

文章编号: 1001—4322(2000)06—0703—04

一种高温等离子体 X 射线参数诊断方法*

王文生^{1,2}, 龚建成², 黑东炜², 邱爱慈², 何多慧¹

(1. 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230026; 2. 西北核技术研究所, 西安 69 信箱 12 分箱 710024)

摘要: 介绍了高温等离子体中用滤波荧光法测量 X 射线能谱、用散射法测量 X 射线总剂量的原理, 建立了 X 射线能谱、总剂量的数据处理方法, 成功获得了实验结果, 测点处总的辐照剂量不确定度为 ±23%。

关键词: 等离子体诊断; X 射线能谱; X 射线总剂量

中图分类号: O 536; O 434. 12 **文献标识码:** A

激光惯性约束聚变(ICF)、非受控热核聚变和等离子体焦点装置(DPF)都产生温度、密度极高的等离子体。X 射线诊断是获得等离子体信息(如电子温度、密度等)的重要手段之一。同时,在高温等离子体辐射应用(如 X 射线材料结构响应、冲量试验、抗辐射加固效应研究等)中,测点处的 X 射线能谱和总的辐照剂量等参数是一项基准参数,其测量的准确性和可靠性直接影响应用结果。因此准确测量 X 射线能谱和总剂量具有重要的意义和应用。

由于这种高温等离子体产生的 X 射线强度很高,时间很短,X 射线诊断的难度也更大。X 射线高速扫描照相机是进行高时间分辨 X 射线测量的重要工具^[1],但价格昂贵,而多道 k 吸收边滤光片方法测量 X 射线能谱,又存在解谱困难,测量精度不高。对处于热平衡条件下的高温等离子体(温度在 10⁷K),其 X 射线辐射主要是韧致辐射,可以近似认为是黑体辐射,由于空气等物质的吸收,到达测点处的 X 射线能谱已经发生变化。因此,针对这种高温等离子体的特点,我们建立了一种 X 射线能谱、总剂量的测量方法,这种方法涉及的设备结构简单,安装、调试容易,并在实验中取得了较好的测试结果。

1 滤波荧光法测量 X 射线能谱

采用滤波荧光法测量 X 射线单能时间谱,测量原理如图 1 所示。通过选择几种不同的金属材料组合测量几个能点,来确定 X 射线的能谱。滤波荧光法的基本原理是利用金属材料对 X 射线具有吸收边,以及 X 射线激发次级材料产生荧光 X 射线的特性进行测量。要求选取的滤光片(又叫吸收片)材料的原子序数比荧光体的原子序数至少大 1(最佳选择为 1)。

初始 X 射线能谱经过滤光片后,光子能量高于滤光片吸收边能量的 X 射线被有效地吸收掉一部分,形成了测量 X 射线能谱的上边界(λ_1);在荧光体中,只有光子能量高于荧光体材料吸收边的 X 射线才能激发荧光体产生荧光 X 射线,形成了测量 X 射线能谱的下边界(λ_2),这样初始 X 射线能谱中能够激发荧光体产生荧光 X 射线的光子能量范围为 $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$,因此所测量的 X 射线波长间隔为

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \tag{1}$$

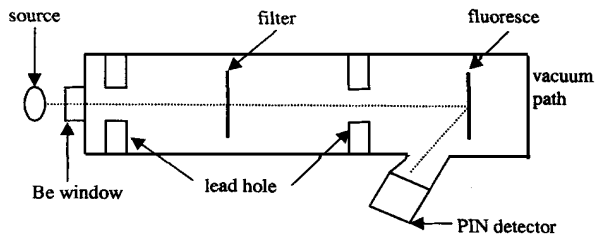


Fig 1 The principle of the filter-fluorescence

图 1 滤波荧光原理图

* 收稿日期: 2000-04-26; 修订日期: 2000-10-13

基金项目: 国防抗辐射加固基金资助课题(11-5-3)

作者简介: 王文生(1964-),男,副研究员,博士研究生,主要从事高温等离子体辐射诊断工作。

该测试能点的波长为

$$\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2) / 2 \quad (2)$$

荧光 X 射线由硅半导体探测器 (PN) 接收, 将 X 射线转换成电流信号, 由高速示波器记录, 信号电流的大小可表示为

$$I_X = E_\lambda S_1 \Delta\lambda (\lambda / \lambda_k) W_K \Delta\Omega \tau G_K \quad (3)$$

