

Experimental Study on Power Characteristic of Surface Dielectric Barrier Discharge

Sitao Wang, Boning Yu, Xuezhong Yan

Electrical Engineering College of Chongqing University, Chongqing
Email: 20153325@cqu.edu.cn

Received: Nov. 23rd, 2017; accepted: Dec. 7th, 2017; published: Dec. 14th, 2017

Abstract

The experimental studies on the factors that influence the surface dielectric barrier discharge (SDBD) are helpful to provide experimental basis for the design of actuators with higher power. Based on an HF/HV power supply, with epoxy as a dielectric barrier, experiments on surface dielectric barrier discharge were carried out in air at atmospheric pressure. The effects of applied voltage, voltage frequency, dielectric thickness and electrode gap on power characteristic of surface dielectric barrier discharge were investigated. The experimental results show that the higher the applied voltage, the thinner the dielectric thickness; and decreasing electrode gap can increase the number of micro-discharge channels and enhance its luminous intensity. The charge transfer capability is intensified, so that the peak value of instantaneous power increases. The effect of the applied voltage on power characteristic is particularly significant. Higher voltage frequency leads to the peak value of instantaneous power growing linearly and slightly.

Keywords

Surface Dielectric Barrier Discharge (SDBD), The Peak Value of Instantaneous Power, Discharge Phenomenon, Influence Factors

表面介质阻挡放电功率特性实验研究

王思韬, 于泊宁, 严学治

重庆大学电气工程学院, 重庆
Email: 20153325@cqu.edu.cn

收稿日期: 2017年11月23日; 录用日期: 2017年12月7日; 发布日期: 2017年12月14日

摘要

研究影响表面介质阻挡放电的因素, 能为获得较大功率的激励器设计提供实验基础。本文在大气环境

条件下,以环氧作为介质阻挡材料,基于高频高压电源进行了表面介质阻挡放电实验,研究了电压幅值和频率、介质厚度以及电极间距对放电功率特性的影响。结果表明,增大外加电压幅值以及减小介质厚度和电极间距,微放电通道数目增加且发光强度增强,传输电荷能力增强,放电瞬时功率峰值增大,其中电压幅值对放电功率特性的影响尤为显著;频率升高,瞬时功率峰值呈线性上升,但随频率的变化率较小。

关键词

表面介质阻挡放电, 瞬时功率峰值, 放电现象, 影响因素

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

表面介质阻挡放电(SDBD)是一种重要的大气压放电形式,可在高气压下避免放电向电弧形式转变[1]。SDBD 的激励器电极布置在物体表面,使得边界层气体分子加速或局部体积耗散加热,从而改变边界层的流场结构和物理特性,作为一种流动控制新技术,受到广泛关注[2] [3] [4] [5];同时,由于 SDBD 生成臭氧的能量效率远高于其它方式,因此在臭氧生成、污水处理、环境保护等领域的应用也备受关注[6] [7] [8];当在两极间施加一定频率的高压交流电时,间隙内的气体就会被电离,形成强烈的气体放电,从而产生高浓度的等离子体,等离子体产生的活性粒子在生物医学、纳米技术等领域起到关键作用[9]-[18],因此如何获得较大功率的 SDBD 激励器受到了越来越多的关注。商克峰等[19]以具有螺环线形高压电极的管状沿面放电装置为对象,研究了装置结构及供电电源对其放电功率特性及臭氧生成的影响;Pekárek S [20]研究了电压频率对空气中 SDBD 的放电功率和臭氧产生的影响;张颖等[21]为了研究 SDBD 反应器的臭氧产量及放电性能,以螺环型沿面放电作为研究对象,探讨了不同外加条件、电极结构对臭氧产量和沿面放电功率的影响;大连理工大学的李杰等[22]在石英玻璃筒上制作沿面放电等离子体发生系统,考察不同低压电极配置方法对臭氧生成和放电功率特性的影响。然而,目前大多数关于 SDBD 的研究对如何选择放电条件,设计激励器参数,从而改善放电功率特性,提高放电功率的研究尚没有达成统一认识。因此,对于 SDBD 相关特性和影响因素进行研究具有重要理论意义和应用价值。影响 SDBD 的因素很多,最常见的如电源参数、激励器参数、工作气体种类等。本文主要利用一台高频高压等离子体电源,以相对介电常数为 5.85 的环氧树脂作为阻挡介质材料,研究了外加电压幅值、电压的频率、介质的厚度和电极间距等因素对 SDBD 功率特性的影响。结合瞬时放电功率峰值图及放电图像进行分析,为表面放电激励器的参数设计以及 SDBD 的放电实验研究提供一些参考。

