



水中流光放电流光丝的再发光和暂停行为

王雪 温小琼 王丽茹 杨元天 薛晓东

Re-illumination and pause behavior of streamer filament of streamer discharge in water

Wang Xue Wen Xiao-Qiong Wang Li-Ru Yang Yuan-Tian Xue Xiao-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 015203 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211162

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211162>

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

水中流光放电流光丝的再发光和暂停行为*

王雪 温小琼[†] 王丽茹 杨元天 薛晓东

(大连理工大学物理学院, 大连 116024)

(2021年6月21日收到; 2021年9月6日收到修改稿)

水中流光放电是研究水中放电基本物理、化学过程的主要研究对象. 本文利用四分幅超高速相机、采用针-板电极结构、在20—800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率范围内研究了水中微秒脉冲流光放电流光丝的再发光和暂停行为, 探讨了高水电导率下观测不到流光丝的再发光的原因. 结果发现: 再发光在不同的流光丝之间交替发生并存在两种模式: 一种为整根丝熄灭后再发光; 一种为只有先端部分发光熄灭随后恢复发光. 随着水电导率的增大, 观测到流光丝的再发光现象的频度急剧减小, 540 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率时降到零; 在20—800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率条件下都可观测到流光丝伴生冲击波串分段现象, 冲击波串分段现象的出现频度在65%以上, 表明在20—800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率条件下流光丝的暂停是一种普遍行为. 通过测量两段冲击波的半径差得到流光的暂停时间平均为157 ns, 几乎不受水电导率的影响; 随着水电导率的增大, 流光丝的发光强度显著增大, 水电导率大于350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 时, 流光丝暂停期间内流光丝的光强度无法衰减到相机分辨水平以下, 在相机获得的发光图像上看上去是持续发光的, 难以分辨出流光丝“熄灭-再发光”过程.

关键词: 水中流光放电, 流光丝再发光, 流光丝暂停

PACS: 52.80.Wq, 52.70.-m, 77.22.Jp

DOI: 10.7498/aps.71.20211162

1 引言

随着水中放电等离子体应用研究的不断深入和扩展^[1-5], 研究者们越来越感到对水中放电基本物理和化学过程的认识不足^[6-8]. 水中流光放电是研究水中放电基本物理和化学过程的主要研究对象, 近年来受到广泛的关注^[9-11].

通常, 水中流光放电产生数根流光丝. 在低电导率($< 100 \mu\text{S}/\text{cm}$)的水中, 利用条纹相机已经发现了流光丝的再发光现象, 即: 流光丝发光熄灭之后又再次发光, 在条纹图像上表现为黑白交替的条纹^[12,13], 在放电电流波形上表现为一系列的电流尖峰^[12,14]. 但是, 在较高电导率的水中($> 400 \mu\text{S}/\text{cm}$), 利用条纹相机观测不到流光丝的再发光现象^[12-14]. 至今无法解释为什么较高的水电导率条件下观测不到流光丝的再发光现象.

水下流光放电伴生冲击波. 过去的研究已经证实冲击波是从流光头部发射的^[12,15,16], 流光丝在水中每前进约160 μm 发射一个冲击波^[16]. 流光丝在达到最大长度时总共发射数十个独立的冲击波, 这些冲击波以流光丝为中心轴形成冲击波串^[12-16]. 在20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率下同时观测了流光丝的发光和伴生冲击波, 发现了流光丝的伴生冲击波图样存在分段现象, 证明流光丝在水中传播发展过程中存在长时间的暂停; 同时还发现了流光丝暂停期间发光熄灭, 恢复传播时再次发光, 表明流光丝的再发光是由流光丝的暂停行为引起的^[17]. 目前尚不清楚在20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上水电导率条件下流光丝伴生冲击波图样是否也存在分段现象, 即是否存在流光丝的暂停行为.

