

EAST 上电荷交换复合光谱诊断波长标定研究

尹相辉^{1,2} 李颖颖^{2*} 符佳² 江堤^{2,3} 冯双园^{1,2} 钟刘军⁴ 吕波^{2,5} 叶民友¹ 万宝年²

¹中国科学技术大学核科学技术学院, 安徽 合肥 230026

²中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031

³安徽大学物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230601

⁴中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

⁵中国科学院合肥大科学中心, 安徽 合肥 230031

摘要 电荷交换复合光谱诊断(CXRS)是在核聚变装置上测量离子温度和旋转速度分布的常规诊断方式之一。通过测量等离子体中完全电离的碳离子(C^{6+})与高能中性氘之间发生电荷交换辐射出的碳谱线(C VI, 529.059 nm, $n=8\rightarrow7$)的多普勒频移来计算 C^{6+} 的速度,而准确测量的前提是波长的精确标定。介绍了东方超环托卡马克装置(EAST)上 CXRS 系统的离线波长标定和实时波长标定方法,详细分析了二者的优缺点,针对 EAST 等离子体及 CXRS 诊断现状提出了一套应用激光(波长为 532.1 nm)作为波长实时标定光源的方案,同时对该方法的有效性进行了仿真分析及实验验证。结果表明使用该方案和利用常用标准灯得到的标定结果一致。

关键词 光谱学; 光谱诊断; 波长标定; 标准灯; 激光; 光谱仪

中图分类号 O433.1; TL65.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0630002

Wavelength Calibration of Charge Exchange Recombination Spectroscopic Diagnostic System on EAST

Yin Xianghui^{1,2} Li Yingying² Fu Jia² Jiang Di^{2,3} Feng Shuangyuan^{1,2}

Zhong LiuJun⁴ Lü Bo^{2,5} Ye Minyou¹ Wan Baonian²

¹ School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

² Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

³ School of Physics and Materials Science, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China

⁴ Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

⁵ Hefei Science Center, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Charge exchange recombination spectroscopic (CXRS) diagnosis is a routine diagnostic method for the measurement of the temperature and the rotation velocity distribution of ions on nuclear fusion devices. The completely ionized carbon ion C^{6+} in plasma exchanges charge with high power neutral deuterium and radiates the carbon line (C VI, 529.059 nm, $n=8\rightarrow7$). By measuring the Doppler shift of C VI, the velocity of C^{6+} can be calculated. Precise wavelength calibration is a precondition for the accurate measurement of the velocity. The off-line and on-line wavelength calibration methods for the CXRS system on EAST (experimental advanced superconducting

收稿日期: 2015-12-28; **收到修改稿日期:** 2016-02-02

基金项目: 中日韩 A3 前瞻计划项目(11261140328)、国家自然科学基金(11405212)、国家磁约束核聚变发展研究专项(2013GB112004, 2015GB103001)、合肥物质科学技术中心方向项目培育基金(2014FXCX003)

作者简介: 尹相辉(1990—),男,博士研究生,主要从事光谱诊断等方面的研究。E-mail: yinxh@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 万宝年(1962—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事等离子体物理诊断及实验等方面的研究。

E-mail: bnwan@ipp.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: liyy@ipp.ac.cn

tokamak) device are introduced. The advantages and disadvantages of both methods are discussed in detail. Considering the special condition of the EAST plasma and the current situation of the CXRS diagnosis, an on-line calibration method using laser (wavelength 532.1 nm) is proposed. Simulations and experiments are performed for the calibration method and the results are consistent with those obtained via the commonly used calibration lamp.

