

大气压氦气介质阻挡放电中的周期一不对称 放电实验研究*

戴栋^{1)2)†} 王其明¹⁾ 郝艳捧¹⁾

1) (华南理工大学电力学院, 广州 510641)

2) (西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

(2013年1月31日收到; 2013年3月3日收到修改稿)

大气压介质阻挡放电不仅具有对称周期一的放电形式,还会在一定参数下呈现不对称周期一(AP1)放电.本文采用具有平行电极结构的介质阻挡放电装置,分别在气隙宽度 1 mm, 3 mm, 7 mm 和 10 mm 下的大气压氦气中进行了一系列放电实验,研究了气隙宽度和外施电压频率对周期一放电对称性的影响.实验结果表明:在较宽的气隙宽度和外施电压频率参数区间内可以观察到显著的 AP1 放电;气隙宽度越大越容易产生 AP1 放电,同一气隙宽度下外施电压频率较高时则相对更容易观察到 AP1 放电;随着气隙宽度增加,首次击穿即呈现 AP1 放电的外施电压频率临界值逐渐减小.本文的研究初步验证了之前关于气隙宽度对 AP1 放电影响的数值仿真结果,由此可以推测 AP1 放电并不只是由系统参数的不对称引起的,也很可能是一种在一定的的气隙宽度和外施电压频率下系统固有的、内在的高频不稳定放电行为.

关键词: 介质阻挡放电, 不对称放电

PACS: 52.80.Tn

DOI: 10.7498/aps.62.135204

1 引言

近年来,等离子体技术特别是低温非平衡等离子体在工业上得到了广泛的应用.大气压介质阻挡放电作为一类产生低温非平衡等离子体的方法,因其装置简单、便于工业化生产,已成为等离子体领域的研究热点^[1-8].在惰性气体中,大气压介质阻挡放电较易形成均匀的辉光放电.大量的实验结果表明,当外施电压为正弦电压时,放电电流的周期与外施正弦电压的周期一致,且放电电流在一个周期的正负半周上具有对称性,如图 1(a) 所示.这种周期一的对称放电在本文中记为 SP1 (symmetrical period one) 放电.虽然 SP1 放电是大气压介质阻挡放电中常见的放电形式,但也有一些关于周期一不对称放电的研究报道^[9-19].与 SP1 放电相比,这种周期一不对称放电电流的周期依然与外施正弦

电压周期相同,只是这种放电电流在一个周期的正负半周上呈现不对称性,如图 1(b) 所示.在本文中,将这种周期一不对称放电记为 AP1 (asymmetrical period one) 放电.若认为 SP1 放电是正常的稳定放电,那么则可将 AP1 放电视为一种高频的不稳定放电行为.图 1(c)—(d) 和 (e)—(f) 分别是对 SP1 放电电流与 AP1 放电电流进行快速傅里叶变换 (FFT) 后得到的频谱图,图中基波频率 f_0 为放电电流的频率,也即外施电压频率.可以看出,SP1 放电电流的频谱只有奇次谐波而无偶次谐波,而 AP1 放电电流的频谱不仅含有奇次谐波,在高频区域还含有明显的偶次谐波.

目前,国内外已有一些关于大气压介质阻挡放电中 AP1 放电的零星报道. Golubovskii 等在研究外施电压参数和气隙宽度对大气压氦气介质阻挡放电模式影响时,观察到了数值仿真中的 AP1 放电现象,他们认为上一次击穿中产生的正柱区在下一

* 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2011ZM0016) 和电力设备电气绝缘国家重点实验室开放基金 (批准号: EIPE10210) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: ddai@scut.edu.cn

次放电发生之前未能完全消散是产生 AP1 放电的重要条件^[9]. Mangolini 等在研究阻挡介质对大气压氦气辉光放电的影响时,发现在一定条件下实验和数值仿真中都存在着 AP1 放电现象,他们认为实验中的 AP1 放电可能是由高压电极与接地气罐壁之间杂散电容导致实验装置系统参数的不对称而引起的,至于数值仿真中的 AP1 放电则与放电时外施电压的相位有关^[10]. 但是, Shin 等在研究大气压氦气介质阻挡辉光放电时,观察到实验中 AP1 放电现象具有一定的随机性,与实验装置参数的不对称没有明显的关系^[11]. 他们认为 AP1 放电可能是由

放电初始时阻挡介质表面二次电子发射系数的差异而引起,这种差异会随时间的演化而逐渐消失,进而又可以观察到稳定的 SP1 放电. 丁伟等在研究壁电荷对大气压空气介质阻挡放电特性的影响时,发现了实验中的 AP1 放电现象,他们认为 AP1 放电可能是由壁电荷导致放电时刻在驱动电压正负半周期不对称,即相邻两次放电时间间隔长短交替而引起的^[12]. 此外,在对大气压介质阻挡放电时域非线性现象的研究中发现,当放电出现倍周期分岔或混沌时,通常也会伴随出现放电电流正负脉冲的不对称现象^[13-17].

