

条纹水电极介质阻挡放电中 D_{2h} 超点阵斑图*李骋¹⁾ 闫志浩¹⁾ 齐晓秀¹⁾ 李雨昕¹⁾ 潘宇扬²⁾ 董丽芳^{1)†}

1) (河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

2) (河北大学质量技术监督学院、零碳能源建筑与计量技术教育部工程研究中心, 保定 071002)

(2025年7月24日收到; 2025年9月10日收到修改稿)

本文设计了一种特殊的完全条纹水电极介质阻挡放电装置, 通过求解拉普拉斯方程发现其产生了条纹状非均匀电场. 采用该装置在空气和氩气的混合气体放电中, 观测到了多种具有 D_{2h} 对称性的条纹斑图, 其中4种条纹超点阵斑图为首次获得. 选取其中结构最复杂的大小点蜂窝条纹超点阵斑图进行研究, 该斑图由小点、大点和蜂窝框架三套放电丝子结构嵌套构成. 实验利用光谱仪测量了不同子结构的发射光谱, 发现其处于不同的等离子体状态; 采用高速照相机和光电倍增管对其时空动力学进行测量, 发现放电顺序为小点→大点→蜂窝框架, 其中蜂窝框架由随机放电丝叠加而成. 理论上, 通过求解泊松方程模拟了不同时刻的电场分布, 很好地解释了上述斑图的形成机制.

关键词: 介质阻挡放电, 斑图, 等离子体**PACS:** 52.50.Dg, 52.35.Mw, 47.54.-r, 52.80.Tn**DOI:** 10.7498/aps.74.20250985**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250985

1 引言

近年来, 介质阻挡放电斑图作为等离子体物理与非线性科学交叉领域的重要课题备受关注^[1]. 斑图作为典型的非线性自组织现象, 具有时空周期性规律的非均匀结构, 广泛存在于自然界(如动物体表花纹及天空云图等)^[2,3]以及多种实验系统(如瑞利-贝纳德对流系统、法拉第系统、化学反应扩散系统及介质阻挡放电系统等)之中^[4-9]. 近年来, 介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)系统中的斑图由于形成时间短、发光可视、可调节参数及众多的应用前景等显著优势而受到广泛关注^[10,11]. 介质阻挡放电是一种在放电气隙中插入介质的非平衡态交流气体放电, 又称“无声放电”. DBD斑图作为等离子体物理与非线性科学的交叉

研究热点, 其研究成果不仅深化了人们对复杂系统自组织行为的理解, 而且推动了气体放电物理的研究^[12-16], 还发现其可在等离子体光子晶体、材料局域处理等方面的具有广泛的应用. 等离子体光子晶体是等离子体与电介质材料的周期性排列, 因其能带动态可调谐的特性, 其在空间通信和可调谐微波器件等领域具有重要的应用价值, 受到研究人员的广泛关注^[17-19]. DBD斑图中等离子体与未放电气体呈现周期性排列, 本质上是一种等离子体光子晶体, 而DBD斑图的规则性、可调性使其成为等离子体光子晶体研究的理想平台^[20-22]. 除此之外, DBD斑图作为一种空间有序的等离子体流光放电模式, 由于放电丝的电子温度高和等离子体密度大等特性, 为材料局域处理提供了有效方案^[23-25], 并且通过调节放电丝的等离子体参量可实现不同的处理效果, 例如2024年Dong等^[23]通过调制气隙

* 国家自然科学基金(批准号: 12075075)、河北省中央引导地方科技发展资金项目(批准号: 246Z7607G)、河北大学校长科研基金项目(批准号: XZJJ202317)和河北大学优秀青年科研创新团队(批准号: QNTD202402)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: donglfhbu@163.com

对 PI 薄膜局域处理, 发现等离子参量可以影响刻蚀深度和处理效率.

众所周知, 介质阻挡放电中的电场分布会影响放电模式及电流特性等^[26-29]. 分析表明, 其电场分布将会对介质阻挡放电斑图的形成产生影响. 在以往介质阻挡放电斑图研究中, 多采用传统的平行平板 DBD 装置, 在均匀电场条件下进行. 迄今为止, 已在均匀场 DBD 中获得了六边形斑图、正方形斑图、螺旋波及多种超点阵斑图等^[30-36]. 近年来, 人们将目光转向通过设计特殊电极结构来调节气隙中的电场, 从而探索在不均匀场条件下产生新型斑图的可能. 2012 年, Sinclair 等^[37] 使用四边形针网电极结构在气隙中引入波状分布的不均匀电场, 获得了棋盘形斑图和方形三角形混合斑图. 2016 年, Liu 等^[38] 通过在圆柱形水电极玻璃板的内侧, 贴上一个很薄的具有四边形排列的圆孔点阵亚克力板, 在气隙中引入点阵不均匀电场, 获得了一种新型的四边形超点阵斑图. 2023 年褚佳惠等^[39] 通过在两个圆柱形水电极内部, 分别贴上很薄的具有横条纹和竖条纹结构的介质板, 在气隙中引入方形阵列电场, 并由此获得了两种四边形阵列分布的斑图. 总体来说, 上述研究通过在气隙中引入了四边形阵列电场, 成功获得了几种四边形对称性的斑图. 本工作通过设计一种完全条纹水电极 DBD 装置, 获得了一系列具有 D_{2h} 对称性的新型条纹斑图, 其中 4 种 D_{2h} 超点阵斑图为首次获得. 这些斑图很难通过现有传统的平行平板 DBD 装置得到, 因而本工作对促进介质阻挡放电斑图动力学发展具有重要意义.

本研究设计了一种有水条纹和无水条纹成阵列分布的完全条纹水电极 DBD 装置, 为明确其电场调控能力, 通过求解拉普拉斯方程计算气隙中的外加电场分布. 基于该装置, 在空气和氩气的混合气体放电中, 获得了多种具有 D_{2h} 对称性的条纹斑图. 对其中结构最复杂的大小点蜂窝条纹超点阵斑图进行了研究, 实验上, 用光谱仪采集了氩原子 696.54 nm ($2p^2 \rightarrow 1S^5$) 和氮分子 (N_2) 第二正带系 ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$) 的发射谱线, 并计算得到了大小点蜂窝条纹超点阵斑图中不同子结构的电子密度和振动温度. 采用 PMT 测量不同子结构光信号. 采用高速照相机拍摄了框架放电的瞬时图像. 利用 COMSOL Multiphysics 软件求解泊松方程, 模拟了大小点蜂窝条纹超点阵斑图不同放电时刻的电场分布. 本研究通过调控电场以获得条纹阵列分布

的斑图, 对促进介质阻挡放电斑图动力学的发展具有重要意义, 同时对推动等离子体光子晶体的调控及应用也有一定的参考价值.