Key words spectroscopy; spectroscopic diagnosis; wavelength calibration; calibration lamp; laser; spectrometer

OCIS codes 300.6190; 280.5395; 350.5400; 120.6200

1 引 言

自 1977 年 Isler^[1] 在 Oak Ridge 托卡马克上观察到完全剥离的杂质离子与氢中性束发生电荷交换辐射出的谱线后,电荷交换复合光谱诊断(CXRS)逐步发展成为核聚变装置上测量离子温度和旋转速度的常规诊断方式之一^[2-8]。2014 年,在东方超环超导托卡马克(EAST)上基于中性束注入系统(NBI)的 CXRS 诊断^[6-7]投入实验。EAST CXRS 系统通过测量等离子体中完全电离的碳离子(C^{6+})与高能中性氘发生电荷交换辐射出的碳谱线(C VI, 529.059 nm, $n=8 \rightarrow 7$)的多普勒频移量来计算等离子体中碳杂质的速度。而测量该多普勒频移量首先需要确定测量谱线的实际波长,即进行波长标定工作。

波长标定是利用已知波长的谱线对光谱仪系统进行标定,从而得到 CCD 像元序数与波长的对应关系。波长标定首先需要找到稳定且波长已知的光源。稀有气体元素灯(也称为标准灯)由于其波长的稳定性,是光谱仪系统波长标定^[5-6,9-12]的常用光源。此外,激光由于其良好的单色性和波长稳定性也是波长标定光源的良好选择。本文将详细分析适用于 EAST CXRS 诊断系统的波长标定方法。

2 反射式光谱仪系统

EAST CXRS 诊断装置主要由前置收光系统、导光光纤和光谱仪系统构成,如图 1 所示。收光系统置于 EAST 装置水平 D 窗口,通过反射镜和透镜组将 NBI 束线与视线相交处的光收集到集成光纤束(芯径为 0.4 mm,数值孔径为 0.22)中,最终传输到位于光谱房内的反射式光谱仪系统^[6-7]。

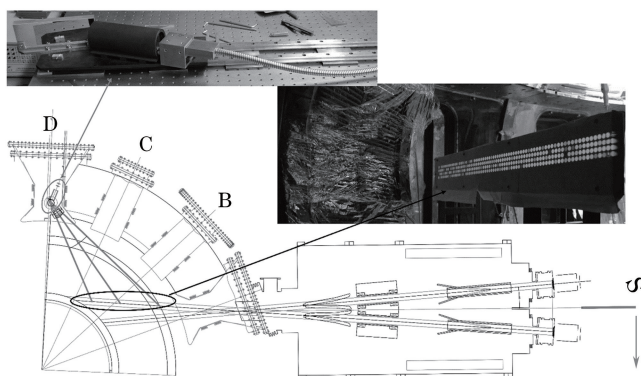


图 1 EAST CXRS 诊断系统布局

Fig. 1 Layout of CXRS system on EAST

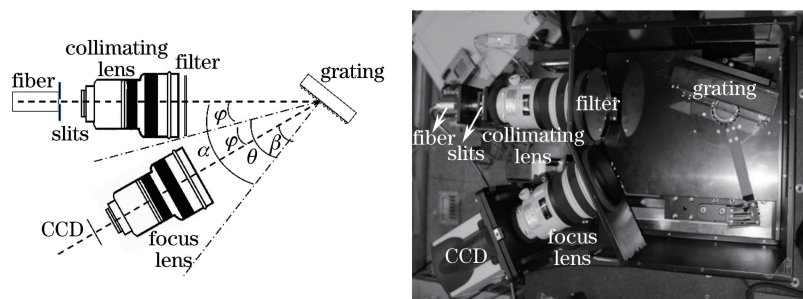


图 2 反射式光谱仪结构示意图与实物图

Fig. 2 Schematic and photograph of the reflective spectrometer

典型的光谱仪是将由复合光照明的狭缝经分光系统变成若干个单色狭缝像即谱线的设备。如图 2 所示, EAST 上环向 CXRS 系统使用基于透镜成像的反射式光谱仪^[11], 与典型的 Czerny-Turner 光谱仪相比, 在保证高通光量的同时可以实现共点成像和高光谱分辨率。标准光栅方程为^[9]

$$k\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta) = d[\sin(\theta + \varphi) + \sin(\theta - \varphi)], \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

