

HL-2A 装置上近红外轫致辐射的时空分布测量

商洁^{1,2} 黄渊² 刘春华² 聂林²

¹中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006

²核工业西南物理研究院, 四川 成都 610225

摘要 为了开展托卡马克装置边缘相关物理问题的研究及汤姆逊散射对电子温度、电子密度更为精确的测量, 初步建立了具有高时空分辨的近红外轫致辐射测量系统, 并测量了其在不同加热条件下的近红外轫致辐射信号。通过与可见光波段及 X 射线的轫致辐射信号进行对比分析, 验证了系统的可行性。该诊断观测了 HL-2A 极向截面的整个空间, 15 道观测弧以极向截面的中平面为轴对称分布, 通过 Abel 反演得到了近红外轫致辐射信号的空间分布趋势。

关键词 测量; 托卡马克等离子体; 轫致辐射; 近红外光谱; 时空分布

中图分类号 O434

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.111201

Measurement of the Temporal and Spatial Distribution to Near Infrared Bremsstrahlung Emission in HL-2A Tokamak

Shang Jie^{1,2} Huang Yuan² Liu Chunhua² Nie Lin²

¹China Institute For Radiation Protection, Taiyuan, Shanxi 030006, China

²Southwestern Institute of Physics, Chengdu, Sichuan 610225, China

Abstract In order to research related edge plasma physics and accurately measure electron temperature and electron density with Thomson scattering system in HL-2A Tokamak device, a new kind of near infrared (NIR) bremsstrahlung emission measurement system with high space-time resolution is built for the first time. Under different discharge and heating conditions, the bremsstrahlung signals in NIR range are successfully obtained and compared with those in visible and soft X-ray range, so that the reliability of the NIR system is confirmed. The radial profile of the NIR bremsstrahlung signals is presented by Abel inversion of bremsstrahlung emission from fifteen horizontal chords which axisymmetrically distribute along the plane in the cross section.

Key words measurement; Tokamak plasma; bremsstrahlung emission; near infrared spectrum; temporal and spatial distribution

OCIS codes 120.4820; 120.1740; 120.1880; 350.2660

1 引言

托卡马克高温等离子体会产生大量的高能粒子、中性粒子和 γ 射线流, 在紫外-可见光(UV-VIS)范围内(200~750 nm), 它会使光学元件和仪器的性能受到严重的影响, 比如窗口永久的(辐射诱导吸收)和动态的(辐射诱导发光和 Cherenkov 辐射)损伤, 第一镜的反射率降低以及对光纤传输的影响。然而在近红外范围(750~2000 nm), 上述影响和损伤将大大减小甚至不存在^[1]。它作为一种可供选择的诊断方法可用于等离子体放电控制、等离子体约束性能的评估及相关物理问题的研究等^[2-4], 在未来的磁约束聚变装置上(例如国际热核实验反应堆)具有十分重要的应用前景。

在可见光 523~536 nm 范围、近红外 800~1040 nm 范围以及 Nd:YAG 汤姆逊散射诊断系统的多道近红外光谱波段。Schunke 等^[5-6]在不同托卡马克中对电子-离子(e-i)轫致辐射进行了成功测量, 进而获得了有效电荷数的估计值。但由于 e-i 轫致辐射的测量在低密度区经常会受到其他光辐射源的污染, 而这些光源的辐射光谱又很难被定量分析以消除其影响, 因此 e-i 轫致辐射在等离子体边缘的精确测量往往是比较困

收稿日期: 2015-05-17; 收到修改稿日期: 2015-06-17; 网络出版日期: 2015-09-24

基金项目: ITER 国内配套高时空分辨边缘等离子体汤姆逊散射诊断技术研究(2009GB107002)

作者简介: 商洁(1986—), 女, 硕士, 研究实习员, 主要从事光谱诊断等方面的研究。

E-mail: shangjie861220@163.com

难的。在可见光韧致辐射的测量中,加料(弹丸注入、送气)和器壁再循环将会在等离子体边缘引入大量的中性双原子分子和其他杂质。这些双原子分子(H_2 、 D_2 、 N_2)裂解所产生的辐射是可见光 e-i 韧致辐射测量的主要污染源,它覆盖了 200~600nm 的连续范围^[7],很难定量计算从而扣除其影响。然而,在近红外韧致辐射的测量中,氦原子和氦分子的线辐射、复合辐射、氦分子的裂解辐射以及杂质的线辐射都是非常小的^[8]。