2 实验装置

实验的放电装置如图 1 所示. 放电系统由普通水电极与完全条纹水电极组成, 两电极间距为 2 mm. 其中, 普通水电极由内径 75 mm、外径 85 mm 的圆柱形透明容器与铜环电极组成, 容器两端采用 1.5 mm 厚的玻璃片密封, 形成平整均匀的液体电极表面; 完全条纹水电极则由方形铣槽结构与浸入水的铜环电极组成, 具体通过在长 86 mm、厚 30 mm 的亚克力板上加工出宽度 4 mm、长度 70 mm 和间距 4 mm 的矩形凹槽, 形成周期性条纹结构. 为保证每个水槽内的放电同步性, 右侧设置 10 mm 宽的竖向通道将横向条纹连通, 槽内注满水并浸入铜环, 然后以 1.5 mm 厚玻璃片密封. 两电极的铜环均与 55 kHz 交流电源相连, 电极间加入一块厚度为 2 mm 的玻璃板, 在玻璃上切割长为 40 mm, 宽为 30 mm 的矩形玻璃框作为放电气隙. 水电极和玻璃框架紧密贴在一起, 为方便观察示意图进行了分离展示. 图 1 中红色虚线标出了完全条纹电极的放电区域, T_1 区域为凹槽有水位置, 形成导电通道, T_2 区域为无水位置, 构成绝缘屏障, 形成了有水条纹和无水条纹成阵列, 该结构能够在放电间隙中产生与电极条纹阵列相对应的条纹阵列电场. 放电装置被放在一个密闭真空罐内, 装置内可以调节气体成分和气压. 电压和电流的幅值分别使用高压探头 (Tektronix P6015A 1000x) 和电流探头 (Tektronix TCP 0030a) 来测量, 用光谱仪 (Acton Advanced SP 2750A, CCD: 1340 400 pixels) 采集氩原子 696.54 nm ($2p^2 \rightarrow 1S^5$) 和氮分子第二正带系 ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$) 的发射谱线, 用数码照相机 (Canon Power Shot G16) 和高速相机 (ICCD, HSFC Pro. 120PH0047) 对斑图进行拍摄, 不同放电丝发出的光通过凸透镜成像, 并用两个光电倍增管 (PMT: RCA7265) 采集光信号, 通过数字示波器 (Tektronix TDS 4054B) 记录波形.

图 2 为电极表面不同 z 位置处的 $x-y$ 平面的电场分布图, 图中用蓝色标记 T_1 区域 (凹槽有水位置), 用斜条纹标记 T_2 区域 (无水位置). 如图 1 建立三维坐标系, 零点设置在气隙中完全条纹水电极表面 (橙色箭头标出), 指向普通水电极方向为

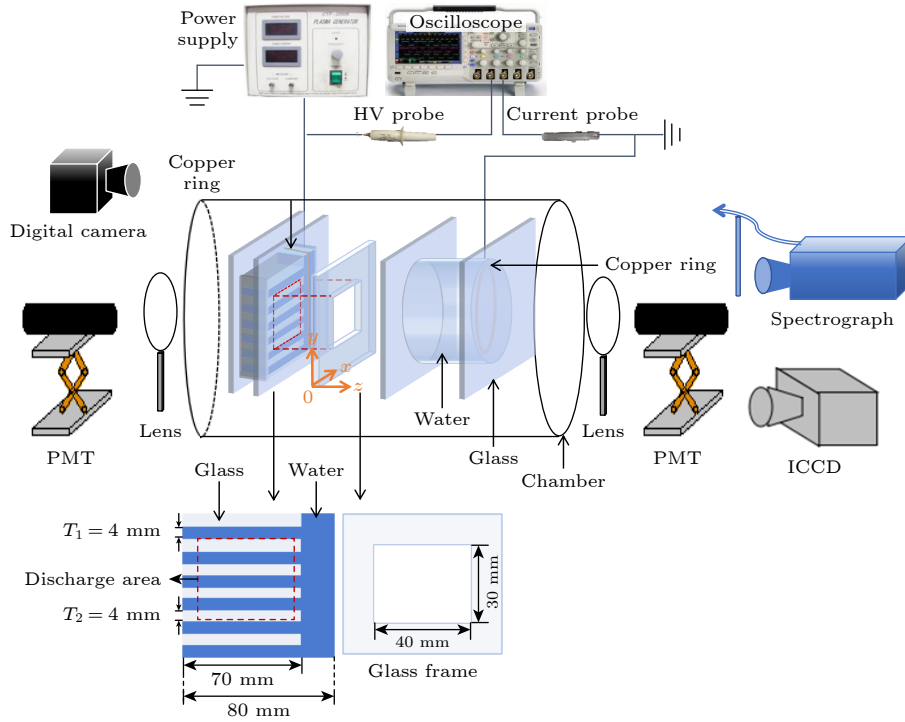


图 1 实验装置图, 其中 T_1 区域为凹槽有水位置, T_2 区域为无水位置, 红色虚线框标出了完全条纹水电极表面的放电区域, 放电区域长 40 mm, 宽 30 mm, 气隙 $d = 2$ mm

Fig. 1. Schematic diagram of the experiment, T_1 region is the grooved area filled with water, while the T_2 region is the water-free area, a red dashed frame marks the discharge area on the surface of fully striped water electrode. Discharge area: length is 40 mm, width is 30 mm, gas gap $d = 2$ mm.

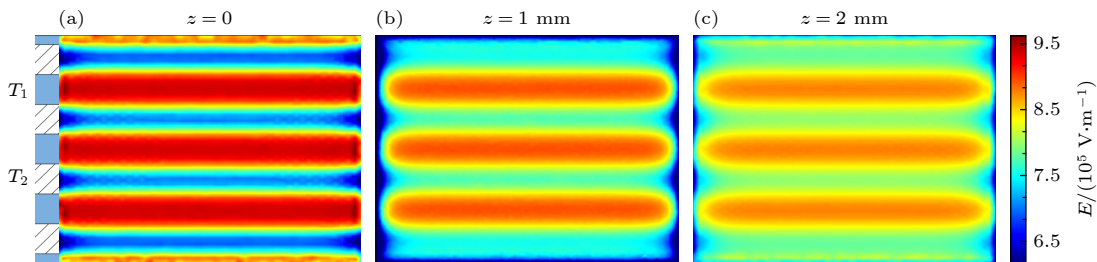


图 2 完全条纹电极介质阻挡放电中气隙外加电场的空间分布 (a)–(c) 不同 z 处 $x-y$ 平面内的电场分布, 外电场的模拟电压为 $U = 2.5$ kV

Fig. 2. Spatial distribution of applied electric field in the gas gap: (a)–(c) Electric field distribution in $x-y$ plane at different z values, the applied voltage is 2.5 kV.

z 轴正方向. 分别取 $z = 0$ mm, $z = 1$ mm 和 $z = 2$ mm 处截面的模拟电场, 外场的模拟电压为 $U = 2.5$ kV. 由模拟结果可以看出调制水电极 T_1 区域电场强度比 T_2 区域电场强度更大, 因此在气隙中产生了条纹阵列的不均匀电场.

3 实验结果与讨论

3.1 完全条纹水电极 DBD 装置下获得的条纹斑图

在完全条纹水电极装置中, 通过调节氩气含量

χ 和气压 p , 获得了多种新型条纹斑图, 如图 3 所示. 在 $p = 10$ kPa 的空气中, 当电压达到击穿阈值 $U = 2.2$ kV, 放电只产生在 T_1 区域形成了条纹斑图, 如图 3(a) 所示, 这与图 2 的电场模拟结果相符. 当电压增至 $U = 2.8$ kV, T_1 区域中的放电变成了大点, 且 T_2 区域也出现晕状放电, 形成了大点与晕构成的条纹超点阵斑图, 如图 3(b) 所示. 随着电压进一步增至 $U = 3.2$ kV, T_1 区域中的大点变成了间距更小的小点, T_2 区域的晕状放电变成了大点, 形成了大小点条纹超点阵斑图, 如图 3(c) 所示. 通过调节气压, 获得了包含晕的双条纹斑图,

