

文章编号: 1007-4627(2013)04-0413-07

## 高电荷态 ECR 离子源引出束流 4D 发射度测量仪设计

赵阳阳<sup>1,2</sup>, 赵红卫<sup>1</sup>, 孙良亭<sup>1</sup>, 杨尧<sup>1,2</sup>, 王云<sup>3</sup>, 曹云<sup>1</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230027)

**摘要:** 为了进一步探究高电荷态电子回旋共振 (ECR) 离子源引出束流品质和横向相空间耦合情况, 根据中国科学院近代物理研究所高电荷态离子源引出束流发射度测量需求, 针对束流流强为  $1\ \mu\text{A}\sim 1\ \text{mA}$ , 能量范围为  $10\sim 35\ \text{keV}/q$  的直流或脉冲高电荷态重离子束, 设计了一台实时四维 Pepper-pot 发射度测量仪。该 Pepper-pot 型发射度测量仪具有响应时间快和工作范围宽等特点。针对强流重离子束诊断的特点, 在结构与材料选择上做了设计与优化, 并对获得图像的处理方法提出了具体的解决办法。

**关键词:** 高电荷态离子; ECR 离子源; 4D 发射度; Pepper-pot 型发射度测量仪; 数字图像

**中图分类号:** TL56; TL506      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.04.413

### 1 引言

高电荷态电子回旋共振 (ECR) 离子源具有工作寿命长、束流强度大、稳定性高、发射度小及重复性好等优点, 已经广泛应用于重离子加速器。目前, 国际上许多大型重离子加速器均采用该类型离子源。例如, 美国 LBNL 的 88 in (1 in = 2.54 cm) 回旋加速器<sup>[1]</sup>采用两台常规 ECR 离子源与一台超导高电荷态 ECR 离子源 VENUS<sup>[2]</sup>作为注入器, 德国 GSI 的加速器装置也采用 14.5 GHz 的 CAPRICE 常规离子源作为注入器<sup>[3]</sup>。为了满足兰州重离子加速器的需要, 中国科学院近代物理研究所自 1986 年起开始研制高电荷态 ECR 离子源, 先后研制成功了数台高性能常规 ECR 离子源<sup>[4]</sup>, 并于 2005 年研制成功了具有国际先进水平的全超导 ECR 离子源 SECRA<sup>[5]</sup>。

高电荷态 ECR 源中, 等离子体被约束于轴向磁场与径向多极场叠加而成的最小  $B$  磁场结构中, 电子通过电子回旋共振被入射微波电场所加热, 热电子逐级剥离原子外层电子产生高电荷态离子。离子源引出孔处于较高的轴向磁场中, 并受六极场的影响, 引出束流横向  $(x, x')$  与  $(y, y')$  相平面发射度耦合,

即 4D 束流矩阵<sup>[6]</sup>存在耦合项  $xy'$  和  $x'y$ 。一般的 2D 发射度测量仪, 如 Allison 型发射度测量仪<sup>[7]</sup>只能分别探测到横向  $(x, x')$  与  $(y, y')$  相平面的 4D 投影发射度, 并不能完全反映束流特性。Pepper-pot 型发射度测量仪是孔屏法测量束流发射度的典型应用, 可以记录较全面的横向相空间  $(x, x', y, y')$  信息, 由此得到束流的 4D 发射度, 能充分反映束流横截面分布及横向运动趋势。另外, 它还具有测量时间短, 可实现对束流的准无损测量, 设备本身热量积累少, 可测量的束流能量范围较大等特点。但早期的 Pepper-pot 型发射度测量仪分辨率受到硬件设备与图像处理的限制, 其测量精度不如 Allison 型发射度测量仪高。随着 CCD 传感器和数字图像处理技术的发展, Pepper-pot 型发射度测量仪逐渐在国际上流行起来。例如, 德国 GSI 的 HITRAP 项目用 Pepper-pot 装置测量了 RFQ 入口处束流发射度<sup>[8]</sup>, 英国 RAL 的 FETS 装置上的 Pepper-pot 型发射度测量仪<sup>[9]</sup>, 美国 ANL<sup>[10]</sup>和 LBNL<sup>[11]</sup>用 Pepper-pot 型发射度测量仪测量了 ECR 离子源引出束流发射度。为满足中国科学院近代物理研究所高电荷态 ECR 离子源引出束流 4D 发射度的测量需求, 针对流强为 1

收稿日期: 2013-01-07; 修改日期: 2013-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11275239, 10921504)

作者简介: 赵阳阳(1987-), 女, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 从事核技术及应用研究; E-mail: zhaoyangyang10@impcas.ac.cn.

