介质阻挡放电跃变升压模式下靶波斑图研究*

 董丽芳[†] 岳 晗 范伟丽 李媛媛 杨玉杰 肖 红 (河北大学物理科学与技术学院,保定 071002)
 (2010年5月7日收到;2010年8月17日收到修改稿)

在大气压氩气介质阻挡放电中,首次通过跃变外加电压得到了稳定的靶波斑图.实验分别研究了跃变再缓变 和直接跃变升压模式下靶波斑图的稳定性和波长选择.研究发现,跃变再缓变升压之后得到的靶波斑图不稳定,其 与螺旋波相互转换.在这种转换中,靶波每次出现的时间为几十毫秒.直接跃变升压得到的靶波斑图稳定性明显增 强,其稳定时间通常为5 min 以上.比较不同升压模式下靶波斑图的波长,发现直接跃变升压模式下波长随电压升 高减小较快.综上表明,升压模式对靶波斑图的稳定性和波长都有影响.

关键词:介质阻挡放电,靶波斑图,跃变升压,缓变升压 PACS: 52. 38. Ph, 82. 40. Bj, 47. 54. - r

1. 引 言

近年来,介质阻挡放电广为引人注目,不仅因 为它在等离子体平板显示和臭氧生产等工业应 用^[1-5],也因为在该系统中实现了丰富多样的非线 性自组织斑图[6-12]. 众所周知,介质阻挡放电是一 种典型的非平衡态气体放电.其装置通常是由两个 平行电极组成,其中至少一个电极上覆盖着电介质 当两极之间加上交流高压后,两极间隙的气体击穿 形成放电.在大气压或较高电压条件下,放电是由 大量微放电通道(有时称为放电丝)组成的.这些微 放电通道之间存在相互作用,在合适条件下会自组 织形成时空规则性结构即斑图,包括四边形、六边 形、超四边形及超六边形等点阵斑图,以及螺旋波 和靶波等条纹状斑图^[13-18].对于点阵斑图.一般通 过缓慢调节、控制放电参数就会得到稳定的斑图, 进而采用光学方法进行空间分辨测量得到其动力 学机理,如正方形斑图由两套正方形点阵嵌套而 成,六边形斑图是由两套矩形点阵嵌套而成等.而 对于靶波等条纹状斑图,其形成机理研究一直是个 难题,主要原因是靶波通常是动态和局域的,且与 螺旋波相互转换.例如,在半导体作为电极的氮气 介质阻挡放电中,靶波存在不超过2s就会转化为 螺旋波^[19];在水电极氩气介质阻挡放电装置中,分 别观察到了局域靶波及全局靶波(充满整个放电 区),但它们在缺陷的作用下与螺旋波不断地相互 转化,其持续存在时间很短(仅为几十毫秒)^[20-22], 远远不能满足采用光学方法进行空间分辨测量得 到其动力学机理的要求.因此,要想搞清介质阻挡 放电靶波形成机理,必须首先得到稳定静态的靶 波.针对于此,本工作仔细研究了电压升高方式对 靶波形成的影响,发现了在介质阻挡放电中得到稳 定静止靶波的跃变升压方式,此时靶波的稳定时间 可达5 min 以上,还比较了跃变再缓变与直接跃变 升压模式下靶波的稳定性及波长的变化.

2. 实验装置

实验装置如图 1 所示. 放电电极是由两个装满 水的内径为 70 mm 的圆柱形容器组成, 与高压交流 电源两极相连的金属环浸在水中. 容器的两端用厚 度为 1.5 mm 的石英片封住, 作为电介质. 放电区域 被封闭在圆形边界内, 圆形边界的直径为 45 mm. 整 个电极放入密闭的反应室中. 其两侧设有观察窗, 用 Konica Minolta Dimage Z2 型数码相机从端面拍摄

©2011 中国物理学会 Chinese Physical Society

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10975043)、河北省自然科学基金(批准号:A2010000185)、河北省教育厅重点项目(批准号:ZD2010140)、 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20101301110001)资助的课题.