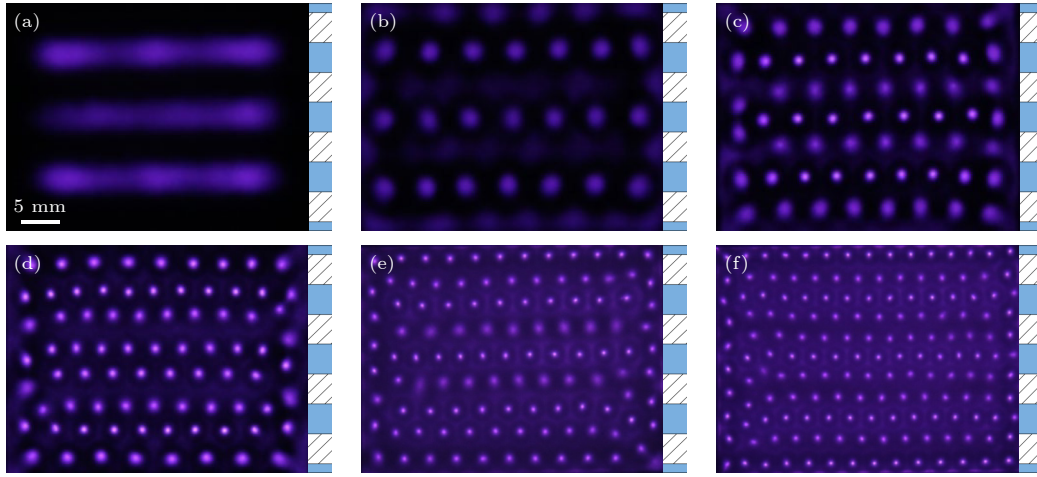


图3 不同放电参数条件下(空气与氩气混合气体中氩气的含量 χ , 气压 p , 电压 U)的条纹斑图 (a) 条纹斑图, $\chi = 0$, $p = 10$ kPa, $U = 2.2$ kV; (b) 大点晕条纹斑图, $\chi = 0$, $p = 10$ kPa, $U = 2.8$ kV; (c) 大小点条纹超点阵斑图, $\chi = 0$, $p = 10$ kPa, $U = 3.2$ kV; (d) 双条纹斑图, $\chi = 0$, $p = 15$ kPa, $U = 3.8$ kV; (e) 大小点蜂窝条纹超点阵斑图, $\chi = 30\%$, $p = 20$ kPa, $U = 4.4$ kV; (f) 条纹蜂窝超点阵斑图, $\chi = 30\%$, $p = 20$ kPa, $U = 4.8$ kV

Fig. 3. Stripe patterns under different discharge parameters (argon content χ in air-argon mixture, pressure p , voltage U): (a) Stripe pattern, $\chi = 0$, $p = 10$ kPa, $U = 2.2$ kV; (b) large dot halo stripe pattern, $\chi = 0$, $p = 10$ kPa, $U = 2.8$ kV; (c) large and small dots stripe superlattice pattern, $\chi = 0$, $p = 10$ kPa, $U = 3.2$ kV; (d) double stripe pattern, $\chi = 0$, $p = 15$ kPa, $U = 3.8$ kV; (e) large and small dots honeycomb stripe superlattice pattern, $\chi = 30\%$, $p = 20$ kPa, $U = 4.4$ kV; (f) stripe honeycomb superlattice pattern, $\chi = 30\%$, $p = 20$ kPa, $U = 4.8$ kV.

如图3(d)所示. 放电气体采用空气和氩气的混合气体, 获得了大小点蜂窝条纹超点阵斑图, 如图3(e)所示, 升高电压得到了条纹蜂窝超点阵斑图, 如图3(f). 值得指出的是图3(b), (c), (e), (f)中的超点阵斑图是首次在DBD系统中发现的.

在以往传统DBD装置各向同性均匀电场中, 四边形、六边形及螺旋波斑图较为常见. 如前所述, 在近年来的调制电极研究中, 大多获得了四边形对称性的点阵斑图. 本工作在完全条纹水电极中, 可得到多种具有 D_{2h} 对称性的条纹阵列斑图, 丰富了斑图类型, 对介质阻挡放电斑图动力学发展具有重要意义.

3.2 大小点蜂窝条纹超点阵斑图研究

3.2.1 演化顺序及相图

为了弄清楚条纹电极中产生的条纹斑图的形成机制, 选择结构最复杂的大小点蜂窝条纹超点阵斑图(图3(e))进行研究. 图4为斑图类型随外加电压增大的演化序列, 其他放电条件为 $p = 20$ kPa, $\chi = 30\%$. 当电压达到击穿阈值 $U = 2.8$ kV时, 放电丝优先产生在 T_1 区域并呈现条形阵列排布, 产生初始斑图, 如图4(a)所示. 随着电压增至

$U = 3.4$ kV时, T_1 区域放电丝变小, 且 T_2 区域也有放电丝产生, 如图4(b)所示, 形成了包含晕的双条纹斑图. 随着电压的进一步增至 $U = 4.4$ kV, T_1 区域的放电丝周围出现蜂窝框架, 经过自组织形成了带有条纹排布的蜂窝框架的大小点蜂窝条纹超点阵斑图, 如图4(c)所示. 当电压 $U = 4.8$ kV时, 放电丝排列更加紧密且蜂窝框架仍然存在, 如图4(d)所示.

为了直观地表示出大小点蜂窝条纹超点阵斑图的不同子结构亮度的差别与比值, 图5展示了不同位置处放电丝的光强分布. 大小点蜂窝条纹超点阵斑图由小点(S), 蜂窝框架(F)和大点(L)组成, 其中小点和蜂窝框架在 T_1 区域, 大点在 T_2 区域, 如图5(a)所示. 通过Matlab对图5(a)中白色线框内光强分布进行计算, 得到光强分布如图5(b)所示, 发现小点、大点和蜂窝框架的亮度分别为237, 129和60, 三者亮度比值约为4:2:1.

实验发现, 大小点蜂窝条纹超点阵斑图的形成与气压、气体成分及外加电压有关. 图6为斑图演化和大小点蜂窝条纹超点阵斑图的相图. 可以看出, 在 χ 为0—50%, U 为2.4—5.9 kV, p 在8—28 kPa范围内, 大小点蜂窝条纹超点阵斑图可以被观察到.

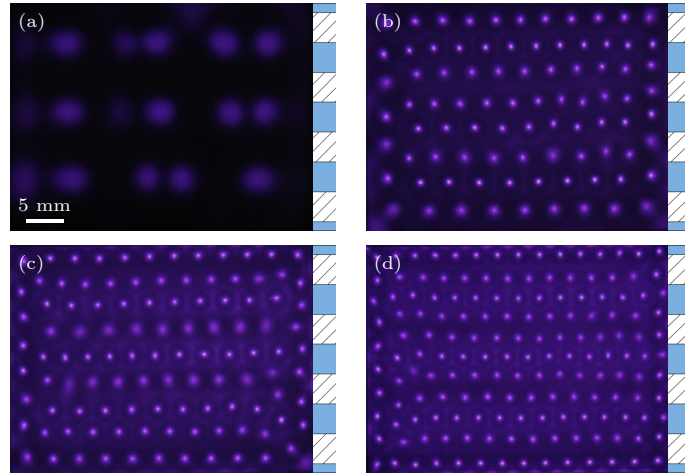


图4 斑图类型随外加电压增加的演化过程 (a) 初始斑图, $U = 2.8$ kV; (b) 双条纹斑图, $U = 3.4$ kV; (c) 大小点蜂窝条纹超点阵斑图, $U = 4.4$ kV; (d) 条纹蜂窝超点阵斑图, $U = 4.8$ kV, 其他实验参数 $p = 20$ kPa, $\chi = 30\%$

Fig. 4. Evolution sequence of large and small dots honeycomb stripe superlattice pattern with voltage increase: (a) Initial pattern, $U = 2.8$ kV; (b) double stripe pattern, $U = 3.4$ kV; (c) large and small dots honeycomb stripe superlattice pattern, $U = 4.4$ kV; (d) stripe honeycomb superlattice pattern, $U = 4.8$ kV, other experimental parameters: $p = 20$ kPa, $\chi = 30\%$.

