

利用啁啾脉冲频谱干涉技术研究高应变率载荷下铜膜的动态响应特性

范伟 朱斌 席涛 李纲 卢峰 吴玉迟 韩丹 谷渝秋

Experiment research on dynamic response of copper film at high strain rate by chirped pulse spectral interferometry

Fan Wei Zhu Bin Xi Tao Li Gang Lu Feng Wu Yu-Chi Han Dan Gu Yu-Qiu

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 150602 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.150602

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.150602>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用 Sagnac 干涉仪实现光子轨道角动量分束器

Realisation of orbital angular momentum sorter of photons based on sagnac interferometer

物理学报.2015, 64(13): 130704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.130704>

一种超快时间分辨速度干涉仪的设计和理论研究

Design and theoretical research of an ultrafast time-resolved velocity interferometer

物理学报.2014, 63(6): 060703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.060703>

软 X 射线双频光栅剪切干涉法研究

Studies on soft X-ray shearing interferometry with double-frequency gratings

物理学报.2013, 62(7): 070703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.070703>

基于飞秒光频梳的压电陶瓷闭环位移控制系统

Closed-loop displacement control system for piezoelectric transducer based on optical frequency comb

物理学报.2013, 62(7): 070702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.070702>

法-珀干涉绝对距离测量中的声光移频器双通道配置方法

Method on double-pass acousto-optic frequency shifter in absolute distance measurement using Fabry-Pérot interferometry

物理学报.2012, 61(18): 180701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.180701>

利用啁啾脉冲频谱干涉技术研究高应变率载荷下铜膜的动态响应特性*

范伟 朱斌 席涛 李纲 卢峰 吴玉迟 韩丹 谷渝秋†

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 等离子体物理重点实验室, 绵阳 621900)

(2016年1月17日收到; 2016年4月25日收到修改稿)

啁啾脉冲频谱干涉测量技术具有高时间分辨的连续测量能力, 属于一种单发超快诊断技术. 本文利用 25 fs 的激光脉冲对厚度为 502 nm 的金属铜膜进行冲击加载, 同时利用啁啾脉冲频谱干涉仪开展超快诊断, 在单次实验内测量获得了皮秒时间分辨的铜膜自由面启动过程, 并由此得到自由面的启动时刻和速度剖面. 上升前沿宽度 6.9 ps. 根据冲击波关系式, 冲击波在材料中引起的冲击压强和应变率分别为 (57.1 ± 8.8) GPa, $8 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$.

关键词: 啁啾脉冲, 频谱干涉, 时间分辨, 冲击波

PACS: 06.30.Gv, 07.60.Ly, 47.40.Nm, 47.80.Cb

DOI: 10.7498/aps.65.150602

1 引言

对于超短脉冲、超强功率的飞秒激光, 其驱动产生冲击波具有宽度窄、压力高的特点, 由此可以产生材料的超高应变率条件, 这对于研究高应变率条件下的材料动力学响应特性和高压状态方程等具有重要意义^[1,2]. 提高应变率一般通过减小冲击加载脉宽或增大加载强度的方式实现^[3], 因此, 利用飞秒激光进行冲击加载对于产生高应变率条件具有独特优势.

2011年, Crowhurst等^[4]采用皮秒激光对金属铝膜进行冲击加载, 获得了 43 GPa 的峰值压力和超过 10^{10} s^{-1} 的应变率. 2012年, Cuq-Lelandais等^[5]将飞秒激光加载到不同厚度的铝膜和钽膜上, 产生不同的应变率 (10^5 — 10^8 s^{-1}), 研究了相应条件下材料的损伤特性. 2013年, Ashitkov等^[3]通过对飞秒激光在铝膜中驱动的冲击波进行实验研究, 发现当应变率由 $1.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 变为 $3 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 时, 铝样品的层裂强度由 6.7 GPa 变为 8.4 GPa, 层裂片

厚度由 300 nm 减小为 150 nm. 2015年, Ashitkov等^[6]又对飞秒激光加载下金属钽的抗拉强度进行研究, 结果表明对于固态和熔融态钽, 在应变率 $5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 和 $1.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 条件下, 抗拉强度分别为 26.7 GPa 和 4.4 GPa. 国内对于飞秒激光加载金属材料驱动冲击波实验研究的报道还比较少, 上海光机所、流体物理研究所和哈尔滨工业大学分别开展过飞秒激光在金属铝膜中驱动冲击波实验, 研究内容主要涉及冲击波波破时刻、上升沿宽度及其后传播过程的诊断^[7-9].

