



·高功率脉冲电源技术及应用·

## 三电极结构在双源激励下的介质阻挡放电特性\*

姜 松<sup>1</sup>, 张征东<sup>1</sup>, 王永刚<sup>1</sup>, 李 孜<sup>1</sup>, 吴忠航<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093; 2. 上海健康医学院 上海市分子影像学重点实验室, 上海 201318)

**摘 要:** 介质阻挡放电 (DBD) 在工业中得到广泛应用, 但效率限制了它的进一步应用。提出了一种 DBD 结构和针板结构相结合三电极结构。将正极性脉冲电源施加在 DBD 电极上, 负极性脉冲电源施加到针板电极上。分析了不同结构下三电极 DBD 的放电特性、现象和光谱强度。结果表明, 三电极结构更加有利于 DBD 放电通道的产生, 其放电均匀性、发光强度均强于双电极 DBD, 特别是在丝网接地电极条件下, 放电更加强。当三种电极结构正极性电压维持在 11 kV, 负极性电压为 -5 kV 时, 丝网接地三电极中 DBD 的放电电流峰值达到 1.54 A, 而实心接地三电极和传统双电极中 DBD 的放电电流峰值为 1.14 A 和 0.74 A。在负极性脉冲维持期间, 针网间隙处于击穿状态, DBD 放电出现很大的放电电流。在三电极结构中, 随着施加在针板上负极性电压的升高也使三电极 DBD 放电更加强。不同结构下的 DBD 的放电光谱表明在丝网接地时三电极 DBD 激发粒子的光谱强度最强。这一趋势与 DBD 放电电流和功率一致。

**关键词:** 介质阻挡放电; 三电极结构; 放电特性; 发射光谱

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230173

## Dielectric barrier discharge characteristics of three-electrode structure under dual-source excitation

Jiang Song<sup>1</sup>, Zhang Zhengdong<sup>1</sup>, Wang Yonggang<sup>1</sup>, Li Zi<sup>1</sup>, Wu Zhonghang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. The Shanghai Key Laboratory of Molecular Imaging, Shanghai University of Medicine and Health Sciences, Shanghai 201318, China)

**Abstract:** Dielectric barrier discharge (DBD) is widely used in industry, but the efficiency limits its further application. This paper proposes a three-electrode structure combining a DBD structure and a needle-plate structure. A positive polarity pulsed power supply is applied to the DBD electrode and a negative polarity pulsed power supply is applied to the needle plate electrode. The discharge characteristics, phenomena and spectral intensity of the three-electrode DBD under different structures are analyzed. The results show that the three-electrode structure is more beneficial to the generation of DBD discharge channels, and its discharge uniformity and luminous intensity are stronger than that of the two-electrode DBD, especially under the condition of mesh grounded electrode. When the positive polarity voltage of the three-electrode structure was maintained at 11 kV and the negative polarity voltage was -5 kV, the peak discharge current of DBD in the mesh grounded three-electrode reached 1.54 A, while the peak discharge currents of DBD in the solid grounded three-electrode and the traditional two-electrode were 1.14 A and 0.74 A respectively. During the period of the negative polarity pulse maintenance, the needle mesh gap was in the state of breakdown, and the DBD discharges appeared to have a large discharge current. In the three-electrode structure, the three-electrode DBD discharges also become more intense with the increase of the negative polarity voltage applied to the needle plate. According to the discharge spectra of DBD under different structures, spectral intensity of excited particles is the strongest among the three-electrode DBD grounded with wire mesh. This trend is consistent with the discharge current and power of DBD.

**Key words:** dielectric barrier discharge, three electrode structure, discharge characteristics, emission spectrum

\* 收稿日期: 2023-06-09; 修订日期: 2023-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12005128, 12205192, 12375251)

联系方式: 姜 松, jecifer@163.com。

通信作者: 吴忠航, wuzh@sumhs.edu.cn。

介质阻挡放电(DBD)可以在大气压下产生大量活性低温等离子体<sup>[1-2]</sup>,目前,它已广泛应用于臭氧合成<sup>[3-4]</sup>、杀菌<sup>[5-6]</sup>、材料表面改性<sup>[7-8]</sup>和环境污染处理<sup>[9-11]</sup>等领域。传统DBD的电极结构主要包括针阵列、平板、螺旋杆和金属网。电极的形状对形成的等离子体的空间分布和均匀性有显著影响<sup>[12]</sup>,同时也会影响放电的效率。为了提高DBD的放电效率,致力于优化介电材料、激励电源、电极结构等领域<sup>[13-15]</sup>,在大多数DBD应用中,通常使用高压脉冲电源和高频交流电源作为激励源来产生等离子体放电。研究表明,与交流DBD相比,脉冲DBD具有更高的瞬时功率沉积、更低的总功耗、更高的能量效率以及更均匀稳定的等离子体放电<sup>[16]</sup>。所以高压脉冲电源更具有优势。在优化电极结构方面,李清泉等<sup>[17]</sup>研究了电极结构、介质材料厚度对DBD装置放电特性的影响,发现针-板电极及电阻率高的阻挡介质容易形成稳定的放电。蒋楠等<sup>[18]</sup>研究了不同脉冲模式激励的三电极DBD反应器中甲苯的降解效率和能量产率,得出与单极脉冲相比,双极性脉冲能产生更多的活性物质。商克峰等<sup>[19]</sup>研究了阵列针电极、网电极、平板电极构型对DBD特性、臭氧生成特性的影响,发现丝网电极放电时生成的臭氧浓度最高。上述研究表明,通过使用脉冲电源和改变电极结构,可以在一定程度上提高DBD的能量利用效率。

