

针-板介质阻挡放电轮辐斑图时空特性分析及光谱特性研究*

冉俊霞¹⁾²⁾ 高翠莹¹⁾ 刘天宇¹⁾ 周明朱¹⁾ 张宏磊¹⁾ 杜蕊¹⁾ 代秀红¹⁾ 李雪辰^{1)†}

1) (河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

2) (零碳能源建筑与计量技术教育部工程研究中心, 保定 071002)

摘 要

本文利用大气压空气针-板介质阻挡放电系统, 采用频率为 20 kHz 的正弦交流电源激励, 获得了稳定的轮辐斑图. 采用电学和光学手段对其时空特性及形成机理进行了研究分析. 结果表明, 轮辐斑图由电压正半周期上升沿的两次放电和下降沿的一次负放电叠加而成, 对其形貌产生关键作用的是第二次正放电. 利用增强型电荷耦合设备 (intensified charge-coupled device, ICCD) 对第二次正放电进行时空演化研究, 发现该放电在介质表面的演化过程由轮毂-轮辐-轮辋-分叉四个阶段组成. 利用发射光谱对轮辐斑图的电子密度、电子温度、振动温度和转动温度进行了空间分辨测量. 结果表明, 轮辐斑图从中心到边缘, 电子密度、电子温度、振动温度和转动温度均呈下降趋势, 这与电场强度由中心向外衰减的空间规律一致, 分析发现该斑图的形成与流光机制和表面电荷密切相关. 本研究揭示了针-板介质阻挡放电系统中轮辐斑图的多阶段演化行为及其等离子体参数空间分布特征, 为理解针-板结构中斑图形成机理提供了理论和实验依据.

关键词: 介质阻挡放电, 斑图放电, 时空演化, 表面电荷

PACS: 52.35.Mw, 47.54.-r, 52.80.Tn

***基金:** 国家自然科学基金(批准号: 12375250, 11875121)、河北省自然科学基金(批准号: A2026201004).

† 通信作者. E-mail: plasmalab@126.com

第一作者. E-mail: rjxhbu@hbu.cn

1 引言

斑图是一种在空间或时间上呈现某种规律分布的非线性自组织现象^[1,2], 广泛存在于对流、法拉第振荡及介质阻挡放电 (dielectric barrier discharge, DBD) 等系统中^[3-6]. 近年来, 由于在 DBD 系统中能产生多种自组织静态或动态结构斑图, 成为研究非线性动力学的热点物理系统^[7,8]. 已有研究证实, DBD 斑图可直接应用于材料的图案化处理, 斑图的空间分布能够映射到材料表面的润湿性、刻蚀深度及光学性质等特征, 从而实现局域化和图案化的材料处理^[9]. 另外通过调控斑图的空间尺度与等离子体参数, 能够精准控制表面改性的区域范围与处理程度, 为亚毫米尺度的聚合物表面图案化加工提供了低成本技术路径^[10]. 因此, DBD 斑图研究为发展局域化、选择性和图案化等离子体应用提供了重要基础. DBD 的特征是在两个电极间至少存在一层阻挡介质, 使得气体中产生的电荷无法到达导电电极^[11]. 其典型的结构有平板型、圆柱型和针-板型^[11-13], 其中平板 DBD 是研究斑图最常用的结构.

人们通过改变环境温度^[14]、电压幅值^[15]、间隙宽度^[16]、驱动频率^[17]、气体压强^[18]和气体含量^[19]等实验条件, 在平板 DBD 中产生了丰富的斑图, 并对其进行了大量的实验和理论研究. 例如, 2015 年, Liu 等人利用 58 kHz 的正弦交流电源, 研究了 DBD 中同心圆环斑图的时空动力学行为, 发现同心圆环斑图是两套圆环子结构的叠加^[20]; 2018 年, Mi 等人利用 53 kHz 的电源, 产生了三个不同的子晶格构成的方形超晶格斑图, 并研究了其时空动力学特性^[21]; 2024 年, Dong 等人利用正弦交流电压, 通过调节气隙, 获得了由两个点状子晶格和一个环状子晶格构成的方形超晶格斑图^[22]; 2025 年, Ran 等人利用正弦交流电源, 在不同半径的圆形边界叠加形成薄厚组合放电气隙, 获得环-点阵-同心环斑图^[15]; 2026 年, Dong 等

人利用 50 kHz 的正弦交流电源、双气隙 DBD 装置, 在氩气和空气的混合气体放电中, 获得了具有 C_{6v} 对称性的三维斑图, 发现其由薄气隙轴点、薄气隙柱点和厚气隙轴点 3 套放电丝子点阵嵌套而成^[13]. 可见, 在平板 DBD 中能产生多种结构斑图, 多是由于子结构拓展而成, 其结构相对复杂.

针-板 DBD 因其结构简单成为研究 DBD 放电特性及机理的重要手段^[23-28]. 如 2012 年, Yu 等人利用正弦交流高压电源, 发现放电正负半周期表现出不同的放电模式, 有微流注放电、电晕放电和微辉光放电, 认为足够强的阴极电场强度和裸露针状电极形成的有效的二次电子发射过程, 是形成微辉光放电的主要因素^[29]; 2022 年, Sun 等人利用高频高压交流电源, 使用针-板 DBD 臭氧发生器发现外加磁场可显著增加电流脉冲的数量和幅值, 提高放电功率^[30]; 2024 年, Yu 等人通过实验和数值模拟, 发现在多针-板介质阻挡放电中旋转介质板能够通过表面电荷的同步输运显著增强放电能量, 揭示了表面电荷移动是增强放电的根本原因^[31]; 可见, 在针-板 DBD 中, 介质表面电荷的移动非常重要, 这与其表面电场分布有关. 如 2011 年, Mu 等人利用正弦电压激励, 研究了表面电荷在不同的聚合物材料表面的分布情况, 结果发现在 polyimide (PI) 和 polyethylene terephthalate (PET) 表面放电会产生蛇形斑图, 在 polyvinylidene fluoride (PVDF) 表面则呈现出规则的轮辐状斑图, 但该斑图没有形成轮辋, 他们认为材料的不同带隙以及其介电常数和厚度对其表面电场分布有很大影响^[32]. 这说明电荷在介质表面移动时, 在某些条件下也可自组织形成斑图. 然而, 目前人们对针-板 DBD 中完整轮辐斑图的形成机制缺乏系统研究.

