

光纤传输激光驱动飞片实验研究*

赵兴海[†] 赵翔 高杨 席仕伟 苏伟

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 绵阳 621900)

(2010年10月26日收到; 2011年2月18日收到修改稿)

构建了一种基于光纤传输高功率激光的飞片发射系统, 并测试了飞片速度. 飞片膜层为三明治结构: 铝烧蚀层、氧化铝隔离层和铝飞片产生层. 飞片膜层采用磁控溅射技术沉积在玻璃衬底上, 总厚度为 $5.5\ \mu\text{m}$. 激光辐照铝膜层产生高温高压等离子体, 驱动剩余膜层产生高速飞片, 速度达数 km/s . 同时, 实验研究了光纤传能系统的输出激光空间分布特性和传输激光能量容量, 它们决定了飞片的平面性和最大速度. 光纤端面损伤是限制光纤传输激光能量容量的关键因素, 光纤端面通过精密机械抛光和激光预处理可以获得理想的抗激光损伤能力. 采用基于光纤阵列探针的时间序列测试技术获得了飞片的平均速度, 并评估了飞片的平面性. 采用搭建的基于光纤传输高功率激光的飞片发射系统获得了速度达 $1.7\ \text{km/s}$ 、直径接近 $1\ \text{mm}$ 的高速飞片.

关键词: 激光驱动飞片, 激光辐照, 光纤阵列探针, 激光等离子体

PACS: 82.50.-m, 42.62.-b, 07.60.Vg, 52.50.Lp

1. 引言

激光驱动飞片是利用激光能量辐照镀在光学窗口(或光纤端面)上的金属膜(或复合介质膜), 部分金属膜烧蚀气化产生高温、高压、高密度等离子体, 驱动剩余金属膜高速发射形成飞片. 激光驱动飞片撞击目标靶可以产生 100GPa — TPa 的冲击压力, 因此该技术在冲击起爆、高压加载、模拟太空高速粒子等方面有重要的应用价值. 美国的洛斯阿拉莫斯国家实验室、海军实验室以及空军菲利普斯实验室等都相继建立了不同能量的激光驱动飞片装置^[1,2]. 激光驱动飞片的研究开始于 20 世纪 70 年代^[3]. 但是真正的激光驱动飞片起爆技术研究盛行于 20 世纪 90 年代以后. 激光器一般采用波长为 $1.064\ \mu\text{m}$ 、脉宽为 10 — $30\ \text{ns}$ 的调 Q YAG 激光器, 金属薄膜选用 Al 或 Cu. 激光驱动飞片起爆技术满足时间控制精度高、响应迅速、抗电磁干扰, 并且起爆炸药的可靠性最高, 满足现代引信需求, 成为各国研究的重点^[4-6]. 飞片速度和平面性是激光驱动飞片系统的重要技术指标. 飞片速度越快、平面性

越好, 冲击能力越强. 飞片速度大小与辐照激光能量密度和膜层构成直接相关; 飞片平面性与辐照激光模式和镀膜质量有关. 因此, 激光驱动飞片系统研制的关键为激光传输系统设计和飞片结构设计. 采用多模石英光纤传输激光技术具有高传输容量、体积小、便于集成、输出激光能量“平顶”分布等优点, 因此在激光驱动飞片系统中采用光纤传能是系统小型化、实用化的关键. 但是光纤传能也有自身的缺点, 比如光纤损伤限制传输容量、光纤弯曲引起模式变化、光纤端面和体内引起的能量损耗等. 光纤传能的缺陷和飞片动能转化效率低限制了基于光纤传输的激光驱动飞片发射系统的发展. Trott 等在 20 世纪 90 年代开展了光纤传导激光束驱动飞片的技术研究, 利用芯径 $0.2\ \text{mm}$ 的石英光纤传输激光, 获得了 $2.3\ \text{km/s}$ 的飞片速度^[4], 2000 年, 又利用芯径为 $0.4\ \text{mm}$ 的光纤端面淀积约 $10\ \mu\text{m}$ 厚的铝膜, 传导脉宽 $25\ \text{ns}$ 、单脉冲能量 $30\ \text{mJ}$ 的激光后产生了速度达 $3\ \text{km/s}$ 飞片, 激光能量转化率为 35% . 英国原子武器公司的 Bowden 等人利用光纤传输 Nd:YAG 激光辐照铝箔形成了速度为 $4\ \text{km/s}$ 飞片^[7]. 目前为止, 在国内未见采用光纤传输

* 中国工程物理研究院科学技术发展基金重点课题(批准号:2007A05001)和中国工程物理研究院电子工程研究所科技创新基金(批准号:S20070202)资助的课题.

