

飞秒激光引导闪电的模拟实验研究^{*}

张 喆¹⁾ 鲁 欣¹⁾ 郝作强¹⁾ 张适昌²⁾ 张东东²⁾ 王兆华¹⁾ 马媛媛¹⁾ 严 萍²⁾ 张 杰^{1)†}

1) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100080)

2) (中国科学院电工研究所, 北京 100080)

(2006 年 5 月 22 日收到; 2006 年 6 月 20 日收到修改稿)

采用能量 40 mJ, 脉冲宽度 50 fs 的超短脉激光脉冲形成的等离子体通道诱发和引导了 3—23 cm 长间隙的静态高压放电. 实验观测显示, 等离子体通道整体上能使空气间隙的击穿阈值降低到自然击穿阈值的 40%. 实验中通过对放电电弧发出的白光信号与激光信号的时间延迟进行分析得到激光引导下梯级先导的发展速度约为 10^7 cm/s.

关键词: 等离子体通道, 高压放电

PACC: 5150

1. 引 言

早在上世纪 70 年代, 科学家就已经提出激光引导闪电的设想^[1]. 其基本原理就是利用强激光电离大气, 产生具有一定导电性能的等离子体通道, 引导雷电沿着通道释放到安全的地方, 以减小甚至消除雷击的危害. 激光引雷技术涉及等离子体通道的产生以及与高压放电的耦合, 其物理机理十分复杂. 由于雷电的随机性和危险性使得直接利用自然界的雷电进行激光引雷的机理研究十分困难. 因此, 目前科学家主要利用人工产生的高压电进行激光诱发和引导放电的基础研究. 80 年代以来, 日本科学家在激光引导放电方面做了大量研究工作^[2,3], 他们采用大功率 CO₂ 激光产生等离子体通道诱导高压放电. 但是 CO₂ 激光产生的通道是由一连串击穿火花构成, 通道连续性很差, 需要很高的激光能量才能引导长间隙的放电. 因此, 长脉冲 CO₂ 激光用于引导闪电有一定的局限性. 近年来, 超短脉冲激光技术的迅速发展为激光引雷提供了另外一种可供选择的方案. 超强飞秒激光脉冲在大气中传输时由于非线性自聚焦和电离散焦的动态平衡, 会形成自引导成丝传输, 其传播路径上会产生具有一定导电性能的电离通道^[4,5]. 目前超强飞秒激光已经很容易形成长达百米^[6] 甚至千米^[7] 的等离子体通道. 这种等离子体通道连续性很好而且具有相对较低的电阻率^[8], 更加有利于引导长距离的放电. 世界上很多实验室都对

短脉冲激光产生的等离子体通道引导放电进行了研究^[8-13]. 加拿大的一个研究小组曾经利用飞秒脉冲激光形成的等离子体通道引导长达 2.8 m 的放电^[11]. Wille 等人利用车载移动 TW 飞秒激光装置 Teramobile, 成功诱发和引导了 3.2 m 长间隙的高压放电^[14]. 研究中发现, 超短脉冲激光等离子体通道的诱发作用能有效地降低空气间隙的击穿电压阈值. 并且能引导放电通道使其沿激光传播的方向发展. 进一步研究表明, 在 fs 激光脉冲后加上 ns 激光脉冲能有效延长等离子体通道寿命^[15], 将更加有利于激光诱发和引导放电^[16].

到目前为止, 绝大部分激光诱导长间隙放电的实验研究都是利用脉冲高压发生器进行的, 其脉冲上升沿一般在 1 μ s 左右, 下降沿约几十微秒. 而自然界雷电电压却是缓慢变化的准静态高压. 已有的研究表明, 静态高压和脉冲电压击穿空气的特性有一定的区别. 静态高压由于在激光到来前有足够的时间发展电晕, 有利于预击穿的形成, 其放电阈值电压通常要低于脉冲高压. 因此对飞秒激光等离子体通道诱发和引导长间隙静态高压放电的过程进行深入地实验研究对明确激光引雷的物理机理是十分有必要的. 到目前为止利用静态高压进行激光诱导放电的实验相对很少, 文献[17] 中报导了利用聚焦后的波长 248.6 nm 的紫外亚皮秒激光引导静态高压放电的实验研究.

