

介质阻挡放电中类蜂窝超点阵斑图*

李耀华¹⁾ 燕兆赫¹⁾ 闫志浩¹⁾ 李骋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18日收到; 2025年9月18日收到修改稿)

本文设计了一种具有长方形边界的介质阻挡放电装置, 首次观察到了一种包含被隔列拉伸蜂窝框架的蜂窝超点阵斑图, 并对其形成机制进行了实验和理论研究. 随着外加电压的增大, 斑图从具有 D_{6h} 对称性的蜂窝超点阵斑图演化到 D_{2h} 对称性的类蜂窝超点阵斑图. 实验上采用高速照相机和光电倍增管测量了上述两种斑图的时空结构, 发现蜂窝超点阵斑图中的六边形子点阵变成大、小条纹两个子点阵, 同时蜂窝框架子点阵被隔列拉伸, 而且除上升沿放电外还存在下降沿放电. 理论上使用 COMSOL Multiphysics 软件数值求解泊松方程, 模拟了外加电压上升沿中的隔列拉伸蜂窝框架放电前后的电场, 其结果很好地解释了实验现象, 给出了隔列拉伸蜂窝框架的形成机制.

关键词: 介质阻挡放电, 斑图, 时空动力学**PACS:** 52.35.Mw, 47.54.-r, 52.80.Tn**DOI:** 10.7498/aps.74.20250952**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250952

1 引言

斑图是一种典型的非线性自组织现象, 广泛存在于自然界中, 如动物体表花纹、蜂窝、沙漠条纹及螺旋星系等. 自 1952 年 Alan Turing 将斑图作为一种生物系统中形态发生的机制提出后, 研究者在实验系统 (如化学反应扩散系统^[1,2]、瑞利-贝纳德对流系统^[3,4]、法拉第系统^[5,6] 和介质阻挡放电系统^[7-10] 等) 中对斑图进行了广泛研究. 介质阻挡放电 (dielectric barrier discharge, DBD), 又称无声放电, 是典型的非平衡态气体放电^[11,12]. 因其装置结构简单、造价低等特点被广泛应用于工业领域, 如臭氧发生器、材料表面改性、等离子体化学气相沉积和污染控制等领域^[13-15]. DBD 系统中的自组织斑图因其形成时间短、装置相对简单及测量

方便等特点^[16-21], 也在等离子体光子晶体、材料局域生长方面具有很广泛的应用前景^[22-25]. 众所周知, 在双平板型介质阻挡放电装置中, 放电模式取决于气压 p 和放电气隙间距 d 的乘积, 当 pd 值较低时 (小于 10 Torr·cm), 放电一般呈现均匀弥散的辉光模式; 当 pd 值较高时 (大于 10 Torr·cm), 放电模式一般为流光模式, 由放电丝 (微放电通道) 组成. 在合适的条件下, 这两种放电模式均能产生 DBD 斑图.

随着介质阻挡放电斑图研究的深入, 人们发现放电气隙的边界对斑图形成具有重要影响. 例如, Duan 等^[26] 通过采用不同边界形状的平面电极, 在辉光放电中研究了电极尺度对斑图形成的影响, 发现边界处条纹的形状随边界形状改变. 近几年, 在流光放电中研究了气隙边界对斑图形成的影响, 发现参数 l/d (l 是放电区域的长度, d 为放电气隙间

* 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)、河北大学优秀青年科研创新团队 (批准号: QNTD202402).

† 通信作者. E-mail: donglfhbu@163.com

距) 是一个关键因素: 当该参数远远大于 25 时, 斑图是自组织形成的; 当其小于 5 时, 斑图的形状及形成过程受边界影响较大; 当其介于 5 到 25 之间时, 边界电场畸变使得斑图的轮廓受边界约束, 而远离边界处斑图的对称性仍然依靠内在性质 [27]. 卫婷等 [28] 使用多个正方形边界作为放电气隙, 每个正方形的 $l/d = 5$ (其中放电区域的长度为正方形边长), 得到了具有呼吸振动的超四边形斑图, 其振动特性与边界电场有关. 在以往关于边界参数 (l/d) 对斑图形成影响的研究中, 所使用的 l/d 为单一值. 针对上述情况, 本文特别设计了长方形气隙边界, 长边界的 l/d 大于 5, 短边界的 l/d 小于 5, 通过同时利用两种边界参数进行实验, 首次观测到一种包含隔列拉伸蜂窝框架的蜂窝超点阵斑图.

蜂窝结构指的是类似蜂窝的正六边形多孔结构, 在介质阻挡放电斑图中常作为复杂斑图的子点阵出现. 对其深入研究发现其形成机制虽多样, 但基本均在外加电压上升沿 ($d|U|/dt > 0$) 放电, 且与壁电荷有关. 壁电荷是放电后在介质表面积累的电荷, 其产生的内建电场与外电场方向相反, 可熄灭当前放电 [29]. 若壁电荷积累较多, 产生的内建电场高于放电的击穿阈值, 则放电会在同一外加电压半周期的下降沿 ($d|U|/dt < 0$) 发生. Dong 等 [30] 发现, 蜂窝六边形斑图中由两套六边形子点阵组成的分立型的蜂窝结构, 其放电发生在外加电压上升沿, 并呈现时间反演对称性, 这是由于壁电荷对放电的禁阻和促进双重作用. Bernecker 等 [19] 观察到六边形斑图中, 六边形结构放电产生的壁电荷诱导