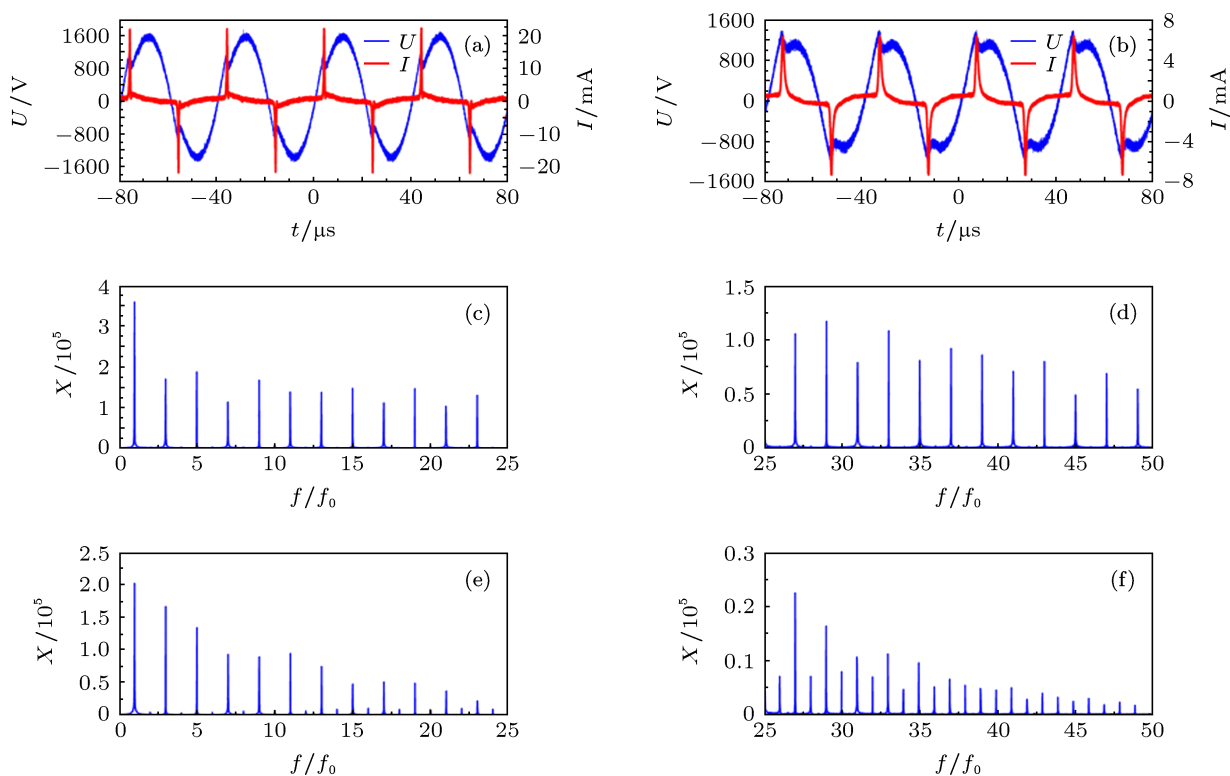


图1 $d = 8 \text{ mm}$, $f = 25.03 \text{ kHz}$ 下的放电波形图 (a) $U_{\text{峰-峰}} = 3139 \text{ V}$, SP1 放电示例; (b) $U_{\text{峰-峰}} = 2092 \text{ V}$, AP1 放电示例; (c) SP1 放电电流 $0-25f_0$ 频谱图 (频率分辨率为 250 Hz); (d) SP1 放电电流 $25-50f_0$ 频谱图; (e) AP1 放电电流 $0-25f_0$ 频谱图 (频率分辨率为 250 Hz); (f) AP1 放电电流 $25-50f_0$ 频谱图

可以看出,国内外学者已对介质阻挡放电中 AP1 放电现象的形成机理与特征有了一些初步的认识. 但需要指出的是,以上关于 AP1 放电的报道都是在对其他课题的研究中或提到,而非针对性的开展研究,甚至对实际实验中能否广泛的观察到 AP1 放电都还存在一定的疑问.

本文作者前期通过基于一维流体模型的数值仿真研究了气隙宽度对大气压氦气介质阻挡放电中 AP1 放电的影响,结果表明较宽的气隙会使得上一次击穿过程中产生的正柱区无法在下次放电

触发前完全消散,这将使得下一次放电发生时气隙空间电场分布极不均匀,进而导致下一次放电发展不充分,因而放电会呈现强-弱相间的 AP1 放电现象^[18]. 在此基础上, Ha 等使用相同的流体模型通过数值仿真进一步探讨了 AP1 放电的产生机理,他们认为未完全消散的正柱区在空间中起到了等效阳极的作用,在其作用下气隙的等效宽度减小,放电模式变为脉冲幅值较小而脉宽较大的汤森放电,因而在一个周期内放电会呈现不对称现象^[19]. 由于文献^[18, 19]中数值仿真模型的参数是对称的,

这就说明对于一个具有对称参数的一维流体模型在一定的参数条件下可以产生不对称的放电现象. 因此, 完全有理由推测 AP1 放电是一种系统固有的放电行为, 而非只是由系统参数的不对称引起的.

虽然文献 [18] 在一定程度上已经较深入地探讨了 AP1 放电的形成机理, 但是考虑到一维流体模型与实际实验系统的差异, 仿真中得到的一些结论仍然需要实验结果的验证. 因此, 本文对采用平行电极的大气压氦气介质阻挡放电中的 AP1 放电进行了针对性的实验研究, 通过观察不同气隙宽度和外施电压频率下放电电流随外施电压幅值增加而演化的过程, 初步验证了文献 [18] 中气隙宽度对 AP1 放电影响的结论, 同时还进一步探讨了外施电压频率对 AP1 放电的影响. 此外, 实验中观察到的大量 AP1 放电现象也充分说明 AP1 放电在实际中是广泛存在的.

2 实验设置

实验系统主要包括电源、放电室、测量装置三个部分, 如图 2 所示. 电源部分包括低温等离子体实验电源和调压器, 测量装置包括高压探头、用于测量气隙放电电流的采样电阻以及数字存储示波器, 具体的型号和参数如表 1 所示.

放电室可抽空至 2.5 Pa 以下, 并充以纯度为 99.99% 的氦气至大气压. 上电极为直径 60 mm 的圆形铝平板; 下电极为圆形平板透明电极, 由 100 mm × 100 mm 石英玻璃的中心喷涂直径为 60 mm 的圆形掺锡氧化铟 (indium tin oxides, ITO) 导电薄层制得, 通过平面反光镜可观察放电时电极表面的发光情况. 阻挡介质是相对介电常数为 3.6 的 100 mm × 100 mm × 1 mm 石英玻璃, 分别覆盖在上下电极表面.

本文实验中的放电气隙宽度分别设置为 1 mm, 4 mm, 7 mm 和 10 mm, 外施电压频率范围为 4—30 kHz. 在不同的气隙宽度以及电源频率下, 调节电压幅值记录一些典型的放电波形. 在实验的实际操作中, 先固定某一电源频率值, 再逐渐增加电压峰-峰值. 当该频率下的实验观察结束后先关闭电源 30 s 左右, 再重复一次实验, 若实验现象可重复则再关闭电源 30 s 左右, 然后进行下一组电源频率下的放电实验, 电源频率间隔约为 2 kHz.

