

辐射驱动条件下冲击波诊断用透明窗口离化现象研究

王 峰 彭晓世 刘慎业 蒋小华 丁永坤

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 针对间接驱动情况下, 冲击波诊断中出现的 X 光离化问题, 利用半导体模型, 解释了蓝宝石和石英晶体材料中出现黑区的理论过程, 并进行了实验验证。利用光生载流子模型分析了石英晶体中时间方向上出现调制的过程, 并进行了实验验证。发现使用石英晶体作为窗口材料, 使用 60 μm 厚度的烧蚀层, 在 180 eV 辐射温度条件下, 没有出现明显的黑区。使用金层做阻挡层, 可以有效避免 X 光离化现象的出现, 从而为辐射驱动条件下冲击波诊断技术发展提供了参考。

关键词 激光技术; 冲击波; 离化; 半导体; 干涉仪

中图分类号 TN012 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0312002

Ionization Effect in the Transparent Window for Shock-Wave Diagnosis under Indirect Drive

Wang Feng Peng Xiaoshi Liu Shenye Jiang Xiaohua Ding Yongkun

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

Abstract When the shock wave is diagnosed under indirect drive, the ionization effect caused by the X-ray in the Al_2O_3 and quartz has been explained with semiconductor model. And the model explanation has been confirmed by the experimental data. In the experimental data, the signal modulation in quartz on time scale has been confirmed with photo-carrier model. It is found that there is not clear “blank” effect in the quartz even if the radiation temperature is 180 eV with 60 μm ablation. The “blank” effect can be avoided obviously after the Au is used as the blocking layer. And this method provides the diagnosis way for shock wave under indirect drive.

Key words laser technique; shock wave; ionization; semiconductor; interferometer

OCIS codes 120.0120; 120.4630

1 引 言

辐射驱动是利用激光烧蚀产生的冲击波, 其产生方式与气炮的加载方式有很大的区别。气炮加载中, 铝材料中能够产生 100 GPa 以上的压力。但是, 激光加载辐射驱动条件下, 能够产生比气炮加载更高的压力。这为开展超高压条件下的冲击波物理研究开辟了新的研究领域。强激光照射到材料上以后, 首先在材料中产生 X 光, 之后烧蚀材料产生冲击波。因此, 在激光加载条件下, 其冲击波的波系结构与气炮加载下有很大的不同。在获得超高压的同时, 也会引入 X 光对材料的预热、离化等问题。

在冲击压力高达太帕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, 进而反射探针光^[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, 其基本原理是非涅耳定律。这个反射面的存在给冲击波阵面的直接诊断提供了可能。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传输历程的主要技术, 该技术简称为任意反射面速度干涉仪技术 (VISAR)^[1,2]。仅就超高压冲击波诊断领域而言, 诊断技术还不太成熟。而对冲击波阵面的直接诊断技术一直是高压物理研究人员追求的目标^[3~9]。目前国际上使用德鲁德 (Drude) 模型^[5,8]来计算离化

收稿日期: 2010-06-29; **收到修改稿日期**: 2010-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(10805041)资助课题。

作者简介: 王 峰(1975—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光学诊断技术研发方面的研究。

E-mail: xiaozei7566@sohu.com

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。

在 VISAR 实验中,加窗 VISAR 技术已经是该领域的主流诊断技术。在辐射驱动条件下,X 光先于冲击波到达透明材料,会对透明材料的折射率、透明性等性能都产生很大的影响。关于这方面的研究,国内外报道都很少。本文就辐射驱动条件下特有的透明窗口离化问题蓝宝石和石英晶体材料的抗辐射特性进行了实验研究。尝试利用半导体模型解释了 X 光产生的黑区问题,利用载流子调制模型解释了石英晶体中出现的信号强度变化问题。通过与实验结果相比,证明了模型的有效性。利用在铝层上加金进行 X 射线阻挡的方法,对方波驱动条件下透明窗口离化现象进行了研究。该实验结果,对间接驱动条件下透明窗口的选取,以及烧蚀材料的选取具有一定的指导意义。

2 光路系统

整个成像型 VISAR (IVISAR) 系统的实验装置示意图如图 1 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 7 ns,线宽小于 50 kHz。其输出激光为经过整形的方波,可以从光强的变化直接判断冲击波阵面的反射率。

