

# 大气压空气纳秒脉冲阵列式线-线 SDBD 等离子体的 电学及发射光谱特性研究

赵紫璐, 杨德正, 王文春\*, 周雄峰, 袁皓

大连理工大学三束材料改性教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024

**摘要** 提出了一种阵列式线-线沿面介质阻挡放电结构, 利用双极性高压纳秒脉冲电源, 在大气压空气中激励产生了相对大面积的放电等离子体。其中, 高压电极、地电极均为圆柱形金属, 放电反应器由 20 组相间排列的阵列式线型高压电极和套有介质管的阵列式线型地电极组成。利用电压探头、电流探头、示波器测量了放电电压和放电总电流, 并计算得出了放电的实际电流。利用光纤、光栅光谱仪、CCD 等测量了波长范围在 300~440 nm 和 766~778 nm 的发射光谱, 即氮分子第二正带  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  包括  $\Delta\nu = +1, 0, -1, -2, -3$ 、氮分子离子第一负带  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$ ,  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$  和  $O(3p^5P \rightarrow 3s^5S_2)$  的发射光谱。比较了氮分子第二正带  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  的各个振动峰和各个活性物种的发射光谱强度, 以及这些发射光谱强度随着脉冲峰值电压的变化。测量了  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, 0-0)$  的二次、三次衍射光谱, 与原始光谱在转动带、背景光谱等方面进行了比较, 并计算了二次衍射和原始光谱之间的峰值比。利用氮分子第二正带  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = +1, 0, -1, -2)$  和氮分子离子第一负带  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+, 0-0)$  模拟了等离子体的转动温度和振动温度, 对模拟结果进行了比较, 并研究了脉冲峰值电压对等离子体振动温度和转动温度的影响。通过测量放电的电压和计算得到的放电电流发现, 当脉冲峰值电压为 22 kV, 脉冲重复频率为 150 Hz 时, 阵列式线-线沿面介质阻挡放电的放电电流在正脉冲、负脉冲两个方向上均可达 75 A 左右。通过诊断放电等离子体的发射光谱发现, 在测量的波长范围内, 放电产生的活性物种主要有氮分子第二正带  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$ 、氮分子离子第一负带  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$ ,  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$  和  $O(3p^5P \rightarrow 3s^5S_2)$ 。在脉冲峰值电压 22~36 kV 的变化范围内, 氮分子第二正带  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, 0-0)$  的发射光谱强度始终保持最强,  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$  次之, 而氮分子离子第一负带  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$  和  $O(3p^5P \rightarrow 3s^5S_2)$  的发射光谱强度较弱。同时, 当脉冲峰值电压升高时, 氮分子第二正带  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  的所有振动峰, 以及氮分子离子第一负带  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$ ,  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$  和  $O(3p^5P \rightarrow 3s^5S_2)$  的发射光谱强度均随之升高。通过比较氮分子第二正带  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, 0-0)$  的原始、二次衍射、三次衍射光谱发现, 二次、三次衍射光谱的转动带更清晰, 但三次衍射光谱的背景更强, 因此氮分子第二正带  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  的二次衍射光谱更有利于模拟等离子体的转动温度。通过比较模拟得到的振动温度和转动温度发现, 氮分子第二正带  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = -2)$  在  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  四个谱带  $\Delta\nu = +1, 0, -1, -2$  中最适于模拟等离子体振动温度, 而利用氮分子离子第一负带  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+, 0-0)$  模拟得到的等离子体转动温度要比  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = -2)$  的模拟结果高约 10~15 K。同时, 当脉冲峰值电压升高时, 由  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = -2)$  和  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+, 0-0)$  模拟得到等离子体的转动温度均出现了略微上升的趋势, 而利用  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = -2)$  模拟得出的振动温度则略微下降。

**关键词** 沿面介质阻挡放电; 大气压放电; 纳秒脉冲放电; 发射光谱

**中图分类号:** O536 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)04-1236-06

收稿日期: 2018-03-26, 修订日期: 2018-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0207200)和国家自然科学基金项目(51377014, 51407022, 51677019)资助