[†] E-mail: xinghaiuestc@126.com

激光驱动飞片研究的公开报道. 本文研究了多模石英光纤传输高峰值功率激光特性, 设计了复合飞片结构, 搭建了光纤传输激光驱动飞片系统并采用一种实用化的方法测量了飞片速度.

2. 实验

2.1. 实验设计

光纤传输激光驱动飞片实验装置示意图如图 1 所示, 主要由 YAG 激光器、聚焦系统、多模光纤、加

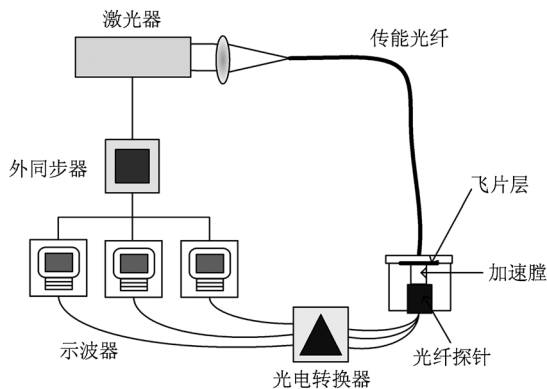


图 1 光纤传输激光驱动飞片实验装置示意图

速腔部件以及光纤探针测试系统构成. 光源为波长 1064 nm、脉宽 15 ns 的调 Q Nd:YAG 激光器, 输出激光为 TEM₀₀ 模. 光纤为多模阶跃折射率石英光纤、芯径为 600 μm、长度为 2 m、数值孔径 (NA) 为 0.22. 光纤探针测试系统由光纤束探头、光电转换器、高速示波器和同步机组成. 激光通过透镜耦合进光纤中, 光纤输出端与镀有复合膜层的 K9 玻璃对接, 光纤输出激光辐照膜层形成飞片, 飞片经过固定长度的加速腔后, 撞击到光纤探头上获得探测信号.

2.2. 光纤传能特性

利用图 1 所示的实验装置, 测量光纤输入输出端的激光能量, 调节光纤五维调整架获得最大耦合效率. 对于芯径 600 μm 的多模石英光纤可以支持上千种传输模式, 因此通过光纤微弯、宏弯、应力等作用使得各种模式在光纤内剧烈耦合, 导致光纤输出激光能量分布“匀化”^[8], 输出模式如图 2 所示. 多模光纤对传输激光空间分布的匀化作用, 对于激光驱动飞片技术是十分有利的. 这种近似平顶分布的激光脉冲辐照金属膜或者复合膜时, 在光斑辐照范围内产生均等的烧蚀效果, 产生的飞片平面性好且不易破碎.

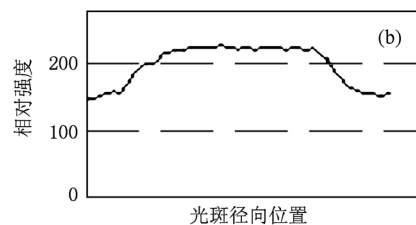
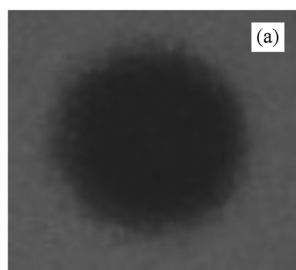


图 2 光纤输出激光能量分布 (a) 光纤输出激光烧蚀场照片; (b) 光纤输出激光远场分布

根据目前研究来看, 激光能量转化为飞片动能的效率还很低, 因此为了获得足够高的飞片速度, 必须提高辐照激光能量. 当飞片结构确定的情况下, 辐照激光能量密度越高, 产生飞片速度越高. 但对于光纤来说, 光纤输入端面损伤和初始输入段损伤严重限制光纤传输激光能量容量^[9]. 大量的实验研究表明光纤端面精密机械抛光和激光预处理可以显著提高光纤端面损伤阈值^[9,10]. 实验用光纤端面粗糙度为 10—50 nm (图 3). 通过测试筛选出输出能量大于 50 mJ (脉宽 15 ns) 的光纤进行激光驱动飞片实验^[11].