一般用固体透明材料,如蓝宝石、石英晶体或者

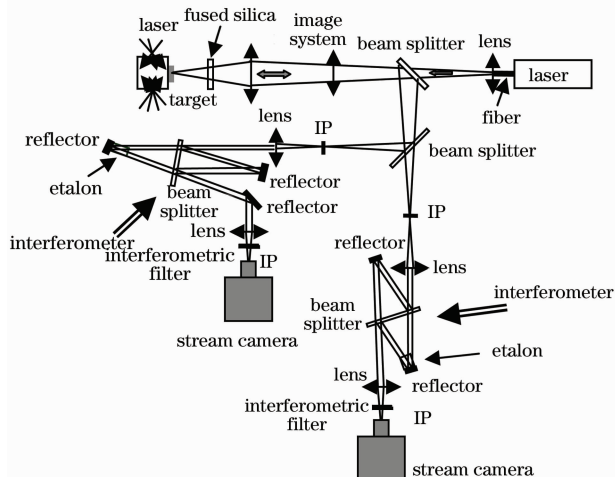


图 1 成像型 VISAR 系统排布示意图
Fig. 1 Schematic of VISAR system

CH 材料做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程曲线。

实验用装置与靶示意图分别如图 2(a), (b) 所示。实验中采用双端驱动,八束对打的条件。单束激光条件为:能量 400 J,波长 351 nm,峰值脉宽 1 ns。胶层在被 X 光照射时产生的离化效应非常明显,而且会与实际冲击波传输过程干扰;同时,不利于对辐射温度影响的判读^[6,9]。为了减小粘胶层的影响,透明蓝宝石窗口的背面镀了一层 1 μm 厚的铝层。部分实验中在铝台阶上还溅射了 5 μm 厚的金层。使用镀膜的透明窗口技术后,可以得到背景干净的干涉条纹图。冲击波到达之后,就会在界面上产生很清晰的条纹跳变,有利于数据的判读和分析。

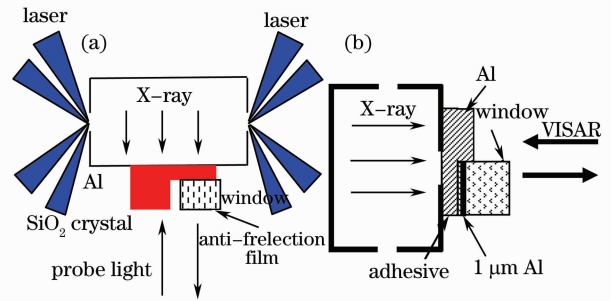


图 2 (a) 实验打靶示意图, (b) 靶示意图
Fig. 2 (a) Diagram of shooting experiment, (b) schematic of target

3 X 光离化模型

X 光离化模型首先是间接驱动时腔靶里面产生的 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^[9]。

整个过程可以理解为两个阶段:第一阶段是 X 光对半导体材料的激发,主要发生的是带间跃迁;第二阶段是价带上的载流子对入射探针光的吸收,主要发生的是带内跃迁。带间跃迁、带内跃迁的示意图如图 3 所示。由实验现象发现,对蓝宝石材料带

内跃迁的几率比石英晶体材料要高出很多。

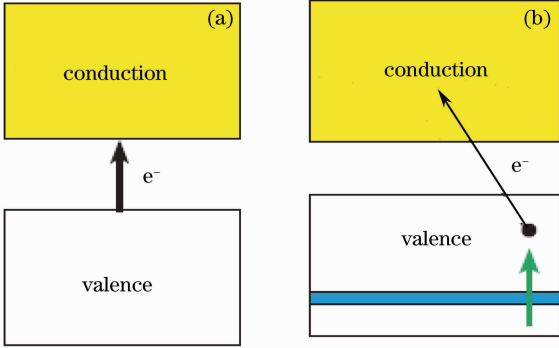


图 3 X 光离化半导体模型示意图。(a)带间跃迁，(b)带内跃迁

Fig. 3 Semiconductor model caused by X-ray.

