基于DBD的均匀大面积等离子体射流研究

孔得霖, 何锋*, 朱平, 张晨阳, 韩若愚, 欧阳吉庭*

北京理工大学物理学院, 北京 100081

*联系人, 何锋, E-mail: hefeng@bit.edu.cn; 欧阳吉庭, E-mail: jtouyang@bit.edu.cn

收稿日期: 2020-04-30; 接受日期: 2020-06-02; 网络出版日期: 2020-07-30

国家自然科学基金(编号: 11475019)资助项目

摘要 为了在标准大气压下获得均匀的大面积等离子体射流, 本文提出了一种新的共面介质阻挡放电(Dielectric Barrier Discharge, DBD)结构. 该结构由两个同轴环形介质管形成放电气隙, 通过管外金属膜电极施加交流电场形成气隙内的介质阻挡放电, 并以此为基础实现了均匀的环形射流, 其覆盖区的直径为12 mm, 厚度为2–3 mm. 本文研究了所提出结构的放电特性、等离子体射流发展过程, 诊断了电子温度、电子密度等参量. 研究结果表明, 本文所获得的大面积射流其物理特性与传统的小管径DBD射流基本一致, 认为大面积射流的物理发展过程为大量“正电晕放电”相互耦合推进过程. 通过实验, 进一步研究了电极结构和气隙结构对大面积DBD等离子体射流特性的影响, 并提出了大面积DBD等离子体射流的优化原则.

关键词 大面积射流, 大气压等离子体, 介质阻挡放电, 正电晕耦合

PACS: 52.75.Hn, 52.50.Dg, 52.80.-s, 52.80.Hc

1 引言

大气压等离子体射流(APPJ)是一种非平衡态等离子体, 具有电子温度高(0.1–1 eV)、气体温度低(300–350 K)、活性粒子含量高、可控性好等优点. 同时操作简单、无需真空腔体, 非常适用于对温度敏感的工艺或领域, 包括材料表面处理、纳米科技、基因工程等^[1–5]. 近些年, 大气压等离子体射流在医疗器械的灭菌消毒、肿瘤凋亡、口腔医学、皮肤病处理等方面都取得了广泛而开拓性的应用^[6–12], 促进了交叉学科——“等离子体医学”的发展.

大气压等离子体射流应用领域的增加对射流本身

提出了更高的要求. 目前大气压等离子体射流源的发展主要有两个方向. 一个是“微型化”(即微射流), 其径向尺寸为毫米至微米或亚微米量级, 有时也称“等离子体针”, 非常适合用于局域、微区工艺, 如微电子器件、纳米器件的刻蚀加工、非规则形状材料处理、细胞处理、伤口处理、牙根管处理等^[13–16]. 另一个是“大型化”, 通过等离子体源尺度的扩展形成大面积均匀的等离子体, 适合于大剂量、大面积处理, 如材料制备和改性、大面积灭菌消毒、半导体工艺和环保等领域^[17–22].

目前大面积等离子体射流的实现主要有两个途径. 一种方法是对等离子体射流的尺度进行扩展.

引用格式: 孔得霖, 何锋, 朱平, 等. 基于DBD的均匀大面积等离子体射流研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 090009

Kong D L, He F, Zhu P, et al. Study of large-area atmospheric pressure plasma jet based on coplanar dielectric barrier discharge (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 090009, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0155](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0155)

Moon等人^[23]使用13.56 MHz的射频电源, 在容性耦合模式下形成了尺寸为200 mm×350 mm×35 mm的大面积等离子体射流源. 大连理工大学的研究小组^[24]报道了一种基于环-平板的大面积等离子体射流源. 在环-平板微结构的基础上进行一维延展, 成为细长的狭缝结构. 形成横向和纵向尺寸相差很大的一维大面积射流. 虽然通过尺寸上的扩展能够形成大面积的等离子体射流, 但是这种结构产生的等离子体使用范围有限, 并且放电均匀性和稳定性还有待提高. 另一种方法是通过多个传统DBD等离子体射流的并行运行实现射流的大面积化, 这是目前普遍使用的方法. 2009年Cao等人^[19]报道了由10个射流管并联形成的一维射流阵列. 这种阵列型等离子体射流是由大量的小尺寸等离子体射流并行组成的, 能够实现大面积等离子体射流. Cao等人^[25-31]在多种电极结构下实现了一维等离子体射流阵列. 在一维阵列的基础上Kim等人^[32-37]实现了同心圆环阵列、正方形、长方形、正多边形等二维等离子体射流阵列. 但是多个独立的射流源的组合会在多尺度上发生交叠而相互影响, 导致所组成的大面积射流在稳定性、均匀性和可控性上都不太理想.