远离放电丝的区域放电, 形成上升沿放电的蜂窝结构. Zhu 等 [31] 在外加电压上升沿中放电的蜂窝超点阵斑图中, 获得了清晰可见的蜂窝结构, 并指出蜂窝子点阵是由随机放电丝叠加形成的. 于广林等 [32] 发现了具有三套子点阵的带晕蜂窝六边形斑图, 其中蜂窝结构在外加电压上升沿放电, 且受到晕结构产生的壁电荷影响. 与上述发现不同, 本文在类蜂窝超点阵斑图中, 首次观察到形变的蜂窝结构, 且在外加电压的上升沿和下降沿均发生放电.

本文在长方形气隙边界介质阻挡放电装置中, 发现了包含被隔列拉伸蜂窝框架子点阵的蜂窝超点阵斑图. 研究了其演化序列和形成条件. 采用高速照相机和光电倍增管测量蜂窝超点阵斑图和类蜂窝超点阵斑图的时空动力学. 通过估算两种蜂窝框架的壁电荷量, 探究两种蜂窝框架的形成机制. 使用 COMSOL Multiphysics 软件求解泊松方程模拟隔列拉伸的蜂窝框架放电前后气隙内的电场, 解释了类蜂窝超点阵斑图的形成机制, 完善了介质阻挡放电蜂窝斑图的研究体系.

2 实验装置

实验装置如图 1 所示. 内径为 60 mm 的圆柱容器的两端用 1.5 mm 厚的玻璃板密封, 在容器内充满水, 将铜环浸入水中构成水电极. 使用两个水电极与 50 kHz 交流高压电相连. 在两个水电极之间放入一个厚度为 5.6 mm、长和宽分别为 5 cm 和 2 cm 的长方形中空玻璃框架, 计算得到长边和

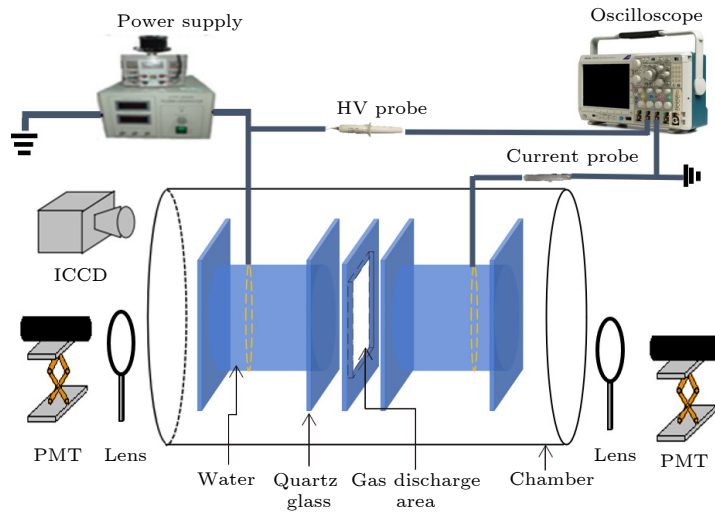


图 1 实验装置图

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

短边的 l/d 分别为 8.9 和 3.5. 将水电极平行放置在透明的密闭容器内, 充满空气和氩气的混合气体, 其中氩气含量为 30%, 气压为 12.1 kPa. 采用数码相机 (Canon PowershotG16, 曝光时间为 12.5 ms) 拍摄斑图的演化序列, 采用两个光电倍增管 (PMT RCA7625) 采集光信号, 数字示波器 (Tektronix DPO4054B, 500 MHz) 记录储存电流电压波形图和光信号. 使用高速照相机 (ICCD, HSFC Pro, 3channels) 分脉冲拍摄瞬时照片.

3 实验结果

随着外加电压的增大, 类蜂窝超点阵斑图的演化序列如图 2(a)–(f) 所示. 当外加电压 $U = 4.0$ kV 时, 气隙内气体被击穿产生了随机放电丝 (图 2(a)). 电压增至 5.0 kV 时, 形成蜂窝超点阵斑图 (图 2(b)),

具有 D_{6h} 对称性 (含有对称操作 E , $7C_2$, C_6 , C_3 , C_2^5 , C_6^5 , S_6 , S_3 , S_3^5 , S_6^5 , i , σ_h 和 $6\sigma_v$, 称为 D_{6h} 点群). 随着电压缓慢增大, 蜂窝超点阵斑图中的蜂窝框架结构增厚 (图 2(c)). 在电压为 5.6 kV 时, 形成了包含被隔列拉伸的蜂窝框架子点阵的蜂窝超点阵斑图 (图 2(d)), 简称为类蜂窝超点阵斑图, 对称性为 D_{2h} (含有对称操作 E , $3C_2$, i 和 $3\sigma_v$, 称为 D_{2h} 点群). 继续升高电压, 斑图呈现向蜂窝超点阵斑图回归的趋势, 形成了不稳定的蜂窝超点阵斑图 (图 2(e)). 当电压达到 6.4 kV 时, 形成了模糊条纹状斑图 (图 2(f)). 为了直观显示演化过程中蜂窝框架子点阵的变化, 图 2(g) 展示了不同蜂窝斑图中 (对应图 2(b)–(e)) 蜂窝框架子点阵的标记 (S_b , S_c , S_{d1} , S_{d2} , S_e). 从对比中可以看出, 框架尺寸有减小的趋势, 但是当电压为 5.6 kV 时, 蜂窝框架被大幅度压缩, 造成了最小的蜂窝框架 S_{d2} 和最长的蜂窝框架 S_{d1} , 形成被