飞秒激光驱动冲击波的特征过程持续时间比较短, 如冲击波上升沿宽度仅几个皮秒^[2,10], 在对这些过程进行诊断时, 任意反射面的速度干涉仪^[11,12]、法布里-珀罗干涉仪^[13]、光子多普勒计^[14]等最快时间分辨为数十皮秒的激光干涉测速系统已不能发挥作用, 此时只有超快显微干涉仪^[8,15]、频域干涉仪^[16]、啁啾脉冲频谱干涉仪 (chirped pulse spectral interferometry, CPSI)^[17,18]等具有飞秒时间分辨能力的测量系统可供使用, 其中前面两种方法属于离散式点测量技术, 对冲击波时间演

* 国家自然科学基金 (批准号: 11405159) 和中物院科学技术发展基金 (批准号: 2014A0102003) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yqgu@caep.ac.cn

化结构的测量需要进行大量的实验发次, 由此给实验结果带来了不确定性^[19,20]. 比较之下, CPSI作为一种连续测量技术, 可以在单发次实验内完成超快物理过程的时间分辨诊断, 既有利于实验测量精度的提高, 又大大减小了工作量, 体现出巨大的优势. 目前, 国外一些研究团队已在利用 CPSI 开展短脉冲激光驱动冲击波方面的研究, 如超快激光加载下铝膜的弹塑性响应^[21]和层裂问题^[3,6,10]、超高应变率条件下的耗散行为^[4]等.

文中利用啁啾脉冲频谱干涉技术对飞秒激光在铜膜中驱动产生的冲击波进行诊断, 获得了铜膜自由面的启动时刻、位移和速度演化历史, 并由此计算出冲击波速度、冲击波压力、速度剖面的上升前沿宽度和应变率等参数, 且观察到了铜膜的层裂信号.

2 原理

在啁啾脉冲频谱干涉测量系统中, 一般首先将飞秒脉冲展宽为线性啁啾脉冲, 然后通过不等臂迈克耳孙干涉仪获得两个具有延迟时间差的啁啾脉冲(分别称为参考脉冲和探测脉冲), 啁啾脉冲对最终以共轴传输的方式进入光谱仪记录系统, 由光谱仪记录脉冲对之间的频谱干涉条纹, 根据频谱条纹的分布可以重建出脉冲对之间的频谱相位差并获得待测信号引起的探测脉冲频谱相移^[22]. 具体地, 设参考脉冲电场为 $E_r(t)$, 探测脉冲 $E_p(t - \tau)$ 在时间上落后 τ 传输, 两者之间的光谱干涉条纹强度 $I(\omega)$ 分布为

$$I(\omega) = |\tilde{E}_r(\omega)|^2 + |\tilde{E}_p(\omega)|^2 + 2|\tilde{E}_r(\omega)||\tilde{E}_p(\omega)| \times \cos[\Delta\phi(\omega) - \omega\tau], \quad (1)$$

式中, $\tilde{E}_r(\omega) = F\{E_r(t)\}$, $\tilde{E}_p(\omega) = F\{E_p(t)\}$, F 为傅里叶变换运算符号, $\Delta\phi(\omega)$ 为两脉冲的频谱相位差.

由于线性啁啾脉冲的频率和时间之间存在一一对应的映射关系

$$\omega = \omega_0 + 2bt, \quad (2)$$

式中, ω_0 为脉冲载频, $2b$ 为啁啾脉冲的啁啾系数, 频谱相位差 $\Delta\phi(\omega)$ 对应着相应时刻的时域相位差 $\Delta\varphi(t)$, 即

$$\Delta\phi(\omega) = \Delta\phi(\omega_0 + 2bt) \approx \Delta\varphi(t), \quad (3)$$

$\Delta\varphi(t)$ 一般由随时间变化的待测信号加载到探测脉冲上引起. 这种由频谱干涉条纹重建 $\Delta\varphi(t)$ 的方法所达到的时间分辨为 $\sqrt{4\ln 2/|2b|}$ ^[23,24].

