第 50 卷 第 2 期：852-860　　高电压技术　　Vol.50, No.2: 852-860
2024 年 2 月 29 日　　High Voltage Engineering　　February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20222062

纳秒脉冲电压幅值和上升/下降沿时间对大气压氮气 DBD 均匀性的影响

李梦遥，王歆昀，赵昱雷，刘　峰，方　志
（南京工业大学电气工程与控制科学学院，南京 211816）

摘　要：大气压氮气介质阻挡放电在材料改性、环境保护、消毒灭菌、臭氧合成以及流动控制等领域具有广阔的应用前景，放电均匀性是影响其应用效果的关键。通过电学及光学诊断方法研究了电压幅值、上升/下降沿时间、及重复频率对纳秒脉冲氮气 DBD 均匀性和放电过程的影响。利用灰度分析方法和等效电路模型定量分析放电图像和电压电流波形，得到放电均匀性和电学微观参数。结果表明：增加电压幅值或重复频率，氮气 DBD 均匀性呈现不均匀到均匀再到不均匀的变化规律，并且频率较低时的氮气 DBD 需要更大的电压幅值以实现均匀放电；增大脉冲上升或下降沿时间会导致放电均匀性显著下降，且相比于下降沿，上升沿对放电均匀性影响更大。测量发射光谱对比了不同纳秒脉冲参数下化学活性物种含量的变化，发现增大电压幅值、重复频率均会导致 N_2 各激发态粒子谱线强度增强；脉冲上升沿或下降沿时间的增加使主要粒子谱线强度下降。此研究揭示了纳秒脉冲参数对 N_2 DBD 过程影响机制，有利于制备均匀、稳定且高活性的大气压等离子体源。
关键词：纳秒脉冲；脉冲参数；介质阻挡放电；氮气；均匀性

Influence of Nanosecond Pulse Voltage Amplitude and Rising/Falling Edge Time on the Uniformity of Atmospheric Pressure N_2 DBD

LI Mengyao, WANG Xinyun, ZHAO Yulei, LIU Feng, FANG Zhi
(College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: Atmospheric pressure N_2 dielectric barrier discharge(DBD) has broad application prospects in the fields of material modification, environmental protection, disinfection and sterilization, ozone synthesis, and flow control, and discharge uniformity is very important for its application. In this paper, the effects of voltage amplitude, pulse rising/falling edge times, and repetition frequency on the uniformity and discharge process of nanosecond pulse N_2 DBD are studied by electrical and optical diagnoses. The discharge images and voltage-current waveforms are quantitatively analyzed by the Gray Value Standard Deviation method and equivalent electrical model to obtain the discharge uniformity and electrical parameters. The results show that the uniformity of N_2 DBD varies from non-uniform to uniform to non-uniform with increasing voltage amplitude or repetition frequency, and the N_2 DBD with lower frequency requires higher voltage to achieve uniform discharge. Increasing the pulse rising/falling edge times leads to a significant decrease in discharge uniformity, and the rising time has a greater impact on the discharge uniformity than the falling time. The emission spectra are measured to compare the changes of chemically active species content under different nanosecond pulse parameters. It is found that increasing the voltage amplitude or repetition frequency enhances the spectral line intensity of each N_2 particle. The increase of the pulse rising/falling edge times reduces the spectral line intensity of the main particle. This study reveals the influence mechanism of nanosecond pulse parameters on the N_2 DBD process, which is conducive to the preparation of uniform, stable and highly active plasma sources at atmospheric pressure.
Key words: nanosecond pulse; pulse parameters; dielectric barrier discharge; nitrogen; uniformity

0　引言

大气压氮气等离子体在材料改性[1]、能源环境[2]、消毒灭菌[3]、臭氧合成[4]以及流动控制[5]等领域具有广阔的应用前景，是目前低温等离子体领域的研究热点之一。介质阻挡放电(DBD)具有结构简单、放电均匀、能量密度适中等优点[4]，是最常见、应用最为广泛的大气压氮气等离子体产生方式。

基金资助项目：国家自然科学基金 (52177148；52037004；51777091)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52177148, 52037004, 51777091).

DBD 通常呈现两种工作模式，即细丝模式和均匀模式[6]，在材料表面改性、薄膜涂层和等离子体医学等各个领域的实际应用中，均匀放电是评价 DBD 的重要指标。传统 DBD 主要由交流电源激励，在大气压下，即使添加活性成分以提高等离子体化学反应性，放电空间仍然存在大量高能量密度电流细丝[7-8]。随着脉冲功率技术的发展，纳秒脉冲电源作为一种新的等离子体驱动电源被广泛应用到 DBD 特性及其应用领域的研究[9]，采用纳秒脉冲电源驱动 DBD 可以有效抑制丝状放电，提升放电均匀性，并相较于传统的交流 DBD，脉冲 DBD 还具有放电稳定、效率高和能耗低等优点[10-11]。

研究发现利用纳秒电源激励 DBD 时，纳秒脉冲参数对氮气均匀 DBD 的生成、放电特性及应用效果具有显著的影响[12-14]。其中，纳秒脉冲参数包括脉冲电压、重复频率和脉冲上升沿/下降沿等。对此，国内外学者进行了相关的研究，Liu 等人利用 ICCD 和光谱测量了纳秒脉冲 DBD 的发展过程[15]，通过调控电源电压和电极结构实现了大气压下的均匀放电。Zhao 等人研究重复频率对 DBD 中记忆效应和放电模式转变的影响[16]，发现频率增加有利于产生均匀和高反应活性的放电等离子体。Fan 等对双极性脉冲正负半周之间的记忆效应进行量化[17]，发现放电特性受表面和体积记忆效应的影响，改变电压变化速率可以有效调节记忆效应，短促的上升沿/下降沿时间利于实现均匀放电，提高放电强度。陈杰等人研究发现脉冲上升沿与下降沿时间主要影响电压变化率，造成空气击穿时放电过程的差异，进而影响放电细丝的均匀性[18]。

综上可知，目前国内外学者对纳秒脉冲参数对 DBD 放电特性影响的研究和仿真已经取得了很多成果，结果表明电压幅值的改变会引起电场强度变化，重复频率影响单位时间内放电发生的次数，脉冲上升沿时间和下降沿时间分别影响一个周期内的一次放电和二次放电击穿时的放电强度，进而导致放电均匀性变化。但是纳秒脉冲参数对放电均匀性的影响十分复杂且敏感，各项脉冲参数之间的相互影响导致放电特性的变化过程属于非线性变化。因此，需要深入研究调控纳秒脉冲参数对 DBD 均匀性的影响以提高纳秒脉冲 DBD 工业应用效果。

