

文章编号 1004-924X(2014)07-1737-06

激光等离子体 X 射线特征谱轮廓诊断

王瑞荣*, 王 伟

(上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要:开展了利用 X 射线特征谱轮廓诊断激光等离子体状态参数的研究。在“神光 II”激光装置上,将 0.35 μm 频谱激光束聚焦于真空室内固体氯(Cl)元素靶上产生激光氯等离子体,利用高分辨 X 射线椭圆弯晶谱仪获取高能谱分辨激光氯等离子体辐射的 X 射线精细结构能谱。用类氢(1s-3p)和类氦(1s²-1s3p)氯离子能级跃迁光谱线的光强度比率计算了激光等离子体的电子温度;然后在假定光性为薄的情况下,利用 X 射线谱线 Lyman-线形轮廓的 Stark 效应所产生的谱线展宽测量了等离子体的电子密度。实验获得的激光等离子体日冕区内平均电子温度约为 450 eV,电子密度约为 $7.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 。文中还简单分析了能谱线的半高全宽度(FWHM)值以及诊断过程引入的诊断误差,初步预估诊断误差可控制在 25% 以内。该项工作为 X 射线特征谱轮廓法进一步应用于激光聚变靶丸压缩度精度测量等工作提供了参考。

关键词: X 射线能谱;谱线轮廓;激光等离子体诊断;电子密度;X 射线谱仪

中图分类号: O433.3; TL653 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142207.1737

X-ray line profile measurements in laser produced plasma

WANG Rui-rong*, WANG Wei

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

* Corresponding author, E-mail: wangrr59@citiz.net

Abstract: This paper explores the parameter measurement in laser produced plasma by X-ray line profile spectroscopy. The experiment was conducted on the SG-II laser facility. A 0.35 μm laser beam was focused on a solid chlorine (Cl) target in a vacuum chamber to produce a laser chlorine plasma and the high resolution X-ray elliptical bent crystal spectrograph was used to obtain the X-ray fine structure energy spectrum of the chlorine plasma radiation. The line integrated intensity ratio between H-like Cl (1s-3p) (Lyman-) and He-like Cl (1s²-1s3p) (He⁻) transitions was used for calculation of the electron temperature. By assuming optically thin, the Lyman-stark broadened profile was utilized to measure the electron density. Obtained experimental results show that the volume averaged electron temperature of Te is about 450 eV and the electron density of Ne is approximately $7.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. In addition, the line Full Width at Half Maximum (FWHM) was analyzed. The uncertainty in Ne due to uncertainties in the temperature and the assumed background level was also simply discussed and it is estimated to be within 25%. As a result, the experimental spectroscopic method may become a reference for diagnosing future higher-compression implosions.

Key words: X-ray spectra; spectral line shape; laser plasma diagnostics; electron density; X-ray spectrometer

收稿日期:2013-11-11;修订日期:2013-12-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11175167)

1 引言

惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)是通过高能量、短脉冲的强激光加热并且压缩核燃料使其达到高温和高密度,以在内爆运动惯性约束下实现热核点火和核燃料燃烧获取聚变能的方法^[1]。聚变时靶丸内形成的等离子体具有高温(几个 keV)、高密度(10^{24} cm^{-3})、小时间尺度(10^{-9} s)和强耦合($\Gamma = \frac{e^2 \times n_e^{1/3}}{k \times T_e} \approx 1$)特征。如何诊断这种极端条件下的等离子体状态,对靶物理和靶丸内爆动力学研究具有十分重要的意义,其结果若与大型辐射流体动力学的计算结果对比,还可以独立地校验辐射流体的力学程序。