作者简介: 赵紫璐, 1992 年生, 大连理工大学三束材料改性教育部重点实验室博士研究生 e-mail: huairuo@mail.dlut.cn

\* 通讯联系人 e-mail: wangwenc@dlut.edu.cn

## 引言

近年来, 介质阻挡放电 (dielectric barrier discharge, DBD) 在表面处理、污染物脱除和生物医学处理等方面具有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。在这些应用中, 放电面积是其中的重要因素之一<sup>[4]</sup>。一般来说, 研究人员通过扩大电极面积或设计阵列式结构来扩大放电面积, 而放电面积可调的放电电极结构更受欢迎<sup>[4-6]</sup>。对于体积 DBD 来说, Zhang 等<sup>[5]</sup>提出了阵列式针-板放电结构来产生大面积放电等离子体。Benard 等<sup>[6]</sup>提出了多电极式的沿面 DBD (surface DBD, SDBD) 结构。

DBD 的光学诊断技术, 主要有吸收光谱、激光诱导荧光、光腔衰荡光谱和发射光谱 (optical emission spectra, OES) 等, 其中, OES 具有非侵入、设备简单等优点<sup>[7]</sup>。对于 OES 来说, 基本的分析、研究方向主要有发射光谱的强度和等离子体振动、转动温度模拟等<sup>[7-10]</sup>。Bruggeman 等<sup>[8]</sup>的文章提出, 当利用发射光谱测量所得的激发态来确定等离子体气体温度时,  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$ ,  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$  和  $OH(A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi)$  是最常见的模拟对象。Zhao 等<sup>[9]</sup>从理论和实验两个方面研究了 OES 的重叠光谱, 将单一光谱从重叠光谱中提取出来, 并利用其模拟了等离子体振动温度和转动温度。Bruggeman 等<sup>[10]</sup>将自吸收模型从原子 OES 扩展至分子 OES, 探究了利用紫外光源和 OES 确定 OH 基态强度的可能性。

本文提出了一种阵列式的线-线 SDBD 结构, 其放电面积可以通过改变阵列数量而方便可调, 并利用双极性高压纳秒脉冲电源, 在大气压空气中激励产生了大面积放电等离子体。测量了放电电压和电流, 以及发射光谱。比较了原始光谱和二次、三次衍射光谱, 并利用  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  的多个谱带和  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$  模拟了等离子体的转动温度和振动温度。研究了当脉冲峰值电压变化时, 发射光谱强度、等离子体振动温度和转动温度的变化等。

## 1 实验部分

图 1 给出了大气压空气纳秒脉冲阵列式线-线 SDBD 的 (a) 放电装置, 以及 (b) 电极结构和放电图像。根据图 1(a) 所示, 放电装置主要包括放电反应器, 高压脉冲电源, 以及电学、光学诊断系统。这与我们先前发表的装置类似<sup>[11-13]</sup>。高压脉冲电源可以提供双极性的纳秒脉冲电压, 即在正、负两个方向上交替产生脉冲电压, 脉冲上升沿约为 30 ns, 脉冲的宽度约为 50 ns, 脉冲重复频率在 0~400 Hz 范围内连续可调。放电等离子体的电学特性由高压探头 (Tektronix P6015A 1000 × 3.0 pF 100 MΩ) 和电流探头 (Tektronix TCP312 100 MHz) 测量, 并显示在示波器上。光学信号由光纤收集, 之后被光栅光谱仪分光 (Andor SR-750i)。其中, 光栅型号有两种, 分别为  $2\,400\text{ l}\cdot\text{mm}^{-1}$ , 闪耀波长 300 nm, 以及  $1\,200\text{ l}\cdot\text{mm}^{-1}$ , 闪耀波长 500 nm。分光后, OES 由 CCD 转换为电信号, 并显示在计算机上。高压脉冲电源和电学、光学诊断系统的具体细节可以参考文献<sup>[11-13]</sup>。