本文进行了飞秒激光等离子体通道诱发和引导

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60478047, 10634020, 60621063, 10425416)资助的课题.

较长间隙 (23 cm) 静态高压放电的实验研究. 研究了空气间隙的击穿电压阈值与间隙长度的关系, 并利用简便的方法测量了放电先导的发展速度.

2. 实验装置及设计

实验使用的激光装置是中国科学院物理研究所光物理实验室的极光 II 号激光系统, 该系统单脉冲输出时能量最大可达 640 mJ, 脉冲宽度最短 30 fs, 中心波长 800 nm, 重复频率 10 Hz. 实验中, 由于激光需要在大气中传输很长距离, 为了保护光学元件, 我们使用激光能量为 40 mJ, 脉冲宽度为 50 fs. 高压装置可提供最高 180 kV 的静态正高压. 飞秒激光脉冲经焦距为 4 m 的透镜聚焦, 形成长约 50 cm 的等离子体通道.

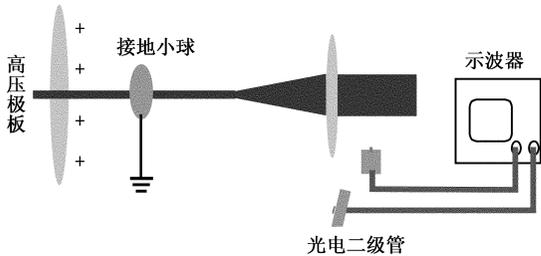


图 1 实验设置

高压电极为 $\phi 55$ cm 金属圆盘. 接地电极为 $\phi 1$ cm 的金属小球. 在圆盘和小球的中心都有一个 $\phi 2$ mm 的小孔. 我们通过调节聚焦透镜位置将通道中光强最强的一段置于两个电极之间, 如图 1. 超短脉冲激光形成的等离子体通道穿过小球与极板上的小孔将电源的正负极连接起来, 从而诱发高压放电.

实验中通过探测放电产生的白光来间接地研究

放电的时间特性. 我们使用两个光电二极管同时对激光信号和放电白光信号进行测量并显示在示波器上. 从示波器上能读出放电白光信号与激光信号之间的延迟, 可以为分析放电的时间特性提供依据.

3. 实验结果及分析

实验中首先研究了等离子体通道对高压放电的引导, 以及对空气间隙击穿电压阈值的降低作用. 测量了不同放电间隙长度对应的自发放电阈值和有激光引导条件下的击穿阈值.

如图 2 是我们实验中拍摄的自发放电和激光引导放电的照片. 图中闪亮的通道就是高压放电的路径. 图 2(a) 是自发放电的通道, 可以看出自发放电沿着一条随机的弯曲的路径发展. 图 2(b) 是激光引导放电通道, 激光引导的放电沿着激光传播方向发展.

我们对 3 cm 到 23 cm 的放电间隙进行了实验测量. 从图 3 中可以看出激光等离子体通道的预电离, 使空气击穿阈值电压有了明显下降. 在放电间隙 5 cm 时, 激光等离子体通道的诱发作用使击穿电压从 110 kV 降到了 45 kV, 降幅达到 60%. 在同样电压 110 kV 时, 激光等离子体通道的诱发作用使放电距离从 5 cm 增加到了 15 cm. 从击穿电压阈值随放电间隙长度变化的整体趋势分析, 激光等离子体通道使空气间隙的击穿阈值降低至自然击穿阈值的 40% 左右.

一次完整的自发放电过程通常包括四个部分: 预击穿过程、梯级先导、连接过程和回击. 预击穿是当空气中电场超过一定阈值时, 在高压端出现的弱电离现象. 当预击穿出现后, 预击穿产生的弱电离通道会在电场的作用下由高压端一级一级地向接地端

