

# 等电子法测量小能量激光打靶等离子体电子温度<sup>\*</sup>

杨家敏 丁耀南 陈 波 郑志坚 杨国洪 张保汉 王耀梅 张文海

(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)

(2001 年 7 月 25 日收到, 2002 年 5 月 22 日收到修改稿)

以低  $Z$  的 CHO 薄膜作为样品靶, 在星光激光装置上以小能量激光辐照样品靶产生温度较低的等离子体, 采用每毫米 2400 线的平焦场光栅谱仪测量等离子体发射的碳和氧离子发射谱线强度比, 并与理论计算相应线强比较, 获得了电子温度, 建立了等电子法测量较低温度(100eV 左右)等离子体电子温度的诊断技术.

关键词: 电子温度, 激光等离子体, 等电子 x 射线谱法

PACC: 5225, 5250J, 5270

## 1. 引 言

电子温度是等离子体的基本参数之一, 其诊断技术的发展对激光惯性约束核聚变、辐射不透明度及 x 射线激光等的研究都有非常重要的实际意义. 国内外对激光与等离子体相互作用中达千电子伏温度的晕区等离子体电子温度诊断方法开展了大量的研究工作, 已有一些较成熟的方法<sup>[1-7]</sup>, 其中采用等电子法测量电子温度对电子密度不敏感, 是一种比较好的方法<sup>[4-7]</sup>.

在辐射不透明度的实验研究中, 需要在测量样品的吸收谱的同时, 确定样品的温度及密度, 而现有实验条件下样品的温度基本在 100eV 及以下, 而且激光与等离子体相互作用中的电子热传导区的温度及密度梯度较大, 其中温度从几十电子伏至千电子伏. 因此深入研究电子热传导区, 迫切需要建立 100eV 左右等离子体电子温度诊断方法. 对 100eV 及以下的等离子体的温度诊断, 国外通常采用测量样品的吸收谱, 并与理论计算比较进行诊断<sup>[8,9]</sup>, 但上述诊断方法易受强辐射场的影响, 而且较强地依赖于电子密度, 国内对激光核聚变研究中 100eV 左右等离子体的电子温度测量尚处于起步阶段.

本文用两种低  $Z$  混合材料作为诊断元素, 采用等电子法探索了激光核聚变研究中 100eV 左右等离子体的电子温度诊断技术.

## 2. 实验布置

实验采用低  $Z$  的 CHO 膜作样品靶, 在星光装置上利用波长为  $0.35\mu\text{m}$  的激光辐照样品靶产生等离子体. 实验测量布置如图 1 所示, 在靶前向用每毫米 2400 线的平焦场光栅谱仪测量等离子体中的碳和氧离子发射谱线, 采用 5FW 软 x 射线胶片记录, 同时在靶前向采用针孔相机测量激光焦斑. 为了产生 100eV 左右低温的等离子体, 选择较小的打靶激光能量. 打靶激光参数如下:

激光能量: 4.4J; 激光焦斑:  $\sim \phi 200\mu\text{m}$ ; 激光脉宽:  $\sim 600\text{ps}$ .

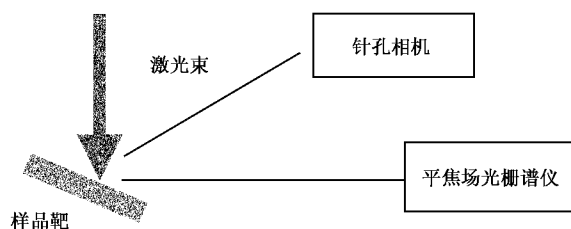


图 1 实验测量布置示意图

## 3. 实验结果

利用平焦场光栅谱仪测量得到的激光辐照样品

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划(批准号 804-3.4)资助的课题.

靶等离子体发射的谱线 x 射线胶片记录如图 2 所示,其中可见非常清晰的碳和氧离子的发射谱线.在黑密度计上对 x 射线记录胶片进行黑度扫描,获得谱线黑度与位置扫描曲线.利用 5FW 软 x 射线胶片

对 x 射线的响应特性<sup>[10]</sup>及平焦场光栅的光栅方程,编程计算处理谱线黑度与位置扫描曲线,得到 CHO 等离子体发射谱线结果如图 3 所示.从图 3 可以看到清晰的氧和碳离子 He- $\alpha$ , He- $\beta$  及 Ly- $\alpha$  谱线.

