

脉冲叠加直流激励辉光放电特性

姜松, 丁起行, 饶俊峰, 王永刚

(上海理工大学机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 辉光放电产生的低温等离子体具有广泛的应用前景, 日益成为研究热点。本文提出了一种采用脉冲叠加直流的方式来激励辉光放电的实验装置。选取氩气作为反应气体, 本实验在低气压下进行, 利用参数可调的高频脉冲电源和直流电源进行激励。研究了不同激励方式下击穿电压和电流的变化规律。实验发现: 直流辉光放电击穿电压最低, 约为 380 V, 但是在放电过程中放电管发热比较严重; 脉冲辉光放电所需击穿电压为 450~600 V, 但其存在反复击穿; 而脉冲叠加直流激励辉光放电则降低了脉冲击穿电压, 最低约为 400 V, 且改善了放电管发热严重的问题。

关键词: 高频脉冲电源; 直流电源; 辉光放电; 击穿电压; 放电电流

中图分类号: TM 832 **文献标志码:** A

Characteristics of pulse superimposed DC excitation glow discharge

JIANG Song, DING Qihang, RAO Junfeng, WANG Yonggang

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The low-temperature plasma produced by glow discharge has broad application prospects and is increasingly becoming a research hotspot. In this paper, an experimental device for exciting glow discharges by means of pulsed superimposed DC is proposed. Argon gas is selected as the reaction gas, the experimental environment is low pressure, and the parameter adjustable high-frequency pulse power supply and DC power supply are used for excitation. The changes of breakdown voltage and current under different excitation methods are studied. The experiments results show that the breakdown voltage of DC glow discharge is the lowest, about 380 V. But the discharge tube generates a lot of heat during the discharge process. The breakdown voltage required for pulsed glow discharge is 450~600 V, while pulse superimposed DC excitation glow Discharge reduces the pulse breakdown voltage, the lowest is about 400 V, and improves the serious heating problem of the discharge tube.

Keywords: high frequency pulse power supply; DC power supply; glow discharge; breakdown voltage; discharge current

辉光放电低温等离子体在众多领域都有应用。等离子体就是部分或完全电离的气体，它作为物质的第四态被大家所熟知^[1-2]。从微观上讲等离子体中含有大量的电子、正负离子和活性基团，电子和负离子带的电位数和正离子所带电荷刚好相等。从宏观上讲等离子体呈电中性^[3-4]。辉光放电低温等离子体的电离率比较低，所以离子温度和室温接近。由于温度接近室温，用低温等离子体处理一些材料不会造成材料本体伤害，因此，低温等离子体具有很高的应用价值^[5-6]。

等离子体通常由气体放电产生，如辉光放电和电晕放电等，它们都属于自持放电，但是它们定义不同，原理机制也不同。辉光放电是指低气压气体中显示辉光的气体放电现象，即是稀薄气体中的自持放电现象，其基本构造是在封闭的容器内放置两个电极；而电晕放电是指气体介质在不均匀电场中的局部自持放电，其形成机制因尖端电极的极性不同而有区别^[7-9]。辉光放电的主要应用是：a.利用它的发光效应制作霓虹灯；b.利用正常辉光放电的稳压特性制作氖稳压管；c.利用辉光的正柱区产生激光的特性制作氦氖激光器。

苏永飞等对低气压下射频辉光放电的电极设计进行了研究，采用容性平行电极板和针管电极相结合的形式实现了低压射频辉光放电，探究了辉光放电的起辉条件^[10]。张希霞等对低气压中频针板电极放电进行了实验研究，给出了在低气压针板电极放电的过程中气体种类、气压、放电的针板间距以及针型等对击穿电压产生的影响^[11]。

本实验以氩气作为主要反应气体，经过自制高频高压脉冲电源和直流电源的激励，产生辉光放电。实验过程中测量了辉光放电的击穿电压幅值和辉光放电过程中不同电压和电流波形，并对其进行整理与分析。重点研究不同激励方式下击穿电压幅值的大小、辉光放电过程中电流的规律以及脉冲激励辉光放电时脉宽的变化对电压和电流的影响。结果表明，脉冲叠加直流激励能有效降低辉光放电所需的脉冲击穿电压。