在当前的大中型托卡马克装置以及我国参加建设的国际热核聚变实验反应堆(ITER)上,非相干汤姆逊激光散射诊断是测量等离子体电子温度和电子密度的可靠方法。这种诊断主要使用电光调 Q 的 Nd:YAG 激光器,激光波长为 1064 nm,激光能量大于 2 J,通常在激光短波长侧测量散射光谱。对于边缘等离子体和偏滤器等等离子体的激光散射诊断^[9],大量杂质和中性气体的存在,产生的原子分子辐射强度可能跨越几个数量级,可能影响到探测器对散射信号的线性测量,需要对等离子体发光进行监测。同时,这些监测数据也可以用于获得等离子体不同空间位置的有效电荷数及其剖面分布^[10-11]。

目前很多报道是关于从真空紫外到可见光波段范围,在等离子体极向截面内的不同空间位置上开展 e-i 韧致辐射、线辐射的分别测量,而对在近红外光谱范围进行的诊断研究比较少,国内也没有这方面诊断工作的文献报道。比较而言,开展近红外波段的韧致辐射测量有一定的优越性。近红外光谱诊断主要用于局部有效电荷数的测量、杂质流的监测、边缘局域模演化的研究、低约束模式和高约束模式间的转化等问题的研究^[8,12-13]。对边缘近红外波段下的韧致辐射信号的精确测量,有助于更好的对边缘相关物理问题进行研究^[14-15]。因此本文建立了一套具有高时空分辨的近红外韧致辐射实时测量系统,通过更换窄带滤波片来测量不同波段下的韧致辐射信号。通过比较分析得到适合于不同区域的 e-i 韧致辐射测量结果。

2 实验装置设计与结果讨论

2.1 实验布置

实验装置如图 1 所示,韧致辐射测量系统与激光汤姆逊散射测量系统共用一个观测窗口,尽量对等离子体的相同空间位置进行探测,这样计算得到的有效电荷数将会更准确。在观测窗口的对面器壁上,安装了光学消光器,以减小器壁反射对韧致辐射信号的影响,提高测量结果的准确性。在近红外韧致辐射测量系统中,等离子体发出的光通过光学窗口经准直通光孔进入近红外窄带滤波片阵列,后经聚焦透镜将光聚焦在近红外探测器的端面上,由前置放大器和主放大器将信号放大,信号的频率带宽为 0~2 MHz,然后经 1 MHz 通道的采集系统将信号导出分析。其中滤光片的中心波长 $\lambda = 980 \text{ nm}$,带宽 $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$,峰值透射率大于 60%。准直通光孔的安装是为了减少周围杂散光对韧致辐射信号的干扰,近红外探测器使用硅发光二极管(光谱响应范围为 400~1100 nm,光敏面直径 $\varphi = 2 \text{ mm}$)。该诊断系统由 15 道水平观测弦以中平面为轴对称分布,道与道间的间隔为 50 mm,边缘道的入射角小于 10° 。聚焦透镜将观测弦线上中心区域等离子体的光辐射成像到探测器表面上,景深约 3 cm。由于测量区域的杂质和中性原子的含量比较低,带通滤波片排除了可能的线辐射干扰,因此可以认为该系统测量的主要是 e-i 韧致辐射信号。