本文利用纳秒脉冲电源驱动氮气 DBD，通过光学和电学测量诊断方法，研究调控电压幅值、重复频率、上升沿和下降沿时间对氮气 DBD 放电特性的影响，通过放电图像结合灰度标准差(GVSD)方法定量分析放电均匀性，分离电压电流波形研究电学微观参量，探讨图像特征与电学参数间的关系，测量不同参数下发射光谱并结合 DBD 放电机制，得到优化放电均匀性，提高等离子体化学反应活性的实验条件，从而为大气压氮气 DBD 均匀且高效的等离子源设计和实际应用提供参考依据。

1 实验装置与方法

搭建的纳秒脉冲DBD特性诊断实验平台如图1所示，主要由纳秒脉冲驱动电源、DBD 反应装置、工作气体控制系统、电学和光学测量系统组成。采用纳秒脉冲电源(型号 HV-2015)激励板-板 DBD，其输出电压幅值范围 0~15 kV，重复频率范围 1 Hz~100 kHz，脉冲宽度范围 50~1000 ns，脉冲上升沿/下降沿时间范围 50~500 ns，实验中固定脉冲宽度为 1000 ns。放电在密闭的不锈钢反应器内进行，侧面留有石英玻璃观察窗。板-板 DBD 置于反应器装置的中心，高压电极和地电极为一对直径 50 mm、厚度 2 mm 表面光滑的不锈钢平行板电极，金属地电极上覆盖直径 80 mm、厚度 2 mm 的石英玻璃为阻挡介质，气隙为 1.5 mm，温度为 25 ℃。

外施电压和总电流分别由 Tek 6015A 高压探头(衰减比 1000:1)和 Pearson Electronics Inc. 2877 电流线圈测量，在接地端的回路中串联 2.2 nF 的测量电容 C_r，其两端电压由 LDP-6002 差分探头测得，用于后续电学微观参量分析。利用 Tek 3054 的数字示波器采集存储电压、电流波形。Canon EOS 6D 数码相机用于拍摄放电图像，曝光时间 1/100 s 研究放电宏观均匀性，这是因为在实际应用中一般需要一定

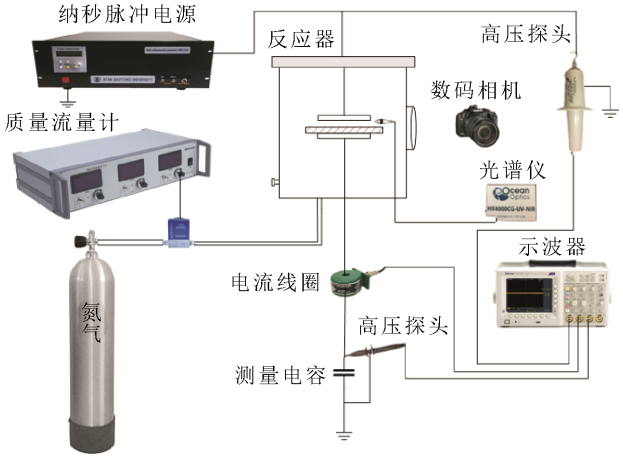


图 1 实验装置及测量系统图

Fig.1 Experimental device and measurement system diagram

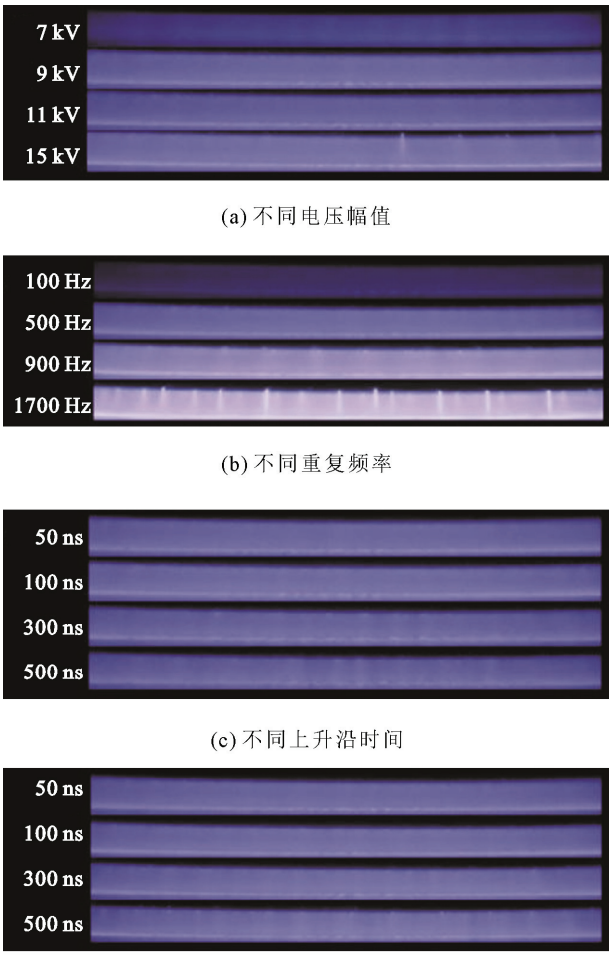
处理时间，1/100 s 的均匀性对实际应用已具有重要参考价值。实验中电源频率变化范围在100~1700 Hz，曝光时间为 1/100 s 的条件下，其放电叠加次数较少，也可以较好反应放电总体均匀性。发射光谱由 Ocean Optics HR4000CG-UV 光谱仪(波长范围 200~1100 nm；分辨率 0.75 nm)采集。实验前先将反应器抽至极限真空度(5 Pa)，随后由 Sevenstar D08-4F 质量流量计控制 1 L/min 的体积流量充入工作气体氮气(纯度 99.99%)，保持反应器内气压为 0.1 MPA。

2 放电均匀性及电气特性

本文利用纳秒脉冲电源激励氮气 DBD，实验采用控制变量法，改变电压幅值时，固定重复频率为 500 Hz，上升/下降沿时间为 50/50 ns；改变重复频率时，固定电压幅值为 10 kV，上升和下降沿时间均设为 50/50 ns；改变上升或下降沿时间时，固定电压幅值为 10 kV，重复频率为 500 Hz。

