

大气压空气中均匀介质阻挡放电的产生及放电特性

方志¹, 解向前¹, 邱毓昌²

- (1. 南京工业大学自动化与电气工程学院, 江苏省 南京市 210009;
2. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049)

Generation and Characteristics of the Homogeneous Dielectric Barrier Discharge in Air Under Atmospheric Pressure

FANG Zhi¹, XIE Xiangqian¹, QIU Yuchang²

- (1. School of Automation and Electrical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, Jiangsu Province, China;
2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: The homogenous dielectric barrier discharge (DBD) in air under atmospheric pressure was generated using a μs oscillatory pulse power supply to drive the symmetric-columnar copper electrodes, and the epoxy served as dielectric barriers. The voltage and current waveforms of the homogenous DBD were measured, and lighting emission images were collected. With the established equivalent electrical model of homogenous DBD, the discharge parameters of homogenous DBD, such as equivalent capacitance, average discharge power, charge transport, average electron density and electron temperature were calculated. Furthermore, the change tendency and microscopic relationship among the voltage drop across air gap, the voltage drop across dielectric barrier, the discharge current and capacitive current were studied, and the discharge mechanism for generation of the homogenous DBD was discussed. Results showed that, with the experimental device developed by the authors of this paper, the homogenous DBD can be generated in the air gap less than 4 mm. Under the applied voltage of 8 kV, the power dissipated by the air gap with the homogeneous DBD is 31.45 W, and the average electron density and the electron temperature are $2.07 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ and 3.4 eV, respectively.

KEY WORDS: dielectric barrier discharge (DBD); homogenous mode; discharge characteristic; electrical parameter

摘要: 采用微秒振荡脉冲电源激励, 利用对称柱形铜电极以及环氧树脂阻挡介质, 在大气压空气中产生均匀介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)。测量了均匀 DBD 的电压-电流波形, 拍摄了放电图像; 建立了均匀 DBD 的等效电气模型, 通过该等效模型计算得到等效电容、平均放电功率、放电电荷量、平均电子密度以及电子温度等重要电气参数值; 并进一步研究了气隙电压、介质电压、放电电流和容性电流等参量的变化趋势以及它们之间的微观联系, 讨论产生均匀 DBD 的放电机制。研究表明, 采用作者的实验装置, 在不大于 4 mm 气隙间距下可以产生均匀 DBD; 当外加电压幅值为 8 kV 时, 均匀 DBD 的气隙放电消耗功率为 31.45 W, 平均电子密度为 $2.07 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, 电子温度为 3.4 eV。

关键词: 介质阻挡放电; 均匀模式; 放电特性; 电气参数

0 引言

介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)可以在常温常压下产生低温等离子体, 目前已被广泛应用于臭氧生成、材料表面改性、杀菌消毒、新型光源、薄膜沉积、电磁波屏蔽、环境保护等工业领域^[1-8]。大气压下 DBD 通常表现为丝状流注放电模式, 在放电空间存在大量高能量密度的电流细丝, 其不均匀性及集中的能量密度限制了 DBD 在很多工业领域的应用前景, 如材料表面改性、薄膜沉积、杀菌消毒等领域。研究表明, 丝状放电并不是 DBD 在大气压下的惟一表现形式, 在一定条件下, DBD 也可以表现为均匀、稳定的无细丝出现

基金项目: 国家自然科学基金项目(50707012)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50707012).

的放电模式，称为大气压均匀 DBD 或大气压辉光放电^[7-8]。

研究人员先后在大气压氦气、氩气、氖气、氮气等气体以及这些气体的混和气体中实现了均匀 DBD，并通过电学参数测量、发光图像拍摄和数值模拟等手段研究了它们的特性^[1-3]。这些研究主要针对大气压惰性气体和氮气，其中惰性气体的价格昂贵，而氮气作为工作气体时，需要密闭的工作环境；因此，最适合大规模工业应用的是空气中实现的均匀 DBD。近年来空气中均匀 DBD 的产生及特性研究已成为热点问题，受到了国内外研究人员的广泛关注。通过改变电源类型、电极结构和阻挡介质等条件，一些研究人员实现了空气中均匀 DBD 或改善了放电的均匀性。目前已报道的产生空气中均匀 DBD 所采用的驱动电源包括工频交流、高频交流或纳秒脉冲电源等；就电极结构而言，所采用的电极结构包括平板、同轴或网状电极结构等；所采用的阻挡介质包括石英玻璃、聚四氟乙烯、环氧树脂或陶瓷等^[7-17]。其中工频 DBD 效率较低；高频 DBD 的电极发热温度较高；纳秒脉冲尽管有助于产生均匀 DBD，且效率高，但其电源成本较高。与之相比微秒脉冲电源驱动的 DBD 具有成本低、功率密度大等特点；但目前关于微秒脉冲电源驱动 DBD 产生均匀放电的报道不多。