2. 实验装置和测量系统

放电实验在大气环境条件下进行,环境温度为 20℃,气压 98 kPa,实验装置和测量系统搭建在光学平台上。采用的电源为南京苏曼的 CTP-2000K 等离子体电源,输入电压 0~220 V,频率 50 Hz 的交流电。输出波形为正弦波,输出电压 0~30 kV 连续可调,频率 5~20 kHz 连续可调,电源中心频率约 10 kHz,电源功率为 500 W。实验中采用的 SDBD 激励器结构如图 1 所示,高压电极宽度为 2 mm,地电极宽度为 4 mm,电极长度均为 10 cm,电极间距为 d 。绝缘材料为环氧树脂,相对介电常数 5.85,阻挡介质板的厚

度为 t 。为防止介质表面发生沿面闪络，制作激励器时将地电极用硅胶封装[23]。

实验电压通过 Tektronix P6015A 高压探头测量，可测电压范围 0~40 kV，带宽 75 MHz，分压比 1000；放电电流通过 Pearson Model 4100 罗果夫斯基线圈测量，输出变比为 1 V/A，测量峰值为 500 A。为保持输入电流电压同步，探头电缆线均选用 3 m 的长度。电压电流信号经同轴电缆 50 Ω 匹配后分别送至 Tektronix DPO2024 示波器，其带宽和采样率分别为 200 MHz 和 1 GS/s。放电图像采用数码相机 Canon EOS70D 拍摄，镜头为佳能 EF-S 18~200 mm F/3.5-5.6 IS 远摄变焦镜头，曝光时间均为 1/25 s。

典型放电电压电流波形图如图 2 所示，SDBD 的电流波形主要出现在电压的上升沿，且在正负半周期呈现出明显的不对称性，这是因为极性效应所导致的，即当电极的正负电性不同时，气体间隙的放电电压不同。波形中的尖峰是由于两电极气隙间的微放电造成的，同时微放电的持续时间很短，故时间上分布是不连续的，表现为一系列的电流脉冲。

3. 实验结果及讨论

3.1. 外加电压幅值对放电特性的影响

取电极介质厚度 $t = 1$ mm，放电电极间距 $d = 4$ mm，电压频率为 10 kHz 不变，分别在外加电压幅值为 12、14、16、18 kV 下进行 SDBD 实验。放电功率可根据测得的电压和电流得到，即

$$P = u(t)i(t) \quad (1)$$

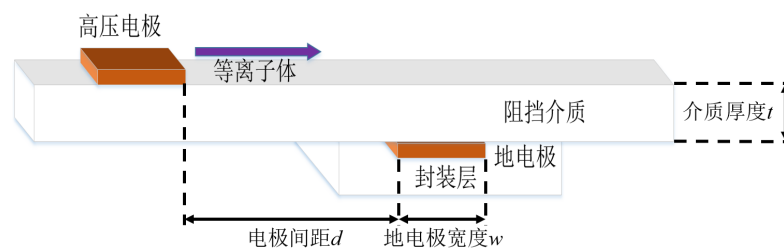


Figure 1. Schematic diagram of surface dielectric barrier discharge actuators
图 1. SDBD 激励器结构示意图

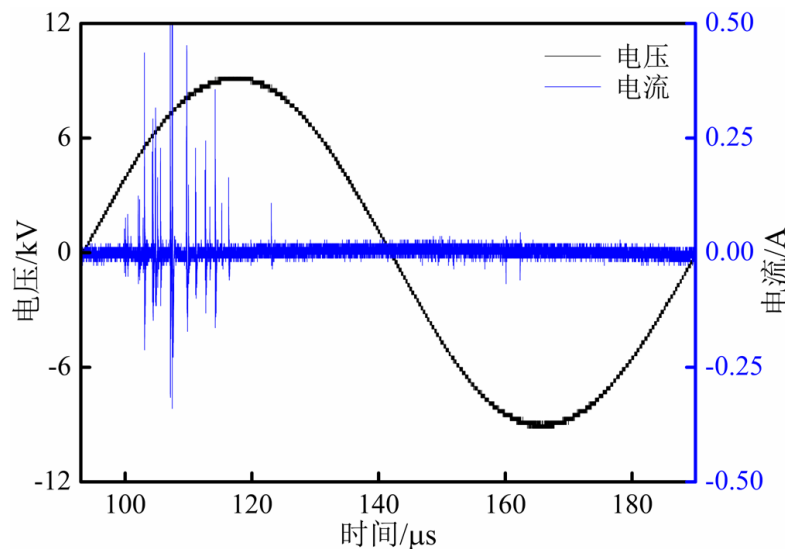


Figure 2. Typical waveforms of voltage and current
图 2. 典型放电电压电流波形图

式中： $u(t)$ 为放电电压； $i(t)$ 为放电电流。

图3为外加电压幅值对瞬时功率峰值的影响曲线，图4是相应的放电图像。随着外加电压的升高，瞬时功率峰值逐渐升高。当外加电压幅值为12 kV时瞬时功率峰值仅为0.19 kW/m，此时的表面电极上仅有少量细小微放电通道零星分布；随着外加电压幅值提升到14 kV时，瞬时功率峰值上升到约1.76 kW/m，