通信作者: 孙良亭, E-mail: sunlt@impcas.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>

$\mu\text{A} \sim 1 \text{ mA}$ , 能量范围为  $10 \sim 30 \text{ keV}/q$  的高电荷态离子束, 设计了一台 Pepper-pot 型发射度测量仪。本文完成了测量仪的设计方案, 给出了 4D 发射度测量仪的基本工作原理以及数据获取与处理的基本方法。

## 2 4D 发射度测量仪设计方案及原理

Pepper-pot 型发射度测量系统主要由测量仪、控制系统及数据采集系统组成, 结构和原理如图 1 所示。测量仪由针孔板、微通道板 MCP (MCP 是一种电子倍增器件, 在确定的电压下有固定增益, 有较高的位置分辨率)、荧光靶、反射镜和 CCD 摄像机组成。发射度仪装在竖直方向或水平方向的测试室端口上, 工作时通过驱动杆来实现探头部分沿垂直于束流传输方向迅速进入到管道中央。束流打在针孔板上, 经针孔板取样的离子束流打到微通道板 MCP 上形成电子倍增, 微通道板上发射出的电子打在荧光靶上产生光斑, 光信号经过反射镜反射进入 CCD 摄像机, 由 CCD 相机记录数据。

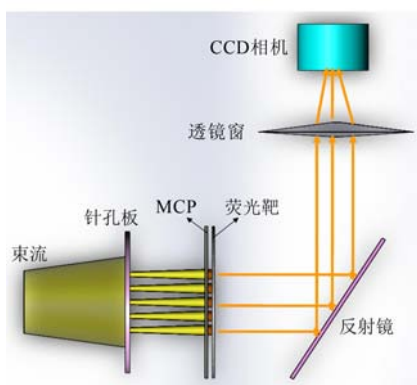


图 1 (在线彩图) Pepper-pot 型发射度测量仪原理图

设针孔板上取样小孔阵列的孔径足够小, 可近似视为一点, 则小孔就作为束流的位置取样, 针孔板足够薄, 可认为各个方向散角的离子都能通过小孔。经过针孔板取样的离子束流作用到 MCP 上, 在 MCP 微孔中产生二次电子并在微孔中倍增输出电子流, 为了减小从 MCP 出射电子的发散并提高荧光靶的发光效率, 需给荧光靶施加正电压, 让出射电子加速获得一定能量且打到荧光靶上, 荧光靶上发出一系列光斑信号。由于引出束能量是确定的, 则认为荧光靶不同位置发光强度和离子密度成正比, 光信号直接反映了离子的位置分布与密度分布。CCD 摄像机通过荧光靶后面  $45^\circ$  角放置的反射镜获取荧光靶上光斑图像, 然

后图像采集卡将获得的数字图像传输到计算机。最后利用图像处理软件分析和处理数字图像得到束流相图。

在 Pepper-pot 型发射度测量仪得到的图像中不同小光斑之间没有相互叠加的 (若存在叠加, 可以调整针孔板与 MCP 距离重新获取图像) 条件下, 通过标定将每个小光斑与针孔板小孔位置一一对应, 即小光斑相对于坐标原点 (主束流剖面中心) 的位置  $(x, y)$  可由此确定。设小光斑中不同像素点相对于对应小孔中心位置的偏移量为  $(\delta x, \delta y)$ , 则离子散角为  $x' = \delta x/l$ ,  $y' = \delta y/l$ , 其中  $l$  为针孔板到荧光靶的距离。此外, 图片各像素点的灰度值记录了荧光靶的发光强度分布, 即像素点的灰度值  $i$  与离子密度成正比。据此, 可得到下列束流矩阵:

$$C = \begin{bmatrix} \langle xx \rangle & \langle xx' \rangle & \langle xy \rangle & \langle xy' \rangle \\ \langle x'x \rangle & \langle x'x' \rangle & \langle x'y \rangle & \langle x'y' \rangle \\ \langle yx \rangle & \langle yx' \rangle & \langle yy \rangle & \langle yy' \rangle \\ \langle y'x \rangle & \langle y'x' \rangle & \langle y'y \rangle & \langle y'y' \rangle \end{bmatrix}. \quad (1)$$

