

神光 II 装置上速度干涉仪的研制及应用*

舒桦^{1)†} 傅思祖¹⁾ 黄秀光¹⁾ 叶君建¹⁾ 周华珍¹⁾ 谢志勇¹⁾ 龙滔²⁾

1) (上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

2) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2011 年 7 月 30 日收到; 2011 年 9 月 23 日收到修改稿)

任意反射面速度干涉仪 (VISAR) 具有很高的测试精度, 能实现冲击波速度、粒子速度的连续测量, 是目前冲击波传播相关物理实验的主要诊断设备. 神光 II 高功率激光装置上的速度干涉仪其空间分辨率优于 $7\ \mu\text{m}$, 靶面视场约为 $1\ \text{mm}$, 探针光脉冲宽度约为 $60\ \text{ns}$, 能满足各类冲击波相关实验的诊断. 该 VISAR 系统用偏振分光镜和波片系统组成了能量调节系统, 极大地方便了探针光能量和条纹相机匹配的调节; 利用新颖的探针光引入系统, 极大地提高了探针激光的能量利用率 (相对其他方法, 能量利用率提高了 3 倍). 该速度干涉仪已成功应用于状态方程实验、等熵压缩实验和冲击波追赶实验. 本文利用激光脉冲整形技术获得了无冲击压缩实验图像, 利用石英作为标准材料获得了聚苯乙烯 (CH) 的 Hugoniot 数据, 利用双脉冲激光获得了石英材料中冲击波追赶的实验图像并与理论模拟进行了对比, 实验和模拟符合得比较好. 实验结果表明, 神光 II 装置上的速度干涉仪能满足不同时间尺度 (亚 ns—几十 ns) 冲击波传播相关物理实验的诊断, 为进一步开展 CH 的高精度 Hugoniot 参数测量、高压无冲击压缩实验和冲击波时空整形实验奠定了基础.

关键词: 速度干涉仪, 冲击波, 状态方程, 激光

PACS: 41.75.Jv, 07.60.Ly

1 引言

任意反射面速度干涉仪^[1-3](VISAR) 在凝聚态物理、等离子体物理及惯性约束聚变 (ICF) 等领域有广泛的应用, 是高压状态方程^[4-6]、材料动态力学性能实验、瑞利泰勒 (R-T) 不稳定性实验中的冲击波特性以及冲击波多波追赶实验^[7-11]等冲击波传播相关物理实验的主要诊断设备. VISAR 需要窄线宽激光器作为探针光源, 目前使用较多的是脉冲式激光 (其功率比较高, 能满足条纹相机记录的需求). 其中罗切斯特大学激光装置 (OMEGA) 上 VISAR 探针光源的脉冲宽度为 $10\ \text{ns}$ ^[3]. 在各类实验中, 被诊断物理量的时间尺度从亚 ns 到几十 ns 不等. 为了满足各类物理实验诊断的需求, 要求 VISAR 探针光的脉冲宽度能覆盖整个物理过程, 即探针光源的脉冲宽度越宽越好. 但是脉宽越长对

探针光源的能量要求也越高 (条纹相机需要一定的功率才能得到对比度较好的图像), 目前的窄线宽激光器难以做到很高能量, 而且价格非常昂贵. 充分利用探针光源的能量, 可以降低对探针光源的要求, 降低研制成本.

神光 II 高功率激光装置是国内最早建成的高功率激光装置, 是目前开展 ICF 分解实验研究的主要平台. 研制一套和神光 II 装置相配套的速度干涉仪, 对于丰富物理诊断内容, 提高诊断能力具有重要的意义. 神光 II 装置上 VISAR 的空间分辨率优于 $7\ \mu\text{m}$, 靶面视场约为 $1\ \text{mm}$, 探针光源脉宽约为 $60\ \text{ns}$ (能满足不同时间尺度物理实验诊断的需求), 利用偏振分光镜和波片组成了能量调节系统, 极大地方便了探针光能量和条纹相机匹配的调节. 本文提出了一种新颖的探针光引入系统, 极大提高了探针激光的能量利用率 (相对其他方法, 能量利用率提高了 3 倍), 使得在激光器能量相对较小的条

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2010AA8041016) 资助的课题.

† E-mail: shuhua1979@163.com

件下也可以获得高对比度的实验图像. 该系统已经成功应用于状态方程实验、无冲击压缩实验和冲击波追赶实验, 并获得了高对比度的实验图像和实验数据, 丰富了神光 II 激光平台上物理实验的诊断内容.

2 线成像速度干涉仪介绍

线成像速度干涉仪是在点速度干涉仪 (P-VISAR) 基础上发展起来的能同时测量一条线上物体运动的干涉仪. 它主要由五部分组成: 探针光源、靶面照明系统、成像系统、干涉系统、记录系统及数据处理系统.

2.1 探针光源的选择和优化

探针光源是 VISAR 的一个重要组成部分, 探针光源的选择需要考虑激光强度、激光器脉宽、激光器线宽和激光波长等因素. VISAR 的诊断对象一般为漫反射面, 其反射系数 K 随实验条件不同一般在 10^{-1} — 10^{-3} 量级变动. 成像系统的收集效率一般为 $0.01K$ (K 为收集系数, 采用 $f/5$ 透镜收集, f 为收集透镜的焦距). 记录系统是条纹相机, 相机的曝光时间为几个 ns, 它需要 0.1 W 的功率才能获得适当信噪比的信号. 综合考虑材料的反射率、成像系统的收集效率、各种损耗、条纹相机的响应等因素, 激光的输出功率需要在 10 kW 左右. VISAR 主要用于激光驱动冲击波相关实验的诊断 (整个物理过程一般为几个 ns) 和材料准等熵压缩实验中自由面速度或粒子速度的测量 (整个过程一般为 10—30 ns), 因此探针激光的脉宽必须能覆盖整个物理过程, 其脉宽需大于 30 ns. 原则上探针光波长只需选在条纹相机响应范围内 (400—700 nm), 但是为了在实验中更好地屏蔽杂散光 (驱动激光的波长基频 1.053 μm , 倍频 0.527 μm), 探针激光的波长应尽量远离打靶激光的波长. VISAR 测速原理是借助样品运动产生的多普勒效应和干涉技术来监测样品速度的变化过程. 为了获得高对比度的干涉条纹并具有较高的速度分辨能力, 需要采用单横模、单纵模的激光光源. 基于以上分析, VISAR 选用的激光器参数为: 激光能量约为 mJ, 激光脉宽为几十 ns, 激光波长为 660 nm, 激光线宽 (带宽) 约为 0.001 cm^{-1} .

