

文章编号: 1001-3806(2017)01-0061-04

## CO<sub>2</sub> 激光诱导大气放电特性的研究

邓兴福, 王新兵\*, 左都罗

(华中科技大学 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 为了研究脉冲 CO<sub>2</sub> 激光诱导空气放电的特性, 建立了高压电容充放电实验平台, 采用间距为 8mm、半径为 10mm 的一对球形石墨电极, 取得了放电电压和电流的实时数据, 采用 2 阶振荡电路模型对放电电压和放电电流进行拟合得到了电极间激光诱导放电等离子体的阻抗, 并对放电时间、放电延时及抖动做了统计。结果表明, 激光诱导放电等离子体的阻抗很小, 约  $1\Omega \sim 2\Omega$ , 拟合得到的放电等离子体阻抗随放电电压、放电电容、以及激光能量的增加而减小; 放电延时随着实验条件的变化在  $2\mu s \sim 10\mu s$  之间变化, 放电延时以及延时抖动随着放电电压和激光能量的增加而降低, 而受放电电容大小的影响不明显。由此高稳定性的激光脉冲和高压有助于激光诱导放电过程的稳定。

**关键词:** 激光光学; CO<sub>2</sub> 激光; 脉冲放电; 等离子体; 空气

**中图分类号:** O437

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.01.013

## Characteristics of air discharges triggered by CO<sub>2</sub> laser

DENG Xingfu, WANG Xinbin, ZUO Duluo

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science &amp; Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to investigate the characteristics of pulsed CO<sub>2</sub> laser triggering discharge, a high voltage capacitance discharge experimental platform was set up by a pair of hemisphere graphite electrode with 10mm radius and 8mm gap. The real-time data of discharge voltage and current were obtained. Discharge voltage and discharge current were fitted by two-order oscillation circuit model. The impedance of laser induced discharge plasma was obtained. And the discharge time, discharge delay and jitter data were collected. The results show that the impedance of laser trigger discharge plasma is very little, and of  $1\Omega \sim 2\Omega$ . The fitted plasma impedance slightly decreases with the increase of laser energy, discharge voltage and capacitance. The delay varies from  $2\mu s$  to  $10\mu s$  with the change of experimental condition. Delay and delay jitter decrease with the increase of laser energy and discharge voltage. Discharge capacitance has no obvious effects on delay and delay jitter. Laser pulse and high voltage with high stability are helpful for the stability of laser triggered discharges.

**Key words:** laser optics; CO<sub>2</sub> laser; pulse discharge; plasma; air

### 引言

当高功率脉冲激光在空气或其它气体中被聚焦, 且入射激光在焦点处的功率密度超过某一个临界值的时候, 焦点处的气体将会发生光学击穿, 产生强等离子体; 此时若在等离子体的两端垂直于光轴方向加上电场, 等离子体中存在的大量带电粒子会在电场的作用下运动, 回路产生电流, 形成激光诱导的放电。这项技术被广泛应用于激光引雷、激光触发气体开关以及在工业中的打孔、切割、焊接等, 国内外对激光诱导的放电进行了大量的研究。YAMAURA 等人<sup>[1]</sup>使用激光诱导不同气体介质等离子体放电。ACKERMANN 等

人<sup>[2]</sup>使用 CO<sub>2</sub> 激光诱导空气放电, 得到了放电概率随放电电压的增大而增加的结论。FUJII 研究了击穿阈值与电极间距<sup>[3]</sup>之间的关系, 得到了击穿阈值随电极间距的增大而增大的结论。AKYUZ 等人研究了击穿阈值和激光能量<sup>[4]</sup>之间的关系, 得到了击穿阈值与激光能量成正比的结论。MIKI 等人研究了脉冲 CO<sub>2</sub> 激光诱导空气放电特性<sup>[5]</sup>。HOSHI 等人用帕邢定律解释放电过程中击穿电压与气压和放电距离之间关系<sup>[6]</sup>。ZHAN 等人研究了使用 Nd:YAG 激光诱导不同介质放电, 得到了激光具有降低介质击穿阈值电压<sup>[7]</sup>作用以及通道中的电流波形与放电介质有关而与放电脉宽无关<sup>[8]</sup>的结论。YIN 等人则研究了激光诱导下放电延时和抖动与激光波长的关系<sup>[9]</sup>, 发现短波长激光诱导放电的延时以及抖动较小。WANG 对影响激光诱导放电效果的诸多因素如激光参量、电场强度、电场作用时间进行了试验研究, 结果表明, 与正极性比较,

作者简介: 邓兴福(1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光与空气作用的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: xbwang@hust.edu.cn

