

LSD波点燃和初始阶段传播的光学干涉研究*

陆建 倪晓武 贺安之

(南京理工大学应用物理系, 南京, 210094)

摘要: 本文首先从动力学出发分析了 LSD 波点燃过程, 导出了 LSD 波速度、压力等物理量表达式。用马赫-曾德尔干涉仪同步研究了 Nd:YAG 激光与铝靶表面相互作用过程, 首次获得了 LSD 波点燃和初始阶段传播的系列干涉图象, 为 LSD 波理论模型研究提供了可靠实验数据。

关键词: LSD 波 激光等离子体 光学干涉仪 高功率激光

Investigation of ignition and propagation features of laser-supported-detonation wave using interference pattern

Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi

(Department of Applied Physics., Nanjing University of Science & Technology)

Abstract: According to aerodynamics, ignition process of the laser-supported-detonation (LSD) wave is analyzed and the expressions of the propagation speed, pressure and internal energy of laser-supported-detonation (LSD) wave are derived. The interaction of Nd:YAG laser beam and a pure Al target plate is experimentally investigated with a Mach-Zehnder interferometer, and the series of interferograms of ignition and propagation process of LSD wave are obtained. The propagation speeds obtained from the theoretical calculation and experimental results are 2.54×10^4 m/s and 2.2×10^4 m/s at the moment of 20ns time delay, respectively. The time variation curve of the propagation speed of LSD wave and the distribution of the electron density in plasma are measured. These experimental results are useful to the research on the theoretical model of LSD wave.

Key words: LSD wave laser plasma optical interferometer high-power laser

一、引言

高功率激光和固体靶材相互作用时, 靶材表面由于在短时间内温度骤增, 并且由于材料表面的缺陷, 出现强汽化, 最后形成高温高密度等离子体, 这种等离子体能够吸收大量的激光能量, 之后以一定速度离开靶面逆激光方向传播, 这就是激光支持吸收波(LSA)^[1]。激光支持吸收波分为两种, 一种以超声速传播, 叫做激光支持爆轰波(LSD), 另一种是以亚声速传播, 叫做激光支持燃烧波(LSC)。激光支持爆轰波的产生叫做 LSD 波点燃。LSD 波点燃和传播过程是一个非常复杂的研究课题, 它涉及到空气动力学, 等离子体物理学, 热力学和激光技术等学科。LSD 波点燃直接与激光功率密度、脉冲波形、激光能量、靶材结构、聚焦参数和环境有密切关系。虽然 W. E. Maher 和 R. B. Hall 等人^[2,3]已经应用高速摄影机、光学干涉仪和时间扫描干涉仪等方法研究了 LSD 波的点燃阈值和传播过程, 但是 LSD 波点燃过程和之后初始

* 霍英东教育基金会基金资助。

阶段传播的研究却不尽人意,缺乏有力的实验数据。本文中报道了用光学马赫-曾德尔干涉仪同步研究了 YAG 调 Q 激光与铝靶表面相互作用过程,首次获得 LSD 波点燃和传播初始阶段的系列干涉图象,由这些干涉图象能够全面地获取 LSD 波点燃阶段的物理参数,为 LSD 波点燃理论模拟研究提供可靠实验依据。

二、LSD 波的点燃和传播

LSD 波的点燃是激光与靶材料表面相互作用产生的等离子体膨胀的结果。这种等离子体几乎全部吸收入射激光能量,而使激光能量不能达到材料表面。等离子体的膨胀波前和空气的过密区相连,从而出现明显的冲击波前,因此,由于等离子体的快速膨胀,而在靶前空气中产生 LSD 波。设冲击波前前后的气体密度分别为 ρ_0, ρ , 冲击波速度为 D , 冲击波后气体粒子速度为 v , 冲击波前前后内能和压强分别为 E_0, P_0 和 E, P 。由气体动力学基本定律(质量、动量和能量守恒)得到下列方程:

$$\rho_0 D = \rho(D - v) \quad (1)$$

$$\rho_0 D^2 + P_0 = P + \rho(D - v)^2 \quad (2)$$

$$\rho_0 D \left(E_0 + \frac{D^2}{2} \right) + \Phi_0 = \rho(D - v) \left[E + \frac{(D - v)^2}{2} + \frac{P}{\rho} \right] \quad (3)$$