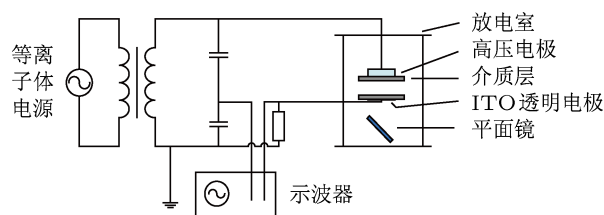


图 2 实验装置原理图

表 1 实验装置及其参数

设备	型号	参数
低温等离子体实验电源	苏曼 CTP-2000 K	3—10 kHz, 10—47 kHz, 0—30 kV, 0—500 W
调压器	正泰 TDGC2-1	50 Hz, 0—250 V, 1 kW
高压探头	Tektronix P6015A	1:1000
测量电阻	—	无电感, 400 Ω
数字存储示波器	Tektronix DPO4104	1 GHz, 10 GS/s

3 实验结果与讨论

3.1 放电电流典型的演化过程

实验中, 若放电电流的周期与外施电压的周期一致, 则认为是周期一放电. 对于周期一放电, 若放电电流在一个周期正负半周上近似具有对称性, 且正、负半周电流幅值相差小于 2%, 则视放电为 SP1 放电, 反之则视放电为 AP1 放电. 按照前述的实验步骤进行了大量的实验研究, 在一定的参数条件下

可以观察到明显的 AP1 放电现象, 下面给出不同气隙宽度以及外施电压频率下典型的放电波形.

图 3 给出了气隙宽度为 1 mm、频率为 14 kHz 时的放电波形图. 逐渐升高电压, 当电压峰-峰值达到 958 V 时气隙击穿, 呈 SP1 放电, 如图 3(a) 所示. 随着电压继续升高, 分别记录了峰-峰值为 1167 V, 2101 V 和 2654 V 时的放电波形, 如图 3(b)—(d) 所示. 可以看出, 在该气隙宽度和电压频率下随着电压峰-峰值增加放电均为 SP1 放电.

保持气隙宽度 1 mm 不变, 提高电压频率至

18 kHz, 当电压峰-峰值达到 990 V 时气隙击穿, 并呈 SP1 放电. 增加电压峰-峰值, 放电仍然呈现 SP1 放电, 图 4(a) 给出了电压峰-峰值为 1706 V 时的放电波形. 但是, 继续增加电压峰-峰值至 1864 V 时, SP1 放电消失, 放电呈现为负脉冲电流幅值大于正脉冲电流幅值的 AP1 放电 (记为 AP1N 放电), 如图

4(b) 所示. 进一步升高电压峰-峰值至 2007 V 时, 放电又呈现 SP1 放电, 如图 4(c) 所示. 此后, 随着电压峰-峰值的增加, 气隙将一直呈现 SP1 放电. 对比电压频率为 14 kHz 时的实验结果可以看出, 虽然气隙宽度保持不变, 但是在较大的电压频率下放电随电压幅值的增加会在一段区间内出现 AP1 放电.

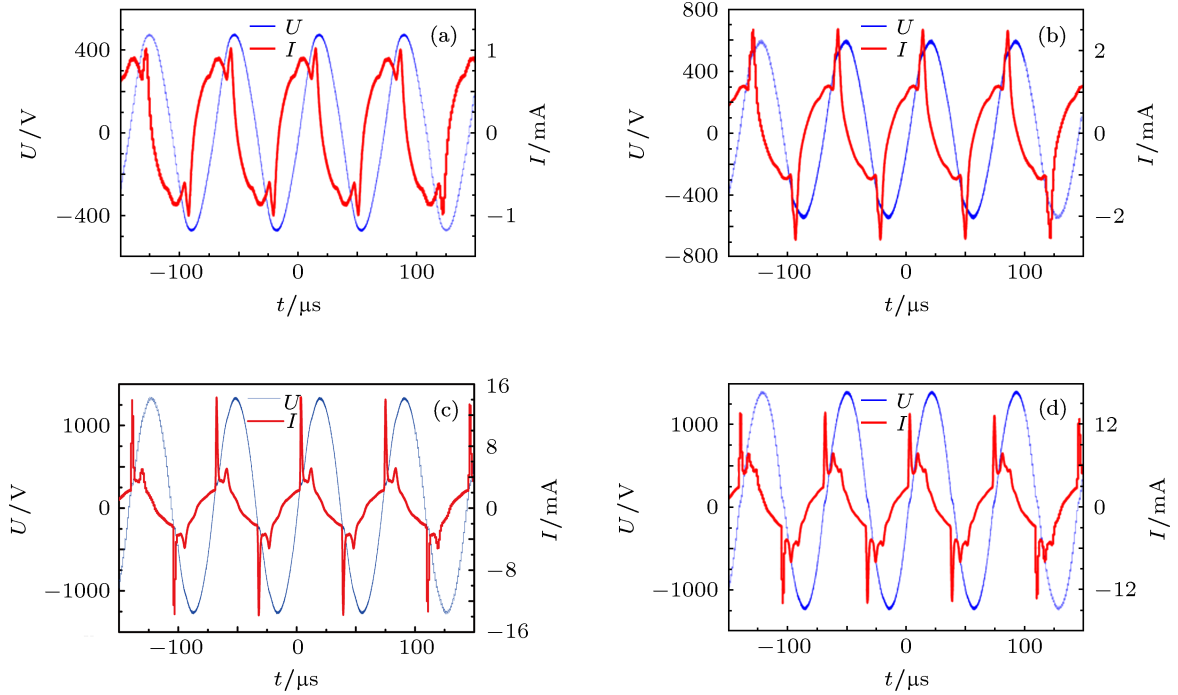


图 3 $d = 1 \text{ mm}$, $f = 14 \text{ kHz}$ 下的放电波形图 (a) $U_{\text{峰-峰}} = 958 \text{ V}$, SP1 放电; (b) $U_{\text{峰-峰}} = 1167 \text{ V}$, SP1 放电; (c) $U_{\text{峰-峰}} = 2101 \text{ V}$, SP1 放电; (d) $U_{\text{峰-峰}} = 2654 \text{ V}$, SP1 放电

