

文章编号: 1007-4627(2019)03-0313-09

ECR源低能强流高电荷态离子束四维发射度测量仪的研制

方兴^{1,2}, 孙良亭^{1,†}, 原有进¹, 钱程^{1,2}, 陈若富¹, 武军霞¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100034)

摘要: 为全面研究 ECR(Electron Cyclotron Resonance) 离子源引出的高电荷态离子束流品质, 获取 ECR 离子源引出离子束流的横向四维相空间分布, 提高向加速器的注入效率, 中国科学院近代物理研究所研制了一台高精度 Pepper Pot 型发射度测量仪 PEMiL (Pepper pot Emittance Meter in Lanzhou)。根据使用需求, 利用 KBr 晶体喷涂技术取代传统的 CsI 闪烁体成像技术, 解决了束流光斑重叠效应, 获得了边界清晰的束流图像; 并开发了相应的数据处理分析程序, 以分析处理得到的束流横向四维相空间分布。利用 PEMiL 获得了 75 keV, 170 eμA 的 O⁵⁺ 束流横向四维发射度。分析结果表明: PEMiL 测量分析后的束流发射度结果可靠性高, 荧光屏电荷累积效应造成的发射度差异不超过 25%, PEMiL 可作为 ECR 离子源引出离子束流品质诊断的有效装置。

关键词: 离子源; 四维发射度; 耦合; Pepper Pot; 重叠

中图分类号: O532.33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.03.313

1 引言

ECR 离子源是产生强流高电荷态离子束最有效的装置, 因此被广泛采用为大型重离子加速器装置的初级离子注入器^[1-3]。ECR 离子源源体^[4]的磁场主要由两部分构成: 螺线管或永磁环产生的轴向磁场, 与六极磁铁提供的径向磁场。通常情况下, 在 ECR 离子源束流引出区, 引出束流在轴向上经过一个磁场逐渐下降的半螺线管区域后, 紧接着又经过一个由初聚焦螺线管产生的螺线管场, 因离子绕磁力线作旋转运动导致束流横向相空间的耦合^[5]。另外, ECR 源引出束流是非对称束, 在引出区受到径向六极场杂散场与低能传输线传输元件的高阶场分量的影响, 会引起束流横向相空间分布的进一步畸变^[6], 从而导致束流发射度增长。发射度过大会使得束流在后续传输中产生相空间失配, 造成束流损失, 降低加速器的传输效率。因此, 系统研究 ECR 离子源束流横向相空间的特性, 特别是离子束四维发射度的研究, 不仅对深入了解 ECR 源特性意义重大, 对下游加速器的匹配分析也具有指导意义。

离子束横向发射度测量方法主要有拦截式和非拦截式。其中, 非拦截式测量方法包括三截面法^[7]、中性束荧光分析法^[8]等。三截面法虽然不需要独立的探测装置

测量离子束发射度, 但是其测量原理的前提是离子束传输过程中忽略了非线性力的影响, 并且通过传输矩阵的方式计算相椭圆参数, 不能获取离子束相空间分布。中性束荧光分析法通过质谱仪对离子束进行分析筛选后, 再搭配使用常规发射度装置对离子束中混合的中性束发射度进行测量, 该方法主要实现了主离子束中混合中性束的非拦截式测量。拦截式测量方法大部分都需要单独的测量装置来获取离子束位置、散角以及流强。这种方法的优点在于可以完整地获取离子束横向相空间分布。拦截式测量方法主要有双狭缝法^[9]、缝丝法^[10-11]、电扫描法^[12-13]以及孔屏法(Pepper Pot)。其中, 双狭缝法是通过两组独立可移动的狭缝分别获取离子束的位置以及散角, 后端法拉第筒测量的电流为离子束流强; 缝丝法中, 通过狭缝扫描获取离子束位置, 单丝多次扫描或多丝单次扫描获取离子束角度, 金属丝通过的电流为离子束流强; 电扫描法通过狭缝对离子束截面进行多次扫描获取离子束位置, 改变极板之间的电场使特定角度的离子束偏转进入后端法拉第筒, 测量的电流为离子束流强。这些拦截式方法均是通过逐行扫描的方式获取离子束横向单个方向的位置、散角以及流强信息, 尽管这些拦截式测量方法在各大实验室都得到了广泛应用, 但是由于其工作机制的限制, 这些测量方法只能直接获取

收稿日期: 2019-04-14; 修改日期: 2019-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11427904, 11575265)

作者简介: 方兴(1987-), 男, 安徽太湖人, 在职博士研究生, 从事离子源相关技术; E-mail: fangxing@impcas.ac.cn

† 通信作者: 孙良亭, E-mail: sunlt@impcas.ac.cn.

离子束横向二维投影发射度，无法对束流的横向四维发射度的情况进行准确探测与描述。

目前离子束横向四维发射度主要测量方法有重构法^[14]以及拦截式的孔屏法 (Pepper Pot)；其中，重构法是利用二维发射度测量装置分别获取轴向某一截面上水平和垂直方向的离子束空间分布以及斜方向空间分布，通过传输矩阵重构离子束四维特性矩阵，从而获取离子束四维发射度；但是重构法的工作机制仍然是通过传输矩阵的方法获取离子束四维发射度，并不能获取四维相空间分布，而且该方案需要通过线性传输元件与探测器共同参与测量，所需的轴向空间尺度较大，对于离子源低能传输段离子束四维发射度测量具有一定的局限性。孔屏法 (Pepper Pot) 作为拦截式测量的另外一种方法，是通过多孔采样的方法同时获取离子束水平以及垂直方向位置、散角以及束流密度信息，从而获得离子束完整的四维相空间分布以及四维发射度，而且 Pepper Pot 是独立的测量装置，硬件构造简单，是离子源引出高电荷态离子束耦合特性研究所需四维发射度测量最有效的方案。