式中, Φ_0 为入射激光强度,现在我们假设等离子体可视为理想气体处理,那么有

$$P = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \rho E \quad (4)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\gamma + 1}{\gamma} \quad (5)$$

γ 为等离子体绝热指数。联立方程(1)~(5),可解出五个变量,因为 $P \gg P_0, E \gg E_0$, 所以有

$$D = \left[2(\gamma^2 - 1) \frac{\Phi_0}{\rho_0} \right]^{1/3} \quad (6)$$

$$P = \frac{[2(\gamma^2 - 1)]^{2/3}}{\gamma + 1} \cdot \rho_0^{1/3} \Phi_0^{2/3} \quad (7)$$

$$E = \frac{\rho_0 D^2 (\gamma + 1) + 2\Phi_0}{2\rho_0 D} \quad (8)$$

$$\rho = \frac{\gamma + 1}{\gamma} \rho_0 \quad (9)$$

$$v = \frac{D}{\gamma + 1} \quad (10)$$

事实上,入射激光强度 Φ_0 是与时间有关的函数 $\Phi(t)$, ρ/ρ_0 也与冲击波速度 D 有关,以上处理只是一种简化结果。给定了脉冲波形,就可以求出 D, P 等参量值。

三、LSD 波实验

1. 实验装置

使用一台电光调 Q YAG 激光振荡放大级,从振荡级 1 输出的激光倍频后用 $0.53\mu\text{m}$ 全反 $1.06\mu\text{m}$ 全透平面镜 3 把绿光分离出来经过光路延时装置后作为马赫-曾德尔干涉仪的探测光源,而从放大级 4 输出的 $1.06\mu\text{m}$ 激光作为作用光,11~14 组成马赫-曾德尔干涉仪。样品铝

靶 7 处于干涉仪的测量臂中。接收部分由成象透镜 15、滤色镜 16、光阑、照相机 17 组成。作用激光能量为 120mJ 内可调,光斑直径为 6mm,激光脉宽为 15ns,聚焦透镜焦距为 38mm。实验装置示意图如图 1 所示。

2. 实验测量原理和方法

当入射作用激光作用于靶表面时,在铝靶表面空气中产生等离子体和 LSD 波,用平行于靶表面方向的探测光获取等离子体和 LSD 波的马赫干涉图和光学阴影图,由这些图片,可以得到 LSD 波位置,速度和等离子体折射率、电子密度、压缩比等物理参量。

设延时 t_1, t_2 时刻, LSD 波位置分别为 r_1, r_2 , 那么 t_1, t_2 时间内, LSD 波平均速度为

$$\bar{v} = \frac{r_2 - r_1}{t_2 - t_1} \tag{11}$$

通过测量不同时刻的 LSD 波位置,得到一组数据。进行数值拟合,得到 $r-t$ 实验曲线,曲线上一点的切线斜率,就是对应时刻 LSD 波的速度。

对于等离子体相位物体,若具有轴对称性,那么它在马赫干涉仪中测量臂上引起的光程差由 Abel 方程给出^[4]:

$$\Delta\Phi(x) = 2 \int_x^R \frac{n(r) - n_0}{(r^2 - x^2)^{1/2}} r dr \tag{12}$$

若用 $\delta(x)$ 表示干涉条纹漂移量,对含冲击波情况下 Abel 方程的解为:

$$n(r) - n_0 = - \frac{\lambda}{\pi} \int_r^R \frac{\delta(x) dx}{(x^2 - r^2)^{1/2}} \tag{13}$$

(13) 式中给出了等离子体相位物体的折射率分布,但 $\delta(x)$ 是一组离散数据,要进行积分必须先对 $\delta(x)$ 进行拟合,而且等离子体流场中有冲击波存在,因而是含激光波的数值拟合。用带有根式项的二次多项式进行分段拟合,即

$$\delta(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 \sqrt{s^2 - x^2} \tag{14}$$