本文的目的是利用四分幅超高速相机在水电导率20—800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 范围内研究水中微秒脉冲流光放电过程中流光丝的再发光和暂停行为, 探讨为

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 11635004)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wenxq@dlut.edu.cn

什么在较高的水电导率条件下难以观测到流光丝的再发光。

2 实验系统

本研究采用针-板电极结构产生水中流光放电。图 1 是本研究的实验装置图。阳极针尖曲率为 30 μm , 电极间距为 40 mm. 基于探讨为什么在较高的水电导率条件下难以观测到流光丝的再发光的目的, 实验在 20 到 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率范围内进行, 实验过程中电压脉冲的幅值和脉宽分别固定在 22 kV 和 1.5 μs . 用高压探头和电流传感器分别测量放电电压和电流, 并用数字存储示波器 (Yokogawa) 记录波形数据. 采用四分幅超高速相机 (PCO HSFC-Pro) 分别拍摄记录流光丝发光图像和流光丝伴生冲击波阴影图像, 拍摄阴影图像时采用 632.8 nm 氦氖激光做背光, 超高速相机和电源之间通过光信号实现同步. 图 2 是本研究中的放电电压、电流波形示例。

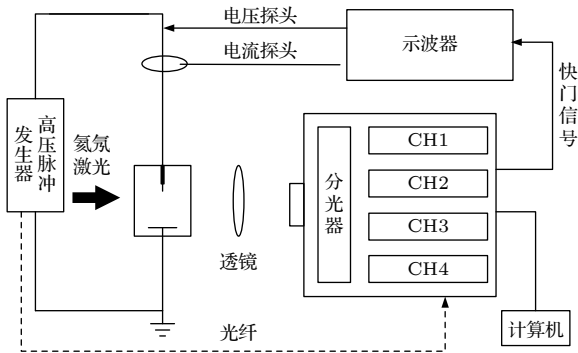


图 1 实验装置示意图
Fig. 1. Experimental setup.

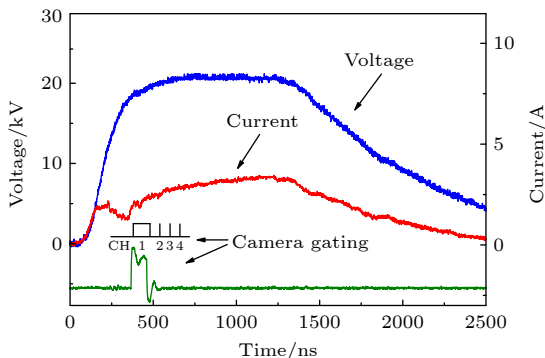


图 2 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率下的放电电压和电流波形以及相机快门信号
Fig. 2. Waveforms of the discharge voltage and current at water conductivity of 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, as well as the camera gating signal.

3 实验结果

3.1 流光丝的再发光

为了研究不同水电导率下水下流光放电流光丝的再发光特征, 脉冲电压幅值固定在 22 kV, 分别在水电导率 20, 60, 180, 540 和 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的条件下拍摄了水下流光放电的时间演化发光图像. 针对同一放电脉冲, 利用四分幅超高速相机连续获取四幅时间演化图像. 图 3(a)—(c) 分别是 20, 60 和 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 三个水电导率条件下获得的典型的连续四幅流光丝的发光图像, 图 3 中每一组图像的 CH1 曝光时间均为 100 ns, 目的是为了确认水下流光放电的初期阶段究竟产生了几根流光丝, 为后续判断究竟其中的哪一根丝发生了“熄灭-再发光”现象提供依据. 如图 3 所示, 在实验中, 20, 60 和 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 三个水电导率条件下观测到了流光丝的再发光现象, 但是在 540 和 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率的实验中, 没有观测到流光丝的再发光现象. 因此, 在图 3 中没有展示 540 和 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率下的发光图像. 从记录的流光丝的时间演化发光图像中, 发现流光丝的再发光存在两种类型: 1) 流光丝发光整体熄灭之后整体再发光, 再发光时流光丝变长且头部较亮, 如图 3 中的 a1, a2, b1 和 b2, 这种类型多见于水电导率 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 及以下的流光放电; 2) 流光丝从头部向根部熄灭, 未等根部完全熄灭头部再发光, 如图 3 中 c1, c2, 这种类型多见于水电导率 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 时. 此外, 我们还发现放电产生的几根流光丝当中, 再发光现象是交替发生的, 其中一根流光丝的再发光熄灭后, 另一根流光丝又发光, 如图 3(a) 中的 a1 和 a2, 图 3(b) 中的 b1 和 b2. 流光丝的再发光具有很大的随机性, 由于我们所使用的超高速相机系统针对一个放电脉冲只能拍摄四幅连续的时间演化图像, 在目前的研究中无法通过发光图像确定流光丝从熄灭到再发光所需的时间. 流光丝的再发光所需时间是再发光现象的一个重要的参量, 目前所知的文献中没有相关数值的报道。

