

电偏转扫描法测量高电荷态 ECR 源发射度^{*}

曹云¹⁾ 马雷 赵红卫 张子民 孙良亭 李锦钰 冯玉成 李锡霞

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 成功地研制了一套适合于低能离子束流发射度测量的电偏转扫描探测器. 对该探测器的原理和结构作了较详细的描述, 并给出该探测器对兰州近代物理研究所高电荷态 ECR 源 LECR3 引出离子束流发射度的测量结果. 典型结果为: 在引出高压为 15.97kV, 引出束流为 190 μ A 时, O⁴⁺ 水平发射度(x 方向)为 137 π mm \cdot mrad, 垂直发射度(y 方向)为 120 π mm \cdot mrad(包括 90% 束流). 最后, 对测量结果作了一些分析和讨论.

关键词 电偏转扫描探测器 ECR 离子源 发射度

1 引言

随着核物理实验、原子物理、表面物理实验的进一步发展, 以及加速器技术在各领域的广泛应用, 我们对 ECR (Electron Cyclotron Resonance) 离子源产生的束流品质的要求也越来越高. 束流发射度是束流品质的一个重要指标, 因此对 ECR 离子源束流发射度的测量和研究, 对离子源技术本身、加速器研究以及相关应用技术都具有重要意义及参考价值.

对于高电荷态 ECR 离子源, 引出束流流强相对较大, 能量较低, 一般只有几十 keV, 如果假定横向发射度两个方向互相不耦合, 非常适合采用拦截型测量方法, 可分别测量水平和垂直两个方向的发射度. 考虑到探测器的使用方便、可靠, 精度高、速度快, 我们采用了双狭缝法, 对束流的取样采用电扫描法, 该探测器称为电偏转扫描探测器 (ESS Electric Sweep Scanner)^[1].

为提高兰州重离子加速器 HIRFL 注入器 SFC 的注入效率, 研究轴向注入匹配, 我们利用研制的发射度探测器 ESS 对我所高电荷态 ECR 源 LECR3^[2] 产生的 O⁴⁺ 和 O⁶⁺ 离子束束流发射度进行了测量. 本文对测量装置作了详细的介绍, 并给出了测量结果.

2 ESS 探测器测量原理及其结构

ESS 探头主要由狭缝、电偏转板以及法拉第筒等构成, 如图 1 所示. ESS 前狭缝作为位置取样狭缝, 确定束流的位置, 给出位置信息; 加在平行偏压板上的斜波电压以及与前狭缝平行的后狭缝用来对束流进行动量取样, 给出束流的动量(角度)信息; 法拉第筒接收的束流大小是与相空间中束流在该位置时的相密度成正比.

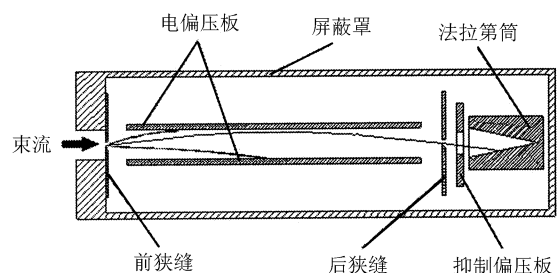


图 1 ESS 结构原理图

当束流能够从两个平行狭缝通过, 束流与束流传输线的夹角 θ 必定满足下面的公式:

$$\theta = \frac{VL}{4\phi g}, \quad (1)$$

2003 - 12 - 08 收稿

* 中国科学院知识创新工程重大项目 (KJ CX 1-09), 国家杰出青年科学基金 (10225523) 资助

1) E-mail: caoyun@impcas.ac.cn

这里 V 是偏压板的电势差, L 是偏压板的长度, ϕ 是 ECR 离子源引出高压, g 是两个偏压板间的间距. 在探测器的各种不同的水平或垂直位置下, 改变偏转板的电压, 用法拉第筒测量流强, 进行该位置处的束流发散角扫描, 从而测量束流的发射度.

ESS 探测器主要由测量探头、机械驱动装置构成, 如图 2 所示. 测量探头采用了水冷结构, 两平行偏压板中一个加斜波电压, 而另一个加相反的斜波电压; 机械驱动采用步进电机驱动.

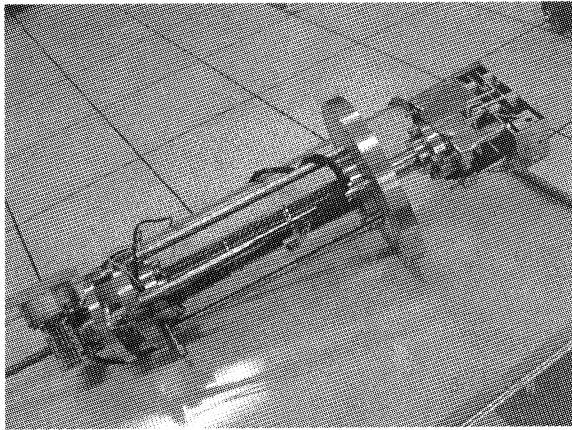


图 2 ESS 探测器

3 LECR3 离子源及测量系统

高电荷态 ECR 离子源 LECR3 是 2002 年上半年建造完成, 并开始为原子物理实验研究提供离子束流. LECR3 的设计采用了负偏压、波导直接馈入微波功率及铝制等离子体弧腔等新技术和新方法.