式中: I_X 为 PN 探测器输出电流 (A); E_λ 为入射到荧光体上的单色 X 射线照度 [$\text{J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{nm})$]; S_1 为荧光体接收 X 射线的面积 (cm^2); $\Delta\lambda$ 为测量的能量间隔 (nm); λ 为测试波长 (nm); λ_k 为荧光体的荧光 X 射线波长 (nm); W_K 为荧光体的荧光效率 ($1/\text{sr}$); $\Delta\Omega$ 为硅 PN 探测器接收荧光 X 射线的立体角 (sr); τ 为初始 X 射线到 PN 探测器的光路上的物质衰减系数; G_K 为 PN 探测器对荧光 X 射线波长的灵敏度 [$\text{A}/(\text{J} \cdot \text{s}^{-1})$].

2 散射法测量 X 射线总剂量时间波形

采用散射法测量 X 射线总剂量时间波形是依据电子对 X 射线的 Compton 散射原理而建立起来的一种测试方法。当一束初始 X 射线照射到散射体上时, 入射的 X 射线与散射体的电子发生 Compton 散射, 入射 X 射线光子能量变化具有下列规律

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad (4)$$

$$\alpha = h\nu / (mc^2) \quad (5)$$

式中: $h = 6.6262 \times 10^{-34} (\text{J} \cdot \text{s})$, 为普朗克常数; ν, ν' 分别为入射、散射 X 射线的频率 ($1/\text{s}$); m 为电子的静止质量 (kg); c 为光速 (m/s); θ 为入射线与散射线的夹角。

在我们测试的 X 射线波段范围内 (光子能量小于 100keV), 计算表明 $\alpha < 0.03$, 在测试角度 $\theta = 90^\circ$ 时, $h\nu' \approx h\nu$ 可以近似认为入射 X 射线光子能量与散射 X 射线光子能量相同, 入射 X 射线的能谱经散射后没有发生变化, 只是强度有所衰减。这样就可以通过测量散射 X 射线的剂量时间波形准确地反映入射 X 射线的剂量时间波形。采用散射法测量, 要求 X 射线与材料的相互作用只有散射效应, 没有荧光效应。因此, 只有轻元素材料可以用做散射体。经过计算比较, 选用了两种厚度的聚乙烯 (CH_2) 薄膜做散射体材料, 以保证测到较好的信号波形。

散射 X 射线照度与入射 X 射线照度的关系为

$$E'_\lambda = E_\lambda N_e \frac{d\sigma}{d\Omega} \frac{1}{L^2} \epsilon_\lambda \quad (6)$$

式中: E'_λ 为经散射片后 PN 探测器位置处的 X 射线照度; E_λ 为入射到散射片上的 X 射线照度; N_e 为被照射到散射体的电子总数 (个); $d\sigma/d\Omega$ 为 θ 角度下的电子对 X 射线的微分散射截面 ($\text{cm}^2/\text{个}$); L 为 PN 探测器到散射体的距离 (cm); ϵ_λ 为与波长有关的散射衰减因子。

散射 X 射线由 PN 探测器接收转换成电流信号。信号电流的大小可表示为

$$I_X = E'_\lambda S_2 G_X d\lambda \quad (7)$$

式中: S_2 为散射靶受照面积 (cm^2); G_X 为 PN 探测器对不同波长 X 射线的灵敏度 [$\text{A}/(\text{J} \cdot \text{s}^{-1})$].

3 能谱及总剂量数据处理方法

3.1 能谱的数据处理

由于实验条件的限制, 通常只能测到有限的几个能点, 如果只利用所测到的几个能点进行曲线拟合, 所得到的能谱与测点的真实能谱存在较大的偏差。对于处于热平衡状态下的高温等离子体辐射, 近似处理为某一等效温度下的黑体谱。这样当窗口处的这种等效黑体谱经过空气等物质吸收后到达测点时, 能谱形状发生变化, 其变化规律可以表达为^[2]

