

CNIC-01788

CAEP-0147

辐射不透明度实验技术研究

张继彦 杨国洪 丁耀南 杨家敏 李 军

张文海 何颖玲 王耀梅 黄灏东

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳, 621900)

摘 要

在“神光”II强激光装置上,开展了辐射不透明度综合实验测量技术探索和相关物理问题的分解研究,并对部分新型诊断设备进行考核。实验的主要研究内容包括:(1) keV 能区辐射吸收谱测量技术探索;(2) 双点背光法辐射不透明度测量技术探索;(3) 不透明度样品状态参数诊断技术探索。

关键词: 不透明度 吸收谱 点背光法

Studies of the Experimental Technologies of Radiative Opacity

(In Chinese)

ZHANG Jiyan YANG Guohong DING Yaonan YANG Jiamin
LI Jun ZHANG Wenhai HE Yingling
WANG Yaomei HUANG Haodong
(Centre of Laser Fusion Research, CAEP, Mianyang, 621900)

ABSTRACT

On the SHENGUANG-II laser facility, integrated experiment for opacity measurement was performed and related physical items were studied. In the experiment, some new-typed diagnosing device were also tested. The experiment includes three contents: (1) Investigation of the measurement technique of absorption spectra in the keV region; (2) Investigation of the measurement technique of dual point projection spectroscopy; (3) Investigation of the temperature and density parameters of the experimental samples.

Key words: Opacity, Absorption spectrum, Point projection spectroscopy

引言

辐射不透明度是反映物质对电磁辐射吸收能力的一种度量。高温等离子体的辐射不透明度是 ICF(惯性约束聚变)相关物理研究中的最基本参数之一,并且广泛应用于恒星以及其他高温物态系统的研究中,因此,研究高温等离子体辐射不透明度既有重要的应用需求背景又有基础物理学价值^[1]。美国 LLNL 曾把不透明度研究作为 NOVA 装置物理研究的主要内容之一,并已经取得了被称之为里程碑的进展^[2~5]。随着激光惯性约束聚变科学和技术的发展,各国根据各自的激光器件和物理思想,对高温等离子体辐射不透明度进行了近 20 年的探索研究。国内从 20 世纪 90 年代中期开始在星光装置上开展一系列的辐射不透明度的实验探索,初步建成了一套谱分辨吸收谱测量系统,获得了时间积分的 CHO 和 Al 等离子体高谱分辨吸收谱数据,并与 UTA 理论模型计算结果进行了初步比较。近两年以来,利用神光 II 八路大能量激光装置陆续开展了一系列的实验工作,对辐射加热 Al 样品和 Ti 样品的软 X 光能区辐射吸收谱进行了实验测量。

从已开展实验情况来看,不透明度实验中需要克服的主要困难有四个:一是吸收谱测量问题。在近两年的吸收谱测量实验中,当采用柱腔加热样品时,样品材料的线吸收强度普遍较弱,与理论计算结果相差较大;而采用多层靶时,线吸收强度更接近于理论结果。分析表明,尽管黑腔作为辐射加热源具有能量利用效率高和样品加热均匀性好等优点,但由此也产生了腔等离子体对样品干扰的问题,即未经过样品的腔辐射抬高了穿透谱的本底,从而降低了吸收谱测量的信噪比。因此,必须设法对腔靶结构进一步改进或采用其他结构的加热源以抑制干扰信号。二是背光源谱测量问题。在过去的实验中,我们发现在相近的激光打靶条件下,有无外背光源的情况下测到的透射谱强度变化幅度很小,这表明背光源辐射强度与腔辐射(可能主要是腔等离子体发光和诊断孔边缘发光)及样品自发辐射本底相比太小。三是样品自发射谱的测量问题。与背光源谱的测量类似,由于腔等离子体发光的干扰,使得测准样品自发光非常困难。四是样品状态参数测量问题。在辐射不透明度实验中,样品电子温度一般通过吸收光谱学方法进行测量,密度则一般由样品的点背光阴影图像或自发光图像进行推断,这需要采用双点背光法^[6~13]。目前,我们已开展了自发光像测量技术探索,点背光阴影测量由于实验条件等原因,还没有进行相应的实验。总之,当前不透明度实验尚存在一些问题,总体表现为谱线吸收强度小,与理论模拟计算差距较大。我们认为,解决这些问题的关键在于设法获得干净的辐射加热样品等离子体,避免腔内以及诊断孔边缘等离子体发光对实验测量的影响。