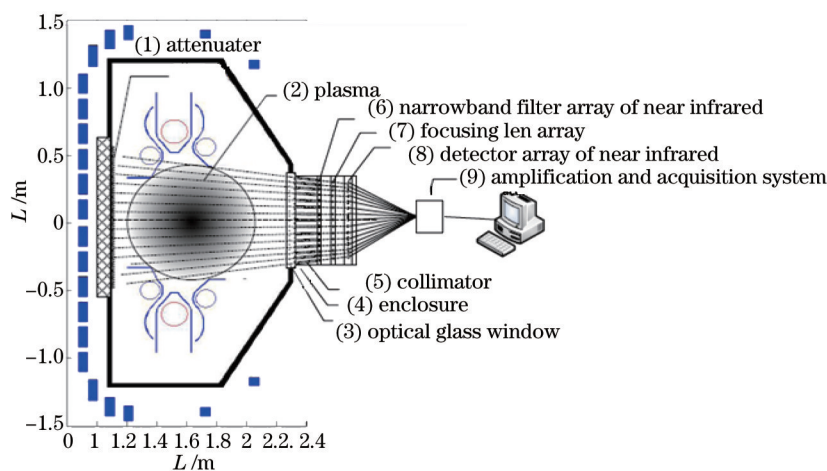


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

2.2 实验结果

2.2.1 欧姆放电情形

HL-2A装置第22445次欧姆放电期间,对近红外韧致辐射信号的测量结果如图2所示。图2(a)~(f)依次为等离子体电流(I_p)、热辐射(BLOM)、用于监测在中平面内超声分子束(SMB)加料的中心道 H_a 辐射,中心道的Mirnov磁信号 M_{pol} ,中心道的电子回旋辐射(ECE)信号 M_{ece} ,中心道的HCN激光干涉系统采集的线平均电子密度信号 n_e ,以及中心道的近红外韧致辐射信号 ε_{NIR} 。从图中可以看出在230~370 ms时间段内,由于前面的2个脉冲SMB加料的时间间隔较长,电子密度持续增加,在 n_e 密度曲线上能观察到破裂现象,而且在时间上与 H_a 大脉冲是同步的。由于后面的3个脉冲SMB加料的时间间隔较短,对等离子体的扰动较强而导致小破裂,在 n_e 密度曲线上表现为首先出现明显的下降然后再慢慢升高。当电子密度达到一个极大值时,近红外韧致辐射信号及热辐射信号也达到对应的极大值。进一步分析250~280 ms的磁信号及近红外韧致辐射信号发现,在Mirnov磁探针信号和近红外韧致辐射信号上的振荡基本同步,而且在260~270 ms期间的振荡频率较高。因此,该近红外韧致辐射诊断系统的设计合理,能开展可靠、稳定的测量工作。

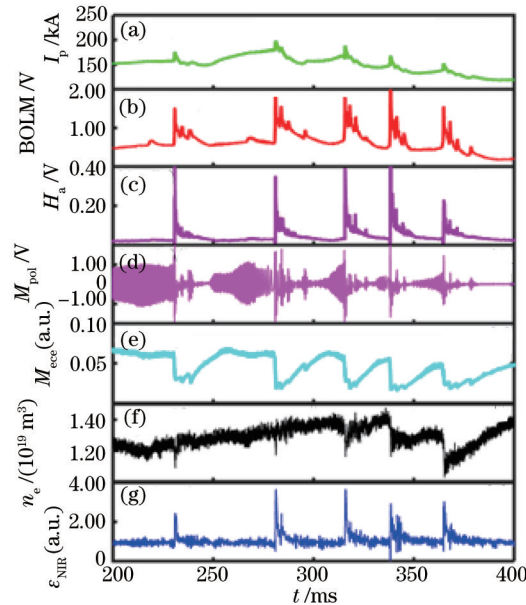


图2 欧姆加热条件下第22445次放电信号。(a) I_p 电流信号;(b) 中心道的热辐射信号;(c) 中心道的 H_a 辐射信号;(d) 中心道的磁信号 M_{pol} ;(e) 中心道的电子回旋辐射信号;(f) HCN干涉仪采集的中心道的电子密度信号;(g) 中心道的近红外韧致辐射信号

Fig.2 Discharge signals of Shot 22445 during ohmic heating. (a) Current waveform I_p ; (b) thermal loss of the central chord; (c) H_a radiation signal of the central chord; (d) magnetic signal M_{pol} of the central chord; (e) ECE; (f) central-chord averaged n_e by HCN laser interferometer; (g) NIR bremsstrahlung radiation of the central chord