由于激光等离子体的产生时间很短,且体积小,因此很难采用插入探针等常规方法^[2-4]测量电子密度与电子温度等参数。X 射线光谱学诊断为获得激光诱导等离子体参数提供了一种重要途径^[5-6]。与一般的激光光学成像及 Thomson 散射等光学探针方法相比,X 射线光谱学诊断方法可以探测更高密度区的等离子体状态参数;而且由于它采用等离子体自身发射的 X 射线作为诊断工具,可以避免对等离子体产生干扰。然而,要实现高精度的 X 射线光谱学诊断尚面临不少的困难和问题,主要表现为等离子体光源,特别是激光等离子体光源的状态不仅时间上具有瞬态性质,而且空间上具有不均匀性。目前,光谱强度测量是对一定时间段和空间范围的等离子体发射谱的累积结果,用它推断得到的等离子体状态参数实际上是真实等离子体状态在时间和空间上的一种平均。此外,等离子体对谱线的吸收效应以及精确原子参数等都是光谱学诊断研究中尚未解决的问题。因此,利用 X 射线特征谱轮廓诊断等离子体状态显得尤为重要和迫切。

本文在“神光 II”激光装置上建立了高能谱分辨光谱测量系统,对激光辐照氯元素产生的等离子体发射光谱进行了高分辨光谱强度测量,获取氯元素高度离化 K 壳层能级跃迁谱线的线形结构。利用谱线线形及光谱强度尝试诊断等离子体的电子密度和电子温度,并对诊断误差进行了初步分析。

2 实验测量原理

2.1 测量电子密度的基本原理

激光等离子体辐射能谱的斯塔克(Stark)加宽起因于辐射粒子受到周围离子和电子形成的微观电场的扰动,因此,斯塔克加宽的线形和线宽由作用于辐射粒子上的电场起伏的几率分布 $W(E)$ 所决定。在处于或接近于热平衡的等离子体中,对 $W(E)$ 的主要贡献来自距离辐射粒子半径为 $r = L_D$ 的德拜(Debye)球内的各个离子和电子,其中 Debye 长度 L_D 为:

$$L_D = \left[\frac{T_e \epsilon_0}{N_e (1 + Z_p T_e / T_i)} \right]^{1/2} = 7.43 \times 10^3 \left[\frac{T_e}{N_e} \right]^{1/2} \left[\frac{1}{1 + Z_p T_e / T_i} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中: T_e 为电子温度, T_i 为离子温度, Z_p 为离子电荷数, N_e 为电子密度。

如果忽略激光等离子体中相邻电荷间的相互作用,相关效应可由 Debye 球内粒子数参数 N_D 决定。此时,Debye 球中的粒子数为:

$$N_D = \frac{4}{3} \pi N_e \times L_D^3 = 1.72 \times 10^{12} \times \frac{(T_e)^{3/2}}{(N_e)^{1/2}}. \quad (2)$$

在准静态电场中,谱线 Stark 加宽半宽度为:

$$\Delta \lambda_{1/2} \cong \frac{3 \lambda_0^3 \epsilon_0 \eta}{m_e c Z_e} (n_1^2 - n_2^2) E, \quad (3)$$

式中: λ_0 为中心波长; Z_e 为发射粒子的核电荷数; n_1, n_2 分别为上下能级的主量子数; E 为平均电场。

对于 Holtsmark 分布^[7],有 $E \approx 3.4 \times E_0$,但由于存在屏蔽及带电粒子的影响,平均电场 E 可粗略地近似为:

$$E \cong 3.4 \times E_0 \times (1 - 0.7 \times N_D^{-1/3}), \quad (4)$$

式中: E_0 为 Holtsmark 标准场。

在电中性等离子体中:

$$E_0 = \frac{2.603 \times Z_p^{1/3} \times e N_e^{1/3}}{4 \pi \epsilon_0}. \quad (5)$$

将式(4)、式(5)联立代入式(3),可得到准静态 Stark 加宽所产生的谱线半宽度为:

$$\Delta \lambda_{1/2} \cong \left[\frac{3 \times 3.4 \times 2.603}{4 \pi} \right] (1 - 0.7 N_D^{-1/3}) \cdot \left[\frac{\lambda_0^3 \eta (n_1^2 - n_2^2)}{m_e c} \right] \left[\frac{Z_p^{1/3}}{Z_e} \right] N_e^{2/3} = 8.16 \times 10^{-19} \cdot (1 - 0.9 N_D^{-1/3}) \lambda_0^3 (n_1^2 - n_2^2) \left[\frac{Z_p^{1/3}}{Z_e} \right] N_e^{2/3}. \quad (6)$$