图 1(b) 给出了阵列式线-线 SDBD 的放电反应器和放电图像。其中, 阵列式高压电极由白钢铸造, 单个电极 297 mm 长, 呈圆柱形, 直径 5 mm。阵列式地电极的材料同样为白钢, 每个地电极直径 13 mm, 长 290 mm。介质管厚 1 mm, 材料为聚四氟乙烯 (PTFE)。20 组阵列式高压电极和套有介质管的阵列式地电极相间排列, 形成一个平面, 由自制的 PTFE 器件固定。根据图 2(b) 中给出的放电图像, 阵列式线-线 SDBD 等离子体在阵列式高压电极和地电极之间沿介质管表面激励产生。

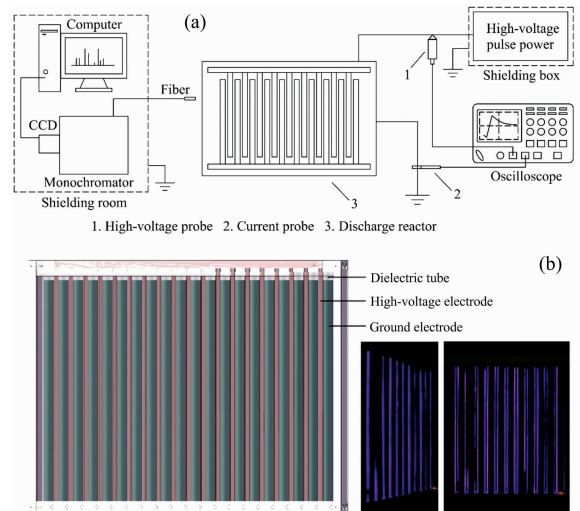


图 1 大气压空气纳秒脉冲阵列式线-线 SDBD

(a): 实验装置; (b): 电极结构和放电图像

Fig. 1 Array wire-to-wire SDBD excited by nanosecond pulse power in atmospheric air

(a): Experimental setup;

(b): Electrode structure and discharge images

## 2 结果与讨论

### 2.1 电学特性

图 2 给出了大气压空气纳秒脉冲阵列式线-线 SDBD 的放电电压和电流, 其中, 图 2(a) 为正向脉冲, 图 2(b) 为负向脉冲, 脉冲峰值电压为 22 kV, 脉冲重复频率为 150 Hz (本文中脉冲重复频率均设定为 150 Hz)。放电电流的计算方法在文献<sup>[11]</sup>中给出。根据图 2 中给出的结果, 放电电压和电流的波形与我们先前的结果类似<sup>[11-13]</sup>。而在本文中, 放电电流在正、负两个方向上均达到了约 75 A, 高于先前得到的电流值。因此, 大面积放电通常会伴随着更高的能量消耗。从图中的波形还可以看出, 放电电流在正、负两个脉冲电压方向上, 都有一个电流值较强的主电流峰, 这说明在每个脉冲电压信号到来时, 都会发生一次较强的放电。

### 2.2 发射光谱

图 3 给出了大气压空气纳秒脉冲阵列式线-线 SDBD 的发射光谱, 其中, 脉冲峰值电压为 36 kV, 波长范围为 330~440 和 766~778 nm。在这个测量范围内,  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  包括  $\Delta v = +1, 0, -1, -2, -3$  是其主要组成部分。根据文献<sup>[11]</sup>, 600~900 nm 主要为  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  的二次衍射

光谱, 因此图 3 仅给出了 766~778 nm 范围内的  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$  和  $O(3p^5P \rightarrow 3s^5S_2)$ 。根据图 3 可以得出, 大气压空气纳秒脉冲阵列式线-线 SDBD 的发射光谱, 主要由  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$ ,  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$ ,  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$  和  $O(3p^5P \rightarrow 3s^5S_2)$  组成。