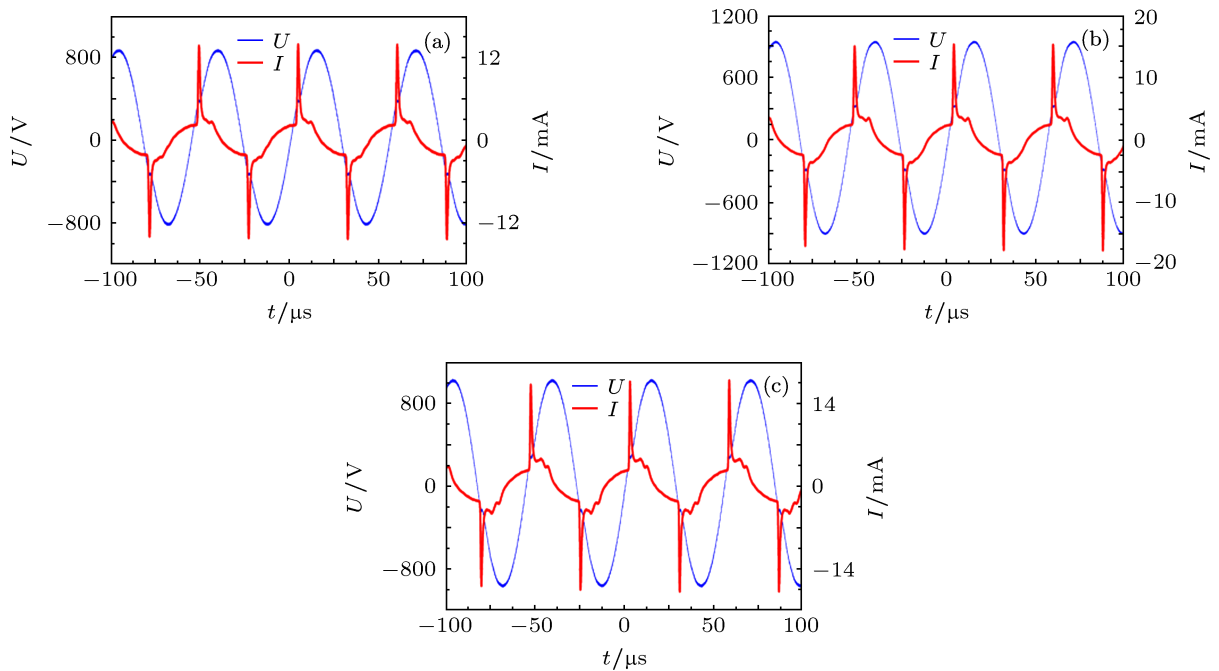


图 4 $d = 1 \text{ mm}$, $f = 18 \text{ kHz}$ 下的放电波形图 (a) $U_{\text{峰-峰}} = 1706 \text{ V}$, SP1 放电; (b) $U_{\text{峰-峰}} = 1864 \text{ V}$, AP1N 放电; (c) $U_{\text{峰-峰}} = 2007 \text{ V}$, SP1 放电

将气隙宽度增加至 4 mm, 图 5 给出了外施电压频率为 22 kHz 时的放电波形图. 当电压峰-峰值逐渐升高到 1498 V 时, 气隙击穿, 发生 SP1 放电, 如图 5(a) 所示. 当峰-峰值增加到 1612 V 时, SP1 放电消失, 放电呈现为正脉冲电流幅值大于负脉冲电流幅值的 AP1 放电 (记为 AP1P 放电), 如图 5(b) 所示. 继续升高电压峰-峰值至 3358 V 时, 放电又进入了 SP1 放电, 如图 5(c) 所示. 再升高电压峰-峰值到 3574 V 时, SP1 放电又消失, 放电变为 AP1N 放电, 如图 5(d) 所示. 将电压峰-峰值增加至 4044 V 时, 又再次进入 SP1 放电, 如图 5(e) 所示, 此后继续升高电压气隙将一直呈现 SP1 放电. 可以看出, 在 4 mm 的气隙宽度下放电随外施电压峰-峰值的增加将呈现 SP1—AP1P—SP1—AP1N—SP1 的变化过程, 对比气隙宽度 1 mm 时的放电结果, 4 mm 气隙宽度下的放电更容易出现 AP1 放电现象.

进一步增加气隙宽度至 7 mm, 图 6 给出了外施电压频率为 10 kHz 时的放电波形. 逐渐升高电压峰-峰值达到 1775 V 时, 气隙发生放电, 放电呈现为周期八的对称放电, 是一种高倍周期态放电. 记为 SP8 (symmetrical period eight) 放电, 如图 6(a) 所示. 随着电压峰-峰值升高到 2398 V, SP8 放电转变为 AP1P 放电, 如图 6(b) 所示. 继续升高电压峰-峰值至 3256 V, AP1P 放电转变为 AP1N 放电, 如图 6(c) 所示. 再升高电压峰-峰值到 3502 V, 放电变为 SP1 放电, 如图 6(d) 所示. 此后继续升高电压峰-峰值, 放电将一直处于 SP1 放电状态. 可以看出, 在 7 mm 的气隙宽度和外施电压频率 10 kHz 下放电随外施电压峰-峰值的增加将呈现 SP8—AP1P—AP1N—SP1 的变化过程, 对比气隙宽度 1 mm 和 4 mm 时的放电结果, 7 mm 气隙宽度下首次放电甚至不能呈现稳定的 SP1 放电现象.

