

测试、试验与仿真

激光电离空气的光学诊断实验研究

张晓许

(92941部队 装备部, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要: 激光电离空气的研究在各个领域具有重要的意义, 其电离过程是一个包括多光子电离和串级电离两个过程在内的多元过程。通过实验研究发现, 当 Nimma-600 激光器的驱动电压为 880 V, 等离子体区域的面积在激光脉冲产生后约 20 ns 时达到最大, 等离子体从产生到消逝得持续时间大约为 16 μ s。

关键词: 激光; 电离; 空气; 等离子体; 光学诊断

中图分类号: O437; O53

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-04-0060-04

Optics Diagnosis Experimental Research on Atmosphere Ionized by Laser

ZHANG Xiao-xu

(Equipment Department of 92941 Army Unit, Huludao 125000, China)

Abstract: The research on atmosphere ionized by laser is significant in many areas. The ionization is a multi-process which contains multi-photon ionization and cascade ionization processes. Experimental results show that when the drive voltage of the Nimma-600 laser is 880 V, the area of the plasma reaches to the biggest area after the laser pulse generated about 20 ns, and the last time of the plasma is about 16 μ s.

Key words: laser; ionization; atmosphere; plasma; optics diagnosis

随着大功率激光器的不断发展, 激光和气体或等离子之间相互作用越来越引起人们的关注。将激光束穿过大气, 当激光功率密度达到一定的阈值后, 大气分子将会被迅速电离, 该区域内的气体分子对激光会进一步强烈地吸收, 气体温度快速升高, 导致气体完全电离形成高度电离的空气团(等离子云), 在焦点区域内出现明亮的火花并伴有啪啪的响声, 这种现象称为大气击穿。激光引起单一气体电离的机理一般认为有两种^[1-3], 一是多光子电离, 二是串级电离(也称级联过程), 但空气是由多种气体组成的混合气体, 而这两种机理并不能很好地解释空气的激光电离实验规律。张显斌等^[4]认为激光在引起空气电离时, 是一个包括多光子电离和串级电离两个主要过程在内并且与空气预电离密

切相关的多元过程。高强度激光击穿空气会产生很多有意思的现象, 如激光的三次谐波以及等离子体通道现象, 等离子体通道的出现会辐射出很强的白光, 其光谱范围很宽包括了紫外到远红外。人们可以利用等离子体通道发出的白光对大气污染和大气层气溶胶成分进行分析。并对等离子体通道中的高次谐波的产生进行研究, 可以有助于发展紫外和 X 射线波段的相干光源。当激光作用于空气时, 使得被作用空气中的粒子被电离, 当单位区域内的自由电子密度达到 10^{18} cm^{-3} , 就认定该处空气被击穿。目前, 主要研究的是激光对单一气体的电离。文中首先简要回顾激光电离空气的一般理论问题, 重点对激光电离空气的实验进行研究和分析, 得出激光击穿空气的一般规律。

1 激光电离空气的多元过程

气体击穿最早是在20世纪50年代中期,由美国麻省理工学院的Brown教授在研究微波气体放电现象时发现的,随后许多科学家对此进行了实验和理论研究,直到1964年Maker^[5]等人发现了激光作用下大气击穿现象。在通常情况下,环境气体是冷的,缺少自由电子,电势能很高,所以它不可能单纯的经过如固体靶材那样的吸收机制与入射激光相互作用激发等离子体,高功率激光束在大气中传输时,经透镜会聚如果在其焦点区域的大气中含有少量的自由电子,自由电子在激光束的强电场作用下发生振荡,当聚焦区域的电场强度足够大,即激光功率密度超过阈值时,电子与中性大气分子碰撞损失从而导致碰撞电离。一般认为多光子吸收电离和串级电离是导致大气击穿主要机制。

1.1 多光子吸收电离

多光子电离^[4]过程是指一个气体原子同时吸收若干个光子,而被吸收的光子能量之和应等于原子的电离能。一般来说,大气分子的电离势要比光子的能量高得多。因此在正常情况下,光致击穿实际上是很难发生的。其原因是光致电离和光致激发是单光子与气体分子之间的相互作用过程。产生这些过程的阈值条件是光子能量约等于原子的电离能或激发能。气体原子和分子的电离电位,通常在几伏到几十伏之间。其电离能表示为 $E=eu$ 。如果原子的电离能正好与 k 个光子能量相当,造成多光子吸收,产生多光子电离。产生多光子电离通常要同时满足两个条件:首先,这种气体原子要有 k 个虚能级,能级之间的能量差正好与作用的光子能量相等;其次,辐照的光中含有大量的光子数目。这实际上是对光强提出要求。只有光子数目足够大,才能增加单个原子吸收多个光子的几率。用 I 表示光强,则吸收单个光子几率为 $P_1 \propto I$,吸收 k 个光子几率为 $P \propto (P_1)^k \propto (I)^k$ 。