收稿日期: 2015-12-21; 收到修改稿日期: 2016-03-09

激光更易于触发负极性电压气隙放电<sup>[10]</sup>。LIU 等人研究了 Nd:YAG 激光诱导空气放电的击穿延时及抖动特性<sup>[11]</sup>。CHEN 等人研究了纳秒紫外激光诱导空气等离子体的阻抗<sup>[12]</sup>。本文中实验研究了 CO<sub>2</sub> 激光诱导空气放电特性,研究了放电电压、激光能量以及电路电容对放电延时以及抖动的影响,采用 2 阶振荡电路模型对实验结果进行拟合得到激光诱导放电等离子体阻抗,研究了放电等离子体阻抗与激光能量、放电电压以及电路电容的关系。

## 1 实验装置

CO<sub>2</sub> 激光诱导空气放电的实验装置如图 1 所示。高压电源由单相调压器和直流电源变压器组成,变压器的作用是将调压器输出的交流电经高压硅堆整流、滤波、稳压后变为直流,调压器的输出电压在 0V ~ 220V 之间可控,变压器变比 100 倍;变压器的输出经 30kΩ 镇流电阻给 0.25μF 的电容充电;30kΩ 镇流电阻可以保证给电容充电的时间小于激光的脉冲周期,以使每个激光脉冲到达电极间都能成功诱导放电;波长为 10.6μm 的 CO<sub>2</sub> 激光通过焦距为 10cm 的聚焦透镜聚焦到两个电极的中间位置,电极是半径 10mm 的球形石墨材质,电极间距 8mm,激光的重复频率为 1Hz,激光单脉冲能量为 579mJ,激光脉冲宽度约 2μs,有较长拖尾。实验中,采用高压探头和罗科夫斯基电流线圈测量电容两端的电压和电流,并用示波器实时记录。

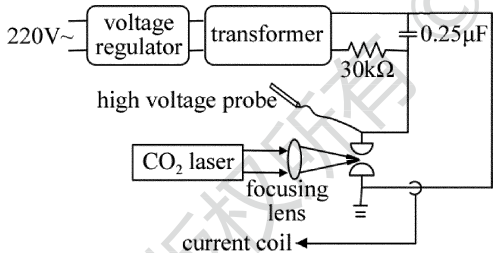


Fig. 1 Experimental setup of laser triggered discharge

## 2 实验结果与分析

为了保证不产生高电压自击穿现象,在无激光脉冲的诱导下,测量了实验条件下的自击穿阈值,在 12.3kV 时,自击穿现象出现,出现丝状放电;实验中使电容的充电电压都应低于击穿阈值。所有实验数据采用 10 次实验的平均值。

### 2.1 激光诱导放电特性的研究

实验中所测激光信号、等离子体发光信号、电极两端电压和击穿电流随时间变化的曲线如图 2 所示,实际的电压、电流值分别为图中所示值的 1000 倍和 100 倍。实验中给定的放电电压为 3.83kV,诱导激光的能

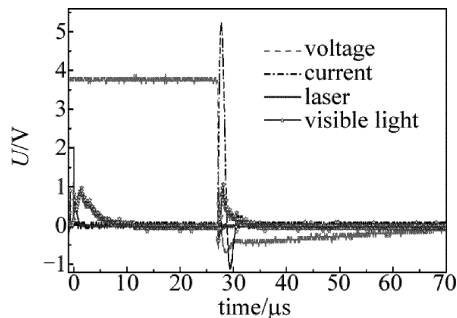


Fig. 2 Typical current and voltage waveform of laser triggered discharge  
量 579mJ, 电容 0.25μF。图中发光信号是等离子体发出的可见光信号,首先,由于空气对激光能量的吸收,空气被快速的电离,产生大量的氮氧离子和自由电子,然后带电粒子在强电场的作用下快速运动,粒子间的碰撞激发出更多的带电粒子,所以有两次较强的光信号。激光诱导放电与激光脉冲间存在延时,这是由于激光产生的等离子体中的带电粒子在电场的作用下,运动到电极形成放电需要一定的时间。由于本实验中激光方向与电场方向垂直,放电延时在微秒量级,与参考文献[13]中的结果一致。放电形成后,电容两端电压迅速降低,而电流急剧上升,呈现出脉冲放电的特点,由于回路存在电感,所以电流与电压出现振荡。

