

文章编号: 1000-7032(2018)03-0349-07

锯齿波激励氩气介质阻挡放电的发光特性

李雪辰, 吴凯玥, 张琦, 楚婧娣, 王彪, 贾鹏英*

(河北大学物理科学与技术学院 河北省光电信息材料重点实验室, 河北保定 071002)

摘要: 采用平行平板结构的微间隙介质阻挡放电装置, 在锯齿波电压激励下产生了电流波形具有平台状的阶梯模式放电。研究发现, 随锯齿波电压峰值的增大, 放电平台的持续时间和幅值随之增加。采用光学方法对单个放电平台的时间演化进行研究, 发现其放电机制属于大气压汤森放电。通过对放电的发射光谱进行采集, 发现包含氮分子的第二正带系($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_u$)、OH($A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$)和 Ar I 的特征谱线。随锯齿波电压峰值的增大, OH(308.8 nm)谱线强度和分子振动温度增加, 但电子激发温度减小。通过对 Ar I(750.4 nm)强度进行比较, 发现相同峰值电压下锯齿波激励介质阻挡放电比正弦激励介质阻挡放电产生的谱线强度更大。利用气体放电理论, 对上述物理现象进行了定性解释。

关键词: 发射光谱; 时间演化; 介质阻挡放电; 汤森放电; 分子振动温度; 电子激发温度

中图分类号: O432.1; O461.2⁺1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/fgxb20183903.0349

Optical Characteristics of Saw-tooth Voltage Excited Dielectric Barrier Discharge in Argon

LI Xue-chen, WU Kai-yue, ZHANG Qi, CHU Jing-di, WANG Biao, JIA Peng-ying*

(Key Laboratory of Photo-Electronics Information Materials of Hebei Province, College of Physical Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

* Corresponding Author, E-mail: plasmalab@126.com

Abstract: A micro-gap dielectric barrier discharge device in a parallel plate geometry is excited by a saw-tooth voltage to produce a stepped discharge, whose current waveform presents a plateau every half voltage cycle. It is found that the duration and amplitude of the discharge plateau increase with the increasing of the peak value of the applied saw-tooth voltage. The temporal evolution in the discharge plateau is investigated through optical method. It is confirmed that the stepped discharge is in an atmospheric Townsend discharge regime. Scanning the optical emission spectrum from the discharge, it is found that the spectrum is composed of the second positive system of nitrogen molecule ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_u$), OH ($A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$) and Ar I. With the increasing of the peak value of the applied saw-tooth voltage, it increases for the spectral intensity of OH (308.8 nm) and the molecular vibrational temperature, while the excited electron temperature decreases. By comparing the spectral line intensity of Ar I(750.4 nm), it is found that the spectral line intensity produced by saw-tooth wave excited dielectric barrier discharge is larger than that of sine wave excited dielectric barrier discharge under the same peak voltage. All of these physical phenomena mentioned above are analyzed qualitatively by gas discharge mechanism.

收稿日期: 2017-06-25; 修订日期: 2017-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(11575050); 河北省自然科学基金(A2015201092, A2015201199, A2016201042); 河北省三三三人才经费(A2016005005); 河北省百优人才支持计划(SLRC2017021)资助项目
Supported by National Natural Science Foundation of China (11575050); Natural Science Foundation of Hebei Province (A2015201092, A2015201199, A2016201042); 333 Talents Fund of Hebei Province (A2016005005); 100 Talents Support Plan of Hebei Province (SLRC2017021)

Key words: optical emission spectrum; temporal evolution; dielectric barrier discharge; townsend discharge; molecular vibration temperature; electron excited temperature

1 引 言

大气压放电产生的多种活性粒子在众多领域中具有广泛的应用前景。例如,在工业领域可用于材料的表面处理^[1]、臭氧合成^[2]及污染物处理^[3]等,在生物医疗领域可用于杀菌消毒^[4]等。因此,大气压气体放电产生的非平衡态低温等离子体受到了大量关注。