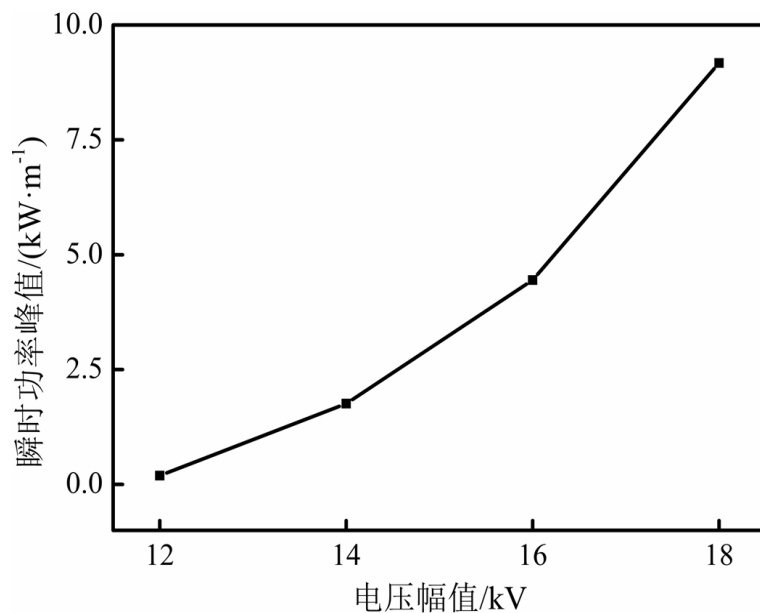


Figure 3. Influence of the applied voltage on the peak value of instantaneous power

图3. 外加电压幅值对瞬时功率峰值的影响曲线

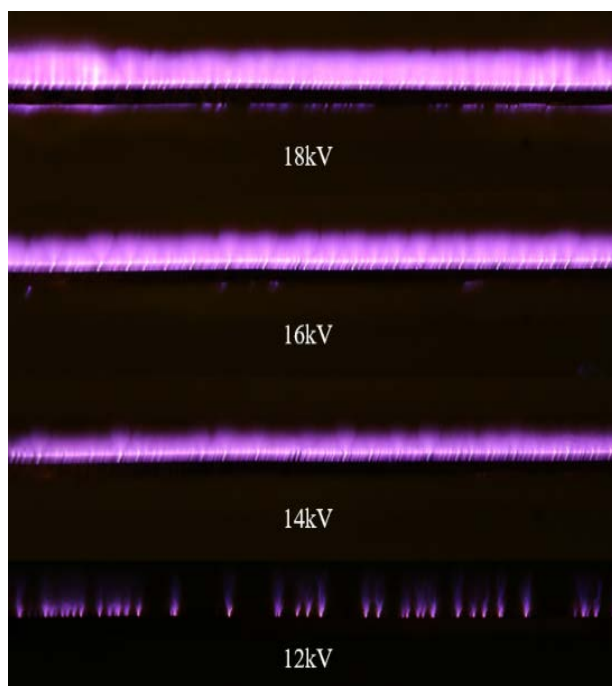


Figure 4. Discharge images at different applied voltage

图4. 不同电压幅值下的放电图像

与电压幅值为 12 kV 时相比,提升了约 9.3 倍。由放电图像可见,此时已经开始出现了较为密集的放电丝簇,放电通道数目增加且发光强度增强;当外加电压幅值升高到 18 kV 时,放电瞬时功率峰值升高至 9.17 kW/m,与电压幅值为 12 kV 时的相比提升了近 48.3 倍。此时,放电丝簇非常密集,放电通道数目最多,已区分不出放电丝之间的间距,发光强度最强,远远强于 12 kV 时的零星光点,且分布更加均匀而接近弥散放电。这是因为外加电压幅值增大,会导致两电极气隙间的电场严重畸变,场强会随之增大,传导电荷能力增强,在放电有效区域内,相同时间条件下,电荷更容易积累到放电所需要的阈值,使放电现象更加明显。但是依然可以从电极边缘处存在的众多细小放电丝簇看出 SDBD 属于丝状放电,并没有达到完全均匀的放电模式。