在上述研究的基础上,提出了一种将DBD结构和针板结构相结合的三电极结构,它们共用一个接地电极。将自制的正极性脉冲电源施加在DBD电极上,负极性脉冲电源施加到针板电极上。正负脉冲电源通过信号控制实现输出电压可调和时序同步。分析了不同结构下三电极DBD的放电特性、现象和光谱强度。结果表明,随着外加电压的增加,双电极和三电极放电的放电强度和均匀性都相应增加。在针板间隙击穿的情况下,三电极DBD的放电电流和功率显著增加。当接地电极从实心板变为丝网时,丝网接地三电极DBD放电表现出明显的丝状放电,可以增加有效放电面积,提高放电均匀性和放电强度,从而降低起始击穿电压。最终表明,丝网接地电极的DBD放电具有更大的放电电流和功率。在相同的电压下,三电极DBD放电时的光谱强度丝网电极最高,实心电极次之,双电极最低。光谱结果进一步验证了放电图像和放电特性。

## 1 实验搭建

实验装置的示意图如图1所示,包括三电极放电装置、正极性脉冲电源、负极性脉冲电源和一个发射光谱测量系统。

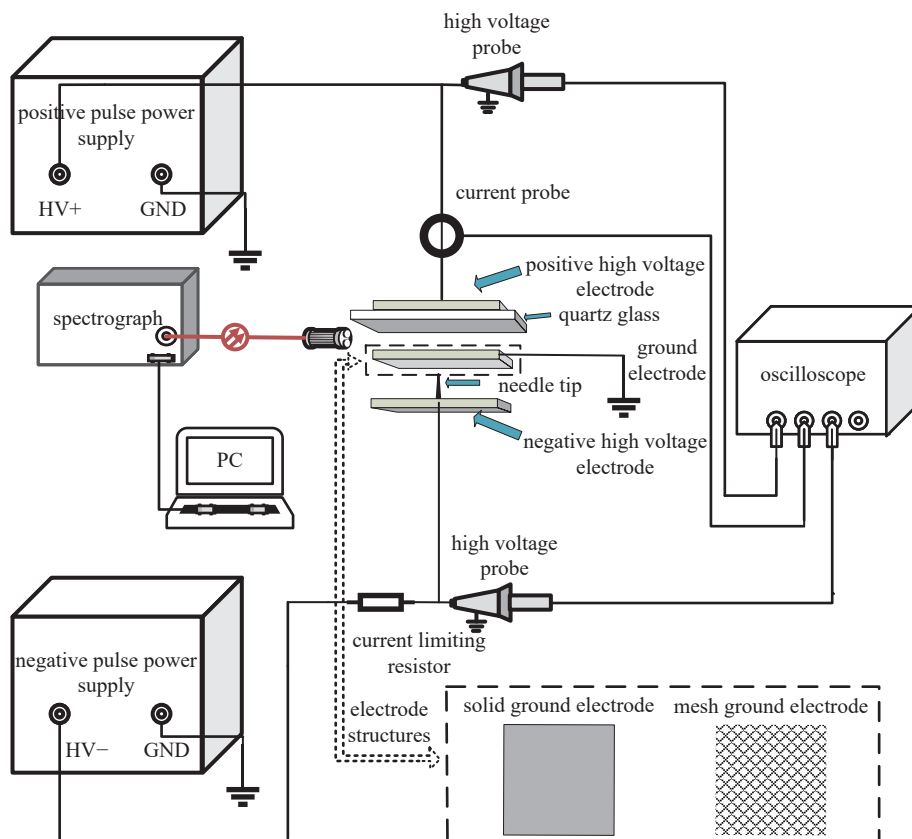


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

图1 实验系统示意图

文中使用的三电极结构如图2所示。三电极结构包括上部分平行板 DBD 反应器, 下部分为针板电极。针板电极和 DBD 共用同一个接地电极。在图2(a)中, DBD 中的高压正极和接地电极由黄铜制成, 电极尺寸为  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ , 厚度为  $2\text{ mm}$ 。使用的介质材料为石英玻璃, 石英玻璃紧密连接在阳极电极上, 介质尺寸为  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ , 厚度为  $2\text{ mm}$ 。针电极由不锈钢制成, 长度为  $2\text{ mm}$ , 尖端半径为  $0.2\text{ mm}$ 。DBD 间隙为  $1.5\text{ mm}$ , 针板间隙为  $1\text{ mm}$ 。在图2(b)中, 唯一的区别是接地电极是金属网。金属丝网格尺寸为  $2\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 。