本文介绍采用微秒振荡脉冲电源产生空气中均匀 DBD 的研究成果。采用微秒脉冲电源驱动柱-柱电极在敞开空气中产生均匀 DBD，测量了放电的电压-电流波形，拍摄了均匀放电图像，并通过建立的均匀 DBD 的等效电气模型来研究 DBD 的各电气参量变化规律，最后讨论了 DBD 的放电机制。

1 实验装置及测量方法

1.1 实验装置

实验在敞开的空气环境下进行，温度为室温，气压接近标准大气压。所采用的实验装置及电气接线如图 1^[18]所示，实验装置主要由驱动电源、反应器和测量系统构成。图中驱动电源部分，充电电容的容量为 0.1 μF，耐压 20 kV；脉冲变压器的变比为 1:10。电源输出电压为最大脉冲幅值 0~35 kV 的振荡脉冲波，脉冲波的持续频率 1 kHz。该电源的工作原理参见文献[18]。由于电容与变压器励磁电感不断交换电磁能量，波形出现正负振荡，又因变压器存在铁损和铜损，振荡波很快衰减。图 2^[18]为电源输出的电压波形，由图 2(a)可以看出，放电周

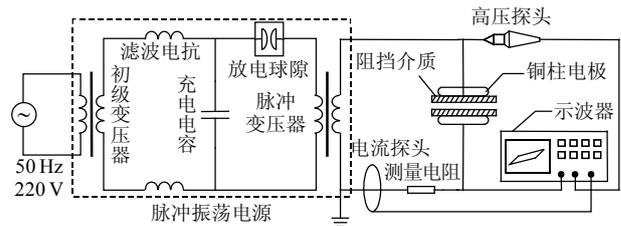
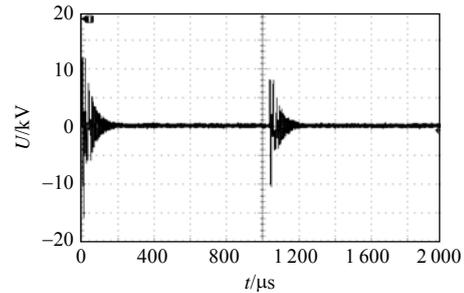
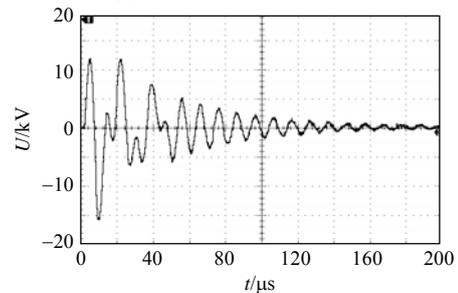


图 1 微秒脉冲 DBD 实验装置及电气接线
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up and electrical connection for μs pulse DBD generation



(a) 2 个周期内电源输出电压波形



(b) 1 个周期内电源输出电压波形展开

图 2 微秒脉冲电源输出电压波形
Fig. 2 Waveforms of output voltage from μs pulse power supply

期持续时间为 1 000 μs，波形持续时间占整个周期的 1/5；由图 2(b)可以看出，脉冲幅值是衰减的，从最大电压幅值衰减到零大约 200 μs，每个单脉冲持续时间约为 2 μs。

实验所采用的电极结构如图 3 所示，上/下电极均为水平放置的表面抛光的圆柱形紫铜电极，其长度为 70 mm，直径为 25 mm，为防止边缘效应，电极两端加工出一定的弧度。阻挡介质采用环氧树脂 (ER)，其介电常数为 3.9，面积为 90 mm×90 mm。

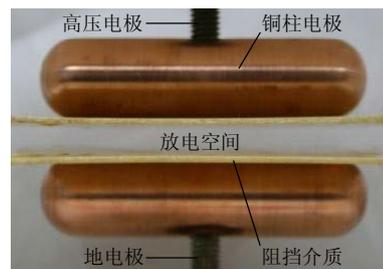


图 3 DBD 电极结构

Fig. 3 Structure of electrode used in DBD test

介质置于上/下电极之间,并与电极表面靠紧以充分接触。气隙距离 d 通过旋转螺杆调节,其可调范围为 0~5 mm。

1.2 测量方法

DBD 放电电压波形通过 Tek P6015 高压探头测量(带宽为 75 MHz,分压比为 1000),放电电流通过在放电回路中串联一个阻值为 $10\ \Omega$ 的无感电阻获得^[18]。实验时得到的电压-电流波形由 Tek TDS-3054c 示波器纪录,示波器的带宽为 500 MHz,分辨率为 5 Gs/s。放电图像用置于放电空间正面和侧面的与放电气隙平行的数码相机(Canon 400D)拍摄得到,拍摄时的曝光时间为(1/4 000) s。