 $[\]dagger$ E-mail:Donglf@ mail. hbu. edu. cn

斑图的空间分布及运动变化过程.使用频率为 30—70 kHz 的正弦交流电源,电压由 Tektronix P6015A 1000X 型高压探头测得,并用 Tektronix DPO4054 型数字示波器在频率 500 MHz 下记录、存储.放电气体为大气压氩气.



图1 实验装置示意图

3. 实验结果与讨论

实验发现,升压模式对靶波稳定性具有很大影响. 在以前的工作中^[20-22],靶波是通过缓慢增加电压得到的. 本工作改变了传统的缓慢升压模式,采取了如图 2 所示的两种跃变升压模式:跃变再缓变和直接跃变,得到了存活时间长于 5 min 的稳定的靶波. 所谓跃变再缓变升压模式,是指气体击穿(3.0 kV)之后,迅速增加电压至靶波斑图出现的最低电压(称为初级跃变电压,本实验条件下为 8.6 kV),然后再在此基础上小幅度缓慢升高电压,如图 2 实线所示;而直接跃变升压模式,是指气体击穿

(3.0 kV)之后,直接跃变外加电压至得到靶波斑图的电压,如图2点划线所示(注:同一时间下的多个点划线代表直接跃变至不同电压下的多次实验).这两种升压模式都包含着电压的跃变过程,对稳定靶波的实现起了决定性的作用,大量实验表明如果没有电压的跃变过程得到的靶波斑图稳定时间仅为几十毫秒.需要说明的是,实验中外加电压为正弦交流电压,图2中所示电压值为外加电压的幅值. 在跃变再缓变和直接跃变升压模式下,能实现全局靶波斑图的最高电压分别为9.3 kV和9.8 kV.为了进一步研究升压模式对靶波的影响,我们对比研究了两种不同升压模式——跃变再缓变和直接跃变下的靶波的稳定性和波长选择.



图2 跃变再缓变和直接跃变升压模式示意图.实线代表跃变再 缓变升压模式:从击穿电压跃变外加电压至出现靶波斑图的最 低电压 8.6 kV,然后再小幅度缓慢升高外加电压;点划线代表直 接跃变升压模式:从击穿电压直接跃变外加电压至靶波斑图出 现的阈值范围.实验条件为:气压为标准大气压,气体为氩气,气 隙间距为 2.0 mm,驱动电源频率为 55 kHz



图 3 跃变再缓变升压模式不同电压下的靶波斑图的行为 (a) 8.6 kV; (b)—(d) 8.8 kV; (e)—(g) 9.3 kV; (h)—(j) 10.6 kV. 同一电压下的照片的时间间隔为 1/15 s. 其他实验条件:气压为标准大气压,气体为氩气,气隙间距为 2.0 mm,驱 动电源频率为 55 kHz

我们首先在跃变再缓变升压模式下对靶波斑 图进行了研究. 气体击穿之后, 电压经历初级跃变 而后缓慢变化,我们用数码照相机记录了初级跃变 以及每一次小幅度(0.2-0.3 kV)升高电压后得到 的斑图的行为,结果如图3所示.电压经初级跃变至 8.6 kV,系统出现稳定的靶波,其稳定时间长于 5 min,此时靶波的中心为点,如图 3(a) 所示. 在接 下来的缓变升压过程中,升高电压至 8.8 kV,得到 外围稳定但中心变化的靶波,其中心的状态有时为 大而模糊的点,有时为环,有时为失去中心对称性 的破缺的环,如图3(b)--(d)所示.图中相邻照片 的时间间隔为(1/15)s,可见靶波的稳定时间不超 过几十毫秒.继续升高电压,中心出现缺陷,并侵蚀 至内侧第一环,如图3(e)所示.缺陷来回运动,使得 靶波与螺旋波相互转化,如图3(f),(g)所示.在这 种跃变再缓变升压模式下,当电压高于9.3 kV时, 不仅中心缺陷侵蚀的范围继续向外移动扩大,而且 边界环开始断裂,靶波斑图全局失稳,如图3(h)--(j)所示,因此9.3 kV 是产生全局靶波的电压上限. 从斑图随电压升高的演化过程中可以看出,随着驱 动电压的升高,缺陷侵蚀的范围不断扩大.比较图3 中不同电压的缺陷,发现随着电压的增大缺陷的运 动范围增大.由于在图 3 中同一电压下相邻照片的 时间间隔均为1/15 s,因此缺陷的运动速度随着电 压的增大而增大.