束流矩阵与 4D 发射度的关系可用下列方程描述<sup>[6]</sup>:

$$\epsilon_{4D} = \sqrt{\det C}, \quad (2)$$

其中, 矩阵元是位置与位置乘积、位置与散角乘积或散角与散角乘积的平均值, 如  $\langle xx \rangle = \sum i \cdot x \cdot x / \sum i$ ,  $\langle xy' \rangle = \sum i \cdot x \cdot y' / \sum i$  等。

可从束流矩阵  $C$  判断束流是否存在  $(x, x')$  与  $(y, y')$  相平面的横向耦合, 若不存在耦合, 则束流矩阵元  $\langle xy \rangle$ ,  $\langle xy' \rangle$ ,  $\langle x'y \rangle$  和  $\langle x'y' \rangle$  的值将全部为零。束流横向耦合情况也可以从束流在  $(x, y)$ ,  $(x, y')$ ,  $(x', y)$  和  $(x', y')$  平面内的分布反映出来。

可将获得的数据处理为 2D 发射度及其对应的 Twiss 参数, 对于  $(x, x')$  相平面可得:

均方根发射度  $\epsilon_{x\text{rms}} = \sqrt{\langle xx \rangle \cdot \langle x'x' \rangle - \langle xx' \rangle^2}$ , 对应的 Twiss 参数:

$$\alpha_x = -\frac{\langle xx' \rangle}{\epsilon_{x\text{rms}}}, \quad \beta_x = \frac{\langle xx \rangle}{\epsilon_{x\text{rms}}}, \quad \gamma_x = \frac{\langle x'x' \rangle}{\epsilon_{x\text{rms}}}, \quad (3)$$

归一化均方根发射度:

$$\epsilon_{x\text{-nrms}} = \beta \gamma \epsilon_{x\text{rms}}, \quad (4)$$

其中:  $\beta$  为粒子的相对论速度,  $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ 。类似

地, 对于  $(y, y')$  相平面也可得到相应的  $\varepsilon_{y\text{-rms}}$ ,  $\alpha_y$ ,  $\beta_y$ ,  $\gamma_y$  和  $\varepsilon_{y\text{-nrms}}$ 。

非线性传输元件会造成横向  $(x, x')$  与  $(y, y')$  相空间耦合<sup>[6]</sup>, 将导致有效发射度的增大, 从 2D 发射度的测量结果是无法得到横向耦合情况的, 只有从 4D 发射度的测量结果来探究束流横向发射度耦合。

### 3 Pepper-pot 型发射度测量仪硬件设计

#### 3.1 测量仪机械机构与设计参数

图 2 给出了发射度测量仪的总体结构, 主要由驱动杆、波纹管、CCD 摄像机、透镜窗、DN160 连接法兰、底部法兰和探头等部分组成。DN160 连接法兰与测试平台的测试室端口相连接, DN160 连接法兰以下的部分处于真空环境中, 通过波纹管连接实现驱动杆与测试室端口的密封。探头部分的 MCP 和荧光靶电线及冷却水管从中空的驱动杆内部伸出, 驱动杆内部非真空环境, 通过陶瓷柯伐和水管焊接实现密封。

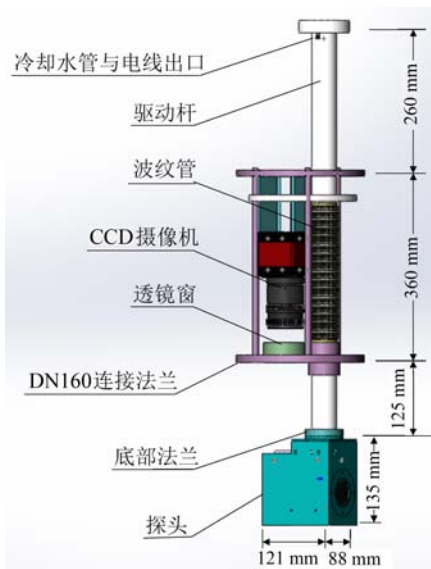


图 2 (在线彩图) 发射度测量仪总体结构图

图 3 给出了探头部分的核心器件, 主要有针孔板、微通道板 MCP、荧光靶和反射镜组成。MCP 与荧光靶间距很小, 固定在同一个支撑架上, 支撑架之间用陶瓷垫片绝缘, 此支撑架在螺杆上通过左右螺母固定并且通过转动螺杆在针孔板与反射镜之间移动, 用以调节针孔板与荧光靶之间的距离。图 4 给出了真空测试室的相关尺寸, 据此初步确定了发射度测量仪的基本尺寸, 如图 2 和图 3 中所示。