根据记录的发光图像统计了可观测到再发光现象的放电脉冲个数, 得到了各个电导率条件下再发光现象出现的频度. 为了比较的方便, 再发光现象出现频度与 3.2 节的暂停行为出现频度的统计结果一起表示在图 5 中. 从图 5 可以看出随着电导

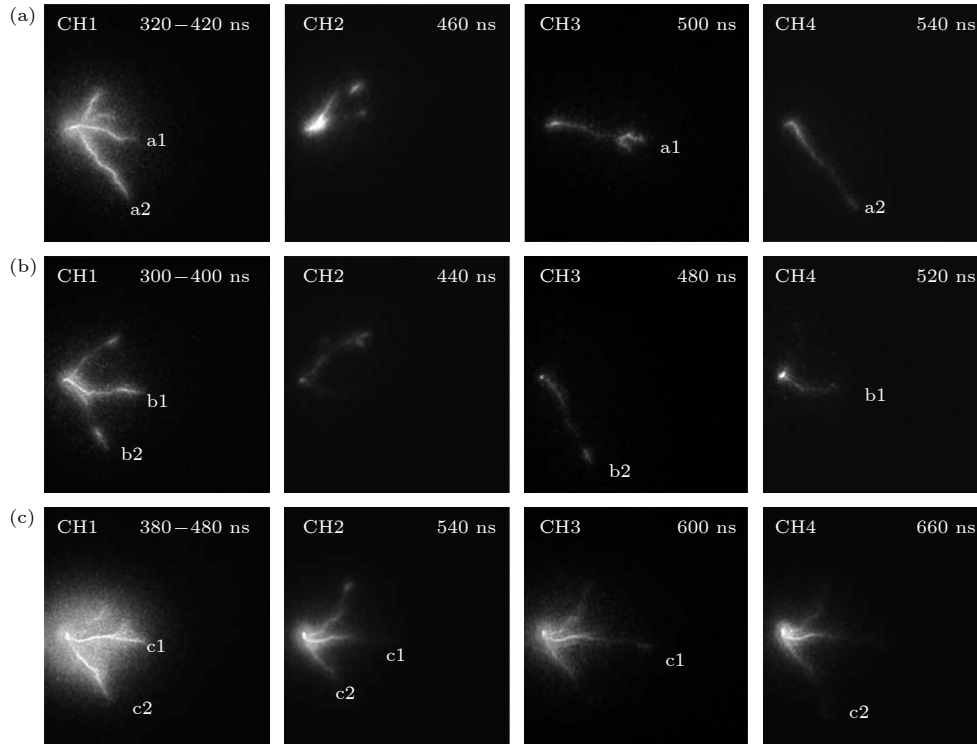


图 3 水下流光放电时间演化图像 (a) 水电导率 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 相邻两幅图像的时间间隔为 40 ns; (b) 水电导率 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 相邻两幅图像的时间间隔为 40 ns; (c) 水电导率 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 相邻两幅图像的时间间隔为 60 ns. (a)–(c) 中 CH1 图像的曝光时间为 100 ns, CH2-CH4 图像的曝光时间为 20 ns, 图中标示的时间是相对高压脉冲起始点的时间

Fig. 3. Light emission images of underwater streamer discharge: (a) 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 40 ns interval; (b) 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 40 ns interval; (c) 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 60 ns interval. The exposure time of the CH1 image in Figure (a)–(c) is 100 ns, and the exposure time of the CH2-CH4 image is 20 ns. The time marked in the Figure 3 is the time to the start of the high-voltage pulse.

率的增大再发光出现的频度近似地呈指数减小, 直到 540 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率时降到零, 即在较高水电导率条件下观测不到流光的再发光现象.

3.2 流光的暂停行为

我们在过去的研究中发现了 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率下流光丝传播过程中的暂停行为^[17], 其判断的标记是流光丝伴生冲击波图样分成半径显著不同的几段. 为了确认在 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上更高水电导率条件下流光丝是否存在暂停行为, 采用阴影图像法, 分别在水电导率 20, 50, 200, 400, 540 和 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的条件下观测了水下流光放电伴生的冲击波, 确认流光丝伴生冲击波图样是否存在分段现象.