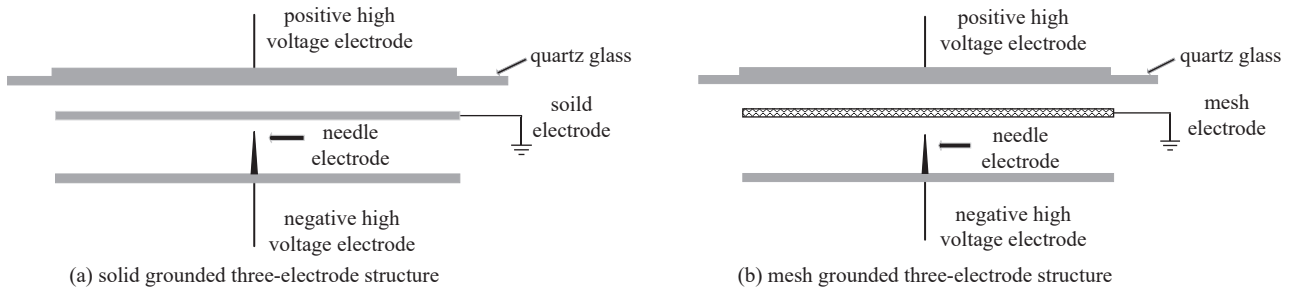


Fig. 2 Schematic diagram of the three-electrode configurations

图2 电极结构示意图

两个高压脉冲电源采用 Marx 结构, 可输出正、负方波电压。施加在 DBD 电极上的正极性脉冲电源输出电压为  $0 \sim 20\text{ kV}$  可调, 施加在针板电极上的负极性脉冲电源输出电压为  $0 \sim -20\text{ kV}$  可调。典型的电压输出波形如图3所示。脉冲宽度为  $1 \sim 50\text{ }\mu\text{s}$  可调, 电压频率为  $1\text{ kHz}$ 。本实验中两台正负极性脉冲电源使用同一台 FPGA 提供同步信号, 进行同步驱动, 实现电压幅值可调, 时序同步。

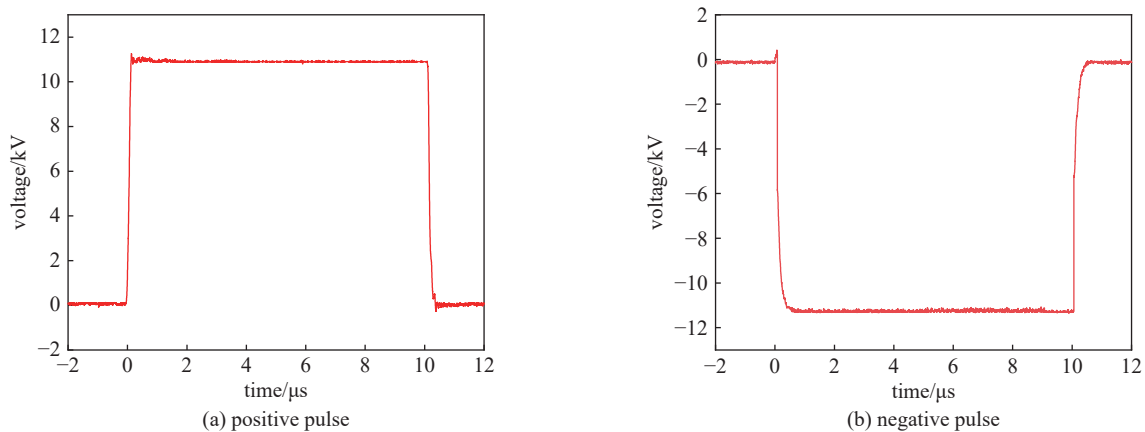


Fig. 3 Output voltage waveforms of high-voltage pulse power supply

图3 高压脉冲电源电压输出波形图

DBD 放电时电压与电流由电压探头 (Tektronix P6015A 带宽  $75\text{ MHz}$ , 分压比为  $1000:1$ ) 和电流环 (Pearson2100,  $20\text{ MHz}$ ) 检测, 示波器使用 (Tektronix 2024B 带宽  $75\text{ MHz}$ , 分压比为  $1000:1$ ), 放电照片是由佳能相机 (佳能 EOS 5D Mark III) 拍摄。放电过程中的光谱强度由光谱仪 (AvaSpec-2048-USB2) 测量。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 放电图像分析

图4(a)为正极性脉冲电源激励的传统双电极 DBD 的放电图像。图4(b)为实心接地三电极 DBD 放电图像, 其中接地电极是实心黄铜板。图4(c)显示了丝网接地三电极 DBD 放电图像, 其中接地电极是金属丝网。三种放电图像均在正极性电压为  $7 \sim 12\text{ kV}$ , 负极性电压为  $-5\text{ kV}$ 。脉冲重复频率为  $1\text{ kHz}$ , 脉冲宽度为  $10\text{ }\mu\text{s}$  条件下拍摄。从放电图像可以看出, 在正极性电压  $8\text{ kV}$  时, 双电极 DBD 与实心接地电极 DBD 可以观测到微弱放电, 而丝网接地电极三电极 DBD 可以明显观测到部分放电细丝, 说明丝网接地三电极 DBD 所需的起始放电电压更低。随着电压值的逐渐升高, 电场强度增加, 粒子的动能增加, DBD 的放电强度以及放电面积均有所增加。丝网电极同平板电极相比, 其网线交点电场不均匀, 使得在外加电场的作用下作用于丝网交点处的电场要略高于其他地方电场, 放电优先作用于丝网接地电极的网线交点处, 当某个放电点形成并发展后会更大程度上抑制周围区域的放电, 从而在