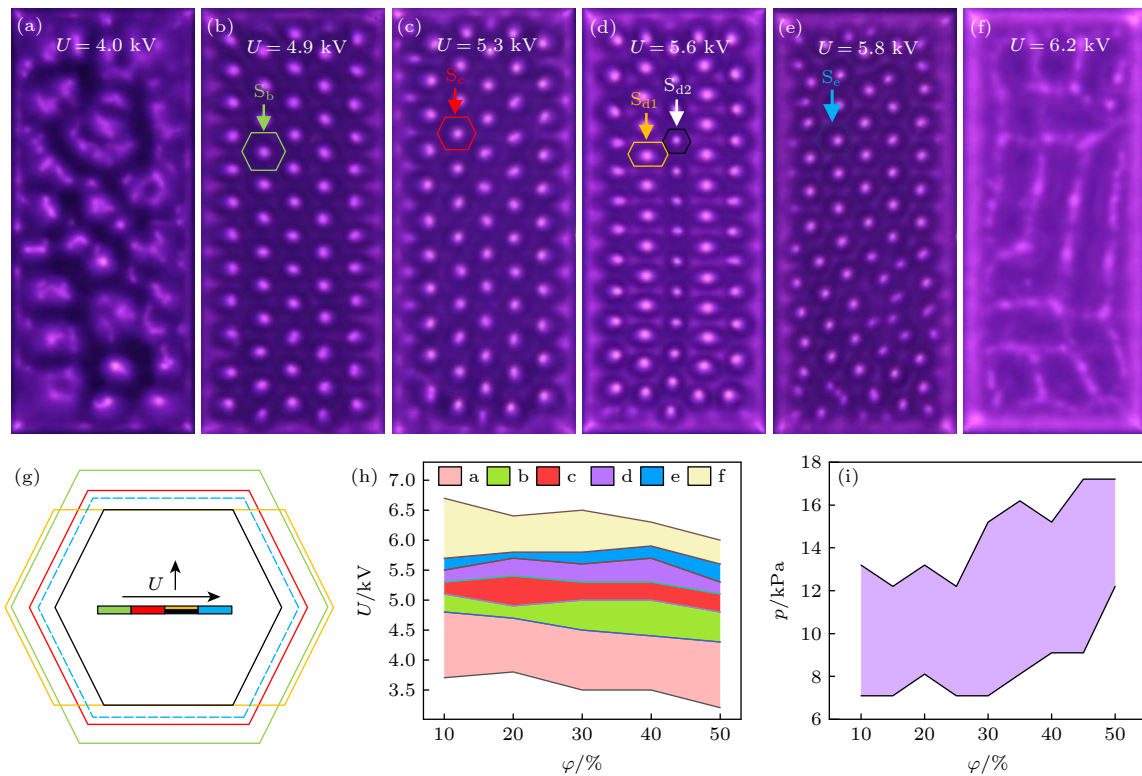


图 2 随着外加电压的增加斑图的演化序列 (a) 随机放电丝, $U = 4.0$ kV; (b) 蜂窝超点阵斑图, $U = 4.9$ kV; (c) 蜂窝框架加厚的蜂窝超点阵斑图, $U = 5.3$ kV; (d) 类蜂窝超点阵斑图, $U = 5.6$ kV; (e) 不稳定的蜂窝超点阵斑图, $U = 5.8$ kV; (f) 模糊条纹状, $U = 6.4$ kV; (g) 不同蜂窝斑图中蜂窝框架子点阵的示意图; (h) 斑图 (a)–(f) 的电压 U 与氩气含量 φ 的相图; (i) 类蜂窝超点阵斑图的气压 p 与氩气含量 φ 的相图

Fig. 2. Transition of the pattern with the applied voltage increasing: (a) Random discharge filament, $U = 4.0$ kV; (b) honeycomb superlattice pattern, $U = 4.9$ kV; (c) honeycomb superlattice pattern with thicker honeycomb frame, $U = 5.3$ kV; (d) quasi honeycomb superlattice pattern, $U = 5.6$ kV; (e) unstable honeycomb superlattice pattern, $U = 5.8$ kV; (f) vague stripe, $U = 6.4$ kV; (g) schematic diagram of the sublattice of the honeycomb frame in different honeycomb patterns; (h) the phase diagram of the patterns in evolution sequence as a function of the voltage U and argon concentration φ shown in panel (a)–(f); (i) the phase diagram of quasi honeycomb superlattice pattern as a function of the gas pressure p and argon concentration φ .

隔列拉伸的蜂窝框架. 为了证明斑图的出现并非偶然, 图 2(h) 记录了演化序列中出现各斑图时的氩气含量与外加电压范围. 对于类蜂窝超点阵斑图, 可以从氩气含量在 10%—50%、气压在 7—17 kPa 范围内获得 (图 2(i)).