Pepper Pot 发射度测量仪是可直接获取束流四维相空间分布的装置，其硬件结构通常由多孔板、荧光屏及图像获取系统组成。如图 1 所示，离子束经过多孔板后形成多股 beamlet 束^[15]，经过一段自由空间漂移后，与荧光屏上的晶体碰撞发出大量光子从而产生多个束流光斑，图像获取系统对束流光斑进行采集，通过对束流光斑图像进行分析处理，即可获取离子束的横向四维相空间分布。其中，多孔板上的小孔为束流位置采样点；beamlet 束中离子横向同一时刻水平和垂直方向的散角是通过束流光斑图像像素点的几何位置及多孔的几何位置获取的；束流光斑图像中每个像素点的灰度值代表了对应位置处的束流密度。经过三十多年的发展，根据硬件结构的不同，Pepper Pot 发射度测量仪可分为两种类型：单次测量型和多次扫描型。单次测量型的 Pepper Pot 发射度测量仪是传统结构，国际上大部分实验室均采用此结构^[16-19]。单次测量型的多孔板为多排阵列结构，在测量过程中只需进行单次插入，即可获取完整的束流光斑图像。其优势在于测量时间较短，且对于脉冲束流瞬时发射度的获取具有较大的便利性。多次扫描型 Pepper Pot 发射度测量仪是由荷兰 KVI (Kernfysisch Versneller Instituut) 在近几年研制的一种新构型^[20]，多次扫描型的多孔板为单排阵列结构，所以在测量过程中需要对束流横截面进行多次扫描才能获取离子束完整的束流光斑图像。与单次测量型结构相比较而言，多次扫描式 Pepper Pot 发射度测量

仪的优势在于可以改变扫描方向的步长从而提高相邻束流光斑之间的分辨率，缺点在于测量时间相对较长，对于脉冲粒子束瞬时发射度的获取具有一定的局限性。

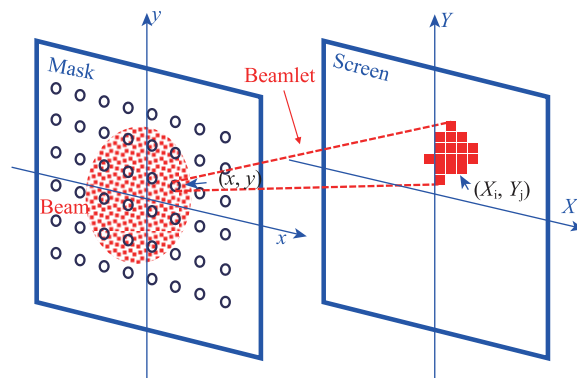


图 1 (在线彩图)Pepper Pot 测量原理示意图

本文针对离子源 LEBT 段直流及脉冲束流四维发射度在线快速测量的需求，研制一台单次测量型的 Pepper Pot 发射度测量仪，首次利用该测量仪获取氧离子束的四维相空间分布及相椭圆参数，并对测量结果进行讨论与分析。

2 PEMiL (Pepper Pot Emittance Meter in Lanzhou) 硬件结构

为满足离子源引出离子束耦合特性研究，中国科学院近代物理研究所研制的单次测量型的 Pepper Pot 发射度测量仪 PEMiL 的参数如表 1 所列。

表 1 PEMiL 主要技术参数

参数	设计值
束流种类	H~U
最大束流能量/(keV/u)	14
最大束流强度/mA	2
束流时间结构	CW & Pulse
最大探测包络/mm	30
最大散角/mrad	200
位置分辨率/mm	0.1
散角分辨率/mrad	3

从表 1 中可看出，PEMiL 需最大可满足 14 keV/u，2 mA 直流以及脉冲离子束流横向四维发射度测量。其中，可测量的离子束最大包络为 30 mm，最大散角为 200 mrad，位置分辨率为 0.1 mm，散角分辨率为 3 mrad。图 2 给出了 PEMiL 硬件实物图。其硬件结构主要由多孔板组件、荧光屏、45 度反射镜、CCD 相机以及驱动系统组成。

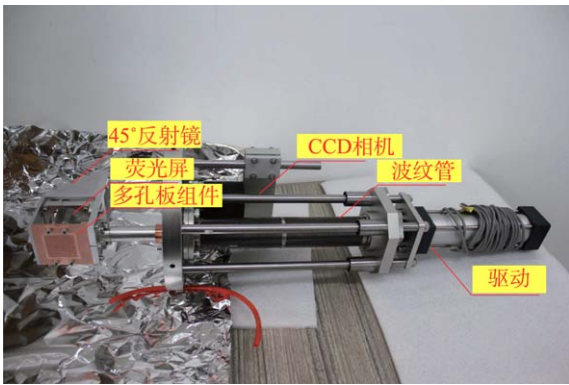


图2 (在线彩图)PEMiL硬件实物图

多孔板组件是Pepper Pot发射度测量仪硬件中重要的构成部件,主要用于离子束位置以及散角测量。中国科学院近代物理研究所PEMiL多孔板为夹层结构,夹层结构不仅可以增加多孔板的散热性能,还能提高多孔板与粒子束传输方向上的垂直度。多孔板组件中Mask的孔径为0.1 mm,厚度为0.1 mm,由于多孔板组件为夹层结构,所以束流发射度测量截面的采样点数目是由多孔板组件的前盖板的孔数量(11×11)决定的。另外,前盖板几何中心小孔是封闭的,这是因为封闭的盖板中心使束流图像的几何中心形成小部分暗区,用来确定多孔与束斑之间的对应关系。