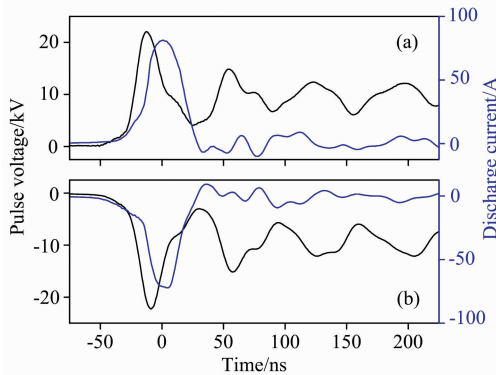


图 2 大气压空气纳秒脉冲阵列式线-线 SDBD 的放电电压、电流

(a): 正向; (b): 负向

Fig. 2 Applied voltage and discharge current of array wire-to-wire SDBD excited by nanosecond pulse power in atmospheric air

(a): Positive; (b): Negative

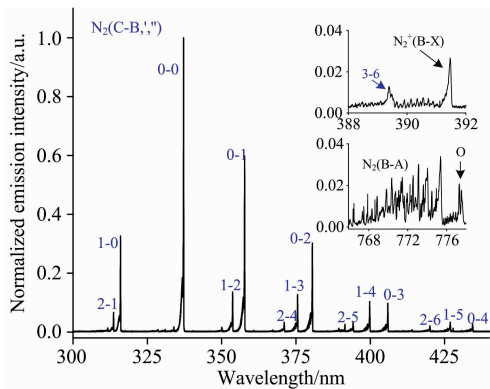


图 3 大气压空气纳秒脉冲阵列式线-线 SDBD 的发射光谱

Fig. 3 Typical OES of array wire-to-wire SDBD excited by nanosecond pulse power in atmospheric air

图 4 给出了(a)  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  的九个振动峰以及(b)  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, 0-0)$ ,  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$ ,  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$  和  $O(3p^5P \rightarrow 3s^5S_2)$  发射光谱强度随脉冲峰值电压的变化。从图 4(a)中可以看出, (0-0) 的发射光谱强度始终保持最高。除了(1-4)和(0-3), 当  $\Delta v$  相同时, 基态为 0 态的振动峰发射光谱强度最高。当脉冲峰值电压升高时, 所有振动峰的发射光谱强度都随之升高。

根据图 4(b), 当脉冲峰值电压升高时, 所有活性物种的发射光谱强度都会随之升高。这是由于当脉冲峰值电压升高时, 电源对放电区域注入的能量更多, 产生了更多的高能电

子, 使得活性物种浓度随之升高<sup>[11]</sup>。同时,  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  的发射光谱强度始终保持最高,  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$  次之, 而  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$  和  $O(3p^5P \rightarrow 3s^5S_2)$  的发射光谱强度较弱。根据文献<sup>[11]</sup>, 由于生成  $N_2^+(B)$  的反应速率常数较低, 而氧原子通常处于基态, 使得发射光谱强度较低。生成  $N_2(C)$  和  $N_2(B)$  的反应常数相对较高, 使得  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  和  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$  的发射光谱强度较高。同时, 由于  $N_2(B)$  常被放电等离子体中的其他活性物种淬灭, 如  $O_2$  等, 且淬灭反应同样具有较高的反应速率, 因此,  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$  的发射光谱强度要低于  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$ 。以上分析中涉及的主要反应式可参考<sup>[11]</sup>。