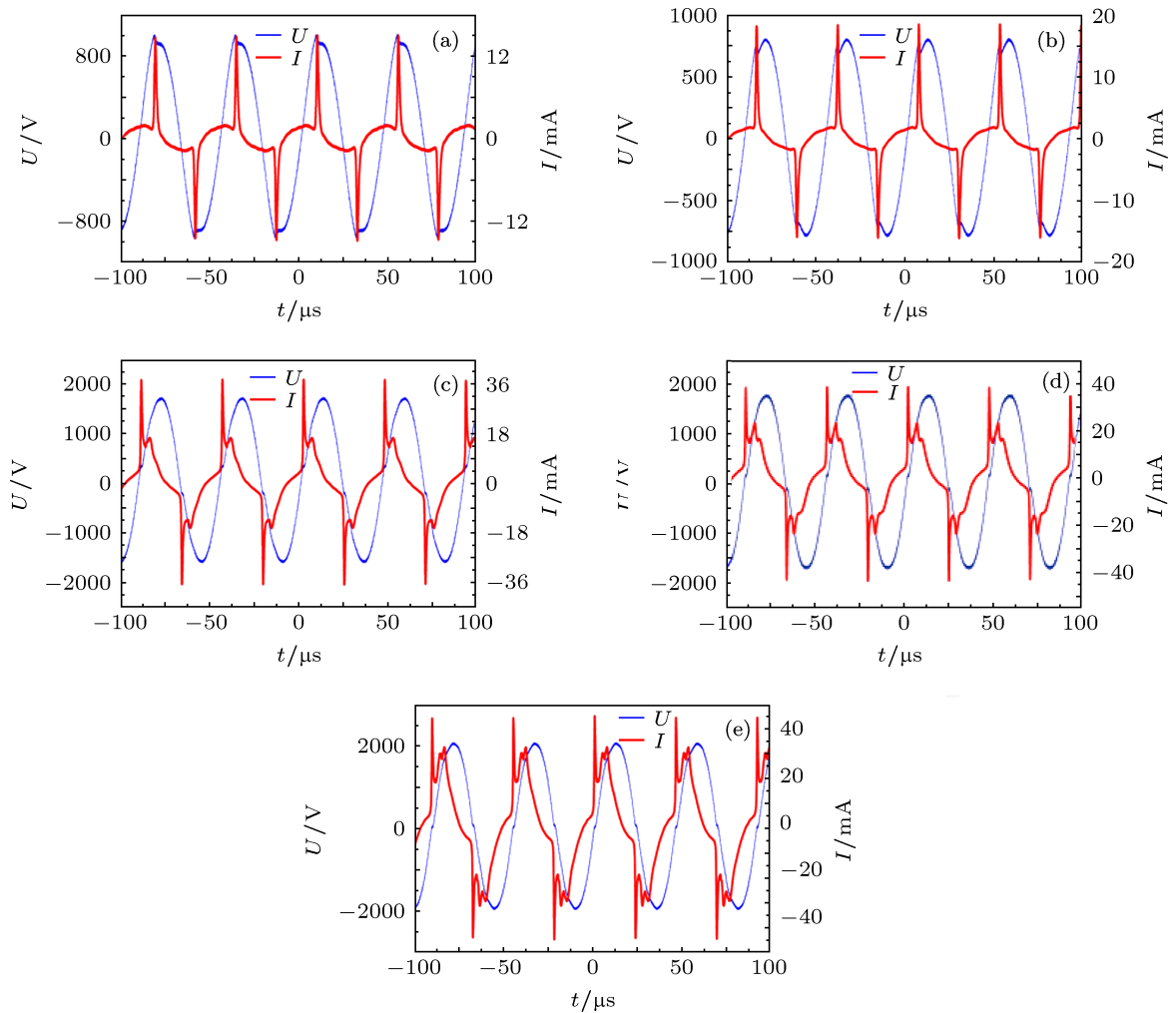


图 5 $d = 4$ mm, $f = 22$ kHz 下的放电波形图 (a) $U_{\text{峰-峰}} = 1498$ V, SP1 放电; (b) $U_{\text{峰-峰}} = 1612$ V, AP1P 放电; (c) $U_{\text{峰-峰}} = 3358$ V, SP1 放电; (d) $U_{\text{峰-峰}} = 3574$ V, AP1N 放电; (e) $U_{\text{峰-峰}} = 4044$ V, SP1 放电

保持气隙宽度 7 mm 不变, 将外施电压频率由 10 kHz 提高至 28 kHz, 逐渐升高电压峰-峰值达到 2039 V 时气隙击穿, 此时放电并不是 SP8 放电而是 AP1N 放电, 如图 7(a) 所示. 当电压峰-峰值升高至 2102 V 时, AP1N 放电消失, 放电呈现为周期二的

不对称放电, 记为 AP2 (asymmetrical period two) 放电, 如图 7(b) 所示. 继续增加电压峰-峰值至 2358 V 时, AP2 放电转变为 AP1N 放电, 如图 7(c) 所示. 进一步升高电压峰-峰值至 2786 V 时, AP1N 放电消失, 放电进入 SP1 放电状态, 如图 7(d) 所示. 此后,

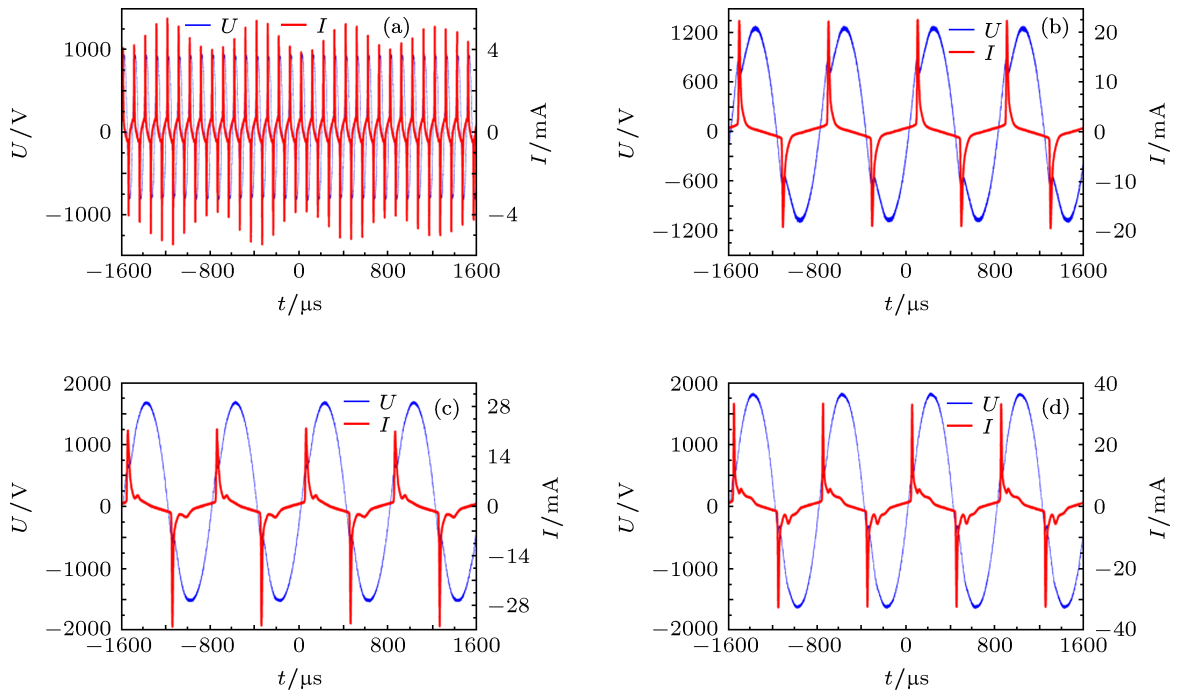


图 6 $d = 7 \text{ mm}$, $f = 10 \text{ kHz}$ 下的放电波形图 (a) $U_{\text{峰-峰}} = 1775 \text{ V}$, SP8; (b) $U_{\text{峰-峰}} = 2398 \text{ V}$, AP1P 放电; (c) $U_{\text{峰-峰}} = 3256 \text{ V}$, AP1N 放电; (d) $U_{\text{峰-峰}} = 3502 \text{ V}$, SP1 放电

