

液体电极上辉光放电丝的运动特性研究

李雪辰 耿金伶 贾鹏英 吴凯玥 贾博宇 康鹏程

Rotating characteristics of glow discharge filament on liquid electrode surface

Li Xue-Chen Geng Jin-Ling Jia Peng-Ying Wu Kai-Yue Jia Bo-Yu Kang Peng-Cheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 075201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[大气压介质阻挡辉光放电脉冲的阴极位降区特性及其影响因素的数值仿真](#)

Simulations of the cathode falling characteristics and its influence factors in atmospheric pressure dielectric barrier glow discharge pulse

物理学报.2017, 66(2): 025203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.025203>

[雷云电场作用下长地线表面正极性辉光电晕放电的仿真研究](#)

Numerical simulation of positive glow corona discharge initiated from long ground wire under thundercloud field

物理学报.2015, 64(10): 105205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.105205>

[线-铝箔电极电晕放电激励器的推力理论与实验研究](#)

Theoretical and experimental study of thrust produced by corona discharge exciter in wire-aluminum foil electrode configuration

物理学报.2015, 64(10): 105204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.105204>

[棒-板电极下缩比气隙辉光放电相似性的仿真研究](#)

Simulation on similarity law of glow discharge in scale-down gaps of rod-plane electrode configuration

物理学报.2014, 63(9): 095206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.095206>

[多针-网电极离子风激励器推力与推功比的实验研究](#)

Experimental study on the thrust and the ratio of thrust to power of multi-points/grid ionic wind exciter

物理学报.2013, 62(7): 075205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.075205>

液体电极上辉光放电丝的运动特性研究*

李雪辰[†] 耿金伶 贾鹏英 吴凯玥 贾博宇 康鹏程

(河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

(2017年10月11日收到; 2018年1月23日收到修改稿)

大气压液体电极放电在生物医疗、化学降解、环境保护等众多方面具有广泛的应用前景, 引起了研究者的关注. 本文利用直流电压激励棒-水电极装置, 在6 mm 气隙间产生了大气压辉光放电. 研究发现, 随着电流的增大, 放电由锥状转变成柱状, 且此过程中水面上放电环的直径先增大后减小. 利用高速照相机对放电进行研究, 发现锥状放电是由单个放电丝旋转形成的. 通过测量放电的伏安特性, 表明放电处于正常辉光机理. 利用光谱学方法, 研究了不同电流下的振动温度、转动温度和谱线强度比 $I_{391.4}/I_{337.1}$, 发现它们均随电流的增加而增大. 根据气体放电理论, 分析和解释了放电丝的运动机理, 并对水面上放电环直径随电流的变化关系进行了解释. 这些结果对于大气压液体电极放电的理论研究和实际应用均具有一定参考价值.

关键词: 辉光放电, 锥状放电, 柱状放电, 运动特性

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

DOI: 10.7498/aps.67.20172205

1 引言

大气压液体电极放电能够产生非平衡态低温等离子体^[1,2]. 因其中含有大量的活性粒子, 能够广泛地应用于化学分析^[3-5]、材料处理^[6-8]、生物医疗^[9-11]、环境保护^[12-14]等领域. 因此, 大气压液体电极放电引起了越来越多的关注.

涉及到液体电极放电的装置有很多. Lu等^[15]利用片状金属-水电极装置产生了大体积的等离子体, 发现水电极的极性会影响等离子体的结构. Andre等^[16]利用直流电压激励, 在两个水流的间隙产生了弥散放电, 分析了阴极区域和阳极区域的分子组成, 并获得了氮第二正带系和氧原子谱线(777.19—777.54 nm)的体积发射系数. Rowland等^[17]研究了交流激励液滴间的放电, 发现放电过程中液滴会发生变形, 并且放电受电流、液滴电阻率和绝缘层表面疏水性的影响. Lu等^[18]利用空心

针-水电极装置产生了钟型氩气放电, 并研究了其光谱特性. Liu和Hu^[19]对比了直流和交流激励下针-水电极间的放电, 发现两种激励下都能产生辉光放电, 但交流放电产生的活性粒子(OH等)比直流的多. Li等^[20]利用直流激励棒阵列-水电极装置, 发现当气隙较小时放电是分立的, 随着气隙增大放电柱中部膨胀从而合并形成了片状等离子体羽. Zheng等^[21]利用交流激励针-水电极装置, 在水面上观察到了自组织斑图. 以上提及的液体电极放电都是静止不动的. Miao等^[22]利用直流激励棒-液体电极装置, 在液面上观察到了锥状放电. 他们认为锥状放电也是静止的, 但Wilson等^[23]发现锥状放电是由放电丝的旋转形成的.