图 2 为平行于电极和阻挡介质的侧面拍摄的不同纳秒脉冲参数下的氮气 DBD 放电图像。由图可见，不同参数对纳秒脉冲氮气 DBD 放电均匀性的影响具有不同规律。随着电压幅值或重复频率的增加，氮气 DBD 放电均呈现不均匀到均匀再到不均匀的变化规律。在电压幅值为 7~8 kV 时，观测到放电未充满整个放电空间且有放电细丝。增加电压至 9~11 kV，放电区域显著增大，无肉眼可见细丝，放电均匀性较好。进一步增加电压至 15 kV 时，放电间隙中产生明亮的流注放电通道，放电均匀性下降。当重复频率增加时，放电图像变化规律与电压变化时类似，即重复频率小于 300 Hz 时，放电强度弱，放电状态不稳定。随着重复频率增加，放电发光强度提升，均匀性得到优化。当重复频率大于 900 Hz 时，空间残留电荷密度增加，电场畸变严重，放电时易沿前一次放电通道发生，放电间隙出现明亮的流注放电细丝，放电呈现不均匀状态且均匀性逐渐变差。

增大脉冲上升沿或下降沿时间会导致放电均匀性显著下降。脉冲上升沿时间的改变比脉冲下降沿时间的改变对氮气 DBD 均匀性的影响更显著。固定脉冲下降沿时间为 50 ns，脉冲上升沿时间为 50 ns 时，放电空间无肉眼可见细丝，放电均匀性好。固定上升沿时间，在下降沿时间为 50~100 ns 范围内，放电呈现均匀状态。增加脉冲上升或下降沿时间，放电空间中细丝数目逐渐增加，放电强度显著减弱，均匀性迅速下降。



(a) 不同电压幅值

(b) 不同重复频率

(c) 不同上升沿时间

(d) 不同下降沿时间

图 2 不同纳秒脉冲参数下氮气 DBD 放电图像

Fig.2 Discharge images of N_2 DBD with different nanosecond pulse parameters

虽然放电图像从宏观层面表征了不同条件下放电状态的差异性，但是肉眼观测的结果无法形成统一的标准，为了量化放电均匀性，相关学者通过傅立叶变换[19]、Hilbert-Huang 变换[20]、小波变换[21]、灰度直方图[22]等图像处理方法对放电图像进行处理，分析放电均匀性变化。文献[8,23]采用 GVSD 对图像进行诊断和定量分析。为防止放电图像边缘处的干扰，提取放电有效区域并进行灰度化处理，以中心线处像素点的灰度值为参考，采用下式进行标准化处理：

$$\bar{x}_n = \frac{x_n - x_m}{v} \tag{1}$$

式中：$\bar{x}_n$ 为零均值标准化像素值；x_n 为有效放电中间线的灰度参考像素值，对 x_n 求平均得到 x_m；v为

所有像素点灰度值的方差。为反映相邻像素点处的灰度值变化率，对 $\bar{x}_n$ 进行梯度化得到 $\bar{x}_n'$，求取其标准差(即 GVSD 值)量化放电均匀性，定义 GVSD 值小于 1 为均匀放电。

图 3 为采用上述方法得到的不同脉冲参数下氮气 DBD 放电图像的 GVSD 值变化曲线。由图可见，随着电压幅值或者重复频率的增加，GVSD 曲线呈现先下降后上升的趋势，在电压幅值 9~11 kV，重复频率 300~900 Hz 的范围内，GVSD 均小于 1，放电呈现均匀状态。为了进一步探究不同重复频率和电压幅值范围下放电模式的变化规律，通过 GVSD 定量分析不同重复频率下氮气 DBD 随电压幅值变化的放电图像，得到了氮气 DBD 放电模式随重复频率和电压幅值变化的分布图，如图 4 所示。可见在频率较低时，氮气 DBD 实现均匀放电模式所需要施加的电压幅值范围更大，但同时所需放电电压值更高。当上升沿时间为 50 ns 时，或者下降沿时间为 50~100 ns 范围内，GVSD 小于 1，表明此时放电均匀。增加脉冲上升和下降沿时间至 500 ns 时，二者的 GVSD 值均逐渐增加，分别增大到 3.29 和 2.43，表明放电均匀性逐渐下降，这与放电图像的观察结果一致。

通过放电图像和 GVSD 分析可见，调控纳秒脉冲参数造成了 DBD 中微观粒子含量、分布和空间电场的变化，这不仅影响放电均匀性，还会导致电学特性的变化。由本课题组之前采用在地电极处串联采样电容的方法进行电压分离[8,23]，DBD 等效电路如图 5 所示。

对于 DBD 结构，外加电压 U_t 施加在气隙和阻挡介质层上，分别为 U_g 和 U_d，测量电流 I_t 为总电流，是气隙传导电流 I_g 和位移电流 I_d 之和。由于阻挡介质和采样电容 C_r 均为容性负载，拥有相同电压波形，所以 U_m 和 U_d 相差 k 倍，k 值可由放电熄灭时刻(U_g 接近 0)的 U_m 拟合 U_t 确定，电压波形分离过程如图 6(a)所示。在相同的外加电压下，I_t 可由电流线圈测得，减去未放电的位移电流 I_d，即可得到 I_g，图 6(b)为电流波形分离图。

由图 6 可以看出，在 U_g 达到气隙击穿电压之前，无放电产生，此时电流线圈测得位移电流 I_d。当 U_g 达到击穿电压时，气隙出现主放电，此时电流迅速增大并观测到气隙传导电流 I_g，阻挡介质上累积电荷导致 U_d 迅速增大，与 U_t 近乎重合，U_g 急剧下降至 0。而在下降沿阶段，由于阻挡介质表面的