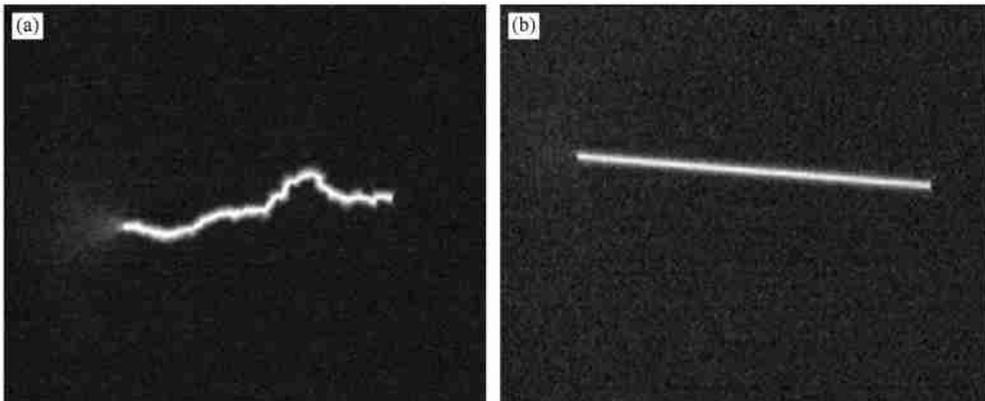


图 2 放电通道 (a) 自发放电的通道; (b) 激光引导放电通道

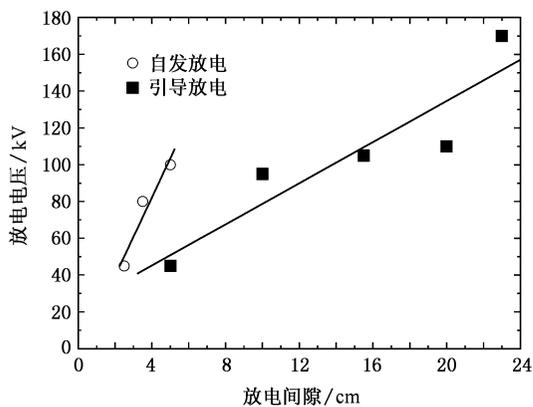


图 3 不同放电间隙下自发放电

发展,称为梯级先导.梯级先导为后面的大电流回击过程开辟了通道.当先导的前端接近接地端时,先导前端电荷产生的局部电场由于接地端一些突起的存在而增强.此时接地端也将产生向高压端的迎面先导.当接地端的迎面先导和梯级先导的前端相连接时,沿着梯级先导的通道会产生很强的大电流放电过程,即回击.我们所看到的放电的强烈白光就是回

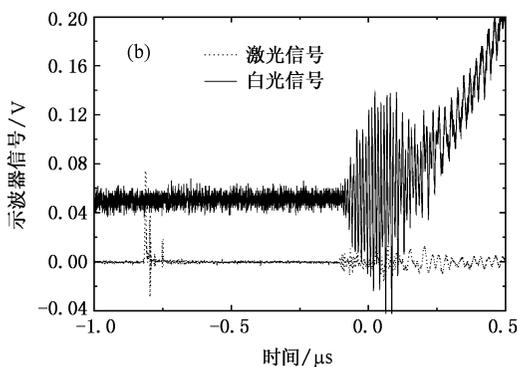
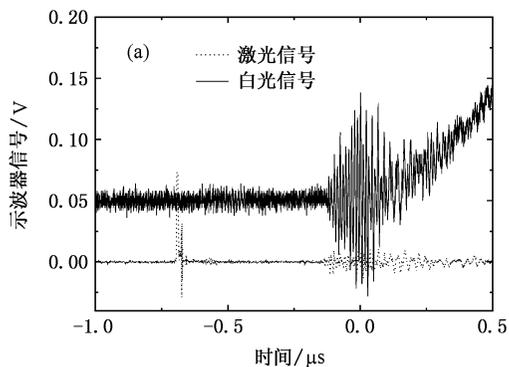


图 4 光电管测量到的放电白光信号与激光信号间的相对延迟 (a)放电间隙 3 cm 时光电管接受到的白光信号延迟 464 ns; (b)放电间隙 15 cm 时光电管接受到的白光信号延迟 901 ns

击所产生的.图 4 中电弧白光信号开始上升的时刻出现的一些细小的尖峰是回击电流辐射出的干扰信号,这些电磁干扰信号能够基本上反映回击发生的时刻,并且可以看出放电电流的持续时间在 0.3 μs 左右.