大气压非平衡等离子体最常用的产生方法是介质阻挡放电(DBD)。它的特点是有绝缘介质插入电极之间。对于不同的气体种类、电压幅值和驱动频率,DBD从放电形貌上可分为随机丝、斑图和均匀放电3种形式^[5]。相比较而言,大气压均匀DBD对工业应用(特别是材料处理等应用)尤为重要。关于均匀DBD的研究,早在1988年,Okazaki等就在大气压氦气中得到了均匀放电^[6]。进一步的研究发现,均匀放电从放电机制上划分可分为两种:大气压辉光放电(APGD)和大气压汤森放电(APTD)^[7]。在APTD中,电场是均匀分布的;而在APGD中,电场会在阴极附近达到最大值,形成阴极位降区。Massines等最先证实了氦气中均匀DBD的机制属于APGD^[8]。除了氦气,在其他工作气体如氮气、混合丙酮的氩气中也产生了均匀DBD^[9]。Trunec等最先获得了氩气中的均匀DBD,并研究了电压幅值、频率和气流对氩气DBD的影响^[10]。研究表明,氩气中的均匀DBD和氦气中类似,仍属于APGD机制^[11]。Brandenburg等也证实了氮气和氩气中的均匀放电属于APGD机制,并将该均匀放电的成因归功于低电场下存在的较高离化率^[12]。与稀有气体中的APGD不同,研究发现纯氮气中的DBD属于APTD^[9,13]。Osawa等发现除了氮气和空气,在较低驱动频率的情况下,氦气DBD也可以运行于APTD机制^[14]。除了驱动频率影响外,Bogaczyk等指出在放电气隙间距较小的情况下,得到的氦气DBD也属于APTD机制^[15]。

上述DBD都是正弦电压激励的,而非正弦电压激励的DBD与之在放电特征上有所不同。例如,采用纳秒脉冲激励空气DBD,可以产生均匀放电,随着气隙间距增大,该均匀放电转换为非均

匀的丝状放电^[16]。Yu等还发现纳秒脉冲激励DBD,电压的频率会影响放电的形貌^[17]。Ayman等对比研究不同外加电压波形对沿面DBD放电特性的影响,发现在正弦波和锯齿波驱动下放电呈丝状,而在脉冲和方波驱动下可以获得均匀放电^[18]。Bogaczyk等发现气隙间距为1 mm的氦气DBD,在正弦波激励时属于APTD机制,方波激励时属于APGD机制,而锯齿波激励时,在一个电压周期下放电机制由APTD转化为APGD。然而,他们仅通过放电电流和气隙电压来判定放电机制^[15]。此前,本小组采用数值模拟,研究了锯齿波激励小气隙间距的氦气DBD,获得了阶梯状放电,并发现其放电机制属于APTD^[19]。

针对于此,本文采用锯齿波激励微间隙氩气介质阻挡放电装置,实验上获得了具有放电平台的阶梯放电模式。通过ICCD对放电过程中的时间演化进行详细的研究,分析其放电形成机制。利用放电的发射光谱,对电子激发温度和分子振动温度进行了研究。

2 实验装置

实验装置如图1所示,两个圆柱形的水电极对称放置(内直径为28 mm),每个水电极上分别覆盖0.5 mm厚的石英介质板。两介质板之间的气隙间距固定为300 μm 。该放电装置被放置在开放的空气环境中。采用纯度为99.999%的氩气,以恒定流速 $Q=4.0\text{ L/min}$ 通入气隙中。其中一个水电极连接高压放大器(Trek 20/20C-HS),其输出端产生的锯齿波电压由相连的信号发生器(Tektronix AFG3052C)提供输入信号。另一个水电极接地。利用高压探头(Tektronix P6015A)对外加锯齿波电压进行测量。通过阳极与地之间串联小电阻($R=1\text{ k}\Omega$)上的分压,采用电压探头(Tektronix P6139A)来测量放电电流。外加电压和放电电流通过示波器(Tektronix DPO4104)同步进行显示和存储。利用光电倍增管(PMT)(ET 9085SB)来探测放电的发光信号。放电的发射光谱通过连接光纤探头并配置有CCD(PIXIS 400, $1\ 340\times 400\text{ pixels}$)的光谱仪(ACTON SP-2750)对其进行采集。利用ICCD(Andor DH334)研究放电的时间演化情况。