为了研究类蜂窝超点阵斑图的形成机制, 首先对其时空动力学进行研究, 使用 ICCD 对斑图进行分脉冲拍摄. 放电的电压电流波形图在图 3(a) 中给出, 在外加电压的每半个周期内, 电流脉冲大致分为 Δt_1 和 Δt_2 ($\Delta t_1 = 1440$ ns, $\Delta t_2 = 640$ ns) 两部分, 前一个脉冲位于外加电压的上升沿, 后一个脉冲位于电压下降沿. 图 3(b), (c) 是分脉冲拍摄且叠加 100 个放电周期后染色的照片, 图 3(d) 展示了这两张照片叠加. 发现隔列拉伸的蜂窝框架在 Δt_1 放电, 条纹点阵在外加电压下降沿 Δt_2 放电, 其中隔列拉伸的蜂窝框架结构由多个放电周期内随机放电丝放电叠加构成, 这之前研究的蜂窝子点阵的形成机制相似^[19,30,31], 但条纹点阵中大小点放电情况仍未明确.

为了明确类蜂窝超点阵斑图子点阵的放电顺序, 采用时间灵敏度更高的 PMT 测量斑图的不同子点阵之间的时间相关性. 分别用 B, S, F 表示类蜂窝超点阵斑图中的大点条纹点阵、小点条纹点阵、隔列拉伸的蜂窝框架. 图 4(b), (c) 分别展示了 S 与 F, B 与 S 之间的时间相关性测量. 值得指出的是, F 在半周期内放电两次, 一次在电压上升沿, 一次在电压下降沿, 其中下降沿 F 在 S 后放电, F 在下降沿放电这一情况并未在图 3 使用 ICCD 时

观察到. 这是因为 Δt_2 中, S 的放电信号强度大于下降沿放电的 F. 根据上述描述, 类蜂窝超点阵斑图放电顺序为 F-B-S-F, 其放电结构示意图在图 4(d) 中给出.

为了研究隔列拉伸的蜂窝框架子点阵出现的原因, 对演化为类蜂窝超点阵斑图之前的蜂窝超点阵斑图进行研究, 使用 ICCD 测量图 2(b) 蜂窝超点阵斑图和图 2(c) 蜂窝框架加厚的蜂窝超点阵斑图的时空特性, 经测量它们的放电行为相近, 此处只展示图 2(b) 蜂窝超点阵斑图的时空测量结果. 图 5(a) 是蜂窝超点阵斑图放电过程中的电压电流波形图, 将外加电压的每半个周期内的电流脉冲分成 Δt_1 和 Δt_2 两个部分 ($\Delta t_1 = 560$ ns, $\Delta t_2 = 2000$ ns). 图 5(b)—(d) 是对斑图分脉冲拍摄且叠加 100 个放电周期的结果. 发现六边形点阵和蜂窝框架分别在 Δt_1 和 Δt_2 放电, 且都在外加电压的上升沿放电. 通过比较图 2(b) 的蜂窝框架与图 2(d) 的隔列拉伸的蜂窝框架的放电行为, 发现后者存在壁电荷主导的下降沿放电.

为了探究这两种大小不同的蜂窝框架放电行为不同的原因, 对这两种蜂窝框架放电后积累的壁电荷量进行计算, 进而初步阐明类蜂窝超点阵斑图的形成机制. 壁电荷的分布情况可以由转移的电荷量 ($Q = \int I dt$) 定量地反映出来^[33]. 分别对图 2(b)—(d) 中的子点阵: 蜂窝框架、加厚的蜂窝框架和外加电压上升沿中隔列拉伸的蜂窝框架, 计算壁电荷量, 结果为 $\Delta Q_{F_1} = 3.9 \times 10^{-9}$ C, $\Delta Q_{F_2} = 5.8 \times 10^{-9}$ C 和 $\Delta Q_{F_3} = 7.0 \times 10^{-9}$ C, 图 6 展示其中两种蜂窝框

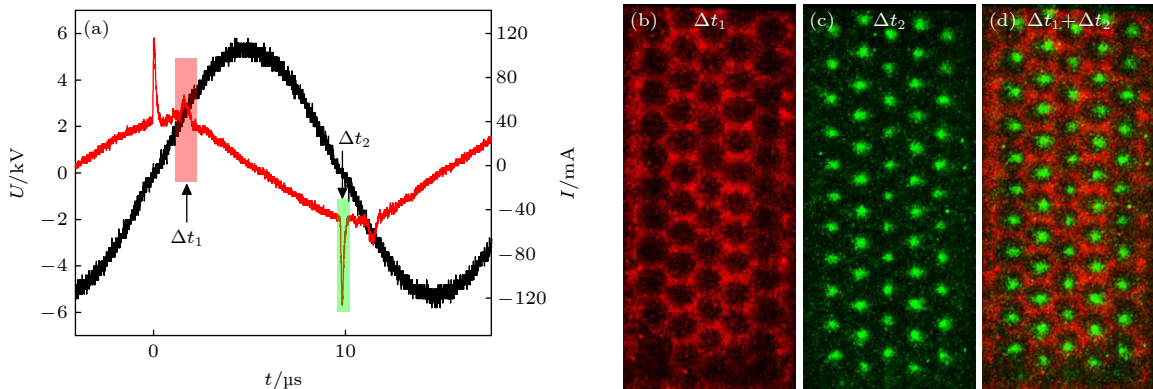


图 3 类蜂窝超点阵斑图的瞬时照片 (a) 斑图的电压电流波形图 ($\Delta t_1 = 1440$ ns, $\Delta t_2 = 640$ ns); (b), (c) 分别对应曝光时间为 Δt_1 和 Δt_2 的染色叠加 100 个电压周期的瞬时照片; (d) 图 (b) 和图 (c) 的叠加图