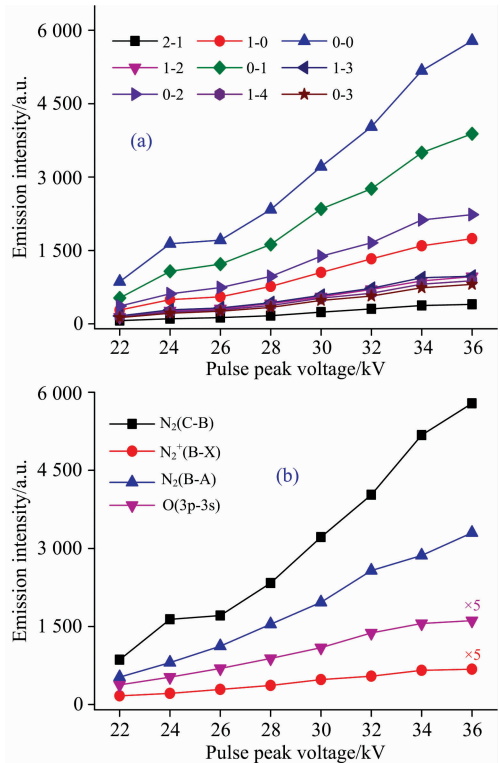


图 4 (a)  $N_2(C-B, \Delta v = +1, 0, -1, -2, -3)$ , 以及 (b)  $N_2(C-B, 0-0)$ ,  $N_2^+(B-X)$ ,  $N_2(B-A)$  和  $O(3p-3s)$  的发射光谱强度随脉冲峰值电压的变化

Fig. 4 Emission intensities of (a)  $N_2(C-B, \Delta v = +1, 0, -1, -2, -3)$ , and (b)  $N_2(C-B, 0-0)$ ,  $N_2^+(B-X)$ ,  $N_2(B-A)$ , and  $O(3p-3s)$  varying with pulse peak voltage

图 5 给出了大气压空气纳秒脉冲阵列式线-线 SDBD 等离子体的  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, 0-0)$  的(a)原始光谱、(b)二次衍射光谱和(c)三次衍射光谱。通过比较可以看出, 图 5(b)和图 5(c)给出的二次、三次衍射光谱的转动带明显比原始光谱更清晰, 而三次衍射光谱的背景光谱更强。当模拟转动温度时, 需要比较实验光谱和模拟光谱的转动带, 因此, 二次衍射光谱更便于模拟等离子体转动温度。

二次衍射会造成光谱峰值的变化, 从而影响等离子体振动温度的模拟。表 1 以脉冲峰值电压为 36 kV 为例, 给出了  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  的原始光谱与二次衍射光谱峰值的比率。

下文利用二次衍射光谱模拟等离子体温度时，两个振动峰之间的相对值将利用峰值比的计算结果进行调整，以保证模拟结果的准确性。

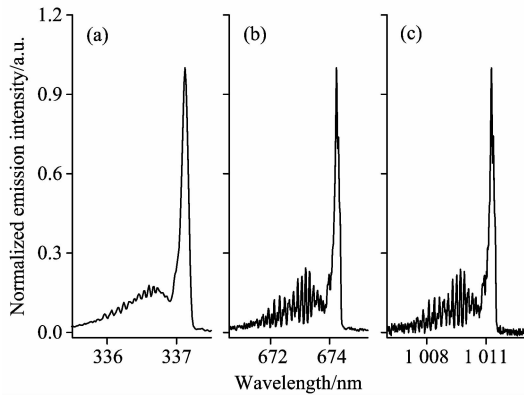


图 5  $N_2(C-B, 0-0)$  的发射光谱  
(a): 原始; (b): 二次衍射; (c): 三次衍射  
Fig. 5 Typical OES of  $N_2(C-B, 0-0)$   
(a): Original; (b) Second diffraction;  
(c): Third diffraction

表 1  $N_2(C-B)$  的二次衍射光谱与原始光谱之间峰值比  
Table 1 Ratios of peak values between the second diffraction and original OES of  $N_2(C-B)$

	2-1	1-0	1-1	0-0	1-2	0-1	1-3	0-2	1-4
峰值比	1.91	1.70	1.12	1.09	0.79	0.68	0.52	0.55	0.35

