

激光冲击波压缩稠密铝辐射不透明度实验研究*

王瑞荣[†] 王伟 方智恒 安红海 贾果 谢志勇 孟祥富

(上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

(2013年1月16日收到; 2013年3月7日收到修改稿)

基于稠密物质辐射不透明度的理论计算目前有相当大的难度, 而稠密物质高精度不透明度数据又对聚变研究中的理论设计和模拟以及状态诊断等方面非常有用. 在“神光 II”激光装置上建立一发次中能同时测量背光谱、样品自发谱和吸收谱的大谱窗高分辨椭圆弯晶测谱系统, 并利用一维辐射流体力学程序 MULTI 仿真冲击波碰撞压缩样品的过程. 在测量中, 用点投影背光法、激光烧蚀冲击波碰撞压缩产生稠密铝 (Al) 样品, 激光镜等离子体 3d—4f 跃迁辐射为短脉冲背光提供样品吸收谱时空分辨诊断, 在一发次打靶中得到了背光谱、样品自发谱和 X 射线吸收精细结构谱, 以及稠密 Al 辐射吸收谱向长波偏移. 实验结果给出了诊断能谱区稠密 Al 相对透射率分布和吸收谱偏移量. 这些工作都有益于丰富不透明度这一基础研究领域和进一步开拓许多重要应用.

关键词: 冲击波压缩等离子体, X 射线吸收谱, 线移, 精细结构

PACS: 52.50.Lp, 61.10.Ht, 33.70.Jg, 32.10.Fn

DOI: 10.7498/aps.62.125202

1 引言

辐射不透明度表征物质的辐射吸收性质. X 光波段的辐射不透明度对高能量密度物质体系的能量输运和能量分配起支配作用, 尤其是低温稠密等离子体辐射不透明度在凝聚态物理、天体物理, 以及激光惯性约束聚变 (ICF) 等研究中具有重要地位^[1-3]. 由于低温稠密等离子体中有着复杂的物理过程, 离子的原子轨道重叠或变形, 大量原子结构和原子动力学过程耦合在一起, 还存在原子以及各种电离度的离子共存, 这不仅导致了不透明度的理论计算有相当大的难度, 以致至今还没有公认合理的物理模型, 其可靠性必需用 Benchmark 实验数据校验, 而且对已有认识的研究理论具有挑战性. 因而低温稠密物质不透明度、不透明度加宽现象以及 X 射线吸收精细结构谱 (XAFS) 移位等课题受到人们的极大关注, 已成为原子物理与等离子体物理相交叉的研究热点之一.

冲击产生稠密等离子体辐射不透明度的实验研究始于 20 世纪 50 年代 Christian 和 Yannger^[4] 的工作. 目前已有冲击压缩方法形成密度不太高的等

离子体不透明度的实验研究^[5], 不过大都以气体作为样品初始材料; 也有很多关于高温高密度等离子体辐射不透明度数据^[6-9], 其中有些数据已应用于 ICF, Z 箍缩 (Z-pinch) 研究领域的理论设计和模拟以及等离子体状态诊断中, 不过多以固体材料为样品的初始材料, 采用辐射或碰撞加热方式形成高温高密度等离子体样品为主. 但关于低温稠密物质不透明度的研究却相对很少, 偶尔见到少量的研究^[10,11] 也是针对具体问题而言的, 仅为考察理论模型对实验数据的解析情况而已, 可以说只有一些定性认识, 在这方面还没有系统的辐射不透明度数据, 也就是说低温稠密物质辐射不透明度的研究是零散的.

本文报道在“神光 II”激光装置上建立足够大谱窗高分辨的椭圆弯晶谱仪的光谱测量系统, 用冲击波碰撞压缩固体材料加热方式产生低温稠密样品, 辐射流体模拟程序 MULTI-1D 模拟冲击波碰撞压缩过程并模拟状态参量, 镱 (Yb) 等离子体 3d—4f 跃迁辐射为短脉冲背光, 利用点背光法对低温稠密 Al 样品辐射不透明度进行测量, 并在测量中尽可能地减小在测量背光谱、样品自发射谱, 吸收谱中由

* 国家自然科学基金 (批准号: 11175167) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: wangrr59@citiz.net

于激光参数抖动、样品状态的空间不均匀性, 以及时间演化引起的测量不确定度.