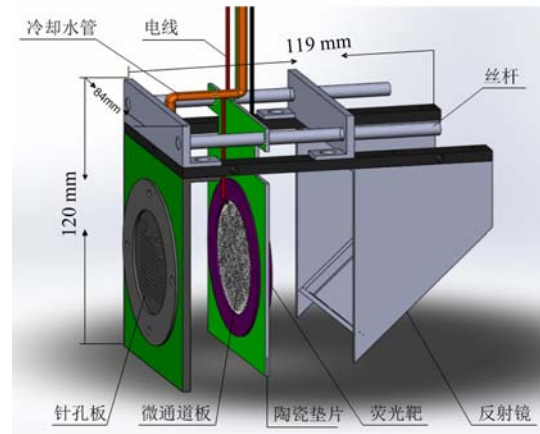


图 3 (在线彩图) 发射度测量仪探头结构图

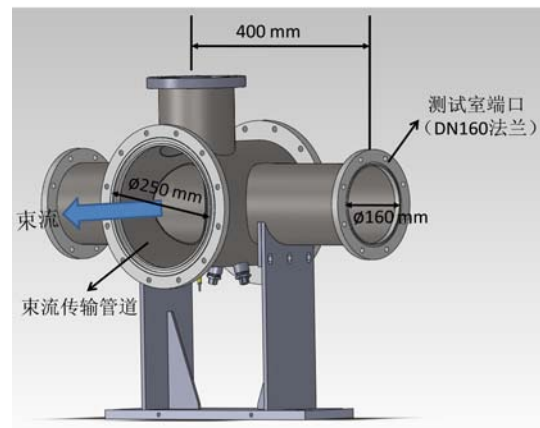


图 4 (在线彩图) 真空测试室

探头部分核心元件的选择与具体物理参数如下:

(1) 针孔板。选用钼作为针孔板材料, 束流能量大部分损失在针孔板上, 热膨胀引起的变形可导致针孔位置变化, 给获取的位置信息带来误差, 钼质地坚硬、熔点高、热膨胀系数小。测试室位置处束流包络直径一般为 10~30 mm, 并且水平方向与垂直方向的束流包络差别较小, 则针孔板的有效感应面积定为 36 mm×36 mm。针孔板钼片上小孔直径为 25  $\mu\text{m}$ , 小孔间距均为 1.5 mm, 形成 25×25 个小孔阵列, 针孔板厚度定为 25  $\mu\text{m}$ 。针孔板夹在孔阵列相同的无氧铜片之间以保证机械固定与散热, 前后铜片厚度分别为 2 和 1.5 mm, 孔径均为 0.3 mm, 以保证散角在 -100 mrad~ 100 mrad 的取样束流不受铜片影响。

(2) 微通道板与荧光靶。束流离子散角较小, 但束流可能存在斜入射, 则微通道板 MCP 与荧光靶的有效工作区域应较针孔板稍大一些, 选用德国 Tectra 公司生产的 MCP050, 有效工作区域直径为 44 mm,

单通道孔径为  $12\ \mu\text{m}$ ，通道中心距为  $15\ \mu\text{m}$ ，板厚度为  $(0.72 \pm 0.04)\ \text{mm}$ ，工作电压为  $1.2\ \text{kV}$  时最小增益为  $2.5 \times 10^4$ ，与其配套使用的 P43 荧光靶发光效率高，发射的最大光强度集中在绿光波段，MCP 与荧光靶之间距离为  $2\ \text{mm}$ ，给荧光靶加上  $1 \sim 5\ \text{kV}$  的电压，可根据荧光靶上的光斑亮度调节荧光靶上的电压，最终使得到的光斑足够清晰但不存在荧光靶发光饱和的情况。针孔板与 MCP 之间的距离为  $5 \sim 50\ \text{mm}$  可调，目的是使具体束流的散角能够达到最佳分辨率又不至于让光斑存在重叠部分。

(3) 反射镜。宽  $50\ \text{mm}$ ，长  $70\ \text{mm}$ ，与荧光靶成  $45^\circ$  角放置。

(4) CCD 摄像机。选用德国 Allied Vision Technologies 公司生产的型号为 Bigeye P-132B Cool 的单色冷 CCD 相机，冷 CCD 相机暗电流噪声几乎不随 CCD 传感器的增益发生变化，有较高的信噪比，该相机分辨率为  $1280 \times 1024$ ，像素点尺寸为  $6.45\ \mu\text{m} \times 6.45\ \mu\text{m}$ ，对绿光及其附近波段最敏感，与荧光靶的发光特性匹配，帧频为  $12.5\ \text{fps}$ ，曝光时间在  $100\ \mu\text{s} \sim 1000\ \text{s}$  范围内可调，并且该摄像机带有 IEEE 802.3 1000BASE-T 数据接口，可通过该接口快速传输数据图像至电脑硬盘存储。