图 4 是各个水电导率条件下获得的流光放电伴生冲击波阴影图像示例. 在各个水电导率条件下都观测到了冲击波串的分段现象: 两段冲击波串(图 4 中分别标记为 I, II) 的半径存在显著差异, 与我们之前在 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率下^[17] 观测到冲击波分段现象一致, 表明在 20–800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导

率范围内, 流光丝在传播过程中都存在暂停行为.

根据每个水电导率条件下获得的阴影图像统计了可观测到冲击波图样分段现象的放电脉冲个数, 得到了各个电导率条件下冲击波分段现象出现的频度(即流光丝暂停行为出现的频度), 结果如图 5 所示. 从图 5 可以看到: 流光放电伴生冲击波串分段现象的出现频度在 65% 以上, 表明在 20–800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率范围内冲击波串分段是一种普遍现象, 即流光丝暂停是一种普遍行为. 流光丝的再发光是由流光丝的暂停行为引起的^[17]: 流光丝暂停期间流光丝的发光熄灭, 恢复传播时流光丝又再发光. 因此, 可以认为在 20–800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率范围内流光丝的再发光是一种普遍现象. 但是, 图 5 的再发光出现频度的统计结果显示: 在较高水电导率条件下观测不到流光的再发光现象. 我们将在下一节中探讨其中的原因.

根据两段冲击波串的半径差可以估算两段流光丝之间的暂停时间^[17]:

$$\Delta t = |t_I - t_{II}| = \frac{|R_{II} - R_I|}{C_0}, \quad (1)$$

其中 R_I 和 R_{II} 分别为两段冲击波串的半径; C_0 为水中声速 (1450 m/s). 从实验获得的冲击波阴影图像测定了两段冲击波串的半径, 根据 (1) 式计算了各个水电导率条件下流光丝的暂停时间, 统计得到的平均值如图 6 所示. 结果显示: 各个水电导率条件下流光丝的暂停时间在误差范围内大致相当, 几乎不受水电导率的影响, 总体平均在 (157 ± 37) ns.

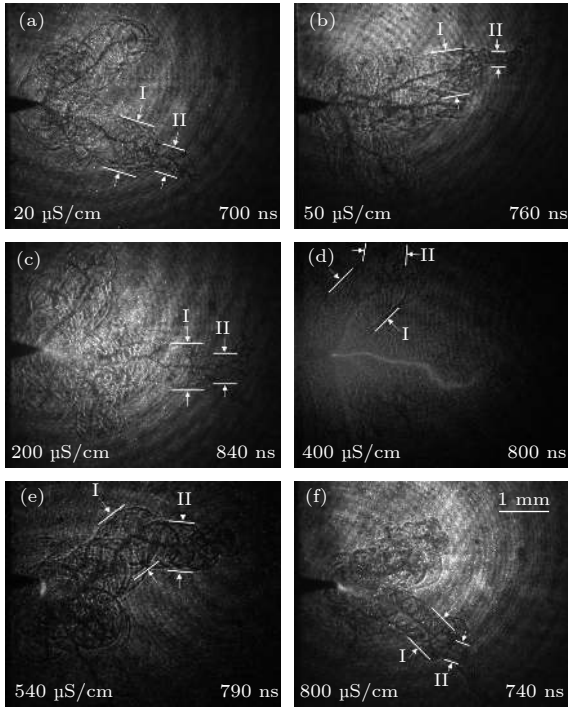


图 4 流光伴生冲击波的分段现象 (a) 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (b) 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (c) 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (d) 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (e) 540 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (f) 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. 图 中所标的时间是相对高压脉冲起始点的时间
Fig. 4. The segmentation of shock wave chain: (a) 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (b) 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (c) 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (d) 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (e) 540 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (f) 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The time marked in the figure is the time to the start of the high-voltage pulse.

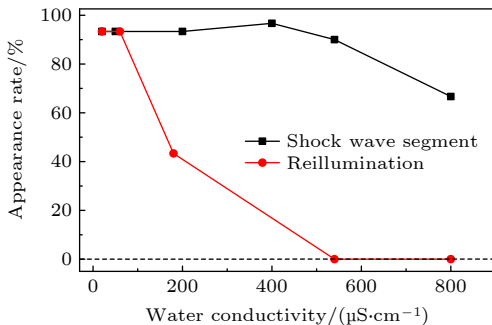


图 5 各种水电导率下流光丝的再发光和冲击波串分段出现频度
Fig. 5. Appearance rate of the re-illumination and segmentation in shockwave pattern of the streamer filament at different water conductivity.