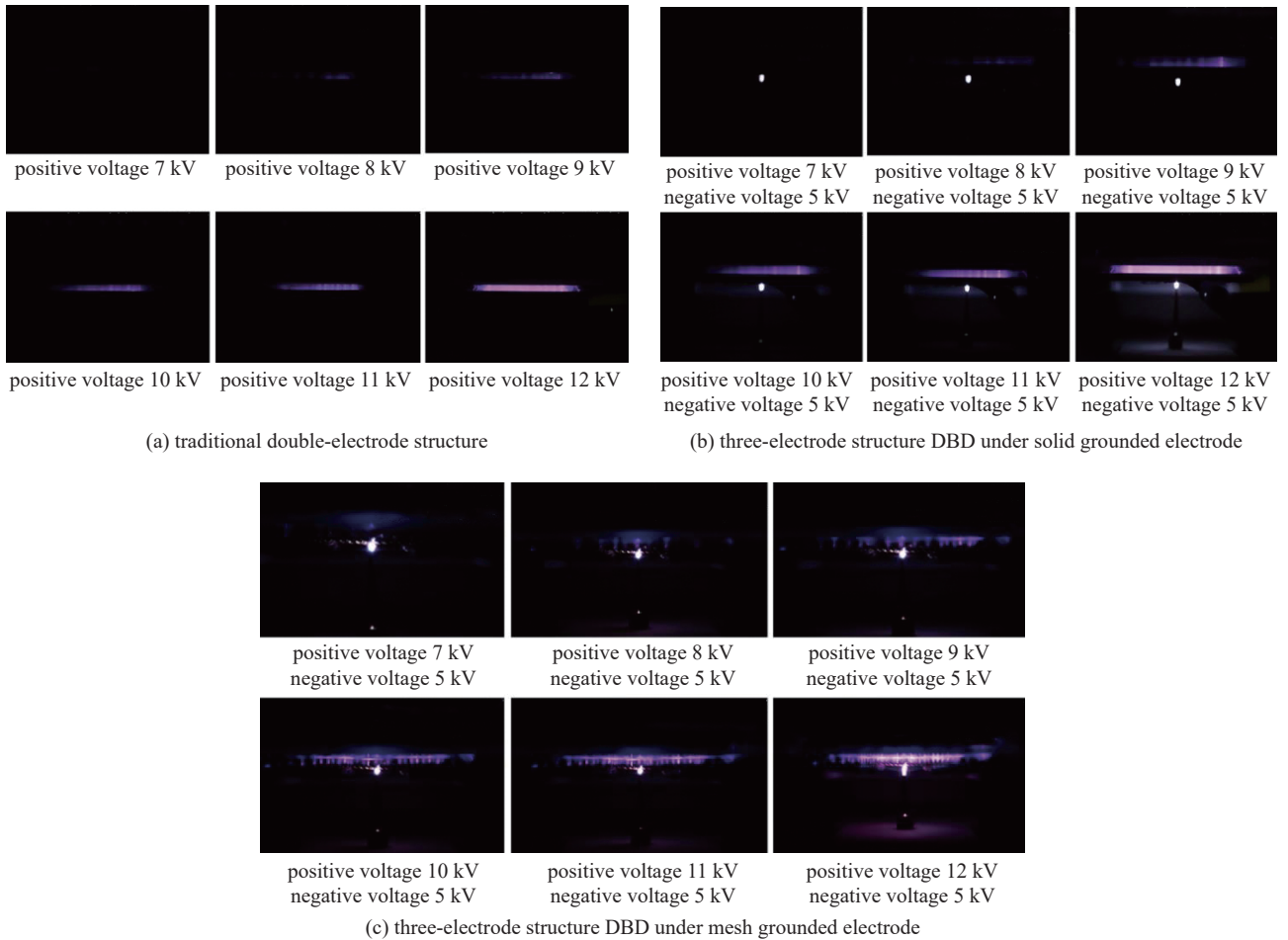


Fig. 4 Discharge images of different electrode structures

图 4 不同电极结构放电图像

该区域形成独立的主放电通道, 放电由网格的中部区域往外延伸, 发展为弥散状的丝状放电。当电压幅值为 12 kV 时, 丝网接地电极 DBD 放电细丝通道已经十分密集, 大量微放电通道分布在整個放电空间, 等离子体沿介质表面和介质之间的气隙更充分地发展, 说明附加的丝网接地电极更加有利于放电通道和放电的产生。放电均匀性、发光强度均强于双电极 DBD 及实心接地三电极。

## 2.2 放电特性分析

图 5(a) 显示了在单个正极性脉冲电源激励下双电极 DBD 的电压-电流特性, 而图 5(b) 和图 5(c) 描述了在双电源激励下不同接地电极的三电极 DBD 的电压-电流特性。在三种情况下, 施加在 DBD 上的正极性电压为 11 kV。针板上的负极性电压为  $-5$  kV。单级正脉冲激励下在一个脉冲周期内出现两次放电, 三电极在一个脉冲周期内, 也出现两次放电。但实心接地三电极 DBD 放电电流幅值比双电极略微增大。丝网接地相比较实心接地三电极 DBD 放电电流幅值显著增加。特别是当负极性电压达到峰值时, 三电极 DBD 放电电流具有更大的峰值。

如图 6 所示为不同电极结构下 DBD 放电电流对比图。实心接地三电极 DBD 的峰值电流为 1.14 A, 而双电极 DBD 的峰值电流为 0.74 A。原因是, 一方面, 不同接地三电极 DBD 开始放电前, 针板已经发生多次放电, 产生大量电荷积累在放电间隙。从而导致 DBD 放电间隙感应电场的增大, 电子从中获得更多的能量形成高能电子, 在空间电场的作用下加速运动, 因此电离率增加, 产生更多的带电粒子, 导致放电电流增大<sup>[20]</sup>。另一方面, 针尖处产生大量自由电子在电场的作用下向接地电极的下层板表面加速运动, 由于脉冲电流的趋肤效应, 电流集中在接地电极外表的薄层, 并且由于接地电极处于等电位, 少部分电子到达接地电极的上表面作用于 DBD 放电间隙中, 同时在外加正极性电压的作用下在 DBD 放电间隙中注入了更多能量, 从而提升实心接地三电极 DBD 放电的电流强度。