### 3.2 测量仪的性能指标评估

测量仪的硬件参数决定了探测器能达到的性能指标，如探测时间、可测量的束流剖面大小、可测量的散角范围、位置分辨率与角分辨率和可测的束流流强等。测量仪的性能指标如下所示：

(1) 探测时间。MCP 与荧光靶的响应时间为纳秒量级，可忽略不计，则探测时间主要取决于 CCD 相机的曝光时间与帧频，本系统取两组数据即 10 幅图像的时间约为  $1\ \text{s}$ 。测量直流束不存在探测器的响应与束流脉冲波形的匹配问题，但需考虑束流功率对探测器的影响，能量为  $10 \sim 30\ \text{keV}/q$  的离子束在  $1\ \text{s}$  的探测时间内针孔板与铜片热效应不会太明显，且 MCP 在该能量范围有较好的响应。

(2) 可测量的束流剖面大小。针孔板的有效感应面积决定了可测量的束流剖面直径小于  $36\ \text{mm}$ 。

(3) 可测量的散角范围。获取的光斑图像中光斑不能存在叠加或重合，因此针孔间距  $d$  与针孔板到 MCP 的距离  $L$  限制了可测量的散角范围，可测

得的束流最小散角为  $x'_{\min} = y'_{\min} \approx -d/2L$ ，最大散角为  $x'_{\max} = y'_{\max} \approx d/2L$ 。针孔板与 MCP 之间的距离在  $5 \sim 50\ \text{mm}$  之间调节时，可接受束流的散角范围在  $\pm 150\ \text{mrad} \sim \pm 1.5\ \text{mrad}$  间变化。待测量的高电荷态 ECR 离子源最大散角范围一般为  $-100\ \text{mrad} \sim 100\ \text{mrad}$ ，夹在针孔板后面的铜片孔径与厚度可保证散角为  $-100\ \text{mrad} \sim 100\ \text{mrad}$  的取样束流离子通过，针孔板和 MCP 间距调节为  $7.5\ \text{mm}$  时可接受束流最大散角为  $\pm 100\ \text{mrad}$ 。

(4) 位置分辨与散角分辨。测量仪的位置分辨由孔间距决定，散角分辨由针孔板与荧光靶之间的距离和 CCD 相机分辨率决定<sup>[12]</sup>。微通道板的位置分辨为几十微米，相比孔间距可以忽略，则测量仪的位置分辨约等于孔间距，为  $\Delta x = \Delta y \approx 1.5\ \text{mm}$ 。调节 CCD 摄像机的焦距使获取到的照片所代表的实际物理空间尺寸约为  $64\ \text{mm} \times 51\ \text{mm}$  时，相应的，一个像素点对应的实际物理尺寸为  $h^2 = 50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ ，MCP 与荧光靶的距离为  $L$  时，散角分辨为  $\Delta x' = \Delta y' \approx h/L$ 。针孔板与 MCP 之间的距离为  $5 \sim 50\ \text{mm}$  时对应的散角分辨约为  $1 \sim 10\ \text{mrad}$ 。

(5) 透光率。即经过针孔板的取样束流与总束流流强的比值，由针孔板上针孔间距与孔径决定。小孔半径  $r$  为  $0.0125\ \text{mm}$ ，孔间距  $d$  为  $1.5\ \text{mm}$ ，则透光率  $\eta = \pi r^2/d^2 = 0.0218\%$ 。透光率应该与 MCP 的动态范围匹配，若透光率太高，取样束流太强会导致 MCP 的通道内壁导电层对二次电子发射层的补偿不够，出现“死时间”与输出饱和，无法得到真实的取样束流密度分布信息，只能得到位置信息。反之，取样束流太弱导致信噪比太低，甚至会有实际有用信号被噪声信号淹没的现象。另外，需提供给 MCP 合适的工作电压，致使 MCP 有适当的增益且不存在“自饱和”现象。

在测量时根据具体的束流合理调节各部件参数，使各部件协调配合工作，可得到较理想的结果。需要注意的问题是束流打到针孔板上，会发射二次电子，产生特征 X 射线，MCP 对电子和软 X 射线较敏感，因此会产生噪声信号。针孔板的低透光率决定了通过针孔的二次电子数目极少，孔壁上和孔边缘产生的二次电子大多损失在夹在针孔板后面的铜板上，因此二次电子引入的噪声信号非常小。同时，针孔板后面的铜板对软 X 射线也有较好的屏蔽作用，束流能量较高

