双间隙构型中介质阻挡放电图样的放电特性与参数诊断*

田爽[1], 张涵[1], 张曦[1], 张雪雪[1], 李雪晨[1], 李青[1,2],冉俊霞[1,2]

1.河北大学物理科学与技术学院，中国保定 071002

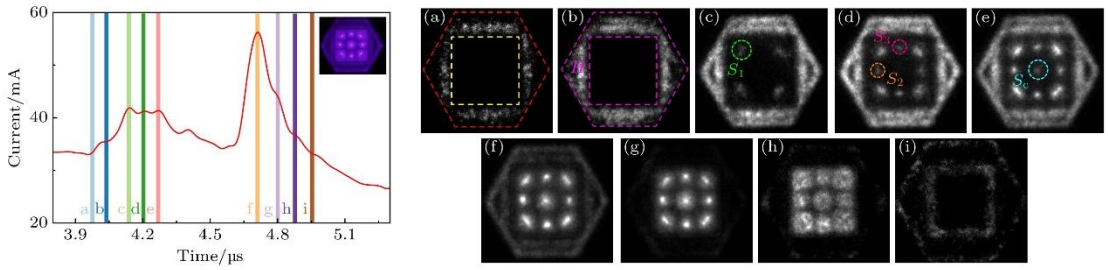
2.零碳能源建筑与测量技术工程研究中心（教育部），中国保定 071002

摘要

图案放电是介质阻挡放电（DBD）中的一种常见模式，在材料表面处理、环境监测和生物医学应用等多个工业领域具有广阔的应用前景。在本研究中，采用75%氩气和25%空气的混合气体产生图案放电。使用由六边形构型和正方形构型组成的双间隙边界，并将气体压力固定为20 kPa。通过改变施加电压的振幅，首次获得了单环图案、方点线图案、方形晶格图案和环形晶格图案。采用光学方法和电学方法研究了放电特性及其时间相关性。结果表明，在电压周期的每个半周期内，放电图样均会发生多次放电，且这些放电之间存在时间相关性。利用增强型电荷耦合器件（ICCD）捕获了方形晶格图案的时间分辨放电图像。实验结果表明，半个电压周期内的多次放电对应于图案沿径向由外向内的点火过程。肉眼观察到的方形晶格图案形貌，实际上是演化过程中不同位置的点所发出发光的时间叠加结果。通过电场模拟和理论计算分析了该图案的形成机制。通过采集方点晶格图案的发射光谱，对等离子体参数进行了诊断。结果表明，电子密度沿径向从外部区域向内部区域逐渐降低，而电子温度和分子振动温度则沿径向从外部区域向内部区域逐渐升高，分子转动温度基本保持不变。方形晶格图案的时间演化如下图所示，其中电流

* 本文为《物理学报》发表的中文原文的英文译本。引用格式如下：**田爽、张涵、张曦、张雪雪、李雪晨、李青、冉俊霞：《双间隙构型中介质阻挡放电图样的放电特性与参数诊断》**。《物理学报》，2025，74(11)：115202。数字对象标识符：10.7498/aps.74.20250111

波形标记了完整方形晶格图案的每一帧ICCD成像的时刻。



关键词：放电阻挡放电，图案放电，时空演化

PACS：52.35.Mw，47.54.–r，52.80.Tn

数字对象标识符：
10.7498/aps.74.20250111

科学数据标识符：
32037.14.aps.74.20250111

1. 引言

介质阻挡放电（DBD）被认为是生成低温等离子体的经济、广泛且可靠的方法之一[1–3]。它广泛应用于表面处理[4]， 臭氧生成[5,6]， 催化[7,8],生物医学[9,10] 和材料沉积[11]等各种技术领域。一般而言，DBD在空间上可呈现三种模式：由大量随机分布的放电丝形成的丝状放电模式、由具有时空分布的微放电组成的图案模式，以及均匀或弥散模式[12,13]。在一定条件下，使用氦或氖作为工作气体更容易实现均匀或弥散放电[14–16]。当工作气体为氩气或混合气体时，丝状放电模式最为常见[17,18]。在适当条件下，电极之间的微放电通道可以自组织形成具有精细且有序宏观结构的图案[19,20]。过去20年来，DBD系统中形成的图案一直受到广泛关注[21]。电压幅值[22], 驱动频率[23], 间隙宽度[24], 气体含量[25],气体压力[26] 等实验条件会影响图案的结构。此外，如果放电区域存在边界，边界附近的电场将发生畸变，使边界附近的电场和壁面电荷分布不同于边界内部，从而影响自组织图案的形成与演化[27–29]。通过改变实验条件，研究人员观察到了一系列空间上规则且稳定的图案，包括方形图案[30,31]，蜂窝六边形