2 放电特性

利用第 1 节的实验装置,采用 0.5 mm 厚的环氧树脂作为阻挡介质,在 1 mm 气隙下拍摄得到 DBD 放电图像(如图 4 所示)。可以看出,放电呈现为均匀放电模式,放电弥散、均匀地覆盖到整个电极表面。发光强度在整个放电空间内近似均匀地分布,无放电细丝出现。随着电压幅值的增大,放电变强烈,发光强度增加,但仍为均匀放电。同时,放电侧面拍摄的图像表明,放电区域也随外加电压幅值的增大逐渐从两圆柱电极弧面顶部与阻挡介质接触处的 2 条长线沿弧面向两侧延伸。当外加电压幅值为 8 kV 时,向两侧各水平延伸 5 mm,实际放电面积为 $70\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$;当外加电压幅值为 10 kV 时,向两侧各水平延伸 7 mm,实际放电面积约 $70\ \text{mm} \times 14\ \text{mm}$ 。

图 5 为与图 4 相同实验条件下测量得到的对应的电压-电流波形图。可以看出,放电电流波形表现为在外加电压的每个周期内,均出现 4~5 个持续时间大约为 $2\ \mu\text{s}$ 的电流脉冲,每个衰减电压脉冲上均出现一个电流脉冲。电流脉冲依次出现在电压脉冲的上升沿和下降沿,其最大幅值为安培级。当外加电压为 8 kV 时,有 4 个电流脉冲,最大放电电流为 0.8 A;当外加电压为 10 kV 时,有 5 个电流脉冲,

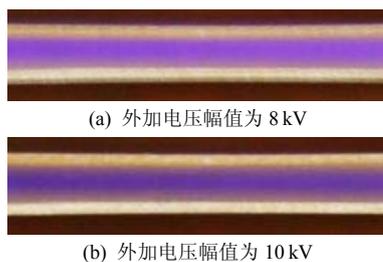


图 4 均匀 DBD 的放电图像

Fig. 4 Lighting emission pictures of the homogenous DBD

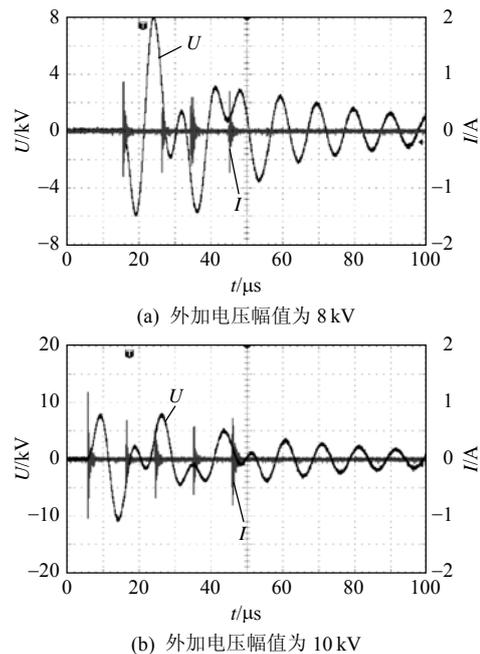


图 5 均匀 DBD 的电压-电流波形
Fig. 5 Voltage-current waveforms of the homogenous DBD

最大放电电流为 1.2 A。可见,放电电流幅值随着外加电压的增大而增大,放电逐渐变得强烈。图 6 为图 5 中电压-电流波形的前 2 个脉冲的展开图。可以看出,每个电压脉冲内的放电电流均表现为一个双极性的振荡单脉冲形式,这与国外的研究者在利用微秒脉冲电源在惰性气体条件下产生均匀 DBD 测量得到的电压-电流波形类似^[12,14-15]。参考相关研究,可以认为本文的空气中微秒脉冲 DBD 在每个电压脉冲内存在 2 次连续发生的均匀放电过程,第 1 次放电产生的能量积聚在介质层表面或气隙内,为第 2 次放电提供能量,二次放电将沿着一次放电的通道发展。上述特征和大气压空气中丝状 DBD 的电压-电流特征和发光特性有明显的不同,丝状 DBD 空间出现肉眼可以分辨的大量随机分布的明亮跳动的细丝,其电流波形表现为在外加电压的每半个周期内出现大量的持续时间为纳秒级的脉冲的形式。由此可知,本文实验装置所产生的 DBD 为大气压空气中均匀模式 DBD。此外,放电电流波形出现于电压波形的较低部位,说明放电在较低的电压下击穿。主要原因有:本文所采用的电极为对称柱形铜电极,其击穿电压远低于平板电极结构;由于所加过电压较高,放电空间电场强度较高,种子电子密度增加,上个脉冲周期放电产生的积聚在介质表面的电荷,对下个脉冲周期放电影响增强,有效降低了击穿电压,使得放电起始时刻提前。