本文利用大气压空气针-板 DBD, 产生了稳定的完整轮辐斑图, 该斑图结构相对简单, 结构单一, 未在空间拓展, 这对斑图动力学的研究具有重要意义, 因

此有必要对其形成机理及演化特性进行深入研究. 利用增强型电荷耦合设备 (intensified charge-coupled device, ICCD) 研究了该斑图的时空演化行为, 分析了其形成机理及动力学过程; 用发射光谱法对该斑图的等离子体参数进行了诊断. 本文系统研究了针-板介质阻挡放电中完整轮辐斑图的时空演化过程, 揭示了轮毂-轮辐-轮辋-分叉四阶段演化规律, 并结合光谱诊断分析了等离子体参数空间分布, 为理解针-板 DBD 自组织斑图形成机制提供了实验依据. 该研究对非线性动力学的发展具有一定的参考价值.

2 实验装置

实验是在开放大气、常温环境中进行的, 工作气体为空气. 如图 1 所示, 放电装置的接地端是一个圆形的罗戈夫斯基轮廓电极 (Rogowski-profile electrode), 简称罗氏电极, 在图 1 中用 RP electrode 表示, 电极整体外径为 80 mm, 有效放电区域直径 50 mm, 电极外缘转角做半径 3 mm 圆角过渡, 内侧台阶转角为半径 4 mm 圆角, 用于缓解边缘电场畸变, 避免尖端放电. 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 1 mm 的陶瓷介质板 (96% Al₂O₃) 置于罗氏电极上. 高压端为一根长 7.0 cm、直径 1.0 mm、针尖曲率半径 0.4 mm 的钨针, 实验中使用的是频率为 20 kHz 的正弦交流电源 (CTP-2000K), 钨针和介质板之间的气隙距离为 1 mm. 利用电压探头 (Tektronix P6015A)、电流探头 (Tektronix TCPA 300) 进行放电的电压、电流信号测量, 并将电信号通过数字存储示波器采集记录. 放电的发光信号经透镜汇聚后, 通过光纤 (PI LG-455-020-1) 传入光谱仪 (MS7504i), 采集放电的发射光谱. 放电图像由数码相机 (Canon EOS 5D) 和 ICCD (Andor DH334 T) 拍摄获得. 拍摄 ICCD 图像时, 利用同步触发装置将激励 DBD 的正弦信号转换为与之同步的晶体管逻

辑 (transistor-transistor logic, TTL) 信号触发 ICCD, 实现 ICCD 快门和放电的精确同步, 通过调节 ICCD 的延迟时间, 可以获得放电不同时刻的短曝光时间图像.

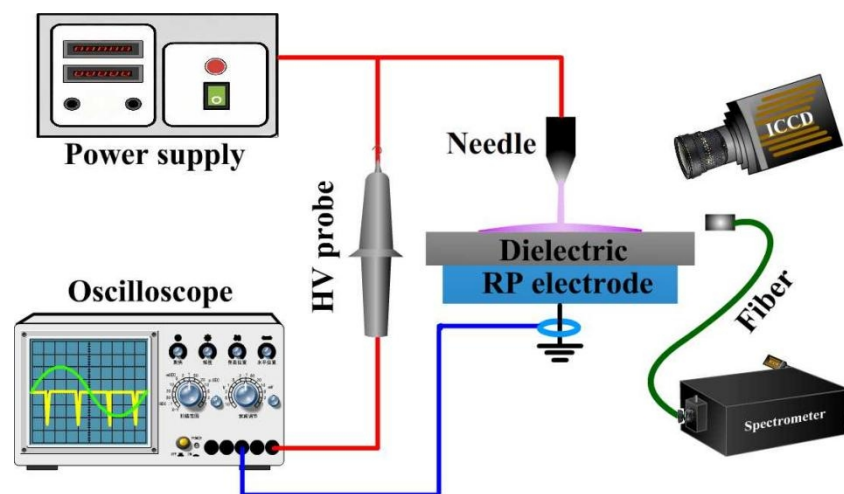


图 1 实验装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

3 结果与讨论

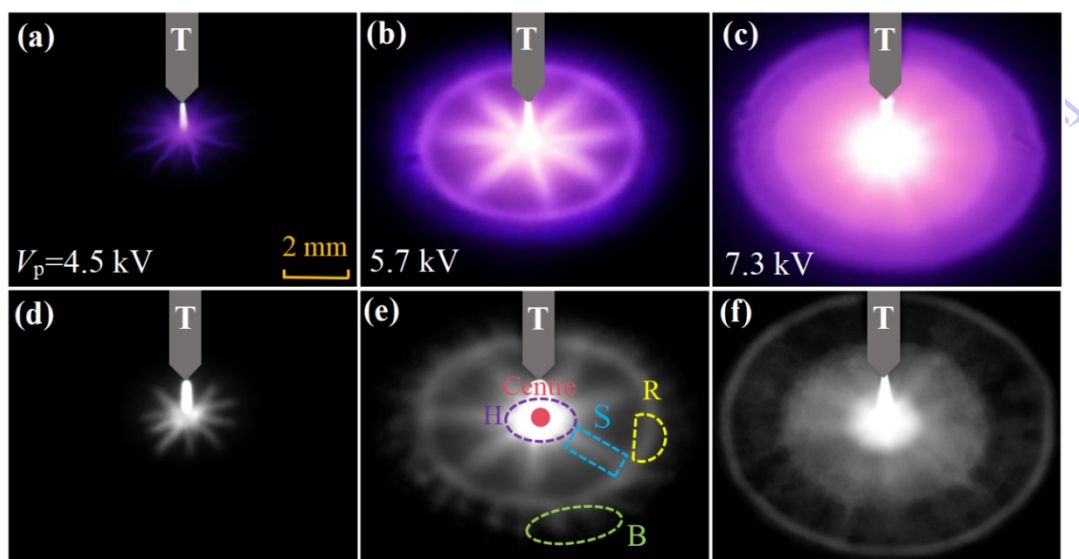


图 2 相机 (曝光时间 $t_{\text{exp}}=1/10$ s) 和 ICCD ($t_{\text{exp}}=50$ μs) 拍摄的针-板 DBD 随外加电压变化的放电图像($f=20$ kHz, 图中 T 代表针), (d)—(f) 分别为(a)—(c) 对应的 ICCD 拍摄图像

Fig. 2. The images of needle-plate DBD with varying applied voltage captured by a camera (exposure time $t_{\text{exp}}=1/10$ s) and an ICCD ($t_{\text{exp}}=50$ μs). ($f=20$ kHz, T represents the needle), (d)—(f) are the ICCD images corresponding to (a)—(c), respectively.