时, 钨针孔板上小孔边缘产生的特征 X 射线以硬 X 射线为主, 但 MCP 对硬 X 射线探测效率低。另外, 还可以考虑从改进针孔板材料(如粘接的复合材料等)解决软 X 射线的屏蔽问题。

#### 4 数据获取与处理方法

Pepper-pot 型发射度测量仪获得的数据为一张或多张图像, 图片上的光斑代表了束流信息, 此外图片还包含了本底噪声、随机噪声以及椒盐噪声(由 CCD 传感器、传输信道、解码处理等产生的黑白相间的亮暗点噪声), 因此, 提取束流信息前需对图片进行噪声处理, 经过噪声处理后的图像需要经过标定才能获得真实的束流信息, 利用提取出的相关数据计算与分析束流发射度。具体实现方法如下所示:

(1) 获取本底噪声图像与数据图像。驱动探头插入束流传输管道, 无束流通过时获取本底噪声图像(图 5), 用于数据处理时扣除本底噪声。束流通过时连续采集 5 幅图片作为一组数据保存至硬盘用于离线数据分析。若获得的单张图片中的饱和像素点超过 10 个, 则得到的发射度结果不可靠<sup>[10]</sup>, 应首先考虑是不是 MCP 输出饱和与荧光靶发光饱和问题导致, 其次是 CCD 相机本身参数的设置问题, 据此可以调节: MCP 的供电电压, MCP 与荧光靶间的高压电场, CCD 相机的曝光时间, CCD 相机的增益。



图 5 (在线彩图) 无束流信息图像

(2) 数据图像的预处理。用 MATLAB 程序实现, 首先, 扣除本底噪声, 方法是每幅数据图像所有像素点灰度值(图 6 为数据图像理想模型)减去本底噪声图像所对应的灰度值。其次, 图像叠加求平均, 方法是将扣除过本底噪声的 5 幅图像对应灰度值先除图像个数 5, 再求和, (防止灰度值求和溢出, 求平均错误), 目的是增强有用信号, 减弱随机噪声, 提高信噪比。

再次, 对叠加后的图像用中值滤波法消除椒盐噪声, 方法是用矩阵

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

与中间像素点和邻近的 8 个像素点灰度值组成的矩阵各矩阵元对应相乘, 对结果排序后取中间值代替中间像素点灰度值, 依次循环将整幅图像每个像素点灰度值用邻近点灰度值的中间值代替, 消除孤立的噪声点。最后, 阈值处理, 方法是对经过噪声处理的图像灰度值设置阈值, 小于阈值的灰度值清零, 大于阈值的灰度值完全保留, 通常阈值的选择是小于全部像素点最大灰度值的 5%<sup>[13]</sup>。

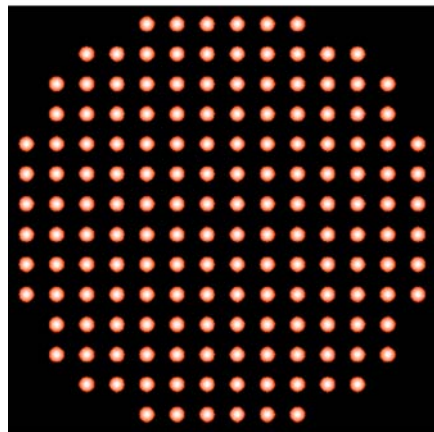


图 6 (在线彩图) 数据图像理想模型

(3) 标定。为了将获得的照片与实际的物理尺寸联系起来, 包括几何中心的确定以及实现针孔与图片上光斑一一对应, 需将预处理过的数据图像与相机附带软件绘制的标定网格线对应起来。另外, 传输元件的准直误差或位置矫正误差有可能导致束流截面几何中心偏离束流传输管道或束流斜入射, 用标定网格线可以确定数据图像与针孔位置的对应关系, 即实际光斑的尺寸与位置, 但无法确定束流的偏移和斜入射情况, 因此需要在测量时将针孔板的中心小孔堵住, 用于从数据图像中间暗区中心位置确定针孔板中心, 即确定坐标原点。堵住中心小孔确定坐标原点的精准度对结果影响不是很大, 因为位置标定误差为  $\pm 0.4 \text{ mm}$  将导致散角计算引入的系统误差小于  $\pm 3\%$ <sup>[11]</sup>。标定完成便获得了数据图像中每个光斑对应的针孔位置,