对于射流之间存在相互作用或耦合的现象, 许多研究者对此进行了研究. 南京工业大学的方志小组^[38]研究表明, 在一维射流阵列中, 外电场的分布影响射流阵列中射流之间的相互作用. 当外部为正交电场时, 外侧射流单元在介质管内开始偏转, 传播到空气中后偏转角度加大. 当外部为线性均匀电场时, 射流中的

电子能量高、化学粒子更加丰富, 并且射流同步、均匀的垂直传播, 无发散现象. 华中科技大学的Hu等人^[39]通过对比射频和直流两种驱动模式下的等离子体射流阵列的发展过程, 研究了电场对射流阵列形成的影响. Nie等人^[40]对由七个射流单元组成的二维六边形射流阵列进行研究, 发现射流单元之间的放电过程并不同步. 阵列外围的六个射流单元的放电发展较为一致, 中间位置的射流单元的发展与外侧射流单元差异较大. Ghasemi等人^[41]研究了阵列中射流之间的相互作用, 认为等离子体射流发散的原因是带电通道之间的静电力与受气体加热和动量传递影响的流体动力学相互作用. 尽管已经有不少文献对此问题进行了报道, 但控制DBD等离子体射流间耦合的关键机制尚不明确, 如何通过等离子体射流的耦合进而产生均匀的大面积等离子体仍需进一步研究.

本文设计了一种新的DBD等离子体射流发生结构, 并利用该结构来实现大面积、均匀等离子体射流. 本文通过实验对该等离子体射流的放电、射流传播等特性进行了研究, 分析了射流间的耦合而形成大面积等离子体的机制. 通过研究放电参数对射流的影响, 给出了有关大面积射流装置结构的优化原则.

2 实验装置和实验方法

本实验采用环形介质管和环形电极结构的共面DBD双层介质管结构装置, 如图1所示. 该装置主要包

图1 (网络版彩图)共面DBD双层介质管结构下大面积等离子体射流实验装置示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of experimental setup for generating large-area plasma jet under a coplanar DBD double-layer dielectric tube structure.

括同轴的外层石英管(管内径 $\Phi_1=12$ mm, 管壁厚度 $h=1$ mm, 相对介电常数 $\epsilon_r=3.7$, 管长 $L=300$ mm)和内层石英柱(外径 $\Phi_2=8$ mm, $\epsilon_r=3.7$, $L=300$ mm)以及两个置于外层介质管外壁的金属铝箔电极. 通过改变内、外介质管的直径可以调节所形成的环形气隙径向间距 $\Delta\Phi=(\Phi_1-\Phi_2)/2$. 左侧金属电极为功率电极(标记为A), 与正弦交流电源(Coronalab CTP-2000K, 频率30 kHz, 最大峰值为15 kV)相连, 其宽度 w_p 固定为3 mm. 右侧电极(标记为C)通过2 k Ω 的采样电阻接地, 其宽度记为 w_g . 功率电极与接地电极内边缘的间距为1 cm. 两介质材料间的气隙中通以高纯氦气(Beijing AP BAIF Gases Industry Co., Ltd., 99.999%), 气体流速 Q 用流量控制器(Seven Star CS200)调节.

实验研究中使用数字示波器(DBO 4034B)与探测探头相结合来检测和采集电学信号. 高压探头I (Tektronix P6015A)测量施加到电极上的电压信号 V_s . 低压探头II (Tektronix TPP1000)采集采样电阻两端的电压得到DBD部分的电流波形, 即 $I_{\text{DBD}}=V_R/R$; 电流探头III (PEARSONTM Current Monitor, Model 4100)测量回路中的总电流 I_{total} , 射流电流通过公式 $I_{\text{jet}}=I_{\text{total}}-I_{\text{DBD}}$ 得到. ICCD高速相机(AndoriStar DH734)获取等离子体射流的时间分辨图像. 数码相机(Cannon EOS550D)获取等离子体射流的时间积分图像^[42,43]. 光谱仪(AvaSpec 3648)测量等离子体射流的发射光谱, 分辨率为0.05 nm, 满足Stark展宽计算电子密度需求.

图 2 (网络版彩图)大面积DBD等离子体射流的图像. 侧面(a)和端面(b) ($V_s=7$ kV, $\Delta\Phi=2$ mm, $w_p=3$ mm, $w_g=3$ mm, $Q=500$ sccm, 工作气体为He气)

Figure 2 (Color online) Images of the large-area DBD plasma jet. (a) Side view; (b) end-on view ($V_s=7$ kV, $\Delta\Phi=2$ mm, $w_p=3$ mm, $w_g=3$ mm, $Q=500$ sccm, working gas is helium).