上述计算中忽略了等离子体电子对半宽度的贡献。但几乎所有线形的精细结构都取决于电子的贡献,只是有些半宽度值对电子的作用并不敏感。对于那些没有强谱线线形又无位移的类-氢谱线,如 Lyman- β , Lyman- γ , Balmer- β 及 Balmer- γ 等跃迁就是这种情况。根据式(6),利用这种谱线可以很好地估算电子密度。另外,在式(6)参数变量中,无需知道光子的绝对强度,只要知道谱线相对的线形和宽度就能确定光谱线线形。拟合线宽(或完整线形)与理论预估就可得到电子密度 N_e 。

2.2 电子温度诊断方法

在局部热力学平衡(Local Thermal Equilibrium, LTE)模型近似条件下,原子、离子束缚态布居数满足 Boltzmann 分布。若以某条谱线的光强度值作为基准,可以通过等离子体辐射其他谱线绝对或相对光谱强度之比来确定等离子体的电子温度。事实上,这种确定等离子体电子温度的方法在不少文献中有报道^[8-9],其中文献[7]的阐述较为详细。这里,利用 Cl^{+16} 谱线的(1s-3p)线同 Cl^{+15} 的(1s²-1s3p)谱线相对光强度之比测量电子温度。

文献[8]中给出了 $R_3 = \frac{I(1s-3p)}{I(1s^2-1s3p)}$ 谱线光强度比为:

$$R_3 = \frac{A_{13}^{\text{H}} \times (h\nu)^{\text{H}} \times n_3^{\text{H}}}{A_{13}^{\text{He}} \times (h\nu)^{\text{He}} \times n_3^{\text{He}}}, \quad (7)$$

式中:角标 H 和 He 分别为高度离化等离子体状态下类氢,类氦离子的跃迁谱线;脚标 1,3 分别表示跃迁的下能态和上能态; n_3 为上能级态粒子数; A 为辐射几率。

文献[7]中还给出了 R_3-T_e 曲线。如果能通过实验方法测得(1s-3p)与(1s²-1s3p)能级跃迁光谱线的光谱强度比,参照文献[7]作曲线,可得到等离子体的电子温度(T_e)。

3 实验方法

在“神光 II”激光装置上,利用第 9 路激光作为激励源。实验时,用第 9 路激光束经聚焦后斜入射聚氯乙烯($[\text{CH}_2-\text{CHCl}]_n$, 简称 PVC)平面靶,从而产生高温等离子体辐射光源。入射光束光轴与靶面法向成 45° 夹角,三倍频(0.35 μm),

激光能量约为 950 J,波形为梯形方波,脉冲宽度约为 1 ns。采用列阵透镜聚焦,激光光束聚焦光斑约为 450 $\mu\text{m} \times 450 \mu\text{m}$,激光功率密度为 $4.69 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ (如考虑损耗,实际功率密度还要小些)。用一台 X 射线针孔相机监测光斑大小,针孔直径为 10 μm ,放大倍数为 10,空间分辨率接近 10 μm 。在激光束后向的靶面法线方向,诊断激光辐照氯靶向外喷射的等离子体区域辐射的 X 射线特征,用高分辨椭圆弯晶谱仪观测等离子体辐射的 X 射线能谱。本文重点观测等离子体辐射 X 射线光谱在 2.5~3.5 keV 能谱段的光强度分布,以及光谱线的线形结构。实验中,所用的分光晶体事先在 X 射线衍射仪上进行了仔细挑选。椭圆弯晶两焦点间的距离为 600 mm,其衍射中心波长位置到探测器距离为 60 mm (理论设计值)。针对测量的中心波段、晶体的积分衍射系数和峰值反射效率,以及同一发次所需要的诊断光谱区域等,选定晶格常数(2d)为 6.67×10^{10} 的石英为分光晶体材料,布拉格衍射角为 $26^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 。探测器为 IP(Imaging Plate)记录,其空间分辨能力为 25 μm 。靶放在椭圆的一个既定焦点上,并在另一焦点放上 1 μm (Ag)+5 μm (CH)+5 μm (Ti)组成的混合箔膜。其目的是滤除杂散光及探测器中分光晶体荧光的绝大份额,减少图像本底,提高图像的信噪比。同时,希望观测到吸收边。测量系统如图 1 所示。