ESS 探测器一共有两组, 各自独立地安装在束流传输线水平和垂直方向, 如图 3 所示.

我们利用 TRACE 3D 程序对该束流传输线进行了计算, 图 4 是计算所得的束流包络, ESS 探测器距离束腰大约 200mm 左右.

测量系统采用了一般工业控制模式, 利用工控机对整个探测器系统进行控制和数据采集. 通过数字 I/O 口, 发出步进信号, 送入步进电机驱动器, 驱动步进电机传动, 移动 ESS 测量探头; 通过 D/A, 周期性地控制斜波电源将我们所需的梯形电压加在探头的偏压板上, 并利用 A/D, 读回任何时刻加在偏压板上的电压值; 探头上的法拉第筒接收的电流信号, 通过一个电流电压转换器, 利用 A/D 读回束流强度值; 最后通过数据处理, 得到我们所需的结果.

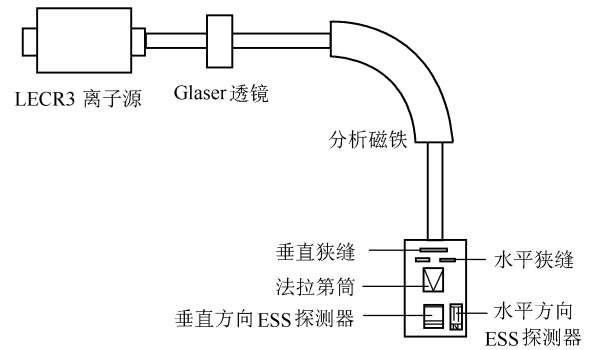


图 3 ESS 在束流传输线上的安装示意图

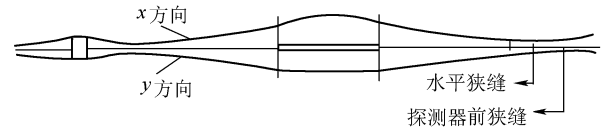


图 4 LECR3 束流传输线的束流包络

4 测量过程和数据处理

我们首先将束流在 ESS 测量探头前聚成束腰. 为了测量在二维相平面内的发射度 (例如 xx' 相平面), 移动测量探头到 $(x_c - a, y_c)$ 位置, 这里 x_c 和 y_c 是束流中心的 x 和 y 坐标值, a 是束流的半宽度. 考虑到计算的方便, 可以假定 $x_c = 0, y_c = 0$. 具有相同水平位置 $x = -a$ 和不同的角散 x' 的所有的粒子都通过探头的前狭缝, 在偏压板内被偏转; 偏压板上加上从 $-V_{\max}$ 到 V_{\max} 变化的电压, 对应不同角散的粒子被相应选择通过后狭缝被探头的法拉第筒收集; 收集的电流信号 $\delta^2 I_j$ 经过电流电压转换器转换成电压信号并放大. 然后, 移动探测器至下一个位置 $(-a + \Delta x, 0)$, Δx 是探头每次步进的位置间隔, 重复上一个过程. 最后, 整个束流区域被取样, 我们将得到对应的三组离散值: $x, V, \delta^2 I$.

由 V 通过(1)式计算束流的角散 x' , $\delta^2 I(x_i, x')$ 是和束流的二维相空间密度 $\rho(x, x')$ 成正比例关系的.

$$\delta^2 I(x, x') \propto \rho(x_i, x') = \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial x'} \approx \frac{D}{S_1 S_2} \delta^2 I(x_i, x'), \quad (2)$$

这里 S_1 和 S_2 是前狭缝的宽度和后狭缝的宽度, D 为两个狭缝的间距. 我们就可以得到束流的三维相空间密度分布函数 $\rho(x, x')$. 等密度发射度 $\epsilon(f)$ 和等密度束流强度 $I(f)$ 计算如下:

$$\epsilon(f) = \frac{1}{\pi} \oint_{\Sigma_f} x' dx = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{x'_1(x_i, f)}^{x'_2(x_i, f)} dx', \quad (3)$$

$$I(f) = \frac{D}{S_1 S_2} \sum_{i=1}^N \int_{x'_1(x_i, f)}^{x'_2(x_i, f)} \delta^2 I(x_i, x') dx', \quad (4)$$

其中 f 是相空间密度百分比. 当 $f = 0$ 时, $\epsilon(0)$ 和 $I(0)$ 分别代表包括 100% 束流的发射度和总束流. 由 $I(f_1)/I(0) = 90\%$ 可得到 f_1 , 则 $\epsilon(f_1)$ 就是通常所说的束流的发射度(包含 90% 束流). 当束流因非线性作用畸变较大时, 另一个重要概念均方根发射度更能够真实地反映束流的品质, 此时, 用均方根发射度来描述束流的有效发射度更为合理, 可由下面公式计算^[3]:

$$\epsilon_{rms} = 4 \left[\overline{x^2 x'^2} - (\overline{xx'})^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

其中 $\overline{x^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2$, $\overline{x'^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x'^2$, $\overline{xx'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N xx'$ 是对所有粒子的平均值.