$$E_\lambda = J_\lambda e^{-a\lambda^3} \quad (8)$$

式中: E_λ 为测点位置入射到荧光体上 (或散射体上) 波长为 λ 的实际单色照度; J_λ 为测点位置在没有衰

减情况下的理想单色照度; a 为测量时测试通道的衰减常数; λ 为波长 (nm)。

这样在实际测量中, 高能点(波长小于 0.15nm) 由于衰减很小, 就可以利用实测的高能点的单能时间谱峰值时刻的照度, 将窗口的等效黑体温度推算出来, 即得到窗口的等效黑体能谱, 再利用实测低能点的照度与没有衰减情况下的理想照度比较, 推算出衰减常数 a 值, 则可以获得峰值时刻测点处的能谱。依据这一规律进行能谱的曲线拟合, 对测点处的能谱积分可以做到更准确, 有利于计算总的辐照剂量。

3.2 总剂量的数据处理

获得测点处 X 射线总的辐照剂量的关键在于准确测量 X 射线的能谱和总剂量时间波形。由于测点的单能时间谱和散射法测到的总剂量时间谱峰值时刻是一致的, 因此对测点处的峰值时刻的能谱进行积分, 即是散射法测到的峰值时刻的剂量

$$q = E_{\lambda} \Delta \lambda \tag{9}$$

式中: q 为峰值时刻测点位置的能谱照度积分 [$J / (cm^2 \cdot s)$]; E_{λ} 为测点位置的波长为 λ 的实际单色照度; $\Delta \lambda$ 为积分时波长间隔 (nm)。

利用散射法测到的总剂量时间波形, 将其它点同峰值相比较, 再对时间积分, 则得到测点处的 X 射线总的辐照剂量

$$Q = q \frac{V_i}{V_{max}} \Delta t \tag{10}$$

式中: Q 为测点位置总的辐照剂量 (J/cm^2); V_i, V_{max} 分别为总剂量时间波形中某一时刻幅度和最大值; Δt 为积分时间间隔 (s)。

4 实验测量与结果

实验是在脉冲高温等离子体辐射源上进行的。设计了一根真空管道 (测量时真空度为 27Pa), 内设两道多孔铅光栏。选择了三对金属组合 Zn- Cu, Fe- Mn, Ti- Ca (前为滤波片, 后为荧光体), 安排了三个测试能点 0.133nm, 0.182nm, 0.278nm, 用来测量 X 射线能谱; 用两种厚度的聚乙烯 (CH_2) 薄膜做散射体材料测量 X 射线总剂量时间谱; 同时用 Zn- Zn, Ti- Ti 对 0.133nm 和 0.278nm 安排了本底监测探测器, 以扣除穿透滤波片的短波 X 射线以及散射 X 射线的影响。X 射线参数 (吸收片的透过率、荧光体的荧光效率、PN 探测器的灵敏度) 均在实验室用直流 X 光机、X 射线多道能谱测量系统、小电流计和电离室进行了标定, 标定条件 (波长、测量角度) 与测试条件一致。

实验获得了 0.133nm, 0.182nm, 0.278nm 单能时间谱 (图 2) 和总剂量 (图 3) 时间波形, 经数据处理后获得了测点的能谱 (图 4) 和总的辐照剂量 ($271J/cm^2$)。