实验表明, 当外加电压逐渐升高时, 可依次出现如图 2 所示放电图像 (以 45° 俯视角度拍摄), 图像上栏为数码相机拍摄, 其曝光时间为 $1/10\text{ s}$, 下栏为 ICCD 相机拍摄的一个周期内的放电图像. 本文重点关注介质表面的放电发展, 从图中可以看出当外电压峰值 V_p 为 4.5 kV 时, 在陶瓷板表面产生从中心向外扩展的丝状放电, 但其放电区域很小, 如图 2(a)及 2(d)所示. 当 V_p 升高到 5.7 kV 时, 获得较稳定、结构清晰的轮辐斑图, 如图 2(b)所示, 该斑图由四部分组成: 放电中心, 用轮心 (wheel center) 来表示, 以及轮心周围的中心盘轮毂 (H:wheel hub); 由中心向外辐射的七条放电丝, 其看起来像车轮的辐条, 用轮辐 (S:spoke) 来表示, 另外, 轮辐最外端, 用辐端来表示; 围绕辐端的轮辋 (R:rim), 以及轮辋外围的电晕放电组成; 通过对比相机和 ICCD 拍摄的照片, 可以看出外围的电晕放电本质是由随机的放电丝组成的, 用 B (branch) 表示. 当电压继续升高, 陶瓷板表面仍可以维持图 2(b)所示的状态, 直到 V_p 升高到 7.3 kV 的时候, 放电开始变得弥散, 介质表面放电总面积明显增大, 从中心向外可看到三个明显的放电环, 并且其亮度沿径向由内向外逐渐减弱, 如图 2(c)所示. 对比图 2(c)及图 2(f)可知, 该弥散放电本质上并不均匀, 最外边的放电环主要是由细丝网状放电组成的.

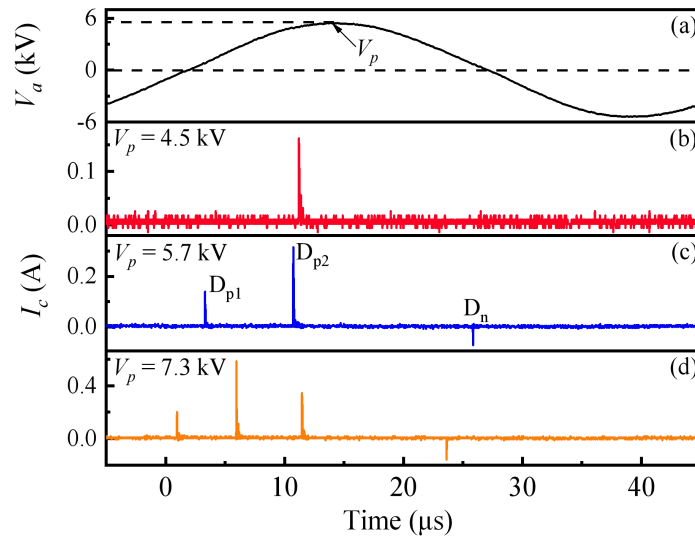


图 3 (a)电压波形图; (b)一(d)不同外加电压下的放电电流波形图

Fig. 3. (a) The waveform of the applied voltage; (b)一(d) are the discharge currents at different voltages.

图 3(a)为放电的典型的外加电压波形图, 其为频率为 20 kHz 的正弦交流电压, 图中 V_a 代表外加电压, V_p 代表峰值电压. 图 3(b)一(d)所示为三个放电图像对应的电流波形图, 图中 I_c 代表放电电流. 当 $V_p=4.5$ kV 时对应图 2(a)所示放电图像, 此时仅出现一次正放电, 出现在电压正半周期的上升沿, 其电流脉冲的半高宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 约为 220 ns; 当 V_p 升至 5.7 kV 时, 此时放电为轮辐斑图, 此时出现两次正放电, 均位于电压正半周期的上升沿, 分别命名为 D_{p1} 和 D_{p2} , 其脉冲的半高宽分别为 160 ns, 180 ns. 此时在正半周期的下降沿开始出现一个较弱的负放电 (D_n), 其脉冲的半高宽为 140 ns; 当 $V_p=7.3$ kV 时, 对应图 2(c)所示放电图像, 此时正放电脉冲增至三个, 负脉冲仍是一个, 但负脉冲强度基本不变.