1.2 串联机制

串级电离^[4]属于另外一种重要的大气电离物理机制。它是电中性大气分子的逆韧致吸收造成的雪崩式电离。在被激光辐照的区域,一般存在自然

产生的电子和由多光子电离产生的早期电子,他们被统称为初始电子。初始电子从激光的电场获得能量,当此能量足够大时,如果和原子碰撞,就能使原子激励被电离。因此高激发态原子的光电离以及电子与原子的直接碰撞,都能进一步放出电子。在场强高的局部区域内,电子雪崩式增长或串级电离从而发生击穿。从这个过程可以看出,串级电离过程取决于电子和电子能量的增加与损失之间的竞争。电子从激光场中获得的能量为

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{e^2 \varepsilon^2}{2m(\omega^2 + \gamma_c^2)} \quad (1)$$

其中, ω 为激光角频率; m 和 e 分别是电子质量和带电量; γ_c 为碰撞频率,大小与气压有关; ε 是随激光角频率振荡变化的激光场强。上式对时间求导,得电子从振荡中获得能量的速率为

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{e^2 \varepsilon^2 \gamma_c}{2m(\omega^2 + \gamma_c^2)} \quad (2)$$

从上式也可以看出,电子从振荡中获得能量的速率与激光角频率和气压有关。随着时间的推移,电子能量不断积累,大到足以引起原子的激励和电离,从而释放出新的电子。在产生新电子的同时,还存在相反的过程——电子的损失。一般认为,电子的损失过程主要是由大气中氧分子吸附,电子与离子复合,电子扩散出激光辐照区域和相互作用区等复杂因素引起的。如果只考虑由多光子电离产生的初始电子,其密度近似应为

$$n_e = a \cdot p^n \quad (3)$$

其中, p 为激光强度; a 是常数,正比于激光脉冲的持续时间。设电离速度为 R_i ,电子二体吸附率为 R_a ,则电子净增加速率为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = (R_i - R_a)N \cdot n_e \quad (4)$$

其中, N 为与气压有关的大气原子密度。上式的物理意义是明显的,它表示单位体积内电子数在单位时间内的增加等于电子数的减少。将该式求解有下式

$$n_e(t) = n_e(0) \cdot e^{(R_i - R_a) \cdot N \cdot t} \quad (5)$$

这表明,在激光辐照时间内,当电子的净增加速率超过在激光辐照时间内形成等离子体所必须的阈值后,电子数目以指数增长(雪崩式),随后就会导致因雪崩电离而产生的等离子通道。可以在几十个纳秒内导致空气电离。

2 实验装置介绍

激光束在空气中聚焦后产生激光等离子体时会伴随着强烈的闪光出现,闪光颜色呈白色,它由多种光谱组成。实验主要是运用HSFC-PRO高速相机对等离子体闪光进行拍摄,对比在不同时间下等离子体的照片来研究等离子体的发展以及变化情况。HSFC-PRO (high speed framing camera)。该超高速相机有四个微通道板(MCP)像增强器,最短曝光时间3 ns,在1 ns帧间隔时间下,超高速记录4张满幅影像,像素1 280×1 024。实验采用Beamtech公司生产的调QYAG激光器,型号为Nimma-600,输出波长为1 064 nm,通过倍频晶体后输出1 064 nm和532 nm波长的光,脉冲宽度为10 ns。

实验中采用的装置及布局如图1所示。

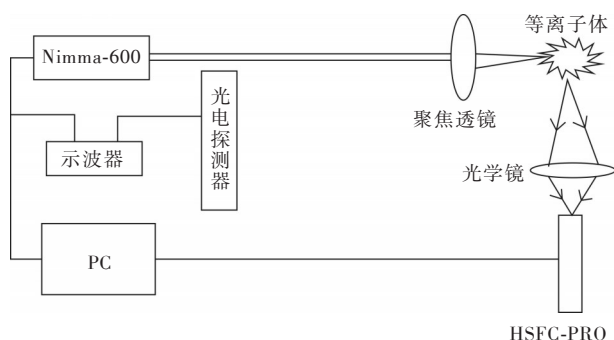


图1 实验装置图

激光束经聚焦透镜后进一步击穿空气,产生等离子体闪光,等离子体闪光经光学镜头处理后被高速相机HSFC-PRO拍摄,结果显示在PC上。利用PC对Nimma-600激光器进行触发,采用光电探测器对激光器被触发后产生激光的延时进行测量。在使用过程中要注意相机的曝光量和聚焦,电磁屏蔽以及同步触发问题。