式中 $d = 1/2160 \text{ mm}$ 为光栅常量, α 为入射角, β 为光栅衍射角, φ 为准直/聚焦镜头间包含角 (30°) 的一半, $\theta = \beta + \varphi = \alpha - \varphi$ 为光栅角 (对于 EAST CXRS 光谱仪系统 $25^\circ < \theta < 55^\circ$), k 为衍射级数 ($k = 1$), λ 为出射光谱波长。由 (1) 式可知光谱波长随着光栅角 θ 变大而变大, 通过转动光栅可以改变成像到 CCD 上的波长。代入光谱仪的具体参数, 可得成像到 CCD 上的波长为^[9]

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{vac}}}{n} = \frac{d}{k} \cos \gamma \left[2 \cos \varphi \sin \theta + \frac{x_1}{f_1} \cos(\theta + \varphi) + \frac{x_2}{f_2} \cos(\theta - \varphi) - \frac{x_1^2}{2f_1^2} \sin(\theta + \varphi) - \frac{x_2^2}{2f_2^2} \sin(\theta - \varphi) \dots \right], \quad (2)$$

式中 λ_{vac} 为真空波长, n 为大气折射率, f_1 和 f_2 分别为准直镜和聚焦镜的焦距, 均为 200 mm 。 γ 为入射光线与主光轴的夹角, $\tan \gamma = y_1/f_1 = y_2/f_2$ 。 x_1, y_1 分别为光线在狭缝位置处与主光轴间的水平、垂直距离; x_2, y_2 分别为光线在 CCD 成像面上位置即谱线中心处与主光轴间的水平、垂直距离。

对波长求导, 得到倒色散率 D (单位为 nm/pixel) 与波长的关系为

$$D(\lambda) = \frac{d\lambda}{d\rho} = \frac{d\lambda}{dx_2} \frac{dx_2}{d\rho} = \frac{dx_2}{d\rho} \frac{nd}{kf_2} \cos \gamma \left[\cos(\theta - \varphi) - \frac{x_2}{f_2} \sin(\theta - \varphi) + \dots \right], \quad (3)$$

式中 $dx_2/d\rho$ 为 CCD 像元尺寸。当中心波长为 529 nm , $\theta = 35.804^\circ$ 时, 在标准状态下 ($n = 1.00027$), 主光轴附近 ($x_2 = 0, y_2 = 0$, 即 $\gamma = 0$) 的倒色散率为 $0.034622 \text{ nm/pixel}$ 。

3 基于标准灯的离线波长标定

标准灯是良好的波长标定光源, 将标准灯放置在光谱仪入射光纤前端, 经过光谱仪系统后其谱线成像在 CCD 上。谱线中心可用重心法^[13]或谱线拟合^[14]的方法求解, 本文采用谱线拟合的方法。谱线线型服从高斯分布, 应用高斯函数对其进行拟合可以得到中心波长对应的 CCD 像素值。若观测波段固定, 则 (2) 式中各角度均为常量, 且在窄波长内 x_2 的二阶项可忽略, 则 λ_{vac} 可写为

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{vac}} &= \frac{dn}{k} \cos \gamma \left(2 \cos \varphi \sin \theta + \frac{x_1}{f_1} \cos \alpha + \frac{x_2}{f_2} \cos \beta - \frac{x_1^2}{2f_1^2} \sin \alpha - \frac{x_2^2}{2f_2^2} \sin \beta + \dots \right) = \\ &= \frac{dn}{k} \cos \gamma \left(2 \cos \varphi \sin \theta + \frac{x_1}{f_1} \cos \alpha - \frac{x_1^2}{2f_1^2} \sin \alpha \right) + \frac{dn \cos \gamma \cos \beta}{kf_2} x_2 - \frac{dn \cos \gamma \sin \beta}{2f_2^2 k} x_2^2 \approx, \quad (4) \\ a_0 + ax_2 &= \lambda_0 + D\rho \end{aligned}$$