可见, 随着外加电压升高, 正放电脉冲个数逐渐增多, 这一放电行为的演变与放电产生的空间电荷及电荷在介质表面上积累过程密切相关. 对于正放电 (针

尖为正极), 电子通过针尖进入回路, 而正离子会存留在放电间隙, 这些空间正电荷与针之间的电场会被削弱, 增强了其与板之间的电场^[33], 最终引发针-板间产生流光放电, 流光放电产生的大量电子迅速进入针尖, 正电荷留在空间形成流光头并继续向板方向迅速发展, 最终导致气隙击穿, 气隙击穿后大量正电荷积累在介质表面, 快速削弱其与针尖的电场, 导致放电熄灭. 但此时外加电压还在随时间而增加, 外加电场也增加, 当净电场再次达到击穿阈值时, 气隙间产生第二次正放电, 甚至第三次正放电^[34]. 当外加电压到达正半周期峰值后开始下降时, 外加电场也随之减弱. 此时, 针-板之间的空间电荷以及介质表面残留的带电粒子产生的内建电场开始占据主导地位. 内建电场的方向恰好与外加电场相反, 当外加电压降到足够低时, 内建电场彻底抵消并反超外加电场, 使得气隙间的电场方向发生反转; 随着外加电压的继续降低, 气隙在反向净电场作用下, 再次达到击穿电场, 产生负放电, 因此, 负放电在电压的正半周期的下降沿产生. 由于电子的迁移速度远高于正离子, 当气隙击穿后, 大量电子会快速中和介质表面的正离子, 并在介质表面积累, 使得针-板间的净电场被快速削弱, 导致放电快速熄灭, 因此负放电的脉宽及电流强度明显低于正放电. 放电熄灭后, 虽然外加电压随时间仍在升高, 但由于针尖附近聚集的正电荷及介质表面的电子产生的电场与外加电场的方向相反, 使得气隙间的净电场难以再次满足击穿阈值. 因此, 在该实验采用的 V_p 范围内, 每个电压周期只有一次负放电. 同理, 负放电产生的大量电子沉积在介质表面对下一次正放电也会产生很大的影响, 因此, 随着外加电压的增大, 第一次正放电的时间也相应提前.

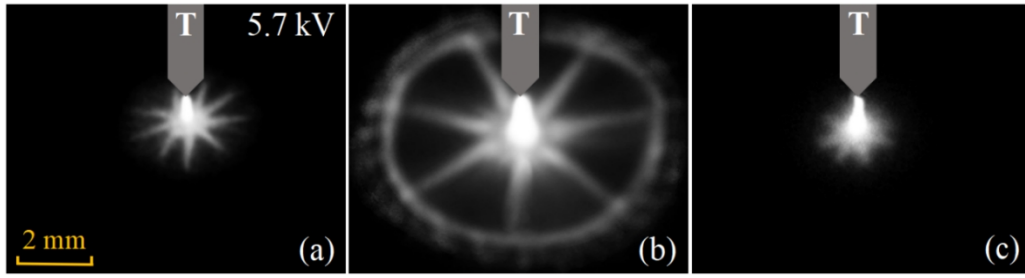


图 4 ICCD 拍摄的轮辐斑图对应的放电图像 ($t_{\text{exp}}=500$ ns, 单次拍摄), 分别对应图 3(c)中的 D_{p1} , D_{p2} , D_n

Fig. 4. Images of the spoke-like pattern discharge ($t_{\text{exp}}=500$ ns, single shot), corresponding to D_{p1} , D_{p2} , and D_n in Fig. 3(c), respectively.

下面重点对轮辐斑图的光电特性及形成机制进行深入研究. 图 4 为轮辐斑图三次放电脉冲 D_{p1} 、 D_{p2} 和 D_n 对应的 ICCD 放电图像. 从图 4(a)中可以看出, 第一次正放电针头垂直对应的介质板表面产生了随机的放电丝, 对应轮辐斑图放电的轮毂部分. 第二次正放电对应的图像如图 4(b)所示, 除了轮毂, 还形成了七条放电丝和一个外围圆盘, 对应轮辐斑图中辐条、轮辋和分叉部分. 正半周期下降沿的负放电看起来像一个小七角星, 如图 4(c)所示, 与正放电相比, 负放电的在介质表面并未有更大发展, 放电主要集中于针-板通道中. 即第一次正放电和负放电都是在较低的外加电压下形成的, 在气隙击穿后, 放电产生的空间电荷场与外加电场方向相反, 导致放电较快熄灭, 没有在介质表面形成有序空间图案. 第二次正放电是在更高的电场驱动下形成, 其形成过程涉及流光径向传播、轮辐选择、轮辋闭合及分叉过程, 从而独立构建出轮辐斑图的所有结构单元, 是形成轮辐斑图的关键放电.

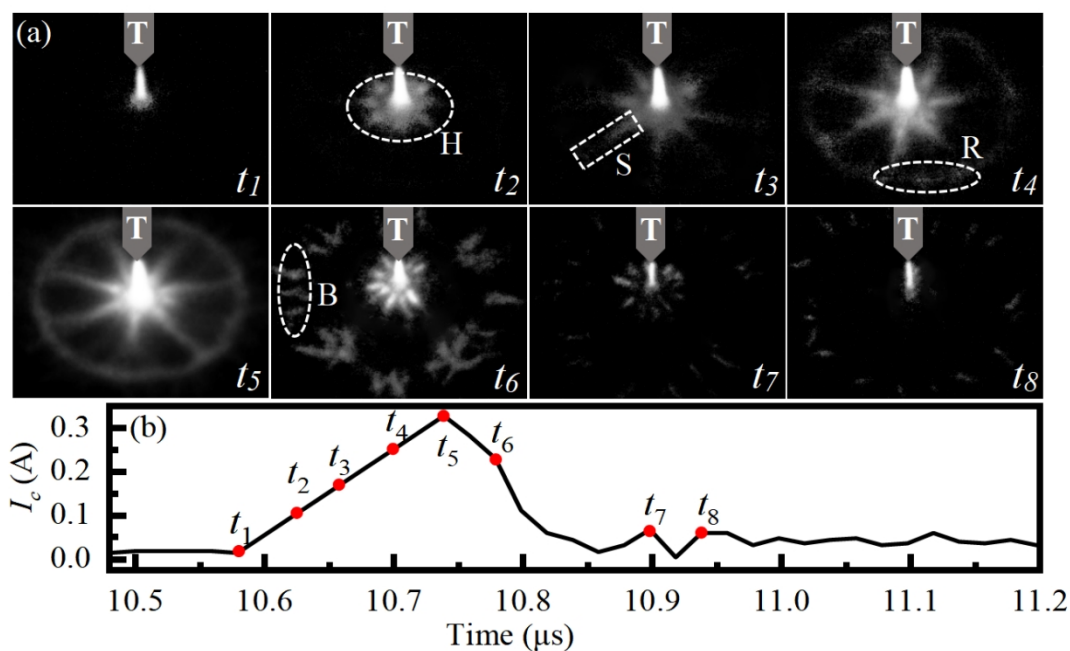


图 5 ICCD 拍摄的第二次正放电 ($t_{exp}=50$ ns, 单次拍摄) 随时间的演化图像 (a), 其对应的拍摄开始时刻标注在图 (b) 中, 图 (b) 为图 3(c)中 D_{p2} 电流局部放大图

Fig. 5. (a) ICCD images showing the temporal evolution of the second positive discharge ($t_{exp} = 50$ ns, single shot) , with the corresponding acquisition start times marked in (b) . Fig (b) is a partial enlargement of the D_{p2} current waveform in Fig 3(c).

