

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0131-04

空气呼吸模式激光推进及其等离子体的实验研究

翟冰洁 左都罗 卢 宏 程祖海

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 为了进一步了解激光推进机理, 利用紫外预电离横向激励大气压 CO₂ 激光器进行了推进抛物面光船的实验研究。利用光电二极管探测 He-Ne 激光束强度变化的方法对脉冲激光束作用于光船后产生的空气扰动进行了探测, 实验发现, 抛物面光船的焦距会对光船外部空气扰动造成影响, 长焦距光船的空气扰动可探测到双冲击波结构, 短焦距光船的空气扰动仅探测到单冲击波, 还得到能量为 32 J 单脉冲激光作用短焦距光船, 在激光脉冲开始 5 ms 以后仍能探测到空气扰动的存在。利用单色仪探测了等离子体光谱, 主要对线状光谱随时间的演化过程进行了分析。

关键词 激光技术; 激光推进; 抛物面光船; 等离子体; 空气扰动

中图分类号 TN249; O53 **文献标识码**: A

Experimental Studies on Air-Breathing Laser Propulsion and Plasma Induced by Laser Propulsion

ZHAI Bing-jie, ZUO Du-luo, LU Hong, CHENG Zu-hai

(State Key Lab of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A brief introduces of some experiments about using UV-preionized TEA CO₂ laser pushed parabolic lightcraft is given. Using PIN to probe the intensity variations of a He-Ne laser, the information of the air disturbance due to the laser interact with the lightcraft was obtained. The experiment showed that the focus of the parabolic lightcraft could influence the air-disturbance outside lightcraft. Two shock waves were detected for longer focus, but only one shock waves was detected for short focus, air-disturbance could be detected after 5 millisecond of laser pulse when single pulse with 32 J energy interacted with short focus lightcraft. Using monochromator detecting the spectrum of the plasma, the time evolution process of line spectrum of the plasma has been analysed.

Key words laser technique; laser propulsion; parabolic lightcraft; plasma; air disturbance

1 引 言

1972 年, 美国学者 A. Kantrowitz^[1] 首次提出高功率激光可能用于产生火箭发射的推力, 将小卫星或飞行器送入近地轨道。随着激光技术和航天技术的不断发展, 激光推进的研究日益受到了重视。激光推进按照激光器划分, 包括连续激光推进和脉冲激光推进两种, 其中脉冲激光推进更引人注目。本实验室也主要侧重于脉冲激光推进的研究。脉冲激光推进又包括烧蚀模式和空气呼吸模式^[2,3] 两种, 其中空气呼吸模式利用空气作为气态工质, 不需要消耗飞行器本身的质量, 这样意味着比冲可以达到无限大。在穿越大气层时, 采用空气呼吸模式, 可大幅度地提高飞行器的有效载荷, 提高发射效率。

利用实验室自行研制的紫外预电离横向激励大气压 (TEA) CO₂ 激光器进行了空气等离子体方面的实验研究。一方面进行了空气扰动的测试; 另一方面进行了空气等离子体的光谱探测。通过光谱探测, 分析了激光束照射抛物面光船后, 等离子体中的各种物理过程。

2 抛物面光船垂直推进实验

紫外预电离横向激励大气压 CO₂ 激光器采用通常的电容放电高压脉冲放电电路, 脉冲能量最大可达 65 J, 采用 Marx 高压脉冲发生器放电电路时, 脉冲最大能量可达 115 J。激光脉冲时间波形如图 1 所示。