根据目前背光法辐射不透明度实验研究的现状和具体问题,在 2003 年“神光”II 辐射不透明度实验中,采用改进的靶型和实验测量设置,有效抑制了腔等离子体发光对实验测量的干扰;同时,利用晶体谱仪对 Al 元素的千电子伏能区吸收谱进行测量,并利用其进行等离子体电子温度诊断;另外,对样品背侧辐射场温度进行了测量;最后,开展了双点背光法辐射不透明度测量方法探索。

1 实验目标

本次实验的主要目标有如下几个方面:

- (1) 进行 Al 样品 keV 能区辐射不透明度测量的实验方法和技术探索,重点是考核 keV

能区辐射穿透谱的实验测量系统;

(2) 双背光法不透明度综合实验测量技术探索,检验相关技术能力,暴露综合不透明度测量的问题和困难,以便进行有针对性的改进;

(3) 探索样品辐射温度与物质温度诊断方法。

2 实验内容

2.1 Al 样品的 keV 能区辐射吸收特性实验测量技术探索

2.1.1 实验条件

实验采用图 1 所示 $\phi 1\ 500\ \mu\text{m} \times 4\ 000\ \mu\text{m}$ 的长腔靶,7 路大能量激光聚焦后 $400\ \mu\text{m}$ 注入腔内,利用激光与柱腔相互作用产生的 X 光辐射加热贴于腔壁的 Al 样品,然后,另一路激光延迟一定时间聚焦于背光靶上产生点 X 光源,并在样品背侧测量背光源穿过样品后的辐射穿透谱。按照这种方式,可以在只有加热束而没有背光束时测量样品自发射谱,在有背光束但无样品及其加热束的情况下测量背光源谱,从而获得计算辐射吸收谱所需的完整实验数据。由于实验采用的柱腔尺寸较长,并且诊断孔尺寸较大,因而可以较好地避免腔等离子体发射对实验测量的干扰。在实验过程中,点背光源采用激光聚焦于金膜靶表面以及聚焦照射 $\phi 30\ \mu\text{m}$ 的 Au 丝顶端两种方式获得。

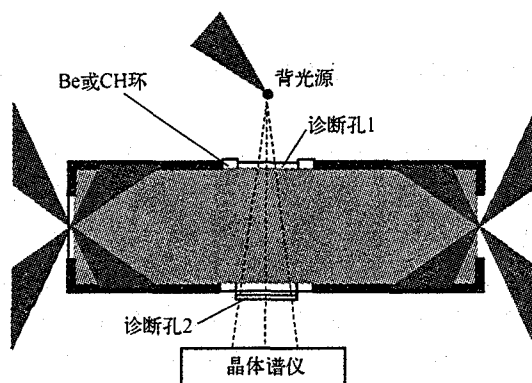


图 1 Al 样品 keV 能区吸收谱测量布置

样品结构如图 2 所示,Al 样品厚度分别为 $0.2\ \mu\text{m}$ 和 $0.3\ \mu\text{m}$,并夹在 $0.2\ \mu\text{m}$ 的 CH 材料中间,以确保样品层在辐射加热过程中具有较为均匀的密度分布。

实验中,辐照背光靶的两路激光相对于注入腔内的激光延迟 $1.0\ \text{ns}$,所用各路激光均采用三倍频大能量打靶,每路激光能量 $260\ \text{J}$ 左右,脉宽 $1.0\ \text{ns}$ 左右。

穿过样品靶的辐射穿透谱,样品自发射谱以及背光源谱由晶体谱仪记录,测谱范围在 $0.6\sim 0.9\ \text{nm}$ 之间。此外,我们用软 X 光能谱仪(Dante)从激光注入孔方向测量黑腔的辐射能谱,并诊断得到黑腔的辐射温度。

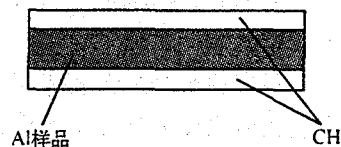


图 2 不透明度样品靶结构简图

2.1.2 实验结果

实验中,先采用门控晶体谱仪进行光谱测量,分别进行了辐射穿透谱的静态和动态测量,经转接镜头调焦和动态同步调节,获得了较为清晰的光谱图像,结果如图3所示。其中图3a是CCD直接记录的TIAP晶体对Al激光等离子体X光辐射的衍射图像;图3b是经波长定标后获得的光谱曲线。

