

大气压空气中纳秒脉冲介质阻挡放电特性分析

章程¹, 邵涛¹, 龙凯华¹, 王东珏¹, 张东东¹, 王珏¹, 严萍¹, 周远翔²

(1. 中国科学院电工研究所, 北京市 海淀区 100190;

2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

Characteristics of Nanosecond-pulse Dielectric Barrier Discharge in Atmospheric Air

ZHANG Cheng¹, SHAO Tao¹, LONG Kai-hua¹, WANG Dong-jue¹, ZHANG Dong-dong¹,
WANG Jue¹, YAN Ping¹, ZHOU Yuan-xiang²

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

2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments(Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Dielectric barrier discharge (DBD) is an important method of generating non-thermal plasma, and DBD generated by nanosecond-pulse is different from that by conventional AC power source. Characteristics of DBD driven by repetitive unipolar nanosecond-pulses in atmospheric air were investigated, the electric parameters were calculated, and the comparison of electric parameters for DBD under AC, microsecond-pulse and nanosecond-pulse excitation was conducted. The relationship between the discharge images and current was obtained, and the discharge mechanism excited by nanosecond-pulse was also analyzed. Some experiment results were acquired, e.g. the measured discharge current exhibits bipolar pulses, which indicating two continuous discharges, and the electric parameters are higher than those under the excitation of AC or microsecond-pulse. Furthermore, with the increase of air gap spacing, the transition from the homogeneous to filamentary discharge is related to the fluctuation of discharge current. Because microdischarge duration and the width of pulse are on the same order under nanosecond-pulse excitation, the microdischarges take place synchronously, and it is difficult for consecutive occurrences on the same location, which has a positive influence on the discharge uniform.

KEY WORDS: dielectric barrier discharge (DBD); nanosecond pulse; repetition rate; atmospheric air

摘要: 介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)是产

生低温等离子体的重要方法, 纳秒脉冲条件下 DBD 与普通交流下的放电不同。通过单极性纳秒脉冲激发大气压空气中 DBD, 计算纳秒脉冲 DBD 的电气参数, 与交流或微秒脉冲放电的电气参数相比较, 并对放电图像与电流波形的关系, 探讨了放电机制。研究表明, 纳秒脉冲 DBD 的放电电流呈双极性, 气隙上发生 2 次放电过程, 其电气参数高于常规交流和微秒脉冲 DBD 的电气参数。随着空气间隙距离的增加, 均匀放电向丝状放电的转化与电流脉冲波动相关。由于微放电持续时间与施加脉冲处于同一个数量级, 且基本同时发生在气隙中, 很难在同一位置上存在数个连续的微放电, 这对放电的均匀性有利。

关键词: 介质阻挡放电; 纳秒脉冲; 重复频率; 大气压空气

0 引言

低温等离子体在环境污染治理、灭菌消毒、材料改性及物理研究等领域具有独特的优越性^[1-3], 产生低温等离子体的方法主要有辉光放电、电晕放电和介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)等。自 20 世纪 80 年代末以来, 基于 DBD 原理产生低温等离子体、尤其是大气压下均匀辉光放电的研究受到国内外广泛关注。DBD 产生低温等离子体通常采用交流高压激励^[2-10]; Okazaki 等^[4-5]利用高频及工频电源都实现了大气压辉光放电, 其放电均匀需要满足一定的条件, 但高速摄影显示并非真实的辉光放电; Massines 等^[6]利用高频高压 DBD 产生大气压辉光放电, 但对介质材料、电源频率、气隙间距、放电气体类型等参数都有严格的要求, 认为氮气中的均匀放电仍属于汤森放电, 而氦气中均匀放电才是真正意义上的辉光放电或亚辉光放电; Radu 等^[7]

基金项目: 国家自然科学基金项目(50707032, 50437020)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50707032, 50437020).

