

激光技术

飞秒激光大气等离子体通道诱导放电技术研究

王毕艺, 陈亚楠

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘要 通过研究飞秒激光在空气中形成等离子体通道的导电特性, 提出一种获得长寿命、长距离的等离子体通道的实验方法。研究表明, 采用飞秒激光脉冲序列电离大气有望获得长寿命、长距离的导电通道, 从而为激光等离子体通道诱导放电技术的发展奠定理论和技术基础。

关键词: 飞秒激光; 等离子体通道; 诱导放电

中图分类号: TN223

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-03-0024-04

Research on Technology of Air Plasma Channel Discharging Induced by Femtosecond Laser

WANG Bi-yi, CHEN Ya-nan

(Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Tianjin 300308, China)

Abstract: The electric conductivity of air plasma channel induced by femtosecond laser is researched. Based on this mechanism, an experimental method of the plasma channel for long life and long distance is proposed. The research results show that long life and long distance conductive channel can be obtained from air plasma induced by femtosecond laser sequences, which paves theoretical and technological basis for developing of the plasma channel discharging technology induced by femtosecond laser.

Key words: femtosecond laser; air plasma channel; induced plasma discharging

强激光激发气体电离和击穿的过程是一个复杂的非线性过程。在过去的40多年的时间里,许多科学工作者对此进行了大量的理论和实验研究,在这些研究中,由于受当时激光技术的限制,激光的脉冲宽度仅仅覆盖了ps-ns或更长的时间范围。如今,随着激光技术的发展,实验室内已可轻易获得强度大于 10^{13} W/cm²的飞秒激光输出,这样高强度的激光脉冲很容易电离大气,并且产生的等离子体通道可在空气中传播几百米甚至上千米的距离,这为激光传能的应用提供技术上的可能^[1-3]。重点研究等离子体通道的传输特性以及获得长寿命长距离等离子体通道的方法,为飞秒激光等离子体通道的诱导放电技术的应用提供了技术依据。

1 飞秒激光大气传输效应

飞秒激光在大气中传输时,当脉冲光束直径聚到一定小的尺寸时,飞秒激光在空气介质中发生非线性光学克尔效应。非线性光学克尔效应对光束传输的作用相当于在光路中插入了正透镜,对激光束起会聚作用(自聚焦效应)。激光自聚焦效应使焦斑内光峰值功率密度急剧上升,当峰值功率密度超过空气的击穿阈值时,空气电离产生等离子体(等离子体为物质的第四态,由电子和离子构成,其物质形态呈现万为气态,整体表现为电中性)。等离子具有负折射率特性,它对激光束传输的作用相当于在光路中插入了负透镜,使激光束发散(散焦

效应)。聚焦飞秒激光脉冲在大气中传输时由光学克尔效应引起的自聚焦与等离子体散焦可通过控制实验条件来达到平衡,产生自持的长距离等离子体丝,其过程如图1所示^[4-5]。

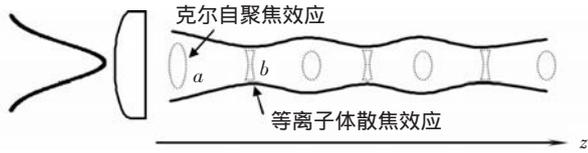


图1 等离子体通丝的传输

大气中聚焦飞秒激光脉冲形成的等离子体丝直径大约为100~200 μm之间(丝直径与实验条件有关)。飞秒激光等离子体成丝的过程相当于透镜的焦点移动传输过程;等离子体丝把激光脉冲能量约束在细丝内并传导到远距离处的作用又非常类似于光波导。由于飞秒激光的这一特殊性质,通过飞秒激光大气成丝方法,把通常毫米量级的焦深延长至公里的范围,同时保持着初始焦点处高激光峰值功率密度特性。

2 通道的电导性分析

2.1 实验测量

高强度飞秒脉冲激光在空气中聚焦时会形成很长的等离子体通道,通道内部会形成细丝,细丝内自由电子密度很高。在细丝周围由于存在激光能量背景,会形成一个等离子体鞘层,鞘层中自由电子密度比细丝中低很多,因此鞘层电阻率也较大。在空气中等离子体通道内电能传输主要在细丝中进行^[6]。