作者简介: 翟冰洁 (1981—), 女, 山西文水人, 华中科技大学硕士研究生, 主要从事激光推进小型卫星机理研究。

E-mail: zhaibingjie@163.com

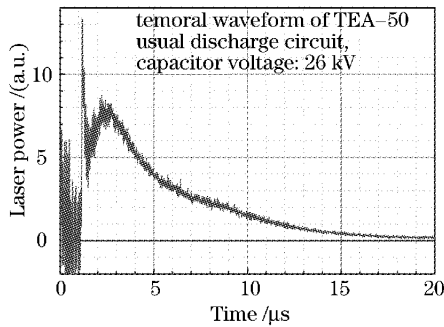


图 1 激光脉冲时间波形

Fig. 1 Laser pulse shape

图 2 是实验记录的激光脉冲能量约 60 J 时的金属丝牵引单脉冲垂直推进的运动轨迹,箭头所指为光船垂直飞行达到的最高点。

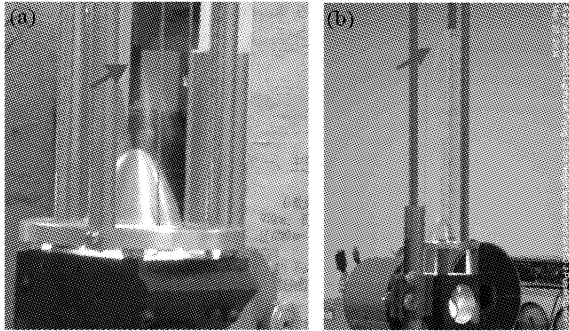


图 2 (a) 18 g 的光船推高 5 cm; (b) 9.2 g 的光船推高 33 cm

Fig. 2 (a) 18 g lightcraft flying 5 cm; (b) 9.2 g lightcraft flying 33 cm

图 2(a) 中的光船,质量为 18 g,垂直飞行高度 5 cm;图 2(b) 中的光船质量为 9.2 g,飞行高度 33 cm。前一光船的工艺较差,质量较重。两个光船都是抛物面光船,抛物面具有相同的几何参量,开口处(底面)直径 60 mm,顶点高 45 mm,焦距(焦点至顶点距离)5 mm。

当忽略重力、空气阻力及和金属丝的摩擦力时,可以用公式

$$C_m = m \sqrt{2gh} / E, \quad (1)$$

来估算冲量耦合系数 C_m , 此处 m 为光船的质量, g 为重力加速度, h 为飞行高度, E 为单脉冲能量。

根据图 2 记录的飞行轨迹和以上公式,可以得到: 18 g 光船, $C_m = 296$ N/MW; 9.2 g 光船, $C_m = 390$ N/MW。虽然这只是由简单实验得到的结果,但应该不会有过大的误差。用(1)式计算冲量耦合系数时,忽略了重力、空气阻力和摩擦力的影响。但忽略这些影响,会使计算得到的耦合系数比实际的小。激光能量是用北京光电所的 M2000B 能量计测

得的结果。在 50 J 以下能量,比较了 M2000B 能量计和加拿大 Gentec 公司 ED-500LIR+ 能量计测量的结果,两种能量计测量结果基本一致。估计脉冲能量数据的误差在 10% 以内,因此冲量耦合系数的误差不应高于 10%。

空气呼吸模式冲量耦合系数比 Schall^[2] 类似条件下所得的数据要高得多,不同的是 Schall 等是通过推进冲击摆测量得到冲量耦合系数。Schall 利用电子束维持放电的脉冲 CO₂ 激光器推进 Myrabo 早期提出的碟形光船实验,得到的冲量耦合系数低于 200 N/MW。推进抛物面光船时,当激光脉冲能量为 60 J,得到的冲量耦合系数为 250 N/MW,脉冲能量增加到 310 J 时,冲量耦合系数可达 320 N/MW。

光船的几何形状不同是冲量耦合系数较高的一个重要原因。使用的光船与 Schall 使用的相比整个光船形状要瘦些(即光船轴线与边沿切线之间的夹角 θ 小些), Ageev^[4] 曾指出瘦的光船有利于提高冲量耦合系数,这是因为 θ 越小,爆轰波垂直于轴向扩散越小,冲量耦合系数就要高些。另外使用的光船焦距为 5 mm,而德国航空空间中心的光船焦距为 10 mm,中国科技大学唐志平等^[3] 也做过水平和垂直推进实验,他们得出的结论是,短焦距有利于提高冲量耦合系数。通过比较我们的实验结果也同样支持这个论述。