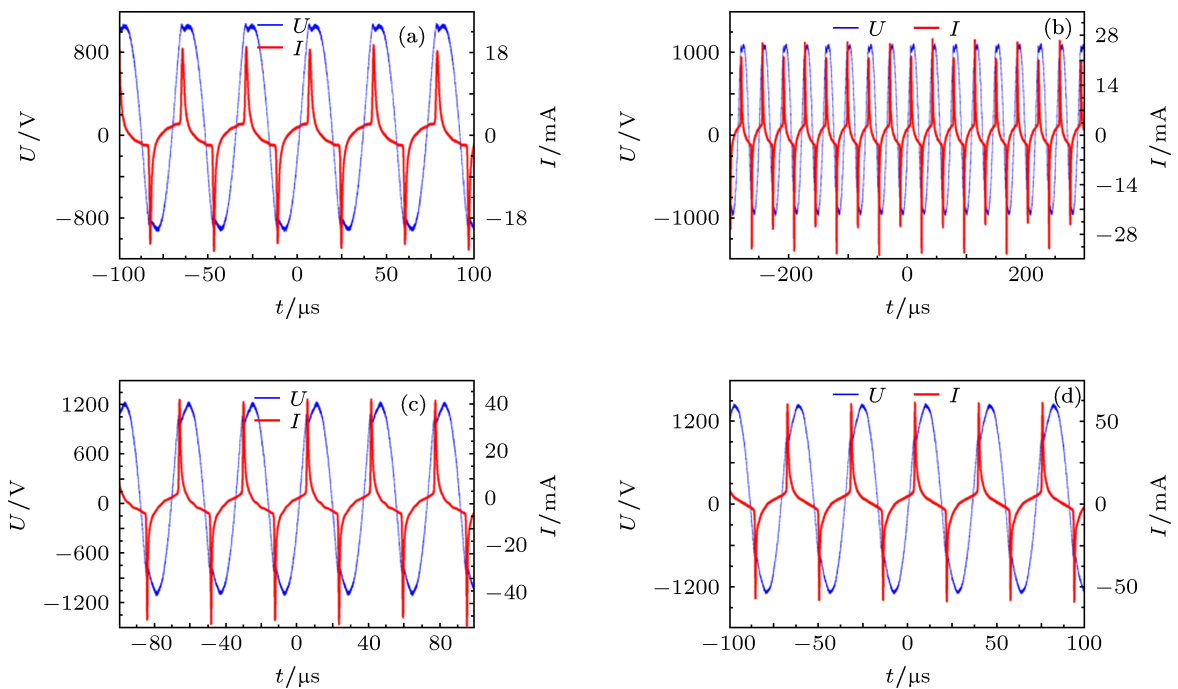


图 7 $d = 7 \text{ mm}$, $f = 28 \text{ kHz}$ 下的放电波形图 (a) $U_{\text{峰-峰}} = 2039 \text{ V}$, AP1N 放电; (b) $U_{\text{峰-峰}} = 2102 \text{ V}$, AP2 放电; (c) $U_{\text{峰-峰}} = 2358 \text{ V}$, AP1N 放电; (d) $U_{\text{峰-峰}} = 2786 \text{ V}$, SP1 放电

随着电压峰-峰值的增加气隙将一直呈现 SP1 放电. 可以看出, 在 7 mm 的气隙宽度和外施电压频率 28 kHz 下放电随外施电压峰-峰值的增加将呈现 AP1N—AP2—AP1N—SP1 的变化过程. 对比前面 10 kHz 时的情形, 同样在 7 mm 的气隙宽度下, 更高的外施电压频率使得初始放电不再为 SP8 放电, 而是呈现具有一定稳定周期性的 AP1N 放电.

继续增加气隙宽度至 10 mm, 图 8 给出了外施电压频率为 6 kHz 时的放电波形. 逐渐升高电压峰-峰值达到 2429 V 时, 气隙击穿, 但此时放电不呈现任何周期性, 是一种混沌态的放电, 如图 8(a) 所示. 进一步增加电压峰-峰值至 2599 V, 放电转变为 SP1 放电, 如图 8(b) 所示. 继续升高电压峰-峰值到 4163 V 时, SP1 放电消失, 进入 AP1N 放电, 如图 8(c) 所示. 当电压峰-峰值再增加至 4256 V 时, SP1 放电消失, 进入 AP1N 放电, 如图 8(d) 所示. 当电压峰-峰值再增加至 4259 V 时, SP1 放电消失, 进入 AP1N 放电, 如图 8(d) 所示.

时, 放电又恢复为 SP1 放电, 如图 8(d) 所示. 此后继续升高电压峰-峰值, 放电将一直处于 SP1 放电. 可以看出, 在 10 mm 的气隙宽度和外施电压频率 6 kHz 下放电随外施电压峰-峰值的增加将呈现混沌—SP1—AP1N—SP1 的变化过程.

保持气隙宽度 10 mm 不变, 将外施电压频率由 6 kHz 提高至 24 kHz, 逐渐升高电压峰-峰值达到 2701 V 时, 气隙击穿, 发生 AP1N 放电, 如图 9(a) 所示. 继续升高电压, 在很长的一段电压范围内气隙一直处于 AP1N 放电状态. 当电压峰-峰值增加到 5409 V 时, 放电由 AP1N 放电进入 SP1 放电, 此后继续升高电压峰-峰值放电将一直处于 SP1 放电状态, 如图 9(b) 所示. 可以看出, 在 10 mm 的气隙宽度和外施电压频率 24 kHz 下很容易在较宽的电压范围内出现不对称放电.