表 1 中统计了激光能量  $E$ 、放电电压  $U$  以及充电电容  $C$  对放电峰值电流  $I_{\max}$  以及放电时间  $t$  的影响,放电时间是电容两端电压从初始值降到零所需时间。从表 1 中可以看出,峰值电流随着放电电压的增加而增大,这是由于激光等离子体中的初始带电粒子在高放电电压的作用下,电子从电场中获得的能量大,通过电子碰撞电离增加带电粒子浓度,使得电流增加。在放电电容不变时,激光能量和放电电压对放电时间的影响小,这是由于放电时间主要是取决于回路的电感和电容。这点也可以从电容增加时,放电时间变长以及放电峰值电流降低可以说明。但峰值电流随激光能量的变化不明显。要实现快速放电,提高放电峰值电流,必须降低回路电感。

Table 1 Data statistics of laser triggered discharge

$U/\text{kV}$	$E = 579\text{mJ}, C = 0.25\mu\text{F}$			$U = 6.85\text{kV}, C = 0.25\mu\text{F}$			$U = 3.5\text{kV}, E = 579\text{mJ}$		
	$I_{\max}/\text{A}$	$t/\mu\text{s}$		$I_{\max}/\text{A}$	$t/\mu\text{s}$		$I_{\max}/\text{A}$	$t/\mu\text{s}$	
2.58	356	0.653		203	793	0.708	0.25	468	0.677
3.18	444	0.668		365	793	0.708	0.5	386	1.38
3.83	565	0.695		405	793	0.708	0.75	312	1.97
4.90	686	0.701		521	793	0.708			
5.90	726	0.705		579	793	0.708			

### 2.2 激光诱导放电的延时以及抖动

当激光能量和电容一定时,不同放电电压对应的

击穿延时和抖动如图 3 所示。由图 3 可知,击穿延时会随着放电电压的增加而减小,这是因为电压越大,等离子体中带电粒子在电场中获得的动能越大,电子与分子间的碰撞电离作用也更强,等离子体密度更高,同时流注传播更快,从而间隙击穿的时间会更短;从图中同样可以看出延时抖动随电压的增加而减小的关系。当放电电压为 2.58kV 时,击穿延时均值 8.52 $\mu$ s,延时抖动 2.1 $\mu$ s;当放电电压为 5.9kV 时,击穿延时均值为 2.89 $\mu$ s,延时抖动为 0.68 $\mu$ s。

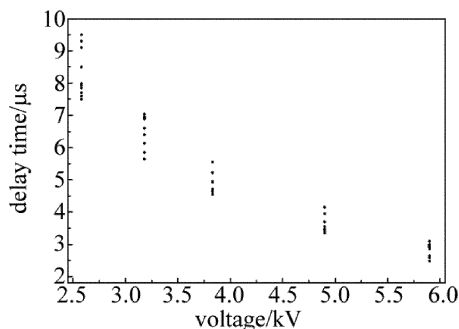


Fig. 3 Delay and delay jitter under different discharge voltages

激光能量对击穿延时和抖动的影响如图 4 所示。从图 4 中可以看出,伴随着激光能量的增加,击穿延时减小,同时延时抖动也随之降低。不难理解,等离子体中的带电粒子是激光诱导产生的,激光能量越大,带电粒子的获得的初速率越大,在电场的作用下运动更快,击穿延时越小。当激光能量为 579mJ 时,击穿延时均值为 2.31 $\mu$ s,延时抖动为 0.54 $\mu$ s;当激光能量为 203mJ 时,击穿延时均值为 14.5 $\mu$ s,延时抖动 5.5 $\mu$ s。击穿延时和抖动随放电电容的变化不明显。

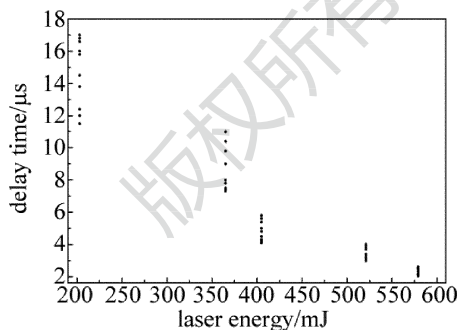


Fig. 4 Delay and delay jitter under different laser energies

### 2.3 激光诱导放电等离子体阻抗

激光诱导放电可以用一个欠阻尼振荡电路进行模拟,电容与电极所在的放电回路可等效为图 5 所示的电路图,其中  $C$  为充电电容,  $L$  为放电回路等效电感,  $r$