图案[32]，条纹图案[33]，同心环图案[34] 和超晶格图案[35]。研究发现，空间中的规则图案在时间上也呈现出规则的演化过程[36,37]。Pan等人[38] 发现了一种具有暗放电的蜂窝-Kagome六边形超晶格图案。其时空结构由三个相互交错的子晶格组成。每个电压半周期内有三个电流脉冲，每个电流脉冲对应一组子晶格。Li等人[39] 发现了一种由五个子晶格组成的三维图案。每个电压半周期内有三个电流脉冲，其中一些电流脉冲包含两个子晶格放电。该图案的时空结构是子晶格重叠的结果。这表明图案的演化过程具有多样性，而演化过程的差异与形成机制有关。因此，可以通过分析演化过程对其机制进行深入研究。

本文设计了一种特殊的组合气隙，并观察到在由正六边形和正方形构成的双重边界条件下形成的一系列新图案。利用增强型电荷耦合器件（ICCD）拍摄的短曝光照片，研究了方形晶格图案的时间演化行为，并通过发射光谱诊断了该图案的等离子体参数。这种图案丰富了介质阻挡放电中的图案多样性，相关研究为其他实验系统中图案的研究提供了理论参考。

2. 实验装置

实验装置的示意图如图 1(a)所示。两个内径为 80 mm 的圆柱形容器相对放置，两端均用厚度为 1 mm 的石英玻璃板密封，作为介质阻挡放电的介电层。容器内装满水，两个铜环分别浸入水中，形成介质阻挡放电的水电极。一个铜环连接正弦交流电源（Nanjing Suman CTP-2000 K），另一个铜环接地。两个带有方形孔（边长 20 mm）和正六边形孔（边长 20 mm）的石英玻璃框厚度均为 2 mm，固定并压紧在两个水电极之间。介电层和石英玻璃框的排列方式如图 1(a)所示。实验过程中，两个石英玻璃框紧密贴合，固定并压紧在两层石英介电层之间，如图 1(b)的侧视图所示。也就是说，图中四边形区域内的空气间隙为 4 mm，四边形边界与六边形边界围成的区域内的空气间隙为 2 mm。整个装置置于充有混合气体（氩气 75%、空气 25%，压力 20 kPa ）的真空腔室中。施加电压由高压探头（ Tektronix P6015A ）测量，放电电流由电流探头（Tektronix TCPA 300）测量。放电的发光信号由光电倍增管测量

该光电倍增管（PMT）（ET 9130/100B）通过石英透镜接收信号。施加电压、放电电流和发光信号的波形由示波器（Tektronix DPO4104）记录并显示。放电图像由数码相机（Canon EOS 5D）和增强型电荷耦合器件（ICCD）（Andor DH334T）拍摄。使用自制触发器将激励介质阻挡放电的正弦信号转换为同步的晶体管-晶体管逻辑（TTL）信号，用于触发 ICCD 和示波器。由于放电时间与激励电压之间存在一定的抖动，为实现 ICCD 快门与放电的精确同步，同时将 TTL 信号和放电发光信号输入示波器，并通过调节 ICCD 的延迟时间，在示波器上获取 ICCD 相对于放电的曝光时间。放电的发光信号经透镜汇聚后，通过光纤（PI LG-455-020-1）传输至光谱仪（PI ACTON SP2750），以采集放电的发射光谱。