2.3. 激光驱动飞片机理

聚焦激光光束或者光纤输出光束透过光学玻璃窗口辐照在沉积于该光学窗口背面上的金属膜或者复合膜上 (图 4), 膜层吸收入射激光能量而发生烧蚀和汽化, 形成微型烧蚀腔, 产生的高温、高压等离子体急剧膨胀, 继续吸收后续激光能量, 产生很高的推动力. Fabbro 根据能量守恒原理, 推导出激光产生冲击波的峰值压力计算公式^[12]

$$P = 0.1 \left(\frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right)^{1/2} Z^{1/2} \times I_0^{1/2}, \quad (1)$$

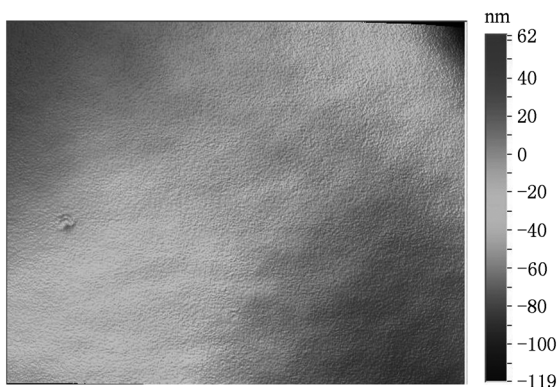


图3 实验用光纤端面粗糙度

$$L(\tau) = 2 \times 10^4 P \tau \times Z^{-1}. \quad (2)$$

式中 P 为激光产生峰值压力(单位为 kbar, $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$); α 为常数,通常取 $\alpha = 0.1\text{—}0.2$; Z 为基板与膜层间的声阻抗(单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{S}$); I_0 为激光功率密度(单位为 $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$); L 为等离子层厚度(单位为 μm); τ 为激光脉宽(单位为 ns).

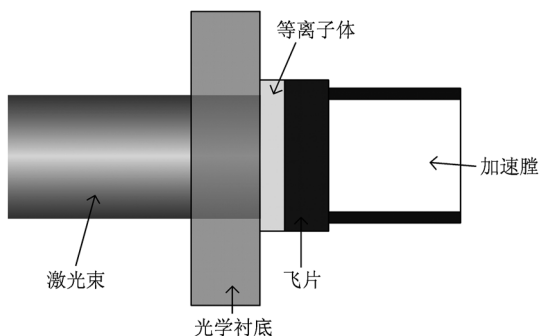


图4 激光驱动飞片示意图

由于膜层的厚度与激光束直径相比非常小,可以认为等离子体的膨胀是一维的,同时逆着等离子体的方向(即入射激光方向)的膨胀受到玻璃窗口的限制,等离子体只能沿着入射激光方向膨胀,并向前方膜层施加一个很大推力.此时,在加速腔内缘处的膜层内存在着非常大的剪切应力,当剪切应力超过膜层的抗剪强度时,剩余未蒸发薄膜就沿着加速腔内缘被切断并向前飞出形成飞片.在激光脉冲周期时间量级内,飞片沿着加速腔被加速到非常高的速度,可达数 km/s .

飞片的速度与辐照激光能量密度有直接的关系.美国圣地亚国家实验室的 Lawrence 等成功地将爆炸力学中的 Gurney 模型应用到激光驱动飞片的理论研究之中,建立了改进的 Gurney 模型^[13],可以

获得飞片速度预测公式为

$$v = \sqrt{\frac{3E}{3x_0/2x_d - 1}} \quad (3)$$

它体现了激光驱动飞片速度与激光能量密度之间的关系,式中

$$E = \frac{I_0(1-r)}{\rho x_d} - \varepsilon_d \left(1 + \frac{1}{\mu_{\text{eff}} \rho x_d}\right). \quad (4)$$

其中, I_0 为激光能量密度, (4) 式中 E 代表 Gurney 能, x_d 为激光烧蚀厚度, x_0 为片膜层总厚度, ρ 为飞片密度 (2.7 g/cm^3), μ_{eff} 是有效吸收因子 ($1.01 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{g}$), r 是能量损耗因子(包括反射和辐射损耗), 材料的气化能为 ε_d (12 kJ/g).