### 2.3 等离子体的振动温度和转动温度

图 6 给出了大气压空气阵列式线-线 SDBD 的实验光谱和利用 SPECAIR 模拟得到的光谱，并给出了模拟得到的振动温度和转动温度。其中，图 6(a) 为  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = -2)$  的实验和模拟结果，图 6(b) 为  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+, 0-0)$  的实验和模拟结果，脉冲峰值电压为 36 kV。从图中可以看出，模拟光谱与实验光谱吻合得很好，因此，可以利用模拟得到的等离子体振动温度和转动温度代表实验光谱的温度。同时，比较图 6(a) 和 (b) 得到的转动温度模拟结果，可以得出，后者模拟得到的转动温度高大约 15 K。

表 2 给出了利用  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  不同谱带模拟得出的等离子体振动温度和转动温度，其中，脉冲峰值电压为 26 kV。从表 2 中可以看出，不同谱带模拟得出的等离子体转动温度比较接近，约为 305~308 K。而等离子体振动温度的差别较大，平均值约为 2 550 K，与  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = -2)$  模拟得出的结果最为接近。因此， $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = -2)$  在四个谱带中最适于模拟等离子体振动温度。

图 7 给出了脉冲峰值电压对于等离子体 (a) 振动温度和 (b) 转动温度的影响，并在图 7(a) 中给出了线性拟合结果。从图中可以看出，随着脉冲峰值电压的升高，等离子体的振动温度略微下降，转动温度略微上升。同时，利用  $N_2^+$  模拟得出的转动温度比  $N_2$  要高出约 10~15 K。

由于本实验在大气压空气下进行，氮气分子转动能级间隙较小，且在放电区域内的充分接触与碰撞，使得转动和平

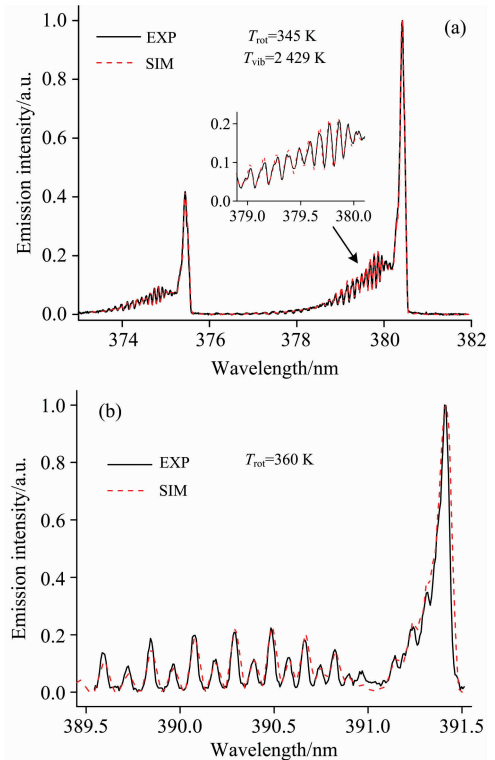


图 6 大气压空气纳秒脉冲阵列式线-线 SDBD 的实验光谱和模拟光谱

(a):  $N_2(C-B)$ ; (b):  $N_2^+(B-X)$

Fig. 6 Experimental and simulated OES of array wire-to-wire SDBD excited by nanosecond pulse power in atmospheric air

(a):  $N_2(C-B)$ ; (b):  $N_2^+(B-X)$

表 2 利用  $N_2(C-B, \Delta\nu = +1, 0, -1, -2)$  四个谱带拟合得出的转动温度和振动温度

Table 2 Rotational and vibrational temperatures simulated by the four bands of  $N_2(C-B, \Delta\nu = +1, 0, -1, -2)$

	转动温度/K	振动温度/K
+1	305	2 099
0	308	2 899
-1	305	2 762
-2	305	2 445

动温度基本达到平衡。所以在本实验中，转动温度可以代表等离子体的气体温度<sup>[11-13]</sup>。根据图 6、图 7 和表 2 中的结果可以得出，大气压空气阵列式线-线 SDBD 等离子体的气体温度随着脉冲峰值电压的上升略微上升。但总体来看，等离子体的气体温度均在水的沸点以下。这是由于纳秒脉冲驱动电源具有极短的上升沿，在放电等离子体中仅加速了电子而非离子和中性粒子，使得大气压空气阵列式线-线 SDBD 等离子体的气体温度较低，同时使得放电等离子体具有较高的非平衡程度。