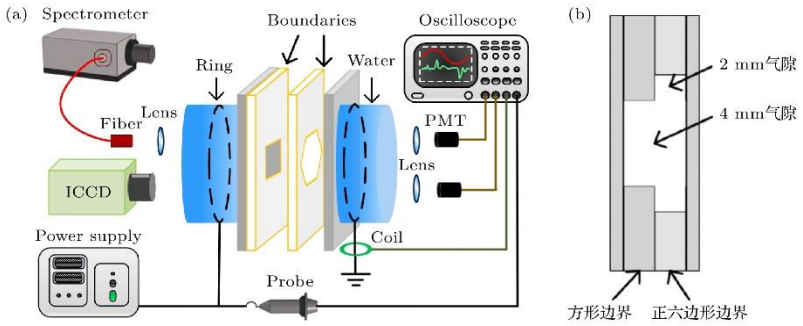


图 1. (a) 实验装置示意图；(b) 间隙结构侧视图。

3. 结果与讨论

图 图 2(a) —(d) 展示了放电图样随施加电压的变化。当施加电压峰值V_a 为 2.9 千伏时，会形成单环图案，如图 2(a)所示。在此图中，2 mm 空气间隙下，正六边形边界与正方形边界所围区域内出现的光晕以H表示；4 mm 空气间隙下，正方形边界内环形区域的内侧部分以R表示；环外的光晕以H'表示。当V_a增至 3.1 千伏时，环形区域分裂成方形点线结构，如图 2(b)所示，称为方形点线图案。正方形边界顶点附近的发光点以S表示，纵向边界线附近的发光线以L_1, 表示，横向边界线附近的发光线以L_2表示。随着V_a 进一步增至 3.3 千伏，方形点线图案中的发光线变为发光点，且中心区域出现一个发光点，形成方形晶格图案，如图 2(c)所示。在方形晶格图案中，正方形边界顶点附近的点以S_1, 表示；纵向边界附近的点以 S_2, 表示；横向边界附近的点以 S_3, 表示；中心处的点

正方形边界上的点记为 S_{co}。当 V_a 继续升至 3.5 千伏时，S_2, S_3 和 S_c 在方形晶格图案中分裂，形成环形晶格图案，如图 2(d)所示。此时，矩形晶格图案中正方形边界顶点附近的点'以$_1$, 表示；纵向边界附近的点以$_2$, 表示；横向边界附近'的点记为$_3$, ；矩形晶格中心'处的点记为$_4$。

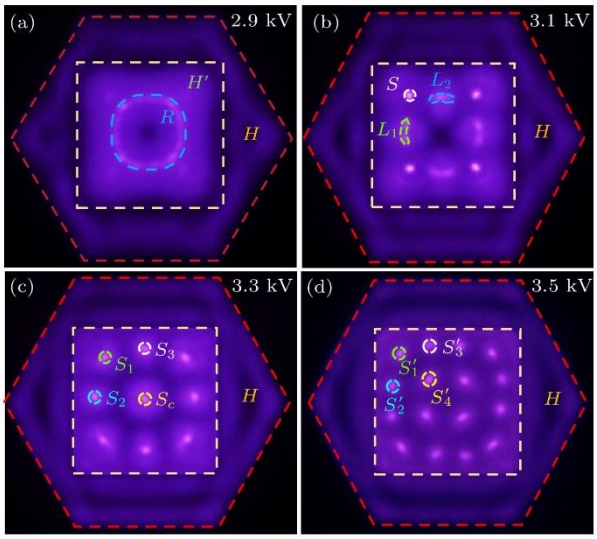


图2。 不同施加电压下、曝光时间为 0.1 s 的图案化放电。

图3(a) —(d) 对应于图2(a)—的放电施加电压与放电电流波形(d)。研究发现，在单环图案、方形点线图案和方形晶格图案中，每个半电压周期始终有两个电流脉冲。第一个电流脉冲的强度较小，第二个电流脉冲的强度较大。对于环形晶格图案，每个半电压周期内有四个不同的电流脉冲，且第一个电流脉冲的振幅最大。