式中 λ_0 为基准波长。

对于 CXRS 系统, 每道光纤在 CCD 竖直方向上 (成像维) 占据 25 pixel , 为了提高信噪比及时间分辨率, 在实验中对其进行并道处理。利用标准灯对所有通道进行标定, 得到同一谱线对应的像素值如图 3(a) 所示。光谱仪的中心波长为 529.059 nm (对应 CCD 上第 128 个像素位置), 其中空心三角形表示并道后得到的谱线中心像素点 (横坐标取每道光纤像的中心), 实心点表示未并道时的谱线中心。可以看到在 CCD 成像维谱线成像是弯曲的, 主要原因是不同通道对应 (2) 式中的 y_1 不同 (即 γ 不同), 使得同波长的光经过不同通道光纤成像到 CCD 上的 x_2 发生偏离。此外, 成像面弯曲并不影响并道处理的谱线中心位置, 如图 3(b) 所示, 弯曲效应对并道后谱线半峰全宽的影响也可忽略。在实际测量时光栅转角固定, 可直接将观测的光谱中心所在像素位置减去对应的修正量来校正像面弯曲。

固定光谱仪中心波长为 529.059 nm (对应 CCD 像素点位置在 128 附近), 利用标准灯对每道观测视线在 CCD 成像面上左、中、右三个位置分别进行波长标定, 结果如表 1 所示。对应地可以看到线色散在 0.0355 nm/pixel 附近波动, 与理论计算值相差约为 0.0009 nm/pixel 。不同通道的线色散差距很小 (0.00004 nm/pixel 左右), 可以忽略, 即在成像维 (不同通道) 线色散值是相同的。

表 1 不同 CCD 像平面的倒线色散率(单位: nm/pixel)

Table 1 Reciprocal linear dispersion at different CCD image positions (unit: nm/pixel)

CCD position	Left (around 529.1 nm)	Middle (around 533 nm)	Right (around 541.8 nm)
Up	0.035596	0.035499	0.035433
Middle	0.035604	0.035493	0.035444
Down	0.035600	0.035487	0.035440

温度、湿度和压强变化会影响大气折射率,进而影响谱线波长与 CCD 像素点的对应关系。保持光谱仪中心波长位于 529.059 nm,使用温湿大气压强测量仪采集 3 d 内实验室的室温、湿度和压强数据,并同时记录中心道两条 Ne 灯谱线(533.08 nm 和 540.06 nm,分别位于 CCD 光谱维的左侧和右侧)的变化,结果如图 4 所示。可以看到两条谱线中心波长在 CCD 上的位置与室温呈正相关,随着室温的降低,谱线向大像元数方向(即长波长方向)移动,温度降低了 1.7 °C,谱线中心变化了 0.2 pixel,会带来约 5 km/s 的测量误差。但是通过两条谱线对应像素位置的差值[图 4(c)]可知该变化是刚性的,即外界温度的改变不会影响测量谱线与基准参考谱线的相对位置。

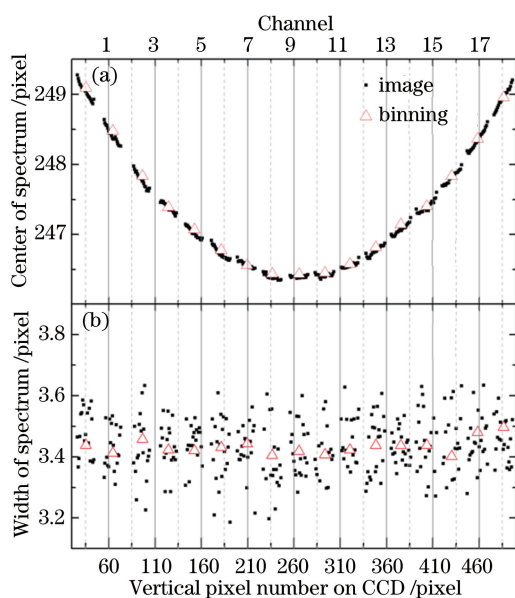


图 3 用标准灯对弯曲谱线进行校正。

- (a) 光谱中心;
- (b) 光谱半峰全宽

Fig. 3 Correction of the curved spectra with calibration lamp.