### 3 结论

提出了一种阵列式线-线 SDBD 结构，用来在大气压空

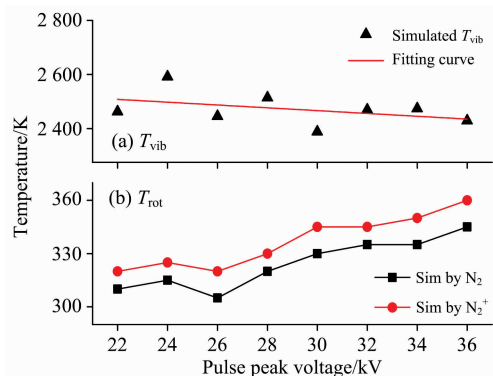


图 7 脉冲峰值电压对 (a) 振动温度和 (b) 转动温度的影响

Fig. 7 The effects of pulse peak voltage on the (a) vibrational and (b) rotational temperatures

气中产生相对大面积的放电等离子体。放电等离子体由双极性高压纳秒脉冲电源激励产生，通过测量放电的电压和电流发现，当脉冲峰值电压为 22 kV 时，阵列式线-线 SDBD 的放

## References

- [1] Shao T, Yang W, Zhang C, et al. Appl. Phys. Lett., 2014, 105: 071607.
- [2] Jiang N, Hu J, Li J, et al. Appl. Catal., B, 2016, 184: 355.
- [3] Choi J S, Kim J, Hong Y J, et al. Biomed. Opt. Express, 2017, 8: 2649.
- [4] Brandenburg R. Plasma Sources Sci. Technol., 2017, 26: 053001.
- [5] Zhang L, Yang D Z, Wang W C, et al. J. Appl. Phys., 2016, 116: 113301.
- [6] Benard N, Moreau E. Exp. Fluids, 2014, 55: 1846.
- [7] Ono R. J. Phys. D: Appl. Phys., 2016, 49: 083001.
- [8] Bruggeman P, Sadeghi N, Schram D, et al. Plasma Sources Sci. Technol., 2014, 23: 023001.
- [9] Zhao T L, Xu Y, Song Y H, et al. J. Phys. D: Appl. Phys., 2013, 46: 345201.
- [10] Bruggeman P, Cunge G, Sadeghi N, et al. Plasma Sources Sci. Technol., 2012, 21: 035019.
- [11] Zhao Z L, Yang D Z, Wang W C, et al. Spectrochim. Acta A, 2016, 161: 186.
- [12] Yang D Z, Yang Y, Li S Z, et al. Plasma Sources Sci. Technol., 2012, 21: 035004.
- [13] Wang S, Yang D Z, Wang W C, et al. Appl. Phys. Lett., 2013, 103: 264108.

## Electrical and OES Characters of Nanosecond Pulsed Array Wire-to-Wire SDBD Plasma in Atmospheric Air

ZHAO Zi-lu, YANG De-zheng, WANG Wen-chun\*, ZHOU Xiong-feng, YUAN Hao

Key Lab of Materials Modification, Dalian University of Technology, Ministry of Education, Dalian 116024, China

**Abstract** In this paper, an array wire-to-wire surface dielectric barrier discharge is reported, and discharge plasma with a relative large area is excited by a high-voltage nanosecond pulse power in atmospheric air. The high-voltage and ground electrodes are made of cylindrical metal, and the discharge structure is composed of 20 groups of alternately arranged array high-voltage and ground electrodes covered with dielectric tubes. The applied voltage and total discharge current are measured by high-voltage and current probes, and displayed on oscilloscope. And the discharge current is calculated. The optical emission spectra within the wavelengths of 300~440 and 766~778 nm are measured by fiber, spectrometer, and CCD, namely, the spectra of  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  including the bands of  $\Delta\nu = +1, 0, -1, -2, -3$ ,  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$ ,  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$ , and  $O(3p^5P \rightarrow 3s^5S_2)$ . The

