论 文

方波占空比对大气压辉光放电斑图的影响研究

耿金伶¹, 贾鹏英¹, 杨林伟¹, 楚婧娣¹, 张琦¹, 李雪辰^{1,2*}

1. 河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002;
2. 河北省光电信息材料重点实验室, 保定 071002

*联系人, E-mail: plasmalab@126.com

收稿日期: 2017-05-11; 接受日期: 2017-08-21; 网络出版日期: 2017-11-20

国家自然科学基金(编号: 11575050, 10805013)、河北省自然科学基金(编号: A2015201092, A2015201199, A2016101042)、河北省百优人才(编号: SLRC2017021)、河北省三三三人才基金(编号: A2016005005)、河北省教育厅科研基金(编号: LJRC001)和中西部高校综合实力提升工程资助项目

摘要 利用方波电压激励针-水电极装置, 在针水间隙产生了大气压辉光放电. 随着方波电压占空比的减小, 在水面上观察到了亮盘、亮盘与外环、同心三环、三环与中心点四种斑图. 通过研究电压、电流波形发现, 放电只产生在负极性电压下, 放电电流由脉冲区和恒定区两部分组成, 有很好的周期性. 并且随着占空比的减小, 放电的起始电压增大, 峰值电流也增大. 采集了水面斑图的发射光谱, 发现主要有氮分子的第二正带系 $N_2(C-B)$ 和第一正带系 $N_2(B-A)$ 、氮分子离子的第一负带系 $N_2^+(A-X)$ 和OH的谱线带系(309 nm). 利用Lifbase软件拟合OH的光谱获得了气体温度, 发现随着占空比的增大, 气体温度升高. 通过同步触发放电电流和ICCD, 研究了不同斑图的时空演化. 结果表明, 水面斑图在电流脉冲区逐渐形成, 而在电流恒定区不发生明显变化. 考虑到空间负电荷, 利用放电基本理论对以上现象进行了分析和解释.

关键词 辉光放电, 自组织斑图, 时空演化, 占空比, 气体温度**PACS:** 52.80.Hc, 52.35.Mw, 52.80.Mg, 52.80.Tn

1 引言

针-水电极放电在大气压下产生的低温等离子体能够广泛地应用于生物医药^[1,2]、化学降解^[3-6]、环境保护^[7,8]、材料分析^[9,10]和材料处理^[11,12]等多个领域.

在低气压电负性气体的射频容性放电中, Liu等人^[13,14]观察到了明暗相间的辉纹, 并且数值模拟了辉纹的形成原因. 在大气压气体放电系统中, 如介质阻挡放电(Dielectric Barrier Discharge, DBD)和阴极层放

电(Cathode Bounday Lay Discharge, CBLD)中, 也发现了放电的自组织现象. 利用介质阻挡放电装置, Dong等人观察到了螺旋斑图^[15]、四边形斑图^[16]和蜂窝斑图^[17]等. 研究发现DBD中自组织斑图由几套不同时刻放电的子结构嵌套而成, 介质表面壁电荷的分布对斑图的形成具有重要影响^[18-20]. 利用CBLD装置, Zhu等人^[21,22]发现了均匀的团块, 规则排列的点和完整的环^[23]. Takano等人^[24]将CBLD中自组织斑图的形成归因于放电丝之间的库仑相互作用. 除了DBD和CBLD

引用格式: 耿金伶, 贾鹏英, 杨林伟, 等. 方波占空比对大气压辉光放电斑图的影响研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 025202
Geng J L, Jia P Y, Yang L W, et al. Influence of square wave duty ratio on pattern formation of atmospheric pressure glow discharge (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 025202, doi: [10.1360/SSPMA2017-00126](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00126)

中的自组织斑图, 在针-水电极放电中也观察到了自组织斑图.

Miao等人^[25]利用直流激励针-水电极装置, 在针水间隙产生了圆锥形的放电, 并在水面上观察到了空心环. Alyssa等人^[26]对其研究发现, 环状斑图是通过放电丝的旋转形成的. Leys课题组^[27]研究发现, 随着液体电导率的减小和放电电流的增大, 水面上的点状斑图的直径增大. 通过引入轴向氦气流, Sharai等人^[28]发现了单环、双环和齿轮状斑图, 并发现斑图种类受气隙间距、电解质浓度和工作气体成分的影响. 此外, Sharai等人^[29]发现, 只有在氦气中混入电负性气体才能形成自组织斑图. 以上研究中, 针水电极产生的自组织斑图都是由直流电源激励的. Zheng等人^[30]利用正弦交流电源激励针水电极, 也发现水面上会形成单环、双环、点状和齿轮状的自组织斑图.

