

辐射加热 Al 等离子体的吸收谱实验^{*}

张继彦^{1)†} 杨家敏¹⁾ 许 琰²⁾ 杨国洪¹⁾ 颜 君²⁾ 孟广为²⁾ 丁耀南¹⁾ 汪 艳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)

(2007 年 4 月 27 日收到, 2007 年 5 月 12 日收到修改稿)

报道了辐射加热 Al 样品的 K 壳层辐射吸收谱实验. 在神光 II 激光装置上, 将 8 路主激光注入锥柱型金腔产生高温辐射源, 利用该辐射源加热腔内的 Al 薄膜样品, 产生温度达到几十电子伏的热稠密等离子体. 相对主激光延迟一定时间后, 利用第 9 路激光短脉冲聚焦打靶加热金盘, 产生短脉冲 X 光点光源. 通过测量 0.75—0.85 nm 波长范围内未经样品衰减以及经过样品衰减后的背光源辐射光谱, 得到了 Al 样品的 K 壳层吸收谱. 利用细致谱线计算的吸收谱对实验光谱进行拟合, 确定了 Al 样品等离子体的电子温度.

关键词: Al 等离子体, 吸收谱, 不透明度

PACC: 5250J, 5270L, 5225

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, 在惯性约束聚变和天体物理等研究中占有重要地位^[1-3]. 目前, 绝大部分辐射不透明度数据是通过理论计算得到的, 而这些理论计算模型中通常引入了各种各样的近似^[4-8], 其可靠性需要实验来进行校验.

背光吸收光谱法是最常用的辐射不透明度测量方法. 该方法需要一个 X 光背光源和一个接近稳态的均匀热稠密状态样品, 并且在测量样品的辐射不透明度的同时, 还需要同时诊断样品的温度密度. 20 世纪 90 年代, 美国利弗莫尔国家实验室(LLNL)在 NOVA 激光装置上, 通过 X 光背光吸收光谱法首次测量了 Al, Fe, Ni, Ge 等中高 Z 材料的高温辐射不透明度数据^[9-17]. 实验中采用激光间接驱动方式加热样品, 即首先将激光注入一个高 Z 材料制作的腔靶, 利用激光加热腔壁产生的高温等离子体辐射的 X 光对样品进行加热. 对于薄样品, 这种加热方式具有体加热特征, 因而易于实现样品的均匀加热, 另外, 由于辐射加热脉冲足够长, 样品能够接近稳态. 对于样品密度, 实验中采用背光阴影照相法诊断, 对

于样品温度, 则一般通过示踪元素吸收光谱来进行诊断.

自 20 世纪 90 年代末期开始, 利用国内的星光 II 和在神光 II 激光装置, 我们相继开展了一些不透明度分解实验研究工作, 发现了散射激光和腔壁等离子体对实验测量的不利影响, 建立了不透明度测量系统, 并逐步完善了不透明度样品的温度密度诊断方法^[18]. 本文采用锥柱型金腔靶的腔壁对激光束的引导作用以及对等离子体喷射方向的控制, 成功地避免了腔壁等离子体和散射激光会对实验测量的干扰, 获得了不透明度实验所需的干净辐射加热源. 相比于 LLNL 采用的腔内安装挡板的直柱金腔靶, 本文使用的锥柱型腔靶制作更简便, 结构更紧凑, 且同样能够达到屏蔽腔壁等离子体和散射激光的效果. 更重要的是, 由于辐射腔较小, 可以充分利用神光 II 激光器相对较小的激光输出能量, 将样品加热到接近于美国研究人员 NOVA 装置上注入大约 15 kJ 的激光能量才达到的样品温度.

2. 实验安排

实验中, 将神光 II 激光装置的 8 路 3 倍频主激光(每路激光波长 351 nm, 能量 260 J, 脉宽 1.0 ns)注入如图 1 所示的金腔靶产生高温辐射源, 利用该辐

^{*} 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金(批准号 9140C6804020606)资助的课题.

[†] E-mail: zhangjiyanzy@sina.com

射源对 Al 样品进行辐射加热. 为了实现均匀加热, 将厚度为 $0.15 \mu\text{m}$, 宽度为 0.4 mm 的薄 Al 样品置于腔靶中央, 使其能够受到较为均匀的辐照, 同时, 在样品的表面覆盖 $1.5 \mu\text{m}$ 厚的 CH 薄膜层以抑制样品直接向真空界面膨胀而形成较大的温度密度梯度. 为了避免散射激光和腔壁等离子体对实验测量的影响, 金腔靶设计成锥柱型, 使散射激光和腔壁喷射等离子体在锥柱面的引导下远离样品. 在相对 8 路主激光延迟约 2.0 ns 后, 将神光 II 第 9 路短脉冲 2 倍频激光束(激光波长 530 nm , 能量 150 J , 脉宽 150 ps) 聚焦于距离样品 4.0 mm 的金背光盘, 产生直径约为 $120 \mu\text{m}$ 的小尺度 X 光背光源. 利用该背光源, 可以采用点投影背光法对 Al 样品的吸收谱进行测量.