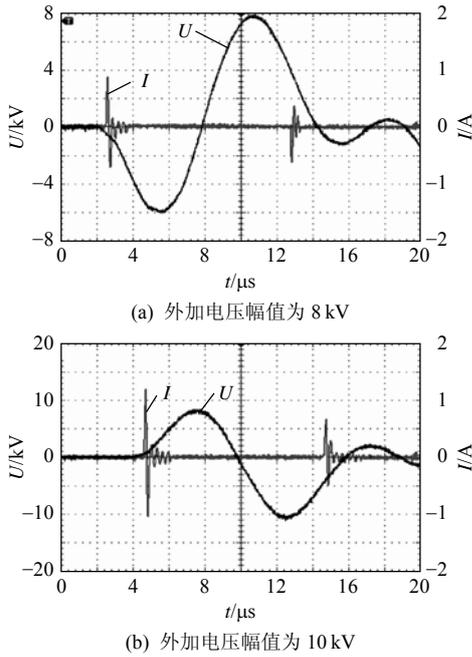


图 6 电压-电流波形展开图
Fig. 6 Expanded voltage-current waveforms of the homogenous DBD

3 放电参数

3.1 等效模型和参数计算方法

DBD 整个放电系统是由放电电极、阻挡介质层、放电间隙构成的有损耗电容器，对激励电源而言可等效为阻容性负载^[13-14]。研究表明，放电发生后，可将空气间隙放电等效为电容 C_g 和压控电流源 $i_g(t)$ 并联，并与介质层等效电容 C_d 相串联，如图 7 所示。图中电流源 $i_g(t)$ 是一个压控电流源，气隙中放电电流变化时，相应 DBD 电路的总电流 $i_t(t)$ 也变化，且可直接测量得到。因此根据该等效模型和测量得到的 $u_t(t)$ 、 $i_t(t)$ ，可计算 DBD 的放电电流 $i_g(t)$ ，并进一步计算得到 $u_g(t)$ 、 $u_d(t)$ 等放电参量。

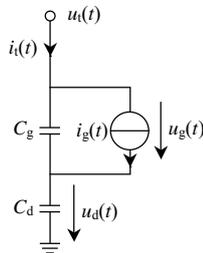


图 7 DBD 的等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit model of DBD

模型中 DBD 的气隙等效电容 C_g 和介质等效电容 C_d 可由式(1)、(2)^[13]计算得到：

$$C_g = \frac{\epsilon_0 S'}{d_g} \quad (1)$$

$$C_d = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S'}{d_d} \quad (2)$$

式中： ϵ_r 为阻挡介质的相对介电常数； ϵ_0 为真空介电常数； S' 为电极有效面积(本文实验条件下，均匀放电时即为电极长度乘以在宽度上扩展的距离)； d_g 为气隙距离； d_d 为 2 片阻挡介质的总厚度。

根据图 7 可得：

$$\frac{du_d(t)}{dt} = \frac{i_t(t)}{C_d} \quad (3)$$

$$\frac{du_g(t)}{dt} = \frac{1}{C_g} [i_t(t) - i_g(t)] \quad (4)$$

$$u_g(t) + u_d(t) = u_t(t) \quad (5)$$

式中： $u_t(t)$ 为外加电压； $u_d(t)$ 为介质上的电压； $u_g(t)$ 为放电间隙上的电压； $i_t(t)$ 为 DBD 总电流； $i_d(t)$ 为间隙放电电流。对式(5)求微分，并将式(3)、(4)代入整理可得：

$$i_g(t) = \left(1 + \frac{C_g}{C_d}\right) i_t(t) - C_g \frac{du_t(t)}{dt} \quad (6)$$

由式(6)可以看出，DBD 的微放电过程受外加电压影响，因此，可用一个压控电流源来表征微放电过程。对于固定的电极布置， C_g 和 C_d 为定值，由式(6)可以看出， $i_g(t)$ 由遵循 C_g 非线性动态变化规律的电压信号 $u_t(t)$ 控制，对于任一 $i_g(t)$ 都有一个 $i_t(t)$ 与之对应。因此，通过实验直接测得的 $u_t(t)$ 和 $i_t(t)$ ，即可由式(6)计算出 $i_g(t)$ ，而 $i_d(t)$ 可由式(7)计算出：

$$i_d(t) = \frac{1}{1/C_g + 1/C_d} \frac{du_t(t)}{dt} \quad (7)$$

$u_g(t)$ 和 $u_d(t)$ 可分别计算为

$$u_d(t) = \frac{1}{C_d} \int_0^t i_t(\tau) d\tau = \frac{C_g}{C_g + C_d} u_t(t) + \frac{1}{C_g + C_d} \int_0^t i_g(\tau) d\tau \quad (8)$$

$$u_g(t) = u_t(t) - u_d(t) = \frac{C_d}{C_g + C_d} u_t(t) - \frac{1}{C_g + C_d} \int_0^t i_g(\tau) d\tau \quad (9)$$