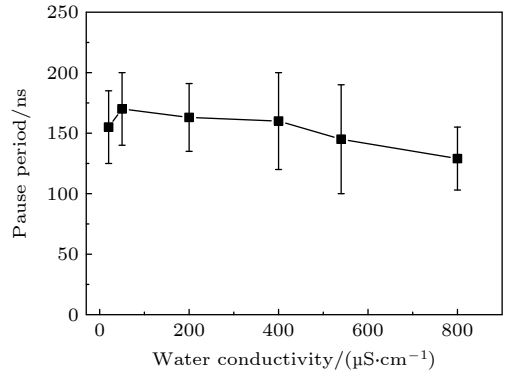


图 6 不同水电导率条件下流光丝的暂停时间
Fig. 6. The pause period of the streamer filament at different water conductivity.

4 讨论

图 5 中的流光丝伴生冲击波阴影图像的观测结果表明流光丝的暂停行为是流光传播过程中的普遍行为, 流光丝的暂停行为导致流光丝的“熄灭-再发光”^[17]. 但是, 图 5 中的流光丝发光图像的观测结果表明, 随着水电导率的增加, 观测到流光丝再发光的频度急剧减小, 以致在较高电导率条件下观测不到流光丝的再发光.

为了探讨随着水电导率增大在发光图像上观测到流光丝再发光的频度急剧减小的物理原因, 分析了流光丝从针尖到尾部沿轴向的光强分布. 图 7 是各个电导率条件下典型的流光丝轴向光强分布, 随着水电导率的增大流光丝的光强大幅度增强. 基于图 7 的各水电导率条件下流光丝的发光强度, 按照下式推算了流光丝光强衰减到相机分辨水平时所需的时间 t :

$$I = I_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

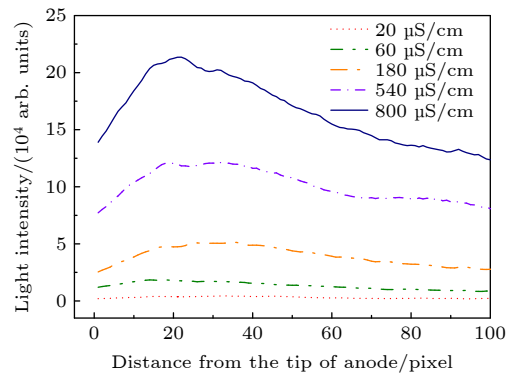


图 7 不同水电导率下流光丝轴向光强分布
Fig. 7. Axial distribution of light intensity of the streamer filament at different water conductivity.

其中 I , I_0 分别为相机的分辨水平和流光丝的光强; λ 为光谱线的迁移常数. 流光放电发射光谱的主要成分是氢原子 H_α 谱线^[18,19], 因此本研究中选用氢原子 H_α 谱线的迁移率 $\lambda=3.44 \times 10^6/\text{s}$ ^[20] 进行计算.

图 8 是计算得到的不同水电导率条件下流光丝光强衰减到相机分辨水平所需的时间. 结果表明水电导率越大流光丝光强衰减到相机分辨水平所需的时间越长. 在 $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率下流光丝光强衰减到相机分辨水平所需的时间约为 10 ns , 与图 6 得到的流光丝的暂停时间 157 ns 相比小得多, 因此在 $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率下流光丝在 157 ns 的暂停期间内发光强度迅速衰减到相机分辨水平以下, 在发光图像上表现为熄灭状态; 当结束暂停再次向前延伸发展时流光丝光强度恢复到相机分辨水平以上, 在发光图像上表现为再发光, 这样相机很容易分辨出流光丝的“熄灭-再发光”过程. 而在 $540 \mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率下流光丝光强衰减到相机分辨水平所需的时间约为 191 ns , 比 157 ns 的流光丝暂停时间长, 在流光丝暂停期间流光丝光强度虽有衰减但仍然高于相机的分辨水平, 在发光图像上仍然表现为发光状态, 相机观测不到流光丝的“熄灭-再发光”过程. 因此, 随着水电导率增大流光丝发光图像上观测到再发光现象的频度急剧减小的结果可以归因于: 随着水电导率的增大流光丝发光强度大幅度增大, 在流光丝暂停期间内流光丝的光强度无法衰减到相机分辨水平以下, 在相机获得的发光图像上看上去是持续发光的, 难以分辨出流光丝“熄灭-再发光”过程.

