



·激光传输与控制·

飞秒激光产生的 X 射线双光谱成像*

王洪建^{1,4}, 叶 雁², 阳庆国², 李泽仁², 刘红杰³

(1. 重庆工商大学 制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室, 重庆 400067; 2. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 3. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 4. 重庆工商大学 机器人与激光智能制造研究所, 重庆 400067)

摘 要: 在微观诊断中往往因为空间限制, 选择具有亮度高、单色性好、对比度强的特征谱线, 而忽略了韧致辐射谱线。率先实验设计了特征谱线和韧致辐射谱线的双光谱诊断 X 射线光源的方法, 在中国工程物理研究院“星光 III”激光装置飞秒激光束靶室上进行实验, 激光功率密度大于 1.6×10^{18} W/cm², 脉宽为 30 fs, 45° 入射靶面。在入射靶前侧, 设计了用于特征光谱成像的针孔成像光路, 获得 Cu 纳米颗粒靶产生的特征 X 射线的焦斑图像, 为 76 μ m, 大于刃边方法测得半径为 54 μ m 的焦斑。在靶后侧, 设计了韧致辐射成像光路, 利用 PIX 射线 CCD 获得 2×5 的圆形 Ta 组图像。实验表明, 利用双光谱成像设计合理, 适合微介观材料动态诊断, 提高诊断效率。

关键词: 泵浦-探针技术; 动态加载; 纳米颗粒材料; X 射线光源

中图分类号: TH742.63

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210287

X-ray dual-spectrum imaging produced by femtosecond laser

Wang Hongjian^{1,4}, Ye Yan², Yang Qingguo², Li Zeren², Liu Hongjie³

(1. Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control, Chongqing Technology and Business University, Chongqing, 400067, China;
2. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China;
3. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China;
4. Smart Manufacturing Institute of Robot and Laser, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: To obtain an X-ray source to diagnose micro-mesoscopic state of material with high brightness, good monochromaticity and good contrast in pump-probe technology, and to often ignore the bremsstrahlung line, hence we designed a dual-spectrum diagnostic X-ray source experiments using characteristic and bremsstrahlung spectra. The experiment was carried out on the femtosecond laser beam of the “Xingguang III” laser facility of China Academy of Engineering Physics. The laser power density is more than 1.6×10^{18} W/cm², with the pulse width of 30 fs by 45° to the target surface. On the other side of the target normal line, the pinhole imaging optical path for characteristic spectral imaging was designed to obtain the focal spot image of 76 μ m from the characteristic X-ray generated by the Cu nanoparticle target, larger than the average focus spot of 54 μ m obtained by the knife-edge method. On the back side of the Cu target, the bremsstrahlung imaging optical path was designed, and the PIX-ray CCD was used to obtain 2×5 circular Ta group images. Experiments show that the dual-spectral imaging design is reasonable, which is suitable for dynamic diagnosis of micro-mesoscopic materials, and improve diagnosis efficiency.

Key words: pump-probe technology, dynamic loading, nanoparticle materials, X-ray source

极端条件下可能同时存在包括应力、温度、电磁场、能量流和化学环境以及相应的加载率等参数, 可为设计材料和预测物质在极端条件下的表现^[1-3], 这在国防科技、能源和材料科学领域相当重要。它的挑战在于实验手段缺乏相应的时间分辨精度(如从光子-电子-声子相互作用的 fs, ps 尺度到损伤成长的 μ s 尺度)和空间精度(如从相变

* 收稿日期: 2021-07-14; 修订日期: 2021-11-11

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金项目(U2030120); 国家重点研发计划项目(2018YFB1306602); 重庆市技术创新与应用发展项目(cstc2019jcsx-msxmX0032); 重庆工商大学科研平台项目(KFJJ2017052、KFJJ2016031、1952038)

联系方式: 王洪建, whj_cqu@163.com.