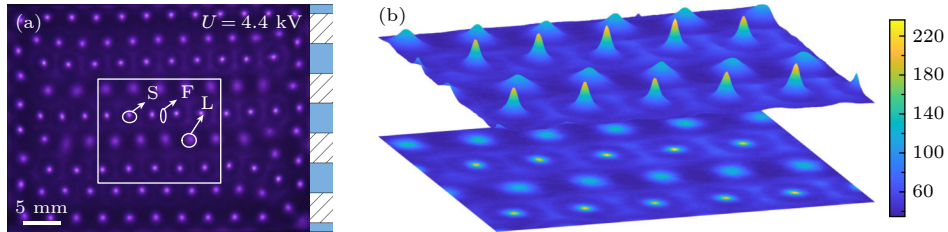


图5 大小点蜂窝条纹超点阵斑图的光强分布 (a) 大小点蜂窝条纹斑图照片, 白色线框标出了光强模拟区域; (b) 不同子结构光强分布图

Fig. 5. Light intensity distribution of the large and small dots stripe superlattice pattern: (a) Photograph of the large and small dots stripe superlattice pattern, the white border outlines the simulated light intensity area; (b) light intensity distribution of the pattern.

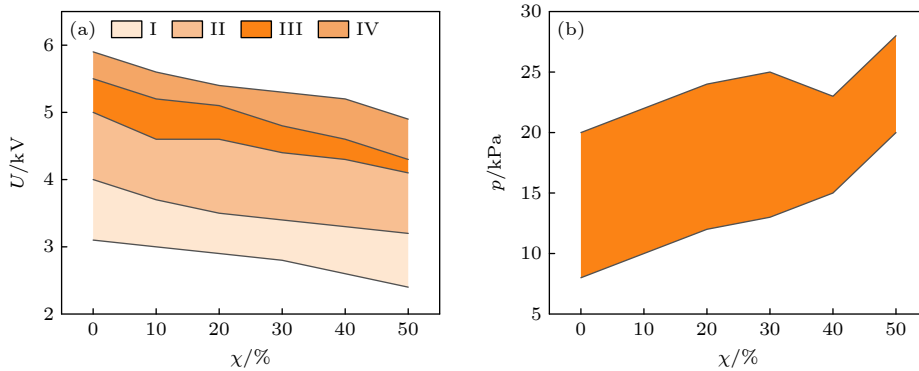


图6 (a) 大小点蜂窝条纹超点阵斑图演化过程随电压 U 与氩气含量 χ 的相图; (b) 大小点蜂窝条纹超点阵斑图随气压 p 与氩气含量 χ 的相图

Fig. 6. (a) Phase diagram of the evolution process of the large and small dots honeycomb stripe superlattice pattern as a function of the voltage U and the argon content χ ; (b) phase diagram of the large and small dots honeycomb stripe superlattice pattern as a function of the gas pressure p and argon content χ .

3.2.2 等离子体参量的光谱诊断

为探究不同子结构的等离子体状态, 利用光谱仪采集不同子结构的 Ar I (696.54 nm, $2p^2 \rightarrow 1S^5$)

谱线和氮分子第二正带系 ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$), 并计算其电子密度和振动温度.

图7(a)给出了S, L和F的Ar I谱线. 利用

Stark 展宽法对电子密度进行估算^[40-42], 结果如图 7(b) 所示, 子结构 S, L 和 F 的电子密度分别为 $(6.0 \pm 0.7) \times 10^{15}$, $(5.4 \pm 0.9) \times 10^{15}$ 和 $(7.0 \pm 1.0) \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 因此 3 个子结构具有不同的电子密度, 其中大点 L 的电子密度最低, 而蜂窝框架 F 的最高. 图 7(c) 展示了不同子结构的氮分子第二正带系 ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$) 发射谱线. 采用第二正带系的两组振动谱带: $\Delta\nu = -2(0-2, 1-3, 2-4)$ 和 $\Delta\nu = -3(0-3, 1-4, 2-5)$, 对振动温度进行估算^[43], 计算结果如图 7(d) 所示, S 的分子振动温度为 $(3000 \pm 50) \text{ K}$, L 的分子振动温度为 $(3010 \pm 50) \text{ K}$, F 的分子振动温度为 $(3760 \pm 50) \text{ K}$, 显见 S 与 L 的分子振动温度基本相同, 但都低于 F 的分子振动温度.

综上, 3 个子结构的电子密度与分子振动温度存在显著差异, 表明它们处于不同的等离子体状态. 进一步, 将电子密度与分子振动温度的分布特征, 与图 2 所示的外加电场分布进行对比后, 发现等离子体参量的空间分布与外加电场分布并非完全一致. 例如, S 和 F 在外电场更大的 T_1 区域,

L 在电场更弱的 T_2 区域, S 与 F 的电子密度均大于 L, 这与电场分布一致, 然而 S 与 L 的振动温度基本相同, 但都低于 F 的振动温度, 这表明斑图的放电行为不仅受外加电场调控, 还与放电丝的自组织过程密切相关. 为深入揭示斑图的放电机制, 我们采用光电倍增管与高速照相机, 对其时空动力学特性开展了进一步测量.

3.2.3 时空动力学测量

图 8 给出了采用光电倍增管测量不同子结构的时间相关性, 以研究大小点蜂窝条纹超点阵斑图的形成机制. 图 8(a) 展示了斑图的照片, 其中 S 和 F 位于调制水电极的 T_1 区域, L 位于调制水电极的 T_2 区域. 图 8(b) 给出了正半周期的电流电压波形图, 可以发现电流波形由三部分组成, 分别用 Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 表示其脉冲宽度. 图 8(c) 展示了 S 和 L 的光信号的时空相关性, 发现 S 比 L 先放电, S 对应第 1 个脉冲, L 对应第 2 个脉冲. 图 8(d) 给出了 S 和 F 叠加光信号, 发现 F 对应后续连续