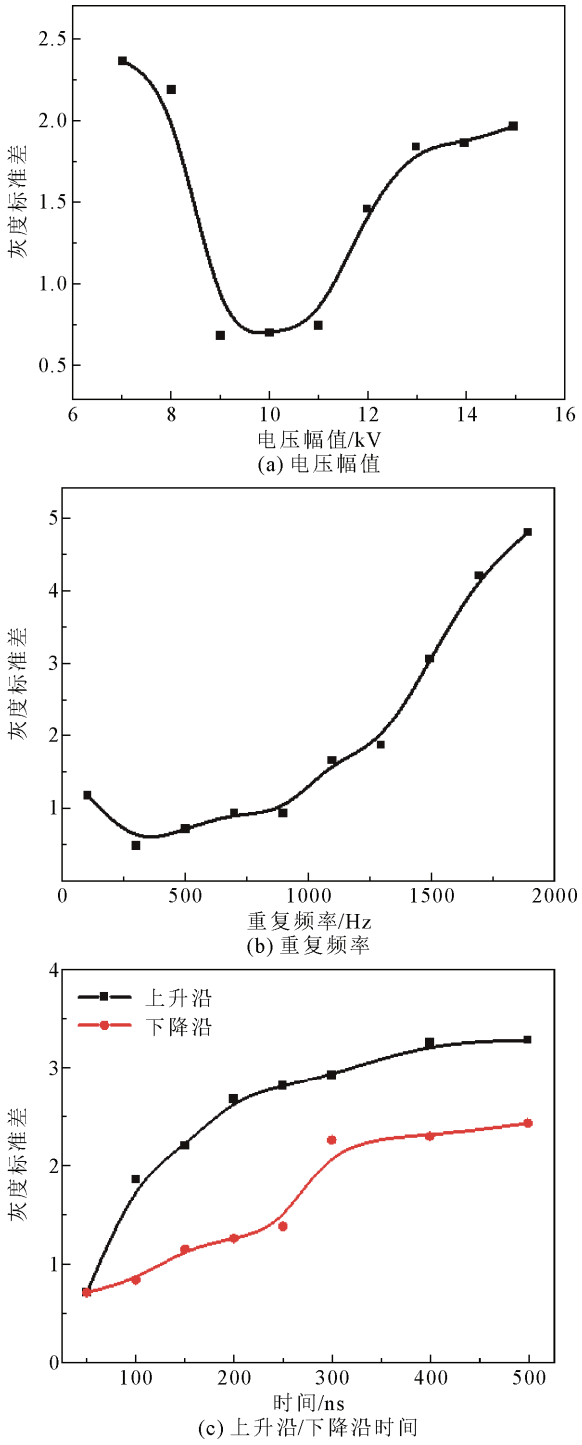


图 3 不同纳秒脉冲参数下氮气 DBD 灰度偏差值

Fig.3 Gray deviation value curve of N_2 DBD under different nanosecond pulse parameters

电荷累积效应，U_d 幅值下降较慢，维持在较高电压，U_g 出现反向脉冲，在增大到击穿电压时，气隙发生反向放电，此时 I_g 出现反向传导电流。

图 7 显示了不同脉冲参数下脉冲上升沿和下降沿阶段气隙电压峰值 U_g 和气隙传导电流峰值 I_g 的变化。从图中可以看出，随着外加电压幅值从 7 kV

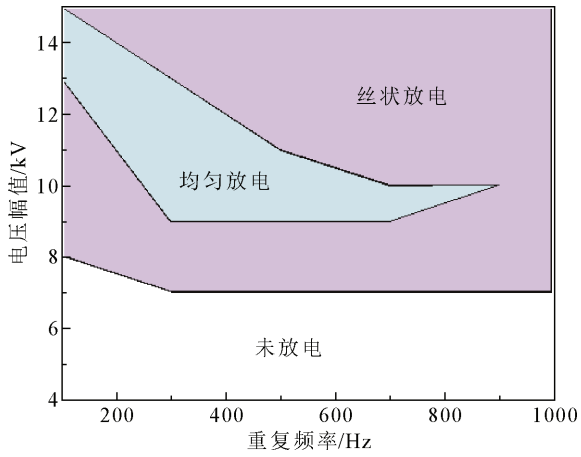


图 4　不同电压幅值和重复频率下氮气 DBD 的放电模式

Fig.4　Discharge modes of N_2 DBD under different voltage amplitude and repetition frequency