1 实验材料、设备和方法

1.1 实验材料与设备

辉光放电实验装置如图1所示，其放电管为U型管，两电极间距约为15 cm，管内主要气体为氩气，管内气压环境为低气压，实物如图2所示。

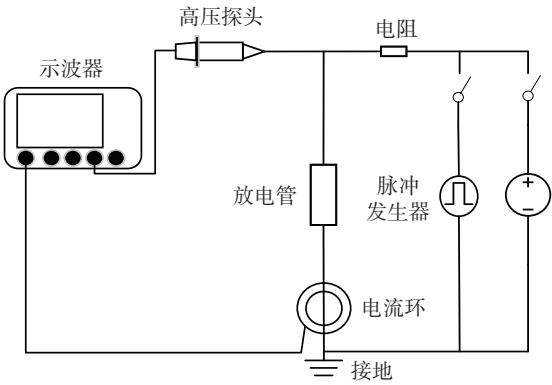


图1 实验装置图
Fig.1 Experimental setup

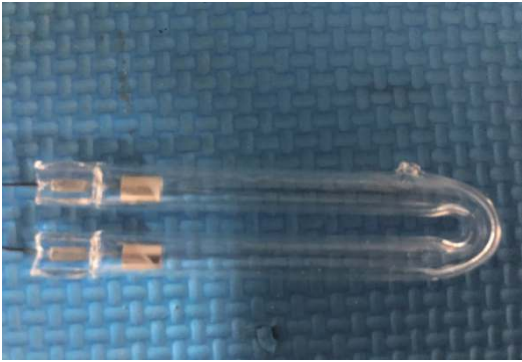


图2 U型放电管
Fig.2 U-shaped discharge tube

实验中采用高频脉冲电源与直流电源对放电管进行激励放电。

脉冲电源采用基于 Marx 电路结构、可以调节不同参数的自制电源。其输出参数为：电压幅值调节范围 0~1 500 V，频率调节范围 0~2 kHz，脉宽调节范围 0~300 μs，此脉冲电源典型的输出波形如图3所示。直流电源采用型号为 HSPY-1000-01 的电源，电压幅值调节范围为 0~1 000 V。

当外加电压足够高时，放电管两电极之间发生放电。为了限制放电电流，在放电管和电源之间串联了一个 1 kΩ 的保护电阻。辉光放电管的电压和总的电流分别由高压探头 (Tektronix P6015 A) 和电流探头 (Pearson 2100) 测量。数字示波器 (Tektronix DPO2014) 用于记录和储存电压电流波形。

1.2 实验方法

直流辉光放电：只采用直流电源激励放电管，慢慢升高电压，记录其击穿电压幅值和辉光放电过程中不同的电压和电流。

脉冲辉光放电：只采用高频脉冲电源激励放电管，脉冲电源的供电模式设置为重频模式，脉

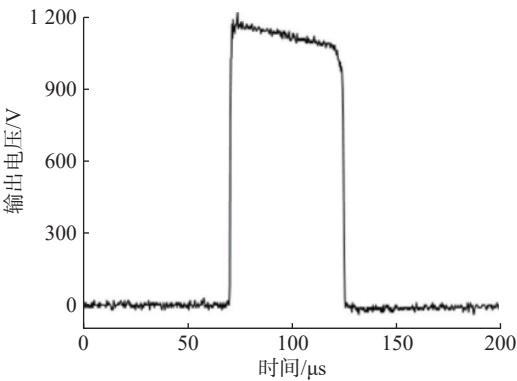


图 3 输出脉冲电压波形

Fig. 3 Waveform of output pulse voltage

冲电源频率设为 1 kHz，慢慢升高电压，记录其击穿电压幅值和辉光放电过程中不同的电压和电流。

脉冲叠加直流辉光放电：采用脉冲叠加直流的方式激励放电管，脉冲电源的供电模式设置为突发模式，即用脉冲电压击穿产生辉光放电，然后用直流电压维持放电。直流维持电压固定为 320 V 不变，改变脉宽，记录不同脉宽下相对应的脉冲击穿电压幅值。同一脉宽下，多次测量脉冲击穿电压，取平均值，以保证测量击穿电压的准确性。