3.2. 频率对放电特性的影响

取介质厚度 $t = 1$ mm,电极间隙 $d = 6$ mm,保持电压幅值 14 kV 不变,频率为 8、9、10、11、12 kHz,得到的频率对瞬时功率峰值的影响曲线如图 5 所示。

介质厚度相同时,随着频率的升高,瞬时功率峰值呈线性增长,但随频率的变化率并不大。相同条件下,频率从 8 kHz,升高至 12 kHz 时,瞬时功率峰值从 0.26 kW/m 升高至 0.45 kW/m,仅上升了约 0.19 kW/m。这是因为在电压幅值一定的情况下,频率越高,放电电压波形越陡,即电压随时间的变化率越大,更容易激发电离,从而使微放电电流脉冲峰值增大,进而使得瞬时功率峰值有较小程度的增长。由图 6 的放电图像可见,因为施加电压幅值较小,放电产生的丝簇整体都比较稀疏,放电通道数目不多,放电现象均不明显,此时的瞬时功率峰值也都相对较小。随着频率的升高,微放电通道的整体发光量增长较小,所以放电图像没有发生显著的变化,放电现象没有明显的改善。总体来说,频率对 SDBD 的功率特性影响程度不大。

3.3. 介质厚度对放电特性的影响

取电极间距 $d = 0$ mm,保持电压幅值 14 kV,频率 10 kHz 不变,介质厚度 $t = 1、2、3$ mm,得到图 7 的介质厚度对瞬时功率峰值的影响曲线以及图 8 的放电图像。

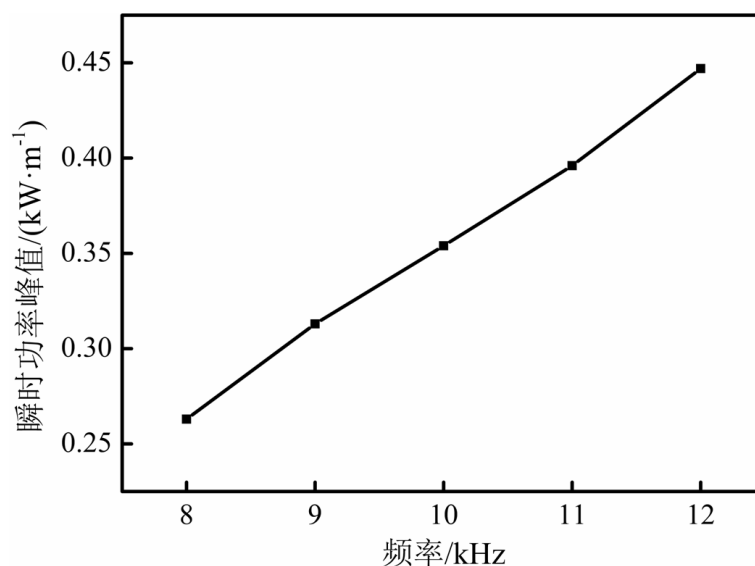


Figure 5. Influence of the voltage frequency on the peak value of instantaneous power

