

时空分辨软 x 射线谱诊断技术研究^{*}

杨家敏¹⁾ 丁耀南¹⁾ 郑志坚¹⁾ 王耀梅²⁾ 张文海²⁾ 张继彦²⁾
刘进元³⁾ 山 冰³⁾ 高盛琛³⁾ 任有来³⁾ 刘秀琴³⁾

¹⁾ 中国工程物理研究院高温高密度等离子体物理国家重点实验室 绵阳 621900

²⁾ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心 绵阳市 919-986 信箱 绵阳 621900

³⁾ 中国科学院西安光学精密机械研究所 西安 710068

(2002 年 8 月 15 日收到, 2002 年 10 月 14 日收到修改稿)

利用平焦场光栅谱仪、门控宽微带 x 射线分幅相机及可见光 CCD 设计了一套时空及高谱分辨 x 射线诊断系统, 利用该 x 射线诊断系统通过一系列的实验研究建立了同时具有时间、空间及高谱分辨 x 射线谱诊断技术, 该技术已经成功应用于辐射加热样品的吸收谱, 获得了较好的实验结果.

关键词: x 射线吸收谱, 诊断技术, 时空分辨

PACC: 4280F, 4272, 4285

1. 引 言

近年来, 随着惯性约束聚变(ICF)研究的发展, 热稠密物质的辐射不透明度研究成为各国同行十分关注的研究课题^[1-6]. 从 20 世纪 80 年代开始, 国外多家实验室采用点背光法进行了中低 Z 材料的 K 壳层和 L 壳层 x 射线吸收谱的实验研究工作, 这些实验谱基本采用晶体谱仪测量, 能区范围在千电子伏的高能区. 90 年代初, Springer 等人^[5]采用平场光栅谱仪测量了铁等离子体在软 x 射线能区的吸收谱, 给出了 Rosseland 平均辐射不透明度, 并与几种理论模型计算结果进行了比较, 对理论模型进行了校验. 在国内随着八路高功率激光装置“神光 II”的升级完成, 使得在国内开展辐射不透明度参数的实验研究成为可能. 在辐射不透明度这一重要基础课题的实验研究中, 由于辐射不透明度强烈依赖于物质状态, 而通过辐射加热物质达到的高温物质状态又是随时间很快变化, 同时高温物质状态本身又要通过自发辐射发射 x 射线, 因此, 要进行辐射不透明度的准确定量研究, 必须发展同时具有时间分辨、空间分辨和高能谱分辨的 x 射线测量这一关键诊断技术.

在 x 射线诊断技术中, x 射线谱测量主要采用光栅谱仪(包括透射光栅、反射光栅和平焦场光栅谱仪)、滤片 x 射线二极管阵列和晶体谱仪(包括平晶和弯晶谱仪). x 射线时间过程测量主要采用 x 射线条纹相机和 x 射线分幅相机; x 射线空间分辨主要采用 x 射线显微镜和 x 射线针孔相机等. 由于 x 射线诊断中记录面通常是二维的, 因此同时实现 x 射线测量的时间、空间及能谱分辨测量, 具有相当的困难. 国内外曾经采用针孔、透射光栅及 x 射线条纹相机组合发展了对特定能带的 x 射线进行时空诊断的技术, 但由于 x 射线条纹相机其线性动态范围一般都较小(20—30 倍), 因此难以适用于开展 x 射线的准确定量实验诊断. 近年来, 国外利用平场光栅谱仪配 x 射线门控分幅相机系统已经发展了时空能谱分辨的 x 射线诊断技术, 由于门控分幅相机其线性动态范围较大, 适宜开展 x 射线的准确定量测量. 我们为了进行辐射不透明度和辐射烧蚀等的实验研究, 采用反射式平焦场光栅、门控宽微带分幅相机发展了时空和高能谱分辨的 x 射线吸收谱定量诊断技术. 在国内首次建立了空间、时间和高能谱分辨的 x 射线谱诊断技术, 并应用于辐射加热样品的吸收谱实验测量, 获得了较好的实验结果.

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10175056)、国家高技术 863-804 专题资助的课题.

