

超高压下冲击波速度直接测量技术*

王峰^{1)†} 彭晓世¹⁾ 刘慎业¹⁾ 李永升²⁾ 蒋小华¹⁾ 丁永坤¹⁾

1) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2009年10月22日收到; 2010年4月27日收到修改稿)

针对超高压下透明材料的高压离化机理, 分析了透明材料中冲击波直接诊断技术的基本方法. 利用 Drude-自由电子气模型, 分析了不同冲击压力下冲击波阵面反射率的变化. 从理论上比较了不同探针光波长反射率的差别, 发现探针光波长为 660 nm 时比探针光波长为 532 nm 时获得的冲击波阵面反射率要高. 对探测器“致盲”问题也进行了研究. 通过分析反射信号的时间顺序和强度大小, 发现“致盲”效应是由 X 光对透明窗口离化引起的. 同时, 发现方波驱动脉冲平台的前沿到达时刻和 X 光离化效应出现的时刻相同, 冲击波信号到达时刻晚于 X 光离化时刻. 通过实验结果, 得到蓝宝石中冲击波速度为 35 km/s 时, 其波阵面的反射率约为 40%. 通过理论分析和实验数据比对的方法, 验证了蓝宝石中的减速曲线. 给出了加蓝宝石窗口后的测速公式. 经过和实验对比, 确认了测速公式的正确性.

关键词: 冲击波, 光学诊断, 成像, 干涉仪

PACS: 52.35.Tc, 52.50.Lp, 62.50.+p

1. 引言

在惯性约束聚变 (ICF) 研究领域, 冲击波测量具有小尺度、超高压、超高速、短持续时间和高时间分辨的特点. 在冲击波诊断领域, 可测量“任意反射面的速度干涉仪”技术, 已经成为诊断冲击波作用下样品自由面速度剖面或粒子速度剖面的主要技术. 该技术简称为 VISAR (velocity interferometer system for any reflector) 技术^[1,2]. 以往的加窗 VISAR 技术主要是针对粒子速度进行诊断的, 而对透明材料中冲击波速度的直接测量技术则是高压物理研究的一个热点^[3-9]. 在冲击压力高达 TPa (1 TPa = 10^{12} Pa) 以上的强冲击波作用下, 固体透明材料将产生压致电离, 从而在冲击波阵面上产生反射面, 反射探针光^[1-3]. 在冲击高压作用下, 整个离化区的表面前沿, 也就是冲击波阵面, 会反射探针光, 其基本原理是菲涅耳定律. 只是根据离化度的不同, 穿透深度会有所不同. 目前国际上使用 Drude 模型^[5,8]来计算离化效应产生的反射率. 这里的离化是由强冲击造成的, 形成的离化区可以反射探针

光, 并提供冲击波阵面传输的直接信息. 这一原理是直接测量透明介质中冲击波速度的出发点.

本文给出了透明材料冲击波直接诊断技术的原理, 分析了预热效应的影响. 对神光 III 原型装置上完成的成像型 VISAR 实验进行了介绍, 提供了透明蓝宝石材料中冲击波阵面传输的实验数据. 通过实验数据, 证明获得的是冲击波阵面反射的信号. 同时, 证明探测器“致盲”是由于 X 光离化引起的. 该理论模型和实验结果将为 VISAR 技术应用到 ICF 领域提供理论模型, 为透明材料中冲击波速度直接测量技术的发展提供直接的支持.

2. 基本原理分析

为了定量地描述冲击波阵面形成反射率, 文献 [8] 发展了一种半导体模型, 其基本思想: 一是高压造成晶体外围能带结构变化, 使其带隙宽度变窄并离化出部分“自由电子”; 二是冲击波阵面区域的压力最高, 高压离化最严重, “自由电子”数量最多, 从而会形成一个对可见光的反射面. 可见光在进入该区域后再经过很薄的区域就被反射回去, 从而将波

* 国家自然科学基金 (批准号: 10805041) 资助的课题.

† E-mail: xiaozei7566@sohu.com

阵面的速度信息带进干涉仪,通过 VISAR 的数据处理技术,就可以获得冲击波阵面速度的信息,从而达到直接测量冲击波阵面速度的目的.