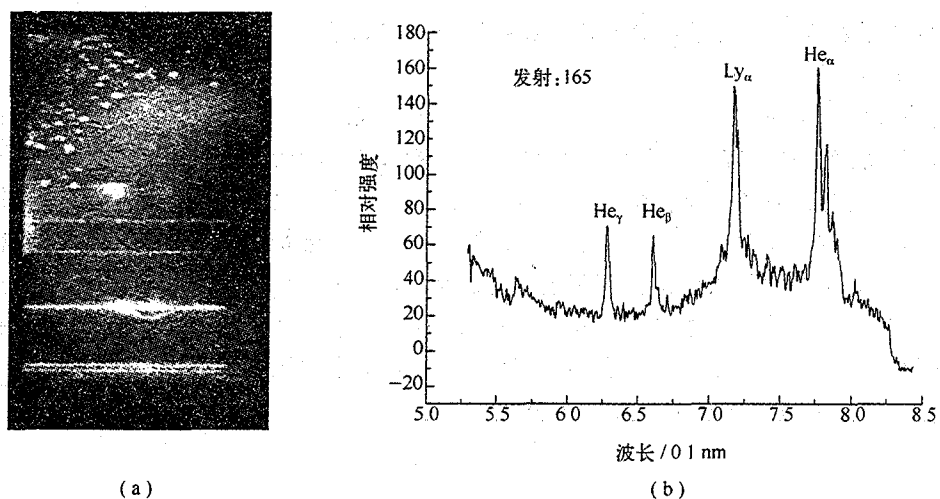


图3 用门控晶体谱仪测量得到的Al等离子体发射谱

从图3b中的实验光谱可以看出,光谱范围在0.55~0.825 nm之间,主要是Al等离子体的K壳层发射,包括 He_{α} , Ly_{α} , He_{β} 和 He_{γ} 等发射谱线。此外,在图3a中我们注意到光谱图像上有斑点状的杂散光,经过对谱仪系统的检查后发现谱仪前端挡光板及Be膜上有砂眼,并且在分幅管微带上也出现砂眼。经分析后认为,由于在腔靶诊断孔与谱仪之间安装了一块限光板(铁材料),在打靶过程中,限光板被诊断孔发出的黑腔辐射部分烧蚀加速,形成高速的固态碎片。这些高速碎片打穿了谱仪头部的限制板和Be滤片,最终直接轰击晶体和分幅管微带,并造成破坏。

实验后期采用时间积分晶体谱仪测量。实验中通过改变激光打靶状态,分别测量了穿过样品的背光源辐射穿透谱,无样品时的背光源谱以及无背光源时样品的自发射谱,结果如图4所示。

对实验数据的分析表明,样品对背光源辐射有一定的衰减,存在K壳层带吸收。而且,自发辐射强度明显较背光源谱及辐射穿透谱强度小,这初步表明长腔靶可以较好抑制腔等离子体辐射对辐射吸收谱测量的影响。此外,在样品自发射谱中,还可以观测到较弱的K壳层发射线,其强度大约相当于背光源辐射强度的10%~20%,因此在计算辐射吸收系数时样品自发辐射谱的影响不可忽略,即需要在辐射穿透谱中扣除样品自发辐射影响以及胶片本底。吸收谱是扣除自发辐射和胶片本底后的辐射穿透谱被背光源谱归一化后的结果,这一点可用如下表达式进行说明:

$$I_T = (I_B - I_F)e^{-\tau} + I_E + I_F \quad (1)$$

式中: τ ——光学厚度;

