

强激光引导和诱发大气高压放电研究

李志刚 王声波 郭大浩 吴鸿兴 戴宇生
(中国科技大学物理系, 合肥, 230026)

摘要: 报道利用钕玻璃激光器的 $1.06\mu\text{m}$ 强激光产生大气等离子体通道, 从实验上研究了其在加载直流高压的棒状电极电场内对放电情况的影响, 通过拍摄到的典型照片, 描述了等离子体通道的引导放电特性, 并测量了其诱发放电能力。

关键词: 激光等离子体 强电场放电 引导和诱发放电特性

Experimental study of guiding and triggering of air discharges by laser-induced plasma

Li Zhigang, Wang Shengbo, Guo Dahao, Wu Hongxing, Dai Yusheng
(Department of Physics, USTC, Hefei, 230026)

Abstract: The air plasma channel is produced by Nd: glass laser (wavelength = $1.06\mu\text{m}$). The influence to the electrical discharge under DC field between two stick electrodes is researched. We described the guiding ability of air discharge by laser-induced plasma and measured the triggering ability of discharges.

Key words: laser-induced plasma discharge under strong electric field guiding and triggering ability of discharge

引 言

大气中强激光经聚焦后在焦点附近会产生气体击穿, 形成串珠状亮斑分布, 且其排列循激光光束方向, 此即为激光大气等离子体通道。在强电场中, 它具有诱发放电的特性^[1]。目前, 正在大力推进的激光诱雷技术研究中, 这个特性具有潜在的应用价值^[2]。激光诱雷技术比被动的避雷针技术要主动可靠, 比其它诸如火箭诱雷、水诱雷等更安全, 适合重要经济、军事目标的防雷害需求。强激光大气高压放电研究是发展这项技术的关键。目前, 实验研究中所采用的强电场主要是高压脉冲形式。美国 Naval 实验室以 360kV 的交流电源产生强电场进行了激光诱发放电实验^[3]。1993 年, 日本电力工业研究所利用 1000kV 的脉冲电源和 10m 焦距反射镜实施了强激光诱导放电的实用性研究^[4]。

我们采用直流高压以模拟雷云的静电场, 并通过棒状电极来实现尖端放电。与一般的强电场下大气自击穿放电不同, 激光等离子体会对诱发放电的产生条件和形态予以影响^[3,4]。可以把这种作用归结为两个方面, 首先是引导能力, 即等离子体的产生和排列方向对放电通道的形状的影响; 其次是诱发能力, 与自放电相比, 等离子体通道可以降低放电电场强度的阈值。

1 实验装置

我们采用的实验研究装置如图 1 所示。图中激光器为“华光”万兆瓦可调谐钕玻璃激光装

置的一部分^[5], 输出脉宽 50ns, 波长 $1.06\mu\text{m}$, 最大输出能量 40J。透镜焦距为 688mm, 焦点位于电极之间的中心处。高压电源采用直流方式, 最大直流电压为 30kV, 棒状电极直径约 5mm, 尖端处为半球形。这种电极间的电场是不均匀的, 下述测量中的电场强度为极间电压除以极间距。为了准确地指示出光路, 实验中利用了 He-Ne 激光束来指示光路中心线, 并称之为“中线”。测量时, 电极与中线间距是电极头外缘与中线的垂直距离, 而左右电极间距是左右电极头内侧的最近距离, 并非两电极的平行轴线间距。在取样玻璃处, 激光经过时约有 8% 的光能被反射至能量计, 由能量计读数乘以比例数可得激光能量值。

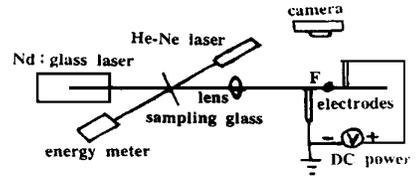


Fig. 1 Experimental facility

实验进行过程中, 钕玻璃激光器的发射时间由人工控制。发射激光脉冲前 1s~2s 左右启动照相机 B 门, 脉冲过后即关闭 B 门。在激光诱发放电时, 由于等离子体的亮度较大, 目测难以见到放电通道, 但此时直流电源电压表指针将大幅度偏转。