图 5. 频率对瞬时功率峰值的影响曲线

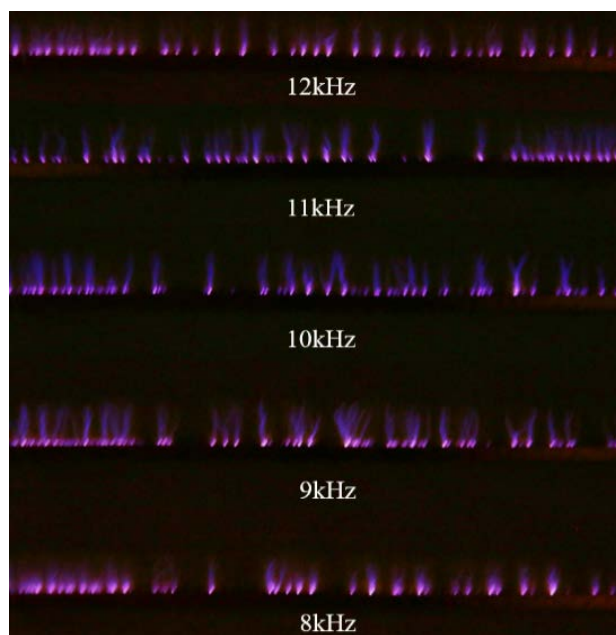


Figure 6. Discharge images at different voltage frequency

图 6. 不同频率下的放电图像

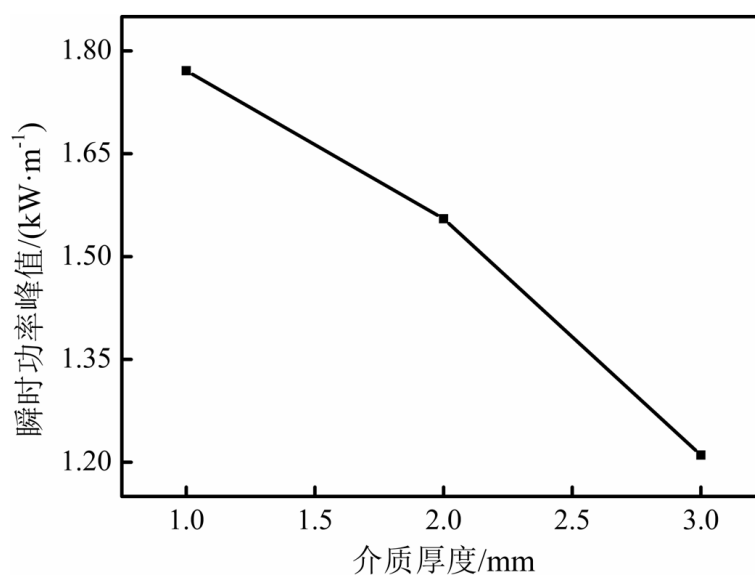


Figure 7. Influence of the dielectric thickness on the peak value of instantaneous power

图 7. 介质厚度对瞬时功率峰值的影响曲线

在相同的外加电压幅值和频率下,介质的厚度越大,SDBD的瞬时功率峰值就越小。介质厚度 $t = 1 \text{ mm}$ 的激励器放电瞬时功率峰值约为 1.77 kW/m , $t = 2 \text{ mm}$ 的激励器放电瞬时功率峰值约为 1.56 kW/m , $t = 3 \text{ mm}$ 的激励器放电瞬时功率峰值约为 1.21 kW/m , $t = 3 \text{ mm}$ 时的瞬时功率峰值比 $t = 1 \text{ mm}$ 时减少了约 0.56 kW/m , 下降了约 31.6% 。从放电图像可见,放电通道的密集程度和均匀性随着介质厚度的增加而减弱,从 $t = 1 \text{ mm}$ 时的相对较密集且均匀分布,随着介质厚度的增加,放电通道数目减小,直到 $t = 3 \text{ mm}$ 时,有效放电区域和放电程度减至最小,发光强度明显减弱。这是因为在相同条件下,随着介质厚度增加,

两电极气隙间的外加电场强减小，传导电荷的能力减弱，电荷积聚变困难，想要达到放电的条件更加不容易，从而导致瞬时放电功率峰值和放电剧烈程度的减小。

3.4. 电极间距对放电特性的影响

取介质厚度 $t = 1$ mm，保持外加电压幅值 14 kV，频率 10 kHz 不变，间距 $d = 0、2、4、6$ mm。图 9 是瞬时功率峰值与电极间距的关系曲线以及图 10 的放电图像。相同条件下，瞬时功率峰值随电极间距的增加而减小。这是因为电极间距增大时，两电极间电场场强减小，同时，介质表面电场的垂直分量也减弱，使两极间的放电通道不容易形成。当电极间距由 $d = 0$ mm 增加到 $d = 2$ mm 时，放电瞬时功率峰值由 1.86 kW/m 下降到约 1.38 kW/m，放电通道的数量也越来越少且变得稀疏；当电极间距继续增加到 $d = 4$ mm 时，瞬时功率峰值再下降到约 1.01 kW/m，下降了约 26.8%。由放电图像可见，随着电极间距的