- (a) Center of spectrum; (b) full width at half maximum of spectrum

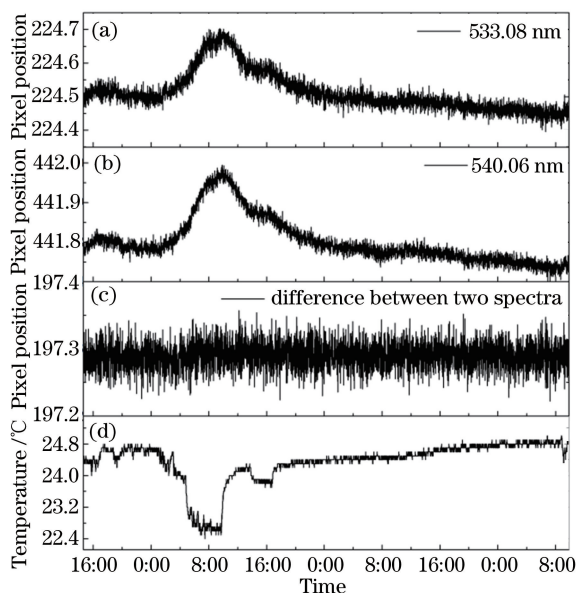


图 4 Ne 灯谱线所在像素随时间的变化。

- (a) 533.08 nm 谱线中心; (b) 540.06 nm 谱线中心;
- (c) 两条谱线的差值; (d) 室温

Fig. 4 Time history of pixel position of Ne lamp spectrum.

- (a) Spectrum center of 533.08 nm line;
- (b) spectrum center of 540.06 nm line;
- (c) difference between the two spectra; (d) room temperature

4 基于激光的实时波长标定

为了满足实验需求,实验过程中会经常改变光谱仪的中心波长,这会带来一定的回程差,同时室内环境的改变也会引起成像到 CCD 上的谱线位置变化,这些因素都会给测量谱线的中心波长带来误差。以测量 C VI 杂质谱线(波长为 529.059 nm)为例,0.01 nm 的测量误差引入的速度误差约为 6 km/s。这些测量误差可以通过实时波长标定来消除。常用的标准灯在标定时通常需要占用多个通道,作为实时标定光源并不经济。为了更好地满足实验需求,对激光作为实时标定光源的可能性进行仿真分析及实验验证。

将一束激光(波长为 532.1 nm)从长光纤反向接入系统,激光在经过透镜组时由于透镜表面微弱的反射作用将激光反射到其他光纤中,可以在其他光纤上接收该激光反射光并将其光谱成像到 CCD 上。因激光是强光,透过透镜表面微弱的反射光光强在 CXRS 系统接受范围内(信噪比较高)。光路通过 Lighttools 光学

模拟软件建模仿真^[15],如图5所示,其反射光通过各道光纤后0.5 mm处的光斑尺寸如图6所示。从图6中可以看出光斑的直径约为0.55 mm,大于光纤芯径(0.4 mm),即反射光可以充满所有观测通道的芯径及数值孔径。可以认为,经过反射后的激光在光谱仪端的入射光路同标准灯标定时光路是相同的。