2. 时空高能谱分辨 α 射线谱仪系统及原理

时空高能谱分辨 α 射线谱仪系统结构如图 1 所示,主要由狭缝、平场光栅谱仪、门控分幅相机及耦合镜头配可见光 CCD 记录系统组成,其中宽度为 $20\mu\text{m}$ 的狭缝实现空间分辨、平焦场谱仪实现高谱分

辨,门控分幅相机实现时间分辨.平场光栅^[7]包括标称线数为每毫米 1200 线和每毫米 2400 线两种,谱仪系统通过选择不同的平场光栅元件并方便调整相应的入射角分别实现 5—30nm 和 1—5nm 波长范围的高谱分辨测量;门控分幅相机^[8]采用光阴极宽度为 12mm、长度为 40mm 的宽微带单分幅相机,由于微带宽度较大,采用四个高压选通脉冲耦合输入微带,以获得适当的增益.

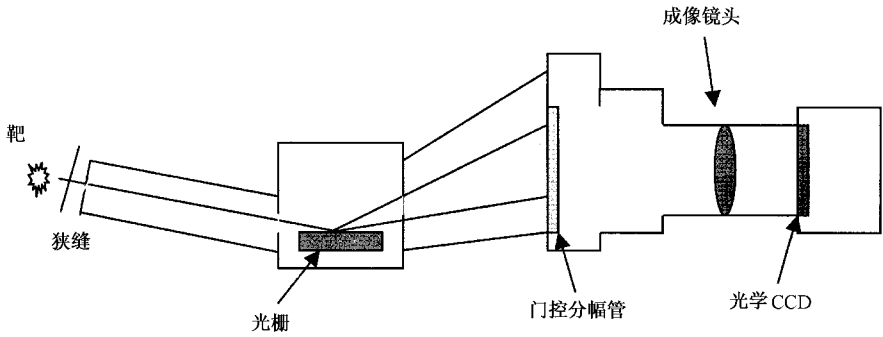


图 1 时空及高能谱分辨 α 射线谱仪结构示意图

3. 时空高能谱分辨 α 射线谱仪性能实验研究

时空高能谱分辨 α 射线谱仪主要由狭缝、平焦场光栅和 α 射线宽微带门控分幅相机构成. α 射线宽微带门控分幅相机经过实验检测,其时间分辨为 70ps.

利用带不同线对细刻线的分划板对 α 射线宽微带分幅相机的空间分辨进行检测,表明其空间分辨为每毫米 20 线对.

采用触发光触发快光电探头输出一路触发脉冲,并用分路器将该触发脉冲分成两路电信号,一路通过电缆输入示波器通道 A,另一路触发门控 MCP 的高压脉冲发生器,使其输出的高压门控脉冲加到 MCP 微带线,开通门控 MCP 记录 α 射线信号,从 MCP 微带线输出的高压脉冲经衰减后,同时输入示波器通道 A,匹配输入到示波器的两信号的电缆长度,使在示波器上同时观察到两路信号,实验中采用了 7.5 G 的示波器,其时间分辨为 50ps,典型的示波器记录信号如图 2 所示.反复实验测量两信号时间差的变化,根据时间差的多次测量平均值,得到宽带门控分幅相机的固有延迟为 28.38ns,根据时间差的多次测量平均值标准偏差,得到门控 MCP 的触发

晃动为 $\pm 80\text{ps}$.

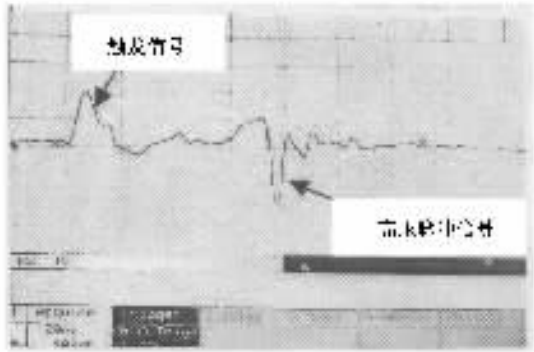


图 2 测量固有延迟和触发晃动示波器记录的典型信号

测量宽微带门控分幅相机线性动态范围实验布置及原理如图 3 所示.在金平面靶和门控 MCP 光阴极之间放置一带 C_8H_8 阶梯膜的透射光栅, C_8H_8 阶梯膜沿光栅狭缝长度方向上各台阶厚度分别为 $0.3\mu\text{m}$, $1.3\mu\text{m}$ 和 $2.3\mu\text{m}$,透射光栅距金平面靶约 200mm.激光辐照金平面靶产生的 α 射线经阶梯膜衰减和透射光栅衍射分光后,在 MCP 光阴极微带上沿微带宽度方向对应不同厚度滤膜衰减分三区成像,该三区 α 射线在微带长度方向通过透射光栅色散形成不同强度的 α 射线能谱分布.该三区 α 射线谱分布由门控 MCP 后的近贴可见光胶片(或可见光 CCD 记录系统)记录,通过对可见光胶片记录胶片