能带变化过程如图 1 所示. 在弱冲击下 (10^2 Pa 量级),能带的带隙宽度略有减小,在强冲击下 (TPa 量级),晶体的外围能带发生重叠,从而产生共用的外围电子. 一般透明固体材料不存在虚部,但是在高压电离条件下,冲击波阵面上产生“自由电子”,其反射率的计算就可以使用金属光学的基本思想进行计算. 根据 Drude-自由电子气模型^[8],其冲击波阵面的反射率可以计算得到

$$R = \frac{(n - n_0)^2 + \kappa^2}{(n + n_0)^2 + \kappa^2}, \quad (1)$$

$$n + i\kappa = \sqrt{\varepsilon_B \left[1 - \frac{\omega_p(E_G)^2}{\omega^2} \frac{1}{1 - i/\omega\tau(E_G \cdot \gamma)} \right]}, \quad (2)$$

(1) 式就是材料的折射率存在虚部时的菲涅尔反射率公式,其中 R 是反射率. 在高压下,材料的折射率变成复折射率, $n = \sqrt{\varepsilon}$, κ 表示折射率的虚部. 其中 n_0 是透明材料未被压缩时的折射率, $\varepsilon_B = n_0^2$, 表示外推的折射率^[8]. 对 532 nm 的激光而言, $\omega = 3.5 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 为光频, $\omega_p^2 = N_e e^2 / \varepsilon_B \varepsilon_0 m^*$ 表示等离子体振荡频率, N_e 为自由电子数目, e 是电子电量, ε_0 是介电常数, m^* 为电子折合质量 $m_e/2$. E_G 表示能带宽度, τ 表示弛豫时间,与带隙宽度和拟合因子 γ 都有关系.

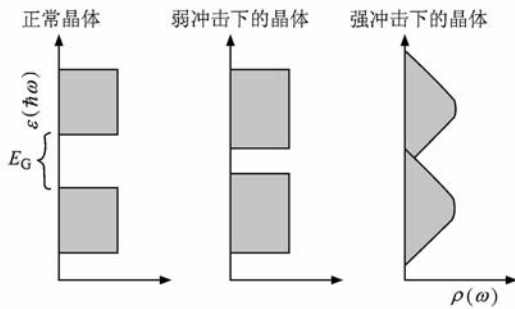


图 1 不同压力下晶体能带结构变化示意图

图 2 是利用 QEOS 方程计算蓝宝石的雨贡纽数据,可以看到,冲击波速度为 35 km/s 的温度为 7 eV 左右^[8]. 图 3 是利用 Drude-自由电子气模型计算得到的反射率图^[8,10,11]. 其中以 660 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) 作探针光得到的反射率较高,以 532 nm 作探针光得到的反射率较低. 尤其在低温阶段,例如 1.5 eV,也就是大约 21 km/s 的冲击波速度下,以 660

nm 作探针光得到的反射率将比以 532 nm 作探针光得到的反射率高大约 3%. 另外,该技术测量反射率的下限约为 1%,其对应的速度约为 20 km/s. 通过计算发现,针对蓝宝石材料,该技术使用的下限约为 20 km/s,反射率约为 1%. 所以,如果是测量低压段的冲击波速度,最好选择长波长的激光器作探针光源.

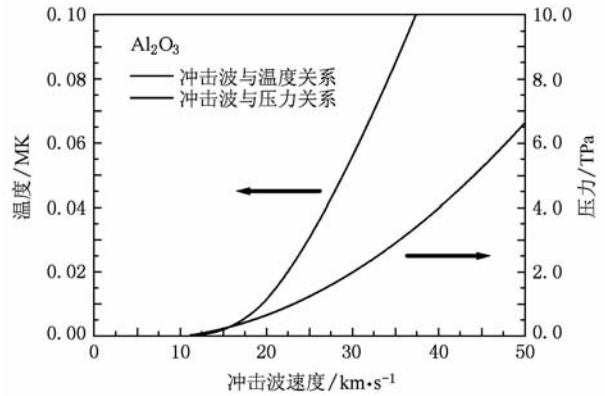


图 2 蓝宝石晶体的雨贡纽数据^[8]