2.4. 飞片设计与制备

用于产生飞片的膜层一般来说分为两层:烧蚀层(产生等离子体)和剩余层(形成飞片).采用一定厚度的金属(Al 或 Cu)膜层,可以实现飞片的激发.为了得到足够高的飞片速度,必须获得金属的厚度、激光能量密度与烧蚀深度之间的关系,这是飞片结构设计的关键.另外,金属膜层的镀膜质量(致密度、粗糙度、附着力等)对飞片速度也有一定的影响.如果膜层具有亮点、气泡等缺陷,情况严重的会造成了铝膜的脱落.如图 5 所示,在膜层与玻璃的界面处存在大量的气泡,会严重影响激光与物质的作用过程且容易脱落.经过工艺改进后,获得较好质量的镀膜(图 6),表面粗糙度为 10 nm .当激光功率密度 $1\text{—}20 \text{ GW/cm}^2$,激光辐照能量到飞片动能的转化效率为 30% 左右.对于单金属层结构,由于等离子体高温高压作用,容易让飞片破碎.采用复合膜结构,在中间加入隔离介质层,可以有效阻止热传导和增强冲击波强度^[14],从而增强飞片的完整性,提高飞片速度.目前研究主要采用 $\text{Mg}/\text{MgF}_2/\text{Cu}$ 和 $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 两种复合膜结构.本文实验用复合膜为 $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ “三明治”结构.首先采用真空磁控溅射的方式在光学玻璃基片上镀一层金属 Al,厚度一般小于 $1 \mu\text{m}$,作为烧蚀层产生足够多的高温高压等离子体;然后通过氧化法生长一层 Al_2O_3 ,作为绝缘层,它的厚度一般数百 nm ;最后再在 Al_2O_3 上溅射一层金属 Al,在等离子体的抛射下形成高速飞片,这一层一般较厚(几个 μm 至十个 μm),根据辐照激光能量密度和相关应用需求而改变.

2.5. 飞片速度测量

飞片速度是激光驱动飞片系统最主要的特性

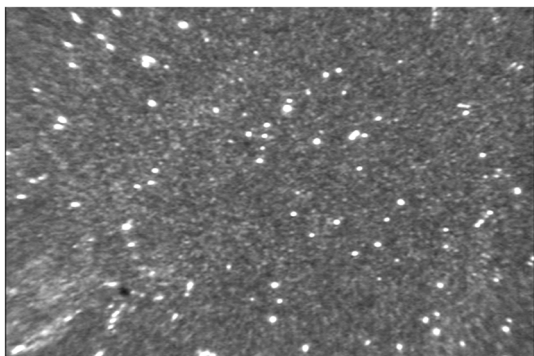


图5 镀膜质量较差情况

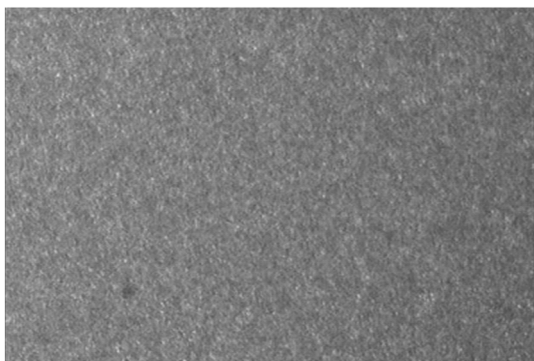


图6 镀膜质量较好的情况

参数,利用飞片速度作为目标参量,来优化系统设计. 目前国际上开展激光驱动飞片的实验研究中对飞片速度测量方法一般有两种:一种是采用激光速度干涉仪 (Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR) 或光学记录的激光速度干涉仪 (Optically Recording Velocity Interferometer System, ORVIS) 来测量飞片的速度历史;另一种是利用高速变相管相机对飞片的飞行过程进行照相. ORVIS 采用光学记录的方法. 但是 ORVIS 的技术难度高,对仪器的要求十分严格,数据处理困难,同时价格昂贵、使用条件苛刻. 利用高速变相管相机对飞片的飞行过程进行照相也可以测量飞片的速度,由于飞片的尺寸很小,飞行距离很短,因此需要建立一套显微照像系统. 同时,照明、杂散光的去除等都是十分困难的事情.