(a) band-to-band transition, (b) intraband transition

从现象上解释，石英晶体材料带内跃迁的中心频率离 2.33 eV(532 nm) 比较远，而蓝宝石材料带内跃迁的中心频率离 2.33 eV 比较近。实际在半导体材料中价带宽度的中心跃迁频率会是一个范围，所以即使更换探针光波长，只要 X 光激发的带间跃迁大量产生，窗口材料仍然会被大量吸收。因此解决这种问题的根本还是要降低 X 光对透明材料照射的强度。就蓝宝石和石英晶体而言，这两种材料的带隙宽度相对于 X 光波长来说都很小(约 9 eV)，所以，带隙跃迁的几率不会差很多。但是，蓝宝石中跃迁的电子数目较多，才导致空穴很多，最终导致出现带内跃迁的几率更高。

图 4 是光生载流子的调制模型^[8]。当时间上有强度调制的 X 光(光子能量大于样品的禁带宽度)照射到样品表面时，大量的 X 光光子被吸收，在样本表面附近产生大量的过剩载流子，当抽运光束在样品表面的光斑半径很小时，载流子通过扩散及复合，在半导体中形成三维分布。在光强被调制的 X 光的激励下，半导体中过剩载流子浓度也是时间的

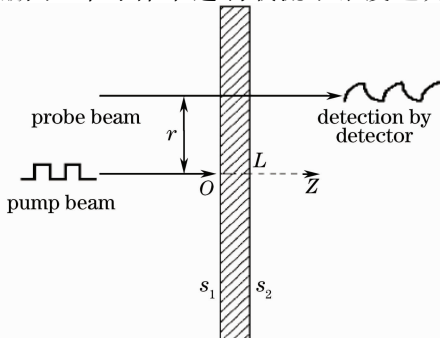


图 4 光生载流子时间调制模型

Fig. 4 Modulation model of photo carrier in time scale

函数。当半导体中周期性产生自由载流子后，再将一束探测光束(光子能量小于半导体禁带宽度)照射到样品表面上，由于浓度有调制的自由载流子对探测光有微弱吸收(即自由载流子吸收)，使得透射的探测光光强呈周期性变化。这个模型就可以解释实验中石英晶体里面时间方向有调制的现象。

4 实验结果

使用蓝宝石窗口，在 170 eV 辐射温度(T_r)条件下获得的冲击波加载图像，如图 5 所示。铝台阶基底厚度为 60 μm ，窗口材料为蓝宝石。单束激光能量 400 J，波长 351 nm，峰值脉宽 1 ns。可以看到，中间方形的黑区部分是由腔内的 X 光辐射引起的，其宽度约为 1 ns。图 5 中条纹的上半部分是铝台阶反射的条纹。在冲击波传到蓝宝石当中以后，高台阶中的冲击波仍然在铝里面传输。经过一定的时间以后，冲击波传到铝表面发生卸载。铝表面反射率急剧下降。这个时刻可以用来标识冲击波到达铝后界面的时刻。图 5 条纹中断点出现的弯曲形状是由间接驱动产生的冲击波边缘处的不均匀性引起的。在诊断孔的中心部分，冲击波是比较平整的。但在诊断孔的边缘部分，窗口材料相对于诊断孔区域变得很宽，冲击波能量耗散，所以波面发生了弯曲，从而较晚到达蓝宝石中，时间轴上就体现出弧度。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。在离化效应发生期间，条纹连续，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，而是在铝中传输。在蓝宝石中条纹反射率变化的情况和条纹图的形状与文献报道相同^[5,8~11]。

与此对应，根据文献选择石英晶体做窗口材料，

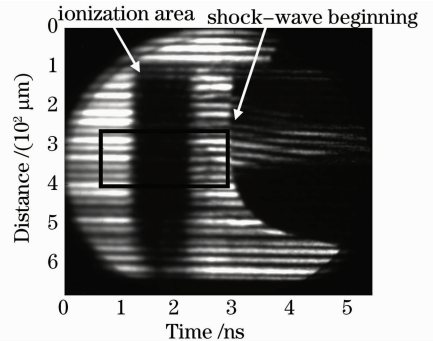


图 5 蓝宝石窗口在 170 eV 辐射温度条件下冲击波诊断实验结果(shot8)

Fig. 5 Experimental data of shock-wave diagnosis with Al_2O_3 window at $T_r=170$ eV (shot8)