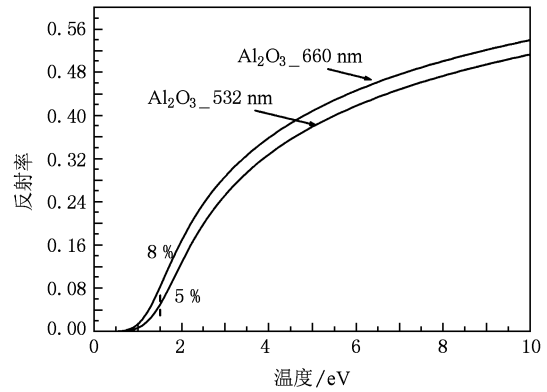


图 3 冲击波阵面反射率与冲击波温度的关系^[8,10,11]

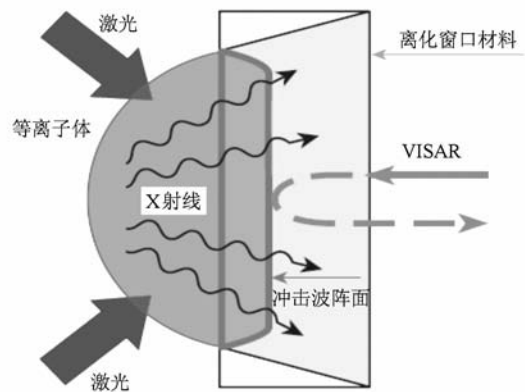


图 4 X 光离子化对诊断影响示意图

另外,在 ICF 研究领域,存在一个对诊断系统致盲的问题^[9]. 图 4 表示 X 光离化效应对 IVISAR 诊断影响的示意. 首先是间接驱动时靶腔里面产生的 X 光对透明窗口材料离化,使得透明窗口材料中产生大量的“自由电子”,其共振频率与探针光频率接近;其次产生大量“自由电子”的透明窗口材料对探针光产生了强烈的吸收,造成反射光信号很弱;最后从表象上来看,这种离化效应就像窗口材料被 X 光漂白,严重时这种现象将会导致诊断失败,无法得到速度信息.

3. 光路系统和实验结果

3.1. 光路系统

整个系统的实验装置如图 5 所示. 探针光发出的激光通过多模光纤进入实验系统,光纤输出的激光通过透镜扩束,进入成像系统聚焦后,打到靶上,靶反射的光重新被成像系统收集,并被分光进入两套光路. 实验中使用的激光器波长为 532 nm,脉宽为 10 ns,线宽小于 100 MHz ($1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$). 根据估算,其速度分辨率优于 $30 \text{ m} \cdot \text{s} / \text{Fr}$,满足实验要求.

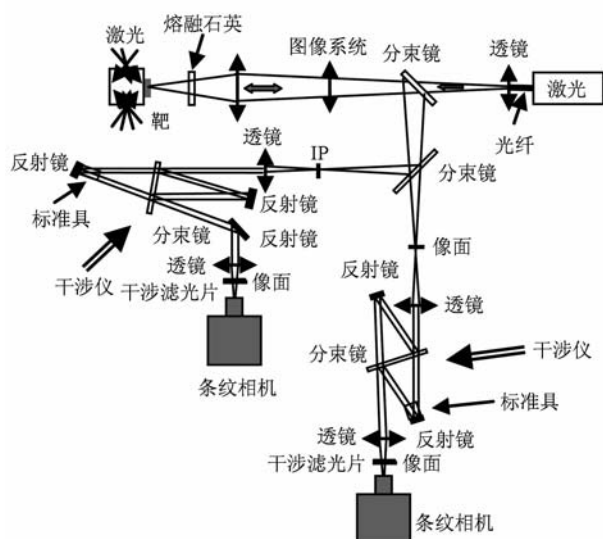


图 5 成像型 VISAR 系统排布示意图

一般用固体透明材料,如蓝宝石, LiF 或者 CH 材料作冲击波调速过程诊断的传输材料. 打靶时激光照射进靶腔内,产生的冲击波在靶内部传播. 在冲击波传入透明窗口材料以后,固体透明材料将会

高压离化,从而在冲击波阵面上产生反射面,反射探针光^[8]. 冲击波阵面的运动反映为条纹相机狭缝上条纹的移动. 通过反演条纹相机上条纹的移动,将获得冲击波波阵面传输的速度历史曲线.

3.2. 实验结果

图 6 是实验用装置的示意图. 实验中采用单端驱动,八束并打的条件. 单束激光条件为:能量为 500 J,波长为 351 nm,峰值脉宽为 1 ns. 实验中铝基底的厚度为 $60 \mu\text{m}$,透明窗口采用蓝宝石. 在蓝宝石和基底之间有一层环氧胶粘合,厚度约为 $6 \mu\text{m}$. 相对于传统 VISAR 技术而言,我们这里使用的是平行平面窗口.