采用光纤探针来测量飞片在通过某段距离的起始时刻和到达时刻就可以计算出飞片的平均速度,该方法简单、快速、装置简洁、便携. 光纤探针测速原理如图7所示,激光辐照金属薄片,产生发光等离子,此时光纤探针接收到泄露信号,记录下此刻作为飞片启动时刻 t_1 ,飞片在加速腔内高速飞行,

经过一段距离 ΔS ,打到光纤端面. 当飞片到达探针端面时由于冲击压力的作用石英光纤会产生光辐射,通过检测这种光辐射就可以获得飞片的到达时间 t_2 . 光纤探针所用的记录系统由光电倍增管和数字示波器组成. 其中光电倍增管的脉冲响应时间应小于 0.5 ns , 数字示波器的采样率达 5 GSa/s , 模拟带宽 1 GHz . 这是取得亚纳秒时间响应信号的重要保证. 因此,可以获得飞片的飞行时间 $\Delta t = t_2 - t_1$, 便可求出飞片的平均速度

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta S}{t_2 - t_1}. \quad (5)$$

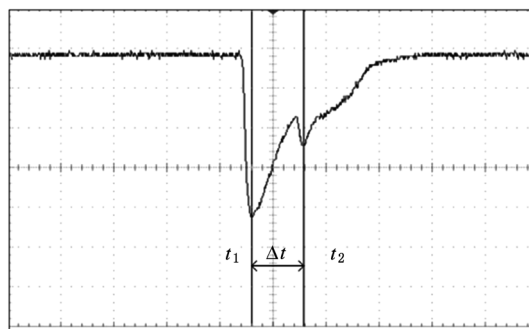


图7 飞片撞击目标靶获得的时间信号曲线(两个峰值点分别代表激光辐照飞片时刻信号和飞片撞击探针时刻信号)

3. 测试结果

采用不同的激光能量辐照沉淀于玻璃衬底上的复合膜,获得的飞片速度如图8所示. 当辐照激光能量小于 10 mJ (能量密度为 1.5 J/cm^2), 飞片不能被驱动. 辐照激光能量密度越大,飞片速度越高,它们关系符合改进型 Gurney 模型(见(3)式). 由于受光纤传输容量的限制,最大输出激光能量 50 mJ (能量密度为 7.5 J/cm^2), 此时获得飞片平均速度为 1.7 km/s , 动能转化效率为 30% .

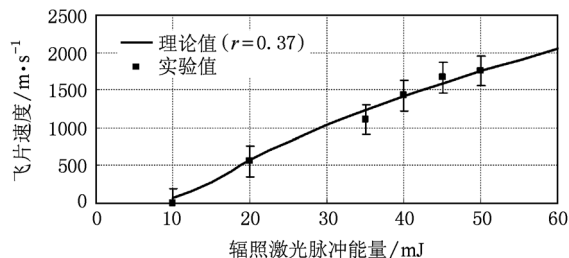


图8 飞片速度与辐照激光能量关系(此时,取光斑 $R = 0.46 \text{ mm}$, 能量损耗因子 $r = 0.37$, 脉冲宽度 $t = 15 \text{ ns}$, 每个点代表3个数据的平均值)