PEMiL角度分辨率 $\Delta r'$ 是通过式 $\Delta r' = s/L$ 获取的,其中, s 为束流图像像素点尺寸, L 为与多孔板与荧光屏之间的距离,变化范围为10~40 mm。多孔板与荧光屏之间的距离越大,角度分辨率越高,但是光斑之间的分辨率越低,相邻光斑越容易产生重叠效应。所以在实际实验过程中,多孔板与荧光屏之间的距离应优化在合适的间距,既能确保PEMiL具有较高的角度分辨率,同时相邻光斑之间具有较好的空间分辨。PEMiL使用的CCD相机分辨率为958×958,像素点的尺寸为0.0522 mm×0.0522 mm;多孔板与荧光屏之间的距离为10 mm时,水平方向的分辨率最高为1.3 mrad,垂直方向的分辨率最高为1.3 mrad;多孔板与荧光屏之间的距离为40 mm时,水平方向的分辨率最低为5.2 mrad,垂直方向的分辨率最低为5.2 mrad。通过优化多孔板与荧光屏之间的距离,可满足角度分辨率的需求。

荧光屏是Pepper Pot发射度测量仪中用来产生束流光斑的部件,图3为荧光屏实际束流光斑成像。其中,无机闪烁体作为Pepper Pot发射度测量仪的荧光屏^[17-20]虽然应用较广,但是在无机闪烁体成像过程中,由于相邻晶格键受二次电子影响产生杂散光

子,如图3(a)所示,束流光斑边缘向四周扩散,使得相邻光斑之间产生边界重叠现象,影响后续图像处理。PEMiL束流光斑成像方案是利用KBr晶体粉末涂层代替无机闪烁体成像,晶体粉末宏观上是相互独立开来的,有效避免了相邻晶格键之间受二次电子的影响导致束流光斑重叠效应的现象。如图3(b)所示,获取了边界清晰的束流光斑图像。

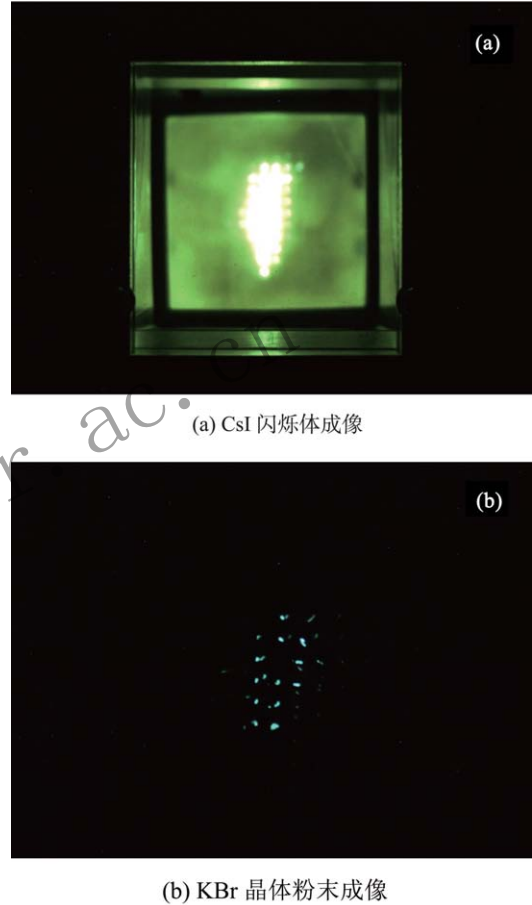


图3 (在线彩图)束流光斑图像

3 数据处理分析方法

Pepper Pot发射度测量仪数据处理的对象是粒子束光斑图像,图4给出了Pepper Pot发射度测量仪的图像处理与分析方法流程图,主要包括噪声处理、网格划分与有效图像区截取和相空间分布计算。其中,图像噪声处理的主要对象是相机背景噪声和系统环境噪声;束流图像经过噪声处理后,通过划分网格的方法确定束流光斑与多孔之间的对应关系,并去除无效的网格后获取有效束流图像;通过对有效束流图像的处理分析即可获取粒子束的四维相空间分布 $\rho(x, x', y, y')$ 及耦合发射度等相椭圆参数信息。