2 方法原理

2.1 辐射不透明度

光学厚度的定义

$$\tau(\nu) = \int_0^l \chi(\nu, x) \rho(x) dx, \quad (1)$$

其中 $\rho(x)$ 是样品 x 处的密度, $\chi(\nu, x)$ 为样品 x 处的辐射不透明度或辐射吸收系数, l 为样品有效吸收厚度.

如果样品状态在空间上是均匀的 (这是实验测量不透明度所必需的), 即 ρ 为常数, 可用有效吸收厚度来表征等离子体的吸收性质. 那么有

$$\chi(\nu) = \frac{\tau(\nu)}{\rho l}, \quad (2)$$

用实验测量样品面密度 (ρl), $\tau(\nu)$ 的值. 而实验测量 $\tau(\nu)$ 一般是通过测量背光谱、样品自发射谱, 以及样品吸收谱得到的.

样品辐射透射率表达式

$$T(\nu) = \exp[-\tau(\nu)]. \quad (3)$$

2.2 库仑能

稠密物质 K 壳层能级定义^[12]

$$E_1(\rho, T) = E_0(Z^*) + \Delta E_1(\rho, T) + \Delta E_{\text{deg}}(\rho, T), \quad (4)$$

其中 ρ 为密度, T 为温度, Z^* 为平均电荷数, $E_0(Z^*)$ 代表电荷数 Z^* 时 K 壳层平均电离能, $\Delta E_1(\rho, T)$ 表示束缚电子能级变量, $\Delta E_{\text{deg}}(\rho, T)$ 表示自由电子退化能.

由于在稠密物质中, 随着密度增大, 每个原子所占的空间体积一定小, 一些原来的束缚轨道在这种极端环境下已经不再存在, 原来这些轨道上的束缚电子现在变成了自由电子, 这时的原子结构和自由状态下的原子结构有很大差异, 因而必须考虑原子或离子的空间体积变小所引起的这种尺寸效应. 目前已有实验观测到由于温度和压缩导致的这种尺寸效应现象^[13].

3 实验布局

在“神光 II”激光装置上, 低温稠密物质辐射不透明度实验测量布局如图 1 所示. 来自背光源的

X 射线通过激光烧蚀“三明治”靶冲击波压缩形成的稠密区吸收被晶体分谱落在探测器 IP (imaging plate) 上. 靶结构由 $15 \mu\text{m}$ (CH) + $2 \mu\text{m}$ (Al) + $15 \mu\text{m}$ (CH) 组成. 激光波长 $0.35 \mu\text{m}$, 将 8 束激光分成两组对称辐照“三明治”主靶, 有辐照功率密度 $I \approx 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 脉宽为 2 ns, 靶面聚焦光斑直径约 $300 \mu\text{m}$, 激光烧蚀 CH 层产生冲击波, 而后冲击波压缩 Al, 在冲击波碰撞区域可形成稠密 Al 样品. 用 3 台椭圆弯晶谱仪分别监测背光谱、样品自发射谱以及样品 X 射线吸收谱. 分光晶体材料石英晶格常数 ($2d$) 为 0.8512 nm , 衍射角 $28^\circ \leq \theta \leq 72.5^\circ$, 其选通滤片为 $50 \mu\text{m}$ 的铍 (Be) 滤片.