发现在大气压惰性气体中利用交流 DBD 可以实现大气压辉光放电;虽然射频交流下不需要介质阻挡也能实现辉光放电,但 Kong 等^[8]研究发现其放电不稳定,容易过渡到电弧放电,而加入阻挡介质有很好的控制效果;方志等^[9]建立了基于电压控制电流源的动态仿真模型对不同条件下大气压工频 DBD 的影响因素进行了仿真研究,仿真结果符合实验结果;何湘宁等^[10]研制了用于产生 DBD 的串联谐振电源来对薄膜表面进行处理;随着各种条件下 DBD 特性的研究不断深入,无论是理论方面还是应用方面的结果源源不断。

相对于交流 DBD 的大量研究和应用,脉冲放电技术在近几年也成为放电等离子体领域的研究热点,目前脉冲电源应用到 DBD 研究和应用以间歇性双极性毫秒脉冲、单极性微秒脉冲和亚微秒脉冲激励居多,主要在材料表面改性处理^[11]、脱硫脱硝^[12]、产生真空紫外辐射^[13-14]以及臭氧发生^[15-16]等方面。Mildren 等^[13]对比分析了次大气压氙气下的交流和脉冲 DBD 产生真空紫外辐射的特性,脉冲下的最大输出强度是交流的 2.6 倍,放电输出效率是交流中的 3.2 倍,且与交流 DBD 表现出的明显丝状模式不同,脉冲 DBD 表现出较为均匀的放电;Liu 等^[15]根据等效电路模型计算了间隙放电参数,且单极性脉冲 DBD 的臭氧效率比交流时提高 30%;Lu 等^[17]施加 10 kV 的亚微秒脉冲得到了近 20 A 的电流峰值,高速摄影显示能产生汤逊模式的均匀放电。最近也有一些单极性纳秒脉冲的应用研究^[18-22],Kong 等^[18]利用 10 ns 上升沿的快脉冲产生了均匀放电;Ganguly 等^[19]研究 10 和 150 ns 2 种脉冲条件下的 DBD 产生 Ar 亚稳态的效率,虽然在高气压条件下更快脉冲效率会相对高些,但考虑到介质损耗,实际两者效率相差不大;Shao 等^[20-21]利用类三角波的纳秒脉冲产生放电,分析了间隙距离、阻挡方式、重复频率等对放电均匀性的影响,结果认为纳秒脉冲 DBD 也存在均匀和丝状放电模式;Ayan 等^[22]采用几十 ns 脉冲激发 DBD,认为不需均衡的气隙和光滑的电极表面,也能在大气压空气中实现均衡的放电且杀菌效果良好;Lu 等^[23]最近研究了不同脉宽的脉冲对 DBD 特性的影响,结果发现当施加电压脉宽小于 600 ns 时,脉宽明显影响放电电流的持续时间。单极性脉冲高压用于产生 DBD,被认为可较好地解决微放电导致的局部过热,简化放电电极结构,实际应用效率更高,可以激发更高能量的低温等离子体。一些研究发现在单极性脉冲条件下的 DBD 电流

经常呈现双极性脉冲,发生 2 次放电过程,其中第 1 次放电出现在施加脉冲的上升沿,第 2 次放电发生在施加脉冲的下降沿^[15,17-18,20-21,23],但也有研究发现单极性脉冲下 DBD 电流只有 1 个脉冲,且电流幅值较高^[12-14,16,19,22]。因此,纳秒脉冲产生 DBD 的研究仍在继续,如脉冲宽度、上升沿等参数对 DBD 特性的影响仍需要进一步的研究。本文利用一套能产生 1 kHz 重复频率纳秒脉冲的高压电源,基于前期的一些研究^[20-21],进一步分析纳秒单极性脉冲电压-电流特征,与目前已有的交流及微秒脉冲结果进行对比,并探讨了图像特征与电参数之间的关系,最后分析和讨论纳秒脉冲 DBD 的产生机制。

1 纳秒脉冲 DBD 电气参数计算

不同于普通交流 DBD,纳秒脉冲 DBD 可能存在 1 次脉冲下 2 次放电过程,因此空气间隙上的电压、电流及放电功率等都需要根据外加电压和 DBD 总电流计算。整个 DBD 等效电路^[15,20]为介质层电容与空气间隙串联,其中空气间隙等效为空气间隙电容与电流源并联。基于以上等效,可以计算空气间隙和介质层的电压及瞬时功率等。

由测量得到的外加电压 u_t 和总电流 i_t ,可以计算空气间隙上的放电电压 u_g 和电流 i_g ,即

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

$$u_g = \frac{C_d}{C_d + C_g}u_t - \frac{1}{C_d + C_g} \int_0^t i_g(t)dt \quad (2)$$