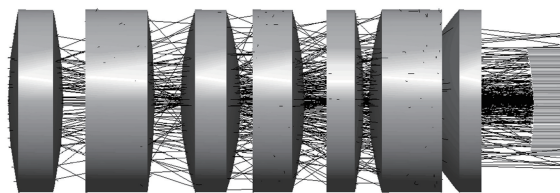


图5 光纤和透镜组的光路模拟

Fig. 5 Optical path simulation of fiber and lens system

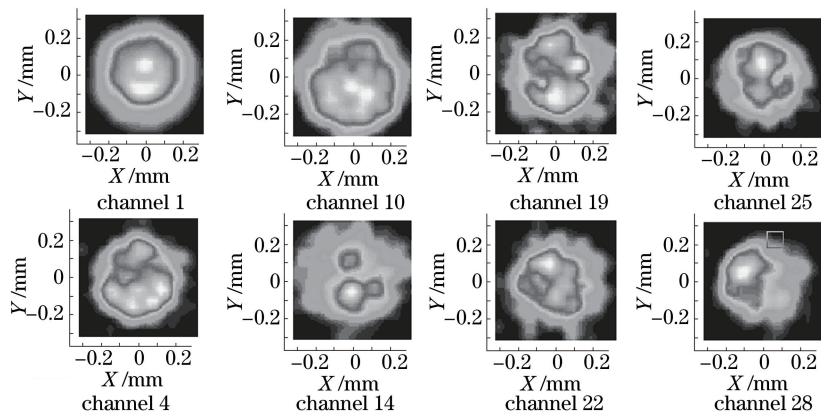


图6 激光从一道光纤入射经过透镜组反射后从其他光纤出射的像

Fig. 6 Images of laser through other fibers when coupled into one fiber via reflection of the lens system

作为波长标定的光源,除了保证每道光纤的芯径和数值孔径充满外,最重要的是确认激光的发射波长及其稳定性。应用标准灯对激光波长进行标定,同时采集50 h内的激光波长变化,结果如图7所示。可以发现随着室温的改变,激光波长的波动范围在0.01 nm以内,表明激光具有良好的波长稳定性,可以作为实时波长标定光源。在2015年的EAST实验中,激光作为实时标定光源应用到实验中。得到的测量结果与基于标准灯标定的结果对比如图8所示。可以看出,应用激光与标准灯两种方法标定的结果误差在2 km/s以内,相对测量结果(60 km/s左右)是小量。而作为EAST CXRS诊断实时波长标定光源,激光与标准灯相比具有不额外占用光谱仪通道、信号强度相对较强因而不需要加长曝光时间等优点。

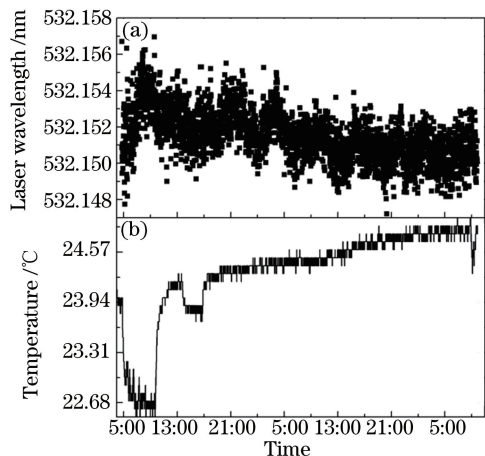


图7 50 h内(a)激光波长和(b)室内温度的变化
Fig. 7 Time history of (a) laser wavelength and (b) room temperature within 50 h

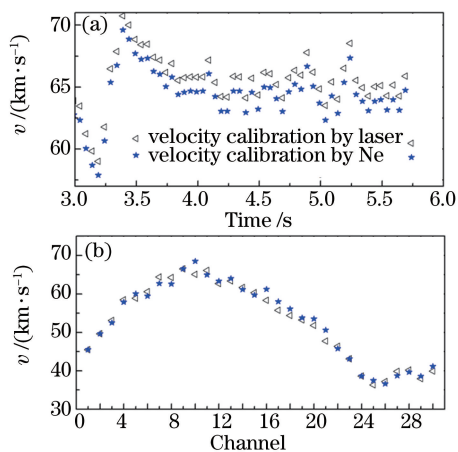


图8 激光与标准灯实时标定测量得到的C VI杂质速度
Fig. 8 Velocity of C VI impurity measured on line with laser and calibration lamp