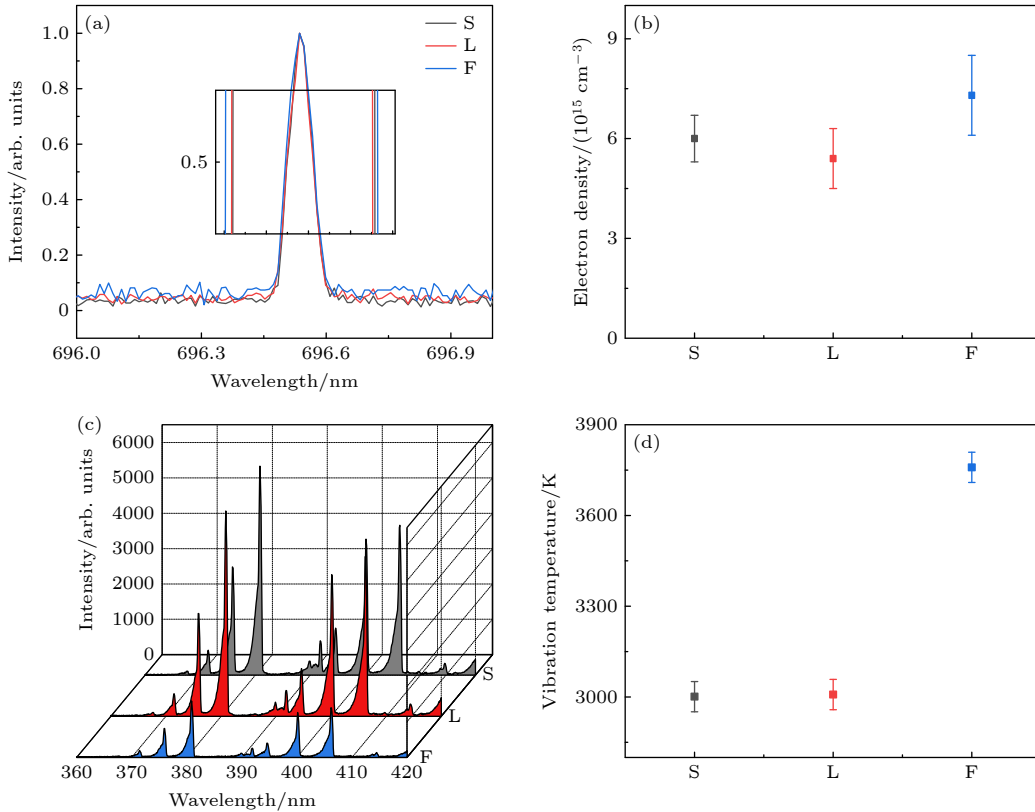


图 7 大小点蜂窝条纹超点阵斑图的发射光谱 (a) 不同子结构在 696.54 nm 处谱线和中心部分放大图; (b) 子结构 S, L 和 F 的电子密度; (c) 不同子结构在 360—420 nm 内的氮分子发射光谱; (d) 子结构 S, L 和 F 的振动温度

Fig. 7. Emission spectra of the large and small dots honeycomb stripe superlattice pattern: (a) Spectral line at 696.54 nm and magnified central region for different substructures; (b) electron density values for substructures S, L and F; (c) N_2 emission spectra of substructures within 360–420 nm; (d) vibrational temperatures for substructures S, L and F.

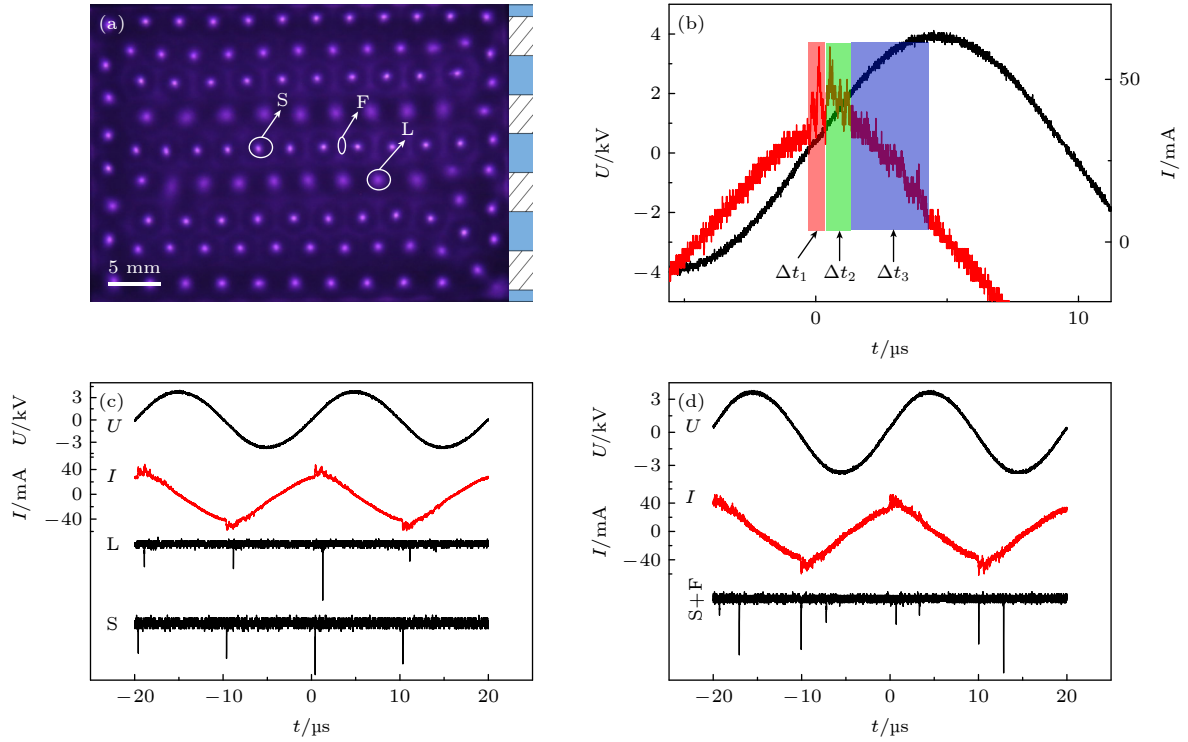


图 8 大小点蜂窝条纹超点阵斑图的时空结构动力学测量 (a) 大小点蜂窝条纹超点阵斑图; (b) 正半周期的电流电压波形图; (c) S 和 L 的时间相关性测量; (d) S 和 F 的时间相关性测量

Fig. 8. Spatial-temporal structure dynamics measurement of large and small honeycomb stripe superlattice pattern: (a) Image of the pattern; (b) waveforms of voltage and current of the pattern in the positive half-cycle; (c) temporal correlation measurement of S and L; (d) temporal correlation measurement of S and F.

脉冲. 综上, S, L 和 F 的光信号分别对应电流脉冲的第 1 个、第 2 个以及之后的脉冲, 且这 3 个光信号分布在电压上升沿放电, 因此大小点蜂窝条纹超点阵斑图的放电顺序为 $S \rightarrow L \rightarrow F$.

为揭示条纹阵列蜂窝框架的形成机制, 采用高速照相机对图 8(b) 第 3 个电流脉冲 (曝光时间 Δt_3) 进行不同叠加周期的分脉冲拍摄, 如图 9 所示. 图 9(a)–(d) 分别展示了叠加周期为 1, 20, 50 和 100 次的放电图像. 实验结果显示: 当叠加周期为 1 时, 图像仅呈现离散分布的随机放电丝, 无法辨识蜂窝结构; 随着叠加次数增至 20 次, 放电丝在特定区域出现聚集现象, 开始显现蜂窝框架雏形; 当叠加周期达到 50 次, 蜂窝框架的周期性显著增强. 最终在 100 次叠加时, 蜂窝框架呈现高度有序的六边形条纹结构. 通过对比这些图片分析表明, 尽管宏观上蜂窝框架表现为连续发光带, 但其微观构成仍为随机放电丝.

综上, 采用光电倍增管及高速照相机发现, 放电顺序为小点 \rightarrow 大点 \rightarrow 蜂窝框架, 且蜂窝框架是由随机放电丝构成的. 值得指出的是 T_2 区域的大点比 T_1 区域的蜂窝框架先放电, 这说明斑图的放电

不仅与外加电场分布有关, 它还是一种有壁电荷参与的自组织过程. 因此需要求解带有壁电荷的泊松方程来进一步分析其放电机制.