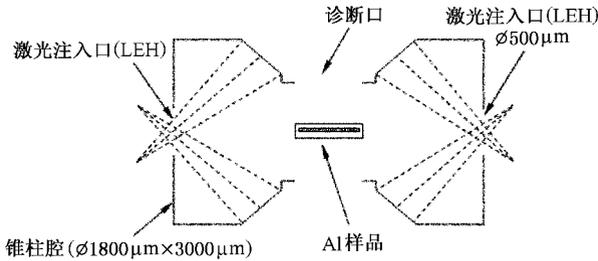


图 1 Al 样品吸收谱实验使用的锥柱型腔靶结构示意图

实验测量布局如图 2 所示. 背光源辐射光谱及其穿透热样品的吸收谱采用 PET 晶体谱仪在不同发次进行测量. 晶体谱仪采用 TJ-III X 光胶片进行记录, 记录面距离样品的光程约 200 mm , 点投影测量系统的放大倍数大约为 51 倍, 样品在记录面的点投影区宽度约为 20 mm , 背光源空间尺度采用一台 X 光针孔相机进行测量, 其选通滤片为 $5 \mu\text{m}$ 厚的 Al 滤片, 可以通过背光源中能量 1.0 keV 以上的 X 光信号, 背光源 X 光辐射脉冲时间波形及其相对主激光的延迟时间采用 X 光条纹相机测量, 选通滤片为 $30 \mu\text{m}$ 的 Be 滤片; 另外, 采用一台软 X 光能谱仪从

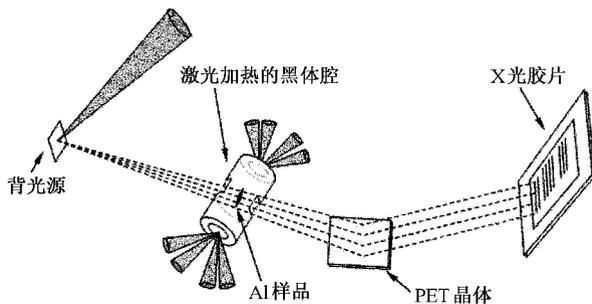


图 2 Al 样品吸收谱实验测量排布示意图

腔靶注入入口方向测量腔靶辐射温度.

3. 实验结果与讨论

采用 Cannon 胶片扫描仪对实验图像进行扫描, 得到 X 光光谱图像如图 3 所示. 图中分别给出了背光源 X 光穿过未加热样品的透过谱以及穿过辐射加热样品的透过谱, 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, 可以近似看作背光源谱. 从图中可以看出, 冷样品的辐射穿透谱是几乎没有峰谷结构的连续谱, 而在热样品的透过谱图像可以清晰到看到 Al 等离子体的类 Li, 类 Be, 类 B, 类 C 等离化阶离子的 $1s-2p$ 跃迁吸收谱线. 这表明, 热样品已经达到了较高的离化状态.

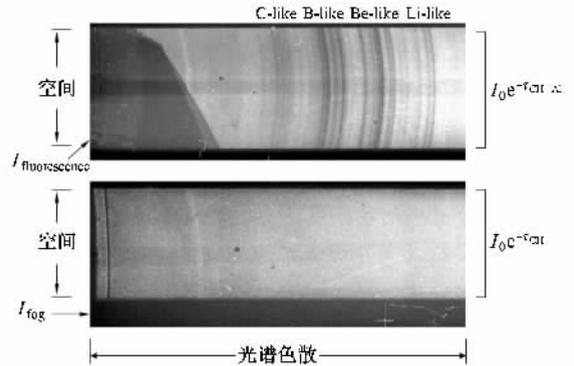


图 3 实验测量光谱的胶片扫描图像

实验数据处理过程如下: 首先, 从胶片记录的光谱图像数据中分别得到辐射透过谱、背光源谱、胶片灰度本底、晶体荧光信号的位置——灰度级数据, 然后, 利用实验标定得到的胶片响应特性曲线(能点 1590 eV , Cannon 胶片扫描仪扫描)将扫描得到的灰度等级数据转换成 X 光相对强度信号, 最后, 根据上述光谱信号得到样品的辐射穿透率, 也即样品的辐射吸收谱. 由实验测量信号得到样品辐射穿透率乃至辐射不透明度的具体过程在下面进行介绍.