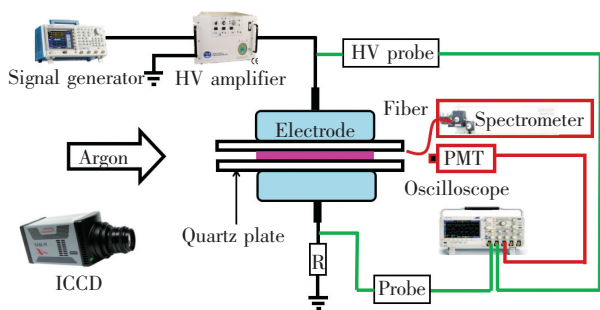


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

3 实验结果与分析

图 2 给出了不同锯齿波峰值 (U_p) 下外加电压和放电电流的波形图。放电电流是由全电流中扣除相应的位移电流得到的。当锯齿波频率为 0.3 kHz 时, 对应每半个电压周期放电电流均出现一个放电平台, 此时放电为阶梯放电。这与此前在数值模拟上得到的结果一致^[19]。对比通常得到的脉冲放电, 在低频率锯齿波驱动下形成的阶梯放电其放电平台能达到 ms 量级的时间尺度, 这明显高于脉冲放电产生的脉冲所能达到 μ s 量级的时间尺度^[20]。随 U_p 增加, 放电平台的持续时间和幅度随之增加。也就是说, 随 U_p 增加, 放电平台阶段的时间占整个锯齿波电压周期的比例(占空比)增加。由此可知, 在较低锯齿波频率下的 DBD 可通过增加 U_p 来得到具有高占空比的低温等离子体。并且在该频率下, 增加 U_p 放电仍然处在阶梯放电模式下。这表明, 锯齿波激励与正弦波激励的不同之处在于外加电压峰值并不是影响放电模式的决定性因素(低于 10 kV)。

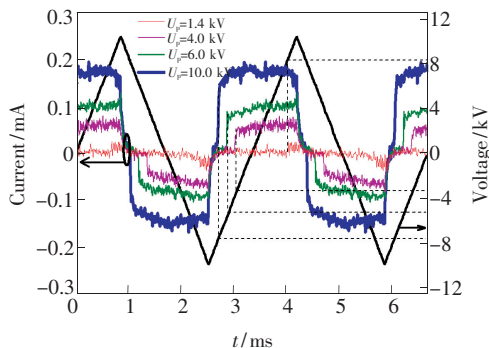


图 2 不同 U_p 下外加电压和放电电流的波形图, 频率 0.3 kHz。

Fig. 2 Waveforms of the applied voltage and the discharge current under different U_p at a frequency of 0.3 kHz

从图 2 还可以看出, 对于 $U_p = 1.4$ kV 时, 其正半周期的起始电压出现在正半周期的上升沿, 而随 U_p 的继续增加 ($U_p = 4.0, 6.0, 10.0$ kV), 其起始电压前移, 会在负半周期的下降沿出现, 起始电压值为负。这里提到的起始电压并不是电压的绝对值。因此, 起始电压值随 U_p 的增加而降低。产生这种现象的原因在于, 随 U_p 增加放电会产生越来越多的残余电荷并积累在介质板表面, 其产生的电场降低放电所需的外加电压, 从而使得放电的起始电压降低, 因此导致放电可能出现在电压的下降沿阶段^[21]。