2.2.2 辅助加热下情形

如图3是第22462次放电,有中性束(NBI)加热,放电持续时间为1800 ms。主要放电参数从上往下依次为等离子体电流 $I_p=200$ kA,在300 ms时注入的中性束加热功率 $P_{NBI}=700$ kW,中心道的ECE信号,HCN干涉仪测得的电子密度值,对应线平均密度约为 $1.2 \times 10^{13} \sim 2.6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$,中心道的软X射线信号 ε_{SX} 、可见光信号 ε_{VIS} 以及近红外韧致辐射信号 ε_{NIR} 。从图中可以看出,中性束的注入引起电子密度在550 ms左右显著增加,导致在ECE信号上出现截止现象。随电子密度的增加,在软X射线波段、可见光波段和近红外波段的韧致辐射强度也显著增加,它们的变化趋势大体相当,在实验上证明了不同波段韧致辐射的变化均与密度的变化成非常密切的正比关系。

如图4所示,第22994次放电中有中性束加热与电子回旋共振(ECRH)加热,在400 ms注入等离子体,采集到的信号及波段选取同上图。主要放电参数从上往下依次为等离子体电流 $I_p=200$ kA,电子回旋共振加热功率 P_{ECRH} 及中性束加热功率 P_{NBI} ,中心道的电子回旋辐射信号,HCN干涉仪得到的中心道的电子密度信号以及中心道的软X射线信号 ε_{SX} 、可见光信号 ε_{VIS} 及近红外韧致辐射信号 ε_{NIR} 。当650 kW的中性束注入

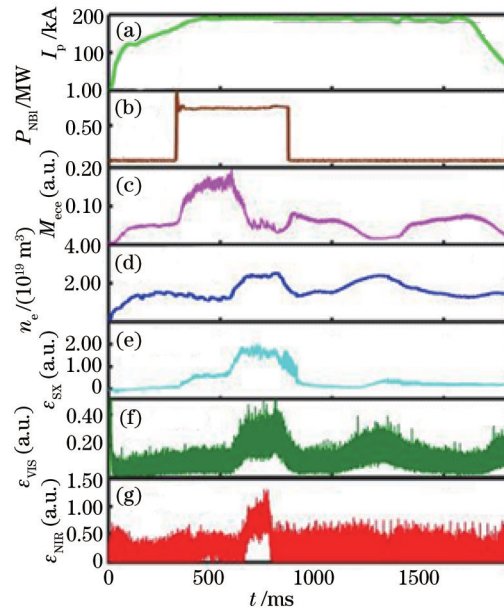


图3 中性束加热期间第22462次放电信号。(a) 等离子体电流波形;(b) 中性束加热功率;(c) 中心道ECE信号;
(d) 中心道HCN电子密度信号;(e) 软X射线信号;(f) 可见光信号;(g) 近红外波段的韧致辐射信号

Fig.3 Discharge signals of Shot 22462 during NBI heating. (a) Plasma current waveform; (b) NBI heating power; (c) ECE of the central chord; (d) central chord HCN averaged electron density; (e) soft X-ray; (f) visible and (g) NIR bremsstrahlung emission of the central chord

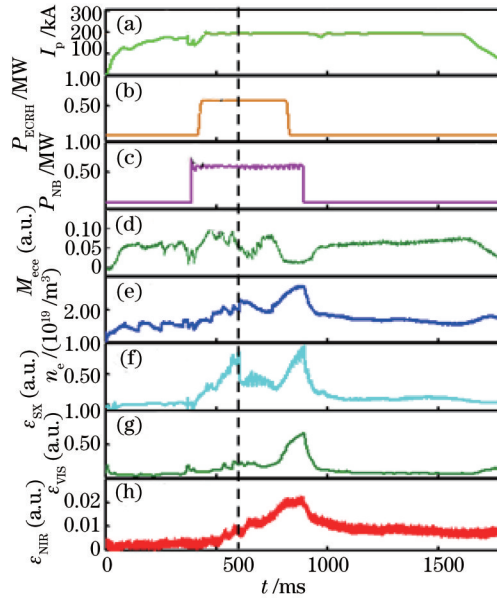


图4 中性束及电子回旋共同加热期间第22994次放电信号。(a) 电流波形;(b) 电子回旋加热功率;(c) 中性束加热功率;
(d) 中心道的电子回旋辐射信号;(e) 中心道HCN采集的线积分电子密度信号;(f) 中心道的软X射线信号
(g) 中心道的可见光信号;(h) 中心道的近红外韧致辐射信号