本文采用直流激励棒-水电极装置, 在其间隙产生了大气压空气辉光放电. 研究发现随着电流的增大, 放电由锥状转变成柱状. 利用电学测量、高速照相和光谱学方法对放电的特性进行了研究.

* 国家自然科学基金(批准号: 11575050, 10805013)、河北省自然科学基金(批准号: A2015201199, A2015201092, A2016201042)、河北省百优人才(批准号: SLRC2017021)、河北省三三三人才基金(批准号: A2016005005)、河北省教育厅科研基金(批准号: LJRC001)和中西部高校综合实力提升工程资助项目资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: plasmalab@126.com

2 实验装置

实验装置如图 1 所示. 一根圆柱形铜棒 (长度 10 cm, 直径 5 mm) 竖直固定在水平放置的水槽 (内径 7.5 cm, 高 8 cm) 上方, 水槽中装满自来水 (约 350 mL, 电导率约 400 $\mu\text{s}/\text{cm}$). 铜棒电极通过镇流电阻 ($R = 100 \text{ k}\Omega$) 与高压直流电源 (Glassman EK15 R40) 的负高压相连, 水电极通过一铝环 (粗 2 mm, 直径 6 cm) 接地. 铜棒的棒端与水面的间距为 6 mm. 利用高压探头 (Tektronix P6015A) 对铜棒与水电极间的放电电压进行测量. 利用电流探头 (Tektronix TCP 312A) 测量放电电流. 放电电压和电流通过示波器 (Tektronix DPO4104) 显示并储存. 利用透镜将放电的发光汇聚到光纤中, 再通过光谱仪 (ACTON SP-2750) 采集其发射光谱. 利用数码相机 (Canon EOS 7D) 拍摄放电的正视图. 高速照相机 (Andor DH334T) 镜头视线与水平面呈 45° 在短曝光时间下拍摄放电图像.

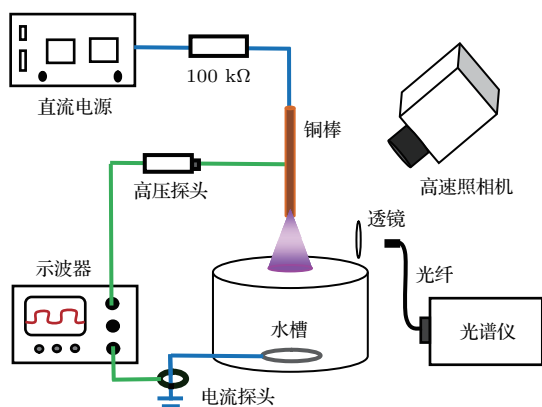


图 1 实验装置图

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

3 实验结果与讨论

当电流为 4.5 mA 时, 锥状放电产生于水面上方 (图 2(a)). 随着电流的增加, 锥状放电体积逐渐增大, 如图 2(a)—(c) 所示. 可见, 棒端处的发光最强, 对应放电的负辉区 (NG). 在负辉区的下方发光明显变暗, 此为法拉第暗区 (FDS). 继续向下, 对应放电的正柱区 (PC), 它在放电区域中所占比例最大. 上述特征区域表明放电处于辉光机理. 当电流为 6.0 mA 时, 锥状放电体积达到最大. 继续增大电流, 放电体积逐渐减小, 如图 2(c)—(e) 所示. 当电流增加到 7.5 mA 时, 锥状放电收缩成了柱状放电 (图 2(e)). 对于柱状放电, 仍能观察到上述的特征区域. 通过对比锥状放电和柱状放电可以看出, 柱状放电的发光强度比锥状放电高, 并且柱状放电中水面的阳极辉光 (AG) 较明显.