此外, 我们对输出激光的空间分布进行了改造, 使得输出激光在空间均匀分布, 这样可以有效提高干涉条纹的对比度. 图 1(a) 给出了探针光整形前铝靶面反射光所形成的干涉条纹, 图 1(b) 是干涉条纹强度分布曲线, 可以看出条纹对比度不是很好, 而且不同区域对比度不同. 为解决这个问题, 我们对探针光源进行空间整形, 使输出激光在空间上均匀分布, 均匀性优于 10%. 通过整形后得到的干涉图像如图 1(c) 所示, 图 1(d) 是条纹强度分布曲线. 可以看出, 探针光整形后光照在整个空间上都比较均匀, 且整个区域条纹的对比度明显变好.

2.2 靶面照明系统

靶面照明系统是将探针激光引入到靶面, 在靶面形成一个空间尺寸符合物理诊断需求的照明区域. 照明系统设计时应最大限度地利用探针光的能量, 同时避免非靶面反射激光对实验图像的干扰. 本 VISAR 设计的照明系统可以在靶面形成 1—1.5 mm 的均匀照明区域 (可以根据物理实验要求调节照明区域的尺寸). 同时探针光的有效利用率大于 90%, 比传统 VISAR 照明系统的能量利用率提高了 3 倍. 图 2 给出了传统 VISAR 照明系统的示意图. 探针激光通过半透半反镜 (BS) 引入到靶面, 靶面返回的激光同样通过 BS 引入到干涉系统, 该照明系统对探针激光能量的利用率小于 25%. 改进后的 VISAR 照明系统如图 3 所示. 该系统用一块偏振分光镜 (PBS) 代替了原来普通的 BS, 然后在靶和成像镜 L 之间加入一块 1/4 波片. 探针激光输出的激光 (p 偏振) 有 95% 以上透过 PBS 进入到靶面, 从靶面反射回来的激光由于两次经过 1/4 波片, 偏振态转了 90° , 变成了 s 偏振光, s 偏振光经 PBS 被全反 (反射率 $R > 95\%$), 然后进入干涉系统. 该照明系统有两个优点: 第一, 与传统照明系统相比, 探针激光的能量利用率提高了 3 倍; 第二, 非靶面反射激光, 如成像镜或靶室窗口反射回来的激光不会进入干涉系统, 可以提高信号的对比度. 图 4 给出了相同实验条件下, 两种照明系统所得到的干涉条纹. 其中图 4(a) 是传统照明系统获得的干涉条纹, 平均强度约为 30, 强度太弱, 干涉条纹对比度不好. 图 4(b) 给出了新型照明系统下获得的干涉条纹, 平均强度约为 120, 强度计数和干涉条纹对比度都有明显提高.

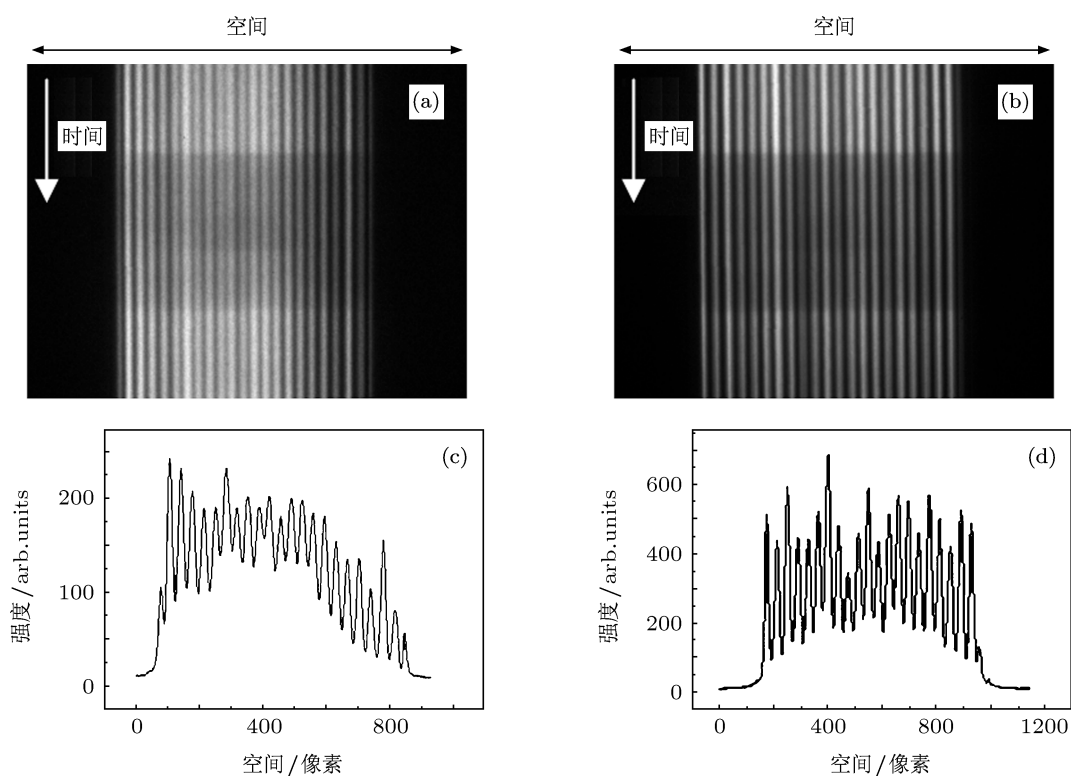


图 1 探针光整形前后铝平面靶反射光所形成的干涉条纹 (a) 探针光整形前干涉条纹; (b) 探针光整形后干涉条纹; (c) 整形前条纹强度分布; (d) 整形后条纹强度分布

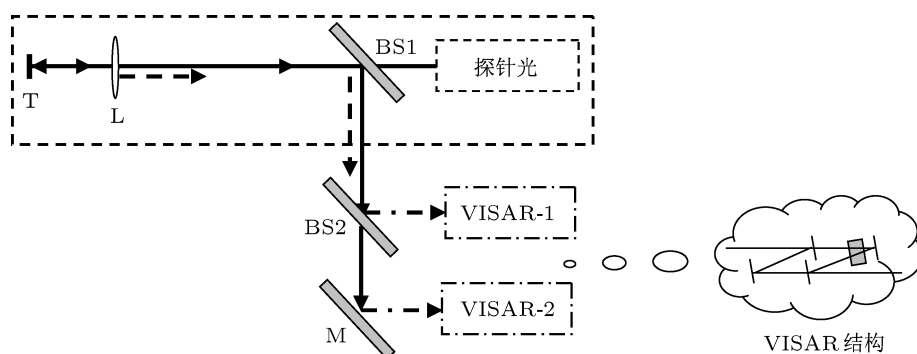


图 2 传统 VISAR 照明系统示意图 T, 靶; L, 成像镜; BS1, BS2, 半反镜; M, 铝镜; 其中虚线箭头表示从靶室窗口和成像镜反射回来的激光, 它会干扰信号光