Fig. 3. Instantaneous images of the quasi honeycomb superlattice pattern: (a) Waveforms of the voltage and the current ($\Delta t_1 = 1440$ ns, $\Delta t_2 = 640$ ns); (b), (c) images exposed corresponding to the current pulse phases denoted by Δt_1 and Δt_2 in panel (a), respectively, and the images are integrated for 100 voltage cycles; (d) superposition of panels (b), (c).

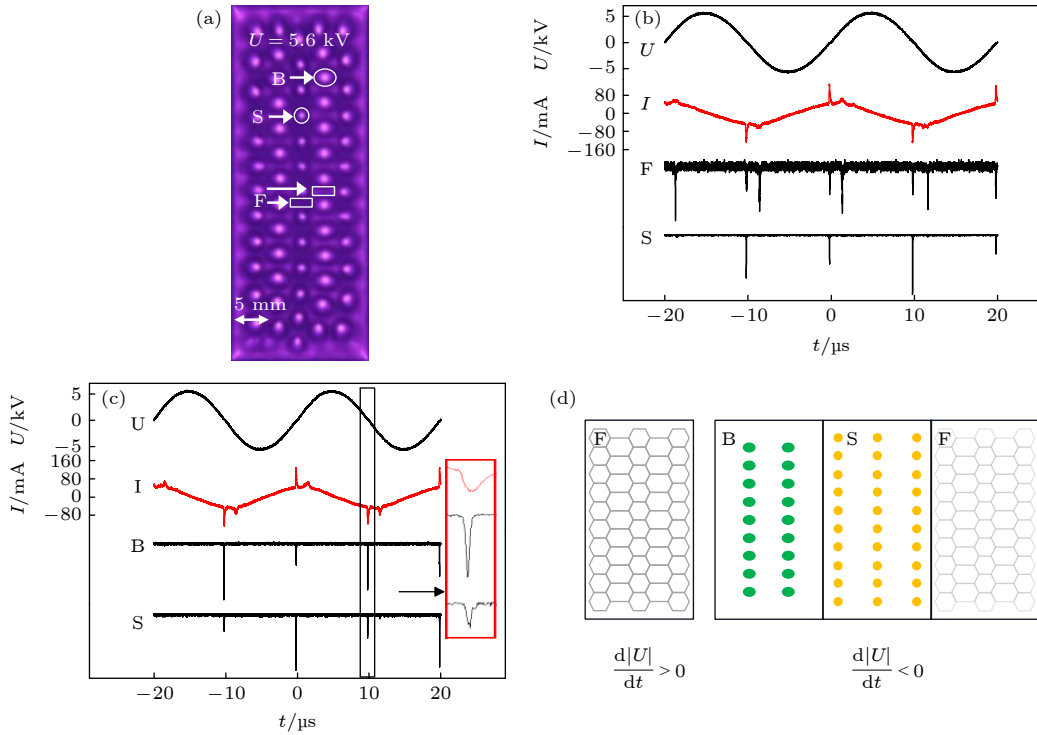


图 4 类蜂窝超点阵斑图中不同子结构的时空相关性测量 (a) 类蜂窝超点阵斑图; (b), (c) F 和 S、B 和 S 的时间相关性测量; (d) 斑图时空结构示意图

Fig. 4. Spatiotemporal correlation measurement of different substructures in a quasi honeycomb superlattice pattern: (a) Quasi honeycomb superlattice pattern; (b), (c) measurement of the temporal correlation between F and S, B and S; (d) schematic diagram of the spatial and temporal structure of the pattern.

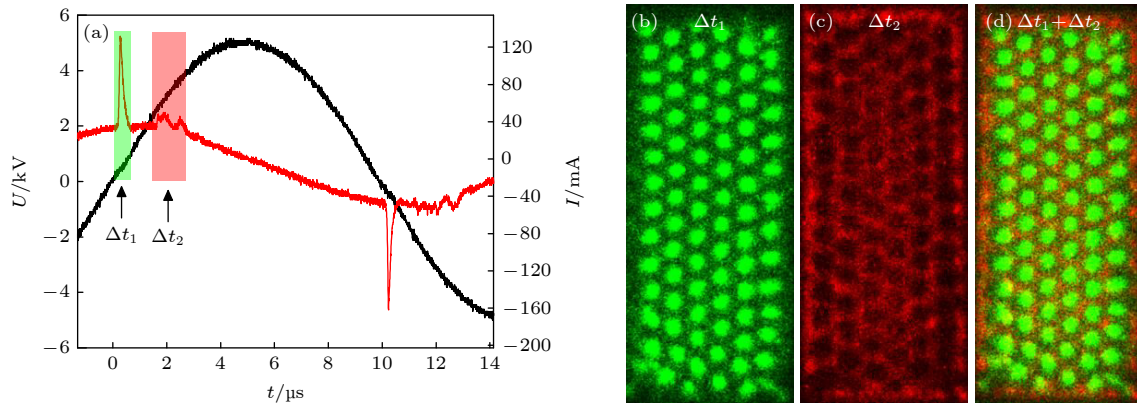


图 5 蜂窝超点阵斑图的瞬时照片 (a) 斑图的电压电流波形图 ($\Delta t_1 = 560$ ns, $\Delta t_2 = 2000$ ns); (b), (c) 分别对应曝光时间为 Δt_1 和 Δt_2 的染色叠加 100 个电压周期的瞬时照片; (d) 图 (b) 和 (c) 的叠加图