DBD 反应器的消耗功率 $P_t(t)$ 、气隙放电消耗功率 $P_g(t)$ 和介质消耗功率 $P_d(t)$ 可分别由式(10)–(12)计算，放电传输电荷量 Q_g 和放电消耗能量 E_g 可由式(13)、(14)计算：

$$P_t(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_t(\tau) i_t(\tau) d\tau \quad (10)$$

$$P_g(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_g(\tau) i_g(\tau) d\tau \quad (11)$$

$$P_d(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_d(\tau) i_d(\tau) d\tau \quad (12)$$

$$Q_g = \int_t^{t+T} i_g(\tau) d\tau \quad (13)$$

$$E_g = \int_t^{t+T} u_g(\tau) i_g(\tau) d\tau \quad (14)$$

式中 T 为 1 个脉冲周期。

3.2 放电参数

按 3.1 节介绍的方法, 根据实验测量得到的 $u_t(t)$ 和 $i_t(t)$, 计算得到外加电压幅值为 8 kV, 阻挡介质的厚度为 0.5 mm, 气隙距离为 1 mm 时 DBD 的放电参量如表 1 所示。

表 1 DBD 的电气参量
Tab. 1 Discharge parameters of DBD

电气参量	C_g/pF	C_d/pF	$u_t(t)/kV$	$u_d(t)/kV$
计算结果	141.68	325.83	8.0	4.5
电气参量	$u_d(t)/kV$	$i_t(t)/A$	$i_g(t)/A$	
计算结果	3.5	0.82	1.10	
电气参量	$i_d(t)/A$	$P_t(t)/W$	$P_g(t)/W$	
计算结果	-0.28	46.27	31.45	
电气参量	$P_d(t)/W$	Q_g/nC	E_g/mJ	
计算结果	9.88	1576	3.14	

在上述实验条件下, 通过示波器测得的电压-电流波形, 并结合 3.1 节的电气模型得到 $u_t(t)$ 、 $u_d(t)$ 和 $u_g(t)$ 及 $i_t(t)$ 、 $i_d(t)$ 和 $i_g(t)$ 的变化规律如图 8 和图 9 所示。由图 8 可以看出, $u_t(t)$ 与 $u_g(t)$ 的变化趋势近似相同而 $u_d(t)$ 幅值较低, 说明阻挡介质充电电压幅值较低, 大部分外加电压用于激励间隙内放电发生, 这也说明本文这种形式的放电效率较高。从图 9 可以看出, $i_t(t)$ 有 4 个分布相对均匀的电流脉冲串,

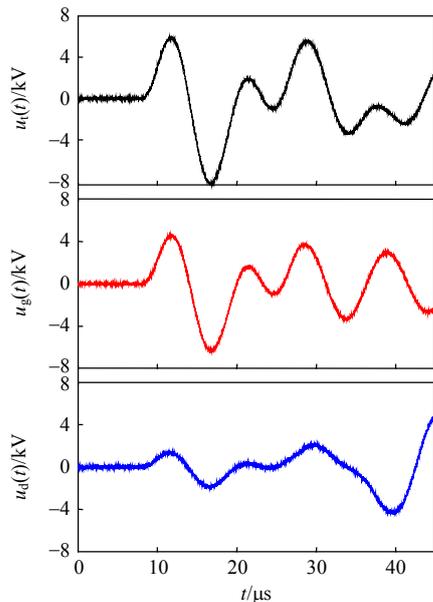


图 8 $u_t(t)$ 、 $u_d(t)$ 和 $u_g(t)$ 的变化规律
Fig. 8 Variation of $u_t(t)$, $u_d(t)$ and $u_g(t)$