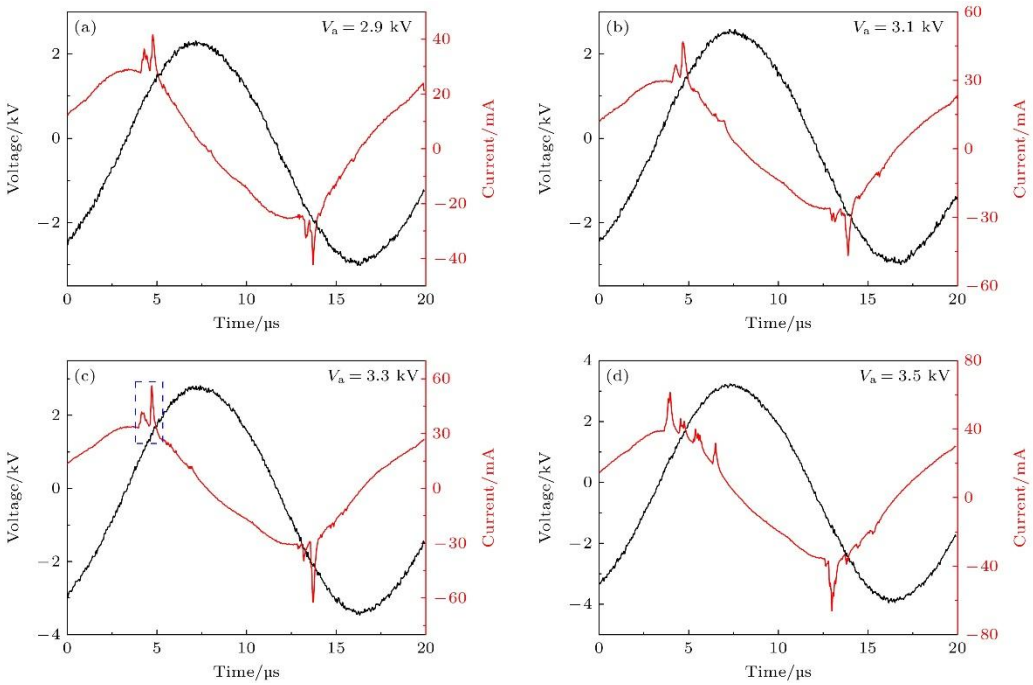


图 3. 不同图案下施加电压和放电电流的波形。

为研究图案中各发光点的放电时间行为，H 区域的整体变化较小，因此选择对其进行整体研究；图案的其余部分则根据图案的对称性选取进行研究。使用高灵敏度光电倍增管，精确测量了图2 中四种图案标记位置处放电丝的光学特性，如图4所示。结果表明，在四种图案中，由正六边形边界至正方形边界所围成的区域（H）最先放电。对于单环图案，4 mm空气间隙内的环（R）立即开始放电，随后是电晕（H'），如图4(a)所示。对于方形点线图案，4 mm空气间隙内靠近正方形边界四个顶点的发光点（S）最先放电，随后是靠近边界线的发光线（L_1 和 L_2），如图4(b)所示。对于方形晶格图案，在4 mm空气间隙内，正方形边界四个顶点附近的发光点（S_1）最先放电，接着边界线附近的发光点（S_2 和S_3）放电，最后中心区域的发光点（S_c）放电，如图4(c)所示。对于环形晶格图案，4 mm空气间隙内正方形边界四个顶点附近的发光点（1）最先放电，接着边界线附近的发光点（2 和 3）放电，最后矩形中心的发光点（4）放电。在4 mm空气间隙内可以清楚地观察到，越靠近边界，放电时间越早，也就是说，相应的放电整体呈现由外向内的发展趋势。