本文采用方波电压激励针-水电极装置, 在针水间隙产生了大气压辉光放电. 通过改变方波的占空比, 在水面上发现了亮盘、亮盘与外环、同心三环、三环与中心点4种斑图. 利用高速照相, 电学测量和发射光谱等手段, 研究了斑图的放电特性和时空演化.

2 实验装置

实验装置如图1所示. 一根长10 cm的钨针(直径1 mm, 针尖曲率半径约为300 μm)与电源的高压输出端相连, 它竖直固定在水平放置的圆柱形水槽上方. 针尖距离水面6 mm. 水槽直径为7.5 cm, 高度为8 cm, 槽中装有300 mL电导率约为400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的自来水. 一个粗2 mm铝线制成直径6 cm的铝环, 放置在水槽的底部, 通过它实现水电极的接地. 高压信号由信号发生

图1 (网络版彩图)实验装置图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the experiment.

器(Tektronix AFG 3021)控制, 且经过高压放大器(Trek MODEL 20/20C-HS, 美国)放大2000倍后输出. 空载情况下, 方波电压(理想电压)的正高值(U_{pp})为1 kV, 负高值(U_{np})为-10 kV, 频率为3 kHz. 电压探头(Tektronix P6015A)与针电极相连用于测量放电电压. 用电流探头(Tektronix TCP 312A)测量放电电流. 放电电压和电流通过示波器(Tektronix DPO4104)显示并记录. 利用光谱仪(ACTON SP-2750)采集水面斑图的发射光谱. 通过配有微距镜头的数码相机(Canon EOS 7D, 美国)和ICCD (Intensified Charge-Coupled Device)即增强电荷耦合器件(Andor DH334T, 美国)拍摄水面上的自组织斑图, 曝光时间分别为1/20 s和2 μs , 镜头视线与水平面的夹角是45°.

3 实验结果与分析

随方波占空比(负极性电压占一个周期的百分比)的减小, 水面斑图的结构呈现规律性变化, 如图2所示. 当占空比为89%时, 一个直径约为2 mm、中间稍暗的亮盘出现在水面上(图2(a)). 当占空比减小到78%时, 亮盘转变成了亮盘与外环斑图, 如图2(b)所示. 外环的

图2 (网络版彩图)曝光时间为1/20 s下, 不同占空比下水面上的自组织斑图. (a) 亮盘, 占空比89%; (b) 亮盘与外环, 占空比78%; (c) 同心三环, 占空比46%; (d) 三环与中心点, 占空比18%

Figure 2 (Color online) Self-organized patterns with an exposure time of 1/20 s on the water surface with different duty ratios. (a) Bright disk, 89%; (b) bright disk with outer ring, 78%; (c) triple ring, 46%; (d) triple ring with central spot, 18%.

轮廓很清晰且它与中心亮盘之间存在很明显的暗区. 对比图2(a)与(b)可知, 放电区域的直径随着占空比的减小而增大. 继续减小占空比, 水面上出现了规则的同心三环斑图(图2(c)), 圆环沿径向等间距排布, 外环直径达到了2.6 mm. 当占空比减小至18%, 同心三环的中心出现了一个亮点, 即产生了三环与中心点斑图, 如图2(d)所示. 与同心三环斑图相比, 每个环的直径都增大, 其中外环直径达到2.7 mm. 总之, 随着占空比的减小, 水面上发光区域增大, 斑图结构也由简单变得复杂.

图3(a)–(d)分别给出了图2(a)–(d)中不同斑图的理想电压、放电电压和放电电流波形. 理想电压是在没有负载情况下电源的输出电压. 由图3可见, 理想电压为非对称的方波(正高压幅值(1 kV)与负高压幅值(−10 kV)不同). 当电压为正极性时, 由于气体电压低于击穿阈值, 所以没有放电电流. 当电压极性变化时(负极性的上升沿), 气体电压随着时间快速增加, 当达

到起始电压(对应击穿电压阈值)时, 针水间发生放电, 此时电流会迅速增大. 放电产生的等离子体连接两个电极(可以视为两个电极被等离子体短路), 因此气体电压会突然降低, 表现为气体电压波形的扭曲. 在负极性电压放电中, 电流波形可以划分为脉冲区(A)和恒定区(B)两部分. 通过图3还可以发现, 随着占空比的减小, 起始电压的绝对值增大, 放电电流峰值也增大, 但恒定区(B)所占的比例减小.