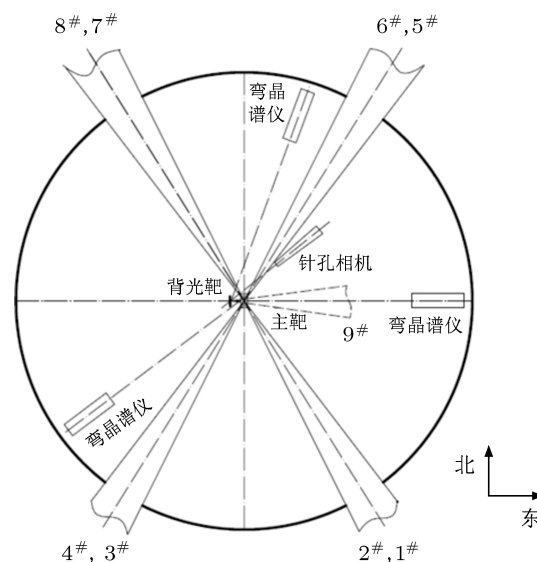


图 1 不透明度实验测量排布示意图

用第九路激光 (图 1 中 9#) 点聚焦斜入射 Yb 平面靶, 光束光轴与靶面法向成 45° 夹角, 三倍频, 激光能量约为 180 J, 短脉冲 150 ps, 从而产生 Yb 等离子体 $3d-4f$ 跃迁辐射的准连续 X 射线背光源. 激光脉冲时间波形相对主激光 8 路延迟 400 ps, 其真实值是用 X 光条纹相机监测. 另外, 用一台 X 射线针孔相机监测光斑大小. 针孔参数: 直径为 $10 \mu\text{m}$; 放大倍数约为 10 倍; 空间分辨率近 $10 \mu\text{m}$, 其选通滤片为 $5 \mu\text{m}$ 厚的钛 (Ti) 滤片.

用辐射流体模拟程序 MULTI-1D 对上述激光参数打靶进行仿真. 设 Al 层中心点为零坐标位置, 驱动激光前沿到 CH 层面时刻设为时间零时刻, 其中将 CH 层分成 50 个网格, Al 层分成 10 网格, 模拟的总时间长度为 3.0 ns, 最后得到等离子体状态的时间演化和一维空间分布情况如图 2 所示. 图 2 表明第一次压缩接着有第二次冲击波压缩. 第一次

压缩发生在激光脉冲开始后大约 600 ps, 延续时间大约 150 ps, 有最大质量密度 $\rho \approx 6\rho_0$, 其中 ρ_0 为常温常压下 Al 固体密度. 并对第一次压缩间的电子温度以及密度进行了模拟计算与分析, 在 Al 稠密区平均密度为 (5—6) ρ_0 , 电子温度为 (8—10) eV.

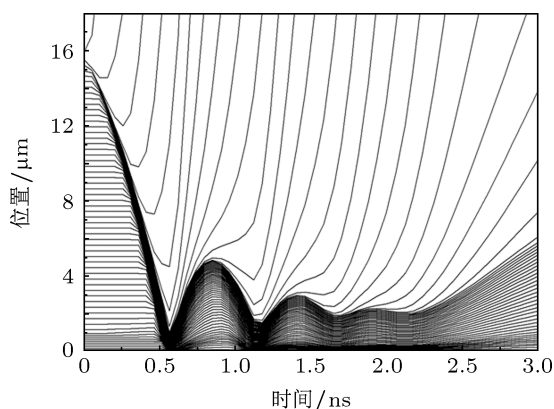


图2 等离子体状态的时间演化和一维空间分布图

4 结果与分析

采用 BAS5000 磷光分析仪对 IP 记录的实验图像进行扫描, 得到了 X 光光谱图像, 如图 3 所示. 在图 3 中分别把样品自发光光谱标为 (a); 背光 X 光光谱标为 (b); 以及穿过冲击波碰撞压缩样品区的吸收光谱标为 (c). 从图 3(a) 中可以看出, 自发光光谱中既没有看到特征线谱, 而且几乎也没有连续谱, 本底很低, 这说明样品的温度很低, 与理论模拟结果一致. 图 3(b) 中, 在背光 X 光谱中几乎是没有任何峰谷结构的准连续谱, 而图 3(c) 中为稠密样品 X 射线吸收光谱, 可见清晰的 Al 等离子体辐射吸收谱线, 这表明冲击波碰撞压缩 Al 已经达到了一定的离化程度.

设一次打靶中同时测量样品辐射吸收光谱强度为 $I_1(\nu)$, 样品自发辐射谱强度为 $I_2(\nu)$, 以及背光 X 光谱强度为 $I_3(\nu)$. 由于未加热冷样品对 X 光的吸收主要来自光电离过程, 吸收系数很小, 为此在图 3 布局测量中, $I_1(\nu)$, $I_2(\nu)$ 和 $I_3(\nu)$ 有下列近似关系

$$\begin{cases} I_1(\nu) = I_S(\nu) e^{-\tau(\nu)} + I_{SE}(\nu), \\ I_2(\nu) = I_{SE}(\nu), \\ I_3(\nu) = I_S(\nu), \end{cases} \quad (5)$$

其中 $I_S(\nu)$ 为背光源谱强度, $I_{SE}(\nu)$ 为样品自发光辐射谱强度.