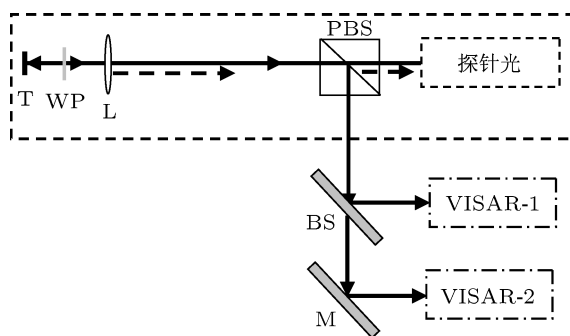


图 3 改进后 VISAR 照明系统示意图 T, 靶; WP, 1/4 波片; L, 成像镜; PBS, 偏振分光镜; BS, 半反镜; M, 铝镜; 其中虚线箭头表示从靶室窗口和成像镜反射回来的激光, 它不会进入干涉系统

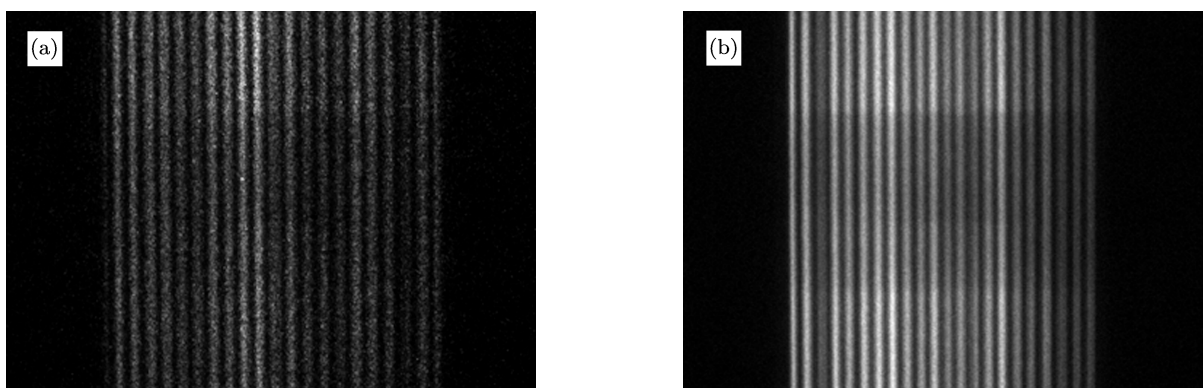


图4 铝平面靶反射光所形成的干涉条纹 (a) 传统照明系统下的干涉条纹 (平均强度约为 30); (b) 新型照明系统下的干涉条纹 (平均强度约为 120)

2.3 成像系统

VISAR 要求在获得清晰的干涉条纹的同时, 成像系统靶面有较高的空间分辨能力, 这就要求成像系统设计时兼顾空间分辨率和条纹定域性问题, 让靶面和干涉条纹同时清晰地成像到记录系统上. VISAR 采用显微放大和像传递相结合的成像系统. 实验时第九路激光从靶室北面正入射到靶面上, 靶点的中心高度为 1.9 m. 记录系统 (条纹相机) 的中

心高度约为 1.1 m, 靶面和记录系统既不在同一高度上也不在同一光轴上, 像在传递过程中会发生旋转. 这样, 待诊断物 (靶面上一条宽约为 $5\ \mu\text{m}$ 的水平线) 与条纹相机狭缝 (水平方向) 会有角度, 不能保证靶的瞄准区域与诊断区域相互对应. 为了解决这个问题, 设计了成像辅助系统 (道威棱镜系统), 通过旋转道威棱镜使得待诊断物与条纹相机狭缝方向一致. 这样极大地方便了整个光路的调节, 而且能保证诊断区域与打靶区域一致.

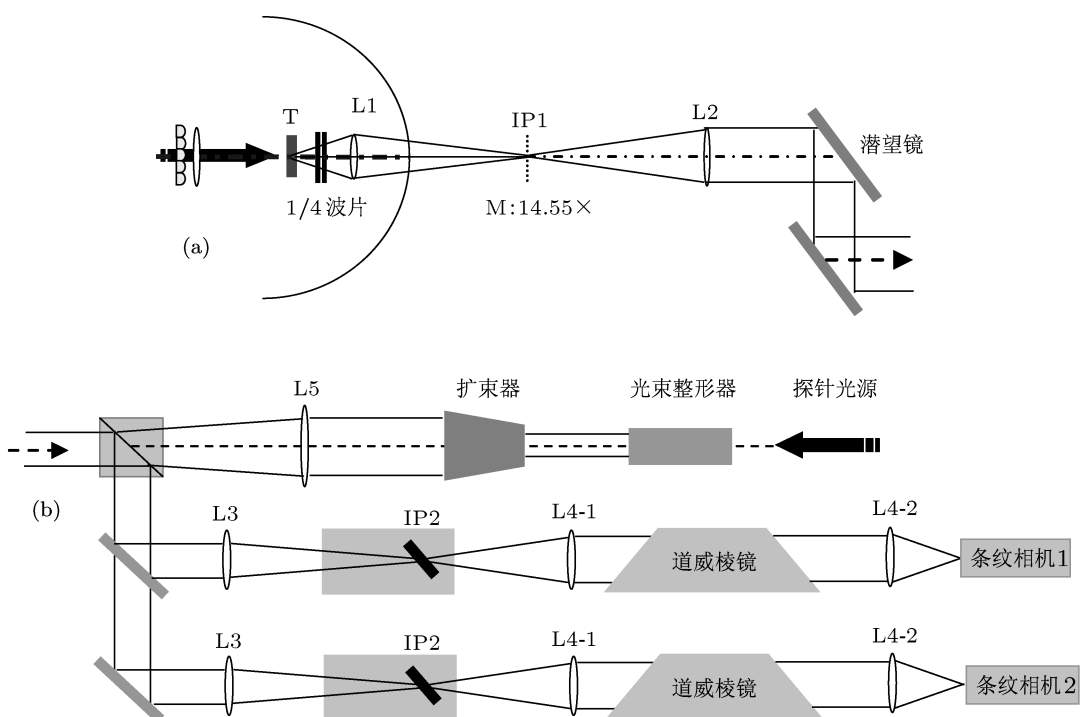


图5 成像系统示意图 (a) 靶面通过显微放大系统成像在 IP1 处, 用潜望镜降低整个光路的中心高度; (b) IP1 通过像传递系统 L2, L3 成像到 IP2 处, 最后成像到条纹相机狭缝上