在丝网接地条件下, 三电极 DBD 放电电流进一步增加。最大电流达到 1.54 A。与针板结构相比, 针网结构中的电场分布极不均匀, 产生的畸变电场要远强于针板结构, 施加相同负极性电压下击穿电压更低, 放电更强烈。在负极性电压为  $-5$  kV 电压下, 此时针网结构在极短的时间内完全击穿, 可激发的带电粒子增多。同时在电场的作

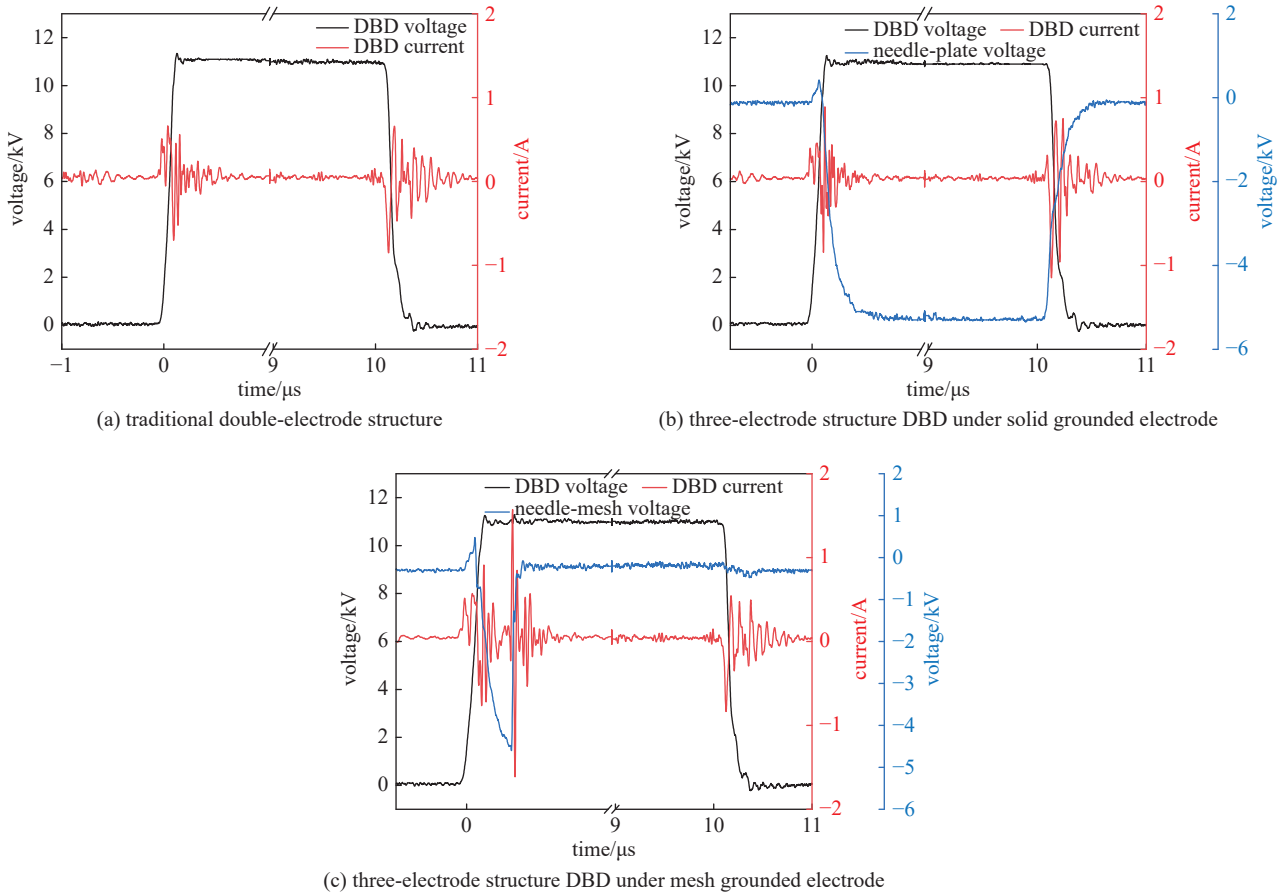


Fig. 5 Voltage current waveform of DBD discharge under different electrode structures

图 5 不同电极结构下 DBD 放电的电压-电流波形图

用下,大量自由电子向接地极加速运动,部分自由电子被接地电极捕获,但仍有大量自由电子穿过网孔间隙到达三电极 DBD 放电间隙中,同时受到正极性电场作用,参与到三电极 DBD 放电过程中,从而加大 DBD 放电电流;同时针网间隙被击穿后,其阻抗近似短路,针网间隙上的电压急剧下降维持在 200 V 左右,直到脉冲结束。

### 2.3 放电功率分析

图 7 显示了在上述三种不同结构下,负极性电压为 -5 kV,改变正极性电压下的 DBD 放电功率,当三种结构的正极性电压为 11 kV 时。双电极 DBD 的功率为 4.29 W,实心接地三电极下的 DBD 功率为 4.53 W,丝网接地三电极下的 DBD 功率为 5.09 W。三电极 DBD 的放电功率显著高于双电极结构。并且丝网接地电极中的 DBD 的功率高于实心接地电极。双源激励下三电极 DBD 放电功率的