Fig.4 Discharge signals of Shot 22994 during NBI and ECRH heating. (a) Current waveform; (b) ECRH heating power; (c) NBI heating power; (d) ECE; (e) n_e with line average of HCN interferometer of the central chord; (f) soft X-ray, (g) visible and (h) NIR bremsstrahlung emissions of the central chord

等离子体后引起了电子密度的增加,随后电子回旋共振加热引起了电子密度的进一步增加。在 ECRH 和 NBI 加热期间,也开展了脉冲超声分子束注入的加料和物理实验,电子密度从 400~900 ms 呈现阶梯式的增加。可以看出,不同波段韧致辐射变化的大体趋势依然与电子密度的变化同步,当芯部电子密度在 900 ms 达到极大值时,在各波段测量的韧致辐射信号也分别达到极大值。

2.2.3 韧致辐射的径向空间分布

通常只要所研究的等离子体具有轴对称或光学薄性,就可以利用 Abel 逆变换,从该物理量的积分值得到其径向分布。这里就韧致辐射的径向分布做出说明。

不需要考虑高温等离子体对电磁波的吸收,只需考虑等离子体中各粒子间的碰撞。根据电动力学,一电荷为 e 的粒子在折射率为 n 的介质中,以速度 v 、加速度 a 运动,所产生的辐射功率为

$$\frac{dE}{dt} = \frac{e^2 n}{6\pi\epsilon_0 c^3} \frac{a^2 - (\mathbf{v} \times \mathbf{a})^2}{(1 - \frac{v^2}{c^2})^3}, \quad (1)$$

式中 E 表示能量, t 表示时间, ϵ_0 表示介电常数, c 表示真空中光速。

在相对论效应可忽略时,单一粒子辐射的频谱可以表示为

$$E_\omega d\omega = \frac{e^2 n}{24\pi^2 \epsilon_0 c^3} |a(\omega)| d\omega, \quad (2)$$

式中 ω 表示角速度。如果碰撞是在具有相同荷质比的粒子间发生的,则 $\sum_i e_i a_i = 0$, 这时不会产生辐射。因此高温等离子体中的韧致辐射是不同粒子间的碰撞产生的。所需要的是电子和离子碰撞产生的韧致辐射,即

$$U_{\lambda, T_e} = 1.90 \times 10^{-33} \frac{n_e n_i Z^2}{\lambda^2 (kT_e)^{1/2}} \bar{g} \exp\left(-\frac{12395}{\lambda kT_e}\right) (\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{nm}^{-1}), \quad (3)$$

式中 n_e 为电子密度, n_i 为离子密度, Z 是离子有效电荷数, T_e 表示电子温度,冈特因子 $\bar{g} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \ln\left(\frac{4kT_e}{\gamma h f}\right)$, 其中 h 为普朗克常数,它是与温度、波长有关的物理量, γ 为电子辐射频率, f 为光波频率, k 为玻尔兹曼常数。当 $h\gamma \ll kT_e$ 时,韧致辐射强度的指数部分接近于 1。

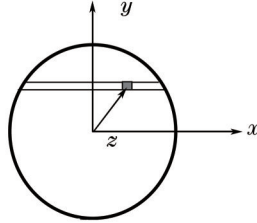


图5 Abel反演变量间的几何关系示意图

Fig.5 Schematic diagram of the geometric relationship of the variables of Abel inverted intensity