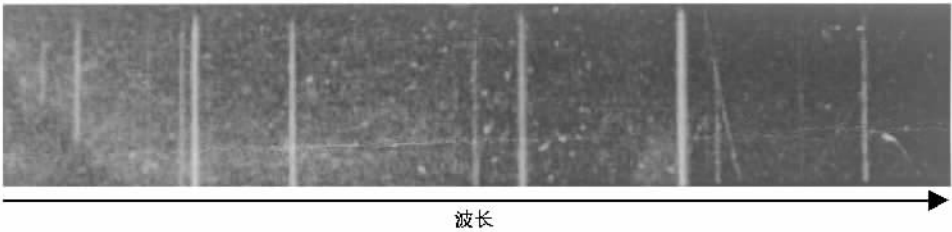


图 2 2400 线每毫米平焦场谱仪测量得到的 CHO 样品等离子体发射谱记录图

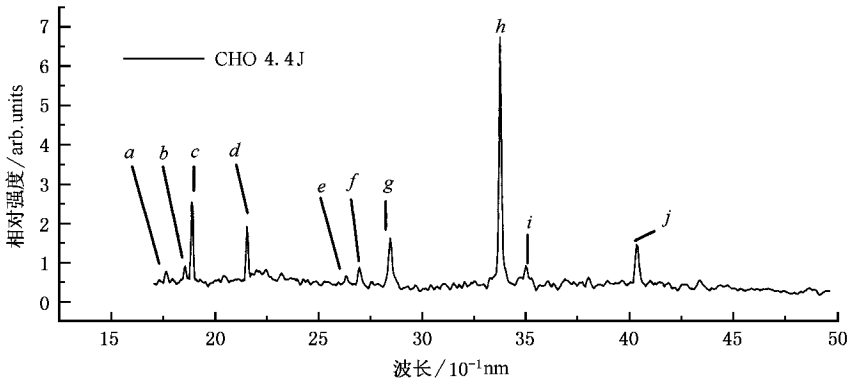


图 3 CHO 样品等离子体发射谱测量结果(氧离子发射谱为 :a :1s<sup>2</sup>—1s4p , b :1s<sup>2</sup>—1s3p , c :1s—2p , d :1s<sup>2</sup>—1s2p ,碳离子发射谱为 :e :1s—5p , f :1s—4p , g :1s—3p , h :1s—2p , i :1s<sup>2</sup>—1s3p , j :1s<sup>2</sup>—1s2p )

为了用等电子法从测量得到的碳和氧离子同种发射谱线强度比获得等离子体电子温度,需要建立电子温度与线强比的关系.设核电荷为  $Z_1$   $x$  度离化的离子从  $m$  能级自发辐射跃迁到  $n$  能级的谱线强度为  $I_r(m, n)$ ,核电荷为  $Z_2$   $s$  度离化的离子从  $p$  能级自发辐射跃迁到  $q$  能级的谱线强度为  $I_s(p, q)$ .在等离子体光学薄条件下,不考虑发射谱线的吸收修正,两条谱线的强度比为<sup>[6,7]</sup>

$$R = \frac{I_r(m, n)}{I_s(p, q)} = \frac{\lambda_s(p, q)A_r(m, n)N_r(m)}{\lambda_r(m, n)A_s(p, q)N_s(p)}$$

其中  $\lambda$  为跃迁波长,  $A$  为跃迁速率,  $N_r(m)$  和  $N_s(p)$  分别为  $m$  和  $p$  激发能级上的离子数.应用基于相对论多组态 Dirac-Fock 理论的计算程序 GRASP2( General-purpose Relativistic Atomic Structure Program 2, 1992 ),计算相关的跃迁波长、跃迁速率、能级结构及电离势等参数.假设在局域热动平衡( LTE )条件下,不同离子的离化分布用 Saha 方程求解,并根

据在 LTE 条件下离子能级分布遵循 Boltzmann 关系,可求得  $N_r(m)$  和  $N_s(p)$ .将上述参数代入线强比表达式,得到相应的线强比与电子温度的关系.

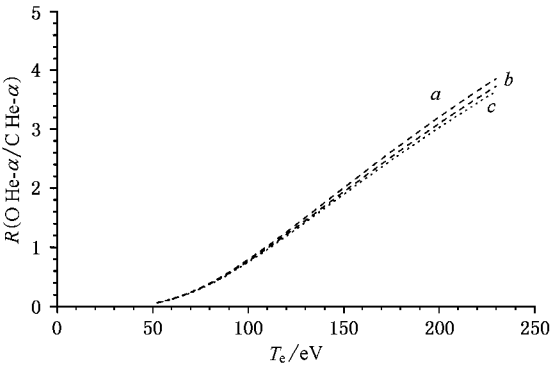


图 4 几种电子密度条件下氧和碳离子类氢  $\alpha$  线强度比与电子温度的关系 a 为  $N_e = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  ; b 为  $N_e = 5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  ; c 为  $N_e = 5 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$

计算了几种电子密度条件下氧和碳离子类氢  $\alpha$  线强度比与电子温度的关系 ,典型计算结果见图 4. 由图中可见 ,氧和碳离子类氢  $\alpha$  线强度比对等离子体电子密度变化极不敏感 ,而对等离子体电子温度变化非常敏感 ,因此非常适合利用等电子法诊断等离子体电子温度 .在实际测量中 ,线强比接近 1 时比较容易准确测量 ,因此从图 3 中可见 ,用碳和氧元素离子作示踪元素比较适合诊断 100eV 左右的等离子体电子温度 .