式中: C_d 为介质等效电容; C_g 为空气间隙等效电容。

介质层电压 u_d 也可用式(3)计算得到

$$u_d = \frac{1}{C_d} \int_0^t i_t(t)dt \quad (3)$$

此外,施加电压脉冲是纳秒级,裸电极对应的等效电容为介质层电容和空气间隙电容串联,位移电流也是一个重要电气参数:

$$i_d = (\frac{C_d C_g}{C_d + C_g}) \frac{du_t}{dt} \quad (4)$$

根据式(1)~(4)计算的电压和电流,可以分别计算电路输入功率 P_t 、空气间隙放电功率 P_g 和介质层的实时功率 P_d ,即

$$P_t = u_t i_t \quad (5)$$

$$P_g = u_g i_g \quad (6)$$

$$P_d = P_t - P_g \quad (7)$$

2 纳秒脉冲 DBD 实验装置及测量

整个 DBD 实验接线如图 1 所示, 基于半导体断路开关的电感储能电源作为 DBD 激发源^[24-26], 输出脉冲上升沿约 15 ns, 脉宽 30~40 ns。实验时 SPG200N 的开启、关停及重复频率调节均通过触发脉冲发生器进行控制。SPG200N 产生纳秒脉冲主要依靠磁开关和半导体断路开关, 输出电压根据负载阻抗变化, 为得到相对稳定的输出电压, 负载端接一循环盐水回路, 通过调节负载盐水的浓度改变电阻来改变输出电压, 实验时需要 DBD 回路与盐水电阻回路并联^[24]。DBD 电极为铝电极, 整个电极直径 70 mm, 电极边缘半径 10 mm, 介质材料为普通玻璃, 边长 100 mm, 厚度 1~4 mm。

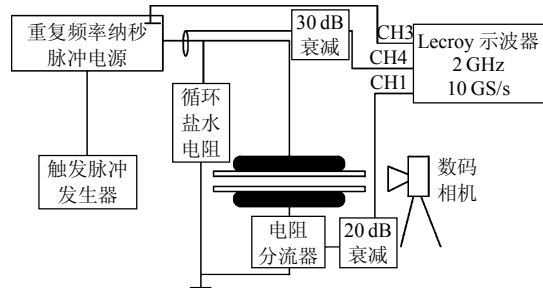


图 1 纳秒脉冲 DBD 实验装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for nanosecond-pulse DBD

DBD 电压(Lecroy 示波器通道 CH3)由附着在 SPG200N 高压输出处的耦合式电容分压器测量, 分压器分压比约 10 000。DBD 电流(通道 CH1)由同轴管式高频电阻分流器测量, 电阻值 103 mΩ, 同时 SPG200N 输出总电流(通道 CH4, 包括盐水电阻回路电流和 DBD 电流)由罗果夫斯基线圈测量, 其变比约 30 A/V。3 路信号经同轴电缆 50 Ω 匹配后分别送示波器的 3 个通道, Lecroy WR204Xi 示波器的带宽和采样率分别为 2 GHz 和 10 GS/s, 可以满足该脉冲信号的测量要求。实验时利用电流信号较稳定的 CH4 边沿信号作为示波器测量的触发信号。DBD 图像用 SONY 的 DSC-H9 数码相机拍摄, 其曝光时间为 0.5 s, 相机镜头置于距离电极边缘 15 mm 处。

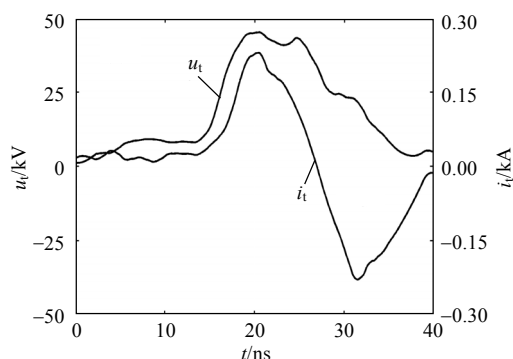
3 纳秒脉冲 DBD 实验结果及分析

3.1 纳秒脉冲 DBD 电压-电流特性

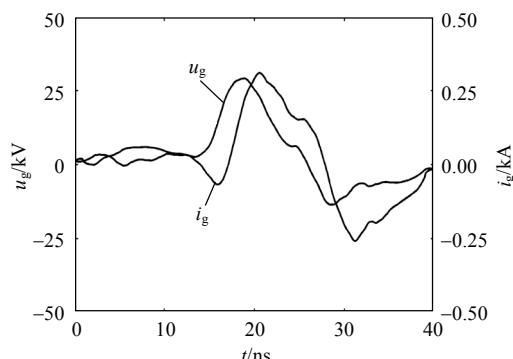
典型纳秒脉冲 DBD 的电气参数波形如图 2(a)所示, 根据电气参数计算公式(1)~(7), 得到图 2(b)~(d), 对应电气参数峰值如表 1 所示。图 2 对应的实验条件为: 电极距离为 4 mm, 负极覆盖 2 mm 厚玻璃进行介质阻挡, 气隙距离为 2 mm, 重复频