观察石英晶体的抗辐射特性。在同样的激光条件下,选择厚度相同的透明窗口,观察石英的抗辐射特性,实验结果如图 6 所示。铝台阶基底厚度为 $60\ \mu\text{m}$,窗口材料为 Z 切石英晶体。单束激光能量 $400\ \text{J}$,波长 $351\ \text{nm}$,峰值脉宽 $1\ \text{ns}$ 。通过与图 5 对比,发现激光到达后会出现条纹强度变化,但是没有出现大范围的黑区,所以石英的抗辐射特性是很好的。在冲击波到达石英材料以后,出现条纹的移动。条纹的移动直接反应了冲击波的减速过程。可以从图中直接读出冲击波的减速过程,这是该技术在冲击波诊断方面的优势之一。

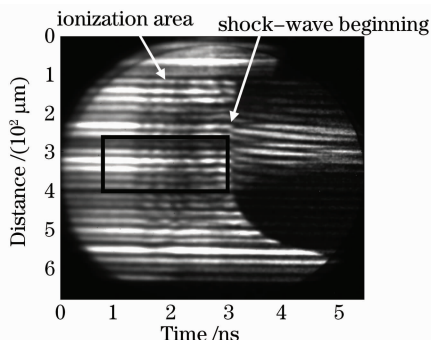


图 6 石英晶体窗口 180 eV 条件下实验结果 (shot9)

Fig. 6 Experimental data with quartz window at $T_r = 180\ \text{eV}$ (shot9)

图 7 是腔内辐射流与两发实验信号的强度对比度。实验数据取自图 5,6 中画黑框部分的信号。可看到,shot8 的黑区效应很明显,其黑区的宽度与激光脉冲宽度基本相同。Shot9 在黑区内信号强度出现先下降后上升的过程,与辐射流先上升后下降的趋势与时间点都很一致。而这一过程与半导体材料受到一个方波脉冲照射后载流子变化过程一致。在半导体被光脉冲照射后,如果这个光脉冲的光子能量高于带隙宽度,将发生带间跃迁,产生光生载流子。在光信号结束后,光生载流子将发生复合。这个过程与文献[9]描述的一致。这也说明图 3 的半导体模型对解释这个物理过程是合适的。图 8 是信号强度、辐射流随时间方向上产生的调制与辐射流强度的对比图。实验数据取自图 6 中画黑框部分的信号。但为了数据的比较,在图 8 中进行了归一化处理。从图 8 看到辐射流最强的时候 ($2.1\ \text{ns}$ 处),条纹图信号最低,辐射流变化率为零。在 $2.1\ \text{ns}$ 之前,在辐射流强度变化时,条纹图信号强度相应的在时间上有强度的起伏变化。每一次辐射流强度变化都对应一次条纹图信号强度变化。这也说明了光生载流子调制模型是正确的。腔内产生的 X 光相当

于图 4 中的抽运光束,它在时间方向上的强度变化会引起光生载流子浓度的变化。VISAR 的探针光相当于图 4 中的探测光束,这个光束的光子能量小于带隙宽度,但是在带内能带宽度以内,所以价带上的载流子会对其进行吸收,产生带内跃迁。直接的结果是探测到的条纹图信号发生时间方向上强度的变化。

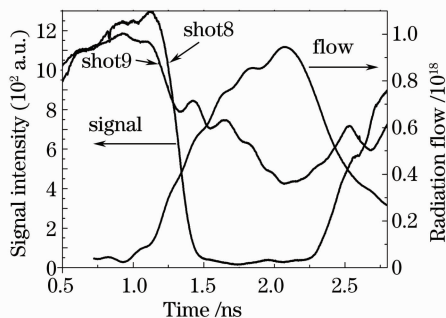


图 7 信号强度与辐射流的关系

Fig. 7 Relation of signal intensity and radiation flow

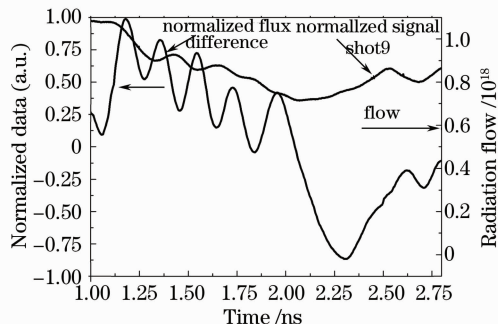


图 8 信号强度、辐射流变化率与辐射流的关系

Fig. 8 Relation of signal intensity, first derivative of radiation flow and radiation flow