根据放电电压和电流波形可以看出, 放电是间歇性的, 且正极性电压下不放电, 只有负极性电压下才放电. 因此每次放电结束后, 一些残余电荷(Residual Charges)会遗留在针与水之间的区域. 它们与介质阻挡放电^[20]或等离子体羽^[31]中的残余电荷类似, 会促进下次放电(降低下次放电的击穿电场). 当外加电压极性转变为正极性时, 之前放电遗留下的残余电荷会转移而消失在电极上. 随着占空比的减小, 正极性电压的占比增大, 会有更多残余电荷消失在电极上. 因而,

图3 (网络版彩图)不同斑图的电压电流波形图. (a) 亮盘, 占空比89%; (b) 亮盘与外环, 占空比78%; (c) 同心三环, 占空比46%; (d) 三环与中心点, 占空比18%. 图中A为脉冲区, B为恒定区

Figure 3 (Color online) Voltage-current waveforms of different patterns. (a) Bright disk, duty ratio=89%; (b) bright disk with outer ring, duty ratio=78%; (c) triple ring, duty ratio=46%; (d) triple ring with central spot, duty ratio=18%. Regions A and B represent the pulsed zone and the constant zone, respectively.

随着占空比的减小, 残余电荷对放电的促进作用减弱. 因此, 放电的起始电压升高, 汤生第一电离系数增大, 峰值电流也随之增大.

通过凸透镜对放电进行成像, 用光谱仪采集水面上斑图的发射光谱, 如图4(a)所示. 通过图4(a)可以看出, 发射谱线主要包括氮分子的第二正带系 $N_2(C-B)$ 和第一正带系 $N_2(B-A)$, 氮分子离子的第一负带系 $N_2^+(A-X)$ 和OH谱线带系. 由于放电在空气中进行, 所以有大量的氮分子被电子碰撞激发, 这些激发态的氮分子在跃迁到低能级时会发射特定波长的谱线而形成氮的谱线带系. OH是由水表面或空气中水分子的激发电离产生的. 此外还发现, 随着占空比的减小, 氮分子的谱线带 $N_2(C-B)$, 氮分子离子的谱线带 $N_2^+(A-X)$ 的强度明显增强. 这是因为随着占空比的减小, 放电的起始电压增大, 汤生第一电离系数增大, 使得更多的氮分子被碰撞激发.

利用Lifbase软件拟合OH(带头在309 nm)的光谱获得了水面斑图的气体温度, 如图4(b)所示. 发现气体温度在2200 K以上, 这个结果与Bruggeman等人^[32]研究的大气压辉光放电中水阳极的气体温度一致. 图4(b)还说明, 随着占空比的增大, 水面斑图的气体温度升高. 这是由于随着占空比的增大, 正极性电压的占比减小(即放电熄灭所占的比例减小), 放电产生的热量更不容易散失, 导致气体温度升高.

同步触发ICCD和放电电流, 对不同占空比下水面斑图的时间演化进行拍摄, 如图5所示. 0 μs 对应放电的开始时刻. 图5(a)是亮盘的时间演化图像. 0 μs 时, 针水间隙被击穿; 15 μs 时中心较暗的亮盘出现在水面