接着,在直接跃变升压模式下对靶波斑图进行 了研究.在这种升压模式下,靶波斑图可以稳定存 在至少5 min.经过大量的观察,发现靶波斑图的中 心随着电压的变化呈现3种状态:稳定的点、稳定的 环以及振荡的点.如图4所示,当电压为8.6,9.8 kV时靶波斑图中心为稳定的点,当电压为8.6,9.8 kV时靶波斑图中心为稳定的点,当电压为8.8 kV 时为稳定的环.而当电压为9.0 kV时靶波斑图中心 为振荡的点,即时而出现,时而消失,详细变化过程 如图5所示.由图4可见,随着电压的升高,靶波的 环数有增加的趋势,如电压自8.6 kV增至8.8 kV 时,中心的点变成了环,继续增加电压至9.8 kV时 靶波中心生长出一个新的点,其环数比8.6 kV下的 靶波增加一环.当电压处于8.8—9.8 kV(如图4 (c)中的9 kV)时,靶波斑图的中心介于点与环之 间,因此系统选择了时间振荡的中心点.

实验发现,当系统中存在扰动时,直接跃变升 压模式下的靶波斑图在较高电压下也会失稳.对于 中心为环的靶波斑图,系统经历中心失稳.如图6所



图4 直接跃变升压模式不同电压下的靶波斑图 (a)8.6 kV;(b)8.8 kV;(c)9 kV;(d)9.8 kV.(a),(b),(d)中的 靶波斑图为照片,曝光时间为1/25 s,(c)中的靶波斑图为 录像截图.其他实验条件:气体为氩气,气压为标准大气压, 气隙间距为2.0 mm,驱动电源频率55 kHz

示,在扰动下中心环断裂产生一对缺陷,其中一个 缺陷向外运动形成螺旋波斑图,这个斑图不能稳定 存在,缺陷又向内运动形成有缺陷的靶波斑图.对 于中心为点的靶波斑图,在扰动下会发生多普勒失 稳.如图7所示,环向一个方向挤压,挤压至边界处 将边界处环挤断,产生一对缺陷,其中一个缺陷向 里运动至中心形成螺旋波斑图,这个螺旋波斑图不 稳定,中心缺陷又向外运动与边界处缺陷汇合形成 靶波斑图,此过程周而复始.

由上可见, 跃变再缓变升压模式和直接跃变升 压模式下的靶波斑图的稳定性不同.相比于跃变再 缓变升压模式下的靶波斑图, 直接跃变升压模式下 得到的斑图稳定性明显增强.如在驱动电压为 8.8 kV时, 跃变再缓变电压模式下得到的靶波斑图经历 了如图 3 (b)—(d)所示的失稳过程, 靶波斑图只是 一个暂态, 而在跃变升压模式下得到的如图 4(b)所 示的靶波斑图则为稳态.此外, 两种升压模式下能 得到全局靶波斑图的电压范围不同, 直接跃变升压模式 下得到全局靶波斑图的电压上限可达到 9.8 kV, 而 跃变再缓变升压模式下的靶波斑图在电压超过 9.3 kV时边界就会出现断裂.