成核的原子团簇到介观 μm 尺度)^[4-6]。

利用飞秒激光的泵浦-探针技术的超快光学测量虽已经相当成熟,但是超快技术和极端条件加载的结合还在萌芽阶段^[7]。在国外,利用 Line-Imaging VISAR 类似的高时空分辨测试技术研究材料内部微细观结构的冲击波力学响应进行了大量的工作^[8-9]。如 W. M. Trott 和 J. R. Asay 等^[10-11] 利用 Line-Imaging ORVIS 研究了泡沫材料、具有规则阵列结构的玻璃钢以及作为炸药模拟的压实白糖等非均匀材料在冲击压缩下的响应,从而验证空间分辨波剖面测量技术的独特作用,获得了极有价值的丰富信息。Chhabildas 等^[12] 则用 Line-Imaging ORVIS 研究了冲击压缩下 Ta 的微结构对层裂产生、发展的影响,利用空间分辨的自由曲面速度剖面展示内部孔洞或缺陷从初始的数 μm 变化到数十 μm 。辛建婷等^[13] 在星光 III 原型激光装置上开展金属材料微喷回收实验,获得了微喷颗粒的三维图像。

由于超短光脉冲不能直接探测原子的位置信息,可见光只与原子外层的价电子和自由电子相互作用,不能到达中心电子层和原子核,因此不能探测到物质内部结构的真实信息^[14],而 X 射线能弥补可见光目前存在的问题,实现物质微观结构的诊断。目前的 X 射线成像普遍采用特征谱线,而忽视了韧致辐射谱线。本文在国内率先验证两种谱线同时成像方法,即在靶前采用网格和针孔进行了特征谱线成像手段,而靶后设计了带台阶钽靶矩阵的金属韧致辐射成像。在中国工程物理研究院“星光 III”激光装置上,以飞秒激光束驱动纳米靶产生的 X 射线作为光源,进行了双光谱成像^[15],验证性地为该装置诊断物质内部结构提供参考。

1 实验布局

实验是在中国工程物理研究院激光聚变研究中心的“星光 III”激光装置上进行,该装置正交布置 ns, ps 和 fs 三束激光,其中 fs 激光束是以钛宝石为增益介质,最大输出靶面功率密度达到 10^{21} W/cm^2 。当功率小于 30 TW 时,重复频率为 10 Hz ;当功率大于 30 TW ,每 20 min 可触发 1 次。

实验安排在该装置 SILEX-I 靶室上进行,布局如图 1 所示。fs 激光脉冲经由 $f/10$ 离轴抛物面镜聚焦在 Cu 纳米颗粒靶上,入射激光脉宽为 30 fs ,与靶平面法线成 45° 。用 X 射线针孔配 PIXIS 1024B CCD 进行监测焦斑直径,安装在与水平面夹角 23.7° ,其在水平面的投影与入射激光夹角 23.2° 的斜上方法兰上。在靶后韧致辐射成像侧,即在靶后 90 mm 处布置了 2×5 个圆形钽片,用铝膜覆盖,留一角少覆盖一层,钽靶后 110 mm 处设置 X 射线 CCD,其像素为 2048×2048 , $13.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。实验采用厚度为 $15 \mu\text{m}$ 、表面生长有纳米颗粒的 Cu 颗粒靶,激光能量为 4.8 J ^[16]。此外,还在靶后布置 0.06 T 的磁谱仪记录超热电子。

2 实验结果分析

激光基频是衡量激光参数的重要参数,实验采用海洋 HR2000+三阶自相关仪对主脉冲基频进行测试,曝光时间为 5 s ,手动方式进行采集。测得该飞秒激光器的基频波长平均在 807 nm ,考虑误差范围 807^{+7}_-8 nm 。将自相关仪所测数据和入射激光的能量导入到 Origin 软件中,并将其进行线性拟合,发现基频标准误差仅为 0.1 ,其半高全宽和全宽值的标准误差分别是 5.9 和 9.2 。而利用两支光电倍增管和衰减片,测得对比度平均值为 3.1×10^5 ,其中最大 1.3×10^6 。测得激光焦斑为 $30 \mu\text{m}$ 。表明该激光器的入射波长、基频和对比度参数比较稳定,满足实验要求。