2 不同方式激励下辉光放电特性

2.1 直流辉光放电

当只采用直流电压激励时，刚开始电压较低，放电管无反应，没有辉光放电现象产生，也无电流产生。当直流电压升高到约 380 V 时，放电管被击穿，开始产生辉光放电，并且伴有电流产生，继续升高直流电压，放电电流也随之增加，并且增加速度越来越快。而放电一段时间后，放电管两端被烧黑，发热比较明显。

2.2 脉冲辉光放电

当只采用脉冲电源激励时，电源频率设置为 1 kHz，脉宽设置为 50 μs。同样脉冲电压幅值较低时，放电管同样无反应，没有辉光放电现象产生，也无电流产生。

随着电压的升高，当放电管两端电压达到约 560 V 时，放电管被击穿，开始产生辉光放电，并且有电流产生，其电压、电流波形如图 4 所示。

由图 4 可知，在辉光放电产生的瞬间，放电管两端的电压有一定的电压降，放电电流突然增大，然后到达一定值后又慢慢减小。主要因为当放电管被击穿时，整个放电空间充满等离子，放

电管阻抗降低，放电电流开始产生并瞬间增大到一定值，之后由于阻抗进一步降低，放电管两端电压也随之降低，当放电管两端电压低于最低维持放电电压(约为 300 V)时，放电电流减小为零，直至放电结束。

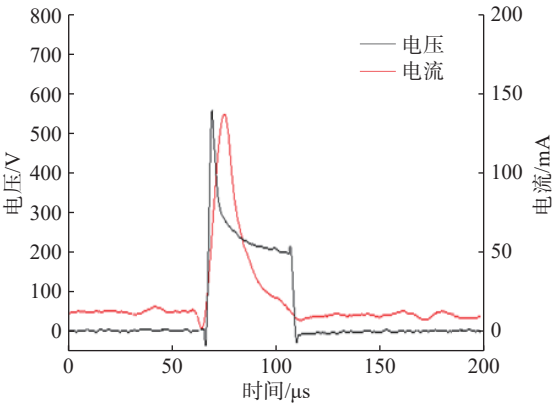


图 4 脉冲辉光电压和电流波形

Fig. 4 Pulse glow voltage and current waveforms

由图 4 可以看出，在单个脉冲时间内，放电管两端的电压和电流是一直变化的，所以其阻抗也是变化的^[12]。通过计算单个脉冲时间内电压与电流的比值可以得出放电管阻抗，先减小到约 2.2 kΩ，然后随着辉光放电结束又慢慢增大。直流辉光放电实验中，在 560 V 直流电压下，通过计算电压与电流的比值可以得出放电管的阻抗减小到约 2 kΩ 后慢慢趋于稳定。在相同电压下，直流辉光放电时放电管阻抗略小，产生的热量更多。

将脉冲电源的频率固定为 1 kHz 不变，当脉宽从 20 μs 增至 250 μs 时，其产生的辉光放电的击穿电压幅值如图 5 所示。

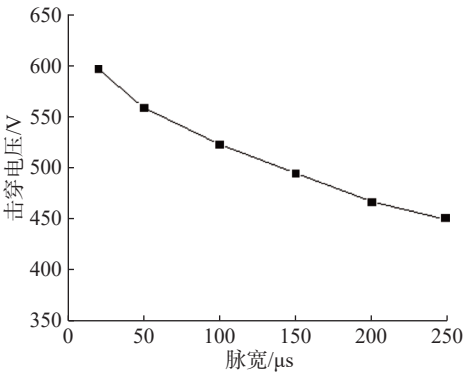


图 5 脉宽对击穿电压的影响

Fig. 5 Effect of pulse width on breakdown voltage

由图 5 可知，随着脉宽的增加，脉冲辉光放电所需要的击穿电压幅值降低。这是因为每个气隙都有它的最低静态击穿电压，欲使间隙击穿，

外加电压必须不小于这个静态击穿电压。由于放电时延的影响，气隙的击穿需要一定的时间才能完成。对于脉冲性质的电压，气隙的击穿电压就与该电压作用的时间有很大关系。所以，对某一特定的非持续作用的电压波形，气隙击穿电压需用外加电压的峰值和延续时间共同表示。当脉宽增加时，其相对应的击穿电压降低。