三区能谱的黑度扫描 ,得到三条能谱黑度曲线 .

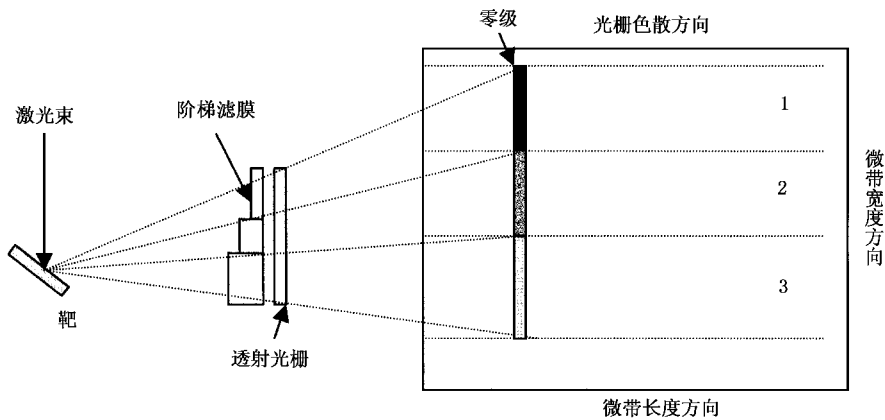


图 3 测量宽微带门控相机线性动态范围实验布置

由打靶实验获得的多发三区能谱黑度扫描曲线 ,通过数据处理得到对应不同黑度的入射到宽带 MCP 光阴极的 x 射线相对强度 .结果如图 4 所示 .由图 4 中黑密度与入射宽带门控 MCP 的 x 射线强度成对数线性关系的关系的 x 射线相对强度范围可以知道 ,门控宽微带 MCP 的线性动态范围大于 100 .

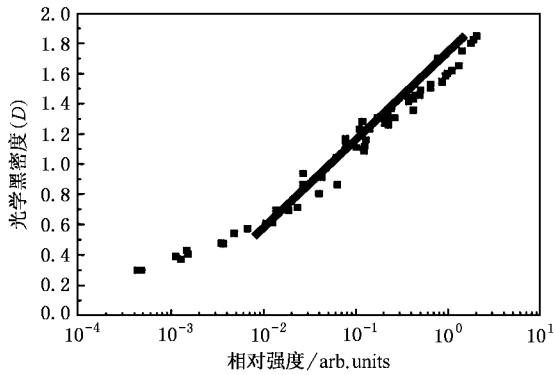


图 4 可见光胶片记录的黑密度与入射宽带门控 MCP 的 x 射线强度的关系曲线

在星光激光装置上 ,利用钨玻璃三倍频激光辐照铝盘靶产生的 x 射线作为源 ,利用时间分辨的平场光栅谱仪测量了铝等离子体的 x 射线发射谱 .在图像宽度方向取截面获得的曲线如图 5 所示 ,从图 5 中曲线经过处理得到 ,时空高能谱分辨 x 射线谱仪的空间不均匀性为 10% .