Fig. 5. Instantaneous images of the honeycomb superlattice pattern: (a) Waveforms of the voltage and the current ($\Delta t_1 = 560$ ns, $\Delta t_2 = 2000$ ns); (b), (c) images exposed corresponding to the current pulse phases denoted by Δt_1 and Δt_2 in (a), respectively, and the images are integrated for 100 voltage cycles; (d) superposition of panels (b), (c).

架的电压电流脉冲图. 可以发现随着电压的增大, ΔQ_F 逐渐增大. 当电压达到 5.6 kV 时, 上升沿放电积累的壁电荷显著增加, 其形成的反向内建电场强度超过气隙的击穿阈值, 从而促使斑图内部出现下降沿放电. 该过程通过消耗上升沿积累的壁电荷, 削弱了蜂窝超点阵斑图中的壁电荷记忆效应,

并引发蜂窝框架的形变及其放电行为的改变. 随电压升高, 斑图内部放电丝密度增大, 电荷不断累积来持续压缩蜂窝框架. 在 5.6 kV 阈值下, 具有 D_{6h} 对称性的蜂窝超点阵斑图受到具有 D_{2h} 对称性的长方形气隙的影响, 演化到 D_{2h} 对称性的类蜂窝超点阵斑图. 此时短边 ($l/d < 5$) 会使得蜂窝框

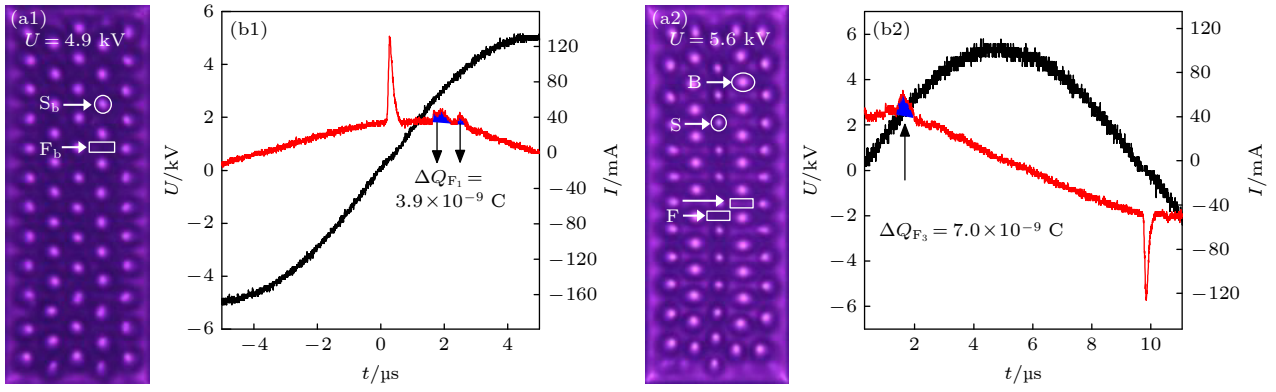


图 6 (a1), (b1) 蜂窝超点阵斑图及其电压电流波形图; (a2), (b2) 类蜂窝超点阵斑图及其电压电流波形图

Fig. 6. (a1), (b1) Honeycomb superlattice pattern and its voltage and current waveforms diagram; (a2), (b2) quasi honeycomb superlattice pattern and its voltage and current waveforms diagram.

架无法均匀地缩小, 产生具有挤压和拉伸形态的蜂窝框架; 而在远离长边 ($5 < l/d < 25$) 处受到边界影响较小, 两种形态的蜂窝框架被均匀地压缩到同一高度. 两个边界共同影响下形成隔列拉伸的蜂窝框架. 蜂窝架放电后, 产生的壁电荷量足够多, 诱发大小条纹点阵在下降沿放电, 其中壁电荷未完全消耗, 导致隔列拉伸的蜂窝框架再次放电. 类蜂窝超点阵斑图中下降沿放电, 即放电过程中产生的壁电荷会作用于放电本身, 以及隔列拉伸蜂窝框架的形成, 均体现了自组织特性.

综上所述, 随着外加电压的增大, 放电气隙内产生了更多的壁电荷, 同时受到边界对称性的影响, 蜂窝超点阵斑图演化为类蜂窝超点阵斑图, 出现了下降沿放电.

4 隔列拉伸的蜂窝框架形成机制的电场模拟

为了深入探究长方形边界中类蜂窝超点阵斑图形成机制, 使用 COMSOL Multiphysics 软件对泊松方程求解, 模拟了隔列拉伸的蜂窝框架放电前后的电场.