5 离化区抑制

根据半导体模型对离化现象的解释,为了抑制 X 光离化,需要从源上减小 X 光对透明晶体材料的照射。经过分析和计算,使用金层阻挡腔内辐射的 X 光。这样可以从根源上减小带间跃迁的自由电子数量,从而消除 X 光产生的离化效应。图 9 左边的图表示黑腔里面辐射的 X 光的能谱分布,横坐标 E_p 代表光的能量。可以看到,大部分能量集中在 $1.5\ \text{keV}$ 以下。分析图 9 后发现,使用 $60\ \mu\text{m}$ 的铝会在 $1.5\ \text{keV}$ 附近和 $3\ \text{keV}$ 以上出现两个窗口。离化效应就是由这两个窗口产生的,但是,具体由哪一段 X 光产生,还需要进一步研究。在图 9 中可以看到,使用 $30\ \mu\text{m}$ 的铝加上 $5\ \mu\text{m}$ 的金以后,仅有 $4.4\ \text{keV}$ 以上很小一部份 X 光从腔内辐射出来。相对于 $60\ \mu\text{m}$

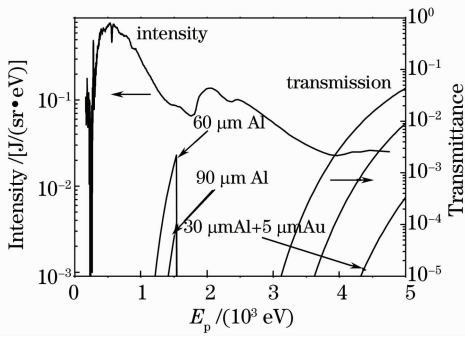


图 9 腔靶的辐射能谱分布与不同厚度 Al 基底透射率比较图

Fig. 9 Comparison of radiation-energy spectra from the Hohlraum target and transmissivity of Al with different thickness

的铝来说,阻挡效果已经相当好了。

图 10 是使用 30 μm 厚的铝基底获得的冲击波图像。窗口材料是石英晶体,辐射温度为 180 eV。可以看到,在信号采集区间存在一段致盲区。而且这段区间内的条纹对比度很差,无法读出信息。但是根据条纹趋势可以判断,条纹没有弯曲。这段黑区的存在给实际的诊断带来了很大的困难。

图 11 是在 30 μm 的铝上面溅射 5 μm 厚的金以后获得的实验结果。可以看到,信号非常清晰,跳变点也很清楚,这说明 5 μm 厚的金对 X 光的阻挡作用非常明显。在加上 5 μm 厚的金以后,冲击波在金里面会有一个很明显的减速,所以,这种阻挡方法带来的缺点还需要进一步研究。

表 1 是对实验结果的汇总。可以发现,在 180 eV 的条件下,如果不使用金做阻挡层,要得到

表 1 窗口离化效应实验汇总表

Table 1 Experimental results of window ionization effect

Number	Target	Barrier layer (Au) / μm	Thickness (Al) / μm	Temperature / eV	Material	Description
8	Cavity target	no	60	170	Sapphire	Obvious black area
9	Cavity target	no	60	180	Quartz	Black area
12	Cavity target	no	30	180	Quartz	Obvious black area
13	Cavity target	5	30	180	Quartz	no black area

6 结 论

针对神光 III 原型的实验结果,利用图 3 的半导体模型,解释了透明蓝宝石和石英晶体材料中出现黑区的理论过程,并用实验进行了证实。发现 X 光照射到透明窗口材料上,主要将发生带间跃迁,激发出大量光生载流子。在价带中产生载流子后,探针光照射进透明窗口材料后主要被价带内的载流子吸

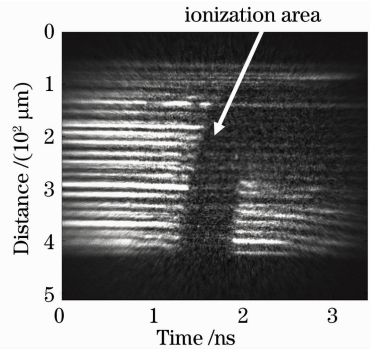


图 10 有黑区的实验数据(shot12)