如图 3 所示, 设背光源谱强度为 $I_S(v)$, 热样品的透过谱强度为 $I_T(v)$, 热样品自发辐射强度为 $I_E(v)$, 胶片的灰度本底信号强度为 I_{fog} , 晶体的荧光发射强度为 $I_{\text{fluorescence}}$, 它们之间满足如下关系:

$$I_T(v) = I_S(v) \exp[-\tau^{\text{Al}}(v) - \tau^{\text{CH}}(v)] + I_E(v) + I_{\text{fog}} + I_{\text{fluorescence}}, \quad (1)$$

式中 $\tau^{\text{Al}}(v)$ 是 Al 样品的光学厚度, $\tau^{\text{CH}}(v)$ 是 CH 包裹层的光学厚度, v 是光子频率. 忽略样品自发辐

射和 CH 包裹层的光学厚度,直接通过热样品的辐射穿透谱强度、灰度本底强度、荧光信号强度与背光源谱强度就可以得到辐射穿透率的表达式:

$$T(\nu) = \exp[-\tau(\nu)] = \frac{I_T(\nu) - I_{\text{log}} - I_{\text{fluorescence}}}{I_S(\nu)}, \quad (2)$$

于是,从辐射穿透谱强度中扣除灰度本底和荧光信号(常数),并将其与背光源谱强度比较,就得到了样品的辐射穿透率。

通常,样品的的光学厚度 $\tau(\nu)$ 和不透明度 $\mu(\nu, x)$ 的关系如下:

$$\tau(\nu) = \int_0^l \mu(\nu, x) \rho(x) dx, \quad (3)$$

其中 $\rho(x)$ 是样品中位置 x 处的密度, $\mu(\nu, x)$ 是样品中位置 x 处的辐射不透明度, l 是样品厚度。当样品在空间上是均匀的时候(这是实验测量不透明度所必需的),可以将(3)式简化为

$$\tau(\nu) = \mu(\nu) \rho l, \quad (4)$$

式中 $\tau(\nu)$ 通过实验测量样品的吸收光谱得到,并且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加热过程中厚度变化引起的,因而面密度是不变的),热样品的面密度 ρl 可以由样品初始面密度 $\rho_0 l_0$ 得到,即 $\rho l = \rho_0 l_0$ 。

图 4 给出了 Al 样品的辐射穿透率曲线,其中虚线为实验测量数据,实线为理论计算结果。实验样品的初始面密度 $\rho_0 l_0$ 为 $40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。理论计算采用基于 LTE 近似的细致谱线模型(DLA),仅考虑线吸收的贡献,光电离吸收和逆韧致吸收在本文测量范围的贡献相对较小,未进行计算。计算模型如下:

$$\mu(\nu) = \frac{1}{\rho} \sum_i \sum_{l'} N_{il} \sigma_{il'}(\nu), \quad (5)$$

其中 $\sigma_{il'}(\nu)$ 表示离化度为 i 的离子从能级 l 激发到 l' 的谱线吸收截面, N_{il} 表示处于能级 l 的离子数密度。计算中,热样品密度采用 RDMG 辐射流体力学数值模拟得到,约为 $0.0135 \text{ g}/\text{cm}^3$,热样品面密度则在实验样品的初始面密度的 $\pm 50\%$ 范围内调整。计算结果表明,当样品电子温度 $T_e = 54 \text{ eV}$ 时,理论计算的离子特征吸收的分布与实验结果符合较好,但样品面密度取为 $40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时得到的辐射吸收强度明显大于实验测量结果。从图 4 中可以看到,当样品面密度调整为实验样品初始面密度的 60% ,也即 $24 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时,理论计算的吸收谱强度与实验结果符合得很好。