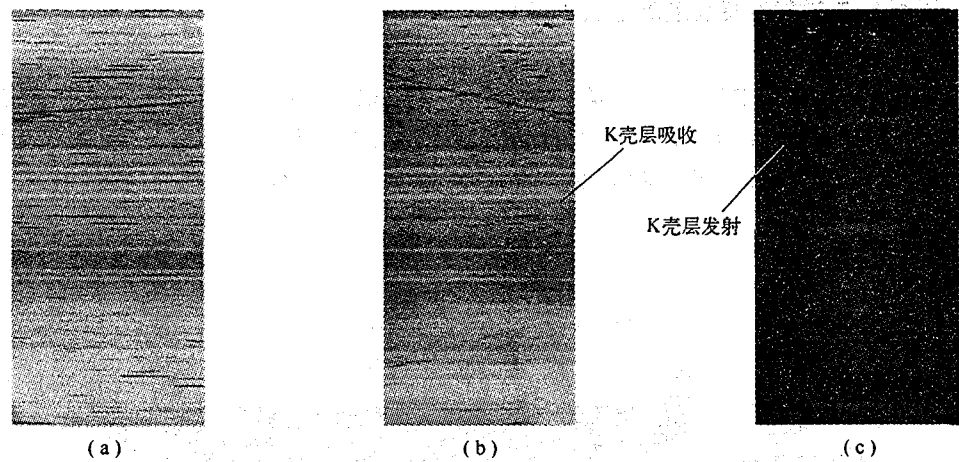


图4 Al样品 keV 能区辐射吸收谱
(a) 背光源谱;(b) 辐射穿透谱;(c) 样品自发射谱

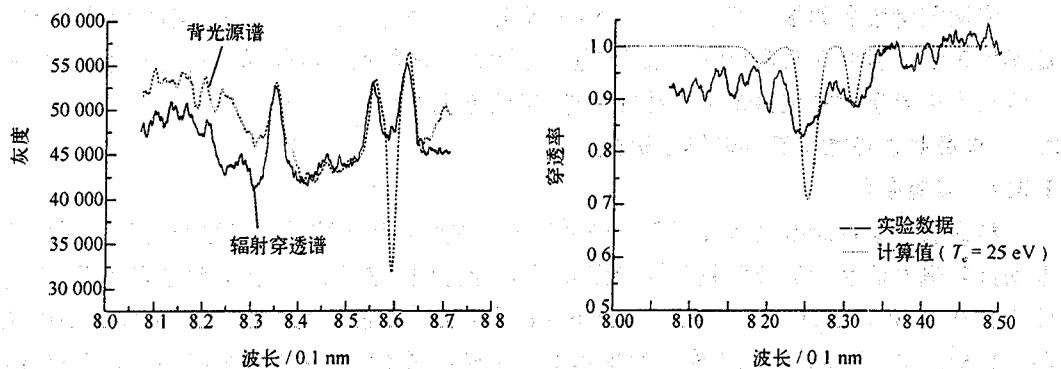
- I_T ——辐射穿透谱强度, $1/L^2 \cdot t$;
- I_B ——背光源谱强度, $1/L^2 \cdot t$;
- I_E ——样品自发射谱强度, $1/L^2 \cdot t$;
- I_F ——荧光本底, $1/L^2 \cdot t$ 。

如果沿吸收路径方向样品状态是均匀的,则光学厚度可表达为

$$\tau = \mu(\nu)\rho l \quad (2)$$

- 式中: $\mu(\nu)$ ——频率相关辐射吸收系数, $L^2 \cdot m^{-1}$;
- ρ ——样品密度, $m \cdot L^{-3}$;
- l ——样品厚度, L 。

对薄膜样品,其膨胀过程中面密度 ρl 几乎不变,于是,通过实验测量的辐射穿透谱,背光源谱,样品自发射谱以及等离子体原始面密度,便可以获得样品的吸收系数 $\mu(\nu)$ 。经波长定标,得到吸收谱实验结果如图5所示。



(a) 背光源谱与穿透谱 (b) 吸收谱

图5 Al样品 K 壳层吸收谱的实验及理论计算结果

2.2 双背光法辐射不透明度测量技术探索

2.2.1 实验条件

双背光实验用靶如图 6 所示,其基本结构与图 1 相似,不过样品不是贴在腔壁,而是置于柱腔中心,并且还增加了背光源 2 用于样品厚度方向的阴影成像。背光源 2 同样采用 $\phi 30 \mu\text{m}$ 的金丝,并垂直放置于激光注入孔一端,其头部在柱腔中心线上。