在利用啁啾脉冲频谱干涉技术对激光在固体靶中驱动产生的冲击波进行诊断时, 主要是基于光学多普勒效应测量样品自由面的速度 $u_{fs}(t)$. 根据多普勒相移公式, 当探测脉冲经历样品自由面时, 其相位变化 $\Delta\varphi(t)$ 与样品自由面速度 $u_{fs}(t)$ 之间的关系为^[1]

$$\frac{d(\Delta\varphi)}{dt} = 2\frac{\omega}{c}nu_{fs}\cos(\theta), \quad (4)$$

式中, ω 为入射脉冲频率, n 为脉冲传输介质的折射率, c 为光速, θ 为探测脉冲的入射角.

3 实验结果与讨论

实验样品为电子束溅射方式制备的 502 nm 厚铜膜, 衬底为 0.18 mm 厚盖玻片, 利用台阶仪测量得到的铜膜粗糙度为 10 nm.

实验光路排布如图 1 所示, 光源为基于 CPA 技术的 Ti:sapphire 激光系统, 激光器最高输出频率 10 Hz, 最大单脉冲输出能量 1.0 J, 脉冲宽度 25 fs (FWHM), 中心波长 800 nm. 实验中, 飞秒激光脉冲首先通过分束片 BS1 分成两束, 一束称为抽运脉冲, 在经过光学延迟线后其被透镜 L1 聚焦到盖玻片-铜膜界面上, 铜膜表层材料吸收抽运激光能量之后在铜膜内部产生指向背面(与空气接触的铜膜表面, 称为铜膜自由面)传播的冲击波, 这部分激光能量 3 mJ, 聚焦透镜 L1 的焦距 $f = 15$ cm, 聚焦光斑直径 830 μm , 加载功率密度为 2.3×10^{13} W/cm².

分束得到的另一束飞秒脉冲被展宽为线性啁啾脉冲, 然后传输进入诊断单元——不等臂迈克耳孙干涉仪, 铜膜自由面和镜面 M4 分别充当迈克耳孙干涉仪的两个反射面, 其中传输经历样品自由面的啁啾脉冲称为探测脉冲, 经历镜面 M4 的啁啾脉冲称为参考脉冲. 自由面上的待测区域通过透镜 L2 成像到光谱仪的入射狭缝上, 由耦合 CCD 的光谱仪系统记录频谱干涉条纹, 系统沿狭缝方向的空间分辨为 10 μm . 将飞秒脉冲展宽为啁啾脉冲的展宽器由两块光栅构成, 光栅线对数 1200/mm. 图 2 所示为实验中展宽得到的啁啾脉冲的时-频映射关系, 图中数据点由非对称频谱干涉法测量获

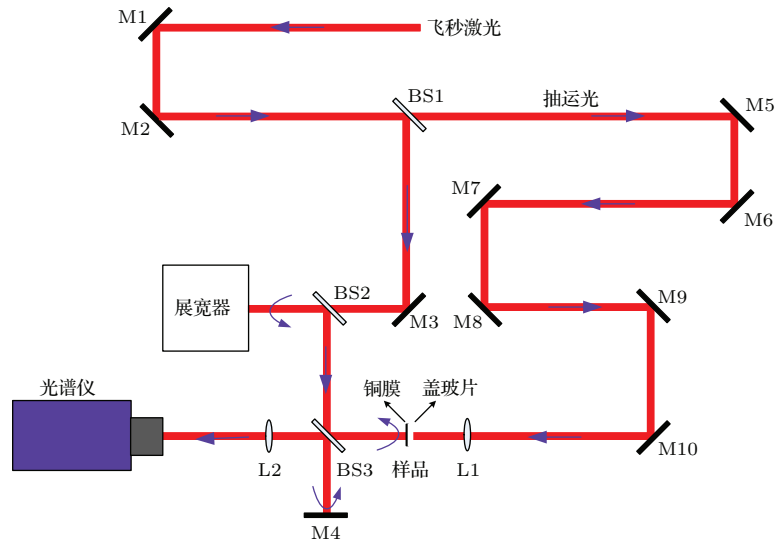


图1 飞秒激光驱动冲击波及 CPSI 诊断光路布局 M, 平面反射镜; BS, 分束片; L, 透镜

Fig. 1. Femtosecond laser driven shock wave and the CPSI diagnosis system layout. M, Plane mirror; BS, Beam splitter; L, Lens.