我们还对两种升压模式下靶波斑图的平均波 长随电压的变化进行了测量,结果如图8所示.这两 种模式下的靶波斑图的波长随着电压的升高而减



图 5 直接跃变升压模式 9 kV 下靶波斑图的中心振荡失稳 相邻照片的时间间隔为(1/15)s,电源频率 55 kHz, 气体为氩气,气压为标准大气压,气隙间距为2.0 mm



图 6 跃变升压模式下有缺陷靶波斑图的中心失稳 照片 的时间间隔为(1/15)s, 驱动电压为 8.8 kV, 电源频率 55 kHz,气体为氩气,气压为标准大气压,气隙间距为2.0 mm

小.但是,直接跃变升压模式下的靶波斑图波长随 电压变化较快,对应较高电压时其波长要小于跃变 再缓变升压模式下的波长.

上述结果表明,在介质阻挡放电系统中,电压

的调节模式对靶波斑图的稳定和波长选择均有重 要影响.

关于参数变化模式对靶波出现与否的影响,在 其他系统(如瑞利贝纳德系统及振荡沙盘系统)中 曾有过研究. 瑞利-贝纳德对流系统, 是将液体放入 浅盘中(底面直径与高度比很大),从底部缓慢加 热,当液体底部与顶部的温度差超过临界值时,液 体开始对流. 通过改变参数如温差, 可以得到多种 斑图,包括局部靶波、局部螺旋波、全局靶波和全局 螺旋波,还观察到了螺旋波和靶波的互相转 化[23-25]. 在圆柱形容器中,其他条件合适时,缓变增 加上下温差系统会产生中心有缺陷的靶波斑图;当 跃变增加上下层温差时,系统会出现没有缺陷的靶 波斑图[25].分析原因,跃变增加温差会增加边界处 液体与内部的横向温度差异,引发一个瞬时边界 力,使得边界效应增强而出现没有缺陷的靶波斑 图^[25].类似的现象,也在圆边界下的振荡沙盘系统 中发现.振荡沙盘系统是在一个开放的浅盘中放入 沙子,使浅盘在垂直方向上作正弦振动,在一定的 控制参数范围内,就会出现各种斑图.在该系统中, 跃变外加正弦振动振幅至缓变振幅出现条纹斑图 的幅值范围,系统中出现了与边界对称性一致的靶



图 7 直接跃变升压模式下有缺陷靶波斑图的多普勒失稳 相邻照片的时间间隔为(1/15)s,驱动电压为 9.8 kV,电源 频率 55 kHz,气体为氩气,气压为标准大气压,气隙间距为 2.0 mm



图 8 跃变再缓变和直接跃变升压模式下靶波斑图的波长选择

波斑图,其原因是由于边界处粒子与边界侧壁之间 有摩擦力,跃变外加振动振幅使得边界处粒子与内 部粒子的差异增强,边界效应增强,产生与边界对 称性一致的没有缺陷的靶波斑图^[26].

在介质阻挡放电系统中,靶波稳定性受升压模 式影响也与边界效应有关.在此系统中,我们所观 察到的靶波为气体放电所形成,其亮环是由大量微

放电组成的. 众所周知, 微放电的产生取决于有效 电场(外加电场与壁电荷电场的矢量和)^[2].因此. 某处微放电的击穿时刻反映了该处有效电场的强 弱.为此,我们采用图1所示的光学成像系统测量放 电区发光信号.不断缩小测量区域,每半周中发光 信号的脉冲数不断减少.大量实验后发现,当其直 径减至 0.18 mm 时,每半周最多出现一个(有些半 周不出现)发光脉冲,如图9(a)所示.由此得到,此 条件下微放电的空间尺度为 0.18 mm. 随后,测量了 稳定靶波不同区域(外环和内环)的微放电(尺度为 0.18 mm)的发光信号,并与放电电流做了比较.发 现位于放电区边界处的靶波最外环的微放电的击 穿时刻只对应放电电流的第二个脉冲或随后的包 络,而从次外环开始靶波内环的微放电却可对应放 电电流的第一、第二个脉冲及随后的包络,如图9 (a) 所示. 该结果说明边界处的气体分子感受到的 电场与内部区域气体分子感受到的电场有差异,也 就是说边界处与内部区域的有效电场存在差异,此 即边界效应,进一步,我们分别测量了缓变和跃变 两种模式下同一电压时的放电电流,如图9(b)所 示.结果表明,跃变升压模式下电流的第一、二个脉 冲时间差 $\Delta t_1 = 1.45 \ \mu s$ 大于缓变升压模式下的时