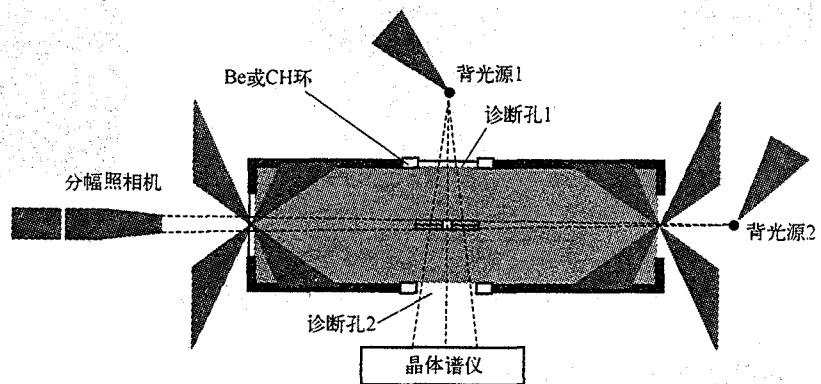


图 6 双背光吸收谱实验测量布局

样品结构如图 2 所示,样品厚度为 $0.3 \mu\text{m}$,样品夹在 $0.2 \mu\text{m}$ 的 CH 材料中间,以便在辐射加热过程保持样品密度分布的均匀性。

实验中,辐照背光靶 1 和背光靶 2 的激光束相对于加热样品的激光束延迟 1.0 ns ,以确保样品充分加热。各路激光均采用三倍频大能量输出打靶,即每路激光能量 260 J 左右,脉宽 1.0 ns 左右。辐射吸收谱采用点背光法测量,点背光源由激光辐照背光丝顶端获得。辐射穿透谱、背光源谱及样品自发射谱采用晶体谱仪测量;样品厚度采用点背光成像技术测量,即在腔轴方向利用一点背光源对样品进行投影成像,用分幅相机的微带记录阴影像,并根据阴影像的大小反推样品的厚度。

2.2.2 实验结果

实验测量结果如图 7 所示。其中图 7a 是辐射穿透谱图像,由于没有测量背光源谱,因此不能确定是否存在吸收谱线。图 7b 是沿腔轴方向测量的腔与样品的背光阴影像,从中可以看出点背光源对柱腔激光注入孔的成像,但没有观测到样品的阴影。

2.3 样品状态参数诊断实验技术探索

2.3.1 实验条件

样品状态参数诊断技术探索部分的实验内容主要与其他实验内容结合进行。样品辐射能谱及其辐射温度的实验测量布局如图 8 所示,实验中,将 7 路大能量激光聚焦后 $400 \mu\text{m}$ 注入尺寸为 $\phi 1500 \mu\text{m} \times 4000 \mu\text{m}$ 大腔内,利用激光与柱腔相互作用产生的 X 光辐射加热贴于腔壁的 Al 样品,然后,在样品背侧用 Dante 谱仪测量背光源穿过样品后的辐射能谱,并最终获得样品辐射温度及其时间过程。样品电子温度的诊断采用吸收谱法,实验布局如图 1 所示,通过测量样品的 keV 能区辐射吸收谱,采用理论计算结果拟合实验数据的方式推断样品的电子温度。样品的电子密度则采用点背光阴影成像方式获得,实验采用图 6 所示的