电电流在正脉冲、负脉冲两个方向上均可达 75 A。测量了  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  包括  $\Delta\nu = +1, 0, -1, -2, -3$ ,  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$ ,  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$  和  $O(3p^5P \rightarrow 3s^5S_2)$  的发射光谱，研究了发射光谱的相对强度，以及随脉冲峰值电压的变化。结果显示， $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, 0-0)$  的发射光谱强度最强， $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$  次之，而  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$  和  $O(3p^5P \rightarrow 3s^5S_2)$  较弱，这主要是由于激发态的反应速率常数、活性物种所处状态和淬灭反应导致的。同时，当脉冲峰值电压升高时，所有活性物种的发射光谱强度均随之升高。测量了  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, 0-0)$  的二次、三次衍射光谱，与原始光谱进行比较得出，二次衍射光谱更有利于模拟等离子体的转动温度。利用  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = +1, 0, -1, -2)$  和  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+, 0-0)$  模拟了等离子体温度，并研究了脉冲峰值电压的影响。结果显示， $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = -2)$  在四个谱带  $\Delta\nu = +1, 0, -1, -2$  中最适于模拟等离子体振动温度，而利用  $N_2^+$  模拟的等离子体转动温度要比  $N_2$  高 10~15 K。同时，当脉冲峰值电压升高时，等离子体转动温度略微上升，振动温度略微下降。



emission intensities are calculated, and every peak of  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$  and four active species are compared. The effects of pulse peak voltage on the emission intensities are also investigated. The second and third diffraction spectra are measured and compared with the original spectra of  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, 0-0)$  in the aspects of rotational bands and background spectra. The ratios of peak value between the second diffraction and original spectra of  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, 0-0)$  are calculated. The rotational and vibrational temperatures are simulated and compared by  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = +1, 0, -1, -2)$  and  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+, 0-0)$ , and the effects of pulse peak voltage are investigated. According to the applied voltage and calculated discharge current, the discharge current of array wire-to-wire surface dielectric barrier discharge is about 75 A in both positive and negative directions, when pulse peak voltage is 22 kV and pulse repetition rate is 150 Hz. The optical emission spectra show that the main active species of discharge plasma are  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$ ,  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$ ,  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$ , and  $O(3p^5P \rightarrow 3s^5S_2)$  during measured ranges. During the range of 22~36 kV of pulse peak voltage, the emission intensity of  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, 0-0)$  keeps the highest, then it is  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$ , and those of  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$  and  $O(3p^5P \rightarrow 3s^5S_2)$  are relatively weak. And when the pulse peak voltage increases, the emission intensities of all vibrational peaks of  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$ ,  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$ ,  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$ , and  $O(3p^5P \rightarrow 3s^5S_2)$  increase. Comparing the original, second, and third diffraction spectra of  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, 0-0)$ , it is found that the rotational bands of the second and third diffraction are clearer than those of original spectra, and the backgrounds of third diffraction are more intense than those of second diffraction, which means that it is more suitable to simulate rotational temperatures by the second diffraction spectra of  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$ . Comparing the simulated vibrational temperatures,  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = -2)$  is the most suitable one among the four bands of  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = +1, 0, -1, -2)$ , and rotational temperatures simulated by  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+, 0-0)$  are higher than those of  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = -2)$  by 10~15 K. Besides, when the pulse peak voltage increases, the rotational temperatures simulated by  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+, 0-0)$  and  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = -2)$  both increase, and the vibrational temperatures simulated by  $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, \Delta\nu = -2)$  decrease.

**Keywords** Surface dielectric barrier discharge; Atmospheric discharge; Nanosecond pulsed discharge; Optical emission spectra

(Received Mar. 26, 2018; accepted Jul. 20, 2018)

\* Corresponding author