图 6 为不同脉冲电压、脉冲宽度下，放电电流的峰值变化情况。

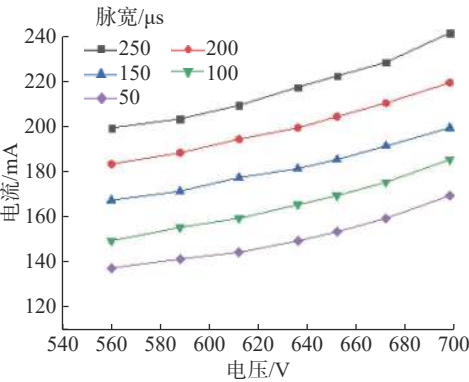


图 6 脉宽对放电电流峰值的影响

Fig.6 Effect of pulse width on peak discharge current

由图 6 可以看出，在相同脉宽下，随着电压的升高，放电电流的峰值随之增加。在相同电压下，随着脉宽的增大，放电电流的峰值也随之增加。这主要是由于间隙相对应的伏秒积增大，放电得到加强，电流随之增大。

2.3 脉冲叠加直流辉光放电

通过比较脉冲与直流辉光放电的实验结果可以看出，直流辉光放电所需要的击穿电压比脉冲辉光放电所需要的击穿电压更低，但是相同电压下直流辉光放电电流更大，发热更严重。因此从能量效率方面考虑，采用脉冲叠加直流的方式激励辉光放电来改善发热问题。

将直流电压固定为 320 V，通过改变脉冲电压的脉宽得到不同脉宽下辉光放电的击穿电压幅值，其结果如图 7 所示。

由图 7 可看出，脉冲叠加直流辉光放电所需要的脉冲击穿电压比脉冲辉光放电要低。主要是由于在脉冲电场下更容易激发初始电子，相对应其直流击穿电压降低；随着脉冲电压脉宽的增加，单个脉冲电压作用的时间增长，激发初始电子个数增加，直流击穿电压也就随之降低。

为了研究不同直流电压下使放电管发生辉光

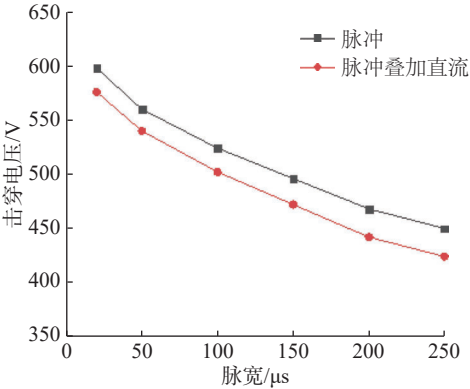


图 7 不同激励方式对击穿电压的影响

Fig.7 Effect of different excitation methods on breakdown voltage

放电的最低脉冲击穿电压，将脉冲电源的频率固定为 1 kHz，脉宽固定为 250 μs 不变，得到其结果如图 8 所示。

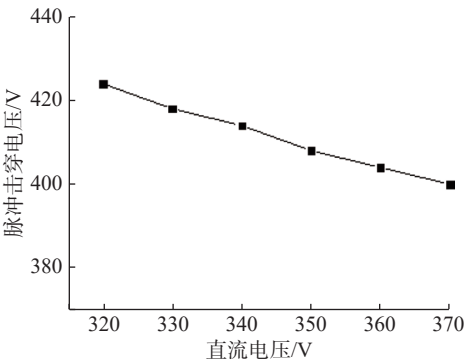


图 8 直流电压对脉冲击穿电压的影响

Fig.8 Effect of DC voltage on pulse breakdown voltage

由图 8 可知，随着所加直流电压的增加，辉光放电所需要的脉冲击穿电压降低。这主要因为随着外加的直流电压的增大，自由电子在脉冲与直流叠加的电场中获得的能量更大，所以更容易发生放电，故起始放电电压就降低。

3 结 论

本文主要研究脉冲电源叠加直流电源激励辉光放电。通过实验发现，单一直流辉光放电所需击穿电压约为 380 V，放电过程中发热较为明显，放电管两端被烧黑。脉冲辉光放电所需的击穿电压较高，为 450~600 V，并且击穿电压随着脉冲电压的脉宽的增加而降低。