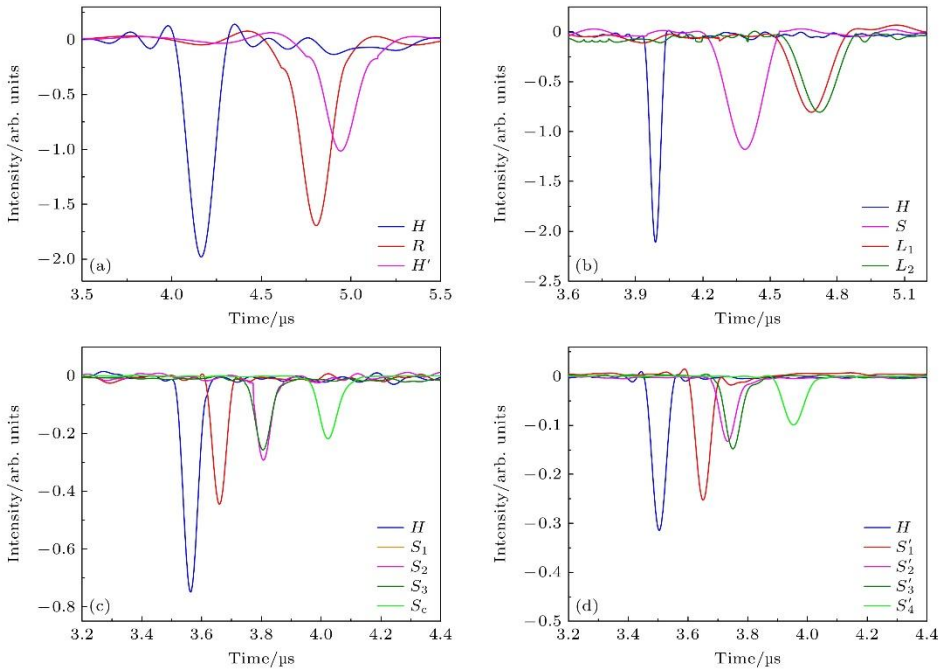


图4。 模式的时间相关性：（a）–（d）分别对应 图2(a)-(d)。

为了更清楚地研究整个放电图样的时间演化行为，使用ICCD相机以短曝光时间拍摄方形晶格图案。上方的波形图5是图3(c)中蓝线圈出的电流脉冲的局部放大图。图5下方是放电过程中拍摄的单次放电图像（曝光时间为t_{exp} = 20 ns），其中图5(a)—(i) 的拍摄时刻分别对应上方图5波形上的时刻a—i。从图5可以看出，放电首先发生在2 mm空气间隙区域（时刻a）。随着放电电流增大，放电逐渐充满整个2 mm空气间隙区域（时刻b）。随后，在正方形边界顶点附近区域的S_1 位置出现一根放电丝（时刻c）。接着，放电丝出现在S_2 和S_3 位置（时刻d），最后出现在S_c 位置（时刻e）。在电流最大值时刻（时刻f），可以清晰地观察到完整的方形晶格图案。随后，放电开始逐渐减弱，首先是正六边形边界区域内的放电开始减弱（时刻g）。之后，正方形边界区域内的放电整体开始减弱（时刻h）。时刻i时，两个边界的边缘附近仍有放电，随后随着电流减小，放电逐渐消失。在上述过程中可以发现，方形晶格图案沿径向由外向内逐渐形成。这与此前使用光电倍增管测量各位置发光信号所得结果一致，即肉眼所见的方形晶格图案形貌，实际上是图5所示演化过程中不同位置这些点的叠加。

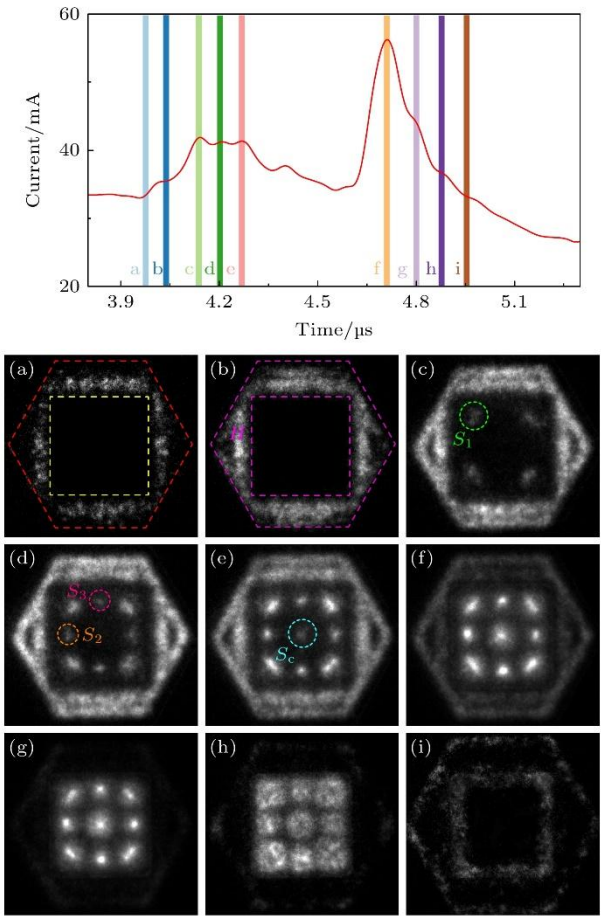


图5. 方形晶格图案的时间演化。电流波形显示了ICCD拍摄每张图片的时间，曝光时间为20 ns（单次拍摄）。

施加电压相同时，不同空气间隙中的电场不同。可以通过等效电路计算不同空气间隙的击穿电压，进而得到击穿电场[40]。图6(a)为介质阻挡放电的等效电路。首次击穿前，空气间隙的等效电容C_g与阻挡介质的等效电容C_{m1}、C_{m2}串联，并对施加电压$V_a(t)$进行分压。空气间隙电压$V_g(t)$的增大完全取决于$V_a(t)$的增大。只有当$V_a(t)$达到某一数值，使$V_g(t)$达到空气间隙的静态击穿电压V_{b0}时，空气间隙才会发生击穿。V_{b0}可由式(1)计算。实验中，不同空气间隙对应的阻挡介质厚度不同，因此不同的C_g对应不同的C_{m1}、C_{m2}。C_{m1}、C_{m2}可由平板电容公式计算。C_m为阻挡介质等效电容之和，由式(2)计算。击穿电场E可由式(3)得到：