2.1 韧致辐射成像

Al, Ti, Pb, Cu 和 Sn 等中 Z 材料的 X 射线特征谱线在 $5 \sim 10 \text{ keV}$,基于极化韧致辐射降低和光子能量增加,在研究高能密度物理中不能忽视薄靶产生韧致辐射^[17]。激光驱动产生 $K\alpha$ 射线的产额及转换效率,依赖于激光-电子的转换过程。热电子满足麦克斯韦能量分布^[14]

$$f(E)dE = 1/\sqrt{Ek_T} \exp(-E/k_T) dE \quad (1)$$

式中: E 表示电场强度; k_T 表示超热电子温度(keV)。从该发次的激光能量为 3.2 J ,可以推算出该发次的理论电

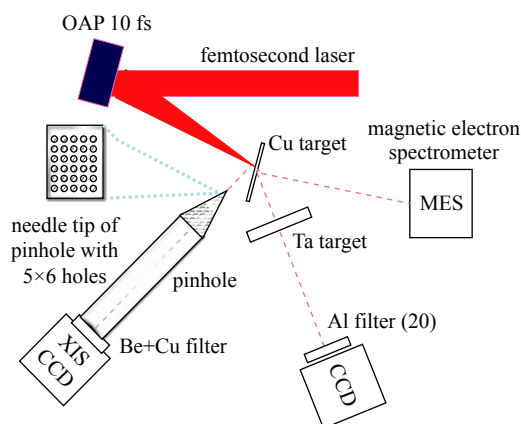


Fig. 1 Experiment setup of two spectrum imaging method on XG-III facility

图 1 星光 III 装置中双光谱成像实验布局图

子温度为 275 keV。利用同步诊断的 0.06 T 的电子磁谱仪测量, 得到实测值为 280 keV^[18]。对于激光强度 $\geq 10^{18} \text{ W} \cdot \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$, 脉冲基底可能产生一个密度标长为上百 μm 的等离子体, 飞秒激光脉冲与该标长的等离子体相互作用^[19]。测量超热电子能谱的基本原理是利用不同动能的电子在均匀磁场中产生不同的偏转来实现的。电荷 e 在磁感应强度为 B 的磁场中运动时, 经过偏转后电子打在成像板或感光片上, 忽略电子重力的影响, 其运动方程为

$$\frac{d}{dt}(mv) = -ev \times B \quad (2)$$

当 $v \perp B$ 时, $mv^2 = evB\rho$ 。其中 $B\rho$ 表示磁刚度 ($10^{-4} \text{ T} \cdot \text{cm}$), 是运动粒子动量的量度^[20]; ρ 表示电子飞行轨道的曲率半径。在同样的磁场强度 B 的情况下, ρ 越大, 表示刚度越大, 越不易被弯曲。

则电子动能可以用磁刚度表示

$$E(\text{keV}) = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left[\sqrt{\left(\frac{eB\rho}{m_0c} \right)^2} - 1 \right] = 511 \left\{ \left[3.44 \times 10^{-7} (B\rho)^2 + 1 \right]^{1/2} - 1 \right\} \quad (3)$$

电子磁谱仪的设计采用半圆聚焦方式, 不同的半径对应于不同动能的电子。这样在不同半径处记录超热电子数目, 可以推算出超热电子能谱^[21]。

当高速超热电子穿越 Cu 靶时, 这时候会发生轫致辐射现象, 并通过 PI-XIS CCD 2048 探测到其图像。从图中所示的厚度 0.1 mm、直径为 10 mm 的圆形 Ta 靶清晰可见^[22], 另外增加了一层厚度为 20 μm Al 膜, 从 Al 边界可以看到两个半圆, 正好覆盖在两个 Ta 靶的上面, 显示 Al 覆盖的地方 X 射线很弱, 能够隐约看到另外的两行 7 个全覆盖圆, 2 个半覆盖圆, 1 个未覆盖。与文献 [21] 采用螺钉、螺母、钽台阶类似, 都是获得较清晰的边缘图像。PI-XIS CCD 2048 按照 Cu 的最高峰值 $K\alpha$ 特征谱 8 keV 计算, 加上 250 μm 厚的 Be 窗, 其光子检测效率 45%~50%。

