 cm, 由 3 kV, 20 μ F 电容器驱动。实验诊断如下: 测量得到周期为 1.5 μ s、约 150 A 的电流通过闪络板; 经过多次放电实验后, 等离子体枪表面烧蚀均匀, 测得等离子体密度为 $10^{12} \sim 10^{13}/\text{cm}^3$, 存在时间 0.5 μ s, 闪络板产生的等离子体具有较高定向速率 (利用公式 (5) 换算达到 5 $\text{cm}/\mu\text{s}$)。图 8 清晰地显示了闪络板的电流频率和幅值。

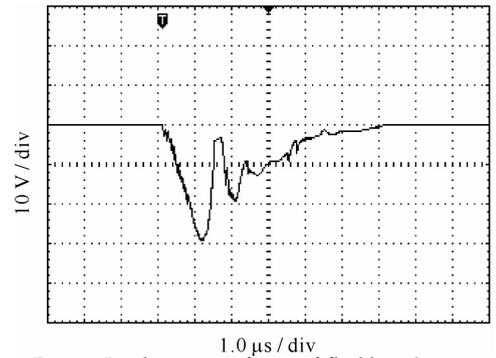


Fig. 8 Discharge waveforms of flashboard

图 8 闪络板的放电电流波形

6 结 论

本文提出了用于 POS 的新型筒状双层闪络板等离子体枪总体设计方案, 并对其运行特性进行了系统的理论及实验研究, 理论分析结果表明, 在两极间距最小处的电场变化梯度最大, 这将首先诱发在该区域的电弧放电, 且会更快速的击穿, 形成高密度的等离子体; 放电实验表明, 该新型筒状双层闪络板等离子体枪可产生密度为 $10^{12} \sim 10^{13}/\text{cm}^3$ 、定向速率约 5 $\text{cm}/\mu\text{s}$ 的均匀等离子体。

参考文献:

- [1] Teramoto Y, Kohno S, Lisitsyn I V, et al. Characterization of cable plasma guns for microsecond plasma opening switch[C]//IEEE International Conference on Pulsed Power. 1999;1183-1186.
- [2] Mendel C W, Seidel D B, Rosenthal S E. A study of parameters useful for describing plasma-opening switches[C]//Proceedings of the 12th International Conference on High-Power Particle Beams. 1998;297-300.
- [3] Stinnett R W, McDaniel D H, Rochau G E, et al. Plasma opening switch development for the particle beam fusion accelerator II (PBFA II) [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1987, **15**(5):557-563.
- [4] Goodrich P J, Hinshelwood D D, Comisso R J, et al. High power opening switch operation on Hawk[C]//Proceedings of the 9th International Pulsed Power Conference. 1993;511-515.
- [5] Weber B V, Hinshelwood D D, Comisso R J. Interferometry of flashboard and cable-gun plasma opening switches on Hawk[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1997, **25**(2):189-195.
- [6] Kohno S, Teramoto Y, Lisitsyn I V, et al. Cable guns as a plasma source in a plasma opening switch[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999, **27**(3):778-785.

A novel double-layer cylinder flashboard plasma gun system

Zhao Ying¹, Yan Ping¹, Wang Jue¹, Shao Tao¹, Wang Xiaoming²

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A novel double-layer cylinder flashboard plasma gun system is put forward. The inner flashboard of the plasma gun is connected to high voltage, with 160 arcing points uniformly distributed on it. Each arcing point consists of a central electrode and a groove filled by TiH_2 powder. The powder is bound to the groove with a sodium-silicate binder. TiH_2 is chosen for negative hydrogen production, and one can fill the grooves with other materials for other purposes if needed. Each high voltage electrode is connected with the earth electrode through a 100 Ω resistor, and the plasma is produced in the gap between electrodes. Experimental results show that, when the capacitor is 3 kV/20 μ F, the plasma gun is triggered by a current whose amplitude is 150 A and pulse width is 1.5 μ s, and the density, existing time and directional speed of the produced plasma are $10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 0.5 μ s and 5 $\text{cm}/\mu\text{s}$ respectively. Experimental results also show that the plasma gun possesses high reliability and reproducibility for plasma production.

Key words: flashboard plasma gun; double-layer flashboard; titanium hydride; plasma; surface flashover