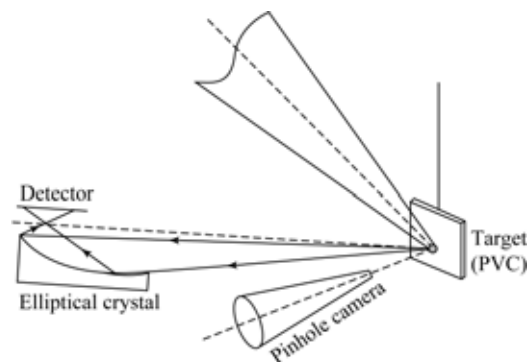


图 1 等离子体 X 射线能谱测量系统示意图

Fig. 1 Framework of measuring system for X-ray line profile of plasmas

另外,需要对实验谱图进行解谱。大多数情况下,晶体谱仪谱线定标采用曲线拟合法,即将已知部分波长光强线作为特征线。参照惯例,本文

利用高度离化的类氢、类氦-Cl 离子共振强跃迁线作为定标基准,建立波长刻度值,并对 X 射线能谱曲线进行波长定标,进而标识、分类。同时,为了提高波长标定精度,采用解析法或最小二乘法将波长拟合成谱线位置的多项式函数,并对能谱线波长定标误差进行修正^[9-10]。

4 实验结果

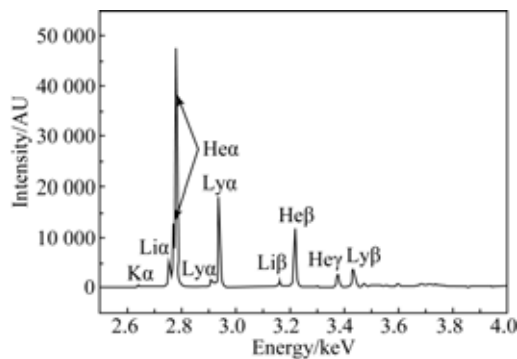
4.1 X 射线能谱图

用椭圆弯晶谱仪配探测器(IP)记录得到的 X 射线原始能谱图,如图 2(a)所示,其中水平方向为晶体色散方向,垂直方向为空间方向。为了得到激光作用 Cl 元素产生等离子体时辐射的高剥离态离子跃迁的细致结构谱图,将图 2(a)中沿着空间方向取 150 个像数点积分后取平均,得到了激光 Cl 等离子体 X 射线能谱的原始谱曲线图,并对原始谱曲线图进行了解谱(包括谱线波长值标定、波长误差修正、组态归类等)。图 2(b)为解谱、标识后 Cl 元素高剥离态离子的 X 射线能谱图。



(a) IP 记录原始能谱图

(a) X-ray emission recorded by IP



(b) 氯(Cl)元素高剥离态离子的 X 射线能谱图

(b) Spectral distribution of a laser-produced chlorine plasma

图 2 氯(Cl)激光等离子体的 X 射线能谱

Fig. 2 X-ray emission from a laser-produced chlorine plasma

4.2 谱型加宽机制分析

X 射线光谱谱线的加宽机制是十分复杂的。实验测得的谱线具有一定的线形轮廓,它由各种加宽机制结果叠加而成。为了理清实验所得谱线的加宽因素,很有必要先对激光等离子体辐射的 X 射线谱线加宽机理做简略分析。一般来说,除碰撞加宽(其中包括斯塔克加宽、范德瓦斯卡加宽)外,谱线加宽机制还有仪器加宽(主要指晶体加宽、光源空间尺寸引起的加宽)、自然加宽、多普勒加宽等。