实验装置如图2所示。

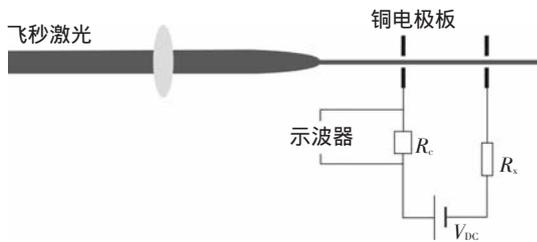


图2 电学测量原理示意图

将两个中心有小孔的铜极板放在电路中,调整光路让光刚好通过小孔。两板间加直流高压V(远低于空气击穿电压)。电路中串联一个10 kΩ的限

流电阻。聚焦激光从小孔通过时,由于细丝直径远小于小孔直径,细丝和极板间由细丝周围的等离子体鞘层导通。由于鞘层电阻率较大,在等离子体细丝和极板间会产生一个较大的接触电阻 R_c 。接触电阻 R_c 和等离子体通道电阻共同导通两块极板间的空气,形成通路。示波器从电阻 R 上获得电压信号^[7-10]。

通道电阻 R_0 即为

$$R_0 = R - R_x - R_c \tag{1}$$

其中, R 为通路总的电阻,总电阻 $R = R_c \times V_{dc} / V_c$ 。

2.2 存在问题

大气等离子体通道形成后,由于电子和离子的复合、电子与中性分子吸附作用等,通道内电子密度下降得很快,通常单个飞秒激光脉冲产生的等离子体通道寿命只有几个纳秒,由于通道的寿命较短,其传输距离 S 也相对较弱($S = vt$),大大限制了激光等离子体通道的导引作用,其原理如图3所示。

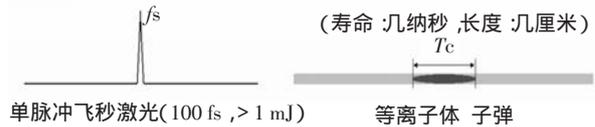


图3 单脉冲飞秒激光等离子体通道

如何提高飞秒激光在空气中产生的等离子体通道的寿命,成为近年来激光等离子体通道领域一直探索和研究的的重要内容之一。

3 通道寿命的延长

目前,有两种方法可显著提高等离子体通道的寿命。

3.1 双脉冲组合激光

延长通道寿命可行的方法之一是在等离子体通道形成之后添加后续脉冲,通过后续脉冲维持等离子体通道的电离状态来达到延长等离子体通道寿命的目的。例如在飞秒激光脉冲之后一定延迟时间内添加另一束长脉冲激光(激光的脉宽在纳秒或者皮秒量级)。后续长脉冲一方面电离空气产生等离子体,另一方面通过逆韧致吸收作用将能量传递给通道内电子。如图4所示。

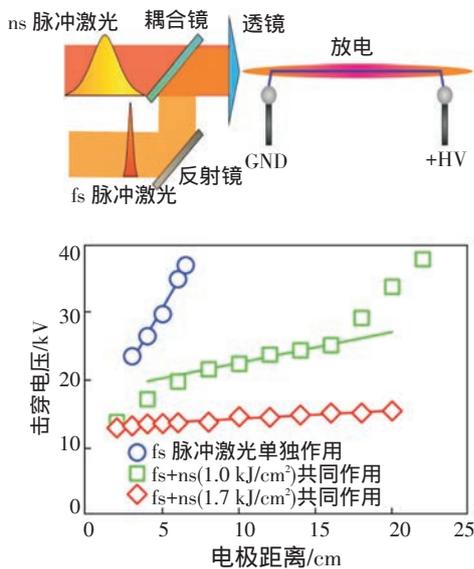


图4 双脉冲组合激光

以往研究表明,通过添加后续长脉冲激光,等离子体通道的寿命延长了数十倍。但是这种方法同样存在引用上的缺陷,虽然长脉冲后续激光的引入大大提高了等离子体通道的存在时间,但是延长效果并不能覆盖在整个长等离子体通道上,这主要是因为长脉冲激光并不像飞秒激光那样能够在长距离上自导引传输。因此添加后续长脉冲激光的办法不能从根本上解决产生长寿命、长距离的等离子体通道的技术问题。