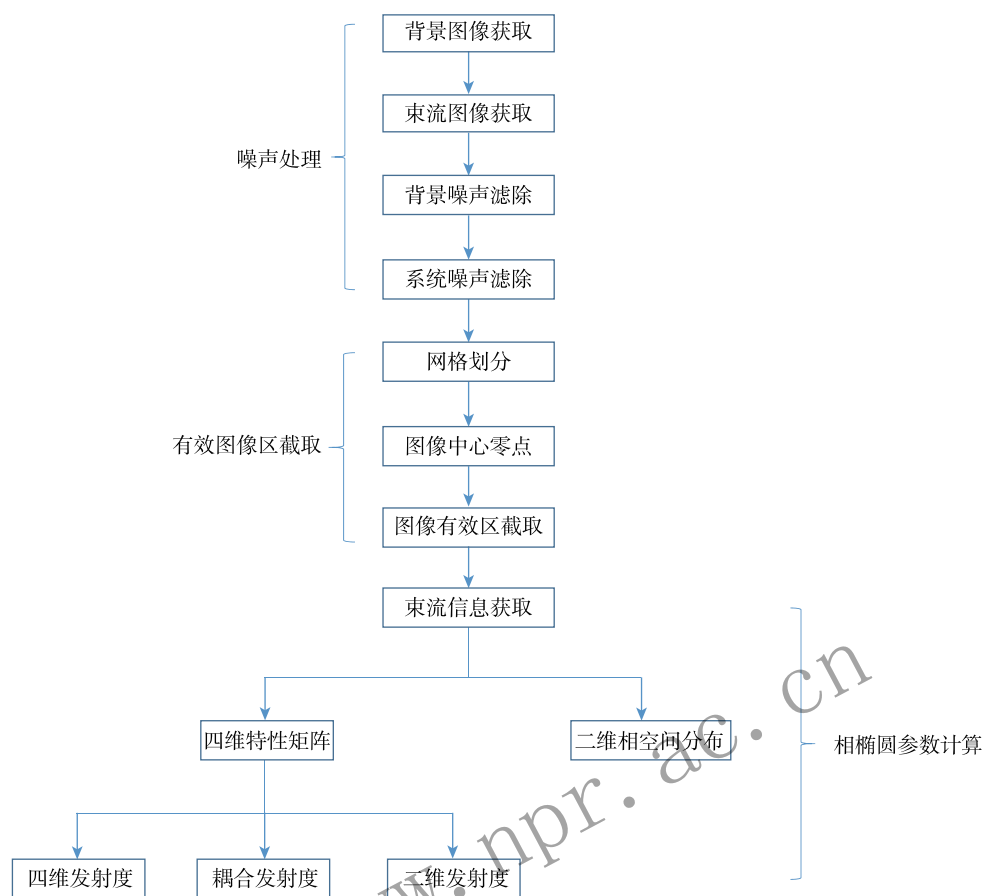


图 4 数据处理与分析的具体方法步骤

3.1 图像噪声处理

CCD 相机曝光后的束流光斑图像噪声来源主要有两个方面：一方面是由于 CCD 相机硬件自身导致的图像噪声，这部分噪声称为背景噪声；另一方面是由于测量环境影响导致的随机噪声，这部分噪声也称为高斯噪声。其中，背景噪声的位置在束流图像往往是固定的，且噪声幅度随着相机参数的变化而变化；背景噪声具体处理方法是首先获取有束流轰击的束流原始图像，再在相同的放大倍数和相同的曝光时间的条件下获取无束流轰击的暗区图像，束流原始图像扣除暗区图像即可滤除图像背景噪声。高斯噪声的位置和幅度在束流图像上是随机产生的，PEMiL 的处理方法是使用 3×3 中值滤波器对图像的高斯噪声进行滤除。图像噪声处理还包括阈值处理，通常阈值的选择是小于全部像素点最大灰度值的 $2\% \sim 5\%$ ，小于阈值的灰度值清零，大于阈值的灰度值完全保留。图 5(a) 给出了噪声处理前后水平方向灰度值分布，从图 5(a) 中可看出，束流原始图像信噪比为 16% ，相应地，图 5(b) 所示的束流原始图像的噪声较强，通过此图所示的束流原始图像处理得到的横向相

空间分布结果将与实际结果存在较大的差别。经过背景噪声和高斯噪声处理后，束流图像的信噪比降为 4% 左右，再经过阈值处理后，束流图像的信噪比下降为 0 ；从图 5(c) 所示经过噪声处理后的束流图像中可看出，经过噪声处理后，束流的噪声较弱，束流光斑之间的分界明显，可通过该图像进行相应的处理获取与束流实际情况相接近的横向相空间分布。

3.2 网格划分与有效束流图像获取

束流图像中光斑与多孔之间的对应关系是通过对束流图像进行网格划分来实现的。图像网格划分的准则是单个网格内有且仅有一个束流光斑；再利用多孔板几何中心产生的暗区确立网格与孔之间的对应关系，下面将详述束流网格划分及有效束流图像获取的方法。

(1) 根据荧光屏的外形尺寸获取如图 6(a) 最大尺寸边界的束流图像。

(2) 通过束流图像灰度分布相邻峰之间的图像坐标差值的平均推导得出网格水平尺寸 h_g 和垂直尺寸 v_g 。具体的计算方法如下：

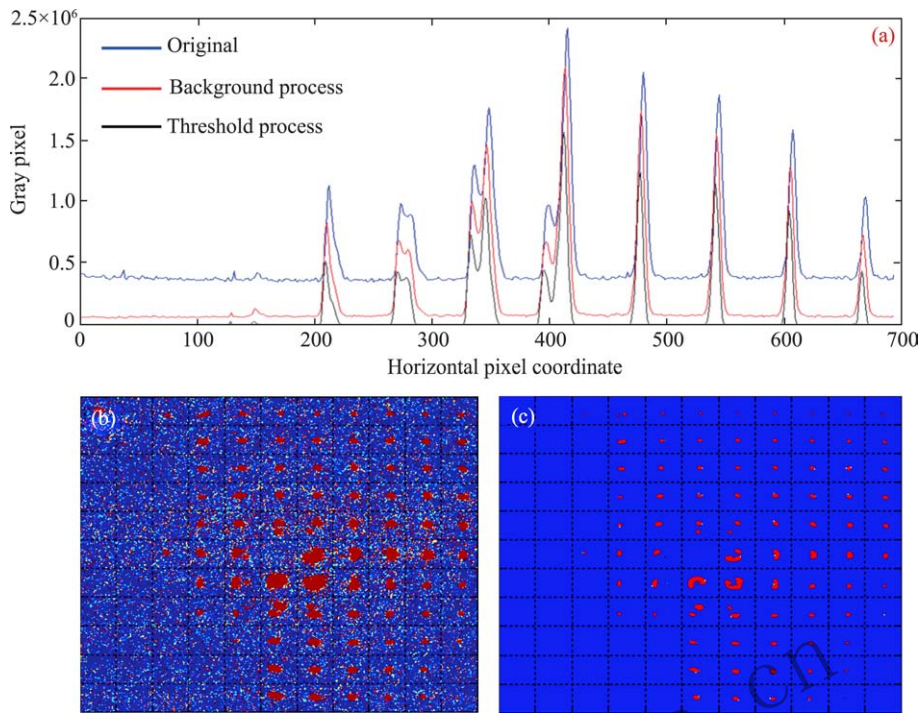


图 5 (在线彩图) 水平方向灰度值分布 (a) 灰度值分布, 横轴为水平方向像素点位置坐标, 纵轴为同一个像素点位置坐标上灰度值总和; (b) 噪声处理前的束流图像; (c) 噪声处理后的束流图像。

$$\begin{aligned}
 h_s &= \frac{1}{n_x - 1} \sum_{i=1}^{n_x-1} x_{p_{i+1}} - x_{p_i} \\
 v_s &= \frac{1}{n_y - 1} \sum_{i=1}^{n_y-1} y_{p_{i+1}} - y_{p_i}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