得 [25], 通过对数据点进行最小二乘线性拟合得到啁啾脉冲的啁啾系数 $2b = -1.72 \times 10^{-6} \text{ rad}\cdot\text{fs}^{-2}$ (双光栅展宽器引入负色散), 标准误差为 $1.66 \times 10^{-8} \text{ rad}\cdot\text{fs}^{-2}$, 从图 2 中可以看到, 啁啾脉冲的时-频映射关系近似为线性, 与光栅展宽器的展宽特性一致. 根据前文所述, 此啁啾脉冲决定的测量时间分辨为 1.3 ps.

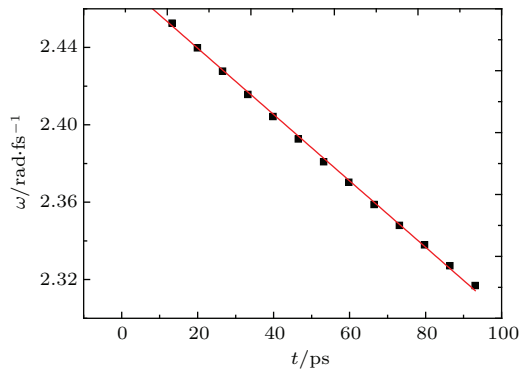


图2 啁啾脉冲的时-频映射关系

Fig. 2. Time-frequency mapping of the chirped pulse.

实验打靶时, 在每次打靶之前和打靶过程中各采集一幅频谱干涉图, 称为静态频谱图和动态频谱图. 采用傅里叶变换方法分别从两幅频谱图中重建探测脉冲相对参考脉冲的频谱相位差, 两个结果的差异即为样品自由面位移引起的探测脉冲相位变化, 如图 3 所示, 图中横轴代表波长分布, 纵轴为沿光谱仪狭缝方向的空间分布.

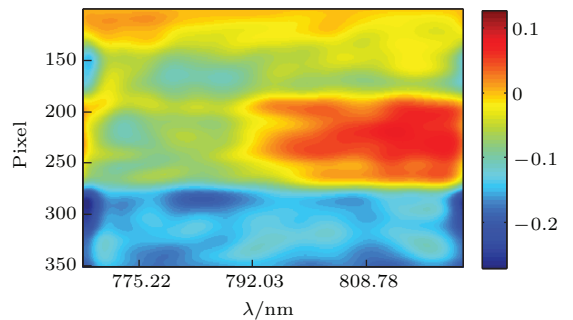


图3 重建的探测脉冲频谱相移

Fig. 3. Reconstructed spectral phase shift of the probe pulse.

忽略可能存在的预热效应 [8], 探测脉冲的时域相位变化 $\Delta\varphi(t)$ 与样品自由面位移 $\Delta s(t)$ 的关系为

$$\Delta s(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi(t), \quad (5)$$

式中, λ 为探测脉冲波长. 图 4 所示为自由面上冲击区域中心部分的位移演化历史, 从图中可以看到自由面从静止到运动的位移变化过程, 它由单次实验测量得到. 然而, 由于数据噪声的存在, 自由面位移曲线存在波动, 如图中的蓝色实线, 由此导致了自由面启动时刻 (即自由面开始运动的时刻) 无法精确确定, 这里我们将其选取为自由面位移出现趋势性连续上升的起始时刻, 充分考虑波动因素后, 这种方式确定启动时刻的误差应在 $\pm 3 \text{ ps}$ 的范围内. 由于自由面在启动之前处于静止状态, 相应的位移为零, 因此图中对启动时刻之前的位移进行了归零处理, 如红色虚线所示. 图中时间零点的

选择具有任意性, 这里取自由面的启动时刻为零时刻, 它发生在抽运脉冲到达盖玻片-铜膜界面后 (89.2 ± 0.2) ps, 误差主要来源于抽运-探测脉冲时间关系的测量误差和光学延迟线的运动机械误差. 将样品靶厚度 $h = (502 \pm 5)$ nm 和冲击波在靶中的渡越时间 $\Delta t = (89.2 \pm 3.0)$ ps 代入公式

$$\bar{u}_s = h/\Delta t, \quad (6)$$

得到冲击波在靶中传播的平均速度 $\bar{u}_s = (5.6 \pm 0.2)$ km/s.