提高一方面是由于针板放电中累积的电荷,改变了放电空间的电场分布,导致 DBD 放电间隙电场的增大,从而提高 DBD 的放电电流和放电功率;另一方面,一部分自由电子进入 DBD 间隙,增加了电子的初始数量。导致放电变得更加强烈,从而提高 DBD 的放电电流和放电功率。与实心接地电极相比,丝网接地电极的三电极中 DBD 的放电功率显著增加。出现这种现象的原因是,丝网电极结构不均匀性,提高了上极板介质表面的电场强度。在脉冲维持阶段期间,针网间隙总是处于击穿状态。放电电流急剧增加,同时针网放电积累了大量的自由电子。并且相当一部分自由电子穿过丝网并进入 DBD 放电空间,从而降低 DBD 的击穿电压,这最终导致更高的放电功率。

图 8 比较了不同接地电极结构下三电极 DBD 放电功率随负极性电压的变化,正极性电压维持在 11 kV。结果

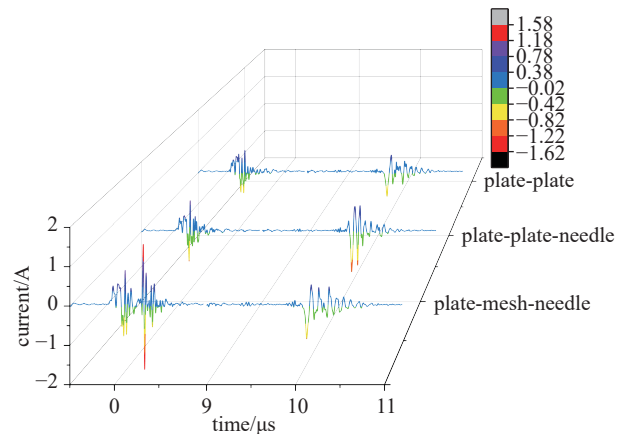


Fig. 6 Discharge current comparison between double-electrode and three-electrode DBDs

图 6 双电极和三电极 DBD 放电电流对比



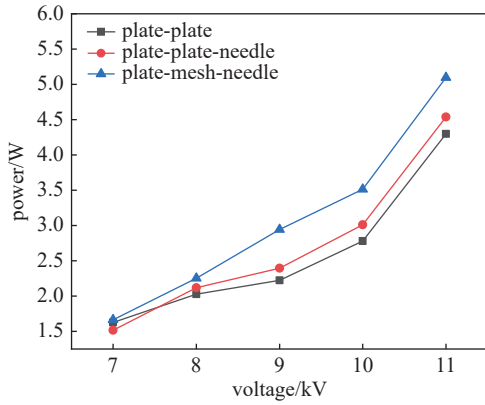


Fig. 7 Discharge power of DBD under different positive voltage with different structures

图 7 不同结构的 DBD 在不同正极性压下的放电功率

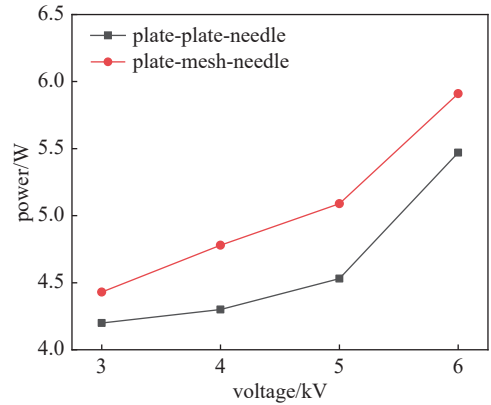


Fig. 8 Discharge power of DBD under different negative voltage with different structures

图 8 不同结构的 DBD 在不同负极性电压下的放电功率

表明, DBD 功率随着负极性电压的增加而增加。负极性电压的增加导致更强烈的放电和更多的电荷积累。这进一步增加了三电极 DBD 间隙中的初始电子密度和电场强度, 最终导致三电极 DBD 放电功率的增加。

### 2.4 放电发射光谱特性

通过对发射光谱的测定来分析放电产生的活性粒子强度。图 9 为不同结构下的发射光谱。图 9(a) 为双电极 DBD 的发射光谱。图 9(b) 为实心接地电极的三电极 DBD 发射光谱。图 9(c) 为丝网接地电极的三电极 DBD 发射光谱。正极性电压为 11 kV, 负极性电压为 -5 kV。频率为 1 kHz, 脉冲宽度为 10  $\mu$ s。从发射光谱的谱线可知, 光谱仪读到的谱线主要是  $N_2$  的第二正带系。主要原因是空气中的氮气占大多数,  $N_2$  第二正带系是由  $N_2(C^3\Pi_u-B^3\Pi_g)$  和  $N_2(B^3\Pi_g)$  阶跃产生的, 是整个  $N_2$  发射光谱中最强最稳定的带系。激发态  $O_2$  以及  $N_2$  的其他带系的粒子跃迁也会