关于实验和理论计算结果中面密度的差异,本

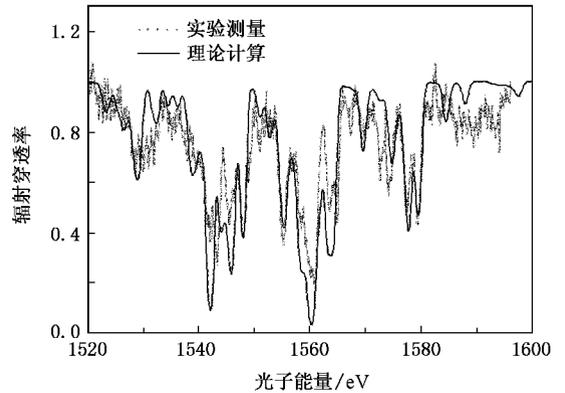


图 4 实验测量的辐射加热 Al 样品吸收谱以及理论计算结果

文认为主要因素在于如下几个方面。第一,由于真实辐射加热过程中样品并非绝对的一维膨胀,存在一定的横向扩张,因而热样品的面密度实际上要小于初始面密度;第二,样品初始面密度的测量存在误差,在国外的实验中遇到这种情况,美国 LLNL 的研究人员在经过精确测量后发现其订制的样品的面密度比供应方提供的数值小了大约 20% ^[13];第三,实验数据处理中未扣除样品自发射谱的影响,由于样品自发射光谱的谱峰正好对应吸收区,对吸收区具有补偿作用,因而导致吸收谱强度的降低;最后,实验数据处理中采用的 X 光胶片响应函数不准确也可能产生一定的误差。

从图 3 中吸收光谱图像可以看出,不考虑谱仪内壁杂散光信号的影响,吸收谱在空间方向是均匀的。在点背光投影几何中,吸收谱图像的空间方向正好对应于样品的宽度方向(腔轴方向),因而吸收谱图像在空间方向的均匀性也就反映了样品的空间均匀性。点背光投影系统的空间分辨由背光源尺度决定。采用 X 光针孔相机对背光源进行成像,得到背光源空间尺度为 $(120 \pm 20) \mu\text{m}$ 。

背光源的 X 辐射时间宽度决定了测量系统的时间分辨水平。采用 X 光条纹相机对背光源辐射时间波形进行观测,在打靶激光为 2 倍频 $2\omega_0$, 脉冲宽度 $\Delta t = 130 \text{ ps}$ 输出能量 $E = (130 \pm 30) \text{ J}$ 的条件下,得到背光源 X 光辐射脉冲的半高宽为 $(190 \pm 40) \text{ ps}$ 。这表明测量系统的时间分辨能力达到 $(190 \pm 40) \text{ ps}$, 在这样短的时间区间内,样品接近稳态,其状态随时间的演化被限制在了一个较小的区间内,这一点可以从理论计算与实验数据之间较好的符合情况看出。

采用软 X 射线能谱仪从腔靶注入口(观测方向

与注入孔法线夹角为 30°)方向对腔靶辐射温度进行测量,得到腔靶辐射温度为 (104 ± 10) eV.

总体上,由于实验中采用了 CH 包裹、均匀辐射加热等控制样品状态的措施,并采用短脉冲背光源进行点投影吸收谱测量,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减小到了相当低的水平.不过,在一些次要的吸收线强度以及吸收线之间的相对吸收强度方面,实验和理论结果之间仍然存在一定差异,这可能与实验样品未完全达到 LTE 状态或理论计算中未考虑某些组态有关.

4. 结 论

采用合理的靶设计和测量安排,成功测量了辐射加热 Al 样品的辐射吸收谱.将实验测量数据与 DLA 模型计算结果进行比较,当样品电子温度 $T_e = 54$ eV,面密度取为样品初始标称面密度的 60%,即 $24 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时,理论计算与实验测量符合得很好;从

点投影背光方式下得到的吸收光谱图像的均匀空间分布表明,通过腔靶辐射加热得到了空间均匀的样品等离子体.实验中,测量系统的空间分辨达到 $(120 \pm 20) \mu\text{m}$,时间分辨达到 (190 ± 40) ps,腔靶辐射温度达到 (104 ± 10) eV.总体上,通过 CH 包裹、均匀辐射加热和短脉冲背光源,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减小到了相当低的水平,不过,在一些次要的吸收线强度以及吸收线之间的相对吸收强度方面,实验和理论结果之间仍然存在一定差异,这可能与实验样品未完全达到 LTE 状态或理论计算中未考虑某些组态有关.

本工作是在数值模拟、诊断、制靶和激光器运行等方面同志的大力协作下完成的,在理论计算方面还得到了北京应用物理与计算数学研究所的颜君研究员、国防科技大学的袁建民教授、曾蛟龙博士、靳奉涛博士的协助,在此对所有参与本工作的人员表示真诚的谢意.