式中: n_x 是水平方向灰度值分布峰的个数; x_p 是水平方向灰度分布峰坐标; n_y 是垂直方向灰度值分布峰的个数; y_p 是垂直方向灰度分布峰坐标。

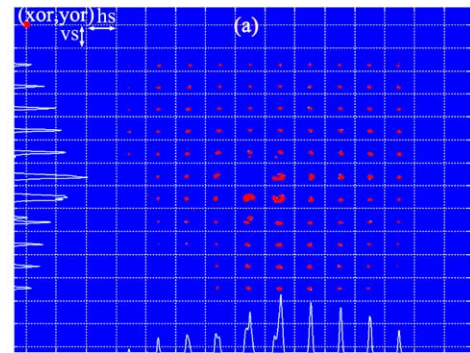
如图 6(a), 网格划分的起始点有可能不是图像的原点(图像坐标的原点是图像的左上角), 故还需要计算初始点位置坐标 (x_o, y_o) 。网格划分初始点坐标是通过取水平和垂直方向像素点个数与相邻峰横坐标的中间值之间的余数实现的, 具体的计算方法如下:

$$\begin{aligned}
 x_n &= \frac{1}{n_x - 1} \sum_{i=1}^{n_x-1} \left(\frac{x_{p_i} + x_{p_{i+1}}}{2 \cdot h_s} \right) \dots \dots x_o \\
 y_n &= \frac{1}{n_y - 1} \sum_{i=1}^{n_y-1} \left(\frac{y_{p_i} + y_{p_{i+1}}}{2 \cdot v_s} \right) \dots \dots y_o
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

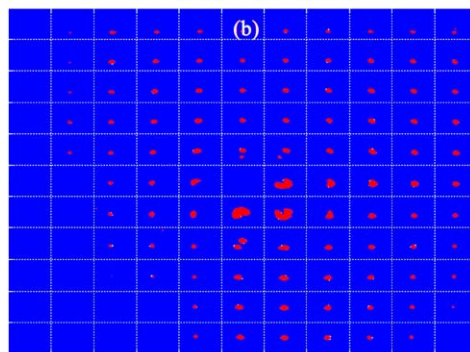
式中: x_n 是水平方向网格的个数; n_x 是水平方向灰度值分布峰的个数; x_p 是水平方向灰度分布峰坐标, h_s 是水平方向网格的尺寸; y_n 是垂直方向网格的个数; n_y 是垂直方向灰度值分布峰的个数; y_p 是水平方向灰度分布峰坐标; v_s 是垂直方向网格的尺寸。

网格划分完成后, 根据多孔板组件采样孔的个数(采样孔的个数由多孔板组件前端板孔的数量决定, 具

体的数量为 11×11 个) 获取图 6(b) 所示的有效束流图像, 后续横向相空间分布是通过此图分析处理后获取的。



(a) 原始图像网格划分



(b) 处理后的 11×11 网格图像

图 6 (在线彩图) 束流图像的网格划分

3.3 相空间参数计算

根据图 6(a) 束流原始图像的尺寸 (荧光屏的外径为图像的几何尺寸) 将其图像坐标 (s_h, s_v) 转换成实际坐标 (X, Y) , 图像坐标和实际坐标之间的转换关系为 (d 是荧光屏的径):

$$\begin{aligned} X &= -\frac{d}{2} + \frac{d}{s_h - 1} \cdot (i - 1), i = 1, 2, \dots, s_h, \\ Y &= -\frac{d}{2} + \frac{d}{s_v - 1} \cdot (j - 1), j = 1, 2, \dots, s_v. \end{aligned} \quad (3)$$

粒子的角度是通过公式 $r' = (R - r)/L$ 计算得出, R 指的是有效束流图像中像素点的实际坐标值, r 指的是多孔的实际坐标值, L 指的是多孔板与荧光屏的距离。其中, 有效束流图像像素点的实际坐标的获取方法是通过截取图 6(a) 所示束流图像的实际坐标矩阵来实现的。

束流四维特性矩阵元素值是通过统计的方法^[15]得出的, 四维特性矩阵 σ_{4D} 为

$$\sigma_{4D} = \begin{pmatrix} \langle xx \rangle & \langle xx' \rangle & \langle xy \rangle & \langle xy' \rangle \\ \langle xx' \rangle & \langle x'x' \rangle & \langle x'y \rangle & \langle x'y' \rangle \\ \langle xy \rangle & \langle x'y \rangle & \langle yy \rangle & \langle yy' \rangle \\ \langle xy' \rangle & \langle x'y' \rangle & \langle yy' \rangle & \langle y'y' \rangle \end{pmatrix}. \quad (4)$$

离子束四维特性矩阵中, 束流横向相空间耦合项为

$$\begin{aligned} \langle xy \rangle &= \frac{\sum \langle x - \bar{x} \rangle \cdot \langle y - \bar{y} \rangle \cdot \rho}{\sum \rho}, \\ \langle xy' \rangle &= \frac{\sum \langle x - \bar{x} \rangle \cdot \langle y - \bar{y}' \rangle \cdot \rho}{\sum \rho}, \\ \langle x'y \rangle &= \frac{\sum \langle x' - \bar{x}' \rangle \cdot \langle y - \bar{y} \rangle \cdot \rho}{\sum \rho}, \\ \langle x'y' \rangle &= \frac{\sum \langle x' - \bar{x}' \rangle \cdot \langle y - \bar{y}' \rangle \cdot \rho}{\sum \rho}. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: x, y 为束流采样点位置, 即多孔板的几何位置; x', y' 为离子束的散角; ρ 为像素点的灰度值。四个耦合项代表了离子束横向相空间的耦合程度, 耦合项绝对值越大, 离子束在对应的相空间中耦合越强, 只有当所有的耦合项数值为零时, 束流才是解耦合状态。