5 结 论

波长的精确标定是 CXRS 诊断旋转速度测量的前提和基础。详细介绍了 EAST 上 CXRS 诊断的离线和实时波长标定方法。标准灯波长稳定且具有多个波长的谱线,可以准确标定系统的线色散及像素点和波长之间的对应关系,是良好的离线标定光源,但是作为实时波长标定光源时会占用光谱仪通道数。激光由于其良好的波长稳定性及其反射光可同时充满所有观测通道的特性,成为 CXRS 系统实时波长标定光源的最佳选择,且在 EAST CXRS 诊断中得到了有效使用。

参 考 文 献

- 1 Isler R C. Observation of reaction $H^0 + O^8 \rightarrow H^+ (O^{7+})$ during neutral-beam injection into ORMAK[J]. Physical Review Letters, 1977, 38(23): 1359-1362.
- 2 Han X Y, Duan X R, Yang L M, *et al.*. First charge exchange recombination spectroscopy diagnostic in HL-2A tokamak [J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(5): 055202.
- 3 Andrew Y, Hawkes N C, Cromb  K, *et al.*. Improved charge exchange spectroscopy on the Joint European Torus for ion temperature and rotation velocity profiles[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(10): 10E913.
- 4 Koide Y, Sakasai A, Sakamoto Y, *et al.*. Multichordal charge exchange recombination spectroscopy on the JT-60U tokamak[J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(1): 119-127.
- 5 Gohil P, Burrell K H, Groebner R J, *et al.*. High spatial and temporal resolution visible spectroscopy of the plasma edge in DIII-D[J]. Review of Scientific Instruments, 1990, 61(10): 2949-2951.
- 6 Li Y Y, Fu J, Lyu B, *et al.*. Development of the charge exchange recombination spectroscopy and the beam emission spectroscopy on the EAST tokamak[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(11): 11E428.
- 7 Ye M, Li Y, Yu Y, *et al.*. Toroidal charge exchange recombination spectroscopy on EAST[J]. Fusion Engineering and Design, 2015, 96-97: 1017-1020.
- 8 Ida K, Kado S, Liang Y. Measurements of poloidal rotation velocity using charge exchange spectroscopy in a large helical device[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(6): 2360-2366.
- 9 Bell R E, Scotti F. High-throughput accurate-wavelength lens-based visible spectrometer [J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 10D731.
- 10 Cromb  K, Andrew Y, Giroud C, *et al.*. Calibration of the charge exchange recombination spectroscopy diagnostic for core poloidal rotation velocity measurements on JET[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(10): 3452-3454.
- 11 Li Yingying. Development of the edge rotation diagnostic and the charge exchange recombination spectroscopy and preliminary experiment studies on the EAST tokamak[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
李颖颖. EAST 边界被动光谱诊断系统与电荷复合交换光谱诊断系统研制及初步实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- 12 Zhang Yi. The calibration of the toroidal CXRS diagnostic in EAST[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
张 懿. EAST 托卡马克上环向 CXRS 诊断系统的标定[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- 13 Li Xin, Zhang Guowei, Xun Lina, *et al.*. Wavelength calibration of shortwave infrared flat spectroradiometer[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(5): 902-906.
李 新, 张国伟, 寻丽娜, 等. 短波红外平场光谱仪的波长定标[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 902-906.
- 14 Tang Yi, Zhang Zhige, Chen Ting'ai, *et al.*. Design of visible-ultraviolet cylinder mirror imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0330004.
唐 义, 张止戈, 陈廷爱, 等. 一种基于柱面反射镜的紫外/可见光成像光谱仪[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0330004.
- 15 Yu Chunyan, Cui Qingfeng, Zhu Hao, *et al.*. Optical design of a double-side Fresnel lens for concentrator[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122008.
于春岩, 崔庆丰, 朱 浩, 等. 双面菲涅耳聚光镜设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122008.