图 3 给出了电流为 6.0 mA 时不同曝光时间下锥状放电的照片. 由于棒端处负辉光的发光太强, 容易曝光过度, 因此仅对负辉区下面的放电进行了拍摄. 研究发现, 当曝光时间为 45 ms 时, 水面上有一个完整的环. 当曝光时间小于 45 ms 时, 水面上仅会出现一段圆弧 (而非完整的单环), 如曝光时间为 35 ms 的照片所示. 随着曝光时间的减小, 弧长也越来越短. 当曝光时间为 1 ms 时, 棒-水间隙间呈现一个直径约为 1 mm 的柱状放电丝, 同时水面上的圆弧变为直径约为 1 mm 的亮点. 继续缩短曝光时间, 放电丝的形状几乎不发生变化, 但其发光强度逐渐减弱. 上述结果说明锥状放电是由直径约为 1 mm 的放电丝旋转形成的, 其旋转周期为 45 ms.

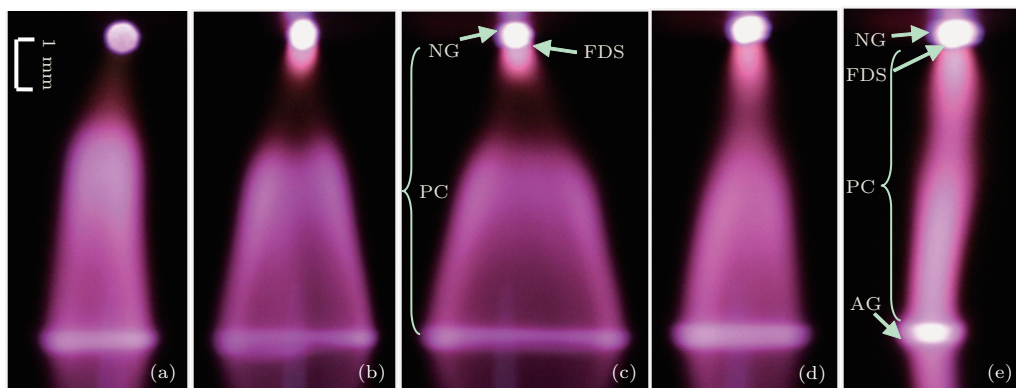


图 2 棒-水电极间放电的正视图, 曝光时间为 0.1 s, (a)—(e) 的放电电流分别为 4.5 mA, 5.5 mA, 6.0 mA, 6.5 mA, 7.5 mA

Fig. 2. Front view of the discharge between the copper rod and the water surface, the exposure time is 0.1 s. The discharge current from (a) to (e) is 4.5 mA, 5.5 mA, 6.0 mA, 6.5 mA and 7.5 mA, respectively.

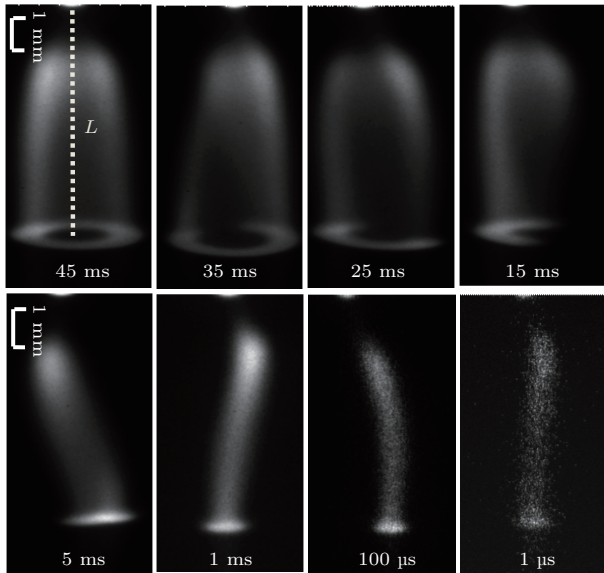


图3 不同曝光时间下锥状放电的照片, 其中放电电流为6.0 mA

Fig. 3. Images of the conical discharge with different exposure time, the discharge current is 6 mA.