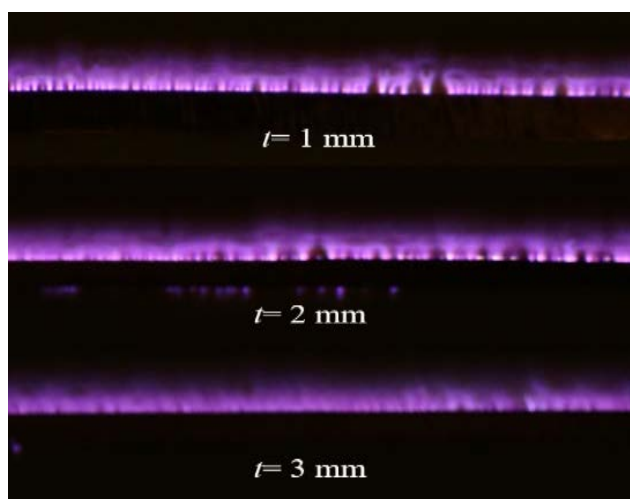


Figure 8. Discharge images at different dielectric thickness

图 8. 不同介质厚度下的放电图像

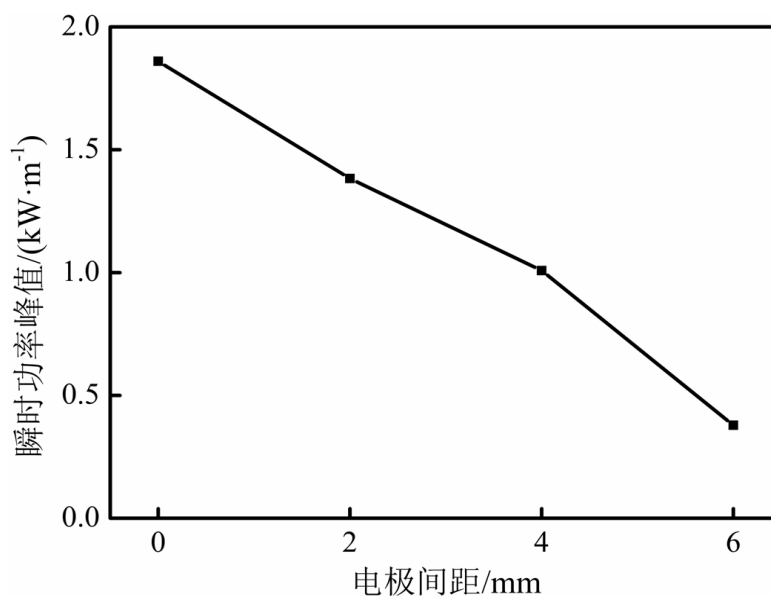


Figure 9. Influence of the electrode gap on the peak value of instantaneous power

图 9. 电极间距对瞬时功率峰值的影响曲线

持续增大，放电通道的间隔增大，变得稀疏，放电的有效区域减小，丝簇状分布变显著，密集程度和发光强度逐渐减弱；电极间距由 $d = 4 \text{ mm}$ 增加到 $d = 6 \text{ mm}$ ，瞬时功率峰值下降到 0.38 kW/m ，减小了约 62.4% ，当电极间距增加到 $d = 6 \text{ mm}$ 时，微放电通道只在电极边缘处零散分布。

3.5. 讨论

SDBD 激励器的电路原理图及等效电路图如图 11(a)、(b)所示，根据放电特性有所不同，在外加电压没有达到起始放电阈值时，等效为 C_d 与 C_g 的串联，电路中没有传导电流，其中 C_g 为气隙等效电容，是暴露电极和电介质表面之间的等效电容，与气隙宽度有关，气隙宽度越大， C_g 越小。介质等效电容 C_d 是电介质表面和封装电极之间的等效电容，是一个与介质厚度成反比的量。从介质阻挡放电的微观机理来看， C_d 应与介质的有效面积，即 SDBD 面积成正比例[24]，通常 C_g 远小于 C_d 。当放电发生后，气隙不