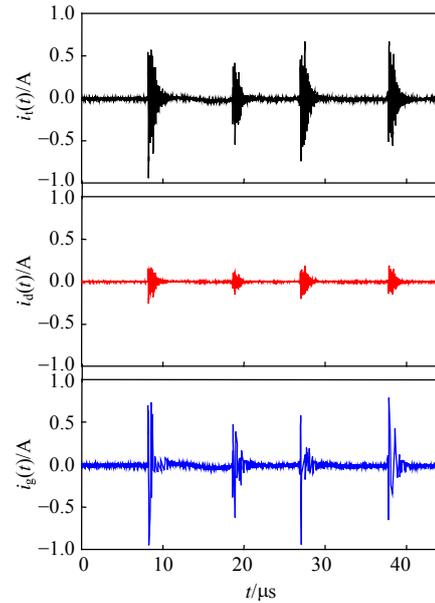


图 9 $i_t(t)$ 、 $i_d(t)$ 和 $i_g(t)$ 的变化规律
Fig. 9 Variation of $i_t(t)$, $i_d(t)$ and $i_g(t)$

$i_d(t)$ 和 $i_g(t)$ 的变化趋势与 $i_t(t)$ 相对应, 但 $i_d(t)$ 的脉冲幅值很小。在 $i_t(t)$ 去除 $i_d(t)$ 后, 放电电流 $i_g(t)$ 表现为一个或几个脉冲的形式。

DBD 气隙中的平均电子密度 n_e 可按式(15)^[16] 估算, 即

$$n_e = (I_g/S') / (e\mu_e U_g/d_g) \quad (15)$$

式中: I_g 为间隙放电电流幅值; S' 为放电电极面积; e 为电子电量; μ_e 为电子迁移率; U_g 为气隙放电电压幅值; d_g 为气隙距离。按上述计算结果和 8 kV 时的有效电极面积, $I_g = 1.1 A$, $S' = 7 cm^2$, $e = 1.6 \times 10^{-19} C$ 。均匀场强下的电场强度 $E = U_g/d_g = 4.5 \times 10^4 V/cm$, 由 BOLSIG KINEMA 软件^[17] 计算得出该电场强度下的 $\mu_e = 542 cm^2/(V \cdot s)$ 。将以上值代入式(15)计算得到气隙中的平均电子密度 n_e 为 $2.07 \times 10^{12} cm^{-3}$ 。

DBD 气隙中的电子温度 T_e 可根据如下 Einstein 方程^[19] 估算:

$$kT_e/e = D_e/\mu_e \quad (16)$$

式中: $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ 为 Boltzmann 常数; D_e 为扩散系数。其中 D_e/μ_e 可表示为 E/N 的函数, E 为电场强度, N 为气体密度, 本文实验条件下, $E = 4.5 \times 10^4 V/cm$, $N = 9.6 \times 10^{18} cm^{-3}$, 由 BOLSIG KINEMA 软件^[17] 计算出该条件下的 $D_e/\mu_e = 4.7 \times 10^{-15} V \cdot cm^2$, 根据式(16)计算得到气隙中的电子温度 T_e 为 3.4 eV。此外, 气隙中的电子温度还可以通过发射光谱手段进行实际测量, 利用光谱仪器采集放电空间发出的光波辐射, 通过分析采集到计算机中的特

征谱线的强度及强度分布可以进一步得到电子温度 T_e 的值, 本文作者将对此作进一步研究。

由表 1 可知, 本文均匀 DBD 反应器消耗功率 $P_t(t)$ 和气隙放电消耗功率 $P_g(t)$ 分别为 46.27 和 31.45 W, 气隙放电消耗功率占 DBD 反应器消耗功率的 68%, 耗散在介质上的功率较低, 这既提高了放电效率, 又减小了放电过程中的介质发热。与高频交流 DBD 相比, 采用微秒振荡脉冲电源激励更易产生均匀 DBD 且放电功率、放电传输电荷和平均电子密度等参量都高得多^[20-24]。

4 放电机制讨论

大气压下, 气体压强 p 与气体间距 d 的乘积 pd 值很高, DBD 通常表现为丝状放电形式, 可用流注理论来解释。在外部电场作用下, 电子崩发展的速度很快并迅速向阳极移动, 空间电荷产生的电场显著畸变了间隙上外加电场的分布, 畸变的电场进一步促进电子崩的发展, 在放电空间产生大量的光电离和二次电子崩, 二次电子崩和主电子崩汇合, 在放电空间产生流注放电区。在流注放电阶段, 放电空间充满随机分布的暂态流注, 流注区域迅速向阴极发展, 最终形成贯穿放电空间的高电导率的丝状放电通道。放电空间介质的引入使得电荷不消失于电极而是积聚在介质上, 产生一个与外电场相反的电场, 抵消了外电场的作用, 使放电熄灭。因此大气压下 DBD 通常表现为由阳极向阴极发展的许多高电导率的导电通道形式(丝状放电的形式)。研究表明, 增强空气中 DBD 放电均匀性主要从 2 方面入手: 采用预电离技术提高放电的种子电子密度; 缩短电压上升时间。