4.2.1 谱线仪器加宽

X 光晶体谱仪所测得的谱线线形并非真正线形,谱仪中分光晶体及等离子体辐射光源的有限尺寸均会使线形加宽。

4.2.1.1 分光晶体加宽

由于衍射晶体的不完善性及其消光效应,晶体对任意入射光线波长的衍射并不仅仅在波长的准确 Bragg 衍射角下才能产生,在 Bragg 衍射角附近的一个小角度范围 $\Delta\theta$ 也能发生衍射,这就形成了晶体衍射强度分布曲线^[11]。对于一束不偏振入射的 X 射线,晶体衍射曲线的半宽度 W_c 为:

$$W_c = \frac{N_c \lambda^2 |F|}{\pi \sin 2\theta} \left(\frac{e^2}{m^2} \right) \left[\frac{1 + |\cos 2\theta|}{2} \right], \quad (8)$$

式中: N_c 为每 cm^{-3} 的晶胞数, λ 为入射 X 射线波长, θ 为 Bragg 衍射角, $|F|$ 为结构因子。

显然,晶体衍射曲线宽度会进一步加宽谱线。为此,在实验结果数据处理过程中,需要测定 W_c 值,并通过 Bragg 公式把 W_c 的量纲换成为 10^{10} 。

4.2.1.2 光源有限尺寸引起加宽

等离子体辐射光源的有限尺寸对谱线加宽是有贡献的。根据发光源直径 φ 及离开谱仪记录介质的距离 S ,可以确定:

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi}{S}, \quad (9)$$

其中: $\Delta\varphi$ 为介质张解。由 $\Delta\varphi$ 可以确定源加宽 W_s 。由于椭圆弯晶的工作距离一般是比较长的,因此光源对探测器张角是很小的^[12]。

事实上,光源加宽强度分布近似于高斯分布。假定晶体衍射曲线为高斯型,则总的仪器加宽 $\Delta\lambda_{\text{instr}/2}$ 为:

$$\Delta\lambda_{\text{instr}/2} = (W_c^2 + W_s^2)^{1/2}, \quad (10)$$

其中: $\Delta\lambda_{\text{instr}/2}$ 为仪器加宽强度分布的半宽度。

4.2.2 其他类型加宽机制对谱线的影响

4.2.2.1 自然加宽

谱线自然宽度由原子固有性质所决定:

$$\Delta E = \frac{4\pi e^2 E^2}{3mc^3 \eta}. \quad (11)$$

与其他加宽机制相比较,自然加宽的影响是很小的,在数据处理中可予以忽略。

4.2.2.2 多普勒加宽

在等离子体中,由于辐射粒子的随机运动造成了谱线的多普勒加宽。假定等离子体中粒子运动是纯热运动,则其速度分布应遵循麦克斯韦(Maxwell)分布。由此可推出多普勒加宽谱线的半宽度为:

$$\Delta\lambda_{D1/2} = 2\sqrt{\ln 2} \times \sqrt{\frac{2kT_e \lambda_0^2}{M_R c^2}} = 7.16 \times 10^{-7} \lambda_0 \times \sqrt{\frac{T_R}{M_R}}, \quad (12)$$

式中: λ_0 为波长, T_R 为粒子温度, M_R 为辐射粒子原子量。

根据文中提到的激光参数,并假定激光等离子体处于热平衡状态,利用式(12)可估算出多普勒谱线加宽。与 Stark 加宽比较,多普勒加宽是很小的。另外,还细致估算了范德瓦尔斯加宽影响,估量结果相对 Stark 加宽也是很小的。

4.3 谱线真实宽度的确定

基于 4.2 节的分析结果,在确定谱线的 Stark 加宽时,只需考虑仪器的加宽影响。确切地说,在数据处理过程中,仅要考虑仪器加宽对谱线半宽度的影响,其他加宽机制的影响可予以忽略。

假定从介质上测得的谱线半宽度为 $\Delta\lambda_{mes1/2}$, 仪器加宽为 $\Delta\lambda_{instr1/2}$, 并认为谱线线形为 Holtmark 分布。在这种情况下,谱线中的 Stark 加宽 $\Delta\lambda_{\frac{1}{2}}$ 为:

$$\Delta\lambda_{\frac{1}{2}} = [\Delta\lambda_{mes1/2} \times (\Delta\lambda_{mes1/2} - \Delta\lambda_{instr1/2})]^{1/2}. \quad (13)$$