- [1] Rogers F J, Iglesias C A 1994 *Science* **263** 50
- [2] Lindl J 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933
- [3] Campbell E M, Holmes N C, Libby S B, Remington B A, Teller E 1997 *Laser and Particle Beams* **15** 607
- [4] Bar-Shalom A, Oreg J, Goldstein W H 1994 *J. Quant. Spectr. & Radiat. Transfer* **51** 27
- [5] Jr Abdallah Joseph, Robert E H C 1991 *J. Appl. Phys.* **69** 23
- [6] Zeng J L, Yuan J M 2002 *Phys. Rev. E* **66** 16401
- [7] Bauche J, Bauche-Arnoult C, Wyart J F, Duffy P, Klapisch M 1991 *Phys. Rev. A* **44** 5707
- [8] Tsakiris G D, Eidmann K 1987 *J. Quant. Spectr. & Radiat. Transfer* **38** 353
- [9] Davidson S J, Foster J M, Smith C C, Warburton K A, Rose S J 1988 *Appl. Phys. Lett.* **52** 847
- [10] Perry T S, Davidson S J, Serduke F J D, Bach D R, Smith C C, Foster J M, Doyas R J, Ward R A, Iglesias C A, Rogers F J, Jr Abdallah J, Steward R E, Kilkenny J D, Lee R W 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 3784
- [11] Da Silva L B, MacGowan B J, Kania D R, Hammel B A, Clark C A, Hsieh E, Doyas R, Iglesias C A, Rogers F J, Lee R W 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 438
- [12] Springer P T, Fields D J, Wilson B G, Nash J K, Goldstein W H, Iglesias C A, Rogers F J, Swenson J K, Chen M H, Bar-Shalom A, Stewart R E 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 3735
- [13] Perry T S, Budil K S, Cauble R, Ward R A, Bach D R, Iglesias C A, Wilson B G, Nash J K, Smith C C, Foster J M, Davidson S J, Serduke F J D, Kilkenny J D, Lee R W 1995 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **54** 317
- [14] Perry T S, Springer P T, Fields D F, Bach D R, Serduke F J D, Iglesias C A, Rogers F J, Nash J K, Chen M H, Wilson B G, Goldstein W H, Rozsnyai B, Ward R A, Kilkenny J D, Doyas R, Da Silva L B, Back C A, Cauble R 1996 *Phys. Rev. E* **54** 5617
- [15] Springer P T, Wong K L, Iglesias C A, Hammer J H, Porter J L, Toor A, Goldstein W H, Wilson B G, Rogers F J, Deeney C, Dearborn D S, Bruns C, Emig J, Stewart R E 1997 *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer* **58** 927
- [16] Back C A, Perry T S, Bach D R, Wilson B G, Iglesias C A, Landen O L, Davidson S J, Crowley B J B 1997 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **58** 415
- [17] Perry T S, Klein R I, Bach D R, Budil K S, Cauble R, Kornblum H N, Wallace R J, Lee R W 1998 *Phys. Rev. E* **58** 3739
- [18] Yang J M, Zhang J Y, Ding Y N, Peng Y L, Li J M, Zheng Z J, Yang G H, Zhang W H, Li J 2003 *Phys. Plasmas* **10** 4881

Absorption experiments on radiatively heated Al plasma ^{*}

Zhang Ji-Yan^{1)†} Yang Jia-Min¹⁾ Xu Yan²⁾ Yang Guo-Hong¹⁾ Yan Jun²⁾
Meng Guang-Wei²⁾ Ding Yao-Nan¹⁾ Wang Yan¹⁾

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

2 *Beijing Institute of Applied Physics and Computation Mathematics, Beijing 100088, China*

(Received 27 April 2007; revised manuscript received 12 May 2007)

Abstract

K-shell absorption spectroscopy of radiatively heated Al sample is reported. The experiment was conducted on Shenguang-II Laser facility. Eight main beams of the facility are injected into a conical gold cavity to produce high-temperature X-ray heating source. This X-ray source is then used to irradiate an Al foil located in the center of the cavity, and heat the foil to temperature of tens of electronvolt. After a time delay, a ninth short-pulsed laser beam is focused on a gold disk to generate an X-ray point-backlighter. By measuring the spectra both directly from backlighter and attenuated by the heated sample in the wavelength range of 0.75—0.85 nm, the K-shell absorption spectrum of Al is obtained. By fitting the experimental spectrum with theoretical calculation, electron temperature of the heated sample is determined.

Keywords : Al plasma, absorption spectroscopy, opacity

PACC : 5250J, 5270L, 5225

^{*} Project supported by the Foundation of National Key Laboratory of High Temperature and High Dense Plasma Physics (Grant No. 9140C6804020606).

[†] E-mail : zhangjiyanzy@sina.com