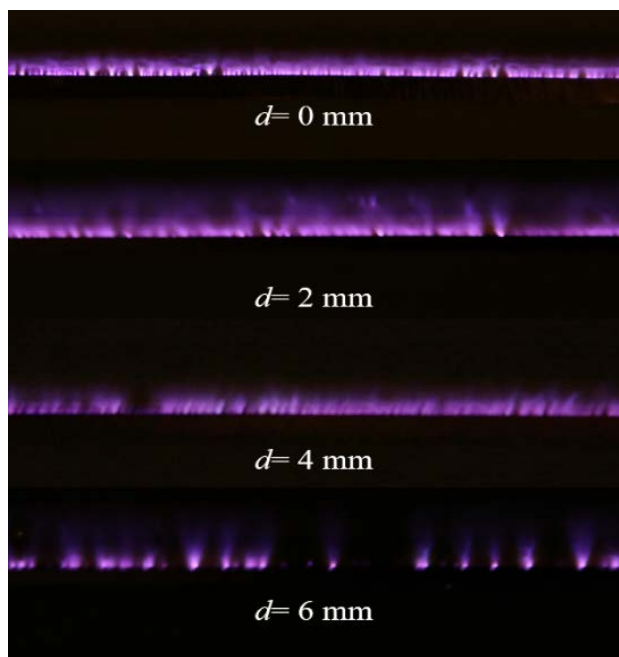


Figure 10. Discharge images at different electrode gap
图 10. 不同电极间距下的放电图像

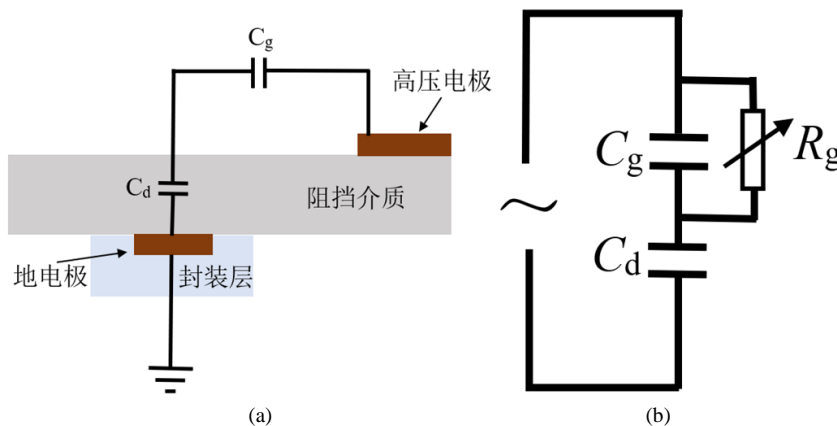


Figure 11. (a) Schematic representation of surface dielectric; (b) Equivalent circuit
图 11. (a) SDBD 激励器的电路原理图；(b) 等效电路图

再表现为电容,有放电电流出现,可以等效为有一定固定压降的电阻 R_g 。

当激励器参数和频率不变时,等效电路中的 C_d 和 C_g 为定值,增大外加电压幅值,从图 4 可见,放电间隙中的放电丝数目增多,介质表面布满放电细丝,放电通道数目逐渐增加,传输电荷的能力增强,瞬时功率峰值增大。当激励器参数和电压不变时,频率增大, C_d 两端的电压不变,而 C_d 的阻抗随频率增大而减小,所以放电通道传输电荷的能力增强,以及电离效果增强,增加了离子间的碰撞频率,所以图 5 中的瞬时功率峰值线性增大。

外加电压和频率相等时,固定气隙宽度不变,介质厚度越大,由图 8 可见,放电通道的发光强度减弱,放电间隙丝状通道数目减少,导致放电的有效面积,即放电通道区域和地电极区域之间重叠的有效面积减小,介质等效电容 C_d 和串联的总等效电容减小,则瞬时放电功率峰值逐渐减小。相同条件下,只增大电极间距,气隙宽度增大,会使气隙的等效电容 C_g 减小,介质等效电容 C_d 保持不变,所以串联的总等效电容减小。同时,随着电极间距的增加,两电极间电场场强和放电通道数目减小,传输电荷的能力减弱,起始放电阈值增大。根据以上分析,在外加电压和介质等效电容 C_d 保持不变时,瞬时功率峰值可以构成以气隙宽度为自变量的非线性单调递减函数,因此瞬时功率峰值会随着电极间距的增加而减小,如图 9 所示。

4. 结论

本文以相对介电常数为 5.85 的环氧树脂作为阻挡介质,针对外加电压的幅值、电压的频率、介质厚度以及电极间距,在大气条件下对空气中 SDBD 功率特性进行了实验研究,并对实验结果进行分析,得到的结论如下:

1) 相同条件下,外加电压幅值越大,微放电通道数目增加,瞬时功率峰值越大,放电现象越明显,放电丝密集均匀并接近弥散放电模式,但 SDBD 依然主要是丝状放电,并不能完全达到均匀的放电模式。且外加电压幅值对瞬时功率峰值和放电剧烈程度的影响尤为显著。

2) 相同条件下,随着频率的增长,瞬时功率峰值呈线性增长,但随频率的变化率较小,且频率对放电现象的影响也较小。

3) 相同条件下,介质的厚度增大,介质等效电容 C_d 越小,外加电场场强减小,导致在相同时间条件下电荷积聚困难,难以达到起始放电阈值,使放电不容易发生,从而使瞬时功率峰值减小。

4) 相同条件下,当电极间距减小时,气隙宽度增大,会使气隙的等效电容 C_g 非线性减小,两电极气隙间的外部电场会被削弱,放电通道不容易形成,放电发生就越困难,瞬时功率峰值减小。

5) 为了获得较大功率的 SDBD 激励器,激励器装置应选用厚度较薄的材料作为阻挡介质,电极距离应尽量设置为较小值,并选择最优的频率,同时在实验时尽可能提高外加电压的幅值。

基金项目

中央高校基本科研业务费(106112016CDJXY150003)资助项目。

参考文献 (References)

- [1] 姜慧,邵涛,章程,等.不同电极间距下纳秒脉冲表面介质阻挡放电分布特性[J].电工技术学报,2017,32(2):33-42.
- [2] 倪章松,李国强,高超,等.介质阻挡面放电等离子体流动控制研究进展[J].真空与低温,2014(1):9-15.
- [3] Neumann, M., Friedrich, C., Czarske, J., et al. (2012) Determination of the Phase-Resolved Body Force Produced by a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator. *Journal of Physics D Applied Physics*, **46**, Article ID: 042001.
- [4] 吴云,李应红.等离子体流动控制研究进展与展望[J].航空学报,2015,36(2):381-405.