冲击波在铜膜中传播时, 冲击波速度 u_s 与波后粒子速度 u_p 的关系为

$$u_s = a_0 + a_1 u_p, \quad (7)$$

式中, $a_0 = 3.940$ km/s 和 $a_1 = 1.489$ 为表征铜材料性质的常数. 冲击波阵面后的压强 p 决定于公式

$$p = \rho_0 u_s u_p, \quad (8)$$

式中, $\rho_0 = 8.93$ g/cm³ 为铜膜密度. 将平均冲击波速度代入 (7) 和 (8) 式得到冲击波在铜膜中引起的冲击压强 $\bar{p} = (57.1 \pm 8.8)$ GPa.

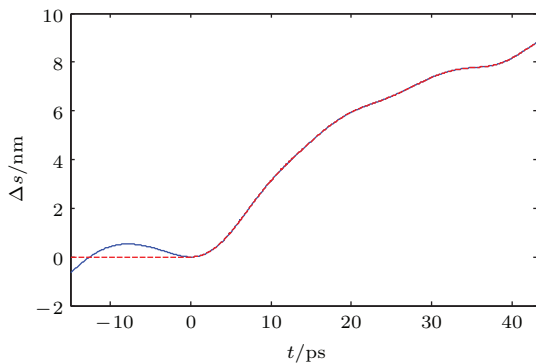


图4 样品自由面冲击区域中心部分的位移演化曲线. 蓝色实线表示由频谱相移求出的结果, 红色虚线表示自由面启动前的位移进行了归零处理.

Fig. 4. The free surface displacement evolution profile measured in a central part of the shocked area, displacement deduced from the spectral phase shift (blue-solid line), displacement is normalized to zero before the free surface starting up (red-dotted line).

图5是与图4相对应的自由面速度 u_{fs} 演化历史, 从图5中可以看到, 自由面在启动后迅速达到峰值速度 0.44 km/s, 然后进入一个长时期的减、加速交替阶段. 由图5可以求出自由面从零加速到峰值速度的时间宽度(即速度剖面的上升前沿宽度) 6.9 ps, 以及应变率 $\dot{\eta} = \dot{u}_p^{\max}/\bar{u}_s = 8 \times 10^9$ s⁻¹ [4], 式中 \dot{u}_p^{\max} 为粒子速度(自由面粒子速度倍增定律 $u_p = u_{fs}/2$ [4]) 对时间求导的最大值.

在飞秒激光加载下, 铜膜内部首先形成一系列指向自由面传播的压缩波, 此后, 压缩波之间通过相互追赶形成冲击波. 当冲击波传播到达自由面时, 自由面粒子速度迅速提高到一个峰值(如图5中的第一个峰值速度). 随后冲击波在铜膜-空气界面发生反射, 产生中心稀疏波, 使自由面粒子速度下降. 中心稀疏波与冲击波后的卸载波(有限的激光加载宽度导致)相互作用在材料内部引起拉应力, 当拉应力强度达到材料的层裂强度时, 材料内部发生层裂. 稀疏波被层裂面反射并形成压缩波, 压缩波再次到达自由面时, 自由面被二次加速并反射稀疏波, 此后, 上述过程在层裂面和自由面之间重复发生, 由此出现了自由面的加速和减速行为, 如图5所示.

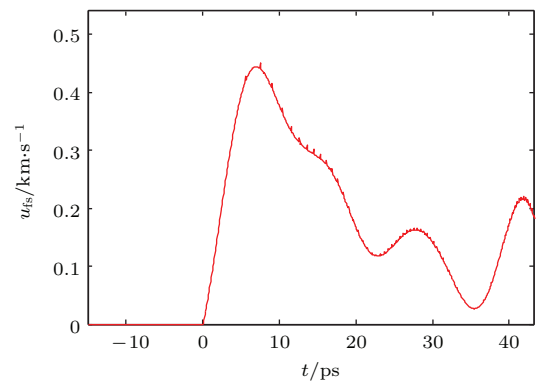


图5 样品自由面冲击区域中心部分的速度演化曲线
Fig. 5. The free surface velocity evolution profile measured in a central part of the shocked area.