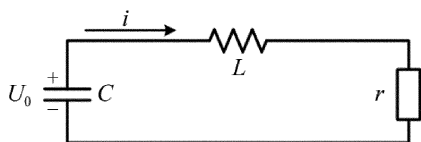


Fig. 5 Equivalent circuit

为电极间等离子体阻抗。欠阻尼振荡的原理是由于  $r$  较小,电容放电时,被电阻消耗的能量较少,大部分电场能转变为磁场能储存于电感中。当电容的储能为零时,电感开始放电,电容被反向充电;可以得出在阻值一样的情况下,当电路中的电容储能越大,振荡次数越多,与实验结果很相似。作者对各实验结果做了拟合处理来探究阻抗随变量的变化情况。2 阶电路中电流和电压与回路电阻、电感和电容的关系式见下:

$$U = \frac{U_0 \exp[-rt/(2L)]}{\sqrt{1 - Cr^2/(4L)}} \sin \left[ \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2} t + \arctan \frac{\sqrt{4L}}{Cr^2} - 1 \right] \quad (1)$$

$$i = \pm C \frac{dU}{dt} = \pm \frac{U_0 \exp[-rt/(2L)]}{\sqrt{L/C - r^2/4}} \times \sin \left[ \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2} t \right] \quad (2)$$

式中,  $U_0$  表示初始电压值,  $r$ ,  $L$  和  $C$  分别为放电等离子体阻抗、放电回路的电感和充电电容。根据 (1) 式、(2) 式对实验得到的放电电流以及电压波形进行拟合,拟合结果如图 6 所示。分别表示在不同激光能量、初始电压和电容条件下激光诱导放电等离子体阻抗的变化情况,综合的拟合相关系数在 0.99 左右,拟合得到的电阻即为激光诱导放电等离子体的电阻。可见激光诱导放电等离子体阻抗远小于参考文献 [12] 中的激光诱导空气等离子体的阻抗。

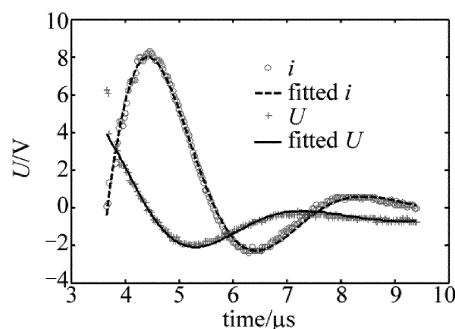


Fig. 6 Fitting results of current and voltage waveform of laser triggered discharge

图 7 中给出了拟合的阻抗随电容、放电电压和激光能量的关系。图 7a 和 7b 中阻值随变量变化的趋势一致:随着激光能量或放电电压的增加,放电等离子体的阻抗会随之减小。可以知道:电阻率与电子密度成反比,而电子密度与激光能量密度成正比,这样电阻与激光能量成反比,故电阻随激光能量的增加反而减小;放电电压越大,电场越强,由激光诱导的等离子体所获加速度越大,粒子间的碰撞电离越激烈,导致电极间带电粒子的密度增大,所以阻抗会随着放电电压的增大而减小。图 7c 中给出了拟合的激光诱导放电等离子