3 结果和讨论

基于环形共面DBD装置, 获得了均匀的大面积射流. 图2为电压 $V_s=7$ kV, 气流量 $Q=500$ sccm条件下大面积DBD等离子体射流的发光图像. 图2(a)为大面积DBD等离子射流的侧面图. 从侧面发光图像可以看到, 接地电极外(右侧)射流放电分布均匀, 由于介质管为环形结构, 上边沿和下边沿射流稍亮. 图2(b)为大面积射流的端面图像, 这一结果进一步表明整个气体间隙内等离子体射流分布较为均匀, DBD射流等离子体区域的环周长约为30 mm, 厚度为2 mm, 面积达到60 mm².

图3给出了该等离子体射流的发射光谱. 图中A, B和C为大面积DBD等离子体射流在地电极外侧轴向3 mm处, 不同径向位置的谱线. 可以看到, A, B和C处的谱线种类和谱线强度基本相同, 表明大面积DBD等离子体射流在径向上具有很好的均匀性.

图 3 (网络版彩图)大面积DBD等离子体射流在不同径向位置处的发射光谱

Figure 3 (Color online) The emission spectrum of the large-area DBD plasma jets at different radial positions.

图3还表明, 大面积DBD等离子体射流的谱线主要分布在300–500 nm和600–800 nm范围内, 辐射较强的谱线包括: 306–309 nm谱线对应 $\text{OH}(A^2\Sigma^+, v'=0 \rightarrow X^2\Pi, v''=0)$, 337.1 nm谱线对应 $\text{N}_2(C^3\Pi_u, v_C=0 \rightarrow B^3\Pi_g, v_B=0)$, 391.4 nm谱线对应 $\text{N}_2^+(B_2\Sigma_u^+, v_B=0 \rightarrow X_2\Sigma_g^+, v_X=0)$, 706.5 nm谱线对应 $\text{He}(3^3S_1 \rightarrow 2^3P_{0,1,2})$ 以及777.2 nm谱线对应 $\text{O}(3p^5P \rightarrow 3s^5S)^{[42,43]}$. 通过Boltzman图法^[44], 利用四条He原子谱线(587.6, 667.8, 706.5和728.1 nm)估算出电子激发温度约为2200 K; 利用Stark展宽方法^[45]对He 706.5 nm谱线进行分析, 计算出等离子体射流的电子密度约为 $10^{11}/\text{cm}^3$. 另外, 该大面积DBD等离子体射流中主要存在的谱线种类及电子密度和电子温度与传统的小管径DBD射流的相似^[46,47].

图4为相同条件下, 放电电压 V_s , DBD电流 I_{DBD} 和射流电流 I_{jet} 的波形图, 两者中的位移电流均已减去. 从图4中可以看到, DBD的电流波形在正、负半周内基本对称, 并且在每半个电流周期内只有一个脉冲. 在电流正半周期内, 脉冲的上升沿时间为 $t_r=2.1 \mu\text{s}$, 脉宽为 $\Delta t=8.7 \mu\text{s}$, 电流幅值 $I_{\text{DBD-peak}}=2.7 \text{ mA}$; 在电流负半周期内, 脉冲的上升沿时间 $t_r=1.9 \mu\text{s}$, 脉宽 $\Delta t=9.7 \mu\text{s}$, 电流幅值 $I_{\text{DBD-peak}}=2.4 \text{ mA}$. 而射流的电流脉冲只在波形的正半周期内形成, 并且射流电流脉冲出现于DBD电流峰值之后. 射流电流脉冲的上升时间 t_r 为 $0.8 \mu\text{s}$, 脉宽 Δt 为 $7.2 \mu\text{s}$, 电流幅值 $I_{\text{jet-peak}}=1.3 \text{ mA}$. 与已有的实验结果^[46–48]比较, 可以发现大面积DBD等离子体射流具有与传统小管径DBD射流相同的电特性.

使用高速ICCD相机获得了电流正半周期内大面

图4 (网络版彩图)大面积DBD射流放电电压-电流波形
Figure 4 (Color online) The large-area DBD jet waveforms of the applied voltage, the DBD current and the jet current.