4 结 论

利用啁啾脉冲频谱干涉仪对飞秒激光在铜膜中驱动产生的冲击波进行超快诊断, 在单次实验内测量获得了铜膜自由面在启动阶段的位移和速度演化历史. 根据实验结果, 激光加载冲击波在铜膜中传播的平均速度为 (5.6 ± 0.2) km/s, 当冲击波在自由面卸载时, 自由面经历一个快速上升和其后续一定时间范围内的减加速交替过程, 其中快速上升过程的时间宽度为 6.9 ps, 而自由面的减加速现象意味着材料发生了层裂. 根据冲击波关系式, 冲击波在铜膜中引起的冲击压强为 (57.1 ± 8.8) GPa, 加载应变率 8×10^9 s⁻¹. 利用飞秒激光对材料进行冲击加载是实现超高应变率条件的有效手段之一, 而啁啾脉冲频谱干涉仪为开展相关实验研究提供了一种重要实验技术.

参考文献

- [1] Evans R, Badger A D, Fallières F, Mahdiah M, Hall T A, Audebert P, Geindre J P, Gauthier J C, Mysyrowicz A, Grillon G, Antonetti A 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 3359
- [2] Gahagan K T, Moore D S, Funk D J, Rabie R L, Buelow S J, Nicholson J W 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3205
- [3] Ashitkov S I, Komapov P S, Ovchinnikov A V, Struleva E V, Agranat M B 2013 *Quantum Electron.* **43** 242
- [4] Crowhurst J C, Armstrong M R, Knight K B, Zaugg J M, Behymer E M 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 144302
- [5] Cuq-Lelandais J P, Boustie M, Berthe L, De-Resseguier T 2012 *EPJ Web of Conferences* **26** 04013
- [6] Ashitkov S I, Komapov P S, Struleva E V, Agranat M B, Kanel G I, Khishchenko K V 2015 *J. Phys.: Conf. Ser.* **653** 012001
- [7] Chen J P, Li R X, Zeng Z N, Wang X T, Wang W Y, Jiang Y H, Cheng C F, Xu Z Z 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 858
- [8] Huang L, Yang Y Q, Wang Y H, Zheng Z R, Su W H 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 045502
- [9] Xin J T, Weng J D, Liu C L, Zhong J, Song Z F, Wang G B 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 2019 (in Chinese) [辛建婷, 翁继东, 刘仓理, 钟杰, 宋振飞, 王贵兵 2010 强激光与粒子束 **22** 2019]
- [10] Ashitkov S I, Komapov P S, Agranat M B, Kanel G I, Fortov V E 2014 *J. Phys.: Conf. Ser.* **500** 112006
- [11] Celliers P M, Bradley D K, Collins G W, Hicks D G, Boehly T R, Armstrong W J 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 4916
- [12] Shu H, Fu S Z, Huang X G, Ye J J, Zhou H Z, Xie Z Y, Long T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 114102 (in Chinese) [舒桦, 傅思祖, 黄秀光, 叶君建, 周华珍, 谢志勇, 龙滔 2012 物理学报 **61** 114102]
- [13] McMillan C F, Goosman D R, Parker N L, Steinmetz L L, Chau H H, Huen T, Whipkey R K, Perry S J 1988 *Rev. Sci. Instrum.* **59** 1
- [14] Weng J D, Tan H, Wang X, Ma Y, Hu S L, Wang X S 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 111101
- [15] Gahagan K T, Moore D S, Funk D J, Reho J H, Rabie R L 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 3679
- [16] Tokunaga E, Terasaki A, Kobayashi T 1992 *Opt. Lett.* **17** 1131
- [17] Benuzzi-Mounaix A, Koenig M, Boudenne J M, Hall T A, Batani D, Scianitti F, Masini A, Di-Santo D 1999 *Phys. Rev. E* **60** R2488
- [18] Chien C Y, La-Fontaine B, Desparois A, Jiang Z, Johnston T W, Kieffer J C, Pépin H, Vidal F, Mercure H P 2000 *Opt. Lett.* **25** 578
- [19] Le-Blanc S P, Gaul E W, Matlis N H, Rundquist A, Downer M C 2000 *Opt. Lett.* **25** 764
- [20] Chen Y H, Varma S, Alexeev I, Milchberg H 2007 *Opt. Express* **15** 7458
- [21] Whitley V H, McGrane S D, Eakins D E, Bolme C A, Moore D S, Bingert J F 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 013505
- [22] Dong J, Peng H S, Wei X F, Hu D X, Zhou W, Zhao J P, Zhang Y, Cheng W Y, Liu L Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 315 (in Chinese) [董军, 彭翰生, 魏晓峰, 胡东霞, 周维, 赵军普, 张颖, 程文雍, 刘兰琴 2009 物理学报 **58** 315]
- [23] Kim K Y, Yellampalle B, Rodriguez G, Averitt R D, Taylor A J, Glownia J H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 041123
- [24] Geindre J P, Audebert P, Rebibo S, Gauthier J C 2001 *Opt. Lett.* **26** 1612
- [25] Fan W, Zhu B, Wu Y Z, Qian F, Shui M, Du S, Zhang B, Wu Y C, Xin J T, Zhao Z Q, Cao L F, Wang Y X, Gu Y Q 2013 *Opt. Express* **21** 13062