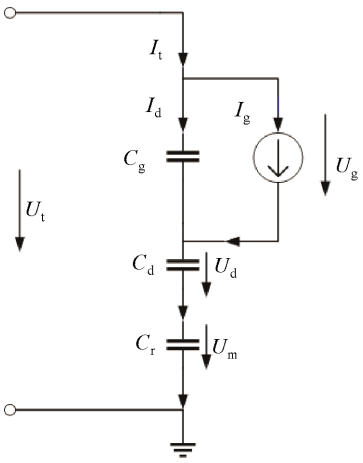


图 5　DBD 等效电路

Fig.5　Equivalent electrical circuit of DBD

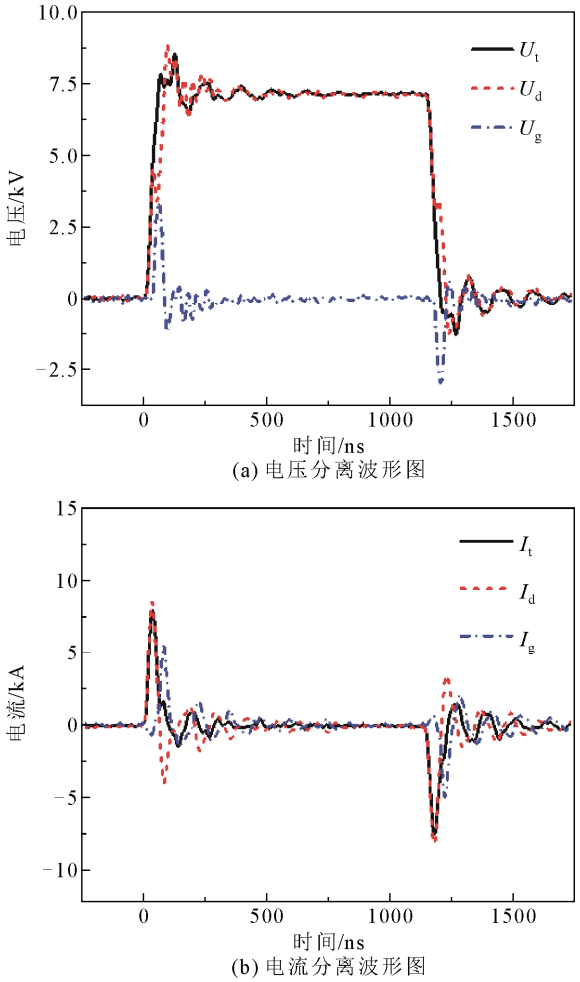


图 6　氮气 DBD 电压和电流分离波形图

Fig.6　Waveform of voltage and current separation of N_2 DBD

增加至 15 kV，脉冲上升沿和下降沿阶段的 U_g、I_g 均呈现递增趋势。上升沿的 U_g 从 3.56 kV 上升至 6.54 kV，下降沿的 U_g 从 2.91 kV 上升至 5.18 kV，上升沿的 I_g 从 6 A 上升至 15.8 A，下降沿的 I_g 从 5 A 上升至 12.6 A。外加电压增加导致气体间隙的电场强度不断增强，电离效率增加，放电空间中产生更多带电粒子，且带电粒子在二次碰撞中会获得更多能量，导致碰撞后电子雪崩的融合，优化放电均匀性。但是当电压幅值进一步提高，高能带电粒子分布不均，引起空间电场畸变，产生多个明亮的放电细丝，引起均匀性下降。重复频率增大导致单个周期内上升沿阶段的 U_g 峰值从 4.96 kV 降至 4.05 kV，对下降沿的 U_g 峰值以及两次放电的 I_g 峰值影响较小。这主要是增大重复频率后，受前一个脉冲周期中残留粒子记忆效应的影响，带电粒子复合、猝灭和耗散的时间缩短，没有足够的时间扩散而形成局部增强的电场，加速电子雪崩的过程，利于形成流注通道，导致放电沿着前一次导电通道发生，放电均匀性恶化。脉冲上升沿或下降沿时间的增加导致对应的脉冲上升沿或下降沿的气隙电压电流峰值出现递减趋势。这是因为增加上升沿时间，电压上升速率降低，U_g 峰值下降，电子获取的能量变少，电子漂移速度下降，一次放电强度减弱，引起各电气参量的下降。同时，带电粒子在放电空间中的分布状态受到影响，不利于电子雪崩通道融合，降低了放电均匀性。而在固定上升沿时间时，脉冲下降沿时间的延长，使得放电空间中的带电粒子有足够的时间进行复合和耗散，反向电流峰值 I_g 减小，进而引起放电强度的降低，介质表面累积电荷难以同时放电，放电均匀性下降。

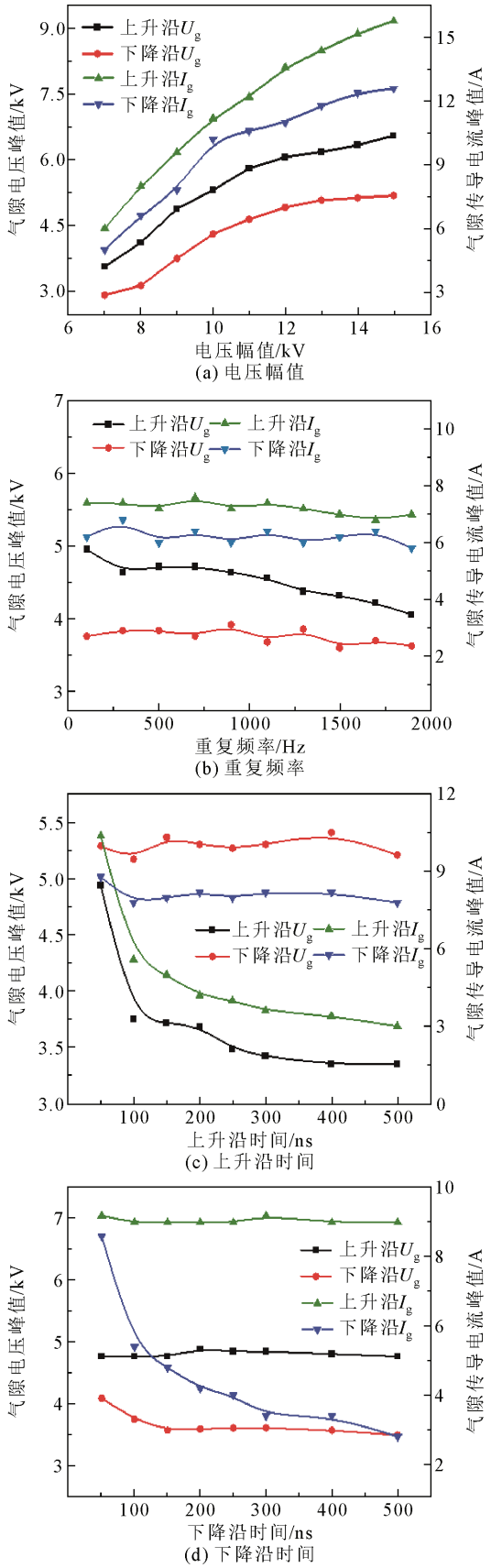


图 7　气隙电压峰值和气隙传导电流峰值随不同纳秒脉冲参数的变化趋势

Fig.7　Variation curve of peak gap voltage and peak gap conduction current with different nanosecond pulse parameters

图 8 给出了脉冲参数改变时平均功率和能量效率的变化曲线。可以看出，随着电压幅值或重复频率的增加，$\overline{P}_t$、$\overline{P}_g$和$\overline{P}_d$均呈现递增趋势，其中$\overline{P}_d$上升速率较缓。这表明外加电压或重复频率上升后，较大比例的功率施加在气隙上且放电强度不断增强，能量效率η曲线呈上升趋势。然而增加脉冲上升/下降沿时间，$\overline{P}_t$、$\overline{P}_g$和$\overline{P}_d$均呈现下降趋势，η分别下降到 59.93 %和 60.97 %，从图中曲线变化幅度可以得知，当脉冲上升沿时间变化较小时，其对能量效率的影响比脉冲下降沿时间发生改变时的影响更显著。

3　发射光谱特性

采用发射光谱法可以深入了解反应过程中活性粒子种类和相对含量的变化，有助于揭示 DBD 中的化学反应机理。本文利用光谱仪测量纳秒脉冲氮气 DBD 发射光谱，图 9 显示了纳秒脉冲氮气 DBD 在电压 15 kV 下的典型发射光谱图。从图 9 可以看出，大气压下氮气 DBD 均匀放电时的主要粒子谱线为 N_2 第二正带系谱线、N_2^+第一负带系谱线，此外还包括反应器中残留的杂质分子生成的 NO 的γ系谱线和 OH 谱线(308.8 nm)。高能电子和氮分子碰撞激发电离，使得放电空间产生 $N_2(C^3\Pi_u)$、$N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$、亚稳态 N_2^m 以及大量电子，主要反应过程如下[6,17,24]：

$$e+N_2(X^1\Sigma_g^+)\rightarrow N_2(C^3\Pi_u)+e \quad (2)$$

$$e+N_2(X^1\Sigma_g^+)\rightarrow N_2^+(B^2\Sigma_u^+)+2e \quad (3)$$

$$e+N_2(X^1\Sigma_g^+)\rightarrow N_2^m+e \quad (4)$$

调控电压幅值、重复频率、上升沿时间和下降沿时间，测量得到图 10 所示的氮气 DBD 发射光谱峰值在不同脉冲参数下的变化曲线。从图中可以看出：随着电压幅值或重复频率的增加，氮气 DBD 发射光谱中各粒子谱线强度均呈上升趋势，以波长为 337.1 nm 的 N_2 谱线为例，其谱线强度分别上升了 1.64 倍和 17.14 倍。增加脉冲上升沿/下降沿时间，各粒子谱线强度下降，且在 50~100 ns 范围内的降幅最明显。