一些研究人员采用预电离技术提高放电的种子电子密度来产生空气中均匀的 DBD, 如齐冰等^[22]采用火花-针预电离装置来产生空气中均匀 DBD, 詹花茂等^[23]采用脉冲火花放电产生的紫外线对 DBD 进行预电离, 提高了空气中 DBD 的均匀性, 方志等^[24]采用网状电极和聚对苯二甲酸乙二酯 (PET)、聚四氟乙烯 (PTFE) 等驻极体阻挡介质实现了空气中均匀 DBD。也有一些研究者如 Ayan 等^[25]和章程等^[26]采用缩短电压上升时间来产生空气中均匀 DBD。

针对本文的电极结构和布置而言, 缩短电压上升时间 ($dU/dt < 10 \text{ kV}/\mu\text{s}$) 对产生空气中均匀 DBD 起主要作用, 预电离技术起次要作用。首先, 放电空间电场强度的增加, 导致种子电子密度的增加,

电压幅值在短时间内快速上升, 使得积累在阴极的电子同时发射, 形成快速放电通道, 并互相耦合和交迭分布, 形成径向的电场分布, 进而形成均匀的空间电荷分布, 最终导致均匀放电的形成。此外, 微秒脉冲 DBD 的每个电压脉冲内的 2 次放电中, 上一次放电对下一次放电的影响也是至关重要的。上一次放电产生的积聚在介质表面或存在于放电空间的电荷, 将为下一次放电提供种子电子, 使下一次放电将沿着上一次放电的通道发展, 这也是均匀 DBD 形成的关键。

值得注意的是, 空气中均匀 DBD 是一种全新的放电形式, 其放电机制不同于丝状 DBD。目前关于这种形式均匀 DBD 的建立过程和机制还不是很清楚。上述分析表明, 电压短时间内快速上升和 DBD 2 次放电间的相互影响对产生均匀 DBD 起重要作用; 因此, 产生电压的上升速度和脉冲持续时间变化都会影响到放电特性的变化。本文作者将对这个问题做进一步的研究。从曝光时间 (1/4 000) s 的数码相机拍摄得到的放电图像以及测量得到的电压电流波形验证了本文产生的 DBD 的均匀性, 要进一步深入地研究放电的发展规律及演变成均匀放电的过程, 需采用高速摄影进行连续拍摄, 本文作者也将对这个问题做进一步的研究。相对于丝状模式 DBD, 本文产生的大气压下均匀模式 DBD 更具有应用前景, 尤其是在材料表面改性和薄膜沉积等方面。

5 结论

本文采取微秒振荡脉冲电源在大气压空气条件下产生均匀 DBD, 拍摄均匀放电图像, 测量电压、电流波形; 通过建立的等效电气模型研究 DBD 的各电气参量变化, 研究结果表明:

1) 采用本文的实验装置, 在 4 mm 气隙下可产生均匀 DBD, DBD 的电压波形为振荡衰减脉冲波, 电流表现为幅值为安培级, 持续时间为微秒的单脉冲电流;

2) 在外加电压幅值 8 kV 的实验条件下, 通过等效模型计算得到均匀 DBD 放电气隙消耗功率为 31.45 W, 放电传输电荷量为 1 576 nC, 平均电子密度为 $2.07 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, 电子温度为 3.4 eV;

3) 本文均匀 DBD 反应器消耗功率和放电气隙消耗功率为几十瓦, 放电功率占反应器消耗功率的 68%, 与高频交流 DBD 相比, 大幅提高了放电能力和放电效率, 减小了介质发热。