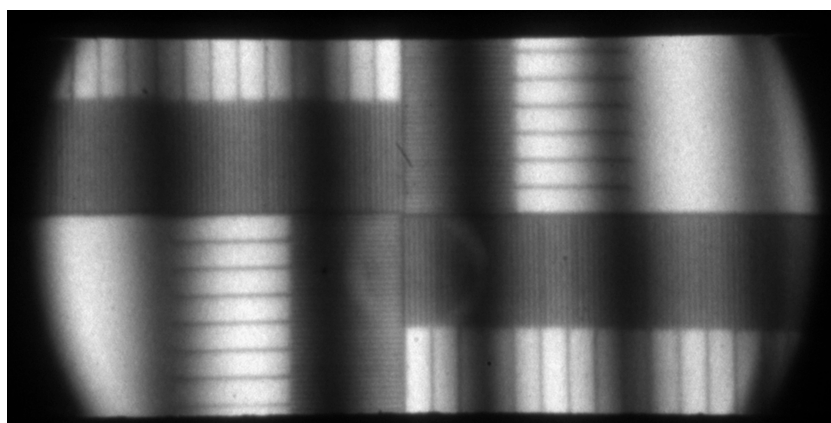


图6 VISAR 白光干涉条纹静态测试图像

靶经过一级显微放大系统和二级像传递系统后成像到记录系统(条纹相机狭缝),成像系统如图5所示.靶经过显微放大系统L1成像到IP1(见图5),放大倍数约为14.55,IP1经过像传递系统L2,L3成像到干涉仪的一个分束镜上,放大倍数约为0.76,IP2经像传递系统L4-1,L4-2成像到条纹相机狭缝上,放大倍数约为1,整个系统的放大倍数为11—12.成像系统的光学空间分辨率高于 $2\ \mu\text{m}$,整个系统(包括条纹相机)的空间分辨率优于 $7\ \mu\text{m}$,并且能保证靶面和干涉条纹同时清晰成像到记录系统上.成像系统空间分辨率标定结果如图6所示,分划板的最小刻线间距为 $7\ \mu\text{m}$.从图6可以看出,靶面(分划板)和白光干涉条纹能同时清晰成像到条纹相机上.整个系统的空间分辨率优于 $7\ \mu\text{m}$,此时白光干涉条纹也很清晰,说明干涉条纹的定域性也很好,干涉条纹完全定域在设计的位置上.

2.4 干涉系统

综合考虑物理需求、光路调节的难易情况和光学元件加工成本等因素,确定了干涉仪的结构,如图7所示(马赫-曾德型干涉仪).干涉仪两块末端反射镜的距离约为 $500\ \text{mm}$,两块分束镜之间的距离约为 $40\ \text{mm}$.干涉仪上采用的光学元件的尺寸为 $25.4\ \text{mm} \times 6\ \text{mm}$.其中干涉仪两块末端反射镜镀了针对波长 $660\ \text{nm}$ 的全反射膜,干涉仪中间两块镜子镀了针对波长 $660\ \text{nm}$ 的半透半反膜.此种干涉仪排布对称,可以抵偿分束镜基底引起的附加延迟(两路光分别经过基底一次);干涉仪可以采用尺寸较小的镜片,既能节约材料成本又能降低镜片加工难度(干涉仪中所使用的镜子的透过和反射面

形都要求满足约为0.05个波长);将像面定在干涉仪的一分束镜上,这样在调节条纹宽度和条纹方向时不会影响干涉条纹的定域位置.

为了精确设置干涉仪其中一臂的延时,首先要调节干涉仪两臂等光程,因此,干涉仪的一臂安装在高精度步进马达上.首先用利用平行光管1,2将四块镜子严格调成平行,然后移动其中一块末端反射镜(M1),直到出现白光干涉条纹,如图8所示.M1固定在一个高精度的步进马达上,它可以精确地将M1移动到指定位置,这样实现了干涉仪的两臂光程相等(等光程误差小于 $10\ \mu\text{m}$).然后在M1前加入标准具(一块双面平行的玻璃),标准具应选用热稳定性好、硬度大、膨胀系数小、化学稳定性好的材料制作.移动末端反射镜M1,移动距离为 $d = h(1 - 1/n)$,使得表观光路不发生变化.这样引入了一个光程差,其大小为

$$\tau = \frac{2h}{c}(n - 1/n), \quad (1)$$

其中 h 为标准具的长度, n 为标准具在波长 $660\ \text{nm}$ 处的折射率, c 为真空中的光速.对应的条纹常数为

$$F = \lambda/2\tau, \quad (2)$$

$1F$ 表示条纹每变化一个条纹对应靶面速度变化了 $F\ \text{km/s}$.