上. 随着时间推移, 电流逐渐减小, 亮盘的亮度也逐渐减小(30–65 μs). 65 μs 后, 放电进入恒定区, 这时水面斑图没有明显变化. 图5(b)是亮盘与外环的时间演化图像, 针水间隙被击穿后, 一个中间较暗的亮盘出现在水面上(15 μs). 随着电流的减小, 亮盘中间的暗区与亮盘的边缘逐渐分离(30–70 μs), 形成亮盘与外环斑图. 在电流恒定区, 斑图不发生变化(70–255 μs). 图5(c)给出了同心三环的时间演化图像. 可以看出, 三环的轮廓在10 μs 时就已显现出来. 随着电流的减小, 同心三环变得越来越清晰. 20 μs 时可以清楚地分辨出三环结构, 并且同心三环斑图形成的时间正好与脉宽时间相同, 这说明脉冲区的脉宽和电流值影响着斑图的形成. 在电流恒定区, 同心三环斑图不发生变化(30–150 μs). 图5(d)是三环与中心点的时间演化图像. 5 μs 时, 一个亮盘出现在水面上. 随后亮盘的中间区域逐渐变暗, 亮盘的边缘逐渐显现出来(0–15 μs). 20 μs 时, 可以看出亮盘的边缘与中间暗区分离, 并且中间暗区转变成了一个模糊的两环一点结构. 25 μs 时, 三环一点斑图基本形成. 在35 μs 可以清晰地观察到三环与中心点的结构. 在电流恒定区(35–55 μs)斑图维持不变, 直到55 μs 以后放电熄灭. 比较不同斑图的放电特性和时间演化图像发现, 在电流脉冲区水面斑图逐渐形成, 而在电流恒定区斑图结构基本不发生变化.

上述现象可以解释如下. 气体击穿后, 电子能与电负性分子(氧分子)结合形成负离子. 同时, 电子与负离子在电场作用下由针电极(阴极)向水电极(阳极)做迁移运动. 由于负离子的质量比电子大, 所以负离子的迁移速度相对较慢. 因此, 电子会进入水中, 而负离

图4 (网络版彩图)(a) 不同占空比下水面斑图的发射光谱; (b) 水面斑图的转动温度随占空比的变化关系

Figure 4 (Color online) (a) Emission spectrum of the patterns with different duty ratios; (b) the rotational temperature of the patterns as a function of duty ratio.

图5 不同斑图的时间演化图像. (a) 亮盘; (b) 亮盘与外环; (c) 三环; (d) 三环与中心点. 曝光时间为 $2\ \mu\text{s}$

Figure 5 Time-resolved images of different patterns. (a) Bright disk; (b) bright disk with outer ring; (c) triple ring; (d) triple ring with central spot. The exposure time is $2\ \mu\text{s}$.

子会在水表面附近的空问积累形成负离子层^[28,29]. 显然, 负离子层会加强它与水电极间的电场, 因此在水面上出现一个亮区. 在不同占空比下, 放电电流的差别导致水面上方区域的负离子密度不同, 从而负离子自组织成不同的斑图结构.

众所周知, 实验参数会影响斑图的形成. 图6给出

图6 三环与中心点斑图的相图

Figure 6 The phase diagram of triple ring with central spot.

了三环与中心点斑图形成时占空比随气隙间距变化的相图. 三环与中心点斑图出现的范围较小, 仅在气隙间距为 $5\text{--}8\ \text{mm}$ 和占空比为 $11\%\text{--}34\%$ 的范围内出现. 此外还发现, 当气隙间距为 $6\ \text{mm}$ 时, 出现该斑图的占空比范围最大. 当气隙间为 $8\ \text{mm}$ 时, 出现该斑图的占空比范围最小.

4 结论

利用方波电压激励针-水电极装置, 在针水间隙产生了辉光放电. 随方波电压占空比的减小, 水面上出现了亮盘、亮盘与外环、同心三环、三环与中心点4种斑图. 研究不同占空比下斑图的放电特性发现, 放电电流由脉冲区和恒定区两部分组成. 随着方波电压占空比的减小, 放电起始电压增大, 峰值电流增大. 采集了水面斑图的发射光谱, 发现主要有氮分子的第二正带系 $\text{N}_2(\text{C-B})$ 和第一正带系 $\text{N}_2(\text{B-A})$, 氮分子离子的第一负带系 $\text{N}_2^+(\text{A-X})$ 和 OH 谱线带系. 利用Lifbase软件拟合 OH 的光谱, 获得了气体温度, 发现随占空比的增大, 气体温度升高. 利用ICCD拍摄了斑图的时空演化图像, 发现在电流脉冲区, 针水间隙击穿. 随着电流的减小, 水面斑图逐渐形成. 在电流恒定区, 斑图不发生明显变化. 实验结果表明, 负离子在针-水放电的斑图形成中起重要作用. 最后, 对三环与中心点斑图的相图进行了研究, 发现在气隙间隙为 $6\ \text{mm}$ 时, 占空比变化的范围最大.