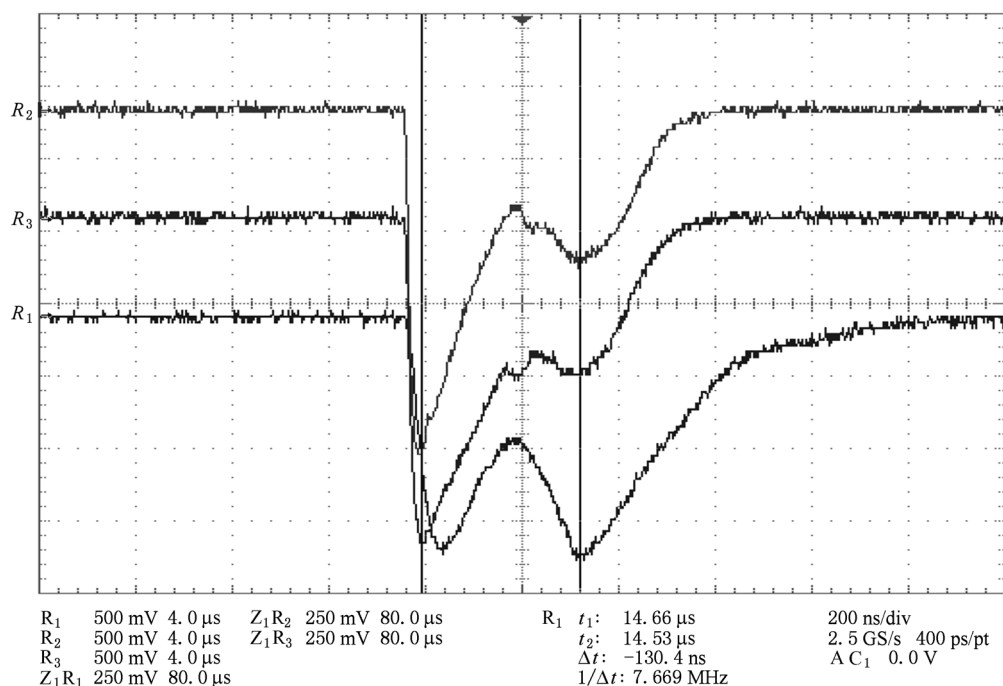


图9 飞片平面性测量时间信号曲线

如图9为典型的飞片速度测量时间信号曲线,这3条曲线由飞片平面内3个不同部位冲击光纤探头获得.由图9可知,3条曲线的峰值基本重合,

说明飞片面内3个不同的部位几乎同时撞击靶面,飞片平面性较好.如图10由膜层剥离形貌和撞击有机玻璃(PMMA)板形貌印证了这个结论.

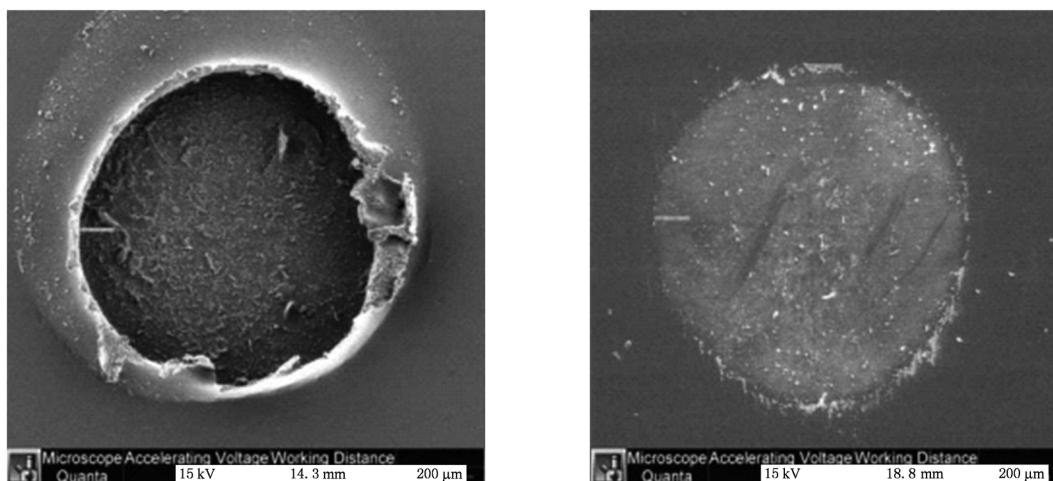


图10 飞片冲击试验 (a)飞片剥离形貌;(b)撞击PMMA板形貌

4. 结 论

实验研究了基于光纤传输激光驱动飞片技术,成功驱动飞片,并采用冲击作用下快响应光纤探针技术测试了飞片的平均速度,最高达1.7 km/s. 优

化了光纤传能系统,获得大于50 mJ(脉宽15 ns)的激光脉冲可靠输出,为驱动飞片提供了足够的激光能量.设计复合结构飞片,通过实验证明这种复合结构可以获得较高的激光能量利用率,达到30%.通过光纤阵列探针法可以简洁、快速的测量飞片的平均速度和评估飞片的平面性.采用光纤传输激光

技术,可以获得数千米每秒的高速飞片,为激光驱动飞片系统的小型化和实用化提供了保障.