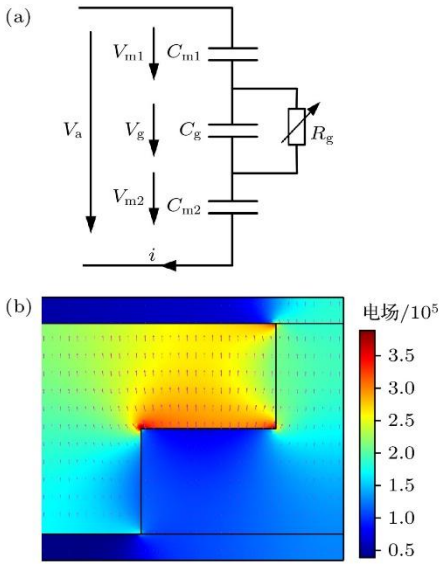


图6. (a) 介质阻挡放电的等效电路图；(b) 外加电场的仿真结果。

$$V_{b0} = \frac{C_m}{C_m + C_g} V_a, \tag{1}$$

$$\frac{1}{C_m} = \frac{1}{C_m 1} + \frac{1}{C_m 2}, \tag{2}$$

$$E = \frac{V_{b0}}{d}. \tag{3}$$

根据公式（1）—（3），2 mm 空气间隙处的电场强度为 480 kV/m，高于 4 mm 空气间隙处的 330 kV/m。根据气体放电理论，电场强度较高的位置会首先放电，因此正六边形边界区域（H）首先放电，这也与图 6(b)中的静电场仿真结果一致。从图 6(b)可以看出，2 mm 空气间隙处的电场强于 4 mm 空气间隙处。在后续过程中，随着施加电压不断升高，放电向 2 mm 空气间隙与 4 mm 空气间隙之间的过渡区域发展。如图 6(b)所示，边界附近的电场最强，而两条边界的交点，即四边形的顶点处的电场，将强于周围其他区域。因此，放电丝会在靠近边界顶角（S_1）的位置较早产生。气体放电受到许多因素的影响，例如电场均匀性、电极形状、气体特性等。当外加电场强度超过

气体击穿阈值时，气体发生击穿并形成微放电；由于电源极性的转换，微放电会在同一位置反复出现，形成微放电通道。微放电通道形成的同时，还会产生正、负带电粒子以及处于激发态的粒子。在外加电场的作用下，这些粒子会向正、负电极移动，并最终沉积在介质板上，形成壁面电荷。当大量壁面电荷沉积在介质表面时，会形成新的电场，该电场称为壁面电荷场。壁面电荷场与外加电场方向相反，因此壁面电荷场会使该位置的放电熄灭，同时还会抑制放电通道周围的放电。当放电丝在S_1 处产生时，该位置会形成壁面电荷场，抑制放电丝周围的放电，因此后续放电将发生在壁面电荷场抑制作用最弱的位置。由于S_2 和S_3 靠近边界，并且在 S_1, 处受到壁面电荷场的抑制最弱，因此位于S_2 和S_3 处的放电丝，会在S_1处产生放电丝之后出现。后续放电会受到三个壁面电荷场的影响，而S_c 是整个边界的几何中心，受到周围壁面电荷场的抑制最弱，因此放电丝会在S_c处产生。这就是放电沿径向由外向内发生的原因。

图 7(a) 显示了 300 — 800 nm 范围内方形晶格图案的发射光谱。从谱线分布中观察到了许多分子带和原子谱线。典型谱线包括 N_2 的 N_2 ($C^3\prod_u \rightarrow B^3\prod_g$)第二正带系谱线、氮分子离子谱线 N_2^+ (B-X)，以及 Ar I (4p → 4s) 的发射线。根据上述谱线估算了各微放电通道的等离子体参数。通过拟合 391.4 nm 处的氮分子离子谱线 N_2^+ (B-X)，计算分子转动温度。如图 7(b) 所示，非平衡等离子体的气体温度 (T_g) 近似等于其分子转动温度 (T_{rot})[41]。研究发现，各微放电通道的分子转动温度基本相同，约为 (400 ± 10) K；如图 7(c) 所示，利用 N_2 ($C^3\prod_u \rightarrow B^3\prod_g$) 的氮分子谱线，通过玻尔兹曼拟合[42] 计算分子振动温度。可以看出，沿径向从外向内，分子振动温度逐渐升高。根据碰撞-辐射模型，738 nm/750 nm 和 750 nm/751 nm 谱线的强度比分别可用于表征电子密度 (n_e) 和电子温度 (T_e)[43]。图 7(d) 显示了方形晶格图案各位置处 n_e 和 T_e 的变化趋势。从图 7(d) 可以看出，n_e 逐渐