参考文献

- Shen J, Sun Q, Zhang Z, et al. Characteristics of DC gas-liquid phase atmospheric-pressure plasma and bacteria inactivation mechanism. *Plasma Process Polym*, 2015, 12: 252–259

- 2 Takai E, Kitano K, Kuwabara J, et al. Protein inactivation by low-temperature atmospheric pressure plasma in aqueous solution. [Plasma Process Polym](#), 2012, 9: 77–82
- 3 Yang H, Zhao X, Mengen G, et al. Defluorination and mineralization of difluorophenols in water by anodic contact glow discharge electrolysis. [Plasma Chem Plasma Process](#), 2016, 36: 993–1009
- 4 Bobkova E S, Krasnov D S, Sungurova A V, et al. Phenol decomposition in water cathode of DC atmospheric pressure discharge in air. [Korean J Chem Eng](#), 2016, 33: 1620–1628
- 5 Gao J, Pu L, Yang W, et al. Oxidative degradation of nitrophenols in aqueous solution induced by plasma with submersed glow discharge electrolysis. [Plasma Process Polym](#), 2004, 1: 171–176
- 6 Gai Ke, Dong Y J. Liquid phase auramine oxidation induced by plasma with glow discharge electrolysis. [Plasma Sources Sci Technol](#), 2005, 14: 589–593
- 7 Cho Y I, Wright K C, Kim H S, et al. Stretched arc discharge in produced water. [Rev Sci Instrum](#), 2015, 86: 013501
- 8 Shutov D A, Ol'khova E O, Kostyleva A N, et al. Destruction of sodium lauryl sulfate in its aqueous solutions by contact glow discharge treatment. [High Energy Chem](#), 2014, 48: 343–345
- 9 Webb M R, Hieftje G M. Spectrochemical analysis by using discharge devices with solution electrodes. [Anal Chem](#), 2009, 81: 862–867
- 10 Bruggeman P, Verreycken T, González M Á, et al. Optical emission spectroscopy as a diagnostic for plasmas in liquids: Opportunities and pitfalls. [J Phys D-Appl Phys](#), 2010, 43: 124005
- 11 Jacobs T, Carbone E, Morent R, et al. Surface modification of polymer films with a remote atmospheric pressure D.C. glow discharge: Influence of substrate location. [Surf Interf Anal](#), 2010, 42: 1316–1320
- 12 Shirai N, Uchida S, Tochikubo F. Synthesis of metal nanoparticles by dual plasma electrolysis using atmospheric DC glow discharge in contact with liquid. [Jpn J Appl Phys](#), 2014, 53: 046202
- 13 Liu Y X, Schüngel E, Korolov I, et al. Experimental observation and computational analysis of striations in electronegative capacitively coupled radio-frequency plasmas. [Phys Rev Lett](#), 2016, 116: 255002, arXiv: [1606.00146](#)
- 14 Liu Y X, Korolov I, Schüngel E, et al. Striations in electronegative capacitively coupled radio-frequency plasmas: Analysis of the pattern formation and the effect of the driving frequency. [Plasma Sources Sci Technol](#), 2017, 26: 055024, arXiv: [1703.05886](#)
- 15 Dong L, Liu F, Liu S, et al. Observation of spiral pattern and spiral defect chaos in dielectric barrier discharge in argon/air at atmospheric pressure. [Phys Rev E](#), 2005, 72: 046215
- 16 Liu W, Wang Y, Zhang H, et al. Note: A novel dielectric barrier discharge system for generating stable patterns in wide range. [Rev Sci Instrum](#), 2016, 87: 056101
- 17 Zhu P, Dong L, Yang J, et al. Honeycomb superlattice pattern in a dielectric barrier discharge in argon/air. [Phys Plasm](#), 2015, 22: 023507
- 18 Wei L, Dong L, Feng J, et al. Spatio-temporal dynamics of the white-eye square superlattice pattern in dielectric barrier discharge. [J Phys D-Appl Phys](#), 2016, 49: 185203
- 19 Liu Y, Dong L, Niu X, et al. Study on hexagonal super-lattice pattern with surface discharges in dielectric barrier discharge. [Phys Plasm](#), 2015, 22: 103501
- 20 Li B, Dong L, Zhang C, et al. Investigation on motional characteristics of paired filaments in a dielectric barrier discharge by a high-speed framing camera. [Plasm Sources Sci Technol](#), 2014, 23: 054020
- 21 Zhu W D, Niraula P. The missing modes of self-organization in cathode boundary layer discharge in xenon. [Plasm Sources Sci Technol](#), 2014, 23: 054011
- 22 Zhu W, Niraula P, Almeida P G C, et al. Self-organization in DC glow microdischarges in krypton: Modelling and experiments. [Plasm Sources Sci Technol](#), 2014, 23: 054012
- 23 Schoenbach K H, Moselhy M, Shi W. Self-organization in cathode boundary layer microdischarges. [Plasm Sources Sci Technol](#), 2004, 13: 177–185
- 24 Takano N, Schoenbach K H. Self-organization in cathode boundary layer discharges in xenon. [Plasm Sources Sci Technol](#), 2006, 15: S109–S117
- 25 Miao S Y, Ren C S, Wang D Z, et al. Conical DC discharge in ambient air using water as an electrode. [IEEE Trans Plasm Sci](#), 2008, 36: 126–130
- 26 Alyssa W, David S, Tanvir F, et al. Self-rotating DC atmospheric-pressure discharge over a water-surface electrode: Regimes of operation. [Plasm Sources Sci Technol](#), 2008, 17: 045001
- 27 Verreycken T, Bruggeman P, Leys C. Anode pattern formation in atmospheric pressure air glow discharges with water anode. [J Appl Phys](#), 2009, 105: 083312
- 28 Shirai N, Ibuka S, Ishii S. Self-organization pattern in the anode spot of an atmospheric glow microdischarge using an electrolyte anode and axial miniature helium flow. [Appl Phys Express](#), 2009, 2: 036001