根据气体放电理论, 当放电只考虑 α 过程(α 为Townsend第一电离系数)和阴极上的 γ 过程(γ 系数表示一个正离子轰击阴极表面, 使阴极逸出次级电子的数量)时, 其放电自持条件为^[24]

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1, \quad (1)$$

其中 d 为气隙间距. 在大气压气体放电中, 还应当考虑到 β 过程(β 为电子与电负性粒子结合形成负离子的复合系数), 这时放电的自持条件为

$$\gamma[e^{(\alpha-\beta)d} - 1] = 1. \quad (2)$$

由于放电会产生大量的电负性粒子, 如NO, NO₂, NO₃, O, O₃和OH^[23]等. 这些电负性粒子会增大放电通道中的 β 系数, 导致放电通道中 $\alpha - \beta$ 值减小. 因此, 原通道因不满足自持条件而导致放电消失. 但原通道临近的区域, 由于与原通道的电场相差不多, 因此具有与原通道相近的 α 值, 并且此区域由于没有放电, 故缺少以上提及的电负性离子, 因此这个区域具有比原通道更大的 $\alpha - \beta$ 值, 可以满足自持条件, 放电会转移到此区域, 即放电是会移动的. 考虑到水面上的负离子(电负性粒子结合电子后会继续向水阳极运动), 它不仅堆积在放电丝对应的水面上, 还会在整个环内区域堆积, 即在图3的中心轴L附近也会有负离子, 这些负离子对放电丝的负离子具有排斥作用, 所以放电丝会沿着中心轴线转动.

图4给出了水阳极上放电环的直径随电流的变化关系. 当电流为4.5 mA时, 环的直径约为2.2 mm. 随着电流的增加, 环的直径逐渐增加. 当电流增加到6.0 mA时, 环的直径达到最大值为3.7 mm. 继续增加电流, 环的直径逐渐减小. 当电流为7.5 mA时, 放电丝停止旋转, 此时水面上放电的直径达到最小值, 约为1.2 mm. 之后, 随着电流继续增加, 水面放电的直径略有增大.

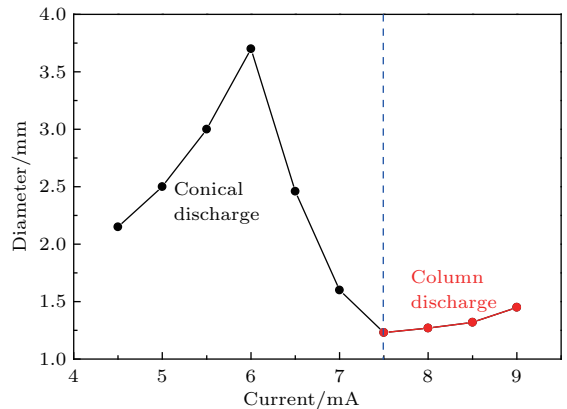


图4 水面上放电环的直径随电流的变化关系
Fig. 4. Diameter of the discharge ring on the water surface as a function of the current.

图5给出了棒-水电极间的放电电压(U)与放电电流(I)的特征曲线(辉光放电的伏安特性曲线). 可以看出, 无论锥状放电还是柱状放电, 其放电电压都大于1 kV, 而电流只有几个毫安. 这与David等^[25]报道的辉光放电特性一致. 此外, 放电电压随着放电电流的增大而减小, 即 $U-I$ 特征曲线具有负斜率. 上述结果表明, 不论是锥状放电还是柱状放电, 均处于正常辉光机理^[26].

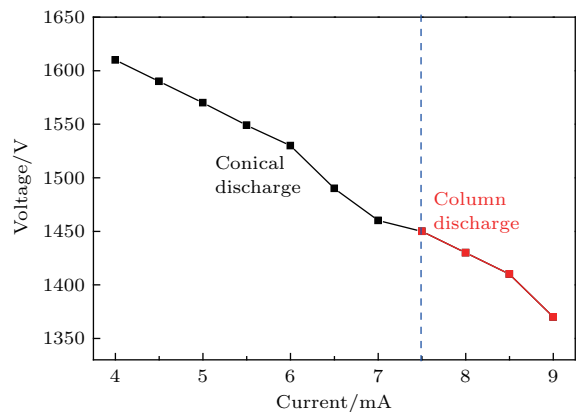


图5 辉光放电的伏安特性曲线
Fig. 5. Voltage-ampere curve of the glow discharge.