积射流的传播过程. 图5给出了 $V_s=7 \text{ kV}$, $Q=500 \text{ sccm}$, $w_g=3 \text{ mm}$ 条件下, 大面积DBD等离子体射流的时间分辨图像. ICCD的曝光时间 t_{exp} 为0.3 s, 快门时间 t_{GW} 为50 ns, 增益 G 为25. 图5中各幅图像的获取时刻分别用实心五星标记于图4电流脉冲波形上. 图5中A和C分别代表瞬时阳极和瞬时阴极. 可以看出, 在电流正半周期内, DBD首先在瞬时阳极附近产生, 随后向瞬时阴极发展, 见31.55–33.20 μs 图像. 33.63–39.06 μs 期间,

图5 (网络版彩图)电流正半周期内大面积DBD等离子体射流的时间分辨ICCD图像($V_s=7 \text{ kV}$, $w_g=3 \text{ mm}$, $Q=500 \text{ sccm}$; $t_{\text{exp}}=0.3 \text{ s}$, $t_{\text{GW}}=50 \text{ ns}$, $G=25$). 操作条件同图2

Figure 5 (Color online) Time-resolved ICCD images of the large-area DBD plasma jet in the positive half cycle of the current ($V_s=7 \text{ kV}$, $w_g=3 \text{ mm}$, $Q=500 \text{ sccm}$; $t_{\text{exp}}=0.3 \text{ s}$, $t_{\text{GW}}=50 \text{ ns}$, $G=25$). The operating conditions are the same as Figure 2.

DBD衰减, 同时射流在瞬时阴极外形成, 并沿着气流的方向在气隙内发展. 当DBD放电熄灭时, 射流也基本消失(图5中39.92 μs 图像). 所获得的时间分辨图像表明, 大面积DBD射流的发展在时间上具有一致性, 在空间上具有均匀性. 而与已有实验结果^[46-48]对比, 大面积DBD等离子体射流的传播过程与小管径DBD等离子体射流的传播过程相同.

由图5给出的射流的时间分辨图像可计算出大面积DBD等离子体射流的传播速度, 如图6所示. 射流在地电极外形成后, 射流的传播速度先迅速增加至约 $2.3 \times 10^4 \text{ m/s}$, 其后的3 μs 时间内射流传播速度基本保持不变, 这与小管径DBD等离子体射流传播速度在同一个量级^[46-48].

文献^[46,48]的研究结果认为, 小管径DBD射流传播机制类似于“正电晕放电”. 电极间的DBD形成后, 等离子体通道在阴极表面以鞘收缩的形式向外发展, 其表面附近滞留的高密度正离子空间电荷产生了强轴向电场. 此时正空间电荷为初始射流头部, 其作用类似于电晕放电中的正电极. 在电场的作用下, 空间中的种子电子向高密度的正离子空间电荷运动, 从而产生电子雪崩. 电离产生的正离子滞留在电子雪崩的后方, 并吸引空间中的电子汇入, 使得路径上形成二次电子雪崩, 在空间中留下更多的正离子作为新的射流头部并产生轴向电场, 使得射流继续发展^[42,43], 直到射流头部的电场低于气体击穿电场, 射流将停止往前发展. 大面积射流的电学特性、光谱特性及射流传播过程和小管径射流的一致, 表明大面积射流的发展也是由于“正电晕放电”的传播, 但形成这种大面积、均匀射流则是大量正电晕放电形成了很好的耦合.

实际上, 一根长金属丝可以产生长而均匀的电晕

图 6 大面积DBD等离子体射流的推进速度

Figure 6 The velocity of the large-area DBD plasma jet.

放电, 形成等离子体“电刷”. 在本文工作中, 长金属丝被一个环形DBD电极代替. 这种无端点的环形介质管有利于形成大面积均匀的DBD射流. 根据等离子体射流的传播机制, 当放电发展到接地电极外时, 接地电极外的正离子空间电荷相互自洽融合为一个整体, 从而产生轴对称的均匀电场, 空间中的种子电子在电场的作用下同步地向正离子运动, 从而使DBD等离子体射流同步且均匀的往前传播.

为了使射流传播的更远, 需要更多的正电荷溢出地电极, 需要选择合适的电极宽度. 图7给出了接地电极宽度 w_g 对大面积DBD等离子体射流的影响. 保持 $V_s=7 \text{ kV}$ 、 $Q=500 \text{ sccm}$ 及气隙等参数不变, 随着接地电极宽度的增加, 接地电极外射流长度逐渐减小, 如图7(a)所示. 随着 w_g 从1 mm增加至7 mm, 等离子体射流的长度 L_{jet} 从 $(11.0 \pm 0.2) \text{ cm}$ 降低至 $(0.5 \pm 0.3) \text{ cm}$.