由 (5) 式, 有

$$\tau(\nu) = \ln \left(\frac{I_3(\nu)}{I_1(\nu) - I_2(\nu)} \right). \quad (6)$$

对图 3 IP 记录的 (a), (b), (c) 图进行常规数据处理, 在 IP 记录的原始谱图的空间分辨方向选取 150 个像数点积分, 而后取平均, 得到原始的样品自发谱、背光谱以及样品 X 射线吸收能谱的原始谱曲线. 然后再对 X 射线能谱的原始谱曲线做进一步处理, 用常规法与曲线拟合法的结合方式对其进行波长标定和 X 射线吸收谱线辨识, 同时对晶体积分反射系数、滤片透射、谱仪几何因子等因素考虑进去把信号强度转换成 X 光相对强度信号, 以及对谱仪放置具体方位进行能谱强度修正和探测器对波长响应等进行估算, 从而得到了 $I_1(\nu)$, $I_2(\nu)$ 和 $I_3(\nu)$ 的实验值. 由实验测量值得到样品的辐射透射率和不透明度实验数据, 图 4 为实验测到的稠密 Al 样品辐射相对透射率曲线. 从图 4 中有稠密 Al 离化阶离子跃迁吸收谱线, 并看到有 XAFS (主要由失透 (opacity) 加宽占优势引起的吸收谱) 红移, 其中 K_α 谱线有偏移大约 80 mÅ, 这些数据与文献 [13] 报道基本一致, 与定态碰撞 - 辐射模型计算的结论随着等离子体密度提高, 其吸收区向长波 (低能) 侧移动的情况也一致.

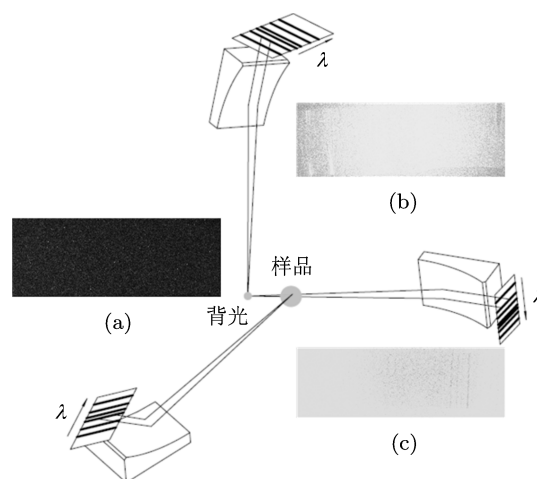


图3 椭圆弯晶测量系统 IP 记录扫描图像 (a) 自发光光谱; (b) 背光 X 光谱; (c) 吸收光谱

在假设样品一维膨胀的基础上 (即样品的密度变化仅仅是由于冲击波压缩加热过程中厚度变化引起的, 面密度应该是不变的, 有 $\rho l = \rho_0 l_0$, 其中 l_0 为样品初始厚度), 低温稠密样品的面密度 ρl 可以由样品初始面密度 ($\rho_0 l_0$) 代替. 本次实验的实验室测量初始值 $\rho_0 = 2.7 \text{ g/cm}^3$, $l_0 = 2.2 \text{ μm}$, 利用 $\tau(\nu)$ 的实验测量值得到了低温稠密 Al 辐射不透明度实

验数据.

由于真实的样品压缩并非绝对的一维压缩,存在一定的横向扩张,因而压缩后的样品面密度实际上要小于样品的初始面密度;实验室对样品初始面密度的测量也存在误差,在这种情况下得到的不透明度实验数据存在不确定度;此外数据的误差源于样品的状态.不过,除了样品在空间不均匀性和时间演化引起的测量不确定度外,还有由于辐射不透明度对电子温度和密度特别敏感,因而电子温度、密度值的不确定性,以及偏离 LTE 程度也是造成实验数据可信度打折或实验数据应用有限的原因.