通过光学耦合镜头利用可见光 CCD 记录的谱图进行空间和光谱波长转换前 ,由于耦合镜头实际调焦过程中会改变设计的物距和像距而改变耦合镜头的放大倍数 ,需要标定光学耦合镜头的放大倍数 .首先 ,时空高能谱分辨 x 射线谱仪采用可见光胶片记

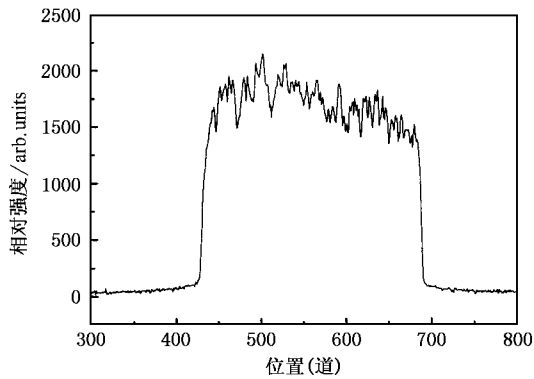


图 5 时空高能谱分辨 x 射线谱仪的空间均匀性(每道长度 0.024mm)

录通过打靶测量铝等离子体谱线 ,获得的任意两条谱线的位置差 Δx_1 ,然后采用可见光 CCD 记录同样测量铝等离子体谱线 ,获得上述两条谱线的位置差 Δx_2 ,即得到耦合镜头的放大倍数标定值 : $k = \Delta x_2 / \Delta x_1$.通过上述标定方法获得该系统耦合镜头的放大倍数为 0.4968 .

4. 时空分辨 x 射线谱诊断技术应用^[9-11]

应用建立的时空高能谱分辨 x 射线谱诊断技术 ,我们开展了相应的物理实验研究 .在星光激光装置上对辐射加热的 CHO 样品的吸收谱采用 2400 l/mm 的平场光栅谱仪进行了定量测量 .实验测量获得了有 CHO 样品时清晰的吸收谱图像 ,通过数据处理得到 CHO 样品的吸收谱结果 ,如图 6 所示 .通过与国

外其他工作^[12]给出吸收谱波长比较对图 6 中吸收谱线进行了辨识,结果见表 1,由表可见:实验测量吸收谱线波长与国外工作给出波长符合较好.假设辐射加热样品为两种温度和密度混合等离子体样品(30% $T=20\text{eV}$ 和 $\rho=0.0167\text{g}/\text{cm}^3$ + 70% $T=70\text{eV}$ 和 $\rho=0.006\text{g}/\text{cm}^3$)利用 UTA 理论计算程序^[6]计算了该样品的吸收谱理论结果,并与实验结果进行了比较,结果如图 7 所示.从图 7 中理论计算曲线与实验测量曲线的比较可见实验结果与理论计算结果在谱线波长和吸收谱线强度两方面总体符合较好,存在一些细致的差别,主要在于上述两种温度和密度还不能完全代表样品等离子体状态^[10].

表 1 实验测量碳和氧离子吸收线辨识与理论计算比较				
标记	离子	跃迁	实验波长/nm	其他实验 ^[12] 波长/nm
a	*	*	4.278	*
b	CIV	1s ² 2p—1s2p ²	4.188	4.152
c	CV	1s ² —1s2p	4.076	4.0731
d	CIV	1s ² 2p—1s2p3p	3.722	3.713
e	CV	1s ² —1s3p	3.520	3.4973
f	CVI	1s—2p	3.397	3.3736
g	*	*	3.137	*
h	CVI	1s—3p	2.862	2.8466
i	CVI	1s—4p	2.708	2.6990
j	*	*	2.216	*
k	OVI	1s ² —1s2p	2.169	2.1602
l	*	*	1.946	*
m	OIII	1s—2p	1.865	1.8627
n	OVI	1s ² —1s4p	1.782	1.7768