为了研究阶梯放电的形成机制, 采用 ICCD 对单个放电平台的时间演化进行了拍摄, 如图 3 所示。其拍摄时刻已经在波形图中标注, 图中用实线和虚线分别表示瞬时阳极和瞬时阴极。在 (a) 时刻, 气隙中无放电。随时间延迟到 (b) 时刻, 能够在气隙中观察到微弱的发光。尽管放电很微弱, 但可分辨出发光强度是由瞬时阴极向瞬

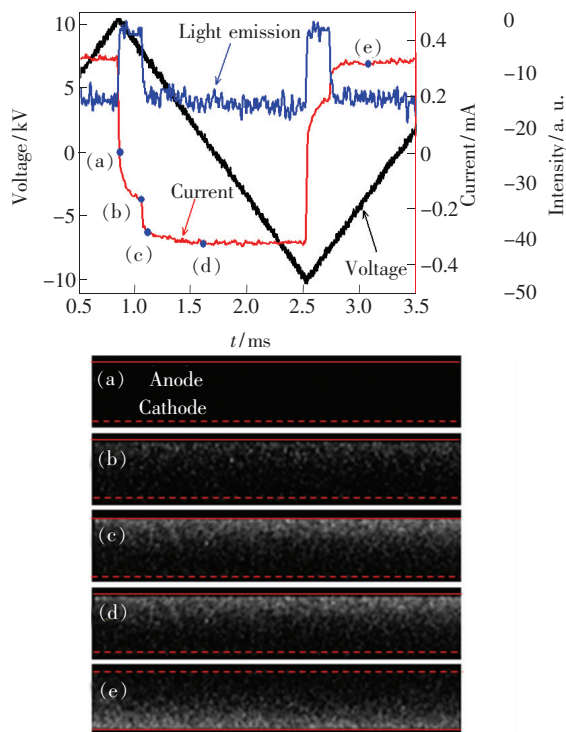


图 3 曝光时间 30 μ s 的 ICCD 拍摄阶梯放电的时间演化情况, 每张照片叠加 100 个周期。对应的时刻 (a) ~ (e) 由顶图显示, $U_p = 10$ kV。

Fig. 3 Temporal evolution of the stepped discharge captured by the ICCD with an exposure time of 30 μ s, which every image is an accumulation of 100 shots. Time moments (a) - (e) correspond to those shown in the top figure, $U_p = 10$ kV.

时阳极逐渐增强的。相比于(b)时刻,(c)时刻的发光强度增大。而在整个放电平台阶段,发光的区域和强度保持不变,如图 3(c)和(d)所示。在(e)时刻,放电装置的上电极和下电极的极性出现反转,因此此时最大发光强度仍靠近瞬时阳极附近。

在较低频率下,放电的电子雪崩发展水平低,其产生的空间电荷对外电场的影响小,外电场仍能保持均匀分布,放电表现为 APTD。在 APTD 中,电子雪崩由瞬时阴极向瞬时阳极发展,因此电子密度呈现 e 指数增长,在瞬时阳极附近达到最大值。则 APTD 的发光是由瞬时阴极向瞬时阳极逐渐增强的。对于较高频率下,电子雪崩的发展水平高,由于正电荷迁移速度慢,在阴极附近能形成阴极位降区,放电表现为 APGD,即阴极附近出现发光强度最大值。由图 3 的放电时间演化情况可以判断,阶梯模式的 DBD 应属于 APTD 机制^[14]。

阶梯放电的放电平台由外加电压的斜率与介质电压的斜率的比值决定,其比值又是由电子雪崩的发展水平决定^[19]。在较低频率的情况下,锯齿波电压的斜率很小。因此,在电极间仅产生少量的电子雪崩,使得在气隙中具有较小的离子密度。此时正离子的数量较少,则源于激发态的分子碰撞产生的阴极二次电子发射就不能被忽视^[22]。随放电的进行外加电压的斜率与介质电压的斜率相等,此时放电电流就保持恒定,由此出现阶梯放电的放电平台。