利用 ICCD 相机对形成轮辐斑图的关键放电部分进行单次短曝光时间 ($t_{exp}=50$ ns) 时序拍摄, 进而分析其时空演化过程. 如图 5(a)所示为轮辐斑图的时间演化图像, 每幅图像的开始拍摄时刻对应图 5(b)中标注的 t_1-t_8 时刻. 放电接触到基底后首先在介质表面形成一个中心亮点(t_1); 随着电流的增大, 放电逐渐呈现出沿着径向由内向外发展的趋势(t_2-t_4), 在 t_2 时刻, 形成轮毂(H), 放电发展出七条呈轮辐状分布的放电丝; t_3 时刻, 轮辐(S)进一步扩展, t_4 时刻, 开始在轮辐末端 (辐端) 处逐渐形成轮辋(R), 至 t_5 时刻, 形成完整的轮辋, 此时放电电流也达到最大, 轮辐斑图的整体结构也非常清晰地显示出来; 之后随着电流的衰减, 放电逐渐减弱, 在 t_6 时刻, 轮心处放电也逐渐减弱, 轮辐消失, 轮毂放电减弱, 只

在轮端周围产生不规则的分叉(B); 随后随着电流的减小, 放电也逐渐消失(t_7-t_8).

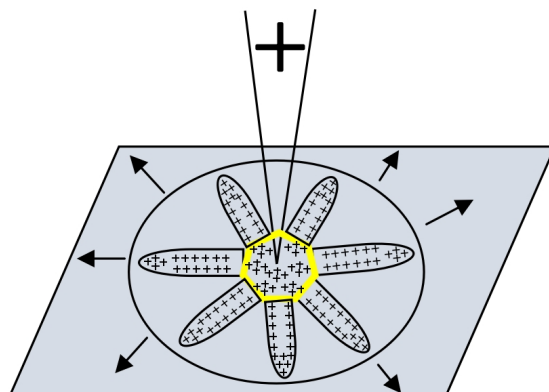


图 6 第二次正放电 (D_{p2}) 时轮辐斑图在介质表面形成的机理示意图

Fig. 6. Schematic illustration of the formation mechanism of the radial spoke-like pattern during the second positive discharge (D_{p2}).

图 6 为第二次正放电脉冲 D_{p2} 期间轮辐斑图在介质表面形成的机理示意图, 对应了放电从中心向外围演化的过程, 直观呈现了电荷分布. 当正电压施加于针电极时, 针尖处会产生局域极强电场, 导致附近气体先电离, 放电首先在针尖处产生, 电子在强电场作用下加速向针尖运动并形成初始电子雪崩^[32]. 由于电子迁移率远高于离子, 新产生的电子会迅速进入针电极, 而运动较慢的正离子则留在空间形成正空间电荷, 正空间电荷与针之间的电场被削弱, 并显著加强正空间电荷与板之间的电场, 当电场足够高时, 产生流注放电, 其头部主要由正离子构成, 形成增强局域电场的空间电荷区, 流注头部持续依靠光电离不断产生新电子, 推动通道向极板延伸^[35], 快速在针-板之间形成等离子体通道, 放电接触到基底后首先在介质表面形成一个中心亮点, 此时电子迅速通过等离子体通道进入针电极, 而大量正离子在介质表面积累, 形成正离子鞘层, 对应图 6 中心黄色边框内

区域. 在电场作用下, 正空间电荷在介质表面从中心向周围扩展, 放电逐渐呈现出沿着径向由内向外发展的趋势, 发展成七条轮辐, **对应图 6 径向辐条结构**. 其本质仍是流光机制, 由于局域电场、表面电荷分布以及电子密度涨落的随机性, 部分方向上的流光传播会优先增强^[36], 从而形成若干稳定的放电通道, 在本实验中表现为七条轮辐结构. 流光头部积累的正离子能够增强前沿区域的局域电场, 促进放电继续沿轮辐方向向外传播. 与此同时, 电子仍然会沿着等离子体通道快速进入针电极, 而正离子由于迁移率较低主要积累于流光头部及其后方区域, 导致介质表面形成的轮辐通道和中心轮毂表面沉积了大量表面电荷, 使轮毂和轮辐空间中产生净正电荷. 轮辐产生电场会中和周围的电子, 轮辐和轮辐之间区域的放电被抑制; 随着放电的发展, 轮端之间的距离逐渐增大, 对彼此之间的影响逐渐减小并消失, 在电场的作用下开始在辐端处逐渐形成轮辋, 轮辋是在轮辐末端发展并逐渐形成闭合, 结合 ICCD 结果分析, 在辐端区域, 表面电荷积累导致局域电场重新分布, 使得放电在径向发展的同时具有一定的切向扩展趋势^[37], 相邻轮辐前沿逐渐连接形成闭合轮辋, **对应图 6 外围环形结构**. 此时放电电流也达到最大, 轮辐斑图的整体结构也非常清晰地显示出来; 之后随着电流的衰减, 放电逐渐减弱, 随着电荷进一步积累和电场分布变化, 在后期流光头因能量耗散或不稳定性导致分叉; 随后随着电流的减小, 放电也逐渐消失.