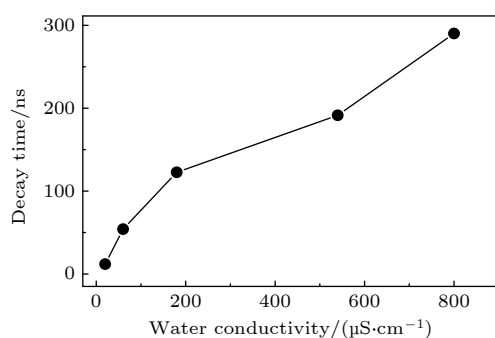


图 8 流光丝光强衰减到相机分辨水平所需的时间

Fig. 8. Time for the light intensity of the streamer filament decaying to the noise level of the camera system.

5 结 论

本文利用四分幅超高速相机在 $20\text{--}800 \mu\text{S}/\text{cm}$

水电导率条件下研究了水下微秒脉冲流光放电流光丝的再发光和暂停行为. 通过对同一放电脉冲连续拍摄四幅发光图像, 发现随着水电导率的增大, 观测到流光丝的再发光现象的频度急剧减小, $540 \mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率时降到零, 再发光现象在不同的流光丝之间交替发生, 并存在两种模式: 一种为整根丝熄灭后再发光; 一种为只有先端部分发光熄灭随后恢复发光. 通过观测流光放电的阴影图像, 发现在 $20\text{--}800 \mu\text{S}/\text{cm}$ 水电导率条件下观测到冲击波串分段现象的频度在 65% 以上, 表明在各种水电导率条件下流光丝在传播过程中都发生长时间暂停, 流光丝的暂停时间平均为 $(157 \pm 37) \text{ ns}$, 水电导率几乎不影响流光丝的暂停时间. 通过分析流光丝轴向光强分布发现, 随着水电导率的增大流光丝的光强显著增大, 在流光丝暂停期间 (约 157 ns), 水电导率小于 $350 \mu\text{S}/\text{cm}$ 时, 流光丝光强衰减到相机分辨能力以下, 在发光图像上显示为熄灭状态; 水电导率大于 $350 \mu\text{S}/\text{cm}$ 时, 在流光丝暂停期间内流光丝的光强度无法衰减到相机分辨水平以下, 在相机获得的发光图像上看上去是持续发光的, 难以分辨出流光丝“熄灭-再发光”过程.

参考文献

- [1] Fridman G, Friedman G, Gutsol A, Shekhter A B, Vasilets V N, Fridman A 2008 *Plasma Processes Polym.* **5** 503
- [2] Locke B R, Thagard S M 2012 *Plasma Chem. Plasma Process.* **32** 875
- [3] Chen Q, Li J S, Li Y F 2015 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** 424005
- [4] Sivachandiran L, Khacef A 2017 *RSC Adv.* **7** 1822
- [5] Saito N, Bratescu M A, Hashimi K 2018 *Jpn. J. Appl. Phys.* **57** 0102A4
- [6] Bruggeman P J, Kushner M J, Locke B R, Gardeniers J G E, Graham W G, Graves D B, Hofman-Caris R C H M, Maric D, Reid J P, Ceriani E, Fernandez Rivas D, Foster J E, Garrick S C, Gorbanev Y, Hamaguchi S, Iza F, Jablonowski H, Klimova E, Kolb J, Krcma F, Lukes P, Machala Z, Marinov I, Mariotti D, Mededovic Thagard S, Minakata D, Neyts E C, Pawlat J, Lj Petrovic Z, Pflieger R, Reuter S, Schram D C, Schröter S, Shiraiwa M, Tarabová B, Tsai P A, Verlet J R R, von Woedtke T, Wilson K R, Yasui K, Zvereva G 2016 *Plasma Sources Sci. Technol.* **25** 053002
- [7] Adamovich I, Baalrud S D, Bogaerts A, Bruggeman P J, Cappelli M, Colombo V, Czarnetzki U, Ebert U, Eden J G, Favia P, Graves D B, Hamaguchi S, Hieftje G, Hori M, Kaganovich I D, Kortshagen U, Kushner M J, Mason N J, Mazouffre S, Mededovic Thagard S, Metelmann H R, Mizuno A, Moreau E, Murphy A B, Niemira B A, Oehrlein G S, Petrovic Z L, Pitchford L C, Pu Y K, Rauf S, Sakai O, Samukawa S, Starikovskaia S, Tennyson J, Terashima K, Turner M M, van de Sanden M C M, Vardelle A 2017 *J.*