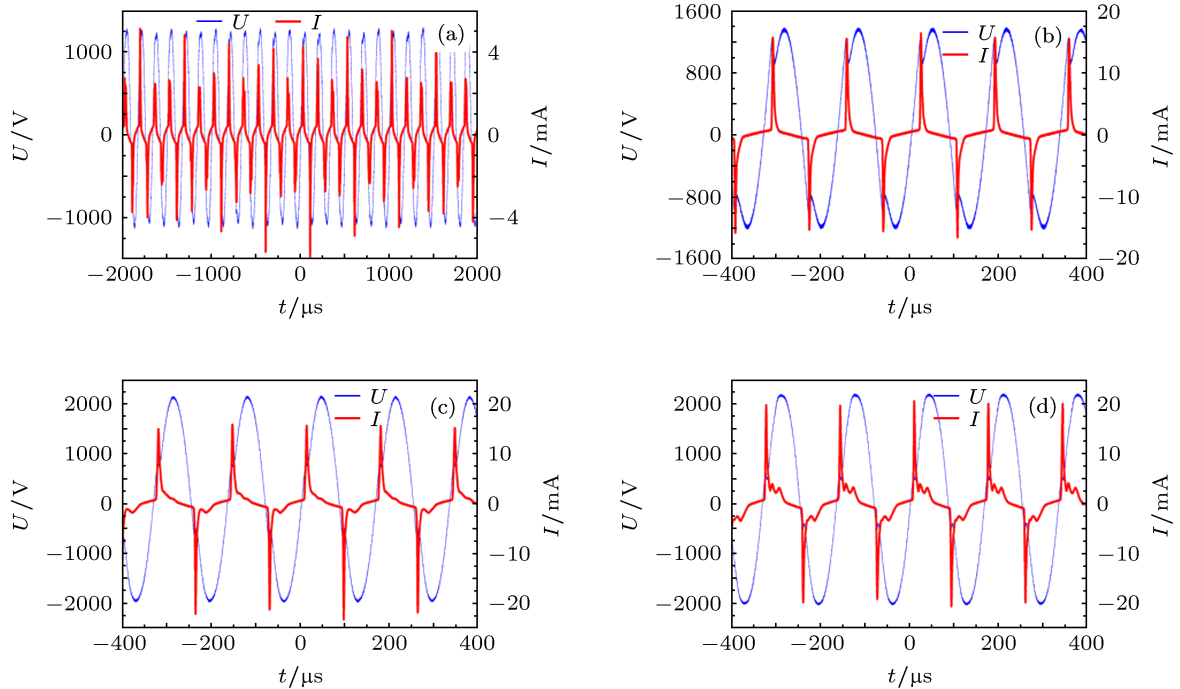


图 8 $d = 10$ mm, $f = 6$ kHz 下的放电波形图 (a) $U_{\text{峰-峰}} = 2429$ V, 混沌; (b) $U_{\text{峰-峰}} = 2599$ V, SP1 放电; (c) $U_{\text{峰-峰}} = 4163$ V, AP1N 放电; (d) $U_{\text{峰-峰}} = 4256$ V, SP1 放电

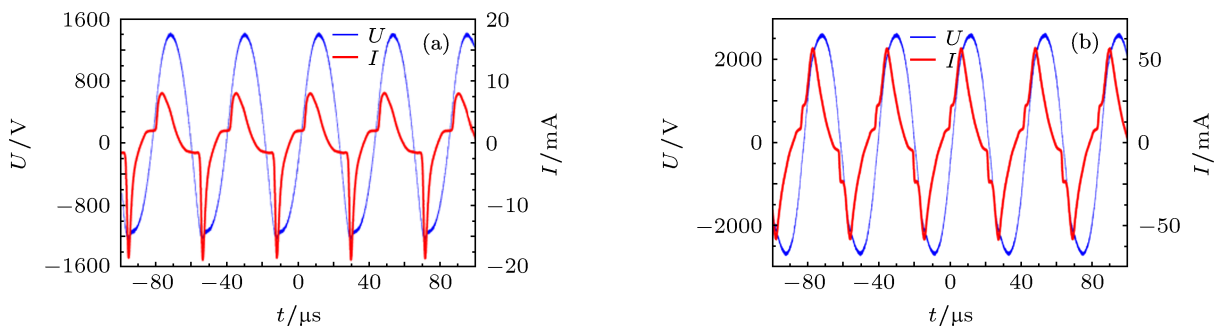


图 9 $d = 10$ mm, $f = 24$ kHz 下的放电波形图 (a) $U_{\text{峰-峰}} = 2701$ V, AP1N 放电; (b) $U_{\text{峰-峰}} = 5409$ V, SP1 放电

3.2 结果分析和讨论

文献 [18] 的研究结果表明在较大的气隙宽度下正柱区更不易消散, 因而更容易产生 AP1 放电. 由图 3—图 9 给出的实验结果可以看出, 气隙宽度对 AP1 放电具有显著的影响. 当气隙宽度较小时几乎无法观察到 AP1 放电, 或只能在很窄的参数区间里观察到 AP1 放电. 随着气隙宽度增加, AP1 放电现象逐渐明显, 可以在较大的参数区间里观察到 AP1 放电. 气隙宽度再增加时, 可以在更大的参数区间观察到 AP1 放电, 并且出现气隙首次击穿即为 AP1 放电. 随着电压峰-峰值增加又呈现 SP1 放电的现象. 这些实验结果都初步验证了文献 [18] 的数值仿真结果和结论.

外施电压频率对 AP1 放电也有着一定的影响. 根据文献 [18] 的分析可知, 若保持气隙宽度不变而增加外施电压频率, 由于电压换向更快正柱区将更不容易消散, 因而相对将更容易出现 AP1 放电现象. 显然, 从前面给出的实验结果可以看出, 在同一气隙宽度下外施电压频率较高时比较容易观察到 AP1 放电.