轮辐斑图形成的物理过程: 首先, 针尖局域强电场诱导电子雪崩向流光放电转变, 并在针-板间形成稳定的放电通道, 大量正离子沉积于介质表面; 在流光机制作用下, 放电进一步沿介质表面径向传播, 产生的表面电荷重新分布局域电场, 轮辐内的净正电荷场抑制了轮辐之间的区域放电, 随着流光向辐端持续发展, 辐端间距增大使抑制作用减弱, 电场驱动表面电荷重新分布, 在辐端诱导切

向电场，推动相邻轮辐末端切向扩展并逐渐连接，随着电荷进一步积累和电场分布变化，同时流光头部能量耗散，引发流光不稳定性并产生分叉，从而形成稳定的轮辐状自组织结构。

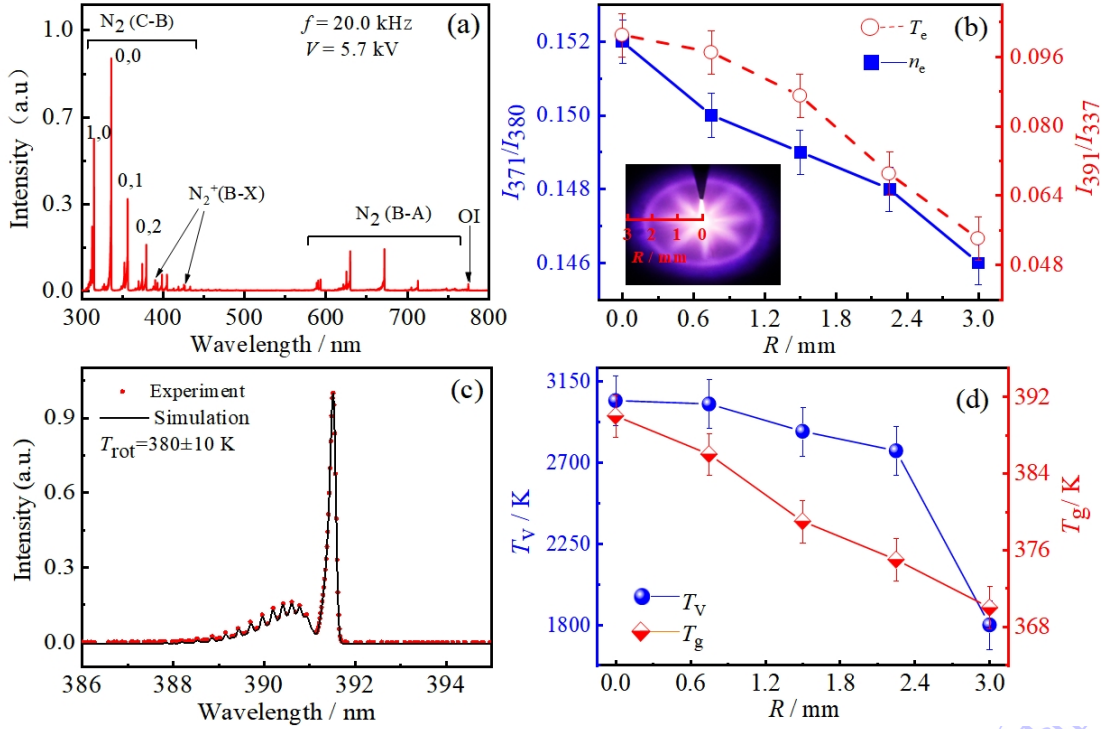


图 7 (a) 轮辐斑图在 300-800 nm 范围的发射光谱 ($V_p=5.7$ kV); (b) 谱线强度比随 R 的变化 (实验中光谱采集沿轮辐径向, R 是相对轮心的距离); (c) N_2^+ (B-X) 转动谱带拟合结果; (d) 分子振动温度和转动温度随 R 的变化

Fig. 7. (a) Emission spectra of spoke-like pattern in the range of 300-800 nm ($V_p= 5.7$ kV); (b) Variation of spectral line intensity ratio with R (spectra are acquired radially along the spoke, R is the distance measured from the wheel center); (c) Fitting results of the N_2^+ (B-X) rotational band; (d) Changes of molecular vibration temperature and rotational temperature with R .

图 7(a)所示为轮辐斑图在 300—800 nm 范围内的发射光谱，主要包括氮分子的第二正带系 N_2 ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$)、第一正带系 N_2 ($B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$)、氮分子离子的第一负带系 N_2^+ ($B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$) 以及氧原子 O I ($3p^5P \rightarrow 3s^5S$) 的谱线^[38,39]，利用这些谱线可对等离子体参数进行估算。电子密度 (n_e) 和电子温度 (T_e) 分别正相关于谱线 371 nm/380 nm 和 391 nm/337 nm 的强度比^[40,41]，图 7(b)给出了相关谱

线强度比, 随距轮心距离 (0、0.75、1.5、2.25、3 mm) 的变化曲线. 可以看出, 随着 R 增大 n_e 和 T_e 呈下降趋势. T_e 与电场强度密切相关, 电场强度可通过 391 nm/337 nm 强度比间接反映^[41], 如图 7(b)所示, T_e 随 R 的增大而减小, 故电场强度也随之减小. 转动温度 (T_{rot}) 通过采用 LIFBASE 软件拟合 N_2^+ (B-X) 的转动光谱获得^[42], 如图 7(c)所示, 通过调整软件参数, 当理论谱线与实验谱线完全重合时, 可以得到相应的 T_{rot} , 气体温度 (T_g) 近似为 T_{rot} ^[42,43]. 因此, 根据图 7(c)的拟合结果, 等离子体的 T_g 约为 380 K. 振动温度 (T_v) 可以通过 N_2 的第二正带系光谱获得^[43], 如图 7(d)所示, 为 T_v 和 T_g 随 R 的变化关系, 可见随着 R 的增大, T_v 和 T_g 在减小. 电场强度越小, 电离率随之降低, 电子碰撞电离减弱, 电子从电场中获得的能量减少, 高能电子比例下降, 从而难以有效激发更高的振动能级^[44]. 如图 7(d)所示, 随着离中心距离的增加, T_v 呈减小趋势.

另外, Mu 等人^[32]利用针-板电极, 采用电荷模拟法计算了表面电荷诱导的电场分布, 发现水平电场 E_r 随离中心距离 r 的增加而减小. 本实验中, T_v , T_{rot} , n_e 及 T_e 均随 R 增大而减小, 与 Mu 等人的模拟趋势一致. 该理论分析与实验中获得数据的结果相符.