泊松方程如下:

$$\nabla^2 \Psi = -\frac{\rho}{\varepsilon_r \varepsilon_0}, \quad (1)$$

其中, Ψ 代表电势, ρ 代表电荷密度, ε_r 代表介质的相对介电常数, ε_0 代表真空介电常数. 气隙中的电场 E 和电势 Ψ 之间的关系为

$$E = -\nabla \Psi. \quad (2)$$

关于隔列拉伸的蜂窝框架在半个电压周期内

有两处放电, 下降沿处放电在上文中已经进行了讨论并得到很好的解释, 下面将对上升沿处, 隔列拉伸的蜂窝框架的形成过程进行模拟.

对图 3 中 Δt_2 电流脉冲积分估算出下降沿放电后积累的壁电荷量为 $\Delta Q_{S_3} = 12.5 \times 10^{-9}$ C, 代入泊松方程并求解, 结果如图 7(a) 所示. 框架处的电场强度大, 且形成隔列拉伸的形状, 因此在下一周期的电压上升沿, 气隙内形成了隔列拉伸的蜂窝框架. 对图 3 中 Δt_1 电流脉冲积分估算出框架放电后积累的壁电荷为 $\Delta Q_{F_3} = 7.0 \times 10^{-9}$ C, 将结果代入泊松方程中, 求解得到结果如图 7(b) 所示. 被隔列拉伸的蜂窝框架放电后形成了, 大点条纹点阵附近的电场强度大于小点条纹处附近的电场强度, 由此导致大点条纹点阵先于小点条纹点阵放电, 该结果与实验结果相符.

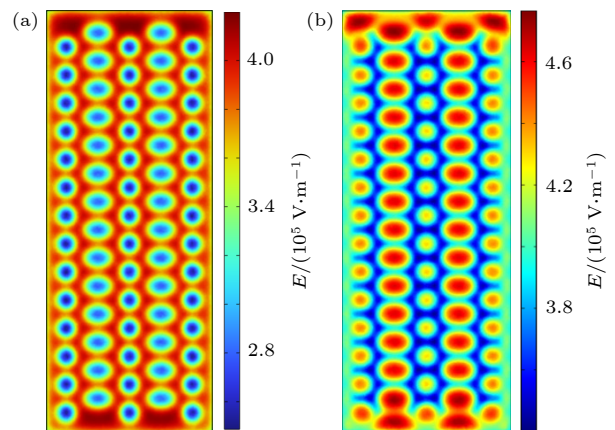


图 7 隔列拉伸的蜂窝框架放电前后的电场分布 (a) 放电前; (b) 放电后

Fig. 7. Electric field distribution of the alternately-stretched honeycomb frame before and after discharging: (a) Before discharging; (b) after discharging.

综上, 通过求解泊松方程模拟电场分布, 得到了在外加电压上升沿隔列拉伸蜂窝框架的时空演化顺序, 模拟结果很好地解释了实验结果.

5 结 论

利用特殊设计的长方形边界的介质阻挡放电系统, 首次观察到了一种包含有隔列拉伸蜂窝框架的蜂窝超点阵斑图, 并对其进行了实验和理论研究. 发现随着电压的增加, 斑图从具有 D_{6h} 对称性的蜂窝超点阵斑图演化到 D_{2h} 对称性的类蜂窝超点阵斑图. 实验采用高速相机和光电倍增管测量了上述两种斑图的时空结构, 发现蜂窝超点阵斑图中的六边形子点阵变成了大、小条纹两个子点阵, 同时蜂窝框架子点阵被隔列拉伸, 而且除上升沿放电外还存在下降沿放电. 通过研究蜂窝框架和隔列拉伸蜂窝框架放电行为的不同, 发现隔列拉伸的蜂窝框架产生足够多的壁电荷, 诱导产生下降沿放电, 改变了斑图的形成机制. 使用 COMSOL Multiphysics 软件数值求解泊松方程, 模拟了隔列拉伸的蜂窝框架放电前后的电场, 模拟结果很好地解释了实验结果. 长方形边界中出现的两种不同对称性斑图, 丰富了介质阻挡放电斑图种类, 为调控斑图提供新的思路, 深化了对等离子体物理放电机制的理解.