沿径向从外向内减小，而 T_e 沿径向从外向内逐渐增大。

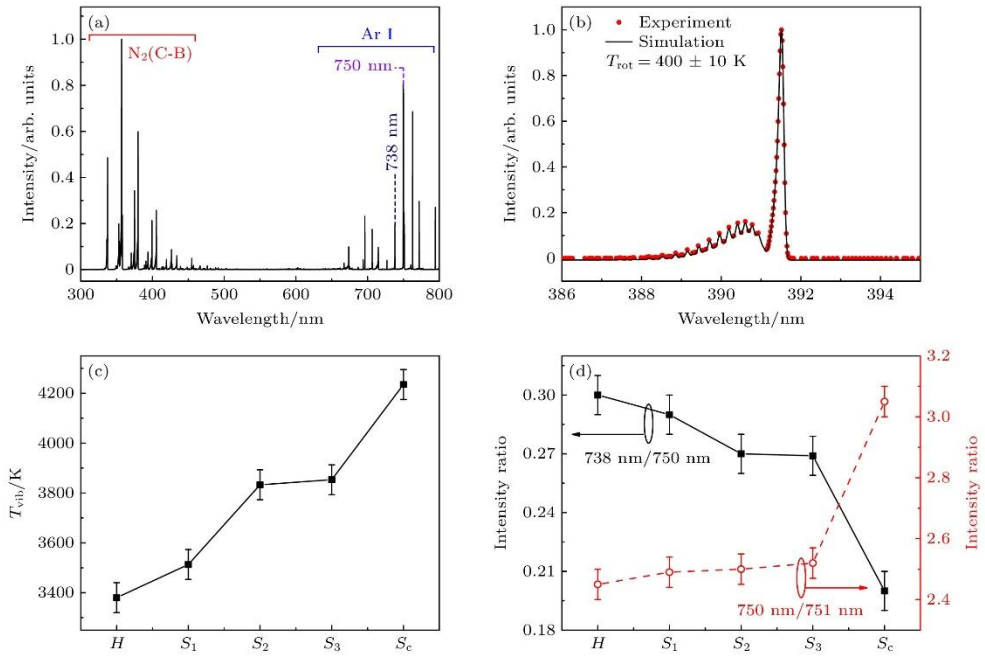


图7。(a) 放电产生的 300–800 nm 光发射光谱；(b) N_2^+ (B-X) 转动带的拟合结果；(c) 方形晶格图案不同位置的 T_{vib}；(d) 方形晶格图案不同位置的 T_e 和 n_e。

4. 结论

在由正六边形和正方形组成的组合边界内，55 kHz 交流电源激励下产生了多种复杂图案，并对其中最具代表性的方形图案进行了研究。结果表明，在每个半电压周期内，方形晶格图案均呈现两个强度不同的电流脉冲；形成方形晶格图案的放电丝实际上是放电沿径向由外向内逐渐击穿的过程。采用 ICCD 拍摄了方形晶格图案的时间演化过程，并从理论上分析了其形成机制。研究发现，该图案的形成是外电场与壁面电荷场共同作用的结果。利用方形晶格图案诊断等离子体参数的结果表明，气体转动温度为 (400± 10) K；沿径向由外向内，分子振动温度和电子温度逐渐升高，而电子密度逐渐降低。这些结果丰富了介质阻挡放电图案的时空结构，并推动了介质阻挡放电中图案放电特性的研究。