3 实验结果及分析

对各个装置的延时进行测量,结果发现,高速相机的延时为100 ns,激光器的延时为325 ns。将实验装置搭建完毕,对时序进行安排后,打开高速相机的四个通道,同时记录一次击穿不同延时的等离子体击穿闪光图像。实验中加载在激光器上的驱动电压为880 V,进行了两次空气击穿实验。第一次主要研究等离子体的产生过程,第二次主要研

究等离子体的消失过程,以激光的产生为时刻的零点,曝光时间皆为10 ns。图2为第二次空气击穿实验零时刻的等离子体闪光图。

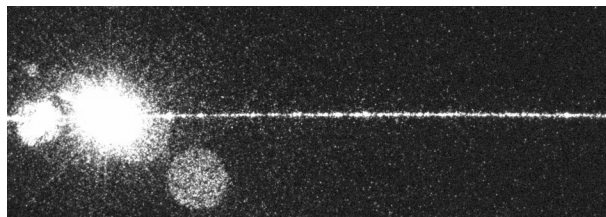
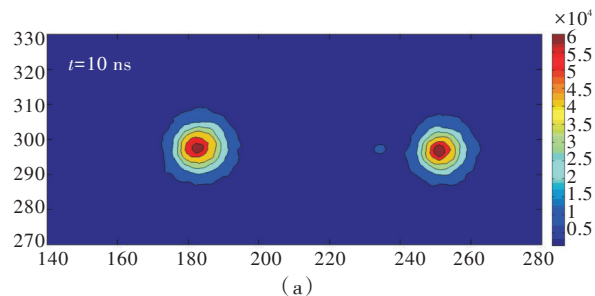


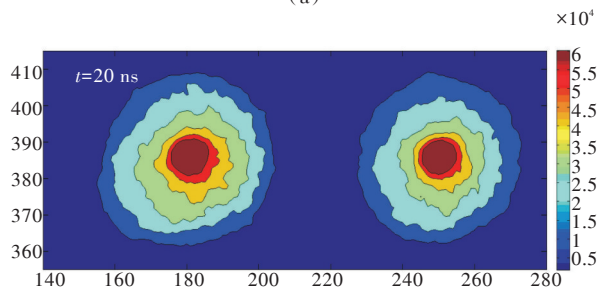
图2 第二次空气击穿实验零时刻等离子体闪光图

从图中可以看出,激光束产生了可观的等离子体,出现了明亮的火花并在实验中听到了啪啪的响声,图中的直线为激光束的传输轨迹。对比激光和等离子体闪光的亮度,可以发现,等离子体闪光的亮度要比激光束还要亮,说明激光击穿等离子体的过程中释放了大量的光子。

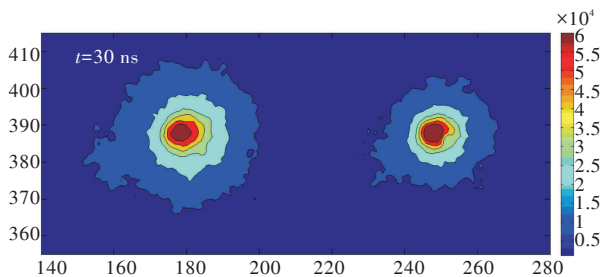
利用matlab对获得的图像数据降噪进行处理,得到第一次和第二次击穿实验的闪光图分别如图3、图4所示。



(a)



(b)



(c)