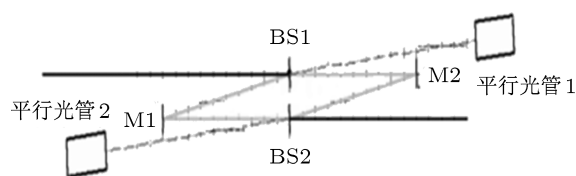


图7 干涉仪结构示意图

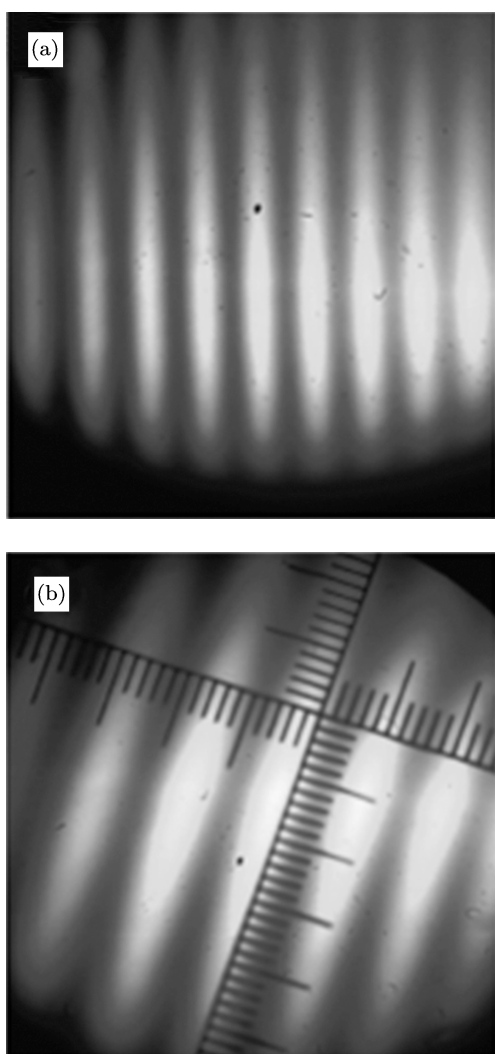


图8 干涉条纹图像 (a) 白光干涉条纹; (b) 分化板和干涉条纹同时成像到记录系统上

2.5 记录系统及数据处理系统

VISAR 的记录系统是条纹相机, 实验得到的是一幅干涉图像, 干涉图像中包含着时间、空间和速度信息. 必须对干涉图像进行分析处理, 得到相位 (条纹移动量), 由此计算出靶面速度变化. 由于仪器本身因素和周围环境的影响, 实验得到的干涉图像会有很多缺陷, 这增加了数据处理的难度. 因此, 必须对这类干涉图像的数据处理进行研究. VISAR 得到的是一幅明暗相间的干涉图像, 如图 9 所示. 图像的水平方向代表空间 (和靶面一一对应), 竖直方向代表时间 t 扫描方向. 条纹移动代表样品速度的变化. 条纹移动量和速度变化的关系为 $V(t) = K \cdot F(t)$, 其中 $F(t)$ 为条纹移动量. 由此

可知, 速度读取精度取决于 $F(t)$ 的读取精度. 一般而言, 由于仪器的热噪声和打靶时杂散光的影响, 干涉条纹会有缺陷, 直接读取条纹移动量会带来较大误差.

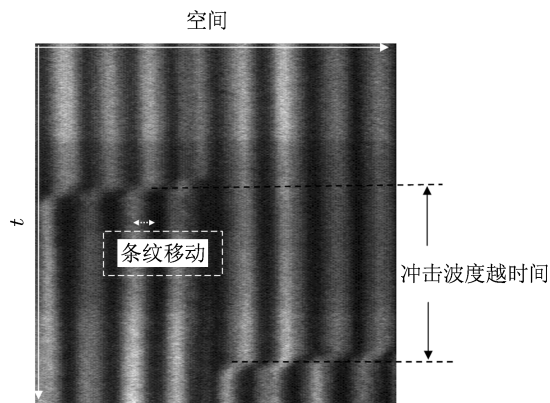


图9 VISAR 实验图像

干涉图像的原始数据由有用信号和随机噪声组成. 输入场分布可以表示为

$$f(x, y) = s(x, y) + r(x, y), \quad (3)$$

式中 s 和 r 分别表示有用信号和噪声, 用 S 和 R 分别表示其频谱, 则其频谱分布可以表示为

$$F(f_x, f_y) = S(f_x, f_y) + R(f_x, f_y). \quad (4)$$

只要信号与噪声在频域中的分布特点不同, 如信号能量集中在某一频带, 噪声能量分布频率范围很宽, 就可以采用带通滤波的方法有效抑制噪声, 提高图像对比度. 图 10(a) 是数值模拟给出的图像 (靶先经历一段时间的加速, 然后保持匀速运动, 信号中加入了高斯分布的随机噪声). 图像的二维及一维傅里叶频谱如图 10(b), (c) 所示, 可以看出, 图像由一个主频和很多高频信号组成.

图 11(a) 是进行滤波消除噪声后得到的图像, 它的二维及一维傅里叶频谱如图 11(b), (c) 所示. 图像进行滤波处理后信噪比明显提高, 但真正有用的信息是待测样品的速度 (冲击波速度或粒子速度等), 而速度信息与条纹移动量 (位相变化) 直接联系. 一般 VISAR 记录到的图像 (如图 9 所示), 其强度在空间方向呈正弦分布, 可表示为

$$S(x, t) = B(x, t) + A(x, t) \cos[\psi(x, t) + 2\pi f_0 x + \delta_0], \quad (5)$$