参考文献

[1] Zhang J, Tang W W, Wang Y H, Wang D Z 2023 《等离子体源科学与技术》32 055005[2] Li J Y, Zhou D S, Rebrov E, Tang X, Kim M 2024 《物理学杂志 D：应用物理》57 395201[3] Fang J L, Zhang Y R, Lu C Z, Gu L L, Xu S F, Guo Y, Shi J J 2024 Chin. Phys. B 33 015201[4] Guan H L, Chen X R, Jiang T, Du H, Para mane A, Zhou H 2020 Chin. Phys. B 29 075204[5] Li X C, Liu R J, Li X N, Gao K, Wu J C, Gong D D, Jia P Y 2019 《物理学：等离子体》26 023510[6] Remy A, Geyter N D, Reniers F 2023 Plasma Process. Polym. 20 2200201[7] Hosseini H 2023 RSC Adv. 13 28211[8] Li Y W, Yuan H, Zhou X F, Liang J P, Liu Y Y, Chang D L, Yang, D Z 2022 催化剂 12 203[9] Song H, Dang Y M, Ki S H, Park S, Ha J H 2024 LWT 207 116637[10] Domonkos M, Tichá P, Trejbal J, Demo P 2021 Appl. Sci. 11 4809[11] Massines F, Sarra-Bournet C, Fanelli F, Naudé N, Gherardi N 2012 Plasma Process. Polym. 9 1041[12] Akishev Y, Alekseeva T, Karalnik V, Petryakov A 2022 《等离子体源科学与技术》31 084001[13] Tschiersch R, Nemschokmichal S, Bogaczyk M, Meichsner J 2017 《物理学杂志 D：应用物理》50 415206[14] Liu K, Fang Z, Dai D 2023 Acta Phys. Sin. 72 135201[15] Ran J X, Zhang X X, Zhang Y, et al. 2023 等离子体科学与技术 25 055403[16] Lu X P, Fang Z, Dai D, Shao T, Liu F, Zhang C, Liu D W, Nie L L, Jiang C Q 2023 High Volt. 8 1132[17] Brandenburg R 2018 《等离子体源科学与技术》26 053001[18] Wang Y Y, Yan H J, Li T, Bai X D, Wang X, Song J, Zhang Q Z 2023 AIPAdv. 13 085327 [19] Wang H R, Hao Y P, Fang Q, Su H W, Yang L, Li L C 2020 Acta Phys. Sin. 69 145203

[20] Wu K Y, Wu J C, Jia B Y, Ren C H, Kang P C, Jia P Y, Li X C 2020 《物理学：等离子体》 27 082308[21] Ouyang J T, Li B, He F, Dai D 2018 等离子体科学与技术 20 103002[22] Hao Y P, Han YY, Huang Z M, Yang L, Dai D, Li L C 2018 《物理学：等离子体》 25 013516[23] Li X C, Liu R, Jia P Y, Wu K Y, Ren C H, Yin Z Q 2018 《物理学：等离子体》 25 013512[24] Li Z Y, Jin S H, Xian Y B, Nie L L, Liu D W, Lu X P 2021 《等离子体源科学与技术》. 30 065026[25] Zhang Y H, Ning W J, Dai D, Wang Q 2019 《等离子体源科学与技术》. 28 075003[26] Zhang J H, PanYY, Feng J Y, He Y N, Chu J H, Dong L F 2023 等离子体科学与技术 25 025406[27] Duan X X, Ouyang J T, Zhao X F, He F 2009 《物理评论 E》 80 016202[28] Wang X, Yan H J, Wang Y Y, Yu S Q, Li T, Song J 2023 《物理学杂志 D：应用物理》 56 105201[29] Mokrov M S, Raizer Y P 2018 Plasma Sources Sci. Technol 27 065008[30] Hao F, Dong L F, Du T, et al. 2018 《物理学：等离子体》 25 033510[31] Han R, Dong L F, Huang J Y, Sun H Y, Liu B B, Mi Y L 2019 Chin. Phys. B 28 075204[32] Sun H Y, Dong L F, Liu F C, Mi Y L, Han R, Huang J Y, Liu B B, Hao F, Pan Y Y 2018 《物理学：等离子体》 25 113507[33] Wei L Y, Dong L F, Fan W L, et al. 2018 《科学报告》 8 3835[34] Feng J Y, Dong L F, Wei L Y, Fan W L, Li C X, Pan Y Y 2016 《物理学：等离子体》 23 093502[35] Pan YY, Li Y H, Dou Y Y, Fu G S, Dong L F 2022 《物理学：等离子体》 29 053502[36] Liu F C, Liu Y N, Liu Q, et al. 2022 Plasma Sources Sci. Technol 31 025015[37] Li C X, Dong L F, Feng J Y, Huang Y P 2019 《物理学：等离子体》 26 023505[38] Pan YY, Feng J Y, Li C X, Dong L F 2022 等离子体科学与技术 24 115401[39] Li Y H, Pan Y Y, Tian M, Wang Y, He Y N, Zhang J H, Chu J H, Dong L F 2023 《物理学：等离子体》 30 033502[40] Liu S H, Neiger M 2003 《物理学杂志 D：应用物理》 36 3144[41] Bruggeman P J, Sadeghi N, Schram D C, Linss V 2014 《等离子体源科学与技术》 23 023001

[42] Yang F X, Mu Z X, Zhang J L2016 《等离子体科学与技术》18 79[43] Zhu X M, Pu Y K 2008 《等离子体源科学与技术》17 024002