通常沿轴对称物体的线积分而得到的投影称为 Abel 变换,反之为 Abel 逆变换。在探测系统中通常都会有一个准直通光狭缝,因此探测系统只能接收光源中来自于一个很窄的薄片的能量。如图 5 所示,若宽度 δy , 长 l 的薄片位于对称轴上方 y 的位置处,那么探测器接收到总的流量为

$$I(y)l\delta y = l\delta y \int_{-x}^x f(r) dx, \quad (4)$$

式中 $f(r)l dx \delta y$ 是距对称轴 r 的体积源 $l dx \delta y$ 的一部分。弦积分的 y 是常数, $x^2 + y^2 = r^2$, $x^2 = R^2 - y^2$, 其中 R 是在 $f(r)$ 可忽略时的半径。(4)式改写为

$$I(y) = 2 \int_y^R \frac{f(r) r dr}{(r^2 - y^2)^{1/2}}. \quad (5)$$

当 $r > R$ 时, $f(r) = 0$ 。反演分析,有

$$f(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{(dI/dy) dy}{(y^2 - r^2)^{1/2}}, \quad (6)$$

(6)式可改为

$$f(r) = -\frac{1}{2\pi r} \frac{dF(r)}{dr}, \quad (7)$$

式中 $F(r) = 2 \int_r^R \frac{I(y)ydy}{(y^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}}$ 。将实验得到的空间 15 道弦积分轫致辐射强度值代入(7)式,就可以得到轫致辐射的空间分布。

图 6 为第 22215 次的偏滤器位形放电条件下,在电子回旋共振加热期间的不同时刻,对 15 个空间通道测量的近红外轫致辐射信号进行 Abel 反演,从而得到的近红外轫致辐射的空间分布。曲线的不同颜色代表不同的时间,分别是 800(红)、900(青)、1000(蓝)、1100(绿)、1200(黑) ms。曲线沿中平面对称分布。在小半径为 15~40 cm 范围内,轫致辐射强度随时间逐渐增加;而小半径为 0~15 cm 范围内的轫致辐射强度随时间的变化情况则与之相反。轫致辐射强度的极大值出现在正负 32 cm 左右的位置。从整个分布曲线的轫致辐射信号来看,在等离子体边缘区域的轫致辐射信号远高于在芯部的轫致辐射信号。出现这种情况可能是由于高功率电子回旋共振加热期间,芯部电子温度显著上升,电子温度的梯度变大,以至于电子温度梯度模被激发,导致电子热运输和粒子运输的增强,在电子密度的剖面分布上就表现为芯部电子密度降低、边缘电子密度上升^[16]。另一方面,增强的电子热运输和粒子运输会导致等离子体与装置真空室器壁的相互作用变大。因此,在等离子体的边缘区域,中性粒子密度、非金属杂质和金属杂质的密度都会上升,等离子体辐射增强而且成分复杂,其中的电子-中性粒子轫致辐射是电子-离子轫致辐射测量的主要污染源,而且器壁的反射、再循环的影响也不能忽略^[8-10]。本实验也直接证明了对于边缘汤姆逊激光散射诊断,边缘区域的等离子体辐射可能会造成比较严重的影响,需要进一步研究。

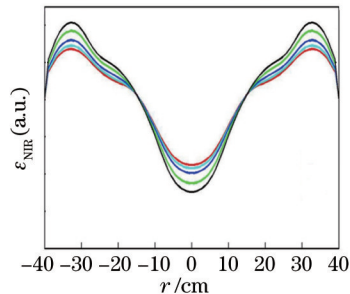


图 6 第 22215 次具有偏滤器位形放电的电子回旋共振加热期间近红外轫致辐射信号的空间分布情况

Fig.6 Spatial profile of the voltage signals of NIR bremsstrahlung emission of Shot 22215 with the divertor configuration discharge during ECRH heating

3 结 论

使用具有高时空分辨的近红外轫致辐射测量系统,对等离子体极向截面的全空间轫致辐射信号进行了测量。采用窗口透射率测量系统来补偿由于光学窗口的污染对轫致辐射信号测量的影响。通过选取不同加热条件下,中心道的近红外轫致辐射信号与可见光及软 X 射线的信号进行对比分析,验证了系统的可行性,并发现不同波段的轫致辐射信号的变化受电子密度影响明显,电子温度的变化对其影响较小。通过对空间 15 道轫致辐射信号进行 Abel 反演,发现边缘等离子体的轫致辐射信号强度大于芯部的,这说明电子-中性粒子轫致辐射可能对 e-i 轫致辐射测量有很大的影响,同时器壁的反射和再循环的影响也不能忽略。今后,需要对近红外轫致辐射系统进行绝对标定,同时要考虑到边缘区域的电子-中性粒子轫致辐射、器壁反射等的影响,从而实现轫致辐射信号更为精确的测量。