图像照射量不是很均匀, 还有大量的椒盐噪声, 能够分辨出圆型 Ta 靶和铝膜边界。输入图像 A 的质量不是太高。通过数学形态学分析^[23-24], 使用半径为 5, 10 和 20 pixel 的平坦型圆盘结构元素 S 分别腐蚀图像 A 。如图 2 所示, 可以看出半径为 10 pixel 的腐蚀后的效果比较清楚, 而腐蚀 20 次后, 图像明显模糊。再运用开运算、闭运算进一步对图像进行分析, 其开运算是输入图像 A 先被结构元素 S 腐蚀, 然后再被 S 膨胀的结果, 表达式为

$$A \circ S = (A \ominus S) \oplus S \quad (4)$$

而闭运算则是开运算的偶运算, 是先用结构元素 S 膨胀图像 A , 然后再腐蚀得到结果, 表达式为

$$A \bullet S = (A \oplus S) \ominus S \quad (5)$$

采用正方形 3×3 的结构算子, 该矢量元素相似于正弦函数, 产生的正方形峰值误差为 ± 1 。在实验中对数学形态学, 分别进行开运算、闭运算, 先开后闭和先闭后开 4 种运算方法。如图 3 所示, 显示先开后闭运算效果较好, 10 个圆形的 Ta 轮廓比较明显。

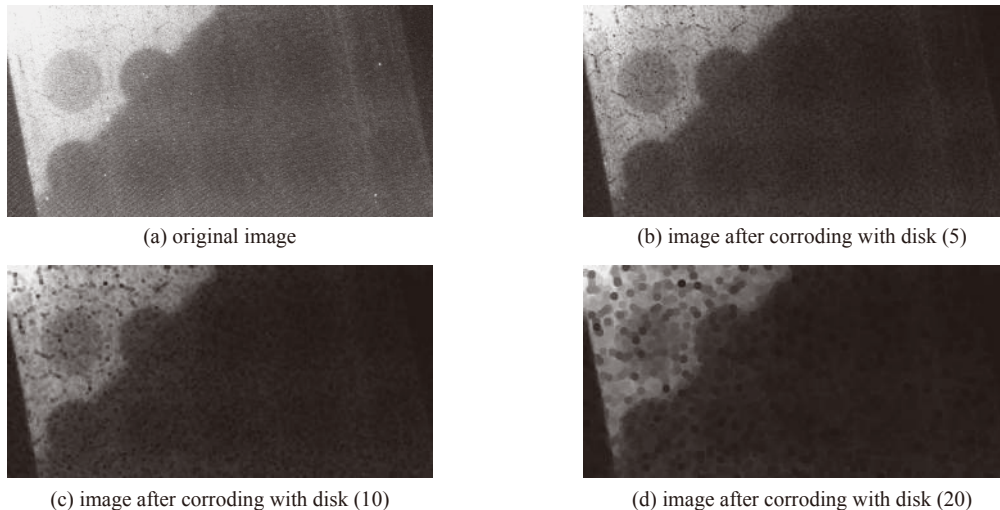


Fig. 2 Bremsstrahlung backlit imaging (original image, corrosion of flat disc structure with radius of 5, 10 and 20 pixel respectively)

图 2 轫致辐射背光成像 (分别是原始图、半径为 5, 10 和 20 pixel 的平坦型圆盘结构腐蚀)

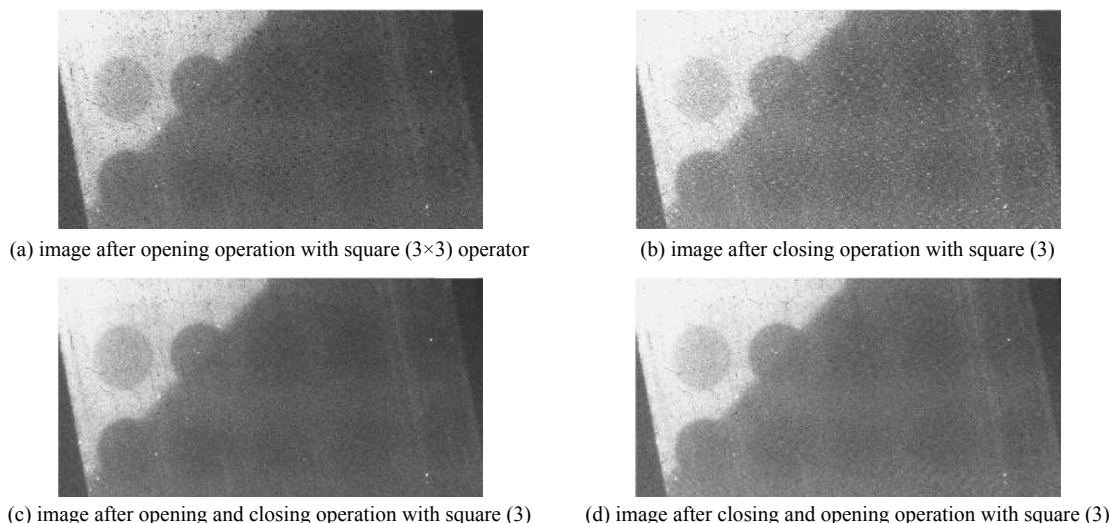


Fig. 3 Bremsstrahlung backlit imaging (respectively open operation, close operation, open first and then close operation and close first and then open operation, 3×3 operator structure)