- [5] Corke, T.C., Enloe, C.L. and Wilkinson, S.P. (2009) Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **42**, 505-529. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145550>
- [6] An, J., Shang, K., Lu, N., *et al.* (2014) Performance Evaluation of Non-Thermal Plasma Injection for Elemental Mercury Oxidation in a Simulated Flue Gas. *Journal of Hazardous Materials*, **268**, 237-245. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.01.022>
- [7] 侯世英, 曾鹏, 孙韬, 等. 介质阻挡放电在水处理中的影响因素分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 187-193.
- [8] Abdelaziz, A.A., Seto, T., Abdel-Salam, M., *et al.* (2015) Influence of Applied Voltage Waveforms on the Performance of Surface Dielectric Barrier Discharge Reactor for Decomposition of Naphthalene. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **48**, Article ID: 195201. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/19/195201>
- [9] 彭燕昌, 严萍, 舒立, 等. 介质阻挡放电用大功率高频高压电源的研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(z1): 35-36.
- [10] 章程, 邵涛, 龙凯华, 等. 大气压空气中纳秒脉冲介质阻挡放电特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010(7): 111-117.
- [11] 卢新培, 严萍, 任春生, 等. 大气压脉冲放电等离子体的研究现状与展望[J]. 中国科学:物理学力学天文学, 2011(7): 801-815.
- [12] 邵涛, 章程, 王瑞雪, 等. 大气压脉冲气体放电与等离子体应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 685-705.
- [13] Mariotti, D., Patel, J., Švrček, V., *et al.* (2012) Plasma-Liquid Interactions at Atmospheric Pressure for Nanomaterials Synthesis and Surface Engineering. *Plasma Processes & Polymers*, **9**, 1074-1085. <https://doi.org/10.1002/ppap.201200007>
- [14] 孔刚玉, 刘定新. 气体等离子体与水溶液的相互作用研究——意义、挑战与新进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 2956-2965.
- [15] Pavlovich, M.J., Chang, H.W., Sakiyama, Y., *et al.* (2013) Ozone Correlates with Antibacterial Effects from Indirect Air Dielectric Barrier Discharge Treatment of Water. *Journal of Physics D Applied Physics*, **46**, Article ID: 145202. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/14/145202>
- [16] Kotsonis, M. (2015) Diagnostics for Characterisation of Plasma Actuators. *Measurement Science & Technology*, **26**, Article ID: 092001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/9/092001>
- [17] Meenan, B.J. (2012) Atmospheric Dielectric Barrier Discharge Treatments of Polyethylene, Polypropylene, Polystyrene and Poly(Ethylene Terephthalate) for Enhanced Adhesion. *Journal of Adhesion Science & Technology*, **26**, 2325-2337.
- [18] 刘定新, 李嘉丰, 马致臻, 等. 空气沿面介质阻挡放电中活性粒子成分及其影响因素[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 421-427.
- [19] 商克峰, 王浩, 岳帅, 等. 结构及供电电源对沿面介质阻挡放电装置放电特性及臭氧生成的影响[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 53-60.
- [20] Pekárek, S. (2012) Experimental Study of Surface Dielectric Barrier Discharge in Air and Its Ozone Production. *Journal of Physics D Applied Physics*, **45**, Article ID: 075201. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/7/075201>
- [21] 张颖, 李凌寒, 李杰, 等. 沿面型介质阻挡放电中高压电极配置对放电特性及臭氧产量的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 539-546.
- [22] 李杰, 王昭博, 姜楠, 等. 沿面介质阻挡放电的低压电极配置方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 2844-2849.
- [23] 姜慧, 章程, 邵涛, 等. 纳秒脉冲表面介质阻挡放电特性实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(3): 592-596.
- [24] Jiang, H., Shao, T., Zhang, C., *et al.* (2013) Experimental Study of Q-V Lissajous Figures in Nanosecond-Pulse Surface Discharges. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, **20**, 1101-1111. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6571423>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2333-5394，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jee@hanspub.org