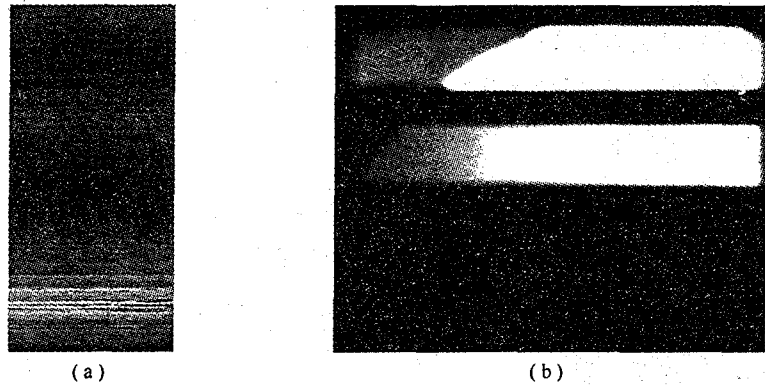


图7 双点背光靶实验测量结果
(a) 辐射穿透谱; (b) 样品厚度方向的点背光阴影像

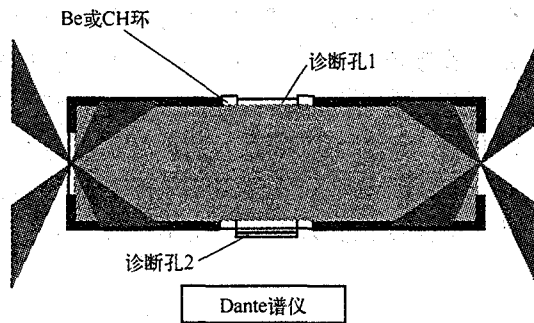


图8 Al样品辐射温度实验测量布置

双点背光布局方式。

图8中的实验样品结构同样如图2所示,样品厚度为 $0.3\ \mu\text{m}$,样品夹在 $0.2\ \mu\text{m}$ 的CH材料中间。

实验中,注入腔内的七路激光均采用三倍频大能量打靶,每路激光能量约 $260\ \text{J}$,脉宽 $1.0\ \text{ns}$ 。

2.3.2 实验结果

利用 Dante 谱仪测量得到的样品背侧辐射场温度如图9所示。在图中我们注意到辐射温度随时间变化曲线有一个较陡的上升前沿,这是样品被辐射烧穿的典型特征。样品被烧穿后,其背侧辐射温度最高上升到 $75\ \text{eV}$ 左右(在大约 $500\ \text{ps}$ 的时间内),然后,随着黑腔的解体和温度的降低,辐射温度开始下降,但直到样品烧穿后约 $5\ \text{ns}$ 时仍保持在大约 $40\ \text{eV}$ 。

样品的电子温度采用吸收谱理论计算结果拟合实验数据的方式得到。在理论模拟时,当电

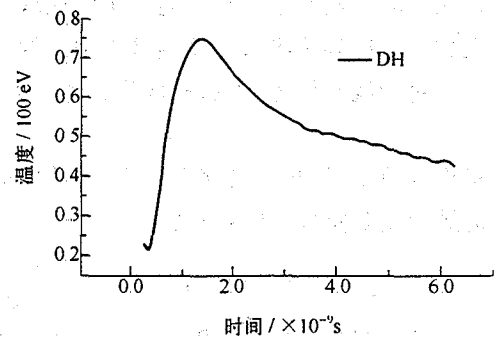


图9 辐射加热 Al 样品辐射温度及其演化过程

子温度取 25 eV, 等离子体密度取 0.02 g/cm³, 样品厚度取 0.1 μm 时, 理论吸收谱与实验谱符合得最好, 因此可以认为等离子体电子温度大约在 25 eV 左右。

由于实验中没有观测到样品厚度方向的阴影像, 因此未获得样品密度方面的信息。

3 实验不确定度分析

在吸收谱测量实验中, 首先通过控制两发打靶激光参数及靶参数基本一致分别获取样品的透过谱和源谱, 并将透过谱按源谱归一化得到吸收谱:

$$T(E) = \frac{[I_T(E) - I_{F1}(E)] - [I_{Em}(E) - I_{F2}(E)]}{I_B(E) - I_{F3}(E)} \quad (3)$$

式中: I_T ——辐射穿透谱强度;

I_B ——背光源谱强度;

I_{Em} ——样品自发射谱强度;

I_F ——记录面本底信号强度。

辐射吸收谱的测量误差主要来源于以下几种因素: 首先, 由于目前实验中光谱强度用记录仪器的计数近似代替, 从而在吸收谱中引入误差; 其次, 辐射穿透谱, 背光源谱以及样品自发辐射是在不同实验发次测量的, 实验条件的重复性也会影响到测谱精度; 最后, 当色散元件与分幅相机等设备配接时, 由于分幅相机在不同发次打靶中脉冲高压不一致引起增益涨落, 从而引入实验误差。我们用 α 表示实验重复因子, 用 η 表示分幅相机的增益重复因子, 忽略高级衍射影响, 并认为不同发次色散元件效率基本一致。于是, 可以将吸收谱测量的不确定度写为:

$$\sigma = \frac{\Delta T'(E)}{T'(E)} = \left[\left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \eta}{\eta} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (4)$$

其中

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta I_{F3} - \Delta I_B}{I_B - I_{F3}} + \frac{\Delta I_T - \Delta I_{F1} - \Delta I_{Em} + \Delta I_{F2}}{I_T - I_{F1} - I_{Em} + I_{F2}} \quad (5)$$

由打靶激光能量一致性偏差, 初步通过打靶激光能量涨落估计源谱及透过谱重复因子不确定度为 15%; 透过谱和源谱记录信号强度不确定度主要由记录可见光 CCD 电子学噪声及其非线性响应引起, 其数值约 20%; 门控分幅相机响应不确定度主要由不同打靶发次时脉冲高压幅度不一致引起其增益涨落所致, 其相对不确定度为 15%。将上述不确定度代入式(2), 得到吸收谱强度测量不确定度为 29%。