4.4 等离子体状态参数

图 2 为椭圆弯晶谱仪配 IP 记录测得的 X 射线谱图。把实测类氢(1s-3p)与类氦(1s²-1s3p)Cl 离子能级跃迁光谱线的相对光强度之比代入式(7),确定等离子体的电子温度关系式。利用(1s-3p)与(1s²-1s3p)能级态跃迁光谱线的相对光强度比率,采用文献[7]作曲线的方法,得到了电子温度约为 450 eV。

另一方面,在激光等离子体中,原子(离子)光谱的展宽为邻近带电粒子的场对发光原子(离子)

作用的结果,因此谱线展宽是电子密度函数。在线性 Stark 展宽的情况下,氢原子(或类氢离子)的谱线展宽是很大的。但在 Lyman 系(1s-*n*p)谱线中, Stark 线型轮廓有两种类型。其中 *n* 为偶数时,谱线可看作有线心但又无位移的组分,仅仅可看作由电子加宽的尖峰重叠在由离子加宽形成的宽阔基底上,如 Lyman- α (1s-2p); *n* 为奇数时,存在没有强谱线线心又无位移的 Stark 组分,并且中心呈凹陷现象,如 Lyman- β (1s-3p)。

由于电子碰撞加宽的精确理论计算是十分困难的,因此在谱线 Stark 加宽诊断等离子体密度的实验研究中,一般选取对电子碰撞不敏感的组分,由准静态离子场起主要作用谱线。本文选取 Cl⁺¹⁶ 的 Lyman- β 线为诊断电子密度谱线。从图 2 中计算出 Lyman- β 的 $\Delta\lambda_{mes1/2}$, 并将其值代入式(13)中,得到了 $\Delta\lambda_{\frac{1}{2}}$ 测量值。接着,利用式(6)得到激光 Cl 等离子体冕区内的体均电子密度(N_e)约为 $7.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 。

5 误差分析

尽管利用光谱线的轮廓测量可获得等离子体的状态参量,且只需测量同一波长附近光强度的相对值,仪器校正也很简单,但是激光等离子体寿命很短,它们的辐射强度与时间有关。因此,测量等离子体在不同时刻的电子温度应利用不同的辐射谱。另外,在利用一个原子或离子的两条谱线的相对强度来确定等离子体的温度时需要知道辐射几率,理论计算出的跃迁几率值往往存在很大的不确定度,因而得到的电子温度可能有较大的误差。粗略预估可知,由计算原子参数不确定性引入的诊断误差不超过 23%;而 keV 能谱区 X 射线主要由光学厚度薄的高温冕区发射,光性厚度效应误差小于 5%,且小于谱线输运、数据处理导致的诊断误差。初步估计实验诊断误差应在 25% 以内。

由于真实的 X 射线光谱谱线的加宽机制是十分复杂的,尤其是在高温等离子体中,多普勒效应有可能成为谱线展宽不可忽略的因素。另外,位于辐射粒子周围处于基态的同种离子会对辐射产生强烈的自吸收,这将导致在发射谱线峰值附近的自吸收更严重。在两翼自吸收较小,从而引起谱线的峰值降低,半宽度也增大。所以,利用测量的 Lyman- β 谱线计算的 Stark 加宽实际上要小于真实

的 Stark 宽度值。因而目前文中给出的电子密度实验测量结果仅供参考,但它仍可作为进一步推广 X 射线特征谱线形轮廓法应用到如激光聚变靶丸压缩度精度测量中的依据。

6 结 论

本文在“神光-II”激光装置上,利用超高精密分辨椭圆弯晶谱仪获得了高信噪比的激光 Cl 等离子体辐射跃迁 X 射线精细结构谱图,并用 X 射线特征谱轮廓法诊断等离子体状态参数。实验得到电子密度约为 $7.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, 电子温度约为 450 eV, 诊断误差控制在 25% 以内。此外,重点研究了