纳秒脉冲参数的变化不会影响氮气 DBD 主要粒子谱线的种类，但是对发射谱线强度具有一定影响，这是由电子能量分布变化而导致的结果。空间约化场强 E/N 的变化影响着放电过程中的放电均匀性和微观放电，因此本文通过发射光谱强度比值法

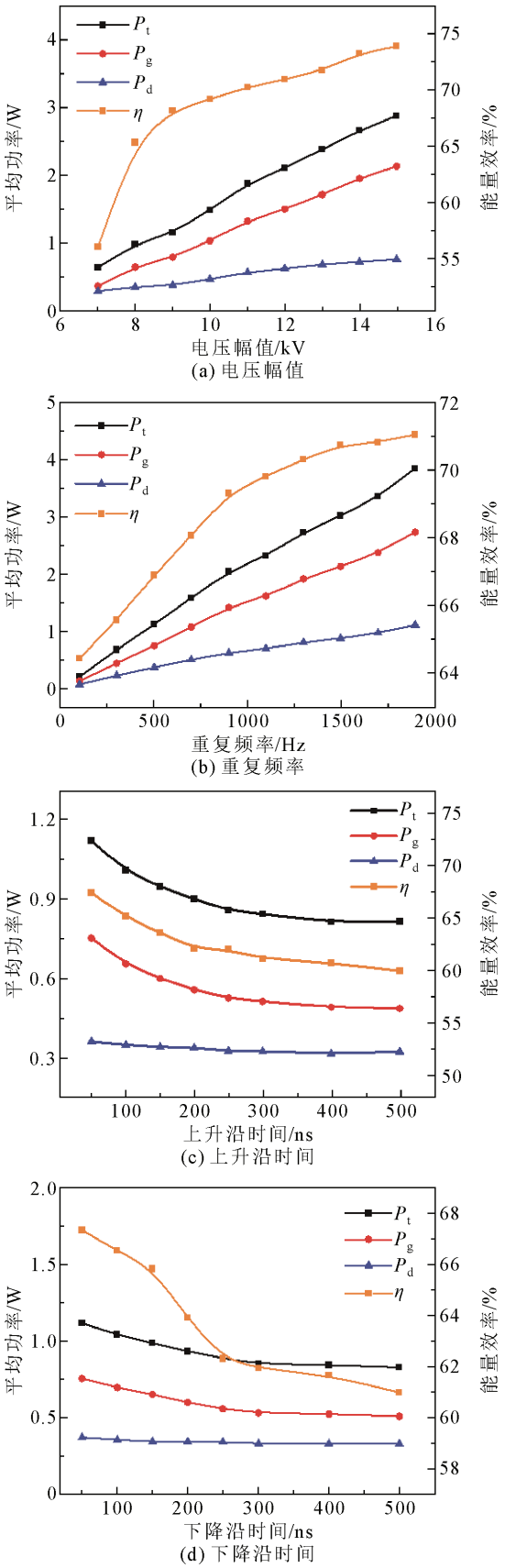


图 8 平均功率和能量效率随不同纳秒脉冲参数变化趋势

Fig.8 Variations of averaged power and energy efficiency with different nanosecond pulse parameters

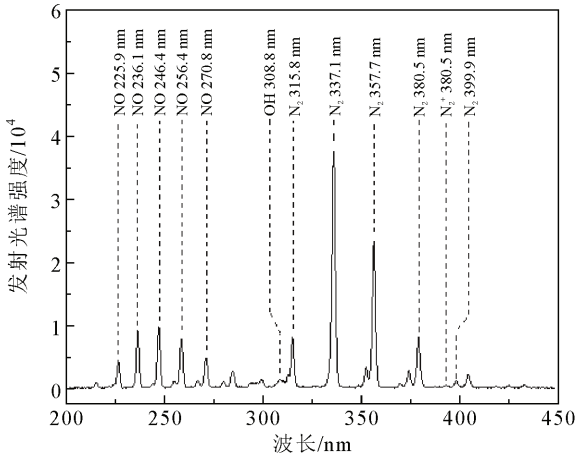


图 9 氮气 DBD 的典型发射光谱图

Fig.9 Typical emission spectrum of N_2 DBD

分析 E/N 的变化规律[6,23,25]。由式(5)计算双原子分子带系发射光谱中的谱带强度[26]：

$$I(v'v'') = K_{\mathrm{CB}}(\lambda)\frac{N_v A(v'v'')}{\lambda} \tag{5}$$

式中：v'、v''分别为高、低振动能级；$K_{\mathrm{CB}}(\lambda)$、A、λ分别为光学测量系统的光谱响应、爱因斯坦系数和波长；N_v为高能级的粒子数密度。通常采用 N_2 分子的第二正带系(second positive system, SPS)谱线强度($I_{\mathrm{N_2}}$)与电离分子 N_2^+的第一负带系(first negative system, FNS)谱线强度($I_{\mathrm{N_2^+}}$)进行比较，通过式(6)计算谱线强度比值，可用于表征 E/N 变化趋势[24,27]。

$$\frac{I_{\mathrm{N_2^+}}}{I_{\mathrm{N_2}}} = \frac{Q_{\mathrm{N_2^+(B)}}\cdot k_{\mathrm{N_2^+(B)}}\cdot n_{\mathrm{N_2}}\cdot n_{\mathrm{e}}}{Q_{\mathrm{N_2(C)}}\cdot k_{\mathrm{N_2(C)}}\cdot n_{\mathrm{N_2}}\cdot n_{\mathrm{e}}} = \frac{Q_{\mathrm{N_2^+(B)}}\cdot k_{\mathrm{N_2^+(B)}}}{Q_{\mathrm{N_2(C)}}\cdot k_{\mathrm{N_2(C)}}} = f(E/N) \tag{6}$$

式中：$Q_{\mathrm{N_2(C)}}$和$Q_{\mathrm{N_2^+(B)}}$分别为氮分子激发态及氮分子离子激发态粒子电子碰撞截面；$k_{\mathrm{N_2(C)}}$和$k_{\mathrm{N_2^+(B)}}$分别为电子与基态氮分子发生非弹性碰撞产生氮分子激发态和氮分子离子激发态的反应速率常数；$n_{\mathrm{N_2}}$和n_{e}分别为氮分子数密度和电子数密度。