即子束流相对于坐标原点的位置坐标  $(x, y)$ 。

(4) 提取  $(x, y, x', y', i)$  信息。如图 7 所示, 每个方形格子的中心位置代表了针孔位置  $(x, y)$ , 每个格子中心间距代表针孔板上的针孔间距为 1.5 mm, 格子边长代表实际中 1.5 mm 距离。设坐标原点为第  $a \times b$  个格子中心, 第  $X \times Y$  个格子对应的针孔位置为  $x = (X - a) \times 1.5$  mm,  $y = (Y - b) \times 1.5$  mm。每个格子内部包含了  $N \times N$  个像素点, 像素点灰度值为  $i$ , 并且每个像素点相对于该格子中心的位置为  $(\delta x, \delta y)$ , 如第  $m \times n$  个像素点, 有  $\delta x = (m/N \times 1.5 - 0.75)$  mm,  $\delta y = (n/N \times 1.5 - 0.75)$  mm, 则由此可算出  $(x', y')$ , 由此将由整幅图片得到的数据  $(x, y, x', y', i)$  按列存储到文档中。

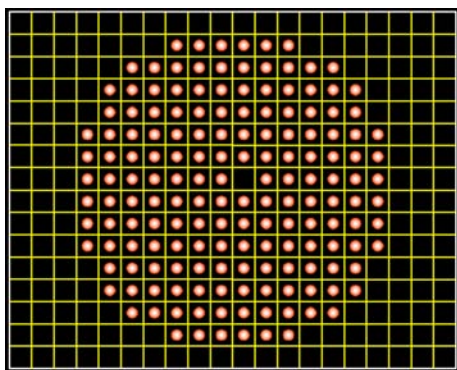


图 7 (在线彩图) 数据图像处理示意图

(5) 计算并绘图。计算 4D 束流矩阵、4D 发射度、水平方向与垂直方向的 2D 发射度及 Twiss 参数, 绘制相图  $(x, x'), (y, y'), (x, y')$  和  $(x', y')$ 。

## 5 近期工作进展

针对中国科学院近代物理研究所高电荷态离子源束流发射度的特点, 对前期方案做了相应的优化。重新优化后的 Pepper-pot 测量仪与原方案相比: 首先, 探头部分尺寸更小, 并且对冷却水管部分进行了缩减, 使得装置更加紧凑。其次, 将探头与驱动杆连接部分设计成分体式并选择电机驱动, 使得该装置有不同的运行量程, 可适用于不同大小的真空室, 故新方案通用性更强。最后, 新方案重点对装置各部件间距进行优化, 加之探头与连接法兰之间有准直豁口, 故新方案的机械结构更具合理性。目前, 该方案已经准备进行机械加工, 后续的图像处理程序也正在编写中。优化后的方案如图 8 所示。

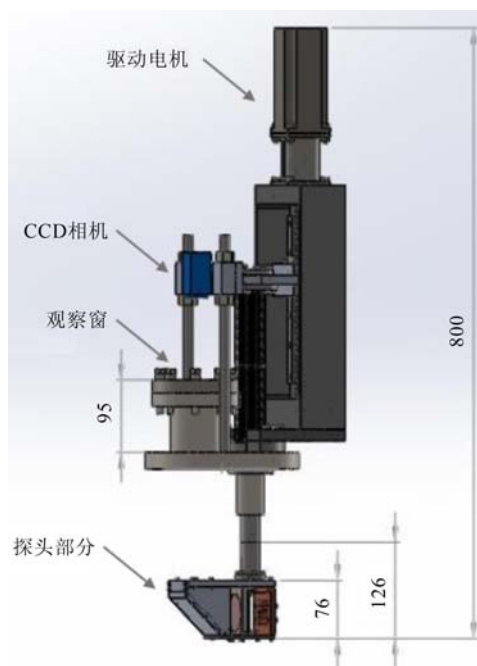


图 8 (在线彩图) Pepper-pot 优化方案设计图

## 6 总结

参考国外各实验室的 Pepper-pot 型发射度测量仪的硬件设备与实际测试经验, 针对中国科学院近代物理研究所现有的高电荷态 ECR 离子源完成了一套系统的 Pepper-pot 型发射度测量仪的硬件设计, 提出了可行的数字图像噪声处理方法与标定方法, 给出了具体的数据计算与分析流程。下一步工作将用这台 Pepper-pot 发射度测量仪测量高电荷态 ECR 离子源引出束流的 4D 发射度, 并进一步研究高电荷态 ECR 离子源引出束流品质及其传输特性。