离子束的横向四维发射度为

$$\varepsilon_{4D} = |\sigma_{4D}|^{1/2}. \quad (6)$$

综上所述, 通过式 (4) ~ (6) 可获取离子束完整的四维特性矩阵, 所有耦合项信息以及离子束横向四维发射度, 将为束流动力学研究提供相对精确的数值参考。

4 测量结果与分析

本次 PEMiL 测试实验中, 中国科学院近代物理研究所 LECR4 实验平台^[21-22]提供了 75 keV, 170 eμA 的 O^{5+} 束流, 利用该束流对探测器的数据处理方法进行了验证。图 7 为 PEMiL 获取的束流光斑图像, 从图中可看出, 束流图像中束流斑点之间的边界清晰, 相邻光斑之间无相互重叠的现象, 可利用该图像获取束流的四维发射度。

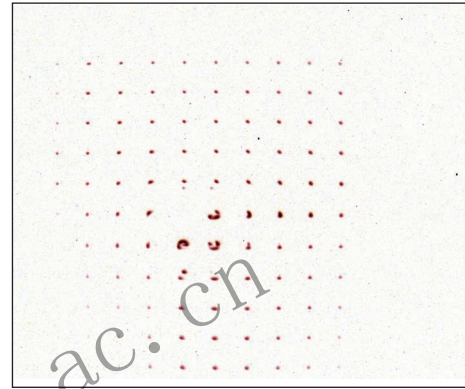


图 7 (在线彩图)束流光斑图像(G01 螺线管电流值为 125 A, G01 螺线管电流值为 95 A)该图为经过图像反色处理后的图像, 原图背景为黑色

图 8 为利用上述图像经过数据分析处理后的 O^{5+} 束流二维相空间分布及相椭圆参数结果。其中, 横向水平方向的均方根发射度为 $35.26 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$, 垂直方向的均方根发射度为 $34.30 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$, 二维发射度的结果符合 ECR 离子源引出束流的特性, 证明 Pepper Pot 发射度测量仪硬件设计合理, 数据分析方法可行性高, 适用于粒子束的发射度测量研究。

从式 (5) 可看出, 束流横向相空间共有 4 个耦合项, 分别是 $\langle xy \rangle$ 、 $\langle xy' \rangle$ 、 $\langle x'y \rangle$ 与 $\langle x'y' \rangle$ 。其中, 耦合项数值的大小代表了束流在相应相空间中的耦合程度, 耦合项数值越大, 束流耦合程度越强, 反之耦合程度越弱。只有束流 4 个耦合项数值都为零时, 束流才是解耦合状态。图 7 所示 O^{5+} 束流图像经过分析处理后的四维特性矩阵 σ_{4D} 为

$$\sigma_{4D} = \begin{pmatrix} 32.8047 & 86.5196 & 1.69878 & 8.3382 \\ 86.5196 & 259.904 & -0.7582 & 6.7420 \\ 1.69878 & -0.7582 & 40.2801 & 84.2627 \\ 8.3382 & 6.7420 & 84.2627 & 205.486 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

从束流的四维特性矩阵可看出, O^{5+} 束流横向相空

间所有耦合项 $\langle xy \rangle$ 、 $\langle x'y' \rangle$ 、 $\langle x'y \rangle$ 与 $\langle x'y' \rangle$ 的数值分别为 1.698 78, 8.338 2, -0.758 2, 6.742 0, 耦合项的数值接近于零, 表明 O^{5+} 束流在本次实验条件下横向相空间的耦合较弱。图 9 为 O^{5+} 束流横向耦合

相椭圆, 从图中可看出, 相椭圆旋转角^[15]最大为 0.068 rad, 最小仅为 0.001 rad, 耦合相椭圆几乎为正椭圆, 说明 O^{5+} 束流耦合程度较弱, 分析结果与横向四维特性矩阵中耦合项所反映的束流耦合状态一致。