参 考 文 献

- 1 V A Soukhanovskii. Near-infrared spectroscopy for burning plasma diagnostic applications[J]. Rev Sci Instrum, 2008, 79(10): 10F539.
- 2 F Orsitto, M R Belforte, M Borra, *et al.*. Measurements of Z_{eff} spatial profiles from bremsstrahlung emission in the visible and near infrared spectral region[J]. Rev Sci Instrum, 1997, 68 (1): 1024-1026.
- 3 F Orsitto, M R Belforte, A Brusadin, *et al.*. Z_{eff} spatial profiles from bremsstrahlung emission in the near infrared spectral region[J]. Rev Sci Instrum, 1999, 70(1): 925-927.
- 4 A Patel, P G Carolan, N J Conway, *et al.*. Z_{eff} profile measurements from bremsstrahlung imaging in the MAST spherical tokamak[J]. Rev Sci Instrum, 2004, 75(11): 4944-4950.

- 5 B Schunke, G T Huysmans, P R Thomas. Evidence of the influence of reflections on the Z_{eff} profile measurements and their mitigation[J]. Rev Sci Instrum, 2005, 76(8): 083501.
- 6 S K Rathgeber, R Fischer, S Fietz, *et al.*. Estimation of profiles of the effective ion charge at ASDEX upgrade with integrated data analysis[J]. Plasma Phys Control Fusion, 2010, 52(9): 095008.
- 7 J K Anderson, P L Andrew, B E Chapman, *et al.*. Direct removal of edge-localized pollutant emission in a near-infrared bremsstrahlung measurement[J]. Rev Sci Instrum, 2003, 74(3): 2107-2110.
- 8 E E Mukhin, R A Pitts, P Andrew, *et al.*. Physical aspects of divertor Thomson scattering implementation on ITER[J]. Nucl Fusion 2014, 54(4): 043007.
- 9 E E Mukhin, V V Semenov, A G Razdobarin, *et al.*. The ITER divertor Thomson scattering system: Engineering and advanced hardware solutions[J]. J Instrum, 2012, 7: C02063.
- 10 H Weisen, D Pasini, A Weller, *et al.*. Measurement of light impurity densities and Z_{eff} in JET using x-ray tomography[J]. Rev Sci Instrum, 1991, 62(6): 1531-1538.
- 11 S Y U Tolstyakov, E E Mukhin, M M Kochergin, *et al.*. Near-infrared plasma spectroscopy in support of divertor Thomson scattering diagnostics development for ITER[C]. Journal of Physics Conference Series, 2010, 227: 012045.
- 12 K H Steuer, H Röhr, B Kurzan. Bremsstrahlung measurements in the near infrared on ASDEX[J]. Rev Sci Instrum, 1990, 61(10): 3084-3086.
- 13 T Sunn Pedersen, R S Granetz, A E Hubbard, *et al.*. Radial impurity transport in the H mode transport barrier region in Alcator C-Mod[J]. Nucl Fusion, 2000, 40(10): 1795-1804.
- 14 Ph Lotte, M H Aumeunier, P Devynck, *et al.*. Wall reflection issues for optical diagnostics in fusion devices[J]. Rev Sci Instrum, 2010, 81(10): 10E120.
- 15 J Lee, S Oh, H Wi, *et al.*. Conceptual design of new polychromator on Thomson scattering system to measure Z_{eff} [J]. Rev Sci Instrum, 2012, 83(10): 10E334.
- 16 Y Huang, P Zhang, Z Feng, *et al.*. The development of Thomson scattering system on HL-2A tokamak[J]. Rev Sci Instrum, 2007, 78(11): 113501.

栏目编辑: 史 敏