率为 1 kHz。

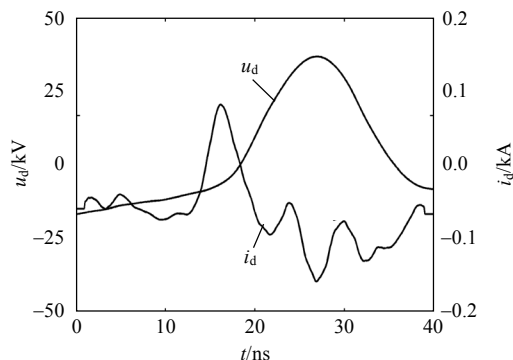
由图 2(a)可以看出: u_t 为单极性纳秒脉冲, 而 i_t 呈双极性特征。虽然目前在实验室条件下无法通



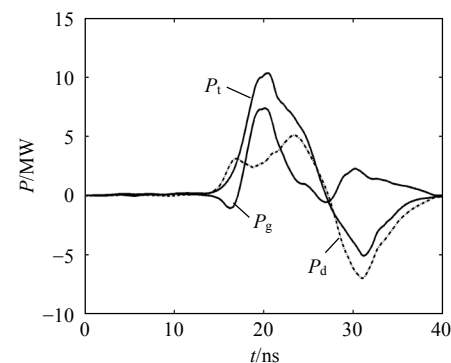
(a) 实验测得的外加电压和 DBD 总电流



(b) 计算得到的气隙上的电压和电流



(c) 计算得到的介质上的电压和电极间位移电流



(d) 计算得到的瞬时总功率、气隙上和介质上的功率

图 2 典型纳秒脉冲 DBD 电气参数波形

Fig. 2 Waveforms of typical electrical parameters of nanosecond-pulse DBD

过高速摄影直接确定产生双极性电流的过程,但对比已有类似文献的研究,可以认为有2次连续发生的放电过程。第1次放电脉冲开始于 u_t 上升期间并在 u_t 下降之前迅速达到最大值,几乎在第1次放电熄灭的同时,第2次放电马上发生。第1次和第2次放电时间间隔几乎为零,而已有实验研究结果中2次放电时间间隔从几十ns到几百ns不等^[15,17-18,23],但这与实验结果并不相互矛盾,由于不论2次放电的时间间隔是多少,第1次放电都发生在外加电压上升期,而第2次放电都发生在外加电压下降期。

图2(b)给出了计算得到的 u_g 和 i_g 。可以看出, u_g 和 i_g 均呈双极性特征,且 u_g 和 i_g 保持相同极性。气隙放电电流 i_g 的正峰值和负峰值均大于DBD总电流 i_t ,与文献[20-21]中得到的结果相似,同时整个放电持续时间约30ns,2次放电分别持续的时间差不多。除了 u_g 和 i_g ,介质电压 u_d 也是决定放电特性的重要参数,在图2(c)中, u_d 是单极性的,其峰值大于 u_g 。当 i_t 的第1个脉冲开始时, u_d 逐渐增大;当 i_t 的第2个脉冲开始时, u_d 逐渐减小; i_t 结束时, u_d 接近于零。 u_g 和 u_d 的和等于 u_t ,因此 u_g 达到负峰值, u_d 达到最大值时,正是蓄积在介质中的能量激发第2次放电的时刻。需要指出的是,在施加上升沿(dU/dt)较快脉冲时,一定电容量 C 的间隙会对应产生一定幅值的位移电流(Cdu/dt),电流幅值与脉冲上升沿和下降沿密切相关,位移电流 i_d 是反映外加电场变化的等效电流,本文研究的DBD间隙也会产生双极性位移电流,如图2(c)所示。可以看出, i_d 和 i_t 、 i_g 的波形明显不同,位移电流与放电电流幅值、脉宽、峰值对应位置等均有较大差别,因此单极性脉冲DBD产生双极性电流脉冲与施加快脉冲得到双极性位移电流是不同的。