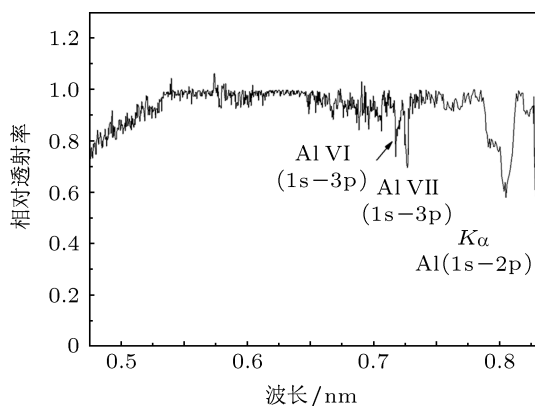


图4 实验测量稠密 Al 样品的能谱辐射透射率

本文实验中尽管已经采用了在一发次打靶中同时测量背光谱、样品自发射谱、样品吸收谱的诊断新技术,激光烧蚀冲击波对称碰撞压缩新加热方式和新构形靶等控制样品状态以及短脉冲 X 射线背光控制时空分辨诊断等措施,将样品状态的空间不均匀性和时间演化引起的测量不确定度也已经做到了尽可能减小的程度,但本文实验研究中需要的面密度、电子温度和密度值都是模拟数值,远非实验测量的真实值,从而大大降低了本次实验数据的可信度和应用范围,甚至图 4 的结果以及低温稠密 Al 辐射不透明度实验数据仅能作参考用.但不管怎样,这些结果无疑将对了解极端条件下不透明度的演化规律和物理机制,推动低温稠密等离子体不透明度模拟先进理论方法发展有着非常重要的价值.

对样品面密度实验测量以及样品状态的实验

诊断是当前不透明度实验中亟待解决的问题,但要真正实现还需要解决一些实验技术方面的障碍,这将是今后要深入研究的课题.

5 结论

采用激光烧蚀冲击波对称碰撞压缩产生稠密样品,利用基于椭圆弯晶为分光元件搭建的光谱测量系统以及短脉冲背光控制时空诊断技术方案,得到了在密度为 $(5-6)\rho_0$, 电子温度为 $(8-10)$ eV 状态下低温稠密 Al 样品辐射不透明度实验数据,以及有压力电离 Al 离子化阶跃辐射 XAFS,并观测到其吸收能谱移动,其中 $K\alpha$ 吸收谱线有大约 80 mÅ 偏移.虽然实验中已经采取了将激光参数抖动、样品状态的空间不均匀性和时间演化引起的测量不确定度减小到一定程度的有效措施,尤其可扣除样品自发射谱的影响,但实验中的样品面密度的实时测量以及样品状态的实验诊断还没有解决好,这方面的实验和理论值之间存在一定的差异;而理论模拟结论又表明不透明度对二者的偏差又特别地敏感,目前国内外在这方面也还没有系统的实验数据;加之低温稠密物质辐射不透明度研究工作又极其复杂,因而本文的实验数据肯定存在一定的分歧或不足,尤其是吸收区谱线偏移量难免存在争议.但谱线红移已经能很好地解释稠密等离子体中的原子或离子的空间体积变小所引起的这种尺寸效应的原子特性,以及稠密 Al 样品辐射吸收谱线表明了冲击波对称碰撞压缩固体 Al 材料已经达到了一定的离化程度,佐证了激光烧蚀冲击波碰撞压缩可产生稠密样品加热方式的可行性,为实验室开展稠密物质辐射不透明度研究探索了新的加热样品的方法.

总之,本文提供的实验图像与数据绝大部分与其预期结果符合较好,但只要深入细致地分析与对比这些实验图像与数据,并相应开展相关方面的研究工作,无疑将会丰富不透明度这一基础研究领域和进一步开拓许多重要的应用.

感谢重庆大学光电工程学院肖沙里教授和神光 II 激光器运行组人员的大力协助.