图 3 韧致辐射背光成像(分别是开运算、闭运算,先开后闭和先闭后开运算, 3×3 算子结构)

2.2 针孔矩阵成像

采用矩阵针孔和 PIXIS 1024B 软 X 光 CCD 构成了针孔成像光路, 该针孔相机的基底为 20 μm 厚的钽, 设计 5×6 多针孔, 其间距 800 μm, 每个孔的尺寸为 φ10 μm。而该 CCD 成像尺寸为 13 μm/pixel。从图 4(a) 显示出该图存在衍射, 导致孔像间的距离与孔直径的比例远远小于钽多针孔的孔距与孔径的比例。采用的滤片为 5 μm 厚的铝膜, 能有效吸收 4 keV 以下的软 X 射线。通常针孔相机的分辨率有几何分辨率 Δ_n 、物理分辨率 Δ_w 的均方根评定, 几何分辨率可表示为

$$\Delta_n = d(1 + 1/M) \quad (6)$$

式中: d 为针孔直径; M 为放大倍数。由针孔衍射现象引起的物理分辨率为

$$\Delta_w = k\lambda a d^{-1} \quad (7)$$

式中: λ 为特征谱线 X 射线波长, Cu 的 $K\alpha$ 线波长为 1.54 nm; 物距 $a=175$ mm。本实验条件下, 所设计满足 $\Delta_n \approx \Delta_w$, 实际放大倍数 M 为 4.743, 故 $k \approx 0.3$, 而文献 [18] 中的 k 值取为 2.44, 原因是放大倍数不同。

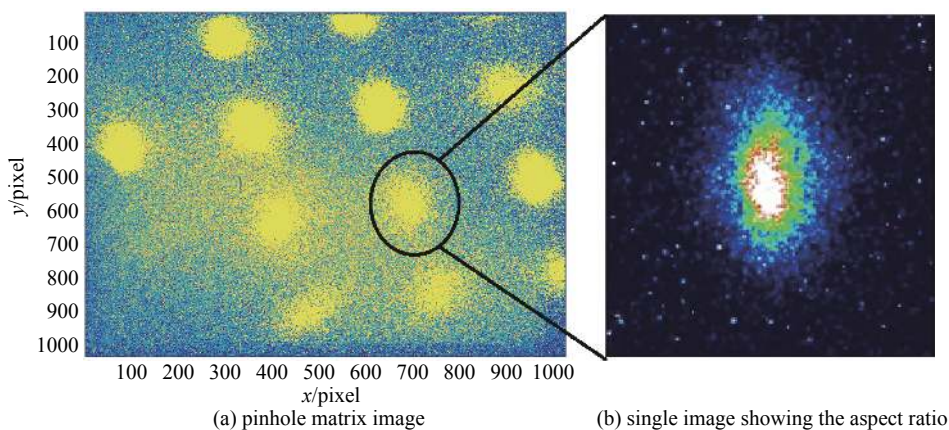


Fig. 4 Image by pinhole CCD

图 4 针孔相机获取的图像

PIXIS1024B 软 X 射线 CCD 的量子效率在 X 射线能量为 1~4 keV 之间高于 60%。而在 2~3 keV 范围响应区间, 效率在 80% 以上。由于该 CCD 用了 0.25 mm 的 Be 窗, 光子检测效率降低, 在 5 keV 处最大峰值为 75%, 而在 8 keV 处, 光子探测效率为 45%。在实验中, 采用 5 μm 厚的铝膜, 其透过率进一步衰减, 在 Cu 靶特征谱线 8 keV 附近 [18], 量子效率约为 20%。本发次采用 f/10 离轴抛物面镜聚焦 X 射线焦斑横向长度为 66 μm, 纵向长度为 107 μm, 参见图 4。这种软 X 射线 CCD 针孔相机的主要特点是灵敏度高, 能够对 X 射线焦斑进行成像。而熊勇采用 f/3 离