如何选择 Lyman 系谱线作为诊断等离子体状态参数的最佳谱线,并验证了 X 射线谱线形轮廓法用于等离子体状态诊断的可行性。

本研究在确定谱线半宽度时,忽略了除仪器加宽以外的其他加宽机制引入的影响,因此得出的 Stark 加宽半宽度 $\Delta\lambda_{1/2}$ 是比较粗糙的,导致电子密度 (N_e) 势必会有相当大的误差。为了提高诊断精度,首先必须对谱线的电子加宽和离子线形作适当的卷积,计算整个线形,求得总的线宽。其次,要达到更高的精度(如高于 15%),还必须把实验测得的整个线形与理论预估进行拟合。但这些方面的计算工作目前尚有一定的困难,日后有条件,当需进行更为深入的研究。

参考文献:

- [1] KEY M H, CABLE M D, COWAN T E, *et al.*. Hot electron production and heating by hot electrons in fast ignition research [J]. *Phys. Plasmas*, 1998, 5 (5): 1966-1972.
- [2] FILEVICH J, ROCCA J J, JANKOWSKA E, *et al.*. Two-dimensional effects in laser-created plasmas measured with soft-x-ray laser interferometry [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, 67: 056409-1-6.
- [3] DASILA L B, BARBEE T W, CAUBLE Jr R, *et al.*. Electron density measurements of high density plasmas using soft-x-ray laser interferometry [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 74(20): 3991-3994.
- [4] 郑无敌, 张国平, 王琛, 等. 用 X 射线激光 M-Z 干涉仪诊断点聚焦 CH 等离子体电子密度[J]. *物理学报*, 2007, 56 (7): 3984-3989.
ZHENG W D, ZHANG G P, WANG CH, *et al.*. Diagnosis of electron density in spot-focused CH plasma with x-ray laser M-Z interferometer [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2007, 56(7): 3984-3989. (in Chinese)
- [5] HARILAL S S, BINDHU C V, ISSAC R C, *et al.*. Electron density and temperature measurements in a laser produced carbon plasma [J]. *J. Appl. Phys. B*, 1997, 82(2): 2140-2146.
- [6] HANS R G. Stark broadening of isolated spectral lines from heavy elements in a plasma [J]. *Phys. Rev.*, 1962, 128(2): 515-523.
- [7] YAAKOBI B, STEEL D, THORSOS E, *et al.*. Explosive-pusher-type laser comprison experiments with non-filled microballoons [J]. *Phys. Rev. A*, 1979, 19(3): 1247-1262.
- [8] HARILAL S S, BINDHU C V, ISSAC R C, *et al.*. Electron density and temperature measurements in a laser produced carbon plasma [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, 82: 2140.
- [9] 王瑞荣, 陈伟民. 椭圆型晶体谱仪谱测量的解谱[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 274-279.
WANG R R, CHEN W M. Unfolded study on spectra by elliptical crystal spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 274-279. (in Chinese)
- [10] 王瑞荣, 熊俊, 王伟, 等. 高度离化的钼离子细致结构能谱测量[J]. *物理学报*, 2012, 61(24): 242901-1-6.
WANG R R, XIONG J, WANG W, *et al.*. Measurement of fine structure spectra in high-stripped states laser-produced Mo plasma [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, 61(24): 242901-1-6. (in Chinese)
- [11] 孙景文. 高温等离子体 X 射线谱学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
SUN J W. *High-temperature Plasma X-ray Spectroscopy* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [12] 王瑞荣, 陈伟民, 王伟. 椭圆弯晶谱仪波长分辨能力的改进[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6): 1303-1308.
WANG R R, CHEN W M, WANG W. Improvement of spectral resolution power for an elliptically curved crystal spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1303-1308. (in Chinese)

作者简介:



王瑞荣(1964—),男,江西吉安人,博士,副研究员,1999年于核工业西南物理研究院获得硕士学位,2009年于重庆大学获得博士学位,主要从事高能 X 射线诊断及诊断技术方面的研究。
E-mail: wangrr59@citiz.net



王伟(1975—),男,河南开封人,博士,研究员,1995年于复旦大学获得学士学位,2001年于中国工程物理研究院获得硕士学位,2006年于复旦大学获得博士学位,主要从事激光等离子体物理的研究。
E-mail: wei_wang@fudan.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)