图 9 波斑图的空间测量图与电流比对图 (a)稳定靶波斑图 的空间分辨测量,从上到下依次为电流、边界环的发光信号、中 部环的发光信号;(b)跃变升压和缓变升压的电流比对图.由上 到下依次为外加电压、跃变升压下的电流、缓变升压下的电流

间差 $\Delta t_2 = 1.29 \ \mu s.$ 可见,跃变升压增加了边界与内部微放电点燃时刻的差别,即增大了有效电场的差异,使得边界效应增强,靶波斑图稳定性增强.

总的来说,介质阻挡放电所形成的靶波斑图是 和放电中的参数密切相关的,这些放电参数包括: 两电极之间的电场及其分布、所充的气体、阻挡层 的介质材料及所加的高压的波形等.上面结果表 明,跃变及缓变的升压方式,实则是影响了电场及 其分布.譬如,对于跃变再缓变的外加电压,跃变时 放电区中心电场与边缘电场差别较大,再缓慢加上 的电压改变了原来的电场分布,使中心电场与边缘 电场差别减小.因此,缓变电压的幅度不仅影响电 场的大小,也会改变其分布,从而使靶波的稳定性 发生改变.

4. 结 论

在大气压氩气介质阻挡放电中,通过跃变外加 电压得到了稳定的靶波斑图.实验分别研究了跃变 再缓变和直接跃变升压模式下靶波斑图的稳定性 和波长选择.研究发现,跃变再缓变升压之后得到 的靶波斑图不稳定,其与螺旋波相互转换.在这种 转换中,靶波每次出现的时间仅为几十毫秒.直接 跃变升压得到的靶波斑图稳定性明显增强,其稳定 时间通常为5 min 以上.我们还比较了不同升压模 式下靶波斑图的波长选择,发现直接跃变升压模式 下波长随电压升高减小较快.上述结果表明,升压 模式对靶波斑图的稳定性和波长选择都有影响.

- Qi B, Ren C S, Ma T C, Wang Y N, Wang D Z 2006 Acta Phys. Sin. 55 331 (in Chinese) [齐 冰、任春生、马腾才、王 友年、王德真 2006 物理学报 55 331]
- [2] Kogelschatz U. 2002 IEEE Trans. Plasma Sci. 30 1400
- [3] Li H M, Li G, Li Y J, Li Y T 2008 Acta Phys. Sin. 57 969 (in Chinese) [李汉明、李 钢、李英俊、李玉同 2008 物理学报 57 969]
- [4] Liu Y H, Zhang J L, Wang W G, Li J, Liu D P, Ma T C 2006 Acta Phys. Sin. 55 3 (in Chinese) [刘艳红、张家良、王卫国、 李 建、刘东平、马腾才 2006 物理学报 55 3]
- [5] Zhang X H, Huang J, Liu X D, Peng L, Sun Y, Chen W, Feng K C, Yang S Z 2009 Acta Phys. Sin. 58 3 (in Chinese) [张先 徽、黄 骏、刘筱娣、彭 磊、孙 岳、陈 维、冯克成、杨思泽 2009 物理学报 58 3]
- [6] Breazeal W, Flynn K M, Gwinn E G 1995 Phys. Rev. E 52 2
- [7] Dong L F, Liu W L, Wang H F, He Y F, Fan W L, Gao R L 2007
 Phys. Rev. E 76 046210
- [8] Ammelt E, Astrov Y A, Purwins H G 1996 Phys. Rev. E 54 5
- [9] Duan X X, Ouyang J T, Zhao X F, He F 2009 Phys. Rev. E 80 016202
- [10] Dong L F, Li S F, Fan W L, Pan Y Y 2009 Phys. Plasmas 16 122308
- [11] Guikema J, Miller N, Niehof J, Klein M, Walhout M 2000 Phys. Rev. Lett. 85 18
- [12] Stollenwerk L, Laven J G, Purwins H G 2007 Phys. Rev. Lett.
 98 255001
- [13] Fan W L, Dong L F, Li X C, Yin Z Q, He Y F, Liu S H 2007 Acta Phys. Sin. 56 3 (in Chinese) [范伟丽、董丽芳、李雪辰、