轴抛物面镜聚焦, 能量在 2.29 J, 获得的 X 射线焦斑直径为 $46\ \mu\text{m}$ ^[19]。

实验中用 X 射线针孔相机测得的激光焦斑如图 4 所示, 焦斑大小随激光能量的变化有少量的波动。由于计算激光焦斑时取平均值。针孔相机实测 X 射线焦斑横向范围 $49\sim 118\ \mu\text{m}$, 平均为 $76\ \mu\text{m}$; 刃边方法^[25]获取 Cu 靶的 X 射线焦斑范围在 $40\sim 86\ \mu\text{m}$, 平均为 $54\ \mu\text{m}$ 。综合考虑 X 射线焦斑, X 射线实际焦斑为 $40\sim 60\ \mu\text{m}$ 。再次从实验上验证了 X 射线的焦斑是激光焦斑的 1.5 倍左右^[26]。理论上, 针孔的直径越小, 分辨图像的能力越强, 但是因针孔钽片的孔径加工工艺极限, 很难加工到直径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的金属针孔。

3 结 论

泵浦-探针技术在激光等离子体研究中是热点问题, 而飞秒激光驱动产生的 X 射线成像可以为有效诊断物质材料动态提供手段。本文利用升级完成的“星光 III”激光装置飞秒束激光与纳米 Cu 相互作用, 在 Cu 纳米颗粒靶入射激光侧, 布置针孔相机获得特征光谱, 与 X 射线 CCD 相结合, 测得并推算 X 射线焦斑直径平均值为 $75\ \mu\text{m}$, 大于理论推导 X 射线焦斑尺寸 ($40\ \mu\text{m}$)。而在靶材后面布置的金属 Ta, 利用从靶背后运动的高速电子与金属相互作用, 获得韧致辐射产生的 X 射线, 以及圆盘金属 Ta 和 Al 膜的边界图像。实验结果表明, 在“星光 III”激光装置上进行的双光谱诊断实验, 适合飞秒激光驱动产生 X 射线特征光谱焦斑和韧致辐射 X 射线的测量, 为材料动态特性诊断提供了参考。

参考文献:

- [1] Ditmire T, Bless S, Dyer G, et al. Overview of future directions in high energy-density and high-field science using ultra-intense lasers[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2004, 70(4/5): 535-552.
- [2] Ravasio A, Gregori G, Benuzzi-Mounaix A, et al. Direct observation of strong ion coupling in laser-driven shock-compressed targets[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99: 135006.
- [3] Barbrel B, Koenig M, Benuzzi-Mounaix A, et al. Measurement of short-range correlations in shock-compressed plastic by short-pulse X-ray scattering[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102: 165004.
- [4] Lee H J, Neumayer P, Castor J, et al. X-ray Thomson-scattering measurements of density and temperature in shock-compressed beryllium[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102: 115001.
- [5] Lee H J, Workman J, Wark J S, et al. Optically induced lattice dynamics probed with ultrafast X-ray diffraction[J]. *Physical Review B*, 2008, 77: 132301.
- [6] Kalantar D H, Belak J F, Collins G W, et al. Direct observation of the α - ε transition in shock-compressed iron via nanosecond X-ray diffraction[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95: 075502.
- [7] 胡昌明, 王翔, 刘仓理, 等. 非均匀性对自由面粒子速度信号的影响[J]. *实验力学*, 2008, 23(3): 271-275. (Hu Changming, Wang Xiang, Liu Cangli, et al. Material inhomogeneity influence on free surface velocity signals[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, 23(3): 271-275)
- [8] Malone R M, Capelle G A, Celeste J R, et al. Overview of the line-imaging VISAR diagnostic at the National Ignition Facility (NIF)[C]//*Proceedings of SPIE* 6342, International Optical Design Conference 2006. Vancouver, 2006: 634220.
- [9] Celliers P M, Bradley D K, Collins G W, et al. Line-imaging velocimeter for shock diagnostics at the OMEGA laser facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(11): 4916-4929.
- [10] Trott W M, Renlund A M, Jungst R G. Single-pulse Raman and photoacoustic spectroscopy studies of triaminotrinitrobenzene (TATB) and related compounds[C]//*Proceedings of SPIE* 0540, Southwest Conf on Optics '85. Albuquerque, 1985: 368-375.
- [11] Asay J R, Hall C A, Konrad C H, et al. Use of Z-pinch sources for high-pressure equation-of-state studies[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 23(1): 27-38.
- [12] Chhabildas L C, Trott W M, Reinhart W D, et al. Incipient spall studies in tantalum-microstructural effects[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2002, 620(1): 483-486.
- [13] 辛建婷, 谷渝秋, 李平, 等. 强激光加载下金属材料微喷回收诊断[J]. *物理学报*, 2012, 61: 236201. (Xin Jianting, Gu Yuqiu, Li Ping, et al. Study on metal ejection under laser shock loading[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61: 236201)
- [14] Reich C, Gibbon P, Uschmann I, et al. Yield optimization and time structure of femtosecond laser plasma $K\alpha$ sources[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(21): 4846-4849.
- [15] 王洪建, 叶雁, 李军, 等. 激光驱动产生 X 射线光源的双光谱成像装置: 201210252295.2[P]. 2012-11-14. (Wang Hongjian, Ye Yan, Li Jun, et al. Double-spectrum imaging device driven by laser to generate X-ray source: 201210252295.2[P]. 2012-11-14)
- [16] 谭秀兰, 李恺, 罗炳池, 等. 去合金化工艺对纳米多孔铜纯度的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(4): 908-912. (Tan Xiulan, Li Kai, Luo Bingchi, et al. Effect of dealloying process on purity of nanoporous copper[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(4): 908-912)
- [17] Singh T, Kahlon K S, Dhaliwal A S. Total bremsstrahlung spectral photon distributions in metallic targets in the photon energy range of 5–10 keV by ^{204}Tl beta particles[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2009, 267(5): 737-741.
- [18] Wang Hongjian, Li Zeren, Chen Zhanbin. High conversion efficiency and small spot size of $K\alpha$ X-ray generated from nano-foam Cu targets irradiated by femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics B*, 2018, 124: 172.

- [19] 熊勇. 基于 $K\alpha$ 射线超短超强激光超热电子转换研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2008: 90-92. (Xiong Yong. Conversion efficiencies of ultra-short ultraintensity laser to ultra hot based on $K\alpha$ X-ray electron[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2008: 90-92)
- [20] 张双根, 谷渝秋, 温贤伦, 等. 相对论激光-固体靶作用中超热电子能谱测量[J]. 光电子·激光, 2006, 17(3): 347-351. (Zhang Shuanggen, Gu Yuqiu, Wen Xianlun, et al. A measurement of hot electron energy spectrum in relativistic laser solid target interactions[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2006, 17(3): 347-351)
- [21] Liu Hongjie, Gu Yuqiu, Zhou Weimin, et al. Characterization of relativistic electrons generated by a cone guiding laser pulse[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21: 055207.
- [22] 叶雁, 李剑峰, 李泽仁, 等. 超短超强激光与金属靶作用产生硬X射线照相[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(8): 1357-1359. (Ye Yan, Li Jianfeng, Li Zeren, et al. Radiography of hard X-ray produced by ultra-short ultra-intense laser-metal targets interactions[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(8): 1357-1359)
- [23] 刘艳莉. 工业X射线图像锐化技术算法研究[D]. 太原: 中北大学, 2015. (Liu Yanli. Study on industrial X-ray image sharpening technology algorithm[D]. Taiyuan: North University of China, 2015)
- [24] 李晨光. 管道焊缝无损检测的综合方法结合及图像处理[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011. (Li Chenguang. Synthetical NDT and image processing for weld joint of pipeline[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2011.)
- [25] 王洪建, 阳庆国, 叶雁, 等. 重复频率下飞秒激光驱动产生的X射线焦斑测量[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 032039. (Wang Hongjian, Yang Qingguo, Ye Yan, et al. Measurement of femtosecond laser-driven X-ray focal spot with repetition frequency[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2015, 27: 032039)
- [26] Mao J Y, Chen L M, Ge X L, et al. Spectrally peaked electron beams produced via surface guiding and acceleration in femtosecond laser-solid interactions[J]. *Physical Review E*, 2012, 85: 025401.