在DBD形成过程中, 放电因鞘的收缩向瞬时阴极

图 7 (网络版彩图)不同地电极宽度下大面积DBD等离子体射流图像(a)和长度(b) ($V_s=7 \text{ kV}$, $Q=500 \text{ sccm}$)

Figure 7 (Color online) The large-area DBD plasma jet images (a) and the length (b) at different electrode widths ($V_s=7 \text{ kV}$, $Q=500 \text{ sccm}$).

(地电极)发展, 并且正离子将会积累在接地电极介质表面. 鞘的收缩在达到瞬时阴极外边沿处停止, 若阴极宽度窄, 聚集在瞬时阴极外边沿处的正离子空间电荷较多, 并产生较强的指向介质管口的轴向电场, 有助于等离子体射流的发展. 若瞬时阴极较宽, 鞘收缩一直沿阴极表面进行, 大部分正离子将积累到阴极介质表面, 而瞬时阴极外侧正离子空间电荷较少, 正离子空间电荷产生指向介质管外侧的轴向电场较弱, 不利于等离子体射流的发展. 产生的等离子体射流长度较短甚至无法产生等离子体射流. 可见瞬时阴极越窄, 越有利于大面积DBD等离子体射流的形成和传播.

如果采用不完整的或有边界的地电极, 则接地电极外的等离子体射流分布将不均匀. 图8(a)和(b)的接地电极为3/4个圆环, 而图8(c)则为矩形电极. 这时由于在与射流发展相垂直的方向上, 存在边界效应, 导致边界处的空间电荷电场存在较大变化, 即形成非均匀的电场. 电极边界、电场畸化较强处先引起电子雪

崩达到击穿阈值, 从而产生孤立的放电通道, 进一步增强了电场的畸化程度, 导致整个放电通道的不均匀, 从而无法形成大面积、均匀的等离子体射流.

气隙间距对大面积DBD等离子体射流的均匀性和端面面积有一定影响. 气隙的径向尺度约束放电的发展范围. 等离子体射流推进过程中, 在射流头部电场的作用下, 周围电子不断向射流头部运动, 射流将径向变宽. 气隙径向尺度一致时, 气隙内射流径向变宽的范围相同, 等离子体射流均匀发展. 气隙径向尺度不均匀时, 气隙内射流径向变宽的范围不同, 且在固定气体流量下, 气隙尺度小处气体流速大. 气隙内各位置的气体流速不同, 将导致大面积射流各处发展速度不一致.

实验中, 保持外部石英管内径 Φ_1 不变, 通过改变内部石英管外径 Φ_2 来调节气隙间距. 图9(a)为保持 $V_s=7$ kV, $Q=500$ sccm, $w_g=3$ mm不变, 气隙径向间距 $\Delta\Phi$ 分别为2, 3和4 mm时大面积DBD等离子体射流的

图 8 (网络版彩图)电极结构不完整或有边界时的放电图像. (a), (b) 接地电极不完整时((a)为侧视图, (b)为俯视图); (c) 矩形接地电极

Figure 8 (Color online) Discharge images when the electrode is incomplete or has a boundary. When the ground electrode is incomplete, from the side view (a) and the top view (b); (c) rectangular ground electrode.

图 9 (网络版彩图)不同气隙间距下大面积DBD等离子体射流的(a)图像和(b)长度 ($V_s=7$ kV, $w_g=3$ mm, $Q=500$ sccm)

Figure 9 (Color online) The large-area DBD plasma jet (a) images and (b) length at different air gaps ($V_s=7$ kV, $w_g=3$ mm, $Q=500$ sccm).

图像. 因装置为轴对称结构, 图中仅标注了下半部分间隙位置. 从这一结果可以看到, 随着气隙间距的增加, 大面积DBD等离子体射流的均匀性降低, 当气隙间距 $\Delta\phi=4$ mm时, 等离子体射流先向内层管壁收缩, 随后径向扩展, 最后又向内层管壁收缩. $\Delta\phi$ 越大, 大面积DBD等离子体射流的不均匀性越明显. 这是因为, 等离子体射流在地电极(瞬时阴极)外形成之初, 地电极外侧的介质管壁附近正离子电荷密度较高, 此时等离子体射流沿着介质管壁推进. 随着等离子体射流的推进, 在射流头部电场的作用下, 周围电子不断向射流头部运动, 导致射流径向变宽. 随着等离子体射流的继续推进, 射流头部的径向电场逐渐减小, 正电荷逐渐向中心轴汇聚, 表现为等离子体射流的收缩现象. 因此, 气隙间距较大时, 等离子体射流的均匀性较差. 当气隙间距 $\Delta\phi=2$ mm时, 等离子体射流在气隙间距内均匀发展. 当气隙间距 $\Delta\phi=3$ mm和 $\Delta\phi=4$ mm时, 等离子体射流轻微的向内层介质管壁收缩.