- Phys. D: Appl. Phys.* **50** 323001
- [8] Vanraes P, Bogaerts A 2018 *Appl. Phys. Rev.* **5** 031103
- [9] Joshi R P, Thagard S M 2013 *Plasma Chem. Plasma Process.* **33** 1
- [10] Sun A, Huo C, Zhuang J 2016 *High Voltage* **1** 74
- [11] Lesaint O 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 144001
- [12] Salazar J N, Bonifaci N, Denat A, Lesaint O 2005 *IEEE International Conference on Dielectric Liquids* Coimbra, Portugal, 26 June–1 July, 2005 p91
- [13] Ceccato P H, Guaitella O, Gloaghec Le M R, Rousseau A 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 175202
- [14] An W, Baumung K, Bluhm H 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 053302
- [15] Katsuki S, Tanaka K, Fudamoto T, Namihira T, Akiyama H, Bluhm H 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 239
- [16] Wen X Q, Xue X D 2019 *AIP Adv.* **9** 075310
- [17] Wen X Q, Xue X D, Liu X H, Li J S, Zhou Y B 2019 *J. Appl. Phys.* **125** 133302
- [18] Šimek M, Člupek M, Babický V, Lukeš P, Šunka P 2012 *Plasma Sources Sci. Technol.* **21** 055031
- [19] Bruggeman P, Schram D, Gonzalez M A, Rego R, Kong M G, Leys C 2009 *Plasma Sources Sci. Technol.* **18** 025017
- [20] <https://www.nist.gov/>[2021-6-21]

Re-illumination and pause behavior of streamer filament of streamer discharge in water^{*}

Wang Xue Wen Xiao-Qiong[†] Wang Li-Ru
Yang Yuan-Tian Xue Xiao-Dong

(*School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

(Received 21 June 2021; revised manuscript received 6 September 2021)

Abstract

The streamer discharge in water is a main object for studying the basic physical and chemical processes of an electric discharge in water. In this paper, the re-illuminations and the pause behaviors of a streamer filament of the microsecond pulsed streamer discharge in water with different conductivities (20 to 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) are studied by adopting a needle-plate electrode system and an ultra-high-speed camera system. The cause why the re-illumination of the streamer filament is difficult to detect by using the camera system as the water conductivity gets higher is discussed. It is found that the re-illumination alternately occurs among different streamer filaments, and two modes of the re-illumination are identified: one is that the whole filament quenches and then illuminates again; the other is that only the tip part of the filament quenches and then resumes the illumination. The appearance rate of the re-illumination of the streamer filament decreases rapidly as the water conductivity increases, and then drops to zero as the water conductivity exceeds 540 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Within a water conductivity range of 20–800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, the appearance rate of segmentation in shockwave pattern of the streamer filament is larger than 65%, indicating that the pause is a common behavior of the streamer filament. By measuring the difference in radius between two adjacent shockwave segments, the average pause period of the streamer filament is estimated at 157 ns, which is almost not affected by the water conductivity. As the water conductivity increases, the light intensity of the streamer filament increases rapidly. The light intensity of the streamer filament cannot decay to the noise level of the camera system during the pause period of the streamer filament as the water conductivity exceeds 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The streamer filament produces glow on the light emission image, which makes it difficult to distinguish the “extinction and illumination” process by the camera system.

Keywords: streamer discharge in water, re-illumination of a streamer filament, pause of a streamer filament

PACS: 52.80.Wq, 52.70.-m, 77.22.Jp

DOI: [10.7498/aps.71.20211162](https://doi.org/10.7498/aps.71.20211162)

^{*} Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11635004).

[†] Corresponding author. E-mail: wenxq@dlut.edu.cn