为了更好的说明气隙宽度和外施电压频率对 AP1 放电的影响, 图 10 分别给出了 4 mm, 7 mm 和 10 mm 气隙宽度下频率范围为 12—30 kHz 时的首次击穿电压峰-峰值以及首次出现 AP1 放电时的电压峰-峰值. 由图 10 可以明显看出, 在某个气隙宽度下当外施电压频率较低时, 首次击穿并不是 AP1 放电 (视气隙宽度大小可能是 SP1 放电、SP8 放电或混沌放电), 但是当外施电压频率增加至某临界值后则首次击穿即为 AP1 放电. 实验结果表明, 气隙宽度 4 mm, 7 mm 和 10 mm 下的外施电压频率临界值分别为 28 kHz, 18 kHz 和 14 kHz, 随气隙宽度增加呈递减趋势. 这说明气隙宽度较大时在较低的外

施电压频率下首次击穿就可以呈现 AP1 放电. 由此可以看出, AP1 放电是受气隙宽度和外施电压频率两个因素综合影响的.

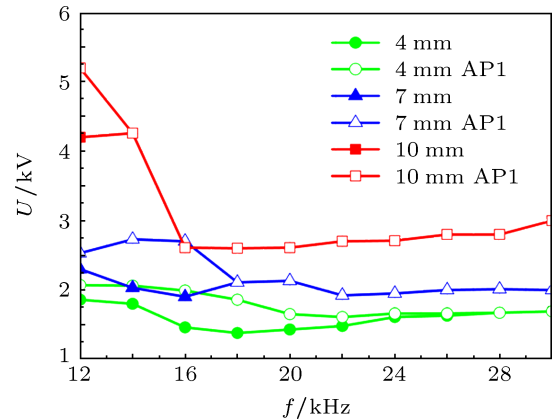


图 10 不同气隙宽度和外施电压频率下的击穿电压

4 结论

采用平行电极进行了大气压氦气介质阻挡放电实验, 分别在 1 mm, 4 mm, 7 mm 和 10 mm 气隙宽度以及不同的外施电压频率下增加外施电压峰-峰值观察放电实验现象. 实验结果表明: 1) 可以在较宽的气隙宽度和外施电压频率参数区间内观察到 AP1 放电; 2) AP1 放电受气隙宽度和外施电压频率影响, 气隙宽度越大越容易产生 AP1 放电, 同一气隙宽度下外施电压频率较高时则相对更容易观察到 AP1 放电; 3) 随着气隙宽度增加, 首次击穿即呈现 AP1 放电的外施电压频率临界值逐渐减小. 结合之前关于气隙宽度对 AP1 放电影响的数值仿真研究, 可以推测 AP1 放电并不只是由系统参数的不对称引起的, 也很可能是一种在一定的的气隙宽度和外施电压频率下系统固有的、内在的高频不稳定放电行为.

[1] Roth J R, Rahel J, Dai X, Sherman D M 2005 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** 555
 [2] Kogelschatz U 2003 *Plasma Chem. Plasma Process.* **23** 1
 [3] Wang X X, Lu M Z, Pu Y K 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2778 (in Chinese) [王新新, 芦明泽, 蒲以康 2002 物理学报 **51** 2778]
 [4] Wang Y H, Zhang Y T, Wang D Z 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 071501
 [5] Zhang Z H, Shao X J, Zhang G J, Li Y X, Peng Z Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 045205 (in Chinese) [张增辉, 邵先军, 张冠军, 李娅西, 彭兆裕 2012 物理学报 **61** 045205]
 [6] Shao T, Zhang C, Niu Z, Yan P, Tarasenko V F, Baksh E K, Burahenko A G, Shut'ko Y U 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 021503

[7] Shao T, Long K, Zhang C, Yan P, Zhang S, Pan R 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 215203
 [8] Shao T, Zhang C, Long K, Wang J, Zhang D, Yan P 2010 *Chin. Phys. B* **19** 040601
 [9] Golubovskii Y B, Maiorov V A, Behnke J, Behnke J F 2003 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **36** 39
 [10] Mangolini L, Anderson C, Heberlein J, Kortshagen U 2004 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** 1021
 [11] Shin J, Raja L L 2007 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40** 3145
 [12] Ding W, He L M, Lan Y D 2010 *High Voltage Engineering* **36** 456 (in Chinese) [丁伟, 何立明, 兰宇丹 2010 高电压技术 **36** 456]

- [13] Zhang Y T, Wang D Z, Kong M G 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 063304
 [14] Wang Y H, Zhang Y T, Wang D Z, Kong M G 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 071501
 [15] Shi H, Wang Y H, Wang D Z 2008 *Phys. Plasmas* **15** 122306
 [16] Wang Y H, Shi H, Sun J Z, Wang D Z 2009 *Phys. Plasmas* **16** 063507
 [17] Qi B, Huang J J, Zhang Z H, Wang D Z 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 3323
 [18] Dai D, Hou H X, Hao Y P 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 131503
 [19] Ha Y, Wang H J, Wang X F 2012 *Phys. Plasmas* **19** 012308

Experimental study on asymmetrical period-one discharge in dielectric barrier discharge in helium at atmospheric pressure*

Dai Dong^{1)2)†} Wang Qi-Ming¹⁾ Hao Yan-Peng¹⁾

1) (School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

2) (State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 31 January 2013; revised manuscript received 3 March 2013)

Abstract

Dielectric barrier discharge at atmospheric pressure not only behaves as a symmetrical period-one (SP1) discharge, but can also manifest itself as an asymmetrical period-one (AP1) discharge in certain ranges of parameters. In our study, a parallel electrode configuration is adopted and a series of discharge experiments are carried out in atmospheric helium at gap widths of 1, 4, 7 and 10 mm, respectively. The effects of gap width and driving voltage frequency on the symmetry of period-one discharge are investigated. Experimental results show that: AP1 discharge can be readily observed in a large range of parameters for the gap width and driving voltage frequency. AP1 discharge is prone to occur for a larger gap width; the critical value of the driving voltage frequency, beyond which the initial discharge is AP1 discharge, decreases as the gap width is increased. Results presented in this paper preliminarily verify the numerical simulations and the analysis which were previously reported in those papers studying the effect of gap width on AP1 discharge. Thus it can be conjectured that the AP1 discharge is not caused only by parameter asymmetry of discharge configuration, it can be also an intrinsic instability in terms of high frequency under certain parameters combination of gap width and driving voltage frequency.

Keywords: dielectric barrier discharge, asymmetrical discharge

PACS: 52.80.Tn

DOI: 10.7498/aps.62.135204

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. 2011ZM0016), and the State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, China (Grant No. EIPE10210).

† Corresponding author. E-mail: ddai@scut.edu.cn