Fig. 10 Experimental data of the blank area (shot12)

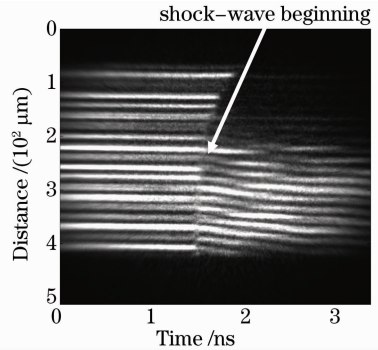


图 11 无黑区的实验(shot13)

Fig. 11 Experimental data of no blank area (shot13)

比较好的实验结果,需要使用石英晶体做透明窗口,同时,铝的厚度要取到 60 μm 以上。如果使用金做阻挡材料,其效果非常好。采集到的条纹图非常干净。但是,由于金的阻抗比较大,冲击波进入金以后有明显的减速过程。所以,对于弱冲击的诊断,能否使用金做阻挡层还有待实验进一步的研究。

收,从而出现黑区。利用光生载流子模型分析了石英晶体中时间方向上出现调制的理论过程,并且从实验上得到了证实。腔内产生的 X 光相当于图 4 中的抽运光束,它在时间方向上的强度变化会引起光生载流子浓度的变化。VISAR 的探针光相当于图 4 中的探测光束,这个光束的光子能量小于带隙宽度,但是在带内能带宽度以内,所以价带上的载

流子会对其进行吸收,产生带内跃迁。直接的结果就是所探测到的条纹图信号发生时间方向上强度的变化。针对辐射驱动的要求,使用 $5\ \mu\text{m}$ 的金做阻挡层,将 X 光挡住,获得了很好的实验结果。这种方法的优点还有,避免了光生载流子浓度变化对透明材料折射率的影响,从而减小在数据反演时带入一个随时间变化过程的问题。这点对辐射驱动冲击波诊断的精密化具有更加重要的意义。

参 考 文 献

- 1 T. R. Boehly, E. Vianello, J. E. Miller *et al.*. Shock-timing experiments using double-pulse laser irradiation [J]. *Phys. Plasmas*, 2006, **13**(5): 056303
- 2 D. G. Hicks, P. M. Celliers, G. W. Collins *et al.*. Shock-induced transformation of Al_2O_3 and LiF into semiconducting liquids[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(3): 035502
- 3 D. G. Hicks, T. R. Boehly, J. H. Eggert *et al.*. Dissociation of liquid silica at high pressures and temperatures[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(2): 025502
- 4 L. M. Barker, R. E. Hollenbach. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface[J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(11): 4669~4675
- 5 R. M. Malone, J. R. Bower, D. K. Bradley *et al.*. Imaging VISAR diagnostic for the national ignition facility (NIF)[C]. *SPIE*, 2004, **5580**: 505~516
- 6 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenye *et al.*. Shock wave velocity calculation under X-ray preheat effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1327~1331
王 峰, 彭晓世, 刘慎业 等. 预热效应影响下冲击波速度推算方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1327~1331
- 7 P. M. Celliers, D. K. Bradley, G. W. Collins *et al.*. Line-imaging velocimeter for shock diagnostics at the OMEGA laser facility[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(11): 4916~4929
- 8 Li Wei, Li Bincheng. Modulated free carrier absorption characterization of semiconductor wafer by frequency scans at different pump-to-probe separations[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(9): 6506~6511
李 巍, 李斌成. 半导体特性的调制自由载流子吸收变距频率扫描方法研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(9): 6506~6511
- 9 W. Theobald, J. E. Miller, T. R. Boehly *et al.*. X-ray preheating of window materials in direct-drive shock-wave timing experiments[J]. *Phys. Plasmas*, 2006, **13**(12): 122702
- 10 R. E. Olson, D. K. Bradley, G. A. Rochau *et al.*. Time-resolved characterization of Hohlraum radiation temperature via interferometer measurement of quartz shock velocity[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(10): 10E523
- 11 P. M. Celliers, G. W. Collins, L. B. Da Silva *et al.*. Shock-induced transformation of liquid deuterium into a metallic fluid [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(24): 5564~5567