Experiment research on dynamic response of copper film at high strain rate by chirped pulse spectral interferometry*

Fan Wei Zhu Bin Xi Tao Li Gang Lu Feng Wu Yu-Chi Han Dan Gu Yu-Qiu[†]

(Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 17 January 2016; revised manuscript received 25 April 2016)

Abstract

That the femtosecond laser pulses irradiate metallic materials thereby inducing ultrahigh strain rates, is an important experimental approach to studying the material behavior under extreme conditions. Femtosecond laser-generated shock waves in metal films have rise times of several picoseconds, the corresponding diagnostic technique is required to work with a higher time resolution, which makes the experimental measurements difficult. Chirped pulse spectral interferometry (CPSI) possesses capabilities of ultrafast time resolution and continuous measurement, thus it provides a diagnostic technique for studying the ultrashort shock wave. In this article, we carry out an experiment on femtosecond laser driven shock wave in copper film and the measurement by CPSI. Laser pulse of 25 fs duration at the central wavelength 800 nm is used, the tested samples are copper films of (502 ± 5) nm in thickness fabricated by electron beam sputtering deposition onto cover slip substrate of 180 μm in thickness, pump beam focuses onto front surface of the copper film through the transparent substrate and this laser intensity is 2.3×10^{13} W/cm². Chirped pulse spectral interferometry is used to detect the movements of the free rear surfaces of the copper films with temporal and spatial resolution. In the spectral interferometry, linearly chirped pulse is required and obtained by stretching the femtosecond laser pulse with a pair of gratings. The relation between frequency and time of the chirped pulse is accurately measured using asymmetric spectral interference method, which is required for explaining the experimental data. Since CPSI is a single shot diagnostic technique, we obtain the displacement and velocity history of the free rear surface with picosecond time resolution in a single measurement. From the results, the average shock velocity is calculated to be (5.6 ± 0.2) km/s and the shock wave rise time is determined to be 6.9 ps. According to the shock wave relations, impact pressure and strain rate in the copper film are (57.1 ± 8.8) GPa and 8×10^9 s⁻¹ respectively, the strain rate is so high that it is hard to achieve by long-pulse laser driven or other loading approaches. Additionally, experimental results also show that the free rear surface alternately experiences acceleration and deceleration, which indicates the spallation in the copper target. It is obvious that chirped pulse spectral interferometry is a reliable approach to studying ultrashort shock waves in metal films.

Keywords: chirped pulse, spectral interference, time-resolved, shock wave

PACS: 06.30.Gv, 07.60.Ly, 47.40.Nm, 47.80.Cb

DOI: 10.7498/aps.65.150602

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11405159) and the Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2014A0102003).

[†] Corresponding author. E-mail: yqgu@caep.ac.cn