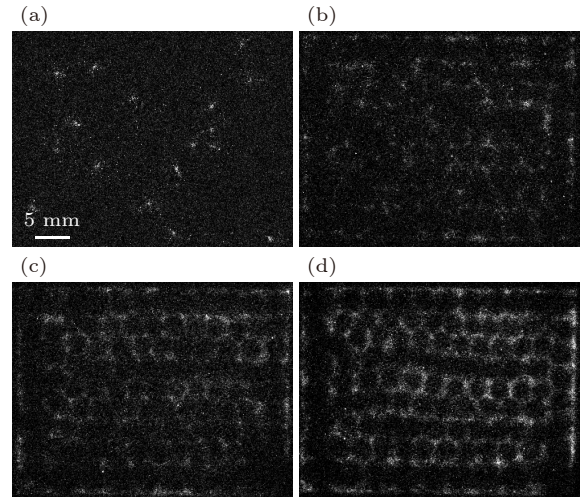


图 9 框架的不同电压周期叠加下的照片 (a)–(d) 在 Δt_3 曝光下分别对应叠加的电压周期分别为 1, 20, 50 和 100 的照片

Fig. 9. Photos of the frame superimposed with different voltage periods. At an exposure time of Δt_3 : (a)–(d) Correspond respectively to the photographs with superimposed voltage cycles of 1, 20, 50, and 100.

3.2.4 电场的时空演化

通过 COMSOL 软件数值求解泊松方程, 模拟其不同放电时刻放电后形成的电场, 给出了电场的时空演化结果如图 10 所示.

泊松方程:

$$\nabla^2 \psi = -\rho / (\epsilon_r \epsilon_0), \quad (1)$$

其中, ψ 代表电势, ρ 代表电荷密度, ϵ_r 代表介质的

介电常数, ϵ_0 代表真空的介电常数. 空间的电场和电势之间的关系由以下公式给出:

$$\mathbf{E} = -\nabla \psi. \quad (2)$$

关于 ρ 的计算, 首先通过对 S, F, L 对应的电流脉冲进行积分计算:

$$Q = \int_{t_2}^{t_1} I dt, \quad (3)$$

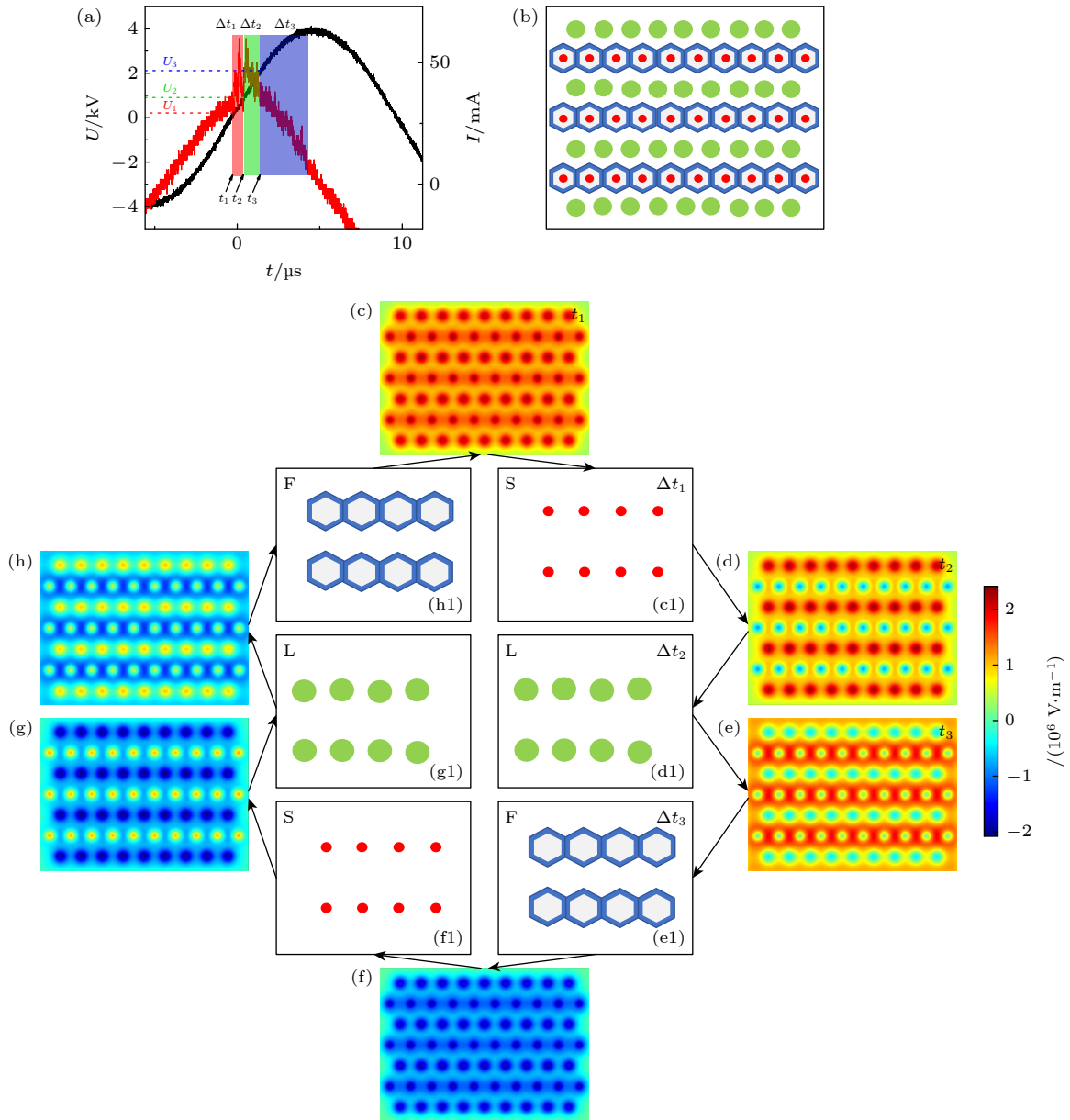


图 10 大小点蜂窝条纹超点阵斑图不同放电时刻的电场分布以及对应的子结构放电示意图 (a) 大小点蜂窝条纹超点阵斑图的电压电流波形图; (b) 斑图的示意图; (c)–(e) 正半周期气隙中 t_1 , t_2 和 t_3 时刻的电场分布; (f)–(h) 负半周期每个子结构开始的电场分布; (c1)–(h1) 分别对应图 (c)–(h) 电场分布下的子结构放电示意图

Fig. 10. Electric field distributions at different moments of the large and small dot honeycomb stripe superlattice pattern and the corresponding schematic diagrams of substructure: (a) Applied voltage and current waveforms for the pattern; (b) schematic diagram of the pattern; (c)–(e) electric field distributions in the gas gap at t_1 , t_2 , and t_3 during the positive half-cycle; (f)–(h) correspond respectively to the electric field distributions before the discharge of each substructure in the negative half-cycle; (c1)–(h1) schematic illustrations of substructure discharge corresponding to the electric fields in panels (c)–(h).

得到 S, F, L 放电后积累的壁电荷的电荷量 $Q_S = 6.93 \times 10^{-9}$ C, $Q_F = 4.94 \times 10^{-9}$ C, $Q_L = 1.28 \times 10^{-8}$ C. 然后根据公式:

$$\rho = \frac{Q}{nS}, \quad (4)$$

其中 n 为放电丝的个数, S 为放电丝的面积, 得出不同子结构的电荷面密度 $\rho_S = 2.94 \times 10^{-4}$ C/m², $\rho_F = 3.15 \times 10^{-5}$ C/m², $\rho_L = 1.02 \times 10^{-4}$ C/m², 值得指出的是电荷面密度大小分布与图 5 光强大小分布一致.