为了研究放电的等离子体参数, 利用N₂⁺的波长为391.4 nm和N₂的波长为337.1 nm的谱线相

对强度比 $I_{391.4}/I_{337.1}$ 来表征电子平均能量^[27], 其中的光谱强度是对应波长的峰值. 利用 Specair 软件拟合氮分子第二正带系 ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$) 的光谱来获取转动温度 (T_r) 和振动温度 (T_v)^[28,29], 结果如图 6 所示. 在图 6 (a) 中, 随着电流的增大, $I_{391.4}/I_{337.1}$ 升高, 这表明放电的电子平均能量随着放电电流增大而升高. 由图 6 (b) 可知, 当放电电流为 4.5 mA 时, 转动温度约为 1380 K, 振动温度约为 3100 K, 这与 Wilson 等^[23] 报道的结果一致. 此外, 转动温度和振动温度均随放电电流的增大而升高. 这是由于电子平均能量越高, 通过碰撞传递给分子的振动能和转动能也越高, 因此分子的振动温度和转动温度也就越高.

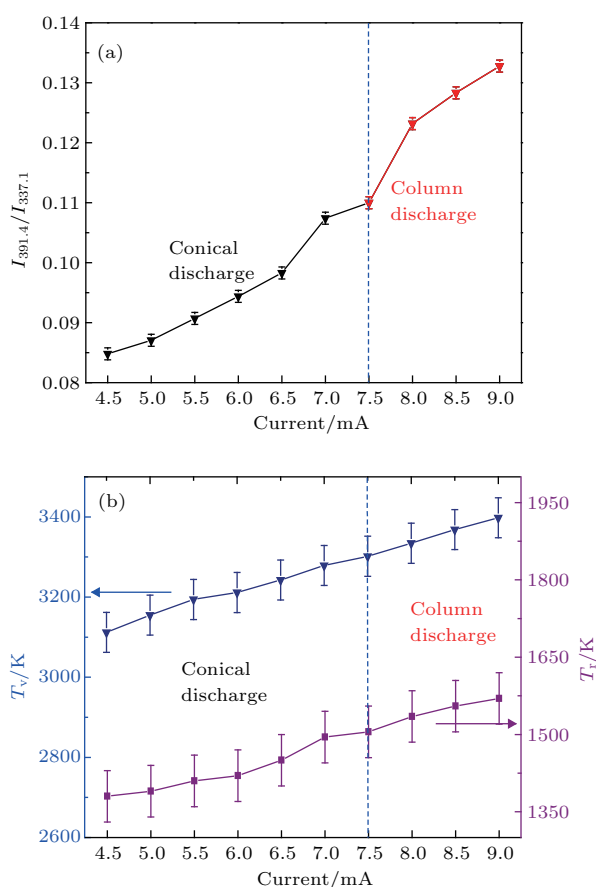


图 6 光强比 $I_{391.4}/I_{337.1}$ (a) 及振动温度和转动温度 (b) 随电流的变化

Fig. 6. The intensity ratio of $I_{391.4}/I_{337.1}$ (a), rotational temperature and vibrational temperature (b) as functions of discharge current.

以上结果能够定性解释水面上放电直径随电流的变化关系. 对于锥状放电, 随着电流的增加, 放电电压逐渐减小, 这使得电子的迁移率减小. 那么, 电子与电负性粒子结合的概率增大, 能够产生更多的负离子. 因此, 随着电流的增加, 中心轴 L

附近及放电通道中的负离子均增多, 二者间的排斥力增大. 所以随着电流增大, 水面上环的直径增大. 另一方面, 随着电流的增加, 放电通道的气体温度逐渐升高. 气体受热膨胀会降低电子与电负性粒子的结合概率, 减少水面上负离子的数量. 这种因素导致环的直径随电流的增大而减小. 在电流小于 6.0 mA 时, 第一个因素占主导地位, 因此环的直径随着放电电流增大而增大. 当电流达到 6.0 mA 后, 温度的影响起主导作用. 因此, 随着电流的继续增加 (小于 7.5 mA), 环的直径减小. 当电流大于 7.5 mA 后, 放电通道的气体温度已经足够高. 此时放电区域中的气体密度足够小, 因此放电区域的电子平均能量远大于其临近区域, 导致放电通道的 α 系数也远大于临近区域, 因此放电通道将能一直满足自持条件, 所以放电静止于轴线位置. 随着放电电流的继续增加, 更多的电子会向水面移动, 导致更多的负离子堆积在水面上, 因此水面上的负离子层会沿着水面扩展, 导致水面上放电的直径随着电流而增大.