### 参考文献(References):

- [1] GOUGH R A, CLARK D J, GLASGOW L R. IEEE Trans Nucl Sci, 1979, **26**(2): 2164.
- [2] LEITNER D, LYNEIS C M, LOEW T, *et al.* Rev Sci Instrum. 2006, **77**: 03A302-1.
- [3] TINSCHERT K, BOSSLER J, SCHENNACH S, *et al.* Rev Sci Instrum. 1998, **69**: 709.
- [4] ZHAO Hongwei, LIU Zhanwen, ZHANG Wen, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2000, **34**(3): 282. (in Chinese)  
(赵红卫, 刘占稳, 张汶, 等. 原子能科学技术, 2000, **34**(3): 282.)
- [5] SUN Liangting. Design and Experiment Study of Highly Charged ECR Ion Sources[D]. Lan Zhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of sciences, 2004: 152-153. (in Chinese)

- (孙良亨. 高电荷态 ECR 离子源的设计与实验研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2004: 152-153.)
- [6] GROENING L. Concept For Controlled Transverse Emittance Transfer Within A Linac Ion Beam[C]//Proceeding of IPAC 2011, San Sebastian, Spain, 2011: 2007.
- [7] STOCKLI M P, WELTON R F, KELLER R, *et al.* Rev Sci Instrum. 2006, **77**: 03B706-1.
- [8] PFISTER J, NÖRENBERG R, RATZINGER U, *et al.* Commission Of The hitrap Decelerator Using A Single-Shot pepper Pot emittance Meter[C]//Proceeding of LINAC08, Victoria, BC, Canada, 2008: 564.
- [9] JOLLY S, LEE D, POZIMSKI J, *et al.* Beam Diagnostics For The Front End Test Stand At Ral[EB/OL]. [2013-01-03]. <http://www.faircloth.info/WEO2A01.pdf>.
- [10] KONDRASHEV S, BARCIKOWSKI A, MUSTAPHA B, *et al.* Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2009, **606**: 296.
- [11] STRHMEIER M, BENITEZ J Y, LEITNER D, *et al.* Rev Sci Instrum, 2010, **81**: 02B710.
- [12] JOLLY S, POZIMSKI J, PFISTER J, *et al.* Data acquisition And Error Analysis For Pepperpot Emittance Measurements[C]//Proceeding of DIPAC09, Basel, Switzerland, 2009: 1.
- [13] STROHMEIER M, BENITEZ J Y, LEITNER D, *et al.* Emittance Measurements At The Lbnl ECR And Aecr-u Ion Source Using A Pepper-pot Emittance Scanner[EB/OL]. [2013-01-03]. [http://www.lanl.gov/conferences/biw10/preprints/TUPSM061\\_preprint.pdf](http://www.lanl.gov/conferences/biw10/preprints/TUPSM061_preprint.pdf)

## Design of a 4D Emittance Measurement Device for High Charge State ECR Ion Sources

ZHAO Yangyang<sup>1,2</sup>, ZHAO Hongwei<sup>1</sup>, SUN Liangting<sup>1</sup>, YANG Yao<sup>1,2</sup>, WANG Yun<sup>3</sup>, CAO Yun<sup>1</sup>

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** For the purpose of on-line beam quality diagnostics and transverse emittance coupling investigation of the ion beams delivered by an Electron Cyclotron Resonance (ECR) ion source, a real-time 4D Pepper Pot type emittance scanner is under development at IMP(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences). The high charge state ECR ion source at IMP could produce CW or pulsed heavy ion beam intensities in the range of  $1 \mu\text{A} \sim 1 \text{mA}$  with the kinetic energy of  $10 \sim 35 \text{keV}/q$ , which needs the design of the Pepper Pot scanner to be optimized accordingly. The Pepper Pot scanner has many features, such as very short response time and wide dynamic working range that the device could be applied. Since intense heavy ion beam bombardment is expected for this device, the structure and the material selection for the device is specially considered during the design, and a feasible solution to analyze the pictures acquired after the data acquisition is also made.

**Key words:** high charge state ion, ECR ion source, 4D emittance, Pepper-pot emittance scanner, digital images

Received date: 7 Jan. 2013; Revised date: 14 Mar. 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11275239, 10921504)

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

<http://www.npr.ac.cn>