图2(d)给出了电源提供的实时总功率、介质层实时功率及空气间隙的实时功率计算结果,可以看出, P_t 、 P_g 和 P_d 都有2个脉冲。第1次放电的峰值功率约7.39MW, P_t 在第1次放电时提供激发DBD的能量,大部分用于在放电气隙中产生等离子体,其余部分储存或消耗在介质上并产生一个反向的电场。第1次放电熄灭后,介质层实时功率为负值,说明介质层在第2次放电期间给整个电路输出功率,空气间隙上的第2次放电功率主要由介质层提供并产生反极性放电。第2次放电功率峰值为2.29MW,约为第1次放电功率峰值的1/3。

根据图2和表1中的电气参数,计算得到纳秒

脉冲DBD的传输能量、传输电荷量、平均电子密度和估计电子温度^[20],如表2所示。可以看出,第1次和第2次放电传输的能量分别为30.1和12.8mJ,在重频纳秒脉冲下,可以定义平均功率 $P=Ef$,其中 E 为每次脉冲传输的能量, f 为脉冲重复频率。随着脉冲重复频率的提高,DBD平均功率密度也会提高,相应传输的电荷量也会大大提高。在图2的实验条件下,重复频率为1kHz,平均功率约43W,对应的功率密度约为2.19W/cm²,比通常交流DBD的功率密度高得多。

表1 纳秒脉冲DBD电气参数

Tab. 1 Electrical parameters of nanosecond-pulse DBD

电气参数	外加电压/kV	气隙电压峰值/kV	介质电压/kV
正峰值	45.2	29.12	40.0
负峰值(次峰值)	—	-13.49	—
电气参数	总电流峰值/A	气隙电流/A	位移电流/A
正峰值	229	310	111.2
负峰值(次峰值)	-228	-258	-67.9
电气参数	总功率/MW	放电功率/MW	介质功率/MW
正峰值	10.36	7.39	5.10
负峰值(次峰值)	-5.08	2.29	-6.98

表2 纳秒脉冲DBD传输能量、电荷量、平均电子密度和电子温度值

Tab. 2 Energy deposition, charge transfer, mean electron density and electron temperature of nanosecond-pulse DBD

电气参数	能量传输量/mJ	电荷传输量/ μ C
第1次放电参数值	30.1	1.97
第2次放电参数值	12.8	1.74
电气参数	平均电子密度/ 10^9 cm ⁻³	估计电子温度/eV
第1次放电参数值	698	6.0
第2次放电参数值	1 250	3.2

3.2 与交流及微秒脉冲DBD特征参数对比分析

对典型交流^[1,12,27]、微秒脉冲^[28]和纳秒脉冲DBD特征参数对比如表3所示。从各个参数的数量级可以看出,交流的电气参数小于微秒脉冲DBD,而纳秒脉冲DBD的电气参数更大。以微放电直径为100 μ m计算^[27],可以估算纳秒脉冲DBD的微放电电流密度、电子密度等参数,可以看到,纳秒脉冲DBD的微放电电流密度约达到 10^6 A·cm⁻²,电子密度约达到 10^{16} cm⁻³,均远大于交流激励下的微放电。此外,纳秒脉冲DBD的微放电电子温度约为10eV,高于交流激励下的微放电。由于纳秒脉冲下的介质击穿是典型的过电压击穿,能产生更高的初始电场强度,在短时间内达到的放电电流和功率都远高于交流DBD。尽管如此,纳秒脉冲DBD长时间运行后并没有发现过热现象,电极和阻挡介质温度基本不会上升,而在高频高压交流DBD经常出

现过热而烧坏阻挡介质的现象。

表 3 典型交流、微秒脉冲和纳秒脉冲 DBD 的特性对比
Tab. 3 Comparison among AC, microsecond-pulse and nanosecond-pulse DBDs

电气参数	电压 峰值/kV	电流 峰值/A	功率 峰值/kW	平均电子 密度/cm ⁻³
交流 DBD	2~30	0.002~0.1	0.001~0.5	10 ⁹ ~10 ¹⁰
微秒脉冲 DBD	≈10	≈30	≈180	—
纳秒脉冲 DBD	≈45	≈200	≈10 000	≈10 ¹²

电气参数	微放电电流密 度/(A·cm ⁻²)	微放电电子 密度/cm ⁻³	微放电电子 温度/eV
交流 DBD	≈10 ³	10 ¹⁴ ~10 ¹⁵	1~10
微秒脉冲 DBD	3×10 ⁵	—	—
纳秒脉冲 DBD	≈10 ⁶	≈10 ¹⁶	≈10