对于波长误差, 可由晶体谱仪衍射方程确定, 晶体衍射方程为:

$$n\lambda = d\sin\theta \quad (6)$$

式中: n 是衍射级次, 通常取一级。在实际光谱处理过程中, 一般是利用两条已知谱线对光谱进行波长定标, 基本表达式如下

$$\lambda = d\sin \left\{ \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{(x_1 - x_2)\operatorname{tg}(\theta_1 + \alpha)\operatorname{tg}(\theta_2 + \alpha)}{(x - x_2)\operatorname{tg}(\theta_2 + \alpha) + (x_1 - x)\operatorname{tg}(\theta_1 + \alpha)} \right] - \alpha \right\} \quad (7)$$

从式(7)可以看出, 波长测量精度主要与基准谱线位置(x_1, x_2, x)、波长(由 θ_1 和 θ_2 确定)以及晶体与光谱记录面的夹角 α 有关。有关波长不确定度的具体分析见《晶体谱仪测量不确定度分析》。对式(7)取全微分, 考虑基准谱线位置测量不确定度以及谱仪几何尺寸不

确定度,得到波长相对不确定度为 0.2%。

4 结 论

在“神光”Ⅱ装置上,利用 $\phi 1\ 500\ \mu\text{m} \times 4\ 000\ \mu\text{m}$ 的长腔靶辐射加热样品,利用激光聚焦与背光膜或背光丝顶端产生点背光源,测量了厚度为 $0.3\ \mu\text{m}$ 的 Al 样品的辐射吸收谱,观察到了 Al 样品 keV 能区辐射吸收线,并且,测量了辐射加热 Al 样品的自发辐射谱。从自发辐射谱强度大大低于样品辐射穿透谱和背光源谱强度的情况来看,初步表明通过采用长腔靶,可以对腔本底辐射进行有效抑制。

开展了样品状态参数诊断技术探索。利用 keV 能区辐射吸收谱的相对强度对样品电子温度进行了推断,得到长腔靶辐射加热样品的电子温度约 25 eV;采用 Dante 谱仪测量了无背光源时样品背侧辐射场温度,获得最高辐射场温度约 75 eV;采用点背光投影技术,进行了黑腔及其辐射加热样品厚度方向成像,获得了黑腔激光注入孔的阴影像,但未观察到样品的阴影像,初步判断可能是由于点背光源尺度较大,而样品较薄造成的。

进行了双点背光法不透明度测量技术探索,测量得到了样品的辐射穿透谱以及黑腔激光注入孔的阴影像,初步表明在“神光”Ⅱ装置上开展双点背光法不透明度实验的条件已基本具备,需进一步开展相关工作。

致 谢

感谢参与本项目实验制靶和激光运行人员的支持和协作。

参 考 文 献

- 1 李世昌. 高温辐射物理与量子辐射理论. 北京:国防工业出版社,1992
- 2 Joseph Abdallah Jr., Robert E H Clark. J. Appl. Phys., 1991, 69(1):23~26
- 3 Perry T S, Davidson S J, Serduke F J D, et al. Phys. Rev. Lett., 1991, 67(27):3784~3787
- 4 Davidson S J, Foster J M, Smith C C, et al. Appl. Phys. Lett., 1988, 52(1):847~849
- 5 Springer P T, Fields D J, Wilson B G, et al. Phys. Rev. Lett., 1992, 69(26):3735~3738
- 6 Keane C J, Lee R W, Hammel B A, et al. Rev. Sci. Instrum., 1990, 61(10):2780
- 7 Keane C J, Hammel B A, Osterheld A L, et al. Phys. Rev. Letters, 1994, 72(19):3029
- 8 Young B K F, Stewart R E, Cerjan C J, et al. Phys. Rev. Letters, 1988, 61(25):2851
- 9 Glenzer S H, Fournier K B, Decker C, et al. Phys. Rev., 2000, E62(2):2728
- 10 Peyrusse, Combis P, Louis-Jacquet M, et al. J. Appl. Phys., 1989, 65(10):3802
- 11 Michelis C De, Mattioli M. Nuclear Fusion, 1981, 21(6):677
- 12 Andrea Thum-Jaeger, Sinha B K, Rohr K P, et al. Phys. Rev., 2000, E61(3):3063
- 13 项志遴,俞昌旋. 高温等离子体诊断技术. 上海:上海科学技术出版社,1982. 60