本文选择 N_2^+(391.4 nm)和 N_2(380.5 nm)[24,26]两条电子激发能相差约 7.7 eV(分别为 11.0 eV 和 18.7 eV)[6,24]的独立谱线。图 10 显示不同脉冲参数下 N_2(380.5 nm)和 N_2^+(391.4 nm)谱线强度比值的变化曲线。可以看出，随着电压增至 15 kV，N_2^+与 N_2 光谱强度比值上升 31.37 %。这是由于电压幅值的增加使放电区域注入更多能量，使得更多的氮分子被碰撞激发，电离效率增大，进而导致各粒子发

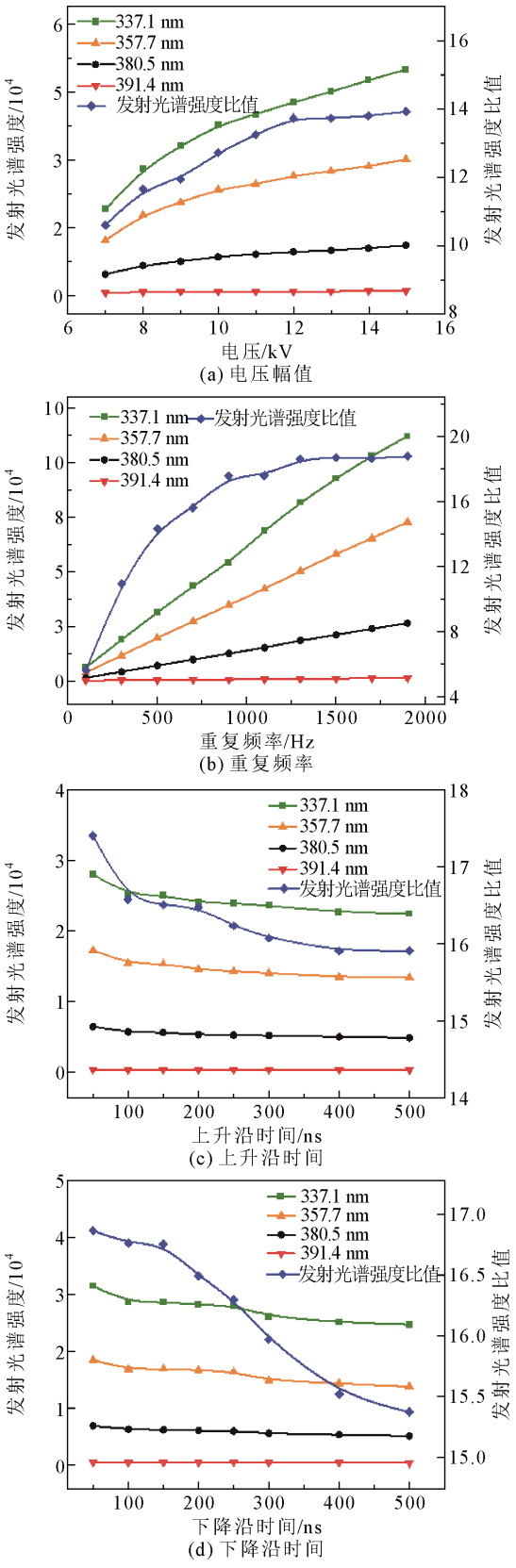


图 10　不同纳秒脉冲参数下主要粒子发射光谱强度及 N_2(380.5 nm)和 N_2^+(391.4 nm)光谱强度的比值

Fig.10　Emission spectral intensity of main particles and intensity ratio of N_2(380.5 nm) to N_2^+(391.4 nm) under different nanosecond pulse parameters

射强度上升，*E*/*N* 不断增大。随着重复频率的增加，N_2^+与 N_2 谱线比值先升高后趋于平稳，表明 *E*/*N* 先上升后保持稳定。这是因为增大脉冲重复频率，单位时间内放电次数增加，带电粒子的淬灭时间更短，亚稳态粒子之间的潘宁电离增强，导致 *E*/*N* 升高；当重复频率超过 1300 Hz 时，放电过程中碰撞电离所产生的氮分子正离子使得比值趋于平缓，因此 T_e 变化不大。N_2(380.5 nm)和 N_2^+(391.4 nm)谱线比值随脉冲上升沿或脉冲下降沿时间的增加，均呈现递减趋势。增大上升沿时间，电压上升速率变缓，电子所获能量减少，放电空间中高能电子与分子间碰撞电离速率降低，导致各粒子发射光谱强度、*E*/*N* 减弱。下降沿时间增加使得介质表面沉积电荷释放速率下降，带电粒子的复合和耗散程度增大，放电强度减弱，*E*/*N* 呈下降趋势。

4　结论

1）电压幅值上升，放电间隙注入能量增加，大气压氮气 DBD 放电均呈现不均匀到均匀再到不均匀的变化规律，间隙电压电流峰值、平均功率、能量效率、谱线强度和 *E*/*N* 均显著增加。

2）重复频率增加影响单位时间内放电次数，单个分子的平均输入能量增加，导致击穿电压降低，有利于实现均匀放电，气隙电压峰值下降，平均功率、能量效率、发射光谱强度和 *E*/*N* 增强。

3）增加上升沿时间导致击穿电压峰值降低，上升沿阶段的 U_g 下降。下降沿时间增加，电极上电压变化率降低，影响介质层累积电荷放电同步性。增加上升沿或下降沿时间均导致放电均匀性、平均功率、能量效率、谱线强度和 *E*/*N* 下降。

参考文献　References

[1] MANSUROGLU D, UZUN-KAYMAK I U. Argon and nitrogen plasma modified polypropylene: surface characterization along with the optical emission results[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 358: 551-559.

[2] 陈　雾，时亚琴，梅丹华，等. 不同气体成分添加对氮气滑动弧放电模式及特性的影响[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3794-3803.
CHEN Ji, SHI Yaqin, MEI Danhua, et al. Effects of different gas compositions on the mode and characteristics of nitrogen gliding arc discharge[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3794-3803.

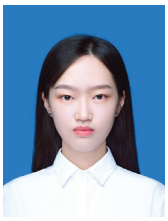
[3] XI W, WANG W, LIU Z J, et al. Mode transition of air surface micro-discharge and its effect on the water activation and antibacterial activity[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(9): 095013.

[4] 商克峰，王美威，鲁　娜，等. 沿面/体介质阻挡放电装置的放电及臭氧生成特性[J]. 高电压技术，2021，47(1)：353-359.
SHANG Kefeng, WANG Meiwei, LU Na, et al. Discharge characteristics and ozone generation of surface/volume hybrid dielectric barrier discharge devices[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 353-359.