3.3 纳秒脉冲 DBD 电流与图像特征的联系

虽然采用 ns 级曝光的高速摄影来诊断放电均匀性是最为科学和可靠的，但实际操作并不方便，因此寻找较为简便的方式判断放电均匀性值得关注。在交流 DBD 中经常采用电压-电荷李萨育 (Lissajous) 图形和电流波形特征来判断，一般可以认为李萨育图形只有 2 条平行线，且电流每半周期内只有 1 个脉冲是均匀放电，而每半周有多个微放电脉冲且李萨育图形为平行四边形的 DBD 是丝状放电^[4-5,29]。这些特征是区分均匀放电和丝状放电的重要特征之一，但对于脉冲条件下的 DBD 如何找到简便判断方法还不明了。

在本文的实验条件下，当电极正负极各覆盖 1 mm 厚的玻璃介质层且施加脉冲频率为 500 Hz 时，随着气隙距离的增大，放电发生了从均匀放电到丝状放电的转变^[20]。如图 3 所示，当气隙距离为 2 mm 时，整个放电空间看起来很均匀，定义其为均匀 DBD；当气隙距离逐渐增大时，逐渐出现肉眼

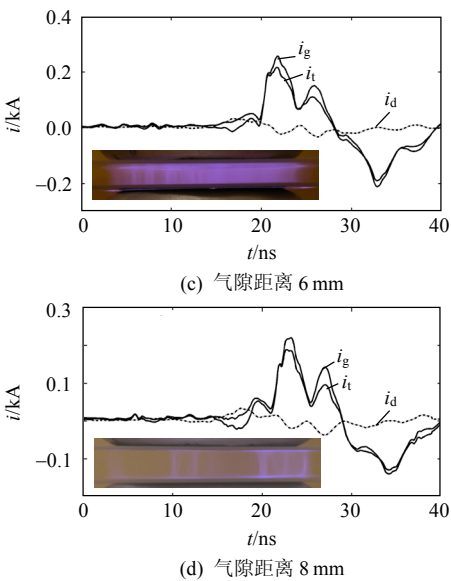


图 3 纳秒脉冲 DBD 的图像和电流波形对比
Fig. 3 Comparisons of photographs and current waveforms for nanosecond-pulse DBD

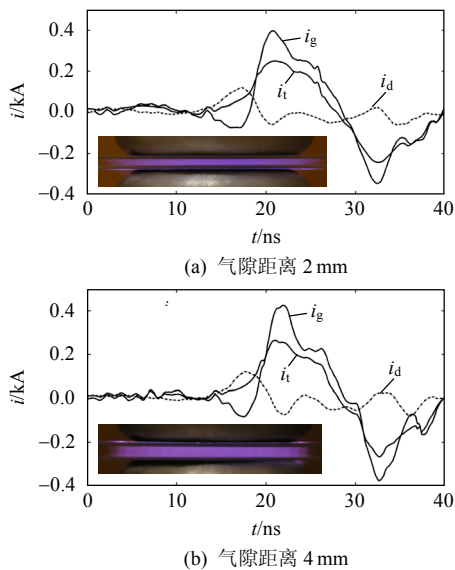
可观察到的丝状；当气隙距离增加到 8 mm 时，放电出现更加明显的丝状，定义其为丝状 DBD。

对比纳秒脉冲 DBD 的图像和电流波形，当气隙距离为 2 mm 时，电流波形较为平滑，有一正一负 2 个脉冲，整个气隙空间放电图像均匀，没有出现肉眼可观察的丝状；随着气隙的增大，电流波动增大，直到气隙距离增加到 8 mm 时，有 3 个正脉冲和 1 个负脉冲，而整个气隙空间有不少明显的丝状放电，这种电流脉冲增多可能与间隙增大后，微放电过程发生变化有关。在更多的实验结果中都显示出这样的规律，因此估计放电的均匀性可能与电流波形中的脉冲和波动相关，但这种放电均匀性与电流波形直接的关系还需要进一步的深入研究。

4 纳秒脉冲 DBD 产生机制探讨

纳秒脉冲放电是典型的过电压击穿^[25,29]，击穿电压高于交流电压作用下的击穿电压，所以能产生更高的初始电场强度，在短时间内达到的放电电流和功率都远强于交流 DBD，具有比交流 DBD 更大的折合电场强度，使得原子、分子激发和分裂的等离子体化学过程快速增加，产生具有更高能量的高能粒子，更多的活性粒子。