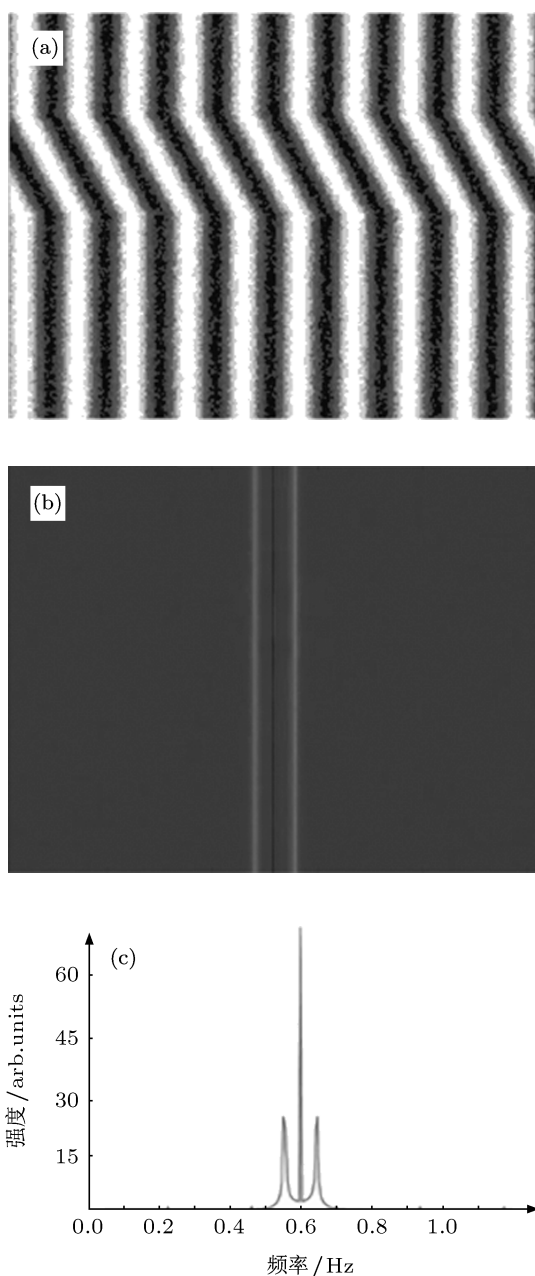


图 10 含噪声的干涉图像 (a) 数值模拟图像 (加入随机噪声); (b) 二维频谱分布; (c) 一维频谱分布

式中 $2\pi f_0 x + \delta_0$ 表示背景条纹花样相位的线性变化, 可以看作是一个具有空间频率为 f_0 和任意相位差 δ_0 的载波. 数据包裹在 $\psi(x, t)$ 中, 而 $\psi(x, t)$ 是叠加在载波上的相位调制. $B(x, t)$ 表示缓慢变化的背景强度, 或为非调制的平均信号强度, $A(x, t)$ 表示条纹幅度, $|A| \leq B$. (5) 式还可以表示为

$$S(x, t) = B(x, t) + E(x, t) \exp(2\pi i f_0 x + i \delta_0) + \text{cc.}, \quad (6)$$

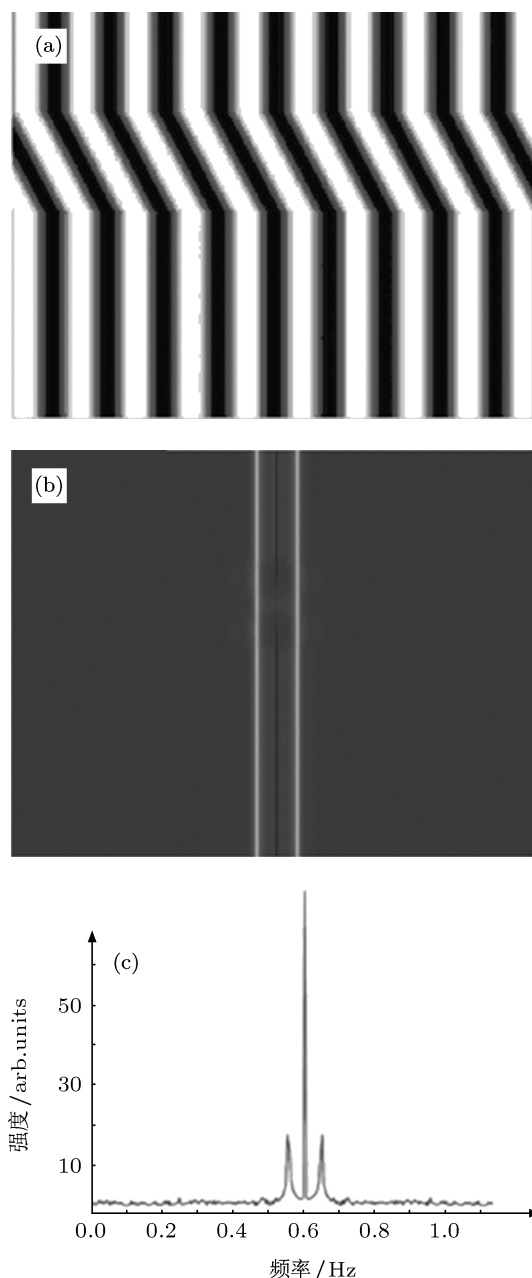


图 11 滤波处理后的干涉图像 (a) 消除噪声后的图像; (b) 二维频谱分布; (c) 一维频谱分布

其中 $E(x, t) = A(x, t) \exp[i\psi(x, t)]/2$. 在固定时刻作一维空间傅里叶变换得到

$$S(f, t) = b(f, t) + e(f - f_0, t) + e^*(f + f_0, t). \quad (7)$$

将背景函数 $b(f, t)$ 从包含相位信息 e 的函数中分离出来. 选择滤波函数可滤出 e 的正频率的功率谱, 并使其他频率的信息为 0 (包括 e 的负半周). 再

作逆傅里叶变换, 得到复变函数

$$D(x, t) = E(x, t) \exp(2\pi i f_0 x \delta_0). \quad (8)$$

“被捆绑的”相位可以从复值函数中提取出来, 即

$$\begin{aligned} W[\psi(x, t) + 2\pi f_0 x + \delta_0] \\ = \arctan[\operatorname{Re}(D), \operatorname{Im}(D)]. \end{aligned} \quad (9)$$

3 应用及推广情况

3.1 在激光驱动状态方程实验中的应用

VISAR 具有测试精度高 (速度测量不确定度约为 2%)、能实现速度连续测量等优点, 是目前激光装置上冲击波相关实验最主要的诊断设备.

3.1.1 透明材料高精度冲击绝热线测量

激光平台上开展的材料冲击绝热线测量通常采用阻抗匹配方法. 实验时通过测量标准材料和待测材料中的冲击波速度 (平均速度), 利用阻抗匹配法推算出待测材料的压强、粒子速度等参数. 采用这种方法开展冲击绝热线测量时要求冲击波具有很好的平面性和稳定性, 实验数据的可靠性和准确性依赖于冲击波渡越时间测量和靶厚度测量等因素.

VISAR 可以测量透明材料中冲击波波阵面速度, 因此可以用石英 (SiO_2) 作标准材料, 测量透明材料 (如 ICF 研究中关心的材料聚苯乙烯 (CH)) 的冲击绝热线, 利用 VISAR 可以记录冲击波波阵面在石英及 CH 中的速度历史, 并可以推算到 SiO_2/CH 界面时刻的速度 [12]. 用此方法测量冲击波速度完全不依赖于渡越时间和靶厚度等参数, 而且冲击波平面性及稳定性对实验数据也没有影响, 因此可以大大提高数据的可靠性和准确性. 图 12(a) 是用 VISAR 得到的实验图像, 标准具的长度分别为 10.016 和 34.986 mm, 对应于 SiO_2 中的条纹常数分别为 3.867 和 1.107 km/s, 对应于 CH 中的条纹常数分别为 3.552 和 1.017 km/s. 对实验数据进行处理, 可以得到 SiO_2 和 CH 材料中的冲击波波阵面的速度历史, 如图 12(b) 所示. 将 SiO_2 和 CH 中得到的速度外推到 SiO_2/CH 界面处, 得到界面处 SiO_2 和 CH 的冲击波速度分别为 $D_{\text{SiO}_2} = 16.7 \text{ km/s}$ 和 $D_{\text{CH}} = 18.377 \text{ km/s}$. 通过阻抗匹配法可以得到 CH 的 Hugoniot 参数. 图 12(c) 是 CH 冲击波速度和粒子速度的关系, 其中方形点来自文献 [12—16], 圆形点是 OMEGA 上用激光驱动得到的实验数据 [17], 三角形点是我们的实验结果. 可以看出, 我们的数据和国外实验数据没有明显偏离.