另一个重要原因是紫外预电离横向激励大气压 CO₂ 激光器的脉冲时间波形。实验中,紫外预电离放电激励是一种短时间强电流自持放电过程,抽运能瞬时注入激光工作气体(研制的激光器,放电时间约 1 μ s 左右),具有很强的增益开关效应,脉冲开始时有强烈的尖峰,拖尾处下降很快。与此相比,电子束预电离激光器则在尖峰处强度相对要弱些,拖尾处下降慢些。在空气呼吸式激光推进中,尖峰处强的激光能量将使焦点处空气发生电离,产生激光支持爆轰波。如果拖尾处激光能量足够强,等离子体密度将不断增加,当高于特征密度时(10.6 μ m 激光,此值为 9.92×10^{24} m⁻³,对应的空气电离度为 40%) 激光将被完全反射,这就是短脉冲激光有利于提高冲量耦合系数的原因。Myrabo^[5] 也曾指出短脉冲有利于提高冲量耦合系数。

由此可见,高功率、高重复率的紫外预电离横向激励大气压 CO₂ 激光器作为激光推进能量源,有着很大的潜力。现在的任务就是进一步实现强度更大均匀性更好的紫外预电离,以获得大面积、高气压下的脉冲放电,增大激光器的输出能量。Kalinin^[6] 曾

指出利用紫外预电离方式横向激励大气压 CO_2 激光器可以输出 1 kJ 的能量。

3 空气扰动实验研究

实验装置如图 3 所示,使用的激光器如上述介绍。激光束从激光器发出作用于抛物面光船,使用了两种不同几何参量的铝制抛物面光船,一种焦距为 5 mm,高为 45 mm,底面直径为 60 mm;另一种焦距为 10 mm,高 22.5 mm,底面直径与前一种光船相同。激光束经抛物面光船聚焦后在焦点附近使空气发生电离产生等离子体,由于激光脉冲持续时间比生成和激发等离子体的时间要长,等离子体一旦被激发,将更加有效地吸收脉冲的剩余能量。在焦点附近形成激光支持燃烧波或爆轰波,波后为高温高压气体。最初,爆轰波的波阵面为球形,其中部分逆激光束方向传播的波将直接逃逸出光船,称之为直接波。顺激光束方向传播的波将被光船反射,称之为反射波。光船的推力就产生于爆轰波的反射过程。由于反射波受到激光束的两次加热,一般而言,反射波的传播速度比直接波快^[2]。燃烧波或爆轰波会加热波前的气体并推动波前的气体高速运动,产生空气扰动,空气扰动导致空气折射率发生变化。He-Ne 激光束从侧面照射过来时,如存在空气扰动,激光束就会产生偏折,此时与激光束在同一直线上的光电二极管(PD1)接收到的激光能量就会减少。测试空气扰动的实验就是利用这个原理进行的。实验中使用的光电二极管型号为 2GS02,武汉大学半导体厂生产,光电二极管的特征参量如下:响应时间 2 ns,响应波长 400~1100 nm,反向光电流典型值 0.5 μA 。光电二极管转换后的电信号使用 Tektronix 数字示波器 TDS430A 探测。实验结果如图 4 所示。