当高压施加在大气压下的气体间隙上，随着电子崩的发展，在放电间隙中形成大量丝状的脉冲流注微放电，它们均匀、漫散，彼此孤立地随机发生在不同位置。在交流 DBD 中，源于介质表面的电荷、气隙空间离子电荷、激发态粒子的“残余粒子”的记忆效应对放电均匀性非常重要。如果当电压极



性翻转时微放电每次都发生在新的点上, DBD 将表现为均匀放电, 如果在同一位置, 则表现为丝状放电^[1]。典型的微放电持续时间约 40 ns, 虽然离子持续时间只有 μs 量级, 但微放电产生的振动态和电子态的激发态粒子可以维持 ms 量级^[1]。因此对于纳秒脉冲 DBD, 其微放电过程应该与施加脉冲处于同一个数量级, 可以推断微放电过程基本都是同时发生, 尤其是小间隙时, 微放电基本都是同时发生在气隙中, 很难在同一位置上存在数个连续的微放电, 所以对放电均匀性有利。

在低频交流激励的 DBD 中, 介质层上的表面电荷经常会在第 2 次反极性放电到来之前部分流失, 能量利用率降低; 而在高频交流 DBD 中, 不可避免地出现了微放电局部过热的问题, 电极容易过热而烧蚀介质阻挡层。在脉冲高压作用下, 在脉冲下降沿时通过 2 次放电有效地利用这些表面电荷等^[15], 因而放电效率高, 并且脉冲作用的间断性和短时性不但解决了微放电局部过热的问题, 而且对抑制放电向不均匀方向发展有好处。越来越多的研究发现, 相比于交流高压, 单极性脉冲高压激发的 DBD 可以在大大降低输入功率的情况下产生较为均匀的大气压放电, 而且施加脉冲的上升沿越陡, 可能对实现均匀放电和应用效率的提高越有利。

5 结论

1) 单极性纳秒脉冲电场下 DBD 电流呈双极性, 比对已有文献表明, 放电气隙上发生 2 次无间隔放电, 分别发生在施加脉冲的上升区与下降区, 有待进一步的高速摄影证明。

2) 计算得到纳秒脉冲 DBD 的电流幅值、传输能量、传输电荷量、平均电子密度和估计电子温度等电气参数均高于常规交流和微秒脉冲 DBD 的参数。

3) 随着空气间隙距离的增加, 放电空间均匀放电向丝状放电的转化与电流脉冲波动相关; 但均匀性需要进一步的高速摄影来更可靠地诊断, 且类比交流 DBD 下采用电流波形来判断放电均匀与否的方法, 纳秒脉冲 DBD 的放电均匀性还需要进一步的研究。

4) 纳秒脉冲 DBD 下降沿的 2 次放电有效地利用上一次放电生成的表面电荷, 且微放电持续时间与施加脉冲处于同一数量级, 一方面解决了微放电局部过热的问题, 另一方面有利于抑制放电向不均匀方向发展。

致 谢

本文研究部分获得中国科学院知识创新工程重要方向项目(KGCX2-YW-339)和清华大学电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室开放基金重点课题(SKLD09KZ05)的资助, 谨此致谢。

参考文献

- [1] Fridman A, Chirokov A, Gutsol A. Non-thermal atmospheric pressure discharges[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(2): R1-R24.
- [2] Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharge: their history, discharge physics, and industrial application[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(1): 1-46.
- [3] 李雪辰, 董丽芳. 大气压介质阻挡辉光放电研究综述[J]. 自然科学进展, 2006, 16(12): 1521-1529.
Li Xuechen, Dong Lifang. Research review of the dielectric barrier glow discharge at atmospheric pressure[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(12): 1521-1529(in Chinese).
- [4] Kanazawa S, Kogoma M, Moriwaki T, et al. Stable glow plasma at atmospheric pressure[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1988, 21(5): 838-840.
- [5] Okazaki S, Kogoma M, Uehara M, et al. Appearance of stable glow discharge in air, argon, oxygen and nitrogen at atmospheric pressure using a 50 Hz source[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1993, 26(5): 889-892.
- [6] Massines F, Rabehi A, Decomps P, et al. Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmosphere pressure controlled by dielectric barrier[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 86(6): 2950-2957.
- [7] Radu I, Bartnikas R, Czeremuszkin G, et al. Diagnostics of dielectric barrier discharges in noble gases: atmospheric pressure glow and pseudoglow discharge and spatio-temporal patterns[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2003, 31(3): 411-421.
- [8] Shi J J, Liu D W, Kong M G. Plasma stability control using dielectric barriers in radio-frequency atmospheric pressure glow discharges[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(8): 1502-1504.
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] Ishikawa S, Yukimura K, Matsunaga K, et al. The surface modification of poly(tetrafluoroethylene) film using dielectric barrier discharge of intermittent pulse voltage[J]. Surface & Coating Technology, 2000, 130(1): 52-56.
- [12] Spaan M, Leistikow J, Schulz V, et al. Dielectric barrier discharges