尹增谦、贺亚峰、刘书华2007 物理学报 56 3]

- [14] He Y F, Dong L F, Liu F C, Fan W L 2005 Acta Phys. Sin. 54
 9 (in Chinese) [贺亚峰、董丽芳、刘富成、范伟丽 2005 物理 学报 54 9]
- [15] Dong L F, Fan W L, He Y F, Liu F C, Li S F, Gao R L, Wan L 2006 Phys. Rev. E 73 066206
- [16] Dong L F, Gao R L, He Y F, Fan W L, Liu W L 2006 Phys. Rev. E 74 057202
- [17] Dong L F, Li S F, Liu F, Liu F C, Liu S H, Fan W L Acta Phys. Sin. 55 1 (in Chinese) [董丽芳、李树峰、刘 峰、刘富 成、刘书华、范伟丽 2006 物理学报 55 1]
- [18] Dong L F, Liu S H, Wang H F, Fan W L, Gao R L, Hao Y J 2007 Acta Phys. Sin. 56 3332 (in Chinese)[董丽芳、刘书华、 王红芳、范伟丽、高瑞玲、郝雅娟 2007 物理学报 56 3332]
- [19] Astrov Y A, Purwins H G 1998 Phys. Rev. Lett. 80 24
- [20] Dong L F, Liu F C, Liu S H, He Y F, Fan W L 2005 Phys. Rev. E 72 046215
- [21] Liu S H, Dong L F, Liu F C, Li S F, Li X C, Wang H F 2006 Chin. Phys. Lett. 23 12
- [22] Dong L F, Wang H F, Liu F C, He Y F 2007 New J. Phys. 9 330
- [23] Thompson K L, Bajaj K M S, Ahlers G 2002 Phys. Rev. E 65 046218
- [24] Koschmeider L, Pallas S 1974 Int. J. Heat Mass Transfer 17 991
- [25] John R R, O'Neill P, Becker N, Ahlers G 2004 Phys. Rev. E 70 036313
- [26] Bruyn J R, Lewis B C, Shattuck M D, Swinney H L 2001 Phys. Rev. E 63 041305

Target patterns obtained by suddenly increasing applied voltage in dielectric barrier discharge *

Dong Li-Fang[†] Yue Han Fan Wei-Li Li Yuan-Yuan Yang Yu-Jie Xiao Hong

(College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)
 (Received 7 May 2010; revised manuscript received 17 August 2010)

Abstract

Stable target patterns are produced by suddenly increasing the applied voltage in argon dielectric barrier discharge at atmospheric pressure for the first time. The stability and wavelength selection of target patterns obtained by gradually increasing applied voltage after suddenly increasing applied voltage and by directly suddenly increasing applied voltage are unstable. There is mutual transformation between target pattern and spiral, in which the target pattern can only survive for several tens milliseconds. The target patterns obtained by directly suddenly increasing applied voltage are much more stable, which can survive for more than 5min. The wavelength selections of target patterns obtained by above two methods are studied. It is found that the wavelength of target patterns obtained by directly suddenly increasing applied voltage increasing applied voltage decreases more quickly as the applied voltage increases. The results show that the applied voltage increasing way in which the target patterns are obtained plays an important role in the stability and wavelength selection of target pattern.

Keywords: dielectric barrier discharge, target pattern, suddenly increasing the applied voltage, gradually increasing the applied voltage

PACS: 52. 38. Ph ,82. 40. Bj, 47. 54. - r

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10975043), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. A2010000185), the Key Project of Department of Education of Hebei Province, China (Grant No. ZD2010140), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20101301110001).

[†] E-mail: Donglf@ mail. hbu. edu. cn