感谢中国工程物理研究院流体物理研究所王荣波、何莉华、李泽仁同志对飞片速度测量工作的支持.

- [1] Roybal R, Tlomarck P 1997 *Aerospace Industry Analysis Association (AIAA) Report* A9741727
- [2] Obenschain S P, Lehmborg R H, Ripin B H 1980 *Appl. Phys. Lett.* **37** 903
- [3] Krehl P, Schwirzke F, Cooper A W 1975 *J. Appl. Phys.* **46** 4400
- [4] Trott W M, Meeks K D 1990 *J. Appl. Phys.* **67** 3297
- [5] Paisley D L 1989 *Los Alamos National Laboratory Report* LA-UR-89-2723
- [6] Watson S, Field J E 2000 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33** 170
- [7] Bowden M D, Drake R C 2007 *Proc. SPIE* **6662** 66620D-1
- [8] Zhao X H, Gao Y, Xu M J, Duan W T, Yu H W 2008 *Infrar. Laser Eng.* **37** 444 (in Chinese)[赵兴海、高杨、徐美健、段文涛、於海武 2008 红外与激光工程 **37** 444]
- [9] Zhao X H, Hu J P, Gao Y, Ma P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3917 (in Chinese)[赵兴海、胡建平、高杨、潘峰、马平 2010 物理学报 **59** 3917]
- [10] Wang F R, Huang J, Liu H J, Zhou X D, Jiang X D, Wu W D, Zheng W G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5122 (in Chinese)[王凤蕊、黄进、刘红婕、周信达、蒋晓东、吴卫东、郑万国 2010 物理学报 **59** 5122]
- [11] Zhao X H, Gao Y, Xu M J, Duan W T, Yu H W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5027 (in Chinese)[赵兴海、高杨、徐美健、段文涛、於海武 2008 物理学报 **57** 5027]
- [12] Fabbro R, Fournier J, Ballard P 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 775
- [13] Lawrence R J, Trott W M 1993 *Int. J. Impact Eng.* **14** 439
- [14] Gu Y Y, Zhang Y K, Zhang X Q, Shi J G 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5885 (in Chinese)[顾永玉、张永康、张兴权、史建国 2006 物理学报 **55** 5885]

Fiber-coupled laser-driven flyer plates experiments*

Zhao Xing-Hai[†] Zhao Xiang Gao Yang Xi Shi-Wei Su Wei

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 26 October 2010; revised manuscript received 18 February 2011)

Abstract

A system for the launch of hypervelocity flyer plates is developed, characterized and applied. Laser-driven flyers are launched from substrate backed aluminum-alumina- aluminum sandwiched films. A laser-induced plasma is used to drive flyers with a thicknesses of a 5.5 μm and a diameter of less than 1 mm, and typically, the flyer plates can achieve velocities of a few kilometers per second. These flyer plates have several applications ranging from micrometeorite simulation to laser ignition. The flyer plates considered here have three layers: an ablation layer for forming plasma; an insulating layer; and a final thicker layer for forming the final flyer plate. The optical fiber delivery system determines the spatial profile of the laser spot and power capacity. A technique and procedure for coupling high power laser pulse into optical fiber is developed. The surface finish of the fiber is found to be a critical factor. This fiber optic system is successfully used to launch flyer plates. Measurements of the flyer performance including the mean velocities and planarity are made by an optical time-of-arrival (TOA) technique with using an optical fiber array probe. The flyer shows a good planarity and achieves an average velocity of 1.7 km/s. The relationship between flyer velocity and incident laser pulse energy is investigated.

Keywords: laser-driven flyer, laser irradiation, optical fiber array probe, laser plasma

PACS: 82.50.-m, 42.62.-b, 07.60.Vg, 52.50.Lp

* Project supported by the Key Program of Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics, China (Grant No. 2007A05001) and the Science and Technology Innovation Foundation of Institute of Electronic of Engineering, China Academy of Engineering Physics, China (Grant No. S20070202).

[†] E-mail: xinghaiuestc@126.com