- [18] PEGO R L. Remarks on the stability of shock profiles for conservation laws with dissipation[J]. [Transactions of the American Mathematical Society](#), 1985, 291(1): 353–361.
- [19] NEMYTSKII V V, STEPANOV V V. Qualitative theory of differential equations[M]. New York: Dover Publications, 1989.
- [20] ZHANG Z F, DING T R, HUANG W Z, et al. Qualitative theory of differential equations[M]. Providence: American Mathematical Society, 1992.
- [21] 马知恩, 周义仓. 常微分方程定性方法与稳定性方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [22] ARONSON D G, WEINBERGER H F. Multidimensional nonlinear diffusion arising in population genetics[J]. [Advances in Mathematics](#), 1978, 30(1): 33–76.
- [23] FIFE P C. Mathematical aspects of reacting and diffusing systems[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1979.
- [24] YE Q X, LI Z Y. Introduction to reaction diffusion equations[M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [25] BELYTSCHKO T, LU Y Y, GU L. Element-free Galerkin methods[J]. [International Journal for Numerical Methods in Engineering](#), 1994, 37(2): 229–256.
- [26] KAWASHIMA S. Systems of a hyperbolic-parabolic composite type, with applications to the equations of magnetohydrodynamics[D]. Kyoto: Kyoto University, 1984.
- [27] DIAZ J B, METCALF F T. An analytic proof of Young's inequality[J]. [The American Mathematical Monthly](#), 1970, 77(6): 603–609.
- [28] EVANS L C. Partial differential equations[M]. 2nd ed. Berkeley: American Mathematical Society, 2010.

(编辑: 石 瑛)

[上接第 476 页]

采用脉冲叠加直流的方式激励辉光放电所需的击穿电压既比脉冲电压辉光放电所需的击穿电压要低, 更易产生辉光放电, 也改善了直流辉光放电发热严重的问题, 提高了效率。另外, 在不改变脉冲电源参数的情况下, 增加直流维持电压, 辉光放电所需要的脉冲击穿电压也有所降低, 最低约为 400 V。

参考文献:

- [1] 李定, 陈银华, 马锦秀. 等离子体物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 营井秀郎. 等离子体电子工程学 [M]. 张海波, 张丹, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] DING W D, LI F, YANG L J. Atmospheric-pressure glow discharge sustained by a resonant power supply[J]. [IEEE Transactions on Plasma Science](#), 2009, 37(11): 2207–2212.
- [4] GODYAK V A, PIEJAK R B, ALEXANDROVICH B M. Measurement of electron energy distribution in low-pressure RF discharges[J]. [Plasma Sources Science and Technology](#), 1992, 1(1): 36–58.
- [5] HECHLEF B, BOUCHIKHI A. Identification of the normal and abnormal glow discharge modes in a neon-xenon gas mixture at low pressure[J]. [Plasma Science and Technology](#), 2018, 20(11): 115401.
- [6] YU Q, DENG Y F, LIU Y, et al. Numerical study on characteristics of argon radio-frequency glow discharge with varying gas pressure[J]. [Chinese Physics Letters](#), 2008, 25(7): 2569–2572.
- [7] HAN Q H, WU C Y, GUO Y, et al. Temporal evolution of atmospheric cascade glow discharge with pulsed discharge and radio frequency discharge[J]. [Plasma Science and Technology](#), 2020, 22(3): 034014.
- [8] GAO S, FENG J Y, LI W Q, et al. DC radial glow discharge in axial magnetic field at low pressures[J]. [The European Physical Journal Applied Physics](#), 2019, 88(3): 30801.
- [9] 许根慧, 姜恩永, 盛京, 等. 等离子体技术与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [10] 苏永飞, 李占贤, 张钧尧. 实现低气压射频辉光放电的电极设计及实验研究 [J]. [机械工程与自动化](#), 2020(1): 24–25, 28.
- [11] 张希霞. 低气压针板电极中频放电的实验诊断研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [12] 焦俊凯, 周全, 王豪, 等. 大气压射频辉光放电电子数密度解析解及等离子体阻抗特性研究 [J]. [高电压技术](#), 2020, 46(4): 1458–1464.

(编辑: 董 伟)