最后由计算机进行分段数值积分得到折射率变化。

等离子体诊断过程中,冲击波波前折射率变化主要是由电子和压缩状态下气体贡献,即^[5]

$$n - 1 = - \frac{\omega_p^2}{2\omega^2} + (n_0 - 1) \frac{\rho_2}{\rho_0} \tag{15}$$

式中, ω_p 为等离子体振荡频率, ω 为探测激光角频率, ρ_1/ρ_0 称为波前压缩比,它直接与波速有关,

$$\frac{\rho_2}{\rho_0} = \frac{(\gamma + 1)M^2}{2 + (\gamma - 1)M^2} \tag{16}$$

式中, γ 为等离子体绝热指数, M 为马赫数, $M = \frac{v}{a}$, v 为冲击波速度, a 为音速。而等离子体区域,有

$$n - 1 = - \frac{\omega_p^2}{2\omega^2} \tag{17}$$

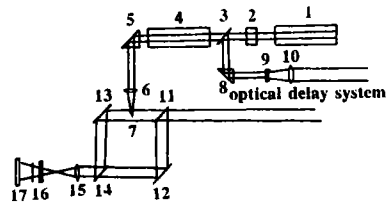


Fig. 1 Diagram of experimental set-up

$$\omega_p^2 = 8.9 \times 10^3 \cdot N_e^{1/2} \tag{18}$$



Fig. 2 Series of interferograms of plasma and LSD wave on Al target surface produced with a laser energy of 78 mJ (magnification $\times 10$)
 a - 52ns time delay b - 108ns time delay c - 137ns time delay

所以,得到电子密度 N_e 与折射率的关系,

$$n - 1 = -4.403 \times 10^{-10} \times N_e \lambda^2 \tag{19}$$

因此,由以上各式可求解密度,电子密度,折射率变化等物理量。

3. 实验过程和结果

高功率激光在铝靶表面 LSD 波点燃所需激光功率密度阈值比空气中击穿所需阈值要低,实验中,为了避免空气击穿,需把靶表

面位置调整到聚焦激光焦点前面。为了鉴别 LSD 波的存在,把靶材法向相对于入射激光方向转一个角度 θ , 实验中选择 θ 为 15° 。通过改变探测光经过作用区域的时间,用照相机拍摄到靶面等离子体和 LSD 波干涉图象,如图 2 所示。如果挡住马赫-曾德尔干涉仪中参考光臂,就能获得直观反映 LSD 波的光学阴影图,如图 3 所示。



Fig. 3 Optical shadowgram of LSD wave
 $E = 78\text{mJ}$ $t = \text{ns}$

四、结果处理与讨论

1. 图 2 和图 3 中干涉和阴影图片具体反映了等离子体和激光支持持爆轰波(LSD)的发展过程。首先,可以看出 LSD 波是沿着逆激光方向传播的,而不是沿着法线方向,这是 LSD 波的一个重要特征,另一方面也说明了 LSD 波的存在。LSD 波似圆柱状扩展,这给 LSD 波早期发展阶段的一维圆柱模型提供了实验基础。在 LSD 波波前上因为吸收激光剩余能量而逐渐成球面状。同时还发现 LSD 波是关于激光方向对称的。通过比较不同延时的 LSD 波传播情况,可以得到 LSD 波位置随延时的变化曲线。图 4 中两种曲线分别表示逆激光方向和垂直于激光方向的径向上 LSD 波传播情况,运用最小二乘法进行数值拟合得到 $r-t$ 曲线。由 $r-t$ 曲线上任一点的切线斜率 dr/dt 即表示对应时刻 LSD 波的传播速度,如图 5 所示。可以看出,LSD 波主要是沿逆激光方向传播的,并且在开始阶段吸收剩余激光能量,从而该方向的传播速度比较快,是音速的几十倍。这是 LSD 波是以超声速传播的,是 LSD 波的另一个重要特征。由公式(6)算出 LSD 波在 20ns 时理论速度值为 $D_{理} = 2.54 \times 10^4 \text{m/s}$,而由实验测出的实测速度为 $D_{实} = 2.2 \times 10^4 \text{m/s}$,实验值和理论值基本吻合。LSD 波传播过程中因为有了剩余激光能量的吸收,从而其速度在扩展过程逐渐减小。在径向方向因为开始就没有优先吸收激光能量,从而速度明显小得多,但是径向分布通常给一维模型处理靶力学效应时带来可观误差,因而这种径向分布会给二维数值模拟激光与靶相互作用过程提供实验规律。