4 结 论

本文在大气压空气针-板 DBD 中获得了稳定的轮辐斑图, 并对其时空演化特性及形成机理进行了研究. 实验结果表明, 轮辐斑图仅在特定外加电压条件下稳定存在, 其形成主要依赖于正半周期中的第二个放电脉冲 D_{p2} . ICCD 单次短曝光结果显示, 该放电脉冲经历了轮毂形成、轮辐扩展、轮辐闭合及后期分叉四个阶段, 揭示了放电由中心向外围发展的动态演化过程. 针尖局域强电场首先诱导电子雪崩并迅速发展为流光放电, 并在针-板间形成稳定的放电通道, 使得大量

正离子在介质表面沉积；在流光机制的作用下，促使放电从轮心沿介质表面径向传播，形成七条轮辐，同时，表面电荷建立的局域电场会抑制邻近区域放电；轮辐的形成与辐端间距增大使抑制作用减弱以及表面电荷的重新分布有关。发射光谱诊断结果表明，电子密度、电子温度、振动温度及转动温度均随 R 的增大而逐渐减小，说明轮辐斑图内部存在由中心向外围递减的电场分布，这与表面电荷诱导电场的空间分布规律一致。此外，电极间距与驱动频率对轮辐斑图的形貌演化具有显著调控作用：随电极间距减小，斑图的径向扩展范围逐渐缩小，轮辐数量增多，最后变成弥散放电；随驱动频率升高，斑图面积持续增大，放电强度不断增强，轮辐数量增加，最终也演化为弥散放电。反之，当电极间距增大或驱动频率降低时，轮辐结构逐渐消失，斑图退化为初始的中心丝状放电。本研究表明，针-板 DBD 轮辐斑图主要与流光机制和表面电荷有关，等离子体参数随电场衰减呈中心高、外围低的分布。本文仅在空气、1 mm 气隙和 20 kHz 条件下开展研究，其普适性仍需进一步验证，后续将系统研究参数空间中的斑图分岔，并考察不同介质材料的影响。上述结果不仅揭示了针-板 DBD 轮辐斑图的形成机制，也为理解针-板结构中自组织斑图提供了实验依据。

参考文献

- [1] Werner T, Koshikawa S, Williams T M, Carroll S B 2010 *Nature* **464** 1143
- [2] Gurevich E L, Zanin A L, Moskalenko A S, Purwins H G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 154501
- [3] Epstein T, Fineberg J 2006 *Phys. Rev. E* **73** 055302
- [4] Topaz C M, Porter J, Silber M 2004 *Phys. Rev. E* **70** 066206
- [5] Perkins A C, Grigoriev R O, Schatz M F 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 064501
- [6] Dong L F, Li Y H, Yan Z H, He Y N, Li C, Pan Y Y 2025 *Chaos Soliton. Fract.* **200** 117023
- [7] Callegari T, Bernecker B, Boeuf J P 2014 *Plasma Sources Sci. Technol.* **23** 054003
- [8] Li C X, Feng J Y, Wang S C, Li C, Ran J X, Pan Y Y, Dong L F 2024 *Plasma Sci. Technol.* **26** 085401
- [9] Dong L F, Zhang L J, He Y N, Wei T, Li Y H, Li C, Pan Y Y 2024 *Appl. Phys. Lett.* **125** 104101
- [10] Penache C, Gessner C, Betker T, Bartels V, Hollaender A, Klages C P 2004 *IEE Proc. Nanobiotechnol.* **151** 139
- [11] Kogelschatz U 2003 *Plasma Chem. Plasma Process.* **23** 1
- [12] Brandenburg R, Becker K H, Weltmann K D 2023 *Plasma Chem. Plasma Process.* **43** 1303
- [13] Dong L F, Chen H R, Sun F X, Yan Z H, He Y N, Fan W L, Pan Y Y 2026 *Sci. Sin.-Phys. Mech. Astron.* **56** 235211 (in Chinese) [董丽芳, 陈浩然, 孙凤霞,

燕兆赫, 贺玉楠, 范伟丽, 潘宇扬 2026 中国科学: 物理学 力学 天文学 **56**
235211]

[14]Noma Y, Choi J H, Stauss S, Tomai T, Terashima K 2008 *Appl. Phys. Express* **1**
046001.

[15]Ran J X, Zhang H, Chen Q Y, Zhou Y X, Su T, Li Q, Li X C 2025 *Acta Phys. Sin.*
74 185202 (in Chinese) [冉俊霞, 张寒, 陈沁怡, 周奕汛, 苏彤, 李庆, 李雪
辰 2025 物理学报 **74** 185202]

[16]Li Z Y, Jin S H, Xian Y B, Nie L L, Liu D W, Lu X P 2021 *Plasma Sources Sci.*
Technol. **30** 065026

[17]Li X C, Liu R, Jia P Y, Wu K Y, Ren C H, Yin Z Q 2018 *Phys. Plasmas* **25**
013512

[18]Zhang J H, Pan Y Y, Feng J Y, He Y N, Chu J H, Dong L F 2023 *Plasma Sci.*
Technol. **25** 025406

[19]Zhang Y H, Ning W J, Dai D, Wang Q 2019 *Plasma Sources Sci. Technol.* **28**
075003

[20]Liu W B, Dong L F 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 245202 (in Chinese) [刘文波, 董
丽芳 2015 物理学报 **64** 245202]

[21]Mi Y L, Dong L F, Liu B B, Sun H Y, Huang J Y, Han R, Cui Y Q, Hao F, Liu F C,
Pan Y Y 2018 *Phys. Plasmas* **25** 123502

[22]Wei T, Dong L F, Zhang L J, He Y N, Li Y H, Li C, Pan Y Y 2024 *Sci. Sin.-Phys.*
Mech. Astron. **54** 105211 (in Chinese) [卫婷, 董丽芳, 张立佳, 贺玉楠, 李耀
华, 李骋, 潘宇扬 2024 中国科学: 物理学 力学 天文学 **54** 105211]