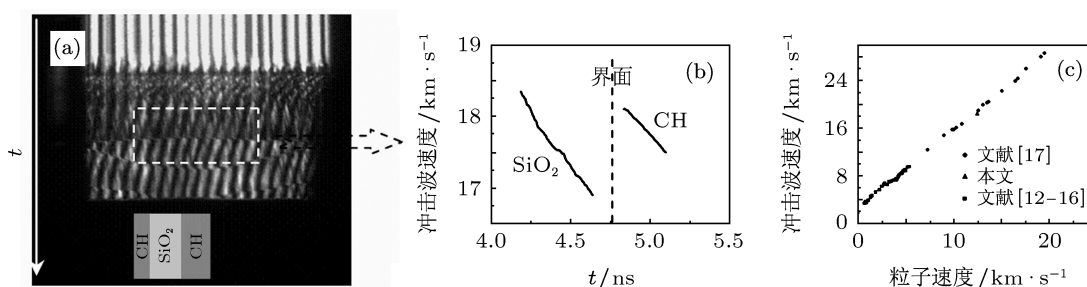


图 12 CH 冲击绝热线测量 (SiO_2 作标准材料) (a) 实验图像和靶构型; (b) 处理得到的冲击波速度历史; (c) 冲击速度和粒子速度的关系

3.1.2 激光驱动无冲击波压缩实验

利用激光脉冲整形技术形成一个缓慢上升的加载源, 能在材料中形成无冲击压缩 [18], 获取材料的无冲击压缩数据. 在神光 II 装置上开展了激光直接驱动无冲击压缩实验. 实验排布如图 13(a) 所示. 加载激光的波形如图 13(c) 所示, 激光脉冲宽度约为 3 ns. 驱动激光能量为 64 J. 实验用靶为 Al 三台阶靶, 窗口材料为 LiF, 利用 VISAR 作为诊断,

观察 Al/LiF 界面的速度变化过程. 由于 LiF 和 Al 的阻抗非常接近, 因此 Al/LiF 界面速度可以直接等价于 Al 材料的粒子速度. 图 13(b) 为实验得到的无冲击压缩图像, 从图像上可以看到, 在开始阶段 (图 13(b) 中 S 时刻之前) 粒子速度连续光滑变化, 没有出现明显的冲击现象. 到后面部分 (图 13(b) 中 S 时刻之后), 速度变化出现了陡变, 说明可能已经形成冲击.

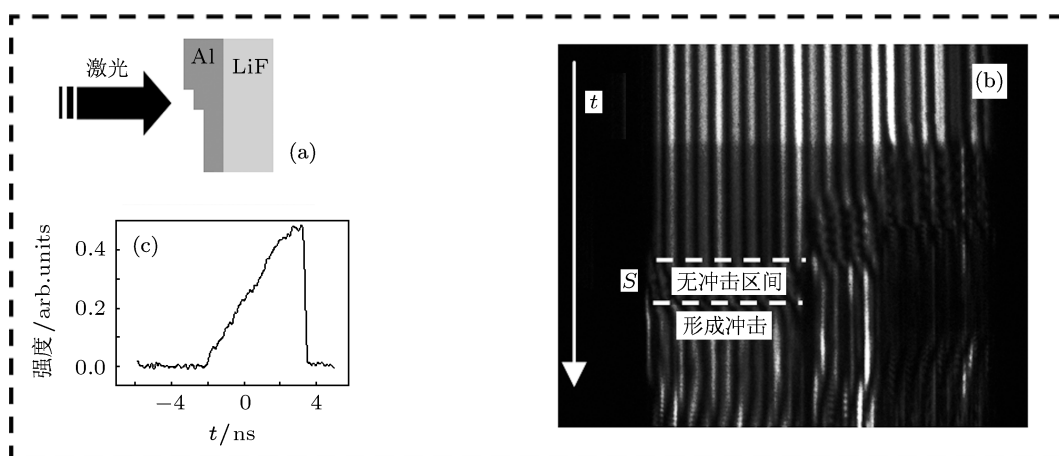


图 13 激光直接驱动无冲击压缩实验 (a) 实验排布; (b) 实验图像; (c) 驱动激光波形

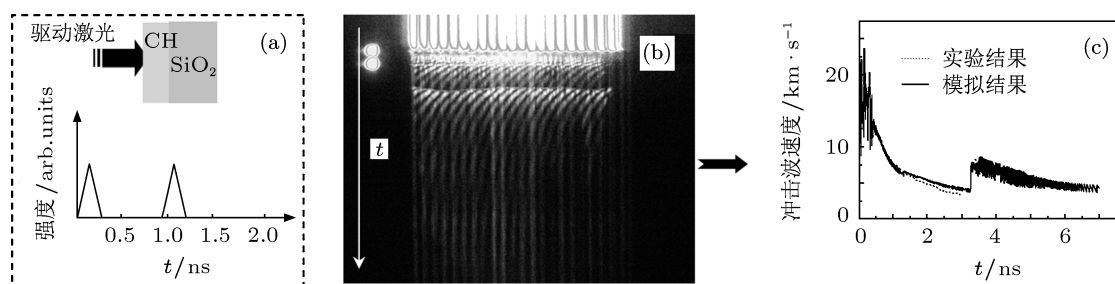


图 14 冲击波追赶实验 (a) 实验排布和驱动激光波形; (b) 实验图像; (c) 冲击波速度随时间变化的历史

3.2 冲击波时空整形精密诊断实验

利用石英平面靶开展了冲击波追赶^[19-21]实验, 获得了多个冲击波在石英材料中的冲击波速度变化历史、冲击波追赶时间、冲击波汇合后的速度等信息. 实验排布和实验图像如图 14(a), (b) 所示. 对实验图像进行处理可以得到冲击波速度随时间变化的过程, 处理结果如图 14(c) 所示, 其中黑色线是理论计算结果, 黑色点是实验测量得到的冲击波速度. 实验结果和理论模拟符合得比较好.