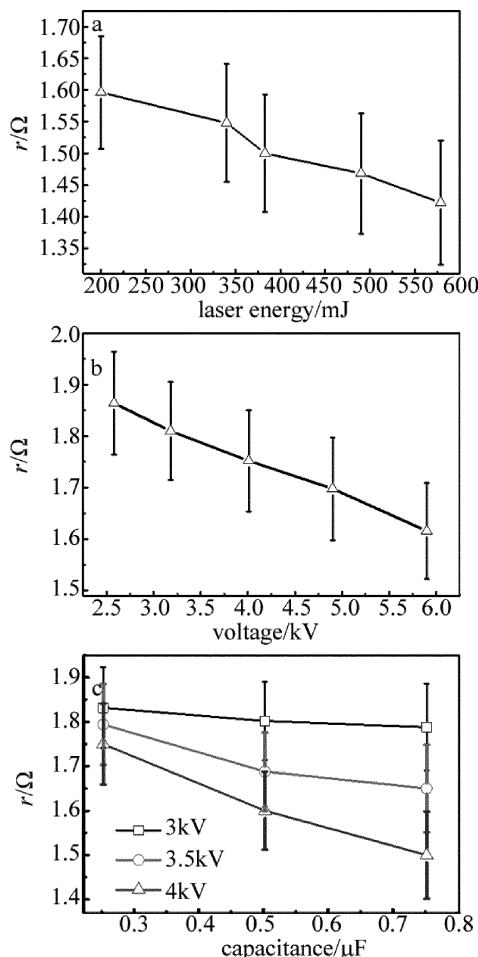


Fig. 7 Fitted plasma impedance with the change of experimental parameters

体阻抗随电容的变化趋势,可以发现,随电容的增加,拟合的放电等离子体阻抗降低,而电压越高,等离子体阻抗越小,这与图 7a 中的结果相符。虽然从表 1 中可以看出,电容增加峰值电流降低,但放电时间和电路储能的增加,使得更多的能量沉积到放电区中,导致拟合的阻抗呈下降的趋势。TANG 等人使用相同的激光器做了激光诱导空气等离子体的光谱诊断实验<sup>[14]</sup>,经过计算得到电子密度在  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  量级,而实验中电容的储能最小为 832mJ,远大于激光能量 579mJ,且拟合阻抗随实验变量的变化不大,可以认为,在实验条件下激光诱导放电等离子体的电离度很高。

### 3 结 论

激光诱导放电的延时及延时抖动随激光能量以及放电电压的增加而降低,当电压从 2.58kV 增加到 5.9kV 时,放电延时均值从  $8.52 \mu\text{s}$  减少到  $2.89 \mu\text{s}$ ,延时抖动从  $2.1 \mu\text{s}$  降低到  $0.68 \mu\text{s}$ ;当激光能量从 203mJ 增加到 579mJ 时,放电延时均值从  $14.5 \mu\text{s}$  减小到  $2.31 \mu\text{s}$ ,而延时抖动则从  $5.5 \mu\text{s}$  降低到  $0.54 \mu\text{s}$ ,可见增加放电

电压和激光能量能有效降低放电延时和延时抖动。放电电容对激光诱导放电的延时以及延时抖动影响不明显,但放电电容影响放电峰值电流以及放电时间;拟合得到的激光诱导放电等离子体阻抗在  $1.4 \Omega \sim 1.8 \Omega$  间变化,并且随放电电压、激光能量以及电容的增加而稍许有些降低。

### 参 考 文 献

- [1] YAMAURA M, IHARA S, SATOH S, *et al.* Characteristics of a laser-triggered discharge by high-repetition-rate excimer laser on dc electric field[J]. Proceedings of the SPIE, 2000, 3886:207-214.
- [2] ACKERMANN R, STELMASZCZYK K, ROHWETTER P, *et al.* Triggering and guiding of megavolt discharges by laser-induced filaments under rain conditions[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85 (23): 5781-5783.
- [3] FUJII T, MIKI M, GOTO N, *et al.* Leader effects on femtosecond-laser-filament-triggered discharges[J]. Physics of Plasmas, 2008, 15 (1): 981-984.
- [4] AKYUZ M, RAHMAN M, LARSSON A, *et al.* Characteristics of laser-triggered electric discharges in air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5): 1060-1070.
- [5] MIKI M, WADA A, SHINDO T. Model experiments of laser-triggered lightning using an intense  $\text{CO}_2$  laser pulse[J]. Proceedings of the SPIE, 2000, 3886:680-690.
- [6] HOSHI Y, YOSHIDA H. Examination of laser-triggered discharge using a virtual gas model and the similarity of its Paschen curve with those of inert gases[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(6): 066103.
- [7] ZHAN J, YANG M J. Investigation on the breakdown voltage induced by YAG pulsed laser[J]. Laser Technology, 2009, 33(2): 138-140 (in Chinese).
- [8] ZHAN J, YANG M J. Investigation on the voltage- current characteristics of the YAG laser guiding discharge channel [J]. Laser Journal, 2008, 28(5):17-19 (in Chinese).
- [9] YIN Y, YANG J, ZHONG L H, *et al.* Triggering delay and jitter of laser triggered gas switch [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40 (1): 194-200 (in Chinese).
- [10] WANG J F, TANG X Z. Testing study of gap flashover triggered by laser-plasma[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(2): 18-20 (in Chinese).
- [11] LIU Z F, WEI W B, DONG Q X, *et al.* Experimental study on air gap discharge triggered by pulsed laser under HVDC condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21): 3527-3533 (in Chinese).
- [12] CHEN D Z, GAO J B, YE J F, *et al.* Experiment study of air ionization and plasma channel conducting with nanosecond ultraviolet laser pulses[J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 262-264 (in Chinese).
- [13] ARANTCHOUK L, POINT G, BRELET Y, *et al.* Large scale Tesla coil guided discharges initiated by femtosecond laser filamentation in air[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(1): 013303.
- [14] TANG J, ZUO D L, YANG C G, *et al.* Spectroscopic diagnosis of air plasma induced by pulsed  $\text{CO}_2$  laser [J]. Laser Technology, 2013, 37(5):636-641 (in Chinese).