参考文献

- [1] Bansagi T, Vanag V K, Epstein I R 2011 *Science* **331** 1309
- [2] Kameke A V, Huhn F, Munuzuri A P, Perez-Munuzuri 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 088302
- [3] Rogers J L, Schatz M F, Brausch, Pesch W 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 4281
- [4] Perkins A C, Grigoriev R O, Schatz M F 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 064501
- [5] Cominotti R, Berti A, Farolfi A, Zenesini A, Lamporesi G, Carusotto I, Recati A, Ferrari G 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 210410
- [6] Frumkin V, Gokhale S 2023 *Phys. Rev. E* **108** 012601
- [7] Bernecker B, Callegari T, Boeuf J P 2011 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** 262002
- [8] Shih H, Wang Y H, Wang D Z 2008 *Phys. Plasmas* **15** 122306
- [9] McKay K, Donaghy D, He F, Bradley J W 2017 *Plasma Sources Sci. Technol.* **27** 015002
- [10] Fan W L, Deng T K, Liu S, Liu R Q, He Y F, Liu Y H, Liu Y N, Liu F C 2025 *Phys. Rev. E* **111** 024210
- [11] Kogelschatz U 2003 *Plasma Chem. Plasma Process.* **23** 1
- [12] Callegari T, Bernecker B, Boeuf J P 2014 *Plasma Sources Sci. Technol.* **23** 054003
- [13] Boeuf J P 2003 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **36** R53
- [14] Polonsky O, Hartig T, Uzarski J R, Gordon M J 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 211601
- [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] Brauer I, Bode M, Ammelt E, Purwins H G 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4104
- [17] Breazeal W, Flynn K M, Gwinn E G 1995 *Phys. Rev. E* **52** 1503
- [18] Guikema J, Miller N, Niehof J, Klein M, Walhout M 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3817
- [19] Bernecker B, Callegari T, Blanco S, Fournier R, Boeuf J P 2009 *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **47** 22808
- [20] Nie Q Y, Ren C S, Wang D Z, Li S Z, Zhang J L, Kong M G 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 221504
- [21] Dong L F, Mao Z G, Ran J X 2005 *Chin. Phys.* **14** 1618
- [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] 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
- [25] Fan W L, Wang Q H, Li R, Deng T K, Wang S, Li Y H, He Y F, Chu L Z, Liu F C 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 121703
- [26] Duan X X, Ouyang J T, Zhao X F, He F 2009 *Phys. Rev. E* **80** 016202
- [27] Feng J Y, Dong L F, Wei L Y, Fan W L, Li C X, Pan Y Y 2016 *Phys. Plasmas* **23** 093502
- [28] 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]
- [29] Dong L F, Fan W L, He Y F, Liu F C, Li S, Gao R L, Wang L 2006 *Phys. Rev. E* **73** 066206
- [30] Dong L F, Liu W L, Wang H F, He Y F, Fan W L, Gao R L 2007 *Phys. Rev. E* **76** 046210
- [31] Zhu P, Dong L F, Yang J, Gao Y N, Wang Y J, Li B 2015 *Phys. Plasmas* **22** 023507
- [32] Yu G L, Dong L F, Dou Y Y, Sun H Y, Mi Y L 2018 *Chin. J. Lumin.* **39** 1527 (in Chinese) [于广林, 董丽芳, 窦亚亚, 孙浩洋, 米彦霖 2018 *发光学报* **39** 1527]
- [33] Li Y H, Wang Y, Pan Y Y, Tian M, Zhang J H, Dong L F 2024 *Phys. Plasmas* **31** 033502

Honeycomb-like superlattice pattern in dielectric barrier discharge*

LI Yaohua¹⁾ YAN Zhaohe¹⁾ YAN Zhihao¹⁾ LI Cheng¹⁾
 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 18 July 2025; revised manuscript received 18 September 2025)

Abstract

Patterns formed in dielectric barrier discharge is a typical nonlinear self-organization phenomenon. Research on the patterns helps elucidate the formation and evolution mechanisms of spatiotemporal structures in non-equilibrium systems, while also holding potential application value in fields such as material processing and plasma chemical engineering. A honeycomb superlattice pattern with an alternately-stretched honeycomb frame is observed in dielectric barrier discharge with a rectangular modulated gas gap for the first time and is studied both experimentally and theoretically. As the applied voltage increases, the pattern evolves from a hexagonal superlattice pattern with D_{6h} symmetry to a quasi honeycomb superlattice pattern with D_{2h} symmetry. Experimentally, the spatiotemporal structures of these two patterns are measured using an intensified charge coupled device (ICCD) and two photomultiplier tubes (PMTs). It is found that the hexagonal sublattice in the honeycomb superlattice pattern is divided into two sublattices, including a large stripe sublattice and a small stripe lattice. Additionally, the honeycomb frame sublattice is alternately-stretched. Discharges occur during both the rising and falling edges of the applied voltage. Through the estimation of the wall charge quantities of the two types of honeycomb frames and the analysis of the influence of boundaries on pattern formation, it is found that the quasi honeycomb superlattice pattern emerges as a self-organized structure under the influence of gas gap symmetry. Theoretically, the Poisson equation is numerically solved using COMSOL Multiphysics to simulate the electric field of the alternately-stretched honeycomb frame before and after discharge during the rising phase of the applied voltage. The result well explains the experimental phenomenon and provides the formation mechanism of the alternately-stretched honeycomb frame.

Keywords: dielectric barrier discharge, pattern, spatiotemporal dynamics

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

DOI: [10.7498/aps.74.20250952](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250952)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250952](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250952)

* 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

介质阻挡放电中类蜂窝超点阵斑图

李耀华 燕兆赫 闫志浩 李骋 潘宇扬 董丽芳

Honeycomb-like superlattice pattern in dielectric barrier discharge

LI Yaohua YAN Zhaohe YAN Zhihao LI Cheng PAN Yuyang DONG Lifang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 225201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250952

CSTR: 32037.14.aps.74.20250952

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250952>

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>

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>

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>

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>

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>

混合填充下介质阻挡放电特性的粒子云网格/蒙特卡罗碰撞模拟

Particle-in-cell/Monte Carlo collision simulations of dielectric barrier discharge packed with mixed dielectrics

物理学报. 2025, 74(13): 135201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250208>