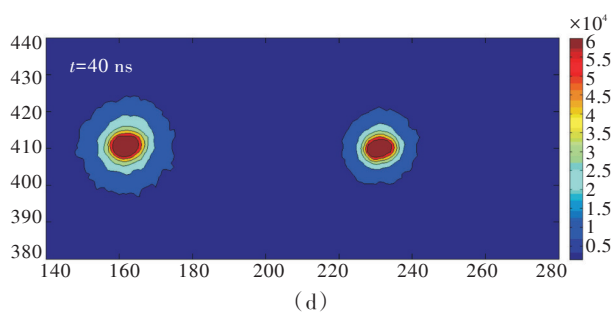


图3 第一次空气击穿实验

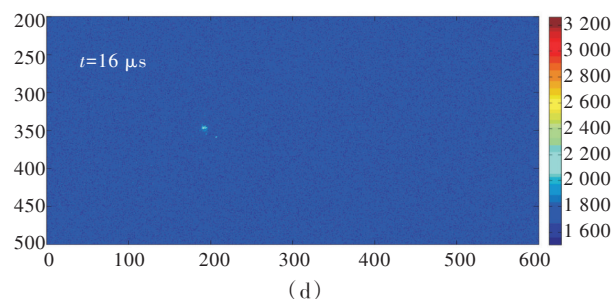
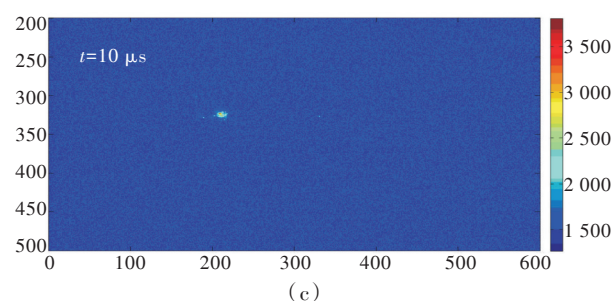
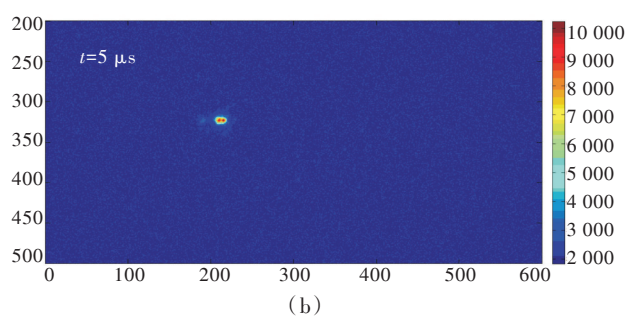
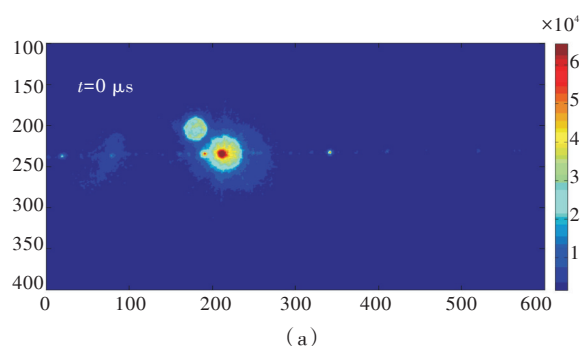


图4 第二次空气击穿实验

对比图3的四幅图像,从中可以看出,激光击穿空气时产生了不连续的两处击穿,这说明激光并不是在激光束的焦点处电离,而是在焦点对称的两边电离,结果与文献[6]一致,认为在长焦距透镜下,空气中易产生多处击穿现象。在 $t \approx 20 \text{ ns}$ 时,等离子体区域发展到最大,且等离子体分布较为均匀,呈圆形均匀分布。考虑到激光脉冲的宽度为 10 ns ,在激光脉冲消失以后,等离子体区域仍继续扩大,说明在激光对空气进行第一阶段的电离以后,电离产生的等离子体发出强光(这在图2中可以观察得到),对周围的空气进一步的电离产生更多的等离子体,与激光电离空气的多元过程理论相一致。当等离子体的产生率与消失率相等时,等离子体区域开始减小,如图3c、图3d所示,等离子体的消逝不再具有均匀性,分析认为是空气的空间不均匀性(如对流)所致。观察图4,可看到激光击穿等离子体后等离子体的消逝过程,从中可以看出,等离子体在产生后大致经过 $16 \mu\text{s}$ 后消失。从图3、图4中可以看出,等离子体区域中心的亮度明显大于边缘的亮度。

4 结 论

激光击穿空气的研究是激光与等离子体相互作用研究的重要内容之一,在各个领域中具有重要的作用。激光引起空气电离是一个包括多光子电离和串级电离两个过程在内的多元过程。通过对等离子体闪光拍摄的研究得出,等离子体在空间上呈现圆形状,当Nimma-600激光器的驱动电压为 880 V ,激光击穿空气时出现明亮的火花并伴有啪啪的响声,等离子体区域的面积在激光脉冲产生后约 20 ns 时达到最大,等离子体从产生到消逝得持续时间大约为 $16 \mu\text{s}$ 。随着大功率和高功率激光器的不断发展,使空气电离的几率极大地增加,空气电离也变得可以被人所控制,这种技术将对现代科学技术和国防建设产生深远的影响。

参考文献

- [1] 杨津基. 气体放电[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [2] 高树香,陈宗柱. 气体导电[M]. 南京:南京工学院出版社,1983.