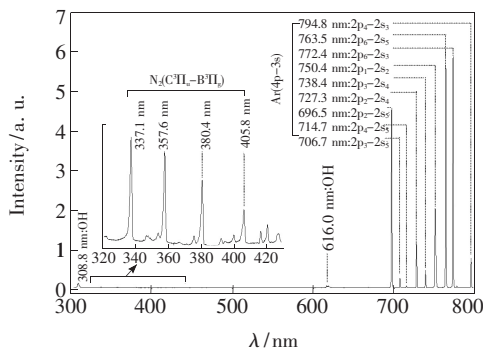
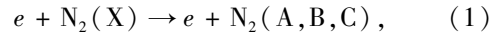


图 4 放电的发射光谱 ($U_p = 10$ kV, $Q = 4$ L/min)

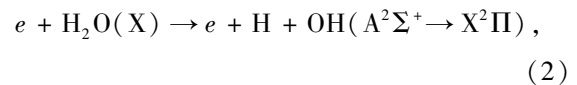
Fig. 4 Optical emission spectrum from the DBD ($U_p = 10$ kV, $Q = 4$ L/min)

图 4 给出放电在波长 300 ~ 800 nm 范围内的发射光谱。从图中可以看出,放电发射光谱中存在多条跃迁谱线,这表明在放电过程中电子碰撞将气体原子(和分子)激发到多种高激发态,激发

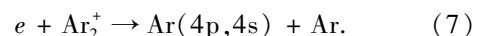
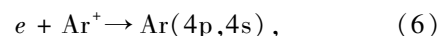
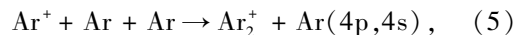
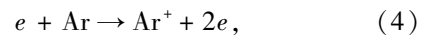
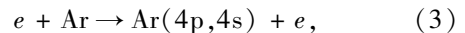
态粒子退激发时发射出多条特定谱线。从图中可以观察到氮分子第二正带系 ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_u$) 波长为 337.1, 357.6, 380.4, 405.8 nm 的谱线。氮分子谱线的出现主要源于环境空气中的氮气扩散到工作气体中。



同时,还发现了 $OH(A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi)$ 波长为 308.8 nm 和 616.0 nm 的谱线,这是由于外界环境中的空气存在少量的水蒸气渗入到工作气体中。由于在气体间隙中 Ar 气流的冲刷作用,渗入到间隙中的空气含量很少,因此氮分子和 OH 发射谱线相比于 Ar 的发射谱线要低很多。



发射谱中除了 Ar I 750.4 nm 谱线,在波长 650 ~ 800 nm 范围内还发现了 696.5, 706.7, 714.7, 727.3, 738.4, 750.4, 763.5, 772.4, 794.8 nm 等谱线。这些氩的原子谱线主要来源于氩与电子发生碰撞激发、碰撞离化和随后的辐射复合。这些高强度 Ar I 谱线的存在说明放电产生了大量的活性粒子,即这种介质阻挡放电具有很高的化学活性。活性粒子产生途径如下:



由于 OH 对于低温等离子体应用具有重要作用,我们对其谱线强度进行了研究。发现 OH (308.8 nm) 的谱线强度随 U_p 增加而单调增加,结果如图 5 所示。

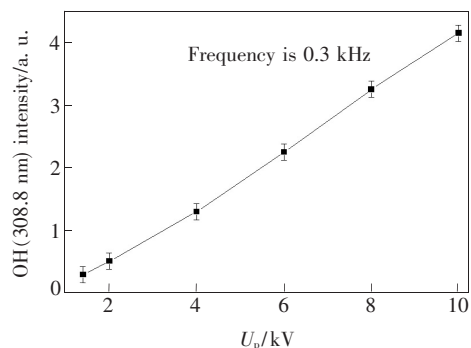


图 5 OH 谱线强度(308.8 nm)随 U_p 的变化关系

Fig. 5 Spectral line intensity of OH(308.8 nm) as a function of U_p

OH 作为一种强氧化剂^[23],能够在工业等领域用于氧化降解,因此图 5 说明增大峰值电压有利于增大化学反应效率。这是因为,电压峰值增大的过程中,放电的占空比增大(图 2),则一个周期中放电产生的电子数量增加,导致电子与水分子的碰撞次数增加,从而使得在一个放电周期中产生的 OH 谱线强度会随着外加锯齿波电压峰值的增加而增大。