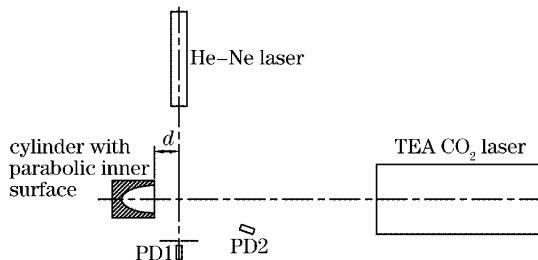


图 3 实验装置简图

Fig. 3 Experiment equipment

在开始处出现了一个大的尖峰,这是激光作用光船后,在焦点附近产生的等离子体发光所致。从图 4 可看到等离子体发光大概持续 64 μs 。等离子体发光

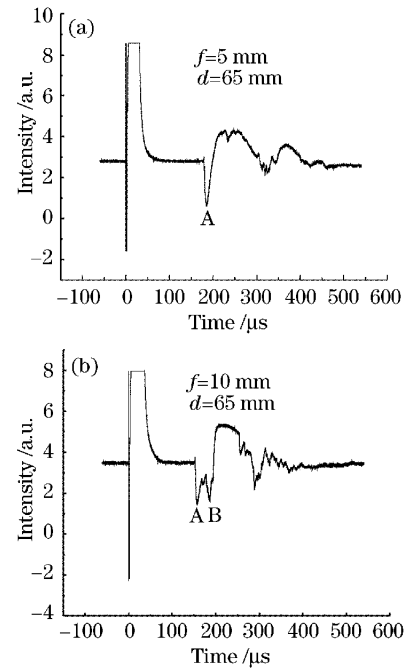


图 4 焦距为 5 mm (a), 10 mm (b) 时光船测得的空气扰动图

Fig. 4 Curve of air disturbance when the focus is 5 mm (a) and 10 mm (b)

结束后,当冲击波传播到探测位置时,曲线上出现由于空气扰动导致的尖峰。出现尖峰是冲击波后的热空气引起的。焦距短的光船在距光船口 65 mm 处测得的空气扰动只有一个峰值,在图 4(a)中 A 处;而焦距长的光船在相同距离处却出现两个峰,在图 4(b)中 A, B 两尖峰处,这是因为光船的焦距不同造成的。当焦距短时,发射波速度比直接传播的波快,在测量处反射冲击波追上了直接传播的波,两者合并为一个,因此只观察到一个峰。而焦距长时,虽然反射波速度快些,但由于焦距较长,反射波无法追上直接传播的波,因此探测到两个空气扰动峰值。

此外,空气扰动向光船外传播时,引起的空气折射率的不均匀性会对后续激光的传输造成影响,进而影响传递给光船的冲量耦合系数,限制了可使用的激光器重复频率,基于以上原因,探测了单脉冲激光作用于光船后,空气扰动可传输的最远距离。实验中单脉冲激光能量为 32 J,作用光船后发现在距光船口 1640 mm 处仍能观察到空气扰动,不过此时很微弱。即在脉冲开始后 5ms 还能探测到的反射波产生的空气扰动。

4 等离子体光谱实验

实验装置如图 5 所示,光源同上。激光器工作

在单次触发状态,激光能量固定在 35 J/pulse。脉冲激光束作用于焦距为 5 mm 的抛物面光船,等离子体发出的光经反射镜改变传播方向后,再经过焦距为 200 mm 成像透镜成像于单色仪的入射狭缝处,单色仪的分辨率为 0.02 nm。单色仪的输出信号经光电倍增管(R456)送入 Tektronix 数字示波器 TDS430A 观察。