[5] 储海靖，刘 峰，庄 越，等. 水蒸气添加对纳秒脉冲激励氩气DBD放电特性的影响[J]. 高电压技术，2021，47(3)：885-893.
CHU Haijing, LIU Feng, ZHUANG Yue, et al. Influence of H_2O addition on discharge characteristics of nanosecond pulsed Ar dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 885-893.
[6] ZHANG S, WANG W C, YANG D Z, et al. Nanosecond pulsed uniform dielectric barrier discharge in atmospheric air: a brief spectroscopic analysis[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2019, 207: 294-300.
[7] MORITZ S, SCHMIDT A, SANN J, et al. Surface modifications caused by cold atmospheric plasma sterilization treatment[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(32): 325203.
[8] 赵昱雷，刘 峰，庄 越，等. 纳秒脉冲电压变化速率对氩气DBD均匀性的影响[J]. 高电压技术，2022，48(6)：2317-2325.
ZHAO Yulei, LIU Feng, ZHUANG Yue, et al. Influence of nanosecond pulse voltage slew rates on the uniformity of argon DBD[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2317-2325.
[9] ZHANG L, YANG D Z, WANG W C, et al. Needle-array to plate DBD plasma using sine AC and nanosecond pulse excitations for purpose of improving indoor air quality[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 2542.
[10] LIU Z Y, XU J G, ZHU X, et al. Study on discharge characteristics and improving surface hydrophobicity of epoxy resin by nanosecond pulse excited argon/hexamethyldisiloxane jet array[J]. High Voltage, 2022, 7(4): 771-781.
[11] MEI D H, ZHANG P, DUAN G H, et al. CH_4 reforming with CO_2 using a nanosecond pulsed dielectric barrier discharge plasma[J]. Journal of CO_2 Utilization, 2022, 62: 102073.
[12] POURALI N, SARAFRAZ M M, HESSEL V, et al. Simulation study of a pulsed DBD with an electrode containing charge injector parts[J]. Physics of Plasmas, 2021, 28(1): 013502.
[13] XU S D, WU Y, SONG F L, et al. Experimental investigation on DBD plasma reforming hydrocarbon blends[J]. Plasma Science and Technology, 2021, 23(8): 085509.
[14] CHEN K, WEI C Y, SHI Z W. Effect of NS-DBD actuator parameters on the aerodynamic performance of a flap lifting device[J]. Applied Sciences, 2019, 9(23): 5213.
[15] LIU C, DOBRYNIN D, FRIDMAN A. Uniform and non-uniform modes of nanosecond-pulsed dielectric barrier discharge in atmospheric air: fast imaging and spectroscopic measurements of electric fields[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(25): 252003.
[16] ZHAO Z, LI J T. Repetitively pulsed gas discharges: memory effect and discharge mode transition[J]. High Voltage, 2020, 5(5): 569-582.
[17] FAN R, WANG Y G, ZHANG X N, et al. The regulation of memory effect and its influence on discharge properties of a dielectric barrier discharge driven by bipolar pulse at atmospheric-pressure nitrogen[J]. Plasma Science and Technology, 2021, 23(10): 105401.
[18] 陈 杰，梁 华，魏 彪，等. 参数化纳秒脉冲电源激励下表面介质阻挡放电特性[J]. 高电压技术，2019，45(10)：3365-3374.
CHEN Jie, LIANG Hua, WEI Biao, et al. Discharge characteristics of surface dielectric barrier discharge driven by parameterized nanosecond pulsed power supply[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3365-3374.
[19] FARES K, AMINE K, SALAH E. A robust blind color image watermarking based on Fourier transform domain[J]. Optik, 2020, 208: 164562.
[20] OST A P, NEUMEISTER R F, MÖLLER S V. Analysis of wake velocities and pressure fluctuations in a bistable flow using Hilbert–Huang transform and wavelets[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2021, 43(2): 65.
[21] MUTHUKRISHNAN A, KUMAR J C R, KUMAR D V, et al. Internet of image things-discrete wavelet transform and Gabor wavelet transform based image enhancement resolution technique for IoT satellite applications[J]. Cognitive Systems Research, 2019, 57: 46-53.
[22] HEIDARI S, ABUTALIB M M, ALKHAMBASHI M, et al. A new general model for quantum image histogram (QIH)[J]. Quantum Information Processing, 2019, 18(6): 175.
[23] LIU F, ZHUANG Y, ZHAO Y L, et al. Effects of O_2 addition on the plasma uniformity and reactivity of Ar DBD excited by ns pulsed and AC power supplies[J]. Plasma Science and Technology, 2022, 24(5): 054004.
[24] WU Y, LI Y H, JIA M, et al. Experimental investigation into characteristics of plasma aerodynamic actuation generated by dielectric barrier discharge[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(1): 39-45.
[25] LIU C, FRIDMAN A, DOBRYNIN D. Investigation of the transition from streamer to uniform 'overvoltage' mode of atmospheric air nanosecond-pulsed dielectric barrier discharge[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(10): 105205.
[26] QAYYUM A, DEEBA F, AHMAD S, et al. Optical emission and Langmuir probe diagnostic measurements in DC electrode pulse discharge in nitrogen[J]. High Temperature, 2019, 57(6): 821-831.
[27] KOGELHEIDE F, OFFERHAUS B, BIBINOV N, et al. Characterisation of volume and surface dielectric barrier discharges in N_2–O_2 mixtures using optical emission spectroscopy[J]. Plasma Processes and Polymers, 2020, 17(6): 1900126.



李梦遥
1998—，女，硕士生
研究方向为大气压纳秒脉冲介质阻挡放电特性诊断与应用
E-mail: ylldmhlz@163.com
LI Mengyao



王歆昀
2002—，女
研究方向为大气压纳秒脉冲介质阻挡放电特性诊断与应用
E-mail: Eliauk_wxy@163.com
WANG Xinyun



赵昱雷
1998—，男，硕士生
研究方向为大气压纳秒脉冲介质阻挡放电特性诊断与应用
E-mail: rayzhaocr7@163.com
ZHAO Yulei



刘 峰(通信作者)
1981—，男，博士，教授，硕导
研究方向为等离子体诊断、低温等离子体应用研究，近年来，在国内外重要学术期刊发表论文 50 余篇
E-mail: f.liu_1@hotmail.com
LIU Feng
Ph.D., Professor
Corresponding author



方 志
1975—，男，博士，教授，博导
近年来一直从事高电压绝缘及气体放电等离子体基本理论及其用于材料表面改性研究工作，在国内外重要学术期刊上共发表论文 110 余篇，主持国家和省部级项目 10 余项
E-mail: myfz@263.net
FANG Zhi
Ph.D., Professor

收稿日期 2022-12-20 修回日期 2023-04-13 编辑 曹昭君