图 6 给出了利用玻尔兹曼拟合计算得到的电子激发温度和分子振动温度随 U_p 的变化关系。电子激发温度的变化范围为 9 000 ~ 10 800 K,分子振动温度的变化范围为 840 ~ 1 930 K。并且,随外加锯齿波电压峰值大,电子激发温度降低,而分子振动温度升高。产生这种现象可以解释为,随外加锯齿波电压峰值的增加,放电的占空比增大,即单次放电产生的电子数目和活性粒子增加。在这些电子和活性粒子共同作用下,放电的击穿电场降低。这直接导致了电子能量会随着峰值电压的增大而降低,表现为电子激发温度随着峰值电压的增大而降低。但对于分子振动温度而言,电子能量随峰值电压的增大而降低会导致分子振动温度的降低,但另一方面峰值电压的增大会增加电子与中性粒子的碰撞次数,导致分子振动温度的升高。在两个因素的共同作用下,分子振动温度表现为随峰值电压的增大而降低。

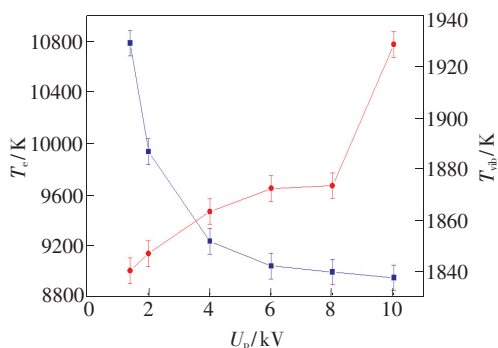


图 6 电子激发温度和分子振动温度随 U_p 的变化关系
Fig. 6 Excited electron temperature and molecular vibration temperature as functions of U_p

图 7 通过对 Ar I (750.4 nm) 强度进行对比,发现相同峰值电压下锯齿波激励 DBD 比正弦波激励 DBD 的谱线强度大。对于大气压介质阻挡放电,通常情况下采用正弦波交流电源进行激励。例如, Tang 等采用正弦波交流电压激励 DBD,研究发现当向工作气体空气中混入氩气时,放电表

现为多脉冲的丝状放电模式,放电的发射光谱中包含氮分子的第二正带系、OH ($A^2 \Sigma^+ \rightarrow X^2 \Pi$) 和 Ar I 谱线^[24]。通过对比,我们发现锯齿波激励 DBD 与正弦波激励 DBD 的发射光谱中所包含谱线种类一样。但是,由于锯齿波激励 DBD 比正弦波激励 DBD 每个周期的放电持续时间更长,因此在相同曝光时间下,锯齿波激励 DBD 的谱线强度会更大。

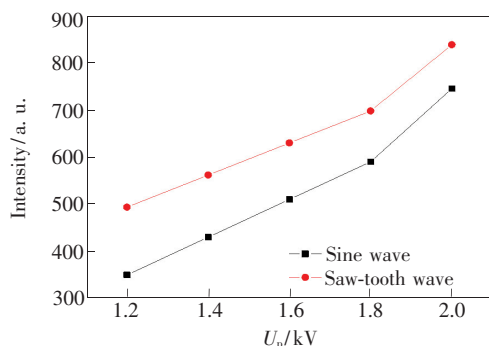


图 7 正弦波激励 DBD 和锯齿波激励 DBD 下 Ar I (750.4 nm) 谱线强度随 U_p 的变化关系

Fig. 7 Spectral line intensity of Ar I (750.4 nm) by DBD excited by the voltage of sine wave and saw-tooth wave as functions of U_p