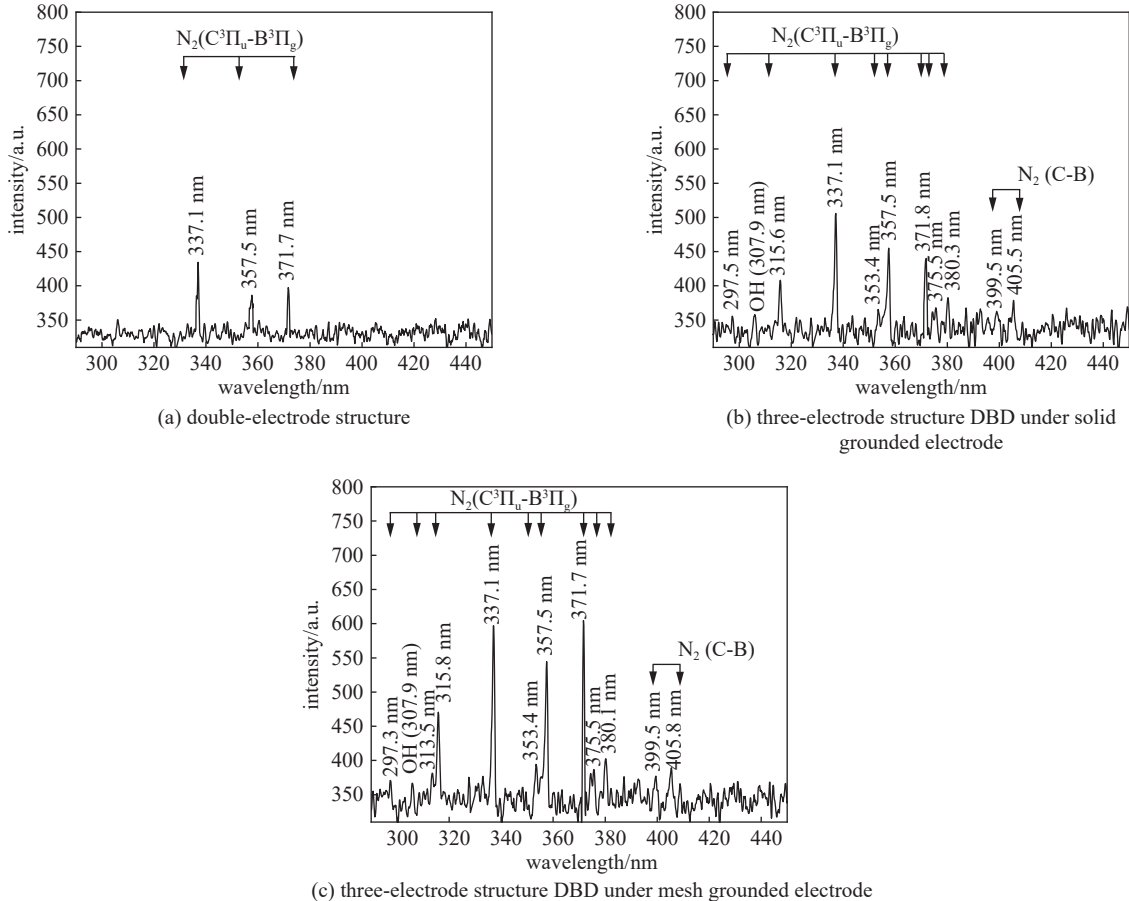


Fig. 9 Emission spectra under different electrode structures

图 9 不同结构下的 DBD 发射光谱

产生发射光谱,但是这些粒子浓度较低,少量的激发态 OH,其谱线分布为 308 nm 左右<sup>[21]</sup>。在这些谱线中, N<sub>2</sub> 光谱的相对强度最高,而 OH 谱线的相对强度较弱。

根据发射谱线的结果,可以观察到丝网接地三电极 DBD 的发射谱强度最强。传统的双电极 DBD 的发射光谱是最弱的。这种趋势与相同电压下放电电流和功率的变化是一致的。负极性电压的引入增加了 DBD 间隙电场强度、放电电流和气体电离程度,增加了等离子体粒子的数量。当接地电极从实心变为金属丝网时,丝网接地电极的变化允许等离子体穿过丝网孔径并进入 DBD 放电间隙,从而在放电期间产生更高的峰值放电电流和更大的功率。因此,与其他结构相比,丝网接地三电极 DBD 产生了更多的高能电子,从而导致更高的发射光谱强度。此外,光谱强度与放电图像中观察到的结果一致。

### 3 结 论

本文提出了一种新的三电极结构,它包括共用接地电极的 DBD 结构和针板结构。在 DBD 电极上施加正极性脉冲电源,在针板电极上施加负极性脉冲电源。正脉冲电压输出和负脉冲电压输出可以通过信号控制来实现同步。研究了三种电极结构下 DBD 放电的放电特性、图像和发射光谱。结果表明:

(1) 丝网接地三电极 DBD 放电均匀性、发光强度均强于传统双电极 DBD 和实心接地三电极 DBD,且丝网接地三电极 DBD 所需的起始放电电压更低,更加有利于放电通道和放电的产生。

(2) 在外加正极性电压 11 kV, 负极性-5 kV 时,实心接地三电极 DBD 的峰值电流为 1.14 A,而双电极 DBD 的峰值电流为 0.74 A。在丝网接地条件下,三电极 DBD 放电电流进一步增加。最大电流达到 1.54 A。自由电子穿过网孔间隙到达三电极 DBD 放电间隙中,同时受到正极性电场作用下参与到三电极 DBD 放电过程中,丝网接地三电极结构 DBD 的放电电流有了较大的提升。