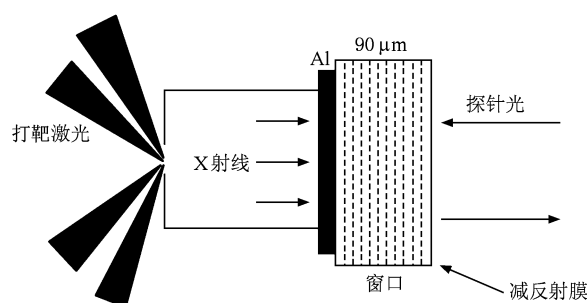


图 6 实验打靶示意图

为了获得比较高的反射率,根据文献[8]选用蓝宝石作窗口. 但是,根据 X 光离化的原理,蓝宝石的外壳层电子数目较多,也有可能产生很强的离化效应^[9]. 为了平衡 X 光离化和冲击波阵面反射率的关系,基底材料的选择以及厚度匹配就很重要. 这里选择基底材料为 Al,厚度为 $60 \mu\text{m}$ 以减小 X 光离化的影响. 实验发现这样还是有效的,但是预热效应仍很严重.

图 7 是最高辐射温度为 170 eV 条件下获得的条纹未完全间断的实验条纹图. 最上面的光点是时标光,小点之间的距离是 500 ps. 使用时标光可以让我们对各个部分得到的信号作对应. 通过图 7 可以看到,黑区出现的时刻与激光脉冲平台期到达的时刻相同,之后条纹对比度减小,在激光脉冲平台期结束后,条纹对比度有所增加. 通过条纹图和激光脉冲的分析,可以看到在激光峰值到达时刻,离化效应开始出现. 沿时间方向,离化效应也是逐渐减弱的. 而且,在离化效应发生期间,条纹没有发生移动. 说明冲击波在离化效应期间还没有到达窗口

材料,而是在 Al 中传输. 黑区后期出现了一个反射率突然增加的情况,与文献[5,8—12]报道相同.

图 7 中黑区之后的反射面就是冲击波的波阵面,其减速曲线就是波阵面的减速曲线. 根据已有的数据处理程序,对图 7 进行处理,得到了减速曲线. 为了将驱动器激光波形、理论计算的冲击波速度历史曲线和对图 7 处理得到的冲击波速度历史曲线进行对比,将三条曲线放在一张图中,得到了图 8. 图 8 左边的纵轴坐标系针对激光脉冲能量,用向左的箭头表示;图 8 右边的纵轴坐标系针对冲击波速度,用向右的箭头表示;图 8 中网格部分就是离化效应作用的区域;图中标注了几个关键点的数据值. 理论计算发现,在胶层里面速度有一个跳变(达到 41 km/s),之后迅速衰减到 32 km/s,最后在 4.5 ns 位置衰减到 23 km/s. 实验数据处理发现,出界面到达蓝宝石中 2.2 ns 左右时刻的速度为 35 km/s,但在 3.7 ns 时由于条纹质量不好导致速度高于理论值,为 27 km/s,最后在 4.5 ns 衰减到 25 km/s. 综合图 7 的波阵面反射率和图 8 的冲击波速度,发现在蓝宝石中冲击波阵面起始点(2.2 ns 左右时刻)冲击波速度为 35 km/s 时,反射率约为 40%,与图 3 的理论计算结果符合较好. 通过理论数据可以知道对应蓝宝石中的压力超过 1 TPa.

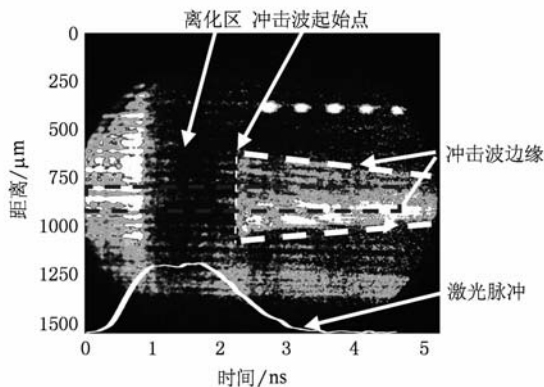


图 7 最大辐射温度为 170 eV 条件下,有预热效应影响的蓝宝石窗口中冲击波速度直接测试实验结果 激光脉冲平顶部分为 1 ns

比较实验处理和理论计算的冲击波速度,除了在环氧胶里面的加速现象没有看到之外,其余在时间点和速度值以及变化趋势上面,实验结果和理论计算符合得比较好. 对于实验结果与理论计算数据的差距,初步分析原因有两个:一是环氧胶里面冲