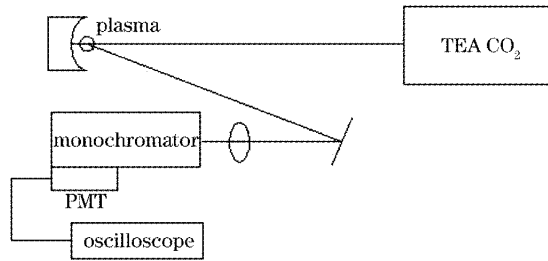


图 5 等离子体光谱探测实验装置简图

Fig. 5 Experiment equipment of detecting spectrum of the plasma

激光大气等离子体光谱是由叠加于连续谱上的线状光谱组成的^[7]。实验中,主要对波长在 300~900nm 的线状光谱进行了研究。将光谱仪的波长

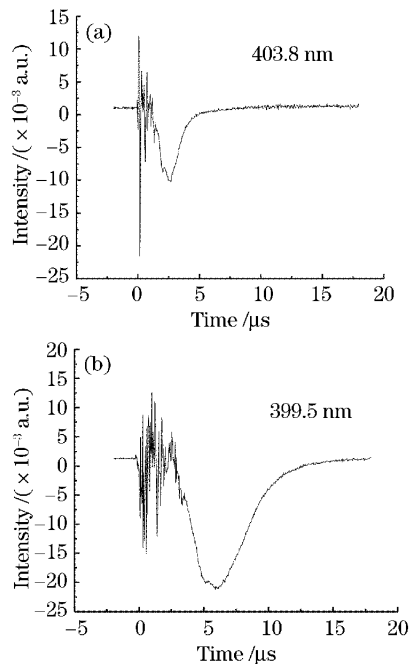


图 6 等离子体线状光谱的时间演化曲线

Fig. 6 Time evolvement process of line spectrum of the plasma

置于要研究的特定谱线的位置,然后用数字示波器捕捉并记录其光谱信号的时间演化特性。实验发现,空气等离子体的线状光谱主要来自空气的主要成分 N_2 和 O_2 的分子、原子和离子激发态的自发辐射。

从测得的线状光谱时间演化过程看,初期的线状光谱主要是由 N_2 和 O_2 的离子谱线组成的。且发现在初始激发光谱中出现的这些离子谱线大部分呈现出很快的衰减速率,大约在 $5 \mu s$ 后,这些离子谱线基本上衰减到零,典型谱线如图 6(a)所示。此支谱线是 N^+ 从 $4f(^3D)$ 跃迁到 $3d(^3F_0)$ 产生的。但是也存在个别离子谱线寿命很长,如图 6(b)所示。谱线大约在 $11 \mu s$ 后才衰减到零,这一谱线是 N^+ 从 $4p(^1D)$ 跃迁到 $3s(^1P_0)$ 产生的。

5 结 论

对等离子体光谱仅进行了上述初步的分析,对等离子体中其他物理过程的进一步分析,还有待于继续进行深入的实验。目的是想通过对等离子体光谱的探测,获得单脉冲激光束作用于抛物面光船后,等离子体中电子温度和电子密度的信息,通过这方面的研究有助于我们更好地了解激光推进机理,优化推进过程。

参 考 文 献

- 1 A. Kantrowitz. Propulsion to orbit by ground-based lasers [J]. *Astronautics and Aeronautics*, 1972, **10**(5): 74~76
- 2 Wolfgang O. Schall, Willy L. Bohn, Hans-Albert Eckel *et al.*. Lightcraft experiments in Germany [C]. *SPIE*, 2000, **4065**: 472~481
- 3 Zhiping Tang, Ping Gong, Xiaojun Hu *et al.*. Experimental investigation on air-breathing mode of laser propulsion [R]. *AIP Conference Proceedings*, 2003, **702**: 23~30
- 4 V. P. Ageev, A. I. Barchukov, F. V. Bunkin *et al.*. Experimental and theoretical modeling of laser propulsion [J]. *Acta Astronautica*, 1980, **7**: 79~90
- 5 L. N. Myrabo. The Apollo lightcraft project [R]. NASA/USRA Advanced Design Progra Rensselaer Polytech Institute, 1989
- 6 V. P. Kalinin, D. A. Goryachkin, V. M. Gromovenko *et al.*. Feasible configurations of repetitively-pulsed TEA CO_2 laser with small angular divergence and 1 kJ-pulse energy [C]. *SPIE*, 1998, **3574**: 187~202
- 7 Lin Zhaoxiang, Li Xiaoyin, Cheng Xuewu *et al.*. The spectrum analysis on the time evolvement peculiarity of laser air plasmas [J]. *Spectrum and Spectrum Analysis*, 2003, **23**(3): 421~424
林兆祥, 李小银, 程学武 等. 激光大气等离子体时间演化特性的光谱研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2003, **23**(3): 421~424