- 29 Shirai N, Uchida S, Tochikubo F. Influence of oxygen gas on characteristics of self-organized luminous pattern formation observed in an atmospheric DC glow discharge using a liquid electrode. [Plasm Sources Sci Technol](#), 2014, 23: 054010
- 30 Zheng P, Wang X, Wang J, et al. Self-organized pattern formation of an atmospheric-pressure, AC glow discharge with an electrolyte electrode. [Plasm Sources Sci Technol](#), 2015, 24: 015010
- 31 Wu S, Lu X. The role of residual charges in the repeatability of the dynamics of atmospheric pressure room temperature Plasm plume. [Phys Plasm](#), 2014, 21: 123509
- 32 Bruggeman P, Liu J, Degroote J, et al. DC excited glow discharges in atmospheric pressure air in pin-to-water electrode systems. [J Phys D-Appl Phys](#), 2008, 41: 215201

Influence of square wave duty ratio on pattern formation of atmospheric pressure glow discharge

GENG JinLing¹, JIA PengYing¹, YANG LinWei¹, CHU JingDi¹,
ZHANG Qi¹ & LI XueChen^{1,2*}

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

² Key Laboratory of Photo-Electronics Information Materials of Hebei Province, Baoding 071002, China

Excited by a square wave voltage, atmospheric pressure glow discharge is generated in a needle to liquid configuration. With decreasing duty ratio of the square voltage, bright disk, bright disk with outer ring, triple ring, triple ring with concentric spot are observed on the water surface. Voltage and current waveforms indicate that the discharge occurs in the negative polarity. The discharge current consists of two parts, the pulse region and the constant region, which has a good periodicity. It is found that the inception voltage and the peak current increase with decreasing the duty ratio. Optical emission spectra are detected. It contains the second positive band of N_2 , the first positive band of N_2 , the first negative band of N_2^+ and the OH (309 nm). Using the Lifbase, emission spectra of the OH are used to estimate rotational temperature by fitting the experimental spectra to the simulated spectra. It is found that the gas temperature increases with increasing the duty ratio. By synchronously triggering discharge current and ICCD, temporally resolved images of the patterns are captured on the water surface. Results show that self-organized pattern gradually evolves in the pulse region, and it does not change any more in the constant region. Taking into account the space negative charge, above phenomena are analyzed and explained by using the basic theory of discharge.

glow discharge, self-organized pattern, spatio-temporal evolution, duty ratio, gas temperature

PACS: 52.80.Hc, 52.35.Mw, 52.80.Mg, 52.80.Tn

doi: [10.1360/SSPMA2017-00126](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00126)