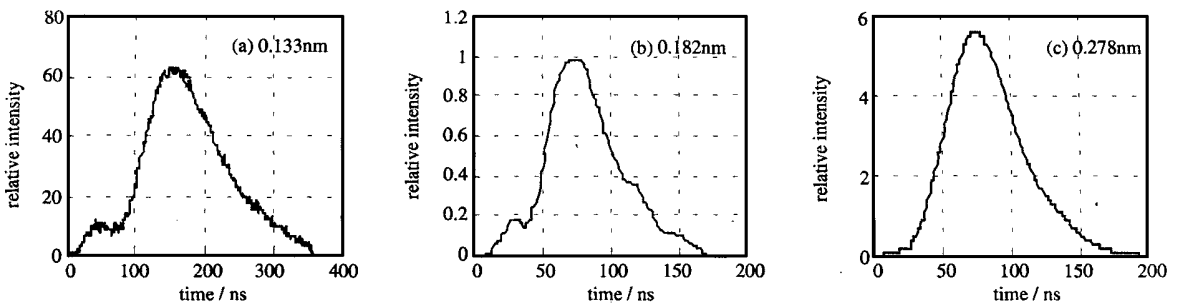


Fig. 2 Time waveform at different spot

图 2 不同测点处的单能时间谱

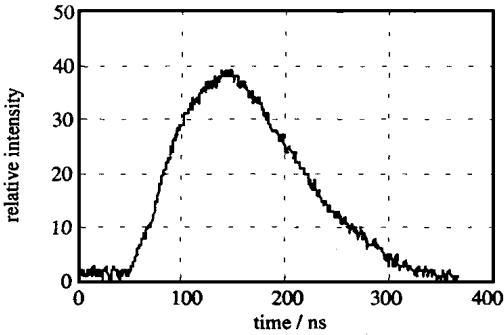


Fig 3 The total dose time waveform
图 3 总剂量时间波形

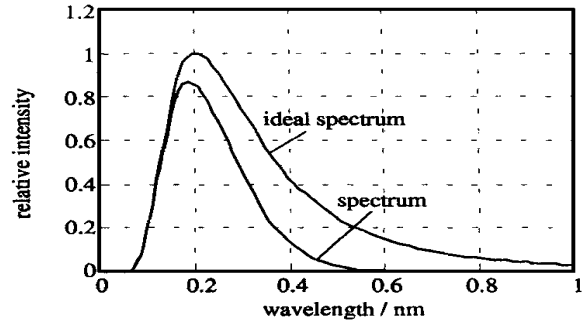


Fig 4 The measuring spectrum and the ideal spectrum at the spot
图 4 测点处实测能谱与理想能谱

5 不确定度

单色照度测量结果的不确定度是由测试通道上的每一部分构成, 根据不确定度传递规律进行计算。主要有: (1) 吸收片透过率不确定度 $\pm 3\%$; (2) A1 膜透过率不确定度 $\pm 3\%$; (3) 测量波长间隔的不确定度 $\pm 2\%$; (4) 测试波长和荧光波长的不确定度 $\pm 2\%$; (5) 光斑面积的不确定度 $\pm 2\%$; (6) 荧光效率不确定度 $\pm 10\%$; (7) 立体角不确定度 $\pm 1\%$; (8) PN 探测器的灵敏度不确定度 $\pm 10\%$; (9) 信号电流不确定度 $\pm 8\%$; 因此测点位置的单色照度的测量不确定度为 $\pm 17.2\%$ 。

总的辐照剂量的不确定度由以下几部分组成: 单色照度的测量不确定度 $\pm 17.2\%$; 根据能谱曲线拟合进行能谱积分不确定度估算为 $\pm 10\%$; 时间谱积分不确定度为 $\pm 10\%$; 总剂量的不确定度为 $\pm 23\%$ 。

6 结 论

采用滤波荧光法测量 X 射线能谱、散射法测量 X 射线总剂量的方法在高温等离子体实验中取得了成功, 测量结果具有时间分辨信息, 在分析等离子体参数和辐射应用中取得了较好结果, 测点处总剂量不确定度为 $\pm 23\%$ 。由于受到金属材料选择的限制, 测量温度、波长有一定的局限性。

参考文献:

- [1] 项志遵, 俞昌旋 高温等离子体诊断技术(下册)[M] 上海: 上海科学技术出版社, 1982 202~ 206
- [2] 詹金斯, 戴维斯 实用 X 射线光谱分析[M] 赵继良等译 北京: 中国有色金属分析情报网《光谱实验室》编辑部, 1986 15~ 18

A Diagnostic Method of X-ray Parameters on High-temperature Plasma

WANG Wen-sheng^{1,2}, GONG Jian-cheng², HE IDong-wei², QIU A ìcì², HE Duo-hui¹

- (1. University of Science and Technology of China, National Synchrotron Radiation Laboratory, Anhui 230026, China;
2. Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-12, Xi'an 710024, China)

ABSTRACT: In the paper, the principle of the scattering technique was applied in measuring the total X-ray dose and the filter-fluorescence was applied in measuring the X-ray spectrum on high-temperature plasma as described. The method of dealing with the X-ray spectrum and the total X-ray dose was established. The result of the experiment was got successfully. The uncertainty of the total X-ray dose at the measuring spot was about $\pm 23\%$.

KEY WORDS: plasma diagnosis; X-ray spectrum; X-ray dose