4 结 论

利用微间隙平行平板 DBD 装置在大气压条件下产生了非平衡态低温等离子体,并用光学方法对其放电特性、放电机制和光谱特性进行了研究。在锯齿波电压激励下,发现 DBD 表现为放电电流具有平台状的阶梯放电。并且,随外加锯齿波电压峰值的增加,放电平台的持续时间和幅值随之增加。对阶梯放电中单个放电平台的时间演化情况进行分析,发现阶梯放电的放电机制属于大气压 Townsend 放电机制。对波长 300 ~ 800 nm 的放电发射光谱进行采集,发现发射光谱中包含氮分子的第二正带系 ($C^3 \Pi_u \rightarrow B^3 \Pi_u$)、OH ($A^2 \Sigma^+ \rightarrow X^2 \Pi$) 和 Ar I 的特征谱线。通过测量 OH (308.8 nm) 的谱线强度,发现其随锯齿波电压峰值的增大而增大。采用玻尔兹曼拟合的方法,对不同电压峰值下的电子激发温度和分子振动温度进行了测量计算,发现电子激发温度随锯齿波峰值电压的增大而减小,而分子振动温度随锯齿波电压峰值的增大而增大。通过对 Ar I (750.4 nm) 强度进行对比,发现相同峰值电压下锯齿波激励 DBD 比正弦波激励

DBD 的谱线强度大。

介质阻挡放电作为一种产生低温等离子体的重要方法,通常采用正弦(几千赫兹或射频)和纳秒脉冲激励。然而,在这些方式激励下介质阻挡放电一般表现为脉冲模式。在脉冲放电模式中,放电时间占外加电压周期的时间(定义为放电的

占空比)较小。也就是说常规激励的 DBD 具有较低的占空比。本文采用锯齿波激励介质阻挡放电能够形成具有高占空比的阶梯放电。并且,锯齿波激励 DBD 属于大气压汤森放电机制的均匀模式放电,这对于需要均匀等离子体的应用领域也具有一定价值。

参 考 文 献:

- [1] GEYTER N D, MORENT R, GENGEMBLE L, *et al.*. Increasing the hydrophobicity of a PP film using a helium/CF₄, DBD treatment at atmospheric pressure [J]. *Plasma Chem. Plasma Proc.*, 2008, 28(2):289-298.
- [2] REHMAN F, LIU Y, ZIMMERMAN W B J. The role of chemical kinetics in using O₃, generation as proxy for hydrogen production from water vapour plasmolysis [J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2016, 41(15):6180-6192.
- [3] PLAKSIN V Y, PENKOV O V, MIN K K, *et al.*. Exhaust cleaning with dielectric barrier discharge [J]. *Plasma Sci. Technol.*, 2010, 12(12):688.
- [4] DENG X T, SHI J J, SHAMA G, *et al.*. Effects of microbial loading and sporulation temperature on atmospheric plasma inactivation of *Bacillus subtilis* spores [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87(15):153901-1-3.
- [5] CHU H Y, HUANG B S. Gap-dependent transitions of atmospheric microplasma in open air [J]. *Phys. Plasmas*, 2011, 18(4):043501.
- [6] KANAZAWA S, KOGOMA M, MORIWAKI T, *et al.*. Stable glow plasma at atmospheric pressure [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1988, 838:189-200.
- [7] MASSINES F, GHERARDI N, NAUDÉ N, *et al.*. Recent advances in the understanding of homogeneous dielectric barrier discharges [J]. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2009, 47(2):22805.
- [8] MASSINES F, RABEHI A, DECOMPS P, *et al.*. Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmospheric pressure controlled by dielectric barrier [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, 83(6):2950-2957.
- [9] GHERARDI N, GOUDA G, GAT E, *et al.*. Transition from glow silent discharge to micro-discharges in nitrogen gas [J]. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2000, 9(3):340.
- [10] TRUNEC D, BRABLEC A, BUCHTA J. Atmospheric pressure glow discharge in neon [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001, 34(11):1697.
- [11] NAVRÁTIL Z, BRANDENBURG R, TRUNEC D, *et al.*. Comparative study of diffuse barrier discharges in neon and helium [J]. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2005, 15(1):8.
- [12] BRANDENBURG R, NAVRÁTIL Z, JÁNSKÝ J, *et al.*. The transition between different modes of barrier discharges at atmospheric pressure [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2009, 42(8):085208.
- [13] KOZLOV K V, BRANDENBURG R, WAGNER H E, *et al.*. Investigation of the filamentary and diffuse mode of barrier discharges in N₂/O₂ mixtures at atmospheric pressure by cross-correlation spectroscopy [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, 38(4):518-529.
- [14] OSAWA N, YOSHIOKA Y. Generation of low-frequency homogeneous dielectric barrier discharge at atmospheric pressure [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2012, 40(1):2-8.
- [15] BOGACZYK M, SRETENOVIĆ G B, WAGNER H E. Influence of the applied voltage shape on the barrier discharge operation modes in helium [J]. *Eur. Phys. J. D*, 2013, 67(10):212.
- [16] SHAO T, ZHANG C, YU Y, *et al.*. Temporal evolution of nanosecond-pulse dielectric barrier discharges in open air [J]. *Europhys. Lett.*, 2012, 97(5):504-514.
- [17] YU S, PEI X, HASNAIN Q, *et al.*. Study on the mode-transition of nanosecond-pulsed dielectric barrier discharge between uniform and filamentary by controlling pressures and pulse repetition frequencies [J]. *Phys. Plasmas*, 2016, 23(2):2.
- [18] ABDELAZIZ A A, SETO T, ABDEL-SALAM M, *et al.*. Influence of applied voltage waveforms on the performance of

- surface dielectric barrier discharge reactor for decomposition of naphthalene [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2015, 48:195201.
- [19] LI X, NIU D, YIN Z, *et al.*. Numerical simulation of operation modes in atmospheric pressure uniform barrier discharge excited by a saw-tooth voltage [J]. *Phys. Plasmas*, 2012, 19(8):1819.
- [20] 李雪辰, 楚婧娣, 鲍文婷, 等. 直流激励等离子体喷枪的发光特性研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(7):41-46.
LI X C, CHU J D, BAO W T, *et al.*. Study on the discharge characteristics of a DC-voltage excited plasma jet [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2015, 35(7):41-46. (in Chinese)
- [21] JIANG W M, LI J, TANG J, *et al.*. Prediction of nested complementary pattern in argon dielectric-barrier discharge at atmospheric pressure [J]. *Sci. Rep.*, 2015, 5:16391.
- [22] SUBLET A, DING C, DORIER J. L *et al.*. Atmospheric and sub-atmospheric dielectric barrier discharges in helium and nitrogen [J]. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2006, 15(4):627-634.
- [23] EWING D, DAMSKER K E. The use of glycerol to link DNA damage from hydroxyl radicals with the activities of DNA repair enzymes [J]. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 1995, 207:957.
- [24] TANG J, JIANG W M, ZHAO W, *et al.*. Development of a diffuse air-argon plasma source using a dielectric-barrier discharge at atmospheric pressure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102:033503.



李雪辰(1976-),男,河北保定人,博士,教授,2005年于中国科学院物理研究所获得博士学位,主要从事气体放电光学诊断等方面的研究。

E-mail: plasmalab@126.com



贾鹏英(1976-),女,河北保定人,副教授,主要从事气体放电、高压静电等离子体除尘等方面的研究。

E-mail: jiapengying@mail.hbu.edu.cn