4 结 论

利用直流激励铜棒-水电极装置, 在气隙间产生了大气压辉光放电. 研究发现, 随着电流的增大放电由锥状转变成柱状. 锥状放电时, 水面圆环直径随电流的增大先增大后减小, 柱状放电时, 水面放电直径随电流的增大而增大. 利用高速照相发现锥状放电是由单个放电丝旋转形成的. 电学特性的测量结果表明无论是锥状放电还是柱状放电均处于正常辉光机理. 利用光谱学方法测量了放电的等离子体参数, 发现放电的电子平均能量、振动温度和转动温度均随电流的升高而增大. 根据气体放电理论, 基于放电的伏安特性曲线和等离子体参数的变化, 定性地解释了放电丝的运动机理及环直径随电流的变化关系.

参考文献

- [1] Bruggeman P, Leys C 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 053001
- [2] Bruggeman P, Ribezl E, Maslani A, Degroote J, Malesevich A, Rego R, Vierendeels J, Leys C 2008 *Plasma Sources Sci. Technol.* **17** 025012
- [3] Bobkova E S, Krasnov D S, Sungurova A V, Rybkin V V, Choi H S 2016 *Korean J. Chem. Eng.* **33** 1620

- [4] Webb M R, Hieftje G M 2009 *Anal. Chem.* **81** 862
- [5] Shimizu T, Iwafuchi Y, Morfill G E, Sato T 2011 *J. Photopolym. Sci. Technol.* **24** 421
- [6] Jacobs T, Carbone E, Morent R, Geyter N D, Reniersb F, Leys C 2010 *Surf. Interface Anal.* **42** 1316
- [7] Shirai N, Uchida S, Tochikubo F 2014 *Jpn. J. Appl. Phys.* **53** 046202
- [8] Shekhar R, Karunasagar D, Manjusha R, Arunachalam J 2009 *Anal. Chem.* **81** 8157
- [9] Shen J, Sun Q, Zhang Z L, Cheng C, Lan Y, Zhang H, Xu Z M, Zhao Y, Xia W D, Chu P K 2015 *Plasma Process. Polym.* **12** 252
- [10] Takai E, Kitano K, Kuwabara J, Shiraki K 2012 *Plasma Process. Polym.* **9** 77
- [11] Gils C A J, Hofmann S, Boekema B K H L, Brandenburg R, Bruggeman P J 2013 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** 175203
- [12] Cho Y I, Wright K C, Kim H S, Cho D J, Rabinovich A, Fridman A 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 013501
- [13] Shutov D A, Ol'khova E O, Kostyleva A N, Bobkova E S 2014 *High Energy Chem.* **48** 343
- [14] Cho Y I, Wright K C, Kim H S, Cho D J, Rabinovich A, Fridman A 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 013501
- [15] Lu X P, Laroussi M 2003 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **36** 661
- [16] Andre P, Aubreton J, Barinov Y, Elchinger M F, Fauchais P, Faurel G, Kaplan V, Lefort A, Rat V, Shkol'nik S 2002 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **35** 1846
- [17] Rowland S M, Lin F C 2006 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** 3067
- [18] Lu Y, Xu S F, Zhong X X, Ostrikov K, Cvelbar U, Mariotti D 2013 *Europhys. Lett.* **102** 15002
- [19] Liu J J, Hu X 2013 *Plasma Sci. Technol.* **15** 768
- [20] Li X C, Zhang P P, Jia P Y, Chu J D, Chen J Y 2017 *Sci. Report* **7** 2672
- [21] Zheng P C, Wang X M, Wang J M, Yu B, Liu H D, Zhang B, Yang R 2015 *Plasma Sources Sci. Technol.* **24** 015010
- [22] Miao S Y, Ren C S, Wang D Z, Zhang Y T, Qi B, Wang Y N 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 126
- [23] Wilson A, Staack D, Farouk T, Gutsol A, Fridman A, Farouk B 2008 *Plasma Sources Sci. Technol.* **17** 045001
- [24] Raizer Y P 1991 *Gas Discharge Physics* (Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg) p131
- [25] Staack D, Farouk B, Gutsol A, Fridman A 2005 *Plasma Sources Sci. Technol.* **14** 700
- [26] Shuaibov A K, Chuchman M P, Mesarosh L P 2014 *Tech. Phys.* **59** 847
- [27] Li X C, Yuan N, Jia P Y, Chen J Y 2010 *Phys. Plasmas* **17** 093504
- [28] Laux C O, Spence T G, Kruger C H, Zare R N 2003 *Plasma Sources Sci. Technol.* **12** 125
- [29] Bruggeman P, Schram D, Kong M, Leys C 2009 *Plasma Process. Polym.* **6** 751