图 10 给出了在一个外加电压周期内电场及放电随时间的变化. 图 10(a) 展示了斑图的电压和电流波形图, t_1, t_2, t_3 分别记作图 8(b) 中 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ 开始的时刻, 并给出了对应的放电电压. 图 10(b) 为该斑图的结构示意图, 小点、大点和蜂窝框架分别用红色小圆、绿色大圆和蓝色正六边形表示. 图 10(c)–(e) 为气隙中 t_1, t_2 和 t_3 时刻的电场分布. 图 10(c1)–(e1) 分别为 $\Delta t_1, \Delta t_2$ 和 Δt_3 时段内子结构放电示意图. 由图 10(c) ($U_1 = 0.3$ kV, $t = t_1$) 可以看出, 此时小点位置处的场强最大, Δt_1 对应条形阵列分布的小点放电结构如图 10(c1). 小点放电后电场分布如图 10(d) ($U_2 = 0.9$ kV, $t = t_2$), 可以看出大点位置处的场强最大, 随着电压的增大 Δt_2 时段内同样有条形阵列排布的大点放电如图 10(d1) 所示. 大点放电后电场分布如图 10(e) ($U_3 = 2.1$ kV, $t = t_3$), 此时蜂窝框架处的场强最大, 因此下一个放电结构为蜂窝框架如图 10(e1). 由于受到的小点位置壁电荷的禁阻作用, 放电丝在离小点较远的区域产生, 最终形成了条形阵列排布蜂窝框架. 当外加电压改变极性时, 将重复上述过程. 在负半周期, 3 个子结构放电开始时气隙中的电场分布和放电子结构分别如图 10(f)–(h) 和图 10(f1)–(h1) 所示.

由图 10 中电场与放电的时空演化结果可以看出, 电场与放电存在显著的相互作用: 电场分布决定放电位置, 而放电积累的壁电荷又会影响下一时刻的电场分布, 以此类推, 循环往复, 最终通过自组织形成稳定的斑图.

在完全条纹水电极放电装置中, 条纹阵列电场与放电的自组织过程耦合, 进而得到多种类型的条纹阵列斑图, 这为斑图动力学研究提供了助力; 这些条纹斑图本质上是等离子体与未放电气体周期排列的等离子光子晶体, 相较传统的能带结构固定

的光子晶体, 等离子光子晶体具有可调谐的灵活性. 近年来, 条纹斑图因其具有一维周期性的独特结构而受到广泛关注^[19,44–46]. 2014 年, Zhang 等^[19] 通过条纹分布的放电管获得了一维的等离子体光子晶体. 2021 年 Polonskyi 等^[46] 通过在放电气隙中引入刻有条纹图案的亚克力板获得了可用于材料局域处理的条纹 DBD 斑图. 上述研究说明, 条纹斑图在等离子光子晶体和材料局域处理领域均有重要作用. 本装置中通过调节放电参量, 可以获得多种条纹斑图, 这为等离子体光子晶体的研究提供了新的方案, 而且为 DBD 系统中材料的局域处理提供有效方法.

4 结 论

本工作设计了一种可以产生条纹阵列电场的完全条纹水电极介质阻挡放电装置. 为了探究其电场调控能力, 通过求解拉普拉斯方程对气隙中外加电场进行计算, 发现电场呈现条纹状的非均匀电场分布, 有水的 T_1 区域处的电场强度明显高于无水的 T_2 区域的电场强度. 通过空气和氩气的混合气体放电. 在该装置中观测到了多种具有 D_{2h} 对称性的新型条纹斑图, 其中四种条纹超点阵斑图为首次获得, 并重点研究了其中结构最复杂的大小点蜂窝条纹超点阵斑图. 该斑图由小点、大点和蜂窝框架三套放电丝子结构嵌套构成. 利用光谱仪采集了不同子结构的 Ar I (696.54 nm, $2p^2 \rightarrow 1S^5$) 和氮分子 (N_2) 第二正带系 ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$) 的发射谱线, 并计算得到了其电子密度和振动温度, 发现不同子结构处于不同等离子体状态. 通过光电倍增管和对大小点蜂窝条纹超点阵斑图的时空结构动力学研究, 明确放电顺序为小点 \rightarrow 大点 \rightarrow 蜂窝框架. 利用高速照相机对蜂窝框架进行不同时间尺度的拍摄, 表明蜂窝框架的微观结构由随机放电丝组成.

通过 COMSOL 软件求解泊松方程, 得到了不同放电时刻的电场分布, 由此获得了电场的时空演化结果. 结果表明, 完全条纹水电极使斑图的子结构呈现条形分布特征, 且前一次放电的子结构会影响下一次放电过程, 最终形成了条纹阵列斑图, 这很好的解释了实验现象. 本研究通过调控电场以获得 D_{2h} 条纹阵列分布的斑图, 促进了斑图动力学发展, 并且为等离子体光子晶体的禁带调控提供新的方案.