2 实验结果及分析

2.1 引导能力研究

图 2 给出了未加激光脉冲时的自放电情况。此时, 电极与中线间距 2mm, 左右电极间距 2cm, 极间电压为 22.8kV。可看出自放电电弧是弯曲的。

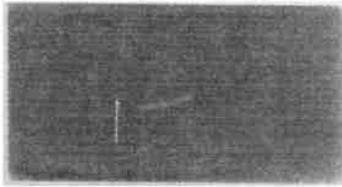


Fig. 2 An unguided discharge

强激光脉冲在空气中产生气体击穿, 从而出现等离子体通道, 当电极间存在这种通道时情况即大不一样。改变左右电极间距为 4cm, 电压 20kV, 加上激光脉冲 15J, 摄得图 3。从图 3 中可明显看出等离子体珠串之间的细长“引线”, 这就是电极之间的放电通道。引线的方向性非常明显, 通道中处于右电极右端部分没有引线, 但其趋势所反映出来的方向与引线处于一条直线上。因此, “引线”处于激光光场通道之内。事实上, 虽然引线是放电通道, 但通道中有无等离子体对于引线的存在具有重要意义。下述图 4 所表现出的放电即与众不同。

强激光脉冲在空气中产生气体击穿, 从而出现等离子体通道, 当电极间存在这种通道时情况即大不一样。改变左右电极间距为 4cm, 电压 20kV, 加上激光脉冲 15J, 摄得图 3。

从图 3 中可明显看出等离子体珠串之间的细长“引线”, 这就是电极之间的放电通道。引线的方向性非常明显, 通道中处于右电极右端部分没有引线, 但其趋势所反映出来的方向与引线处于一条直线上。因此, “引线”处于激光光场通道之内。事实上, 虽然引线是放电通道, 但通道中有无等离子体对于引线的存在具有重要意义。下述图 4 所表现出的放电即与众不同。

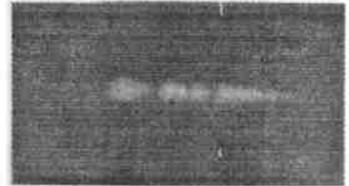


Fig. 3 Laser-guided discharge

图 4 中电极间距较短, 约为 2cm, 电压为 21kV。两电极中并无等离子体珠串存在。无疑地, 激光脉冲诱发了放电, 但放电的电弧形状与无激光脉冲时是相一致的。原因主要在于等离子体珠之间仍有少量电离了的气体有利于诱发放电。这种情况也只在电压较高时发生, 如降低至十几千伏时即不易出现。而图 3 则说明了电场中等离子体的存在能对放电通道的形态产生影响。这就是为什么把引线作为强电场中激光等离子体的一个重要性质和表现方面而不是单纯地视作放电通道的原因。

图 4 中电极间距较短, 约为 2cm, 电压为 21kV。两电极中并无等离子体珠串存在。无疑地, 激光脉冲诱发了放电, 但放电的电弧形状与无激光脉冲时是相一致的。原因主要在于等离子体珠之间仍有少量电离了的气体有利于诱发放电。这种情况也只在电压较高时发生, 如降低至十几千伏时即不易出现。而图 3 则说明了电场中等离子体的存在能对放电通道的形态产生影响。这就是为什么把引线作为强电场中激光等离子体的一个重要性质和表现方面而不是单纯地视作放电通道的原因。