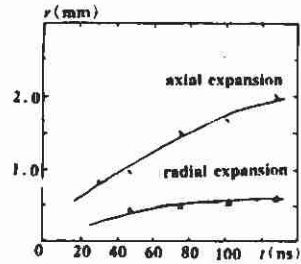


Fig. 4 The variation curve of wave front position of LSD wave

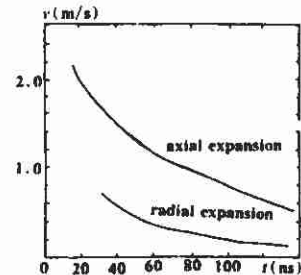


Fig. 5 The propagation speed of LSD wave is a time variation function

2. 从干涉照片可以看出, 等离子体相位场具有轴对称性, 而且由于干涉条纹的偏离, 反映它是非均匀相位场。干涉条纹的偏离实质上是由于光程差引起的, 而光程差又是因为折射率的不均匀性, 由前面知道, 通过 Abel 方程能够求解出折射率变化, 在 LSD 波波前, 干涉条纹偏离出现剧变, 这也说明 LSD 波处有很强的不均匀性。图 6 给出了延时 137ns, 距靶面 1.2mm 的横截面内等离子体电子密度径向分布。可以发现, 等离子体内电子密度数值在 $\sim 10^{18}/\text{cm}^3$ 量级上, 而且基本均匀, 差伏不大, 但在 LSD 波前上出现大幅度变化, 这主要是因为波前传播过程中带走部分电子, 形成“压缩”。由电子密度数值还可粗略地估算等离子体区总电子数, 即 $N_e \cdot \pi R^2 \cdot l \approx 4.5 \times 10^{15}$ (个)。若考虑到电离程度, 就可估算激光与靶相互作用过程中靶喷溅物质的多少。

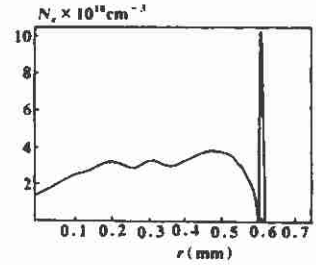


Fig. 6 The radial distribution of electron density near the target surface (laser energy 78mJ, 137ns time delay)

五、结 论

LSD 波是以超声速沿激光相反方向传播, 其波形发展似圆柱形状。LSD 波初始传播速度实验值和理论值基本吻合。

用马赫-曾德尔干涉仪可定量地测定 LSD 波和等离子体的产生和发展情况, 获得了 LSD 波速度随延迟时间变化曲线和等离子体电子密度分布。

参 考 文 献

- 1 Maher W E, Hall R B. J A P, 1975;46(2):761
- 2 Maher W E, Hall R. B, Johnson R R. J A P, 1974;45(5):2138
- 3 Walters C T., Barnes R H, Beverly R E. J A P, 1978;49(5):2937
- 4 Ni X W, Lu J, He A Z. Opt Commun, 1989;74(3):185
- 5 Mckay J A, Bleach R D, Hall R B. J A P, 1979;50(5):3231



* 作者简介:陆 建(附照片),男,1965年9月出生。博士,副教授。现主要从事激光与材料相互作用研究。

倪晓武,男,1955年10月出生。硕士,教授。现主要从事激光与材料相互作用及激光医学应用等研究。

收稿日期:1994-12-13

· 产品简讯 ·

钒酸盐微型片式激光器

美国加州圣何塞 Uniphase Lasers 公司提供一种微型近红外二极管泵浦 Nd:YVO₄ 激光器, 输出波长 1064nm, 功率达 250mW 衍射极限光束。这种微型片式激光器工作面积为 4 × 1 × 1(in) 激光头, 在 2MHz 脉冲重复率时噪声低到 0.5% rms。激光器的输出功率稳定度低于 2%。

於祖兰, 曹三松 供稿