随着放电间隙的增大,梯级先导的发展也需要更长的时间,即放电白光信号对激光信号的延迟也在增大.我们对不同放电间隙的白光信号和激光信号进行了测量.如图 5 是放电白光信号的延迟随放电间隙长度的变化.可以看出随着放电间隙的加长,白光信号对激光信号的延迟也在增加.对图 5 进行分析,得到先导发展速度在 10^7 cm/s 左右,并且随着放电间隙的加长和电压的升高,先导发展速度呈增

击所产生的.

通过分析激光等离子体通道引导的高压电弧的发光信号的时间特征,我们发现高压电弧的白光与激光信号之间总是存在微秒级的时间延迟,并且这个时间延迟随放电间隙的加长而增大.这说明飞秒激光等离子体通道诱发和引导放电同样包括预击穿、梯级先导的发展、连接和回击四个过程.与自发放电不同的是,当激光触发预击穿后,梯级先导会沿着激光等离子体通道的路径发展.回击所产生的强放电通道也会沿着激光传播方向.已有的激光诱导放电实验也观测到了类似的现象^[10, 12-14].图 4(a)是放电间隙为 3 cm 时的信号,图 4(b)是放电间隙为 15 cm 时的信号.由于测量用的两个光电二极管接收的光信号来自光路中不同位置,如图 1,其信号本身存在一定延迟,经测量为 92 ns.示波器读出的延迟时间应该减去 92 ns,才是激光到达高压极板时间和放电时间的真正延迟.从图 4 可以看出,当间隙从 3 cm 增大到 15 cm 时,白光信号对激光信号的延迟也从 464 ns 增大到了 901 ns.

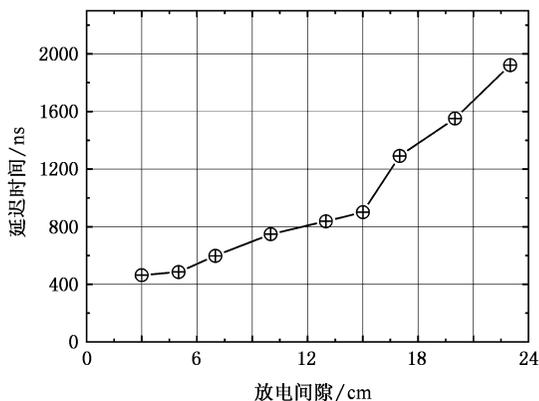


图 5 不同放电间隙下白光信号延迟

长趋势,这与文献[10]中的测量结果一致.

4. 结 论

我们利用波长 800 nm 的红外飞秒激光在大气中产生的等离子体通道成功地诱发和引导了较长间隙的静态高压放电. 在 170 kV 的高压下实现了 23

cm 长空气间隙的击穿. 实验观测显示, 等离子体通道整体上能使空气间隙的击穿阈值降低至自然击穿阈值的 40%. 通过比较激光与放电极白光之间的时间延迟推算出了梯级先导的发展速度约为 10^7 cm/s. 本实验的结果对超短脉冲激光引雷技术的发展能够提供有价值的参考.