参考文献

- [1] Massines F, Ségur P, Gherardi N, et al. Physics and chemistry in a glow dielectric barrier discharge at atmospheric pressure: diagnostics and modelling[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 174-175(3): 8-14.
- [2] Trunec D, Brablec A, Buchta J. Atmospheric pressure glow discharge in neon[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(11): 1697-1699.
- [3] Gherardi M, Gouda G, Gat E, et al. Transition from glow silent discharge to micro-discharges in nitrogen gas[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2000, 9(3): 340-346.
- [4] 王新新. 介质阻挡放电及其应用[J]. 高电压技术, 2009, 35(1): 1-11.
Wang Xinxin. Dielectric barrier discharge and its applications[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(1): 1-11(in Chinese).
- [5] 章程, 方志, 胡建杭, 等. 不同条件下介质阻挡放电的仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 33-39.
Zhang Cheng, Fang Zhi, Hu Jianhang, et al. Simulation and experiment study on dielectric barrier discharge under different conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 33-39(in Chinese).
- [6] 解向前, 方志, 杨浩. 空气中均匀介质阻挡放电研究进展[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29(6): 649-658.
Xie Xiangqian, Fang Zhi, Yang Hao. Industrial applications of homogeneous dielectric barrier discharge in air technology[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2009, 29(6): 649-658(in Chinese).
- [7] Fang Z, Lin J, Xie X, et al. Experimental study on the transition of the discharge modes in air dielectric barrier discharge[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(8): 085203.
- [8] Fang Z, Xie X, Lin J, et al. Comparison of surface modification of polypropylene film by filamentary DBD at atmospheric pressure and homogeneous DBD at medium pressure in air[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(8): 085204.
- [9] Ayan H, Fridman G, Gutsol A F, et al. Nanosecond-pulsed uniform dielectric barrier discharge[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2008, 36(2): 504-508.
- [10] Fang Z, Qiu Y, Luo Y. Surface modification of polytetrafluoroethylene film using the atmospheric pressure glow discharge in air[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(23): 2980-2985.
- [11] Shao T, Long K H, Zhang C, et al. Experimental study on repetitive unipolar nanosecond-pulse dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(21): 215-203.
- [12] Williamson M J, Trump D D, Bletzinger P, et al. Comparison of high-voltage AC and pulsed operation of a surface dielectric barrier discharge[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(20): 4400-4406.
- [13] Liu S, Neiger M. Electrical modeling of homogenous dielectric barrier discharges under an arbitrary excitation voltage[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(24): 3144-3150.
- [14] Liu S, Neiger M. Excitation of dielectric barrier discharges by unipolar submicrosecond square pulses[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(11): 1632-1638.
- [15] Lu X, Laroussi M. Power consideration in the pulsed dielectric barrier discharge at atmospheric pressure[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(5): 3028-3030.
- [16] Walsh J L, Kong M G. 10 ns pulsed atmospheric air plasma for uniform treatment of polymeric surfaces[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(25): 251504.
- [17] KINEMA. KINEMA software: Boltzmann solver for the numerical solution of the Boltzmann equation[R]. Monument, Co USA: KINEMA Research in the USA, 1996.
- [18] 解向前, 方志, 张永焯, 等. μs 振荡脉冲电源激励的多针 2 平板电极 DBD 特性[J]. 印染, 2010(5): 1-4.
Xie Xiangqian, Fang Zhi, Zhang Yongye, et al. Characteristics of multineedle-to-plate DBD driven by μs oscillation pulse power[J]. Dyeing & Finishing, 2010(5): 1-4(in Chinese).
- [19] Hong Y C, Usm H C. Air plasma jet with hollow electrodes at atmospheric pressure[J]. Phys Plasma, 2007, 14(5): 053503.
- [20] 刘勇, 张琪, 何湘宁. 基于移相脉冲宽度调制控制的串联谐振式塑料薄膜表面处理电源的研制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 142-146.
Liu Yong, Zhang Qi, He Xiangning. Design of phase-shifted pulse width modulated(PS-PWM) controlled series resonant inverter for plastic film surface treatment[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 142-146(in Chinese).
- [21] 王跃球, 唐杰, 罗庆跃, 等. 介质阻挡放电型臭氧发生器等效电路研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12): 109-114.
Wang Yueqiu, Tang Jie, Luo Qingyue, et al. Study on equivalent circuit of dielectric barrier discharge type ozone generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(12): 109-114(in Chinese).
- [22] Qi B, Ren C S, Wang D Z, et al. Uniform glowlike plasma source assisted by preionization of spark in ambient air at atmospheric pressure[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(13): 131503.
- [23] Zhan H M, Ding L J, Li C R, et al. Pre-ionization methods for atmospheric pressure discharge controlled by dielectric barrier[J]. IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006, 6(5): 287-289.
- [24] Fang Z, Qiu X, Zhang C, et al. Factors influencing the existence of the homogeneous dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(5): 1401-1407.
- [25] Ayan H, Staack D, Fridman G, et al. Application of nanosecond-pulsed dielectric barrier discharge for biomedical treatment of topographically non-uniform surfaces[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(8): 125-202.
- [26] 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, 30(7): 111-117.
Zhang Cheng, Shao Tao, Long Kaihua, et al. Characteristics of nanosecond-pulse dielectric barrier discharge in atmospheric air[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 111-117(in Chinese).



方志

收稿日期: 2010-05-25。

作者简介:

方志(1977), 男, 博士, 副教授, 研究方向为高电压技术与气体放电应用, myfz@263.net;

解向前(1982), 男, 硕士, 研究方向为大气压介质阻挡放电及其应用, xiexq3000@163.com;

邱毓昌(1934), 男, 教授, 博士生导师, 美国电气与电子工程师学会会士(IEEE Fellow), 研究方向为高电压绝缘技术与气体放电技术, ycqiu@mail.xjtu.edu.cn。

(责任编辑 马晓华)