- [1] DaSilva L, Ng A, Godwal B K, Chiu G, Cottet F, Richardson M C, Jaanimagi P A, Lee Y T 1989 *Phys. Rev. Lett.* **62** 1623
- [2] Campbell E M, Holmes N C, Libby S B, Remington B A, Teller E 1997 *Laser and Particle Beams* **15** 607
- [3] Stewart J, Pyatt K 1996 *J. Astrophys.* **144** 1203
- [4] Christian R H, Yarger F L 1955 *J. Chem. Phys.* **23** 2042
- [5] Wang F H, Chen J P, Meng X J, Zhou X M, Li X J, Sun Y S, Jing F Q 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1308 (in Chinese) [王藩侯, 陈敬平, 孟续军, 周显明, 李西军, 孙永盛, 经福谦 2001 物理学报 **50** 1308]
- [6] Pisani F, Koenig M 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 3314
- [7] Zhang J Y, Yang J M, Xu Y, Yang G H, Yan J, Meng G W, Ding Y N, Wang Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 689 (in Chinese) [张继彦, 杨家敏, 许琰, 杨国洪, 颜君, 孟广为, 丁耀南, 汪艳 2008 物理学报 **57** 689]
- [8] Anderson S G, Heeter R F, Booth R, Eming J, Fulkerson S, McCarville T, Norman D, Young B K F 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 063115
- [9] Audebert P, Renaudin P, Ceccotti S B, Geindre J P, Popovics C C, Tzortzakis S, Silvert V N, Shepherd R, Matsushima I, Gary S, Girard F, Peyrusse O, Gauthier J C 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 025004
- [10] Zhao Y, Yang J M, Zhang J Y, Liu J S, Yuan X, Jin F T 2009 *Rev. Sci. Instrum.* **80** 043505
- [11] Cai L C, Chen Q F, Gu Y J, Jing F Q 2005 *At. Mol. Phys.* **22** 43 (in Chinese) [蔡灵仓, 陈其峰, 顾云军, 经福谦 2005 原子与分子物理学报 **22** 43]
- [12] Kuzee J A, Hall T A, Frey H D 1998 *Phys. Rev. E* **57** 7060
- [13] Godwal B K, Ng A, Silva L D, Lee Y T, Liber 1989 *Phys. Rev. A* **40** 4521

Experimental studies on the opacity of dense aluminum compressed by a laser-driven shock waves*

Wang Rui-Rong[†] Wang Wei Fang Zhi-Heng An Hong-Hai Jia Guo
Xie Zhi-Yong Meng Xiang-Fu

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

(Received 16 January 2013; revised manuscript received 7 March 2013)

Abstract

The high-precise opacity of the dense plasma has important applications in the design and simulation of fusion research, and in plasma diagnostics. Base on the novel technique of point-projection backlighting, a broadband high-resolution elliptical crystal X-ray spectrometer, which is used to measure simultaneously the self-emission spectrum, the backlighting source spectrum, and the transmission spectrum in one shot, is designed on the Shengguang-II laser facility. The process of the colliding-shock-compressed sample by laser-driven shock waves is also investigated using a one-dimensional radiation hydrodynamics code MULTI. In the measurement, the dense plasma, produced in aluminum by colliding shocks driven by laser beams, reaches a peak density several times that of a solid, and the short backlighting from the 3d–4f transition bands of ytterbium is used as an absorption source for time- and space-resolving diagnostics. Several experimental results are obtained, they are the X-ray source spectrum, the transmission spectrum, and the self-emission spectrum of the dense Al sample in one shot obtained by using the point-projection method, as well as X-ray-absorption fine-structure spectra, and the changes in the K-shell photo-absorption edge of aluminum as it was compressed by a laser-driven shock waves. The transmissivity distribution and red-shift around 80 mÅ (with respect to the cold value of 1.56 keV) of the dense aluminum are also obtained. The data obtained are further analysed. As a result, a new theoretical model is developed.

Keywords: plasma production by shock waves and compression, X-ray absorption spectra, line shift, fine structure

PACS: 52.50.Lp, 61.10.Ht, 33.70.Jg, 32.10.Fn

DOI: 10.7498/aps.62.125202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11175167).

[†] Corresponding author. E-mail: wangrr59@citiz.net