3.2 飞秒脉冲序列

利用飞秒激光脉冲序列反复刷新等离子体通道有望从根本上解决产生长寿命、长距离的等离子体通道的技术问题,如图5所示。

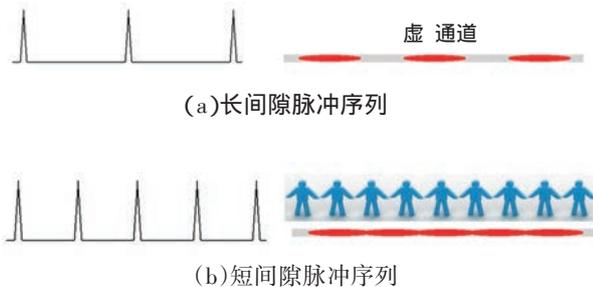


图5 飞秒激光脉冲序列

当脉冲序列的间隙大于等离子体的衰变时间时,各个激光脉冲形成的等离子体“子弹”是相互独

立的,是不相互连接的,这种情况下等离子体通道是不导电的,如图5a所示。但脉冲序列的间隙小于等离子体的衰变时间时,各等离子体“子弹”之间是相互联接的,是导电的,如图5b所示。

利用短间隙飞秒激光脉冲序列反复刷新等离子体通道有望从根本上解决产生长寿命、长距离的等离子体通道的技术问题。

3.3 飞秒激光脉冲序列诱导高压放电

根据等离子体通道诱导放电的技术特点,在实验室里搭建一套高压放电装置,利用飞秒激光脉冲序列电离大气,将人工产生的高压电流定向传输到目标,其实验装置的示意如图6所示。

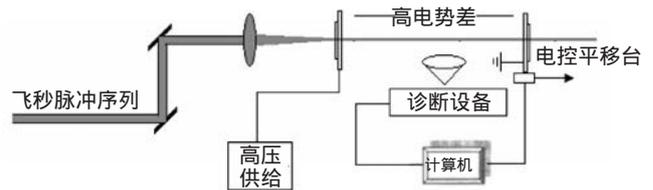


图6 飞秒激光诱导高压放电的实验装置示意图

如图6所示,飞秒激光经聚焦光学系统后进入两高电势差的电极板(带小孔),其中一极通过高压供给装置供给高电压,另一极接地并安装在电控平移台上,通过移动平移台来调节高压放电的距离,诊断设备可用来精确测量等高压放电的时间、寿命等相关参数。

在实验中,通过控制飞秒装置产生不同长度和电子密度的等离子体通道。放电电源可采用上万伏量级的高压直流电源或高压脉冲放电装置,利用等离子通道将电源的正负极连接起来实现对放电的诱发和引导。对放电过程的诊断除了观察放电过程中产生的光信号和电信号,还可创新性地采用监测放电产生的电磁辐射的方法,因为放电发展过程中的各个阶段,包括起始放电、流注、先导发展、主放电以及回击等过程,都会发射出不同特征的电磁辐射信号,因此可以根据这些信号幅值和波形特征参数来比较有无激光诱导情况下的放电过程。

4 结论

利用飞秒激光等离子体通道的导引作用,将高压电流/电磁波定向传输到目的,此概念较创新性较

强,一旦技术成熟,将广泛应用于各个领域,具有重要的意义。然而,激光等离子体通道引导高压放电的物理机制仍旧属于尚未解决的科学问题,对这一现象中的许多微观物理过程的研究还需要进一步深入,同时,由于受限于飞秒激光技术的发展,等离子体通道的放电距离还远未达到适用的阶段,这也是激光诱导放电需要迫切解决的问题。

参考文献

- [1] Sprangle P, Penano J R, Hafiz B. Propagation of intense short laser pulses in the atmosphere[J]. Phys Rev E, 2002, 66(4): 045418.
- [2] Gamal Y EE-D, Abdel-Moneim N M. Theoretical study of electrical breakdown in nitrogen induced by laser radiation at 1.06 μ m [J]. J Phys D: Appl Phys, 1987, 20(6): 757-761.
- [3] 杨小丽,王俊波,刘炎焱,等.脉冲激光作用下气溶胶导

致大气击穿研究[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(1): 157-160.