随着气隙间距的增加, 大面积DBD等离子体射流的长度变短. 如图9(b)所示, 当 $\Delta\phi=2, 3$ 和4 mm时, 射流长度分别为 $L_{\text{jet}}=5.38, 5.32$ 和4.85 cm. 可见气隙间距大, 等离子体射流越不均匀、长度越短.

由上述实验结果可知, 要实现大面积、均匀的

DBD等离子体射流, 气隙结构要具有良好的对称性和轴向一致性, 电极结果也需要具有良好的轴对称性以保证气隙内电场的轴对称性. 此外, 气隙径向尺寸应保持在2–3 mm.

4 结论

本文设计了一种双层环形介质管和环形电极的介质阻挡放电结构, 来实现大面积等离子体射流. 实验结果表明, 利用该结构可以获得大面积、均匀的等离子体射流. 通过研究该大面积等离子体射流的光辐射、电子密度、放电特性及传播过程, 认为该大面积DBD等离子体射流的传播机制与传统小管径DBD射流基本一致, 都属于“正电晕”放电机制, 而大面积的等离子体射流是由大量“正电晕”耦合同步向前传播所形成. 本文进一步研究了接地电极宽度、气隙径向尺寸、电极结构等影响大面积等离子体射流均匀性的因素. 实验结果表明, 要实现大面积、均匀等离子体射流, 首先要保证气隙结构和气隙中的电场具有良好的轴对称性, 其次气隙径向尺寸保持在2–3 mm. 此外可以采用窄的接地电极以获得更大的射流长度. 本文的研究将有助于大面积等离子体射流的实现和应用.

参考文献

- 1 Lu X, Naidis G V, Laroussi M, et al. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: Generation, transport, and biological effects. *Phys Rep*, 2016, 630: 1–84
- 2 Penkov O V, Khadem M, Lim W S, et al. A review of recent applications of atmospheric pressure plasma jets for materials processing. *J Coat Technol Res*, 2015, 12: 225–235
- 3 Norberg S A, Tian W, Johnsen E, et al. Atmospheric pressure plasma jets interacting with liquid covered tissue: Touching and not-touching the liquid. *J Phys D-Appl Phys*, 2014, 47: 475203
- 4 Cheng H, Liu X, Lu X, et al. Active species delivered by dielectric barrier discharge filaments to bacteria biofilms on the surface of apple. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 073517
- 5 Kuok F H, Kan K Y, Yu I S, et al. Application of atmospheric-pressure plasma jet processed carbon nanotubes to liquid and quasi-solid-state gel electrolyte supercapacitors. *Appl Surf Sci*, 2017, 425: 321–328
- 6 Kong M G, Kroesen G, Morfill G, et al. Plasma medicine: An introductory review. *New J Phys*, 2009, 11: 115012
- 7 Dobrynin D, Fridman G, Friedman G, et al. Physical and biological mechanisms of direct plasma interaction with living tissue. *New J Phys*, 2009, 11: 115020
- 8 Yan X, Zhang C, Ouyang J, et al. Cytoprotective effect of atmospheric pressure helium plasma on oxygen and glucose deprivation-induced cell death in H9C2 cardiac myoblasts and primary neonatal rat cardiomyocytes. *J Phys D-Appl Phys*, 2019, 52: 135401
- 9 Xu H, Liu D, Xia W, et al. Comparison between the water activation effects by pulsed and sinusoidal helium plasma jets. *Phys Plasmas*, 2018, 25: 013520
- 10 Lu X P. Plasma jets and their biomedical application (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2011, 37: 1416–1425 [卢新培. 等离子体射流及其医学应

用. 高电压技术, 2011, 37: 1416–1425]