表 1 CHO 样品靶等离子体电子温度测量结果

谱线强度比	电子温度/eV
$R_1 = 1.18$	119
$R_2 = 0.700$	113
$R_3 = 0.480$	98

由图 3 中实验测量得到的碳和氧离子发射谱线测量结果 ,分别对各发射谱线进行积分得到各发射谱线相对强度 ,分别相除可得到相应的谱线强度比 ,结果见表 1. 其中 , $R_1$  表示 O He- $\alpha$  与 C He- $\alpha$  谱线强度比 , $R_2$  表示 O He- $\beta$  与 C He- $\beta$  谱线强度比 , $R_3$  表示 O Ly- $\alpha$  与 C Ly- $\alpha$  谱线强度比 .利用理论计算在电子密度为  $5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  时的相应线强比与电子温度关系 ,与实验线强比比较 ,得到电子温度 ,结果见

表 1. 可见采用不同的线强比获得的电子温度基本一致 ,最大相对偏差在 20% 以内 .因此 ,采用等电子法测量电子温度是比较可靠的 .

4. 结 论

以低  $Z$  的碳和氧元素作为示踪元素 ,采用每毫米 2400 线的平场光栅谱仪测量了碳和氧离子选定的发射谱线强度比 ,理论计算相应线强比并与实验结果比较 ,获得了温度较低的等离子体的电子温度 ,将国内外用于磁约束核聚变等离子体的电子温度诊断方法推广到激光聚变研究中 100eV 左右等离子体电子温度诊断 .结果表明 ,采用等电子法测量温度较低的等离子体电子温度对电子密度变化不敏感 ,是一种比较可靠的诊断方法 .

由于本工作采用软  $x$  射线胶片记录 ,测量的是时间积分的谱线信号 ,因此得到的是时间平均的电子温度 ;在理论计算方面 ,采用了 LTE 近似 .下一步将采用门控分幅相机记录平场光栅谱仪测量信号 ,可以获取时间分辨的电子温度测量结果 ;并进一步开展非局域热动平衡动态下的理论计算工作 .

作者对星光激光装置运行组和靶制备组的大力协作表示感谢 .

[ 1 ] Kauffman R 1991 *Handbook of Plasma Physics* , Vol. 3 :Physics of Laser Plasma , edited by A M Rubenchik and S Witkowski ( Elsevier , Amsterdam ) pp 111—162

[ 2 ] Abdallah J , Clark R E H *et al* 1993 *JQSRT* , **50** 91

[ 3 ] Dittrich T R , Hammel B A *et al* 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 2324

[ 4 ] Marjoribanks R S , Richardson M C *et al* 1992 *Phys. Rev. A* **46** R1747

[ 5 ] Shepard T D , Back C A *et al* 1996 *Phys. Rev. E* **53** 5291

[ 6 ] Chen B , Zheng Z J *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 711 ( in Chinese )

[ 陈 波、郑志坚等 2001 物理学报 **50** 711 ]

[ 7 ] Chen B 2000 *Postdoctoral Report* ( Chinese Academy of Engineering Physics [ in Chinese ] 陈 波 2000 博士后研究工作总结报告 ( 中国工程物理研究院 )

[ 8 ] Springer P T , Fields D J *et al* 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 3735

[ 9 ] Bar-Shalom A , Oreg J , Seely J F *et al* 1995 *Phys. Rev. E* **52** 6686

[ 10 ] Yang J M , Ding Y N , Zheng Z J *et al* 1997 *Acta Opt. Sin.* **17** 599 ( in Chinese ] 杨家敏、丁耀南、郑志坚等 1997 光学学报 **17** 599 ]

# Electron temperature measurement of low-energy laser produced plasma using iso-electronic x-ray spectroscopy<sup>\*</sup>

Yang Jia-Min Ding Yao-Nan Chen Bo Zheng Zhi-Jian Yang Guo-Hong

Zhang Bao-Han Wang Yao-Mei Zhang Wen-Hai

( *Research Centre of Laser Fusion , Chinese Academy of Engineering Physics , P. O. Box 919-986 , Mianyang 621900 , China* )

( Received 25 July 2001 ; revised manuscript received 22 May 2002 )

## Abstract

Low- $Z$  CHO targets were illuminated by a low-energy laser beam on Xingguang laser facility to produce relatively low-temperature plasma. The ratios of spectrum intensity of the carbon ions to the oxygen ions have been measured by a 2400 lines per millimeter grating spectrometer in order to obtain the electron temperature. The diagnostics on low electron temperature has been developed.

**Keywords** : electron temperature , laser-produced plasma , iso-electronic x-ray spectroscopy

**PACC** : 5255 , 5250J , 5270

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Development Program of China ( Grant No.804-3.4 ).