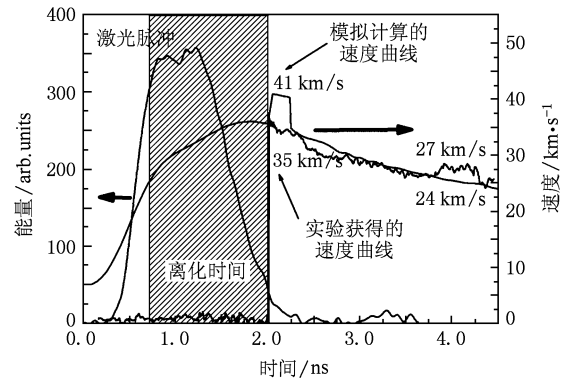


图 8 激光脉冲与产生冲击波速度理论曲线、实验曲线综合图 阴影区是 X 光离化作用的时间段

击波速度有一个加速过程,而后进入蓝宝石又会有一个减速过程,由于胶层很薄(6 μm),这样条纹跳变的时间很短(约为 160 ps),而且由于胶层本身处于无定型态,形成的冲击波反射面也不是很规则,对应的条纹也不会清晰;二是探测胶层里面快速的条纹跳变,需要探针光具有较高的时间和空间稳定性,也就是需要输出激光脉冲能量稳定,模式为单纵模,而实际实验中探针激光器输出状态不稳,存在时间方向的调制,导致跳变信号很快地被系统噪声淹没,所以,冲击波在胶层中的加速过程没有在最后的数据中反映出来. 对于 3.7 ns 以后冲击波速度比理论计算值高的问题,主要原因是由条纹质量不好造成处理误差造成所致.

4. 实验结果讨论

4.1. 速度计算公式变化

在加窗测界面运动速度的时候, $\Delta v/v_0$ ^[13]是由于界面之前的冲击波对窗口进行预压缩,引起窗口材料折射率的变化,从而引入附加多普勒频移所引起的. 在我们的实验中,直接测量的是冲击波阵面的速度,冲击波之前的介质折射率并没有变化. 由于进入蓝宝石的光波波长发生了变化,所以,产生的多普勒频移也与进入的光波长有关. 在蓝宝石里面光波长变成 λ_0/n ,所以,冲击波阵面的速度计算公式变成

$$u\left(t - \frac{\tau}{2}\right) = \frac{\lambda_0}{2\tau(1 + \delta)n_{00}} \cdot F(t), \quad (3)$$

式中 t 是样品运动时间, τ 是干涉仪内两光路间的延

迟时间, λ_0 是激光波长, δ 是标准具色散引入的修正项, 其中 $\delta = 0.0318^{[5]}$, 可以取蓝宝石静态折射率的值为 $n_{00} = 1.77$ (532 nm), 条纹常数为 $7.3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}/\text{Fr}$.

4.2. 条纹视场变化

条纹总体趋势是视场在减小, 原因是随着冲击波的传输, 边缘部分的冲击波减速较快, 造成冲击波阵面发生弯曲, 边缘部分的冲击波反射信号已经不能进入成像系统, 而造成三角形的收光趋势. 在冲击波的边缘部分, 由于多普勒效应与中心部分已经有所不同. 根据文献[2]的讨论, 我们成像系统 F 数为 4.5, 基本上可以不考虑这个影响.

5. 结 论

理论分析了超高压下冲击波直接诊断的模型, 得到了冲击波速度与冲击波反射率的关系. 同时, 分析了预热效应对诊断的影响, 并用实验数据进行了验证. 通过成像型 VISAR 直接获得了辐射温度为 170 eV 条件下蓝宝石中的冲击波减速历史实验数据. 冲击波阵面的反射率在 35 km/s 速度下约为 40%, 对应冲击波压力超过 1 TPa. 冲击波反射率与理论计算结果符合较好. 实验中还发现预热问题对实验结果的影响非常显著. 计算冲击波速度的公式由于窗口材料的引入也发生了变化. 不能直接使用真空中的计算公式, 而应该将波长改为 λ_0/n 再进行计算.