(3) 在外加正极性电压 11 kV, 负极性-5 kV 时,三电极 DBD 放电功率均高于传统的双电极 DBD。实心接地三电极 DBD 放电功率为 4.53 W,略高于双电极 DBD 的 4.29 W,原因在于针板放电中累积的电荷增加了 DBD 间隙电场强度和初始电子。而丝网接地三电极 DBD 的放电功率达到了 5.09 W,这是由于丝网间隙的存在有更多的自由电子进入 DBD 间隙增强 DBD 的放电功率。

(4) 从三种不同结构的 DBD 放电的发射光谱可以看出,当使用丝网接地电极时,产生了更多的高能粒子,粒子的发射光谱强度最强,而传统的双电极 DBD 最低。发射谱线强度与 DBD 放电特性和放电图像的变化一致。

#### 参考文献:

- [1] Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2003, 23(1): 1-46.
- [2] Brandenburg R. Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2017, 26: 053001.
- [3] Homola T, Pongráč B, Zemánek M, et al. Efficiency of ozone production in coplanar dielectric barrier discharge[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2019, 39(5): 1227-1242.
- [4] Sung T L, Teii S, Liu C M, et al. Surface catalytic effect of electrode materials on ozone dissociation in a cylindrical dielectric barrier discharge ozonizer[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(10): 2751-2755.
- [5] Wang Xiaojing, Wang Peng, Wang Qiao, et al. Efficient degradation of 4-fluorophenol under dielectric barrier discharge plasma treatment using Cu/Fe-AO-PAN catalyst: role of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> production[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 420: 127577.
- [6] Liang Peng, Jiang Wanmin, Zhang Lan, et al. Experimental studies of removing typical VOCs by dielectric barrier discharge reactor of different sizes[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, 94: 380-384.
- [7] Osawa N, Kaga H, Fukuda Y, et al. Comparison of the ozone generation efficiency by two different discharge modes of dielectric barrier discharge[J]. *The European Physical Journal—Applied Physics*, 2011, 55: 13802.
- [8] Zhang Xuming, Lee B J, Im H G, et al. Ozone production with dielectric barrier discharge: effects of power source and humidity[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(10): 2288-2296.
- [9] Mastanaiah N, Banerjee P, Johnson J A, et al. Examining the role of ozone N in surface plasma sterilization using dielectric barrier discharge (DBD) plasma[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2013, 10(12): 1120-1133.
- [10] Fang Zhi, Liu Yuan, Liu Kun, et al. Surface modifications of polymethylmethacrylate films using atmospheric pressure air dielectric barrier discharge plasma[J]. *Vacuum*, 2012, 86(9): 1305-1312.
- [11] Shao Tao, Zhang Cheng, Long Kaihua, et al. Surface modification of polyimide films using unipolar nanosecond-pulse DBD in atmospheric air[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(12): 3888-3894.

- [12] De Geyter N, Morent R, Van Vlierberghe S, et al. Effect of electrode geometry on the uniformity of plasma-polymerized methyl methacrylate coatings[J]. [Progress in Organic Coatings](#), 2011, 70(4): 293-299.
- [13] Jiang Hui, Li Wenhui, Xu Yaozong, et al. Influence of segmented grounding electrodes on electrical characteristics in annular surface dielectric barrier discharge[J]. [Journal of Physics D: Applied Physics](#), 2021, 54: 265203.
- [14] Liu Feng, Chu Haijing, Zhuang Yue, et al. Influence of dielectric materials on discharge characteristics of coaxial DBD driven by nanosecond pulse voltage[J]. [Plasma Research Express](#), 2020, 2: 034001.
- [15] Kettlitz M, Höft H, Hoder T, et al. Comparison of sinusoidal and pulsed-operated dielectric barrier discharges in an O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> mixture at atmospheric pressure[J]. [Plasma Sources Science and Technology](#), 2013, 22: 025003.
- [16] Wang Qian, Liu Feng, Miao Chuanrun, et al. Investigation on discharge characteristics of a coaxial dielectric barrier discharge reactor driven by AC and ns power sources[J]. [Plasma Science and Technology](#), 2018, 20: 035404.
- [17] 李清泉, 马磊. 影响介质阻挡放电的因素[J]. [高电压技术](#), 2007, 33(9): 10-12,16. (Li Qingquan, Ma Lei. Experimental study of factors affecting dielectric-barrier discharge[J]. [High Voltage Engineering](#), 2007, 33(9): 10-12,16)
- [18] Jiang Nan, Guo Lianjie, Qiu Cheng, et al. Reactive species distribution characteristics and toluene destruction in the three-electrode DBD reactor energized by different pulsed modes[J]. [Chemical Engineering Journal](#), 2018, 350: 12-19.
- [19] 商克峰, 曹晓萌, 王肖静, 等. 高压电极构型对DBD装置放电特性及臭氧生成的影响[J]. [高电压技术](#), 2016, 42(5): 1394-1400. (Shang Kefeng, Cao Xiaomeng, Wang Xiaojing, et al. Effect of high voltage electrode geometry on the discharge characteristics and the ozone generation of a DBD device[J]. [High Voltage Engineering](#), 2016, 42(5): 1394-1400)
- [20] Chen Ying, Fu Mengji, Shang Kefeng. Discharge characteristics and ozone generation analysis of dual-power excited three-electrode DBD[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering. 2022: 1229417.
- [21] Chang Zhengshi, Shi Xingmin, Zhang Guanjun, et al. Effects of atmospheric DBCD plasma on three kinds of typical microorganisms[J]. [IEEE Transactions on Plasma Science](#), 2013, 41(7): 1703-1708.