- [4] Sircar A, Dwivedi R K, Thareja R K. Laser induced breakdown of Ar, N₂ and O₂ gases using 1.064, 0.532, 0.355 and 0.266 μ m radiation[J]. Appl Phys B, 1996, 63(6): 623-627.
- [5] 韩晓玉,杨小丽.激光大气击穿阈值的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(11): 1655-1659.
- [6] 郝作强,张杰,俞进,等.空气中激光等离子体通道诊断方法比较研究[J]. 中国科学, 2006, 36(1): 38-45.
- [7] 张喆,张杰,李玉同,等.空气中激光等离子体通道导电性能的研究[J]. 物理学报, 2006, 55(1): 357-361.
- [8] 张杰,郝作强,远晓辉,等.超强飞秒激光脉冲在空气中传输研究[J]. 量子电子学报, 2005, 23(3): 282-284.
- [9] 张志刚.飞秒激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [10] 柴路,胡明列,方晓惠,等.光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. 中国激光, 2013(1): 1-14.

(上接第10页)

京: 科学出版社, 2006: 15-37.

- [2] Qi Feng-jie. Study on cross-talk of laser jamming on interline transfer CCD[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014.
- [3] 陈前荣,亓凤杰,王彦斌,等.激光干扰CCD规则亮点分布原理研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 113-117.
- [4] 张震,江天,程湘爱,等. CCD强光串扰效应的串扰线缺口现象及其机制[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(7): 1505-1509.
- [5] 张震,程德艳,师宇斌,等. IT-CCD串扰强度与时间的无关性研究[J]. 现代应用物理, 2015, 6(2): 81-84.
- [6] 孙静,刘国栋,杜立峰,等. 激光探测过程中CCD的串音

饱和现象分析[J]. 光学技术, 2013, 39(6): 535-539.

- [7] 李晓英,牛春晖,郎晓萍,等. 面阵Si-基CCD串音干扰实验研究[J]. 激光杂志, 2016, 37(11): 24-27.
- [8] 周建民,付有余,郭劲,等. 脉冲激光对CCD的软损伤技术研究[J]. 激光杂志, 2005, 26(2): 20-21.
- [9] 沈洪斌,沈学举,周冰,等. 532 nm脉冲激光辐照CCD实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(10): 1449-1454.
- [10] 郭少锋,程湘爱,傅喜泉,等. 高重复频率飞秒激光对面阵CCD的干扰和破坏[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1783-1786.

(上接第14页)

参考文献

- [1] 刘亚侠,阮锦,郝志航.线阵TDI CCD遥感相机非均匀性校正的研究[J]. 光学技术, 2003, 29(6): 749-751.
- [2] 岳俊华,李岩,武学颖,等.多TDICCD拼接相机成像非均匀性的校正[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 3084-3088.
- [3] 朱宏殷,郭永飞,司国良.多TDICCD拼接相机成像非均匀性实时校正的硬件实现[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 3034-3042.
- [4] 王文华,何斌,韩双丽,等.星上CCD成像非均匀性的实时校正[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1420-1428.
- [5] 李新娥,班皓,沙巍,等.一种大视场TDICCD相机的多

传感器图像配准方法[J]. 液晶与显示, 2014, 29(4): 644-648.

- [6] 王运,颜昌翔.光谱仪图像的亚像素配准[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 661-667.
- [7] 许秀贞,李自田,薛利军.CCD噪声分析及处理技术[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 343-347.
- [8] 彭妮娜,陈大羽.采用线阵TDICCD相机的实时自动增益控制算法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1370-1375.
- [9] 王亮,刘蓉,张丽,等.基于Fourier-Mellin变换的气象卫星光谱图像配准[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(3): 855-858.