-
- [1] Barker L M, Hollenbach R E 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 4669
 - [2] Hu S L 2001 *Laser Interferometry for Measuring Velocities* (Beijing: National Defence Industry Press) (in Chinese) [胡绍楼 2001 激光干涉测速技术(北京: 国防工业出版社)]
 - [3] Lu J X, Wang Z, Liang J, Shan Y S, Zhou C Z, Xiang W, Lu Z, Tang X Z 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 799 (in Chinese) [路建新、王 钊、梁 晶、单玉生、周创志、向 维、陆 泽、汤秀章 2006 强激光与粒子束 **18** 799]
 - [4] Chen Y J, Yang Y Y, Zhuo Y M, Yang L M 2006 *Optical Instruments* **28** 71 (in Chinese) [陈阳杰、杨雨英、卓永模、杨李铭 2006 光学仪器 **28** 71]
 - [5] Celliers P M, Bradley D K, Collins G W, Hicks D G, Boehly T R, Armstrong W J 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 4916
 - [6] He M Q, Dong Q L, Sheng Z M, Weng S M, Chen M, Wu H C, Zhang J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 363 (in Chinese) [何民卿、董全力、盛政明、翁苏明、陈 民、武慧春、张 杰 2009 物理学报 **58** 363]
 - [7] Zhang Y, Li Y T, Zheng Z Y, Liu F, Zhong J Y, Lin X X, Lu X, Liu F, Zhang J 2007 *Chin. Phys.* **16** 3728
 - [8] Hicks D G, Celliers P M, Collins G W, Eggert J H, Moon S J 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 035502
 - [9] Theobald W, Miller J E, Boehly T R, Vianello E, Meyerhofer D D, Sangster T C, Eggert J, Celliers P M 2006 *Phys. Plasmas* **13** 122702
 - [10] Celliers P M, Collins G W, Da Silva L B, Gold D M, Cauble R, Wallace R J, Foord M E, Hammel B A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5564
 - [11] Hicks D G, Celliers P M, Collins G W, Eggert J H, Moon S J 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 025502
 - [12] Celliers P M, Collins G W, Hicks D G, Koenig M, Henry E, Benuzzi-Mounaix A, Batani D, Bradley D K, Da Silva L B, Wallace R J, Moon S J, Eggert J H, Lee K K M, Benedetti L R, Jeanloz R, Masclet I, Dague N, Marchet B, Rabec Le Gloahec M, Reverdin Ch, Pasley J, Willi O, Neely D, Danson C 2004 *Phys. Plasmas* **11** L41
 - [13] Barker L M, Hollenbach R E 1970 *J. Appl. Phys.* **41** 4208

Direct measurement technique for shock wave velocity under super high pressure^{*}

Wang Feng^{1)†} Peng Xiao-Shi¹⁾ Liu Shen-Ye¹⁾ Li Yong-Sheng²⁾ Jiang Xiao-Hua¹⁾ Ding Yong-Kun¹⁾

1) (*Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

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

(Received 22 October 2009; revised manuscript received 27 April 2010)

Abstract

With the ionization mechanism for the transparent material under the super high pressure, the basic measurement method of shock wave has been analyzed. With the Drude-free electron model, the change in reflectivity of shock wave front under different pressures has been analyzed. The reflectivity of shock wave front for different probe lasers has been compared in theory. And it was found that the reflectivity of shock wave front for 660 nm of probe laser is higher than that for 532 nm. The effect of the detector was found to be caused by the X-ray ionization of the transparent material after analyzing the reflectivity data in space-time scale. From the experiment data, it is found that the beginning of “blank” effect coincides with the start point of laser pulse. The shock wave is later than the “blank” effect under the square laser pulse. In the experiment, the reflectivity of shock wave front is about 40% when the shock velocity is 35 km/s. The theoretical decreasing curve of shock velocity in the sapphire window is confirmed by the experiment data. The formula to calculate the shock wave velocity in the transparent material was deduced and verified.

Keywords: shock wave, optical diagnosis, imaging, interferometer

PACS: 52.35.Tc, 52.50.Lp, 62.50.+p

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10805041).

[†] E-mail: xiaozei7566@sohu.com