4 结论

在神光 II 激光装置上研制了符合激光平台上进行冲击波相关物理实验研究的成像型 VISAR, 利用新颖的靶面照明系统使探针激光能量利用率提高了 3 倍. 在探针光能量较小、脉冲宽度较大的情况下也能获得高对比度的实验图像, 并且能用于

从亚 ns (状态方程实验) 到几十 ns (无冲击及压缩实验和 R-T 不稳定性实验) 不同时间尺度冲击波传播相关物理实验的诊断. 诊断设备具有较高的空间分辨率 (约为 $7\ \mu\text{m}$) 和较大的靶面诊断范围 (约为 $1\ \text{mm}$). 利用偏振分光镜和波片系统组成了能量调节系统, 极大地方便了探针光能量和条纹相机匹配的调节 (不同靶材料对探针光的反射率不一样). 利用 VISAR 开展了各类探索实验. 采用透明的 SiO_2 作为标准材料, 测量 CH 的 Hugoniot 数据, 为进一步获得高精度 CH 材料的 Hugoniot 数据奠定了基础. 利用激光脉冲整形技术获得了 Al 材料中无冲击压缩的实验图像, 最高的无冲击压缩压力约为 $20\ \text{GPa}$, 为进一步开展更长脉冲、更高压力下无冲击压缩实验奠定了基础. 利用 SiO_2 开展了冲击波追赶实验, 获得了冲击波追赶实验图像, 并与理论模拟进行了对比, 理论和实验符合得比较好, 为进一步开展液氙材料中冲击波时空整形实验奠定了基础.

- [1] Bark L, Hollenbach R 1974 *Rev. Sci. Instrum.* **33** 1617
- [2] Bark L, Hollenbach R 1970 *J. Appl. Phys.* **41** 4208
- [3] Cellier P M, Bradley D K, Collins G W, Hicks D G, Boehly T R, Armstrong W J 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 4916
- [4] Benuzzi A, Löwer T, Koenig M, Faral B, Batani D, Beretta D, Danson C, Pepler D 1996 *Phys. Rev. E* **54** 2162
- [5] Batani D, Morelli A, Tomasini M, Benuzzi A, Philippe F, Koenig M, Marchet B, Masclet I, Rabec M, Reverdin Ch, Cauble R, Celliers P, Collins G, DaSilva L, Hall T, Moret M, Sacchi B, Baclet P, Cathala B 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 235502
- [6] Batani D, Strati F, Stabile H, Tomasini M, Lucchini G, Ravasio A, Koenig M, Benuzzi A, Nishinura H, Ochi Y, Ullschmied J, Skala J, Kralikova B, Pfeifer M, Kadlec Ch, Mocek T, Prag A, Hall T, Milani P, Barborini E, Piseri P 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 065503
- [7] Boehly T R, Vianell E, Miller J E, Craxton R S, Collins T J B, Goncharov V N, Igumenshchev I V, Meyerhofer D D, Hicks D G, Celliers P M, Collins G W 2006 *Phys. Plasmas* **13** 056303
- [8] Boehly T R, Munro D, Celliers P M, Olson R E, Hicks D G, Goncharov V N, Collins G W, Robey H F, Hu S X, Morozas J A, Sangster T C, Landen O L, Meyerhofer D D 2009 *Phys. Plasmas* **16** 056302
- [9] Robey H F, Boehly T R, Olson R E, Nikroo A, Celliers P M, Landen O L, Meyerhofer D D 2010 *Phys. Plasmas* **17** 012703
- [10] Song P, Wang Q S, Dai C D 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 476 (in Chinese) [松萍, 王青松, 戴诚达 2011 物理学报 **60** 476]
- [11] Park H S, Remington B A, Becker R C, Becker R C, Bernier J V, Cavallo R M, Lorenz K T, Pollaine S M, Prisbrey S T, Rudd R E, Barton N R 2010 *Phys. Plasmas* **17** 056314
- [12] Bushman A V, Zhernokletov M V, Lomonosov I V, Sutulov Y N, Fortov V E, Khishchenko K V 1996 *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **109** 1662
- [13] McQueen R G, Marsh S P, Taylor J W, Fritz J N, Carter W J 1970 *The Equation of State of Solids from Shock Wave Studies* (New York: Academic Press) p293
- [14] Thiel M V 1977 *Compendium of Shock Wave Data* (Livermore: Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-50108) p504
- [15] Marsh S P 1980 *LASL Shock Hugoniot Data* (Berkeley: Univ. California Press) p600
- [16] Dudoladov I P, Rakitin V I, Sutulov Y N, Telegin G S 1969 *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **4** 148
- [17] Barrios M A, Hicks D G, Boehly T R, Fratanduono D E, Eggert J H, Celliers P M, Collins G W, Meyerhofer D D 2010 *Phys. Plasmas* **17** 056307
- [18] Swift D C, Johnson R P 2005 *Phys. Rev. E* **71** 066401
- [19] Boehly T R, Vianello E, Miller J E, Craxton R S, Collins T J B, Goncharov V N, Igumenshchev I V, Meyerhofer D D, Hicks D G, Celliers P M, Collins G W 2006 *Phys. Plasmas* **13** 056303
- [20] Shu H, Fu S Z, Huang X G, Jia G, Zhou H Z, Wu J, Ye J J, Gu Y 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 1142
- [21] Boehly T R, Goncharov V N, Seka W, Hu S X, Marozas J A, Meyerhofer D D, Celliers P M, Hicks D G, Barrios M A, Fratanduono D, Collins G W 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 195005

Line-imaging optical recording velocity interferometer at “Shengguang-II” laser facility and its applications*

Shu Hua^{1)†} Fu Si-Zu¹⁾ Huang Xiu-Guang¹⁾ Ye Jun-Jian¹⁾ Zhou Hua-Zhen¹⁾
Xie Zhi-Yong¹⁾ Long Tao²⁾

1) (*Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China*)

2) (*Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

(Received 30 July 2011; revised manuscript received 23 September 2011)

Abstract

A line-imaging optical recording velocity interferometer (VISAR) is implemented at the “Shengguang II” laser facility. The spatial resolution is $\sim 7 \mu\text{m}$, the effective field of view in the target plane is $\sim 1 \text{ mm}$. We propose a new illumination method with increasing three times the luminosity of such a diagnostic. The VISAR is applied to experiments of laser-driven equation of state shockless compression, and shocktiming.

Keywords: velocity interferometer, shock wave, equation of state, laser

PACS: 41.75.Jv, 07.60.Ly

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2010AA8041016).

† E-mail: shuhua1979@163.com