Rotating characteristics of glow discharge filament on liquid electrode surface*

Li Xue-Chen[†] Geng Jin-Ling Jia Peng-Ying Wu Kai-Yue Jia Bo-Yu Kang Peng-Cheng

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

(Received 11 October 2017; revised manuscript received 23 January 2018)

Abstract

Atmospheric pressure glow discharge above liquid electrode has extensive application potentials in biomedicine, chemical degradation, environmental protection, etc. In this paper, such a kind of discharge excited by a direct current voltage is generated through using a metal rod above water surface. Results show that the discharge has a ring shape on the water surface when the current is low. With increasing the discharge current, its diameter first increases, and then decreases after reaching a maximum, and finally slightly increases. In this process, the discharge transits from a conical shape to a column. Fast photography indicates that the conical discharge actually originates from the rotation of a discharge filament, which can be attributed to the effect of electronegative particles generated in the discharge channel. These electronegative particles, mainly including NO, NO₂, NO₃, O, O₃ and OH, can increase electron attachment coefficient β , resulting in extinguishment of the original discharge channel. Due to a similar field value and a normal β coefficient, the breakdown conditions can be satisfied in a region adjacent to the original channel. Therefore, the discharge will move into the new region. Further investigation indicates that both the conical discharge and the column discharge are in a normal glow regime. By optical emission spectroscopy, it is found that the vibrational temperature, the rotational temperature and the intensity ratio of $I_{391.4}/I_{337.1}$ increase with increasing the current. Electron mobility decreases in the conical discharge due to voltage decreasing with the current. Hence, electrons have an increased possibility with which they are attracted by the electronegative particles to form negative ions. Consequently, with increasing the discharge current, more negative ions will be accumulated not only near the conical center, but also in the vicinity of the discharge channel. Obviously, there is repulsive force between the negative ions in the two regions. The repulsive force increases with increasing the discharge current, which leads to the ring diameter increasing with the current. Besides the negative ions, gas temperature plays another important role in the discharge. It increases with current increasing, leading to the decrease of gas density in the discharge channel. Hence, electrons have a reduced probability with which they are attached by electronegative particles. This factor will lead to a reduced force between less negative ions in the two regions. Consequently, after reaching its maximum, the ring diameter decreases with current increasing. If the current is high enough, the discharge channel will have a sufficiently high temperature and an adequately lower gas density, resulting in an increased electron energy as well as an increased α (the first Townsend ionization coefficient). Therefore, the discharge will be self-sustained in the original region, other than move into an adjacent region. Consequently, the column discharge appears with the current increasing to some extent. In the column discharge, more negative ions will be accumulated above the water surface with increasing the current. These negative ions extend along the water surface, which contributes to the slight diameter increase of the luminous column. These experimental results are of great significance for theoretically studying liquid anode discharge.

Keywords: glow discharge, conical discharge, column discharge, movement characteristics

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

DOI: 10.7498/aps.67.20172205

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11575050, 10805013), the Natural Science Foundation of Hebei province, China (Grant Nos. A2015201199, A2015201092, A2016201042), One Hundred Talent Project of Hebei Province, China (Grant No. SLRC2017021), the 333 Talents Project of Hebei Province, China (Grant No. A2016005005), the Research Foundation of Education Bureau of Hebei Province, China (Grant No. LJRC001), and the Midwest Universities Comprehensive Strength Promotion Project.

[†] Corresponding author. E-mail: plasmalab@126.com