* 未辨识

5. 结 论

利用平焦场光栅谱仪、门控宽微带 x 射线分幅

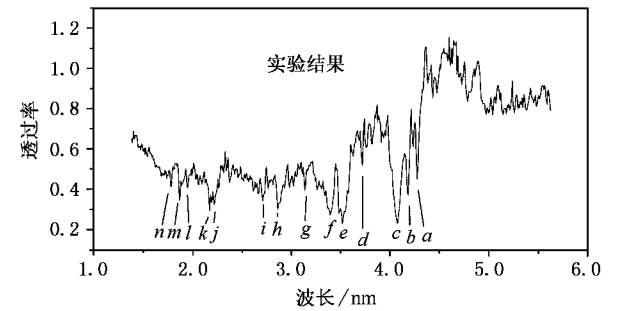


图 6 辐射加热 CHO 样品吸收谱实验结果

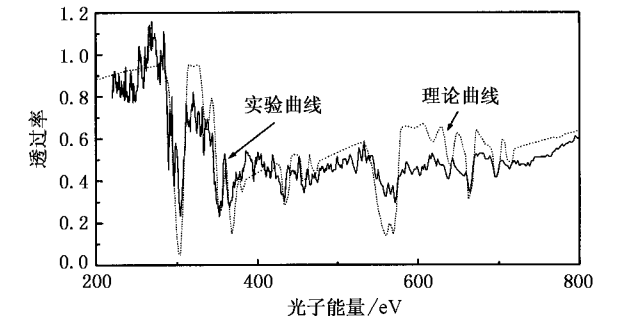


图 7 CHO 等离子体样品吸收谱实验结果与理论结果的比较

相机及可见光 CCD 记录系统建立了时空及高谱分辨 x 射线诊断系统.通过一系列的打靶实验对该系统的测谱性能、时间分辨、线性动态范围等进行了系统的实验研究,在国内首次建立了时空及高谱分辨 x 射线测量技术.该诊断技术时间分辨达到 70ps,空间分辨达到 25 μm ,能谱分辨达到 0.03—0.05nm.利用该诊断技术开展了辐射加热样品的吸收谱实验测量,实验结果表明该吸收谱诊断技术已成功应用于高温样品的吸收谱实验研究.该诊断技术的建立为开展准确的辐射不透明度实验研究奠定了良好的诊断技术基础.

在本项目研究中,“星光 II”和“神光 II”激光装置运行组给予了良好的配合,作者在此表示感谢.

[1] Davidson S J , Foster J M , Smith C C *et al* 1988 *Appl. Phys. Lett.* **52** 847

[2] Perry T S , Davidson S J , Serduke F J D *et al* 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 3784

[3] Foster J M 1988 *Rev. Sci. Instrum.* **59** 1849

[4] O'Neill D M , Lewis C L S , Neely D *et al* 1991 *Phys. Rev. A* **44** 2641

[5] Springer P T , Fields D J , Wilson B G *et al* 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 3735

[6] Yan J , Qu Y Z , Li J M 1999 *High Power Laser and Particle Beam*

11 65 (in Chinese] 颜 君、曲一至、李家用 1999 强激光与粒子束 11 65]

[7] Nakano N , Kuroda H , Kita T and Harada T 1984 *Applied Optics* **23** 386

[8] Denysenko A , Alexandrou S and Wang C C *et al* 1993 *Rev. Sci. Instrum.* **64** 3285

[9] Peng Y L , Han X Y , Li J M *et al* 2002 *Science in China* (Series A)

45 246

[10] Yang J M , Ding Y N , Yan J *et al* 2002 *Physics of Plasmas* **9** 678

[11] Yang J M , Ding Y N Zhang B H *et al* 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 550

[12] Seely J F , Feldman U *et al* 1994 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **51** 349

Diagnostic technology of time-and space-resolved soft-x-ray spectra *

Yang Jia-Min¹⁾ Ding Yao-Nan¹⁾ Zheng Zhi-Jian¹⁾ Wang Yao-Mei²⁾ Zhang Wen-Hai²⁾ Zhang Ji-Yan²⁾
Liu Jin-Yuan³⁾ San Bing³⁾ Gao Sheng-Chen³⁾ Ren You-Lai³⁾ Liu Xiu-Qin³⁾

¹⁾(National Key Laboratory of High temperature and Density Plasma Physics , Mianyang 621900 ,China)

²⁾(Research Centre of Laser Fusion , P. O. Box 919-986 , Mianyang 621900 ,China)

³⁾(Xi 'an Institute of Optics and Fine Mechanism , Xi 'an 710068 ,China)

(Received 15 August 2002 ; revised manuscript received 14 October 2002)

Abstract

Time- and space- resolved x-ray spectrum diagnostic system has been established by coupling flat-field grating and gated-MCP(micro-channel plate)with an optical CCD. A series of experimental investigations on the characterization of the diagnostic system have been carried out to develop quantitative measurement technology of x-ray absorption spectrum. This diagnostic technology has been successfully applied to the measurements of absorption.

Keywords : x-ray absorption spectrum , diagnostic technology , temporal and spatial resolution

PACC : 4280F , 4272 , 4285

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10175056) and National High-tech. Development Program of China (Grant No. 863-804).