(下转第78页)

从图中可以得出,经过滤波之后的陀螺数据的信噪比明显提高了,并且将原始信号的噪声限制在了10 Hz以下。将滤波之后的陀螺信号引入到原来的速度闭环中发现系统的带宽还可以继续压低,经过调整校正函数的参数最终将系统的速度环带宽做到了16 Hz左右。图6就是经过滤波且补偿陀螺随机漂移的稳向误差曲线。

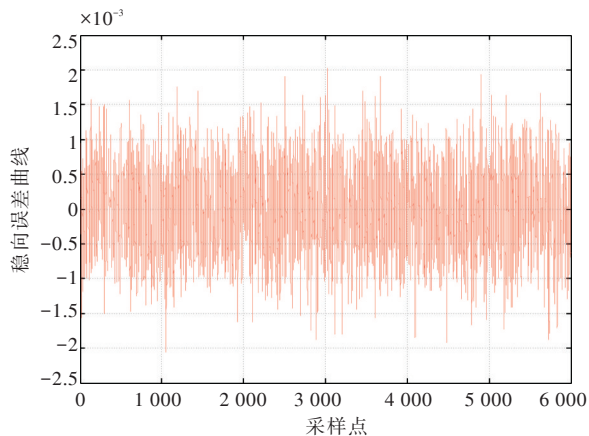


图6 经过滤波且补偿陀螺随机漂移的稳向误差曲线

从图中可以得出,稳向误差在 $\pm 7.2''$ 之间变化,稳向精度明显提高,从而验证了所用方法的有效性。

5 结论

以微机械石英音叉陀螺为研究对象,分析了其

输出噪声的特点,推导出了自适应前向预测滤波的公式,并针对陀螺随机漂移对系统的影响,建立了随机漂移的补偿方法。通过实际验证表明,文中所采用的方法可以有效的提高稳向精度。

参考文献

- [1] 杨培根,龚智炳. 光电惯性技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1999.
- [2] 张亚宁,朱涛,傅军. 基于Allan方差的MEMS陀螺误差分析[J]. 自动化与仪器仪表, 2013.
- [3] 易康,李延志,吴文启. FLP滤波算法在光纤陀螺信号预处理中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(5): 58-62.
- [4] 张海鹏,房建成. MEMS陀螺仪短时间漂移特性实验研究[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(1): 101-104.
- [5] 万俊,潘鸿飞,杨柏军. 陀螺仪随机漂移的测取和数学模型的确立[J]. 微计算机信息, 2003, 19(2): 17-18.
- [6] 潘金艳,朱长纯,樊建民. 微机械陀螺零位误差的研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(4).
- [7] 孙莉. 光电跟踪伺服系统中光纤陀螺滤波算法的应用[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(6).
- [8] 罗护,范大鹏,张智勇,等. 两轴陀螺稳定系统中陀螺安装的几种方法[J]. 兵工学报, 2005, 26(3).
- [9] 邹东明. 舰载光电跟踪设备视轴稳定分析[J]. 兵工自动化, 2003, 22(1): 15-19.
- [10] 孟中. 陀螺滤波在改善伺服系统低速特性中的应用[J]. 压电与声光, 2006, 28(1).

(上接第63页)

- [3] 强希文. 高功率激光表面大气击穿阈值的波长关系[J]. 光学技术, 1995, 5(9): 45-60.
- [4] 张显斌,李恩玲,施卫,等. 激光电离空气的多元过程及其应用[J]. 西安理工大学学报, 2001(17): 314-318.
- [5] Demichelis. Quantum Electronics[J]. IEEE, 1969, J- QE (5): 188.
- [6] 周军. 纳秒激光等离子体和冲击波初始阶段的光学诊断实验研究[D]. 南京:南京理工大学, 2009.
- [7] 孟令轩,延凤平,白燕,等. 产生波长793 nm中空光束

的双包层光纤的优化设计[J]. 光电技术应用, 2017, 32(1): 1-5.

- [8] 李庆轩,杨旭,秦文斌. 大功率半导体激光器防反射损伤技术研究[J]. 光电技术应用, 2017, 32(2): 21-24.
- [9] 李森森,吴凡,吕志伟. 基于液晶空间光调制器的激光近场光束整形[J]. 光电技术应用, 2017, 32(3): 19-23.
- [10] 王毕艺,陈亚楠. 飞秒激光大气等离子体通道诱导放电技术研究[J]. 光电技术应用, 2017, 32(3): 24-25.