- [1] Leonard M. Ball 1974 *Appl. Opt.* **13** 10
- [2] Yoshinori Shimada, Shigeaki Uchida, Chiyo Yamanaaka, Akihisa Ogata, Tatsuhiko Yamanaka, Zen-ichiro Kawasaki, Etsuo Fujiwarada, Yuji Ishikubo, Kinya Kawabatae 2000 *Proceedings of SPIE* 3886
- [3] Yamanaaka T, Uchida S, Shimada Y, Yasuda H, Motokoshi S, Tsubakimoto K, Kawasaki Z, Ishikubo Y, Adachi M, Yamanaka C 1998 *SPIE* 3343
- [4] Tzortzakis S, Prade B, Franco M, Mysyrowicz A, Hiller S, Mora P 2001 *Phys. Rev. E* **64** 057401
- [5] Hao Z Q, Zhang J, Yu J, Zheng Z Y, Yuan X H, Zhang Z, Li Y T, Wang Z H, Ling W J, Wei Z Y 2006 *Science in China; Series G* **49** 228
- [6] La Fontaine B, Vidal F, Jiang Z, Chien C Y, Comtois D, Desparois A, Johnston T W, Kieffer J C, P  pin H, Mercure H P 1999 *Phys. Plasmas* **6** 1615
- [7] W  ste L, Wedekind C, Wille H, Rairoux P, Stein B, Nikolov S, Werner C, Niedermeier S, Ronneberger F, Schillinger H, Sauerbrey R 1997 *Laser Optoelektron.* **29** 51
- [8] Zhang Z, Zhang J, Li Y T, Hao Z Q, Zheng Z Y, Yuan X H, Wang Z H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 361 (in Chinese) [张 喆、张 杰、李玉同、郝作强、郑志远、远晓辉、王兆华 2006 物理学报 **55** 361]
- [9] Ackemann R, Stelmaszczyk K, Rohwetter P, M  jean G, Salmon E, Yu J, Kasparian J, M  chain G, Bergmann V, Schaper S, Weise B, Kumm T, Rethmeier K, Kalkner W, W  ste L, Wolf J P 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 23
- [10] Bruno La Fontaine, Daniel Comtois, Ching-Yuan Chien, Alain Desparois, F  d  ric G  nin, Genev  ve Jany, Tudor Johnston, Jean-Claude Kieffer, François Martin, Raafat Mawassi, Henri Pépin, Farouk A. M. Rizk, François Vidal 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 2
- [11] Nasrullah Khan, Norman Mariani, Ishak Aris and J Yeak 2002 *New Journal of Physics* **4** 61
- [12] Bruno La Fontaine, François Vidal, Daniel Comtois, Ching-Yuan Chien, Alain Desparois, Tudor Wyatt Johnston, Jean-Claude Kieffer, Hubert P. Mercure, Henri Pépin, Farouk A. M. Rizk 1999 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **27** 3
- [13] Comtois D, Chien C Y, Desparois A, Génin F, Jany G, Johnston T W, Kieffer J C, La Fontaine B, Martin F, Mawassi R, Pépin H, Rizk F A M, Vidal F, Couture P, Mercure H P, Potvin C, Bondiou-Clergerie A, Gallimberti I 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 7
- [14] Wille H, Rodríguez M, Kasparian J, Mondelain D, Yu J, Mysyrowicz A, Sauerbrey R, Wolf J P, W  ste L 2002 *Eur. Phys. J. AP* **20** 183
- [15] Hao Z Q, Zhang J, Li Y T, Lu X, Yuan X H, Zheng Z Y, Wang Z H, Ling W J, Wei Z Y 2005 *Appl. Phys. B* **80** 627
- [16] Guillaume Méjean, Roland Ackemann, Jérome Kasparian, Estelle Salmon, Jin Yu, Jean-Pierre Wolf, Kay Rethmeier and Wilfried Kalkner, Philipp Rohwetter, Kamil Stelmaszczyk, Ludger W  ste 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 021101
- [17] Patrick Rambo, Jens Schwarz, Jean-Claude Diels 2001 *J. Opt. A* **3** 146

Laboratory simulation of femtosecond laser guided lightning discharge ^{*}

Zhang Zhe¹⁾ Lu Xin¹⁾ Hao Zuo-Qiang¹⁾ Zhang Shi-Chang²⁾ Zhang Dong-Dong²⁾ Wang Zhao-Hua¹⁾
Ma Yuan-Yuan¹⁾ Yan Ping²⁾ Zhang Jie^{1)†}

1) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China*)

2) (*Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China*)

(Received 22 May 2006; revised manuscript received 20 June 2006)

Abstract

We triggered and guided the stationary electric field discharges in 3—23 cm long air gaps by using plasma channels produced by 40mJ ultrashort laser pulses. We have observed that the plasma channel reduced the discharge breakdown voltage to 40% of its natural value. By analyzing the delay between the laser pulse and the white light emission of discharge, we evaluated the speed of the stepped leader with laser guiding to be about 10^7 cm/s.

Keywords: plasma channel, discharge

PACC: 5150

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60478047, 10634020, 60621063, 10425416).

[†] E-mail: jzhang@aphy.iphy.ac.cn