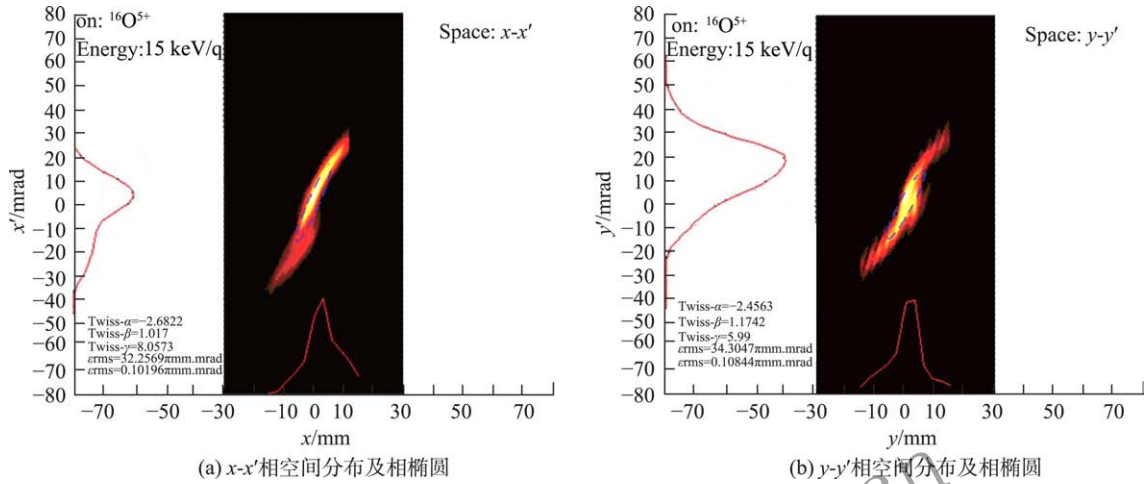


图 8 (在线彩图) O^{5+} 束流横向相空间分布

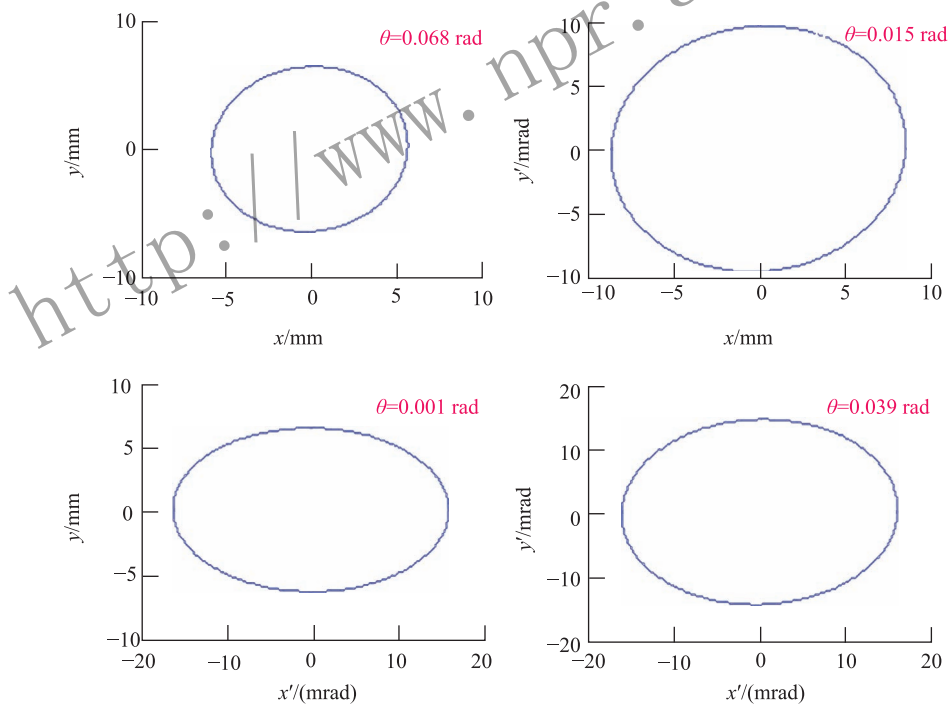
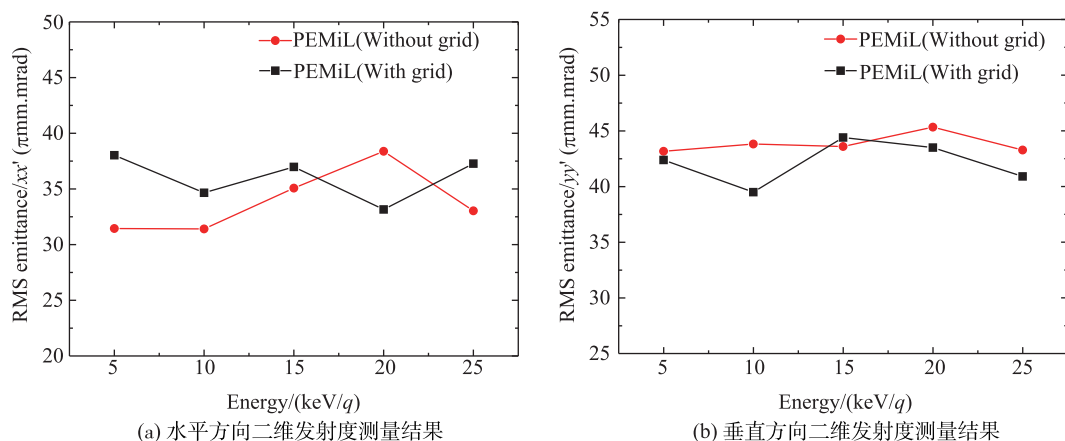


图 9 (在线彩图) O^{5+} 束流耦合相椭圆

离子束与荧光屏相互作用过程中, 由于 KBr 晶体粉末的绝缘性, 荧光屏表面会积累大量的电荷, 累积的电荷与晶体相互作用产生额外的光子, 使得实际的束流光斑直径变大, 对离子束二维发射度测量结果造成一定的影响。为了减弱累积电荷对发射度结果的影响, 在荧光屏的表面增加一层金属栅网, 用于提高累积电荷的扩散效率。图 10 给出了不同离子束能量范围下增加

金属栅网后二维发射度测量结果对比, 从图中可以看出, 荧光屏表面有无金属栅网水平方向二维发射度结果最大差异约为 25%, 垂直方向最大差异约为 6.25%。由于 PEMiL 发射度结果不仅与荧光屏累积电荷效应相关, 还与探测器外部参数以及数据处理方法相关, 而上述发射度结果仅为累积电荷效应初步的实验对比结果, 后续将对电荷累积效应进行详细的系统研究。



(a) 水平方向二维发射度测量结果

(b) 垂直方向二维发射度测量结果

图 10 (在线彩图) 不同能量离子束电荷累积效应影响, 其中红线为不加金属栅网实验结果, 黑线为增加金属栅网实验结果

5 结论与展望

中国科学院近代物理研究所成功研制了一套可用于低能量强流高电荷态离子束 4D 发射度诊断的 Pepper Pot 型发射度测量仪 PEMiL, 在 LECR4 离子源低能传输段首次实现了 O^{5+} 束流的四维相空间分布的测量, 获取了 O^{5+} 束流完整耦合项信息。并通过耦合项数值的大小, 分析判断了束流在横向相空间的耦合程度。实验分析结果表明, PEMiL 发射度测量仪可获取无重叠效应的束流光斑图像, 且数据分析方案可行性高, 后续可用作束流横向相空间耦合及脉冲离子束流品质研究的四维发射度测量装置。计划在十二大科学装置 HIAF 的低能量束流段设计装配, 为直线加速器的高效匹配提供条件。下一步工作中, 可增加多孔板的采样点个数, 增大其探测面积, 使其适用于更大包络的束流发射度测量; 另外, 将针对荧光屏的电荷累积效应进行进一步的深入系统研究。

参考文献:

- [1] ZHAO H W, SUN L T, ZHANG X Z, *et al.* *Review of Scientific Instruments*, 2006, **77**(3): 03A333.
- [2] LEITNER D, LYNEIS C M, LOEW T, *et al.* *Review of Scientific Instruments*, 2006, **77**(3): 03A302.
- [3] NAKAGAWA T, YANO Y. *Review of Scientific Instruments*, 2000, **71**(2): 637.
- [4] GIRARD A, MELIN G. *Nucl Instr and Meth A*, 1996, **382**(1-2): 252.
- [5] YANG Y, YUAN Y J, SUN L T, *et al.* *Review of Scientific Instruments*, 2014, **85**(11): 113305.
- [6] SUN L T, LU W, YANG Y, *et al.* ECRIS Developments Towards Intense High Brightness Highly-charged Ion Beams [C]// McCausey A and Schaa V ed. Proceedings of HB2014. USA: Michigan State University. 2014: 363.
- [7] ZHAO H W. Beam Emittance Measurement on HIRFL[M]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 1991(4): 37. (in Chinese)
- [8] REN H T, PENG S X, ZHAO J, *et al.* A Non-Intercepting Beam Emittance Measurement Device Based on Neutral Beam Fluorescence Method at PKU[C]. Ian Martin and Guenther Rehm ed. Proceeding of IBIC2013, UK: Oxford. 2013: 522.
- [9] YU L D, ZHAO J X, SUI Y F, *et al.* Design and Application of Double-slit Emittance Meter for C-ADS Proton Beams[C] // CHRISTINE P, KIM D E, KIM K S, *et al.* ed. Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea. 2016: 164.
- [10] POGGE F J, SNS Emittance Scanner, Increasing Sensitivity and Performance Through Noise Mitigation, Design, Implementation and Results[C]// Meyer T S and Webber R C ed. Proceedings of Beam Instrument Workshop. USA: Oak Ridge National Laboratory. 2006: 435.
- [11] ZHANG A L, REN H T, PENG S X *et al.* *Chinese Physics B*, 2018, **27**(2): 025205.
- [12] STOCKLI M P, WELTON R F, KELLER R, *et al.* *Review of Scientific Instruments*. 2006, **77**(3): 03B706.
- [13] CAO Y, ZHAO H W, MA L, *et al.* *Review of Scientific Instruments*, 2004, **75**(5): 1443.
- [14] XIAO C, MAIER M, DU X N, *et al.* *Physical Review Accelerators and Beams*, 2016, **19**: 072802.
- [15] STOCKLI M P. Measuring and Analyzing the Transverse Emittance of Charged Particle Beams[C]// MEYER T S, WEBBER R C ed. Proceedings of Beam Instrument Workshop. USA: Oak Ridge National Laboratory. 2006: 25.
- [16] STROHMEIER M, BENITEZ J Y, LEITNER D, *et al.* *Review of Scientific Instruments*, 2010, **81**(2): 02B710.
- [17] DOMKE M, DORN C, FORCK P, *et al.* A Single Shot Emittance Measuring System for Intense Heavy Ion Beams[C]// GHIGO A, GIABBAI M, POSSANZA M, ed. European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators, Italy: Frascati. 1997: 141.
- [18] KONDRASHEV S, BARCIKOWSKI A, MUSTAPHA B, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2009, **606**(3): 296.
- [19] NAGATOMO T, TZOGANIS V, KASE M, *et al.* *Review of*

- Scientific Instruments, 2016, **87**(2): 02B920.
- [20] KREMERS H R, BELJERS J P M, BRANDENBURG S. *Review of Scientific Instruments*, 2013, **84**(2): 025117.
- [21] LU W. Design, Construction and Optimization of High-B Mode Ecr Ion Sources[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013(10): 100. (in Chinese)
(卢旺. High-B模式ECR源的设计、研制及优化[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2013(10): 100.)
- [22] ZHANG X H, YUAN Y J, YIN X J, *et al.* Analyzing and Matching Study of Mixed High Intensity Highly Charged Ion Beams[C]//ESHRAQI M ed. Proceedings of the 57th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity, High Brightness and High Power Hadron Beams. Sweden: European Spallation Source. 2016: 422.

Development of a Four-dimensional Emittance Meter for the Diagnostics of High Intensity Highly Charged Ion Beam From an Electron Cyclotron Resonance Ion Source

FANG Xing^{1,2}, SUN Liangting^{1,†}, YUAN Youjinjin¹, QIAN Cheng^{1,2}, CHEN Ruofu¹, WU Junxia¹

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To study the four-dimensional (4D) emittances of the ion beams extracted from a highly charged ion source, so as to improve the ion beam coupling efficiency to downstream accelerators, a Pepper Pot type emittance probe PEMiL (Pepper pot Emittance Meter in Lanzhou) has been developed at Institute of Modern Physics (IMP). Based on the application requirements, the typical parameters of PEMiL have been refined. In the development, we utilized a quartz glass target sprayed uniformly with KBr powder as the scintillator instead of the traditional CsI scintillator to mitigate the overlapping effect of ion beam spot images, which has been validated with the measured results that the beam spot overlapping error vanishes and clear boundary spots has been obtained. For this 4D emittance probe, corresponding data processing and analyzing code has also been developed, so as to give the detailed transverse beam quality information of the incident beam in 4D phase space. In this paper, we will present the technical details about the structure design, fabrication and data processing of PEMiL. The preliminary test results of a 75 keV, 170 μA O^{5+} beam emittance will also be measured. The analysis results show that beam emittance measured by PEMiL reveals a high reliability, the emittance difference that was caused by the charge accumulation effect of scintillator is lower than 25%, and PEMiL can be used as an efficient meter for the ECR ion source extracted beam property diagnostic.

Key words: ion source; coupling; 4D emittance; Pepper Pot; overlapping

Received date: 14 Apr. 2019; Revised date: 11 Jun. 2019

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11427904, 11575265)

† Corresponding author: SUN Liangting, E-mail: sunlt@impcas.ac.cn.