将电极头分别向上、下离开激光通道。电极头与中线间距约 7mm, 左右电极间距 5.3cm,

将电极头分别向上、下离开激光通道。电极头与中线间距约 7mm, 左右电极间距 5.3cm,

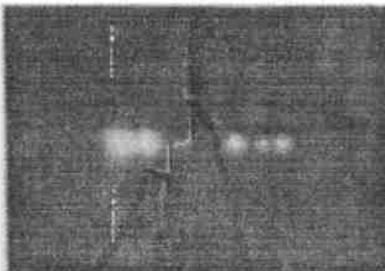


Fig. 4 A special sample of discharge by laser plasma



Fig. 5 The polyline channel of laser-guided discharge

强激光作用下放电情况如图5所示。从图5中可见放电通道分作三段,中间第二段为一直线,引线处于激光通道内,类似于图3。而第一段和第三段分别为电极头与最近珠串之间的连线。这种现象在实验中多次重复出现。

2.2 诱发能力研究

电极与中线间距为5mm,左右电极间距2cm,调整电极整体位置,使得气体击穿时两电极中有一个大的等离子体区域存在,且与两电极的内侧相接触。我们发现,虽然2cm距离的电极自放电需要20kV以上电压,但两电极均处于同一个等离子体珠内时,其放电电压低至1.8kV以下,这说明,一个连续的等离子体区域在某种意义上可作为一个导体来看待。因此,对于串珠状的区域来说,其放电导通能力依赖于整个区域中等离子体的分布密度和其均匀的程度。

等离子体通道的建立可大大减低放电的电场强度。固定极间电压为26.4kV,激光能量12J,改变电极间距,测得放电距离的最大值为7.3cm,放电电场阈值是3.62kV/cm,这即是“引线”产生的电场阈值。自放电电场约为13.5kV/cm,与之相差至少3.7倍。

实验中,另外还通过加长透镜焦距和增加激光能量来获得更长的放电距离。透镜焦距加长,等离子体通道变长;增加激光能量,则等离子体珠的体积变大,间距变小。同时改变两项,放电距离加长更显著。改换透镜焦距为1180mm,激光能量加至25J,极间电压仍为26.4kV,放电距离可长达10cm,放电电场阈值低至2.64kV/cm。因此,长而且珠串间距较小的等离子体通道的诱发能力更强。另一方面,实验过程中有一部分照片表明,空气中产生激光等离子体珠串后,若珠串间距大于同电压条件下无激光的自放电间距时(如上述实验中26.4kV下为2cm),诱发放电可能性显著下降。同样地,电极与其附近的等离子体珠之间的距离大于这个限度时也有同样现象。

3 结 论

由上述实验研究可得结论:(1)大气中,激光等离子体通道能很好地引导放电,使之准确地沿着光场的直线方向行进。在强电场中,激光等离子体珠串之间会产生引线,放电通道则沿着激光光束,通过直线状的“引线”而予以导通两电极。在达到阈值电场的条件下,激光等离子体的引导放电可完全做到使放电路径沿光束方向直线前进。这对于需要控制放电通道的方向时有着重要的意义。(2)激光等离子体通道具有相当好的诱发放电能力。但通道中等离子体珠串的间距对此有显著影响。在激光等离子体珠串足够长而且间距较小时,同等放电电压下,激光诱导放电的距离比无激光自放电时加长3~4倍,显著地降低了放电电场阈值。

参 考 文 献

- 1 Koopman D W, Saum K A. J A P, 1973; 44(12): 5328
- 2 Shinoh T, Aihara Y, Miki M *et al.* IEEE Transactions on Power Delivery, 1993; 8(1): 311
- 3 Greig J R, Pechacek R, Raleigh M *et al.* AIAA 13th Fluid & Plasma Dynamics Conference, 1980: 14~ 16
- 4 Miki M, Wada A. J A P, 1996; 80(6): 3208
- 5 吴鸿兴,郭大浩,王声波 *et al.* 中国科学A辑, 1991; (8): 883~ 889

作者简介:李志刚,男,1975年9月出生。现从事光电子专业研究工作。