参考文献

- [1] Kogelschatz U 2010 *J. Phys. Conf. Ser.* **257** 012015
- [2] Joron M, Jiggins C D, Papanicolaou A, McMillan W O 2006 *Heredity* **97** 157
- [3] Werner T, Koshikawa S, Williams T M, Carroll S B 2010 *Nature* **464** 1143
- [4] Rogers J L, Schatz M F, Brausch O, Pesch W 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 4281
- [5] Perkins A C, Grigoriev R O, Schatz M F 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 064501
- [6] Cominotti R, Berti A, Farolfi A, Zenesini A, Lamporesi G, Carusotto I, Recati A, Ferrari G 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 210401
- [7] Frumkin V, Gokhale S 2023 *Phys. Rev. E* **108** L012601
- [8] Bánsági T, Vanag V K, Epstein I R 2011 *Science* **331** 1309
- [9] Kameke A V, Huhn F, Muñuzuri A P, Muñuzuri V P 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 088302
- [10] Dong L F, He Y F, Yin Z Q, Chai Z F 2004 *Plasma Sources Sci. Technol.* **13** 164.
- [11] Guikema J, Miller N, Niehof J, Klein M, Walhout M 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3817
- [12] Zhang B, Zhang X B, Wu S Q 2024 *J. Appl. Phys.* **136** 203304
- [13] Peng B F, Wang R Z, Li J, Jiang N, Yuan D K, Chen Z Q, Lei Z P, Kang A L, Song J C 2024 *Appl. Phys. Lett.* **125** 144102
- [14] Peng B F, Jiang N, Zhu Y F, Li J, Wu Y 2024 *Plasma Sources Sci. Technol.* **33** 045018
- [15] Peng B F, Li J, Jiang N, Jiang Y, Chen Z Q, Lei Z P, Song J C 2024 *Phys. Fluids* **36** 037144
- [16] Liu Q J, You M, Wang J M, Chen Y Y, Guo Z H, Zhu S S, Wu S Q 2024 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **52** 3166
- [17] Li J F, Yao J F, Wang Ying, Zhou Z X, Lan Z H, Yuan C X 2024 *Adv. Opt. Mater.* **12** 2303244
- [18] Wang R G, Li B, Zhang T K, Ouyang J T, Sun Y R 2020 *Plasma Sci. Technol.* **22** 085002
- [19] Zhang L, Ouyang J T 2014 *Phys. Plasmas* **21** 103514
- [20] Liu F C, Liu Y N, Liu Q, Wu Z C, Liu Y H, Gao K Y, He Y F, Fan W L, Dong L F 2022 *Plasma Sources Sci. Technol.* **31** 025015
- [21] Dong L F, Li Y H, Yan Z H, He Y N, Li C, Pan Y Y 2025 *Chaos Soliton Fractals* **200** 117023
- [22] Dong L F, Li Y H, Qi X X, Fan W L, Li R, Liu S, Pan Y Y 2025 *Opt. Express* **33** 37246
- [23] 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
- [24] Ongrak P, Poolyarat N, Suksaengpanomrung S, Sairarasamoot K, Jirakiattikul Y, Rithichai P 2023 *Horticulturae* **9** 1269
- [25] Kim S J, Kim S, Son B K, Lee K H, Park B J, Cho G 2020 *J. Korean Phys. Soc.* **77** 572
- [26] Fan W L, Hou X H, Tian M, Gao K Y, He Y F, Yang Y X, Liu Q, Yao J F, Liu F C, Yuan C X 2022 *Plasma Sci. Technol.* **24** 015402
- [27] Yao J X, Miao J S, Li J X, Lian X Y, Ouyang J T 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 082905
- [28] Ouyang J T, Duan X X, Xu S W, He F 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 025201
- [29] Duan X X, Ouyang J T, Zhao X F, He F 2009 *Phys. Rev. E* **80** 016202
- [30] Dong L F, Xiao H, Fan W L, Zhao H T, Yue H 2010 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 2486
- [31] Dong L F, Li B, Lu N, Li X C, Shen Z K 2012 *Phys. Plasmas* **19** 052304
- [32] Dong L F, Li B, Shen Z K, Wang Y J, Lu N 2012 *Phys. Rev. E* **86** 036211
- [33] Dong L F, Liu B B, Li C X, Pan Y Y 2019 *Phys. Rev. E* **100** 063201
- [34] Dong L F, Liu W B, Wang Y J, Zhang X P 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 2
- [35] 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
- [36] Dong L F, Mi Y L, Pan Y Y 2020 *Phys. Plasmas* **27** 023504
- [37] Sinclair J, Walhout M 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 035005
- [38] Liu W B, Wang Y J, Zhang H, Pan Y Y, Dong L F 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 056101
- [39] Chu J H, Dong L F, Tian M, Li Y H, He Y N, Zhang J H, Pan Y Y 2024 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **54** 245212 (in Chinese) [褚佳惠, 董丽芳, 田淼, 李耀华, 贺玉楠, 张建华, 潘宇扬 2024 中国科学: 物理学 力学 天文学 **54** 245212]
- [40] Dong L F, Qi Y Y, Liu W Y, Fan W L 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 013301
- [41] Dong L F, Qi Y Y, Zhao Z C, Li Y H 2008 *Plasma Sources Sci. Technol.* **17** 015015
- [42] Dong L F, Ran J X, Mao Z G 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 161501
- [43] Li Y H, Pan Y Y, Tian M, Wang Y, He Y N, Zhang J H, Chu J H, Dong L F 2023 *Phys. Plasmas* **30** 033502
- [44] Feng J Y, Pan Y Y, Li C X, Liu B B, Dong L F 2020 *Phys. Plasmas* **27** 063516
- [45] Wang Y F, Wang L, Guo D, Fan X L, Harati J, Huang H, Chen P F, Chen X G, Guo T L, Weng J, Deng K 2025 *Chem. Eng. Sci.* **311** 121537
- [46] Polonskyi O, Hartig T, Uzarski J R, Gordon M J 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 211601

D_{2h} superlattice patterns in dielectric barrier discharge with striped water electrode*

LI Cheng¹⁾ YAN Zhihao¹⁾ QI Xiaoxiu¹⁾ LI Yuxin¹⁾
PAN Yuyang²⁾ DONG Lifang^{1)†}

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

2) (*College of Quality and Technical Supervision, Engineering Research Center of Zero-carbon Energy Buildings and Measurement Techniques, Ministry of Education, Hebei University, Baoding 071002, China*)

(Received 24 July 2025; revised manuscript received 10 September 2025)

Abstract

In this work, a special striped water electrode dielectric barrier discharge device is designed. Through numerical solutions of the Laplace equation, the spatial distribution of the applied electric field is revealed to exhibit a strip-shaped nonuniform distribution featuring the alternating regions of enhanced and weakened field intensity. These field gradients play a pivotal role in governing the plasma, for the intensified regions act as preferential sites for discharge onset, directly shaping the formation and evolution of plasma structures. Using this device, a series of novel striped patterns is observed in the discharge of a mixed gas of air and argon, marking a significant advancement in pattern formation studies. Notably, four striped superlattice patterns are obtained for the first time, each displaying intricate structural hierarchies. Among them, the large and small dot honeycomb striped superlattice pattern featuring structural complexity is chosen to investigate the formation mechanisms. The pattern is composed of three substructures: small dots, large dots, and a honeycomb framework. In the experiment, the emission spectra of different substructures are measured using a spectrograph, revealing that they are in different plasma states. The spatiotemporal dynamic behaviors of the pattern are observed using a high-speed camera and two photomultiplier tubes. It is found that the discharge sequence is small dots \rightarrow large dots \rightarrow honeycomb framework, where the honeycomb framework is formed by the superposition of random discharge filaments. The electric field distributions at different times are simulated by solving the Poisson equation, and the result well explains the formation mechanism of the above-mentioned patterns.

Keywords: dielectric barrier discharge, pattern, plasma

PACS: 52.50.Dg, 52.35.Mw, 47.54.-r, 52.80.Tn

DOI: [10.7498/aps.74.20250985](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250985)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250985](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250985)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12075075), the Central Government Guiding Local Science and Technology Development Fund (Grant No. 246Z7607G), the Foundation of President of Hebei University, China (Grant No. XZJJ202317), and the Excellent Youth Research Innovation Team of Hebei University, China (Grant No. QNTD202402).

† Corresponding author. E-mail: donglfhbu@163.com

条纹水电极介质阻挡放电中 D_{2h} 超点阵斑图

李骋 闫志浩 齐晓秀 李雨昕 潘宇扬 董丽芳

D_{2h} superlattice patterns in dielectric barrier discharge with striped water electrode

LI Cheng YAN Zhihao QI Xiaoxiu LI Yuxin PAN Yuyang DONG Lifang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 225202 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250985

CSTR: 32037.14.aps.74.20250985

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250985>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双气隙下介质阻挡放电斑图的放电特性与参数诊断

Discharge characteristics and parameter diagnosis of dielectric barrier discharge patterns in double-gap configuration

物理学报. 2025, 74(11): 115202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250111>

结合机器学习的大气压介质阻挡放电数值模拟研究

Numerical study of discharge characteristics of atmospheric dielectric barrier discharges by integrating machine learning

物理学报. 2022, 71(24): 245201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221555>

正弦削波电压调控大气压氦气非平滑表面介质阻挡放电均匀性的仿真研究

Numerical study on uniformity of atmospheric helium gas dielectric barrier discharge on non-smooth surface regulated by sinusoidal clipping voltage

物理学报. 2023, 72(13): 135201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230385>

射频/直流驱动大气压氩气介质阻挡放电的一维仿真研究

One-dimensional simulation of Ar dielectric barrier discharge driven by combined rf/dc sources at atmospheric pressure

物理学报. 2022, 71(24): 245202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221361>

环-点阵-同心环斑图的放电演化机理及光谱诊断研究

Discharge evolution mechanism and spectral diagnostic study of loop dot-matrix concentric-roll pattern

物理学报. 2025, 74(18): 185202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250737>

同轴枪放电等离子体动力学与杂质谱特性

Dynamics and impurity spectral characteristics of coaxial gun discharge plasma

物理学报. 2024, 73(18): 185203 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240760>