- with steep voltage rise: laser absorption spectroscopy of NO concentrations and temperatures[J]. Plasma Sources Science Technology, 2000, 9(2): 146-151.
- [13] Mildren R P, Carman R J. Enhanced performance of a dielectric barrier discharge lamp using short-pulsed excitation[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(1): L1-L6.
- [14] Carman R J, Mildren R P, Ward B K, et al. High-pressure (>1 bar) dielectric barrier discharge lamps generating short pulses of high-peak power vacuum ultraviolet radiation[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(17): 2399-2407.
- [15] 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.
- [16] Williamson J M, 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.
- [17] Lu X, Laroussi M. Temporal and spatial emission behaviour of homogeneous dielectric barrier discharge driven by unipolar sub-microsecond square pulses[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(6): 1127-1131.
- [18] 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): 251501.
- [19] Leiweke R J, Ganguly B N. Effects of pulsed-excitation applied voltage rise time on argon metastable production efficiency in a high pressure dielectric barrier discharge[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(24): 241501.
- [20] Shao T, Long K, 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): 5203-5210.
- [21] Shao T, Long K H, Zhang C, et al. Electrical characterization of dielectric barrier discharge driven by repetitive nanosecond pulses in atmospheric air[J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67(2-3): 215-221.
- [22] 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.
- [23] Lu X, Xiong Q, Xiong Z, et al. Effect of nano- to millisecond pulse on dielectric barrier discharge[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2009, 37(5): 647-651.
- [24] Shao T, Sun G, Yan P, et al. An experimental investigation of repetitive nanosecond-pulse breakdown in air[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(10): 2192-2197.
- [25] 邵涛, 袁伟群, 孙广生, 等. 常压下重频纳秒脉冲气体放电试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 161-166.
- Shao Tao, Yuan Weiqun, Sun Guangsheng, et al. Experimental study of repetitive nanosecond-pulse breakdown in atmospheric air[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 161-166(in Chinese).
- [26] Shao T, Sun G, Yan P, et al. Experimental study of polarity dependence in repetitive nanosecond-pulse breakdown[J]. Chinese Physics, 2007, 16(3): 778-783.
- [27] Eliasson B, Hirth M, kogelschatz U. Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1987, 20(11): 1421-1437.
- [28] Laroussi M, Lu X, Kolobov V. Power consideration in the pulsed dielectric barrier discharge at atmospheric pressure[J]. Journal of Physics, 2004, 96(5): 3028-3030.
- [29] 邵涛, 孙广生, 严萍, 等. 纳秒脉冲下高能量快电子逃逸过程的计算[J]. 物理学报, 2006, 55(11): 161-166.
- Shao Tao, Sun Guangsheng, Yan Ping, et al. Calculation on runaway process of high-energy fast electrons under nanosecond-pulse[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(11): 161-166(in Chinese).



章程

收稿日期: 2009-08-31。

作者简介:

章程(1982—), 男, 博士研究生, 从事高电压技术、脉冲功率技术等方面研究;

邵涛(1977—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 从事高电压技术、低温等离子体、脉冲功率技术等方面研究, 本文的通讯作者, st@mail.iee.ac.cn;

王东珏(1984—), 男, 硕士研究生, 从事高电压与绝缘技术的研究;

张东东(1980—), 男, 博士, 助理研究员, 从事脉冲功率技术等方面研究;

王珏(1972—), 男, 副研究员, 从事高电压技术、脉冲功率技术等方面研究;

严萍(1965—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 从事高电压技术、脉冲功率技术等方面研究, pingyan@mail.iee.ac.cn;

周远翔(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电介质材料教学和科研工作。

(责任编辑 马晓华)