- [23] Li X C, Niu D Y, Jia P Y, Zhao N, Yuan N 2011 *Plasma Sci. Technol.* **13** 213
- [24] Sun Y Z, Liu X G, Dong K L, Xie C W 2019 *Phys. Scr.* **94** 085602
- [25] Wiwoho N, Wongsawaeng D, Kongprawes G, Saengkaew P, Swantomo D 2025 *Sci. Rep.* **15** 23401
- [26] Yang H L, Feng C L, Gao L, Ding H B 2015 *Jpn. J. Appl. Phys.* **54** 106201
- [27] Oliveira R M S D, Alcantara L D S D, Oliveira C B O D, Lopes N M, Zampolo R F, Dmitriev V 2025 *IEEE Access* **13** 3599689
- [28] Dong L F, Ji Y F, Liu W Y, Chen J Y, Yang Y J 2012 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **40** 1701
- [29] Yu Z, Zhang Z T, Yu Q X, Xu S J, Yao J, Bai M D, Tian Y P, Liu K Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 195202 (in Chinese) [俞哲, 张芝涛, 于清旋, 许少杰, 姚京, 白敏冬, 田一平, 刘开颖 2012 物理学报 **61** 195202]
- [30] Sun S K, Chen Y, Yuan P, Xu L S, Zhang Y F, Wei L S 2022 *Ozone: Sci. Eng.* **44** 44
- [31] Yu G, Peng B, Jiang N, Wang R, Sun H, He J, Shang K, Lu N, Li J 2024 *Plasma Process. Polym.* **21** e2300176
- [32] Mu H B, Zhang G J, Komiyama Y, Suzuki S, Miyake H, Tanaka Y, Takada T 2011 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **18** 485
- [33] Komuro A 2025 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **58** 133003
- [34] Wu K Y, Ren C H, Jia B Y, Lin X, Zhao N, Jia P Y, Li X C 2019 *Plasma Process. Polym.* **16** e1900073
- [35] Wormeester G, Pancheshnyi S, Luque A, Nijdam S, Ebert U 2010 *J. Phys. D:*

Appl. Phys. **43** 505201

[36]Nijdam S, Teunissen J, Ebert U 2020 *Plasma Sources Sci. Technol.* **29** 103001

[37]Wu K Y, Zhao N, Wu J C, Zhang F R, Niu M Y, Ran J X, Jia P Y, Li X C 2022

Plasma Process. Polym. **19** e2200003

[38]Li X C, Wu K Y, Liu R J, Yang L W, Geng J L, Wang B, Jia P Y 2019 *IEEE Trans.*

Plasma Sci. **47** 1330

[39]Wu J C, Li X C, Ran J X, Jia H X, Wu K Y, Han G X, Liu J N, Chen J Y, Pang X

X, Jia P Y 2023 *Plasma Process. Polym.* **20** e2200188

[40]Paris P, Aints M, Valk F, Plank T, Haljaste A, Kozlov K, Wagner H 2005 *J. Phys.*

D: Appl. Phys. **38** 3894

[41]Wu K Y, Zhao N, Niu Q M, Wu J C, Zhou S, Jia P Y, Li X C 2022 *Plasma Sci.*

Technol. **24** 055405

[42]Tu X, Yan J H, Ma Z Y, Li X D, Pan X C, Cen K F, Cheron B 2006 *Spectrosc.*

Spectr. Anal. **26** 2161 (in Chinese) [屠昕, 严建华, 马增益, 李习栋, 潘新潮,

岑可法, Cheron B 2006 光谱学与光谱分析 **26** 2161]

[43]Qi F, Li Y, Zhou R, Zhou R, Wan J, Xian Y, Cullen P, Lu X, Ostrikov K 2019

Appl. Phys. Lett. **115** 194101

[44]Ristić M, Poparić G B, Belić D S 2007 *Chem. Phys.* **331** 410

Spatiotemporal and spectral characteristics of spoke-like pattern in a needle-plate dielectric barrier discharge*

RAN Jun-Xia¹⁾²⁾ GAO Cui-Ying¹⁾ LIU Tian-Yu¹⁾ ZHOU Ming-Zhu¹⁾ ZHANG Hong-Lei¹⁾ DU Rui¹⁾ DAI Xiu-Hong¹⁾ LI Xue-Chen¹⁾[†]

1) (College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

2) (Engineering Research Center of Zero-carbon Energy Buildings and Measurement Techniques, Ministry of Education, Baoding, 071002, China)

Abstract

Dielectric barrier discharge (DBD) can generate various of self-organized static and dynamic discharge patterns, making it one of the most important physical systems for investigating nonlinear dynamics. In this work, a stable spoke-like pattern is generated in an atmospheric-pressure air needle-plate DBD system driven by a 20 kHz alternating current (AC) voltage with a 1 mm discharge gap. The spatiotemporal characteristics and formation mechanism of the pattern are investigated by means of electrical and optical diagnostics. The discharge characteristics are analyzed by synchronously measuring the voltage and current. The results show that the spoke-like pattern involves two positive discharge events occurring on the rising edge of the positive half-cycle and one negative discharge occurring on the falling edge of the positive half-cycle, while the second positive discharge dominates the final morphology. The spatiotemporal

evolution of the second positive discharge is studied using an intensified charge-coupled device (ICCD). It reveals that the formation of the spoke-like pattern undergoes four successive stages: hub formation, spoke development, rim formation, and branching. The emission spectra at different radial positions of the spoke-like pattern are measured and analyzed, and a spatially resolved diagnosis of plasma parameters is performed. The electron density, electron temperature, molecular vibrational temperature, and molecular rotational temperature are determined based on optical emission spectroscopy. It is found that the electron density, electron temperature, molecular vibrational temperature, and molecular rotational temperature all decrease gradually from the center toward the periphery of the pattern, which is consistent with the spatial attenuation of the electric field strength. The formation of the spoke-like pattern is closely associated with streamer propagation and surface-charge effects. This work reveals the multistage evolution behavior of the spoke-like pattern and the spatial distribution characteristics of plasma parameters in a needle-plate DBD, providing experimental evidence for revealing the formation mechanism of self-organized discharge structures in needle-plate DBD.

Keywords: dielectric barrier discharge, pattern discharge, spatio-temporal evolution, surface charge

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12375250, 11875121), and the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grants Nos. A2026201004).

† Corresponding author. E-mail: plasmalab@126.com

The first author. E-mail: rjxhbu@hbu.cn

录用稿件，非最终出版稿