- 11 O'Connell D, Cox L J, Hyland W B, et al. Cold atmospheric pressure plasma jet interactions with plasmid DNA. *Appl Phys Lett*, 2011, 98: 043701
- 12 Keidar M, Shashurin A, Volotskova O, et al. Cold atmospheric plasma in cancer therapy. *Phys Plasmas*, 2013, 20: 057101
- 13 Wu S, Wu F, Liu C, et al. The effects of the tube diameter on the discharge ignition and the plasma properties of atmospheric-pressure microplasma confined inside capillary. *Plasma Process Polym*, 2019, 16: 1800176
- 14 Jögi I, Talviste R, Raud J, et al. The influence of the tube diameter on the properties of an atmospheric pressure He micro-plasma jet. *J Phys D-Appl Phys*, 2014, 47: 415202
- 15 Ji L, Bi Z, Niu J, et al. Atmospheric-pressure microplasmas with high current density confined inside helium-filled hollow-core fibers. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 184105
- 16 Ning W, Dai D, Li L. Ignition properties of helium discharges in dielectric tubes with radius from 50 μm to 3 mm. *Plasma Process Polym*, 2018, 15: 1800010
- 17 Zhang C, Qiu J, Kong F, et al. Plasma surface treatment of Cu by nanosecond-pulse diffuse discharges in atmospheric air. *Plasma Sci Technol*, 2018, 20: 014011
- 18 Nie Q, Cao Z, Ren C S, et al. A two-dimensional cold atmospheric plasma jet array for uniform treatment of large-area surfaces for plasma medicine. *New J Phys*, 2009, 11: 115015
- 19 Cao Z, Walsh J L, Kong M G. Atmospheric plasma jet array in parallel electric and gas flow fields for three-dimensional surface treatment. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 021501
- 20 Yan X, Ouyang J T, Zhang C Y, et al. Plasma medicine for neuroscience—an introduction. *Chin Neurosurg J*, 2019, 5: 229–236
- 21 Weltmann K D, Brandenburg R, von Woedtke T, et al. Antimicrobial treatment of heat sensitive products by miniaturized atmospheric pressure plasma jets (APPJs). *J Phys D-Appl Phys*, 2008, 41: 194008
- 22 Wang R, Xu H, Zhao Y, et al. Spatial-temporal evolution of a radial plasma jet array and its interaction with material. *Plasma Chem Plasma Process*, 2019, 39: 187–203
- 23 Moon S Y, Choe W, Kang B K. A uniform glow discharge plasma source at atmospheric pressure. *Appl Phys Lett*, 2004, 84: 188–190
- 24 Feng Y. Study on the Atmospheric Pressure Large Scale Cold Plasma Jet (in Chinese). Dissertation for Dcotoral Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2010 [冯岩. 大气压大尺度等离子体射流研究. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2010]
- 25 Cao Z, Nie Q, Bayliss D L, et al. Spatially extended atmospheric plasma arrays. *Plasma Sources Sci Technol*, 2010, 19: 025003
- 26 Tang D T, Ren C S, Wang D Z, et al. The interactions of two cold atmospheric plasma jets. *Plasma Sci Technol*, 2009, 11: 293–296
- 27 Kim J Y, Ballato J, Foy P, et al. Atmospheric-pressure microplasma jets from linear arrays of hollow-core optical fibers for biomedical applications. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2011, 39: 2958–2959
- 28 Hubicka Z, Cada M, Sicha M, et al. Barrier-torch discharge plasma source for surface treatment technology at atmospheric pressure. *Plasma Sources Sci Technol*, 2002, 11: 195–202
- 29 Pei X, Wang Z, Huang Q, et al. Dynamics of a plasma jet array. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2011, 39: 2276–2277
- 30 Sankaran R M, Giapis K P. Hollow cathode sustained plasma microjets: Characterization and application to diamond deposition. *J Appl Phys*, 2002, 92: 2406–2411
- 31 Hong Y C, Cho S C, Uhm H S. Twin injection-needle plasmas at atmospheric pressure. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 141501
- 32 Kim S O, Kim J Y, Kim D Y, et al. Intense plasma emission induced by jet-to-jet coupling in atmospheric pressure plasma arrays. *Appl Phys Lett*, 2012, 101: 173503
- 33 Furmanski J, Kim J Y, Kim S O. Triple-coupled intense atmospheric pressure plasma jet from honeycomb structural plasma device. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2011, 39: 2338–2339
- 34 Zhou Y D, Fang Z, Wu W J, et al. Latest progress in atmospheric pressure plasma jet array (in Chinese). *Chin J Vacuum Sci Tech*, 2014, 34: 1294–1303 [周耀东, 方志, 吴伟杰, 等. 大气压等离子体射流阵列研究进展. 真空科学与技术学报, 2014, 34: 1294–1303]
- 35 Weltmann K D, Fricke K, Stieber M, et al. New nonthermal atmospheric-pressure plasma sources for decontamination of human extremities. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2012, 40: 2963–2969
- 36 Nie Q Y, Zhang X F, Li H P, et al. Advances of atmospheric-pressure dielectric-barrier-discharge plasma jets (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 1157–1169 [聂秋月, 张晓菲, 李和平, 等. 大气压介电阻挡放电等离子体射流源研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学,

- 2014, 44: 1157–1169]
- 37 Nie Q Y. Experimental Studies on Atmospheric Pressure Cold Plasma Jets (in Chinese). Dissertation for Dcotoral Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2010 [聂秋月. 大气压冷等离子体射流实验研究. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2010]
- 38 Zhang B, Fang Z, Liu F, et al. Comparison of characteristics and downstream uniformity of linear-field and cross-field atmospheric pressure plasma jet array in He. *Phys Plasmas*, 2018, 25: 063506
- 39 Hu J T, Liu X Y, Liu J H, et al. The effect of applied electric field on pulsed radio frequency and pulsed direct current plasma jet array. *Phys Plasmas*, 2012, 19: 063505
- 40 Nie Q Y, Ren C S, Wang D Z, et al. Self-organized pattern formation of an atmospheric pressure plasma jet in a dielectric barrier discharge configuration. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 221504
- 41 Ghasemi M, Olszewski P, Bradley J W, et al. Interaction of multiple plasma plumes in an atmospheric pressure plasma jet array. *J Phys D-Appl Phys*, 2013, 46: 052001
- 42 Liu L J. Formation Mechanism of Atmospheric Pressure Plasma Jet in Coplanar Dielectric Barrier Discharge (in Chinese). Dissertation for Dcotoral Degree. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016 [刘丽娟. 大气压共面介质阻挡放电等离子体射流的形成机理. 博士学位论文. 北京: 北京理工大学, 2016]
- 43 Zhu P. Propagation, Coupling and Large Area of Atmospheric Pressure Plasma Jet (in Chinese). Dissertation for Dcotoral Degree. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2019 [朱平. 大气压等离子体射流的推进、耦合机制与大面积化. 博士学位论文. 北京: 北京理工大学, 2019]
- 44 Duan Z, He F, Si X, et al. Experimental study of atmospheric-pressure micro-plasmas for the ambient sampling of conductive materials. *J Phys D-Appl Phys*, 2018, 51: 065201
- 45 Dong L, Ran J, Mao Z. Direct measurement of electron density in microdischarge at atmospheric pressure by Stark broadening. *Appl Phys Lett*, 2005, 86: 161501
- 46 Zhu P, Li B, Duan Z, et al. Development from dielectric barrier discharge to atmospheric pressure plasma jet in helium: Experiment and fluid modeling. *J Phys D-Appl Phys*, 2018, 51: 405202
- 47 Hu H X, He F, Zhu P, et al. Numerical study of the influence of dielectric tube on propagation of atmospheric pressure plasma jet based on coplanar dielectric barrier discharge. *Plasma Sci Tech*, 2018, 20: 75–81
- 48 Liu L, Zhang Y, Tian W, et al. Electrical characteristics and formation mechanism of atmospheric pressure plasma jet. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 244108

Study of large-area atmospheric pressure plasma jet based on coplanar dielectric barrier discharge

KONG DeLin, HE Feng^{*}, ZHU Ping, ZHANG ChenYang,
HAN RuoYu & OUYANG JiTing^{*}

School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

In order to obtain a uniform large-area plasma jet at the atmospheric pressure, a new structure of coplanar dielectric barrier discharge (DBD) is proposed in this paper. The structure used in large-area DBD plasma jet consists of two coaxial annular dielectric tubes, and an alternating current electric field is applied by metal film electrodes outside the tubes to form dielectric barrier discharge in the air gap. Based on this configuration, a uniform annular jet is achieved, with diameter of 12 mm and thickness of 2–3 mm. The discharge characteristics of the proposed structure and the development process of plasma jet are studied. The spectra of the discharge, the electron temperature, the electron density, and the discharge waveforms are diagnosed. The results show that the physical characteristics of the large-area jet obtained in this work are basically the same as that of the traditional small-diameter DBD jet. It is considered that the physical mechanism of the large-area jet propagation is the mutual coupling propulsion process of a large number of positive corona discharges. The influence of electrode structure and air gap structure on the characteristics of the large-area DBD plasma jet is further studied by experiments, and the optimization principle of the large-area DBD plasma jet is proposed.

large area jet, atmospheric pressure plasma, dielectric barrier discharge, coupled corona-like discharges

PACS: 52.75.Hn, 52.50.Dg, 52.80.-s, 52.80.Hc

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0155](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0155)