本系统的测量误差主要有测量探头的几何分辨率误差和随机测量误差. 在保证了系统的必要测量精度后, 产生的测量误差主要由探头的几何分辨率决定的, 其产生的发射度相对测量误差近似为^[4]

$$\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta x'}{x'_{max}} + \frac{\Delta x}{x_{max}} \right), \quad (6)$$

式中 x_{max} , x'_{max} 是束腰处的束径和最大散角. 设计的探测器角度分辨率 $\Delta x'$ 为 0.625mrad, 位置分辨率 Δx 为 0.1mm. 假设束流包络大小为 30mm, 最大散角为 50mrad, 由(6)式可得系统测量发射度的相对测量误差近似为 1.8%.

5 测量的初步结果及分析

当离子源引出高压为 15.96kV、总束流有 1.03 mA、引出 190 μ A 的 O^{4+} 束流时, 水平方向的发射度(包含 90%束流)大约为 137π mm·mrad, 垂直方向的发射度大约为 120π mm·mrad, 束流水平方向包络为 41mm 左右, 垂直方向包络为 31mm 左右. 对于 O^{6+} 束包含 90%束流大小的水平方向发射度大约为 57π mm·mrad, 垂直方向发射度大约为 95π mm·mrad. 束流在相空间中的密度分布如图 5 的发射度相图所示.

可以看出, 在相空间中, 束流密度较小时, 密度分布比较均匀, 而束流密度较高时, 密度分布就不太

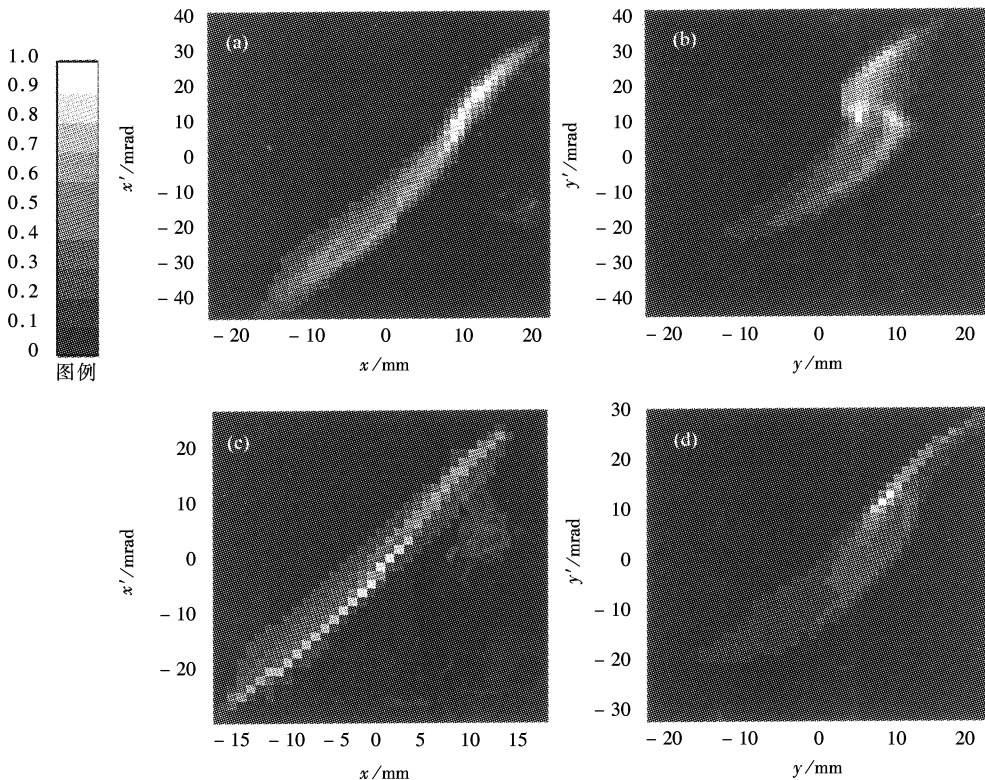


图 5 束流在相空间中的密度分布

(a)是 O^{4+} 束的水平方向相图; (b)是 O^{4+} 束的垂直方向相图;
(c)是 O^{6+} 束的水平方向相图; (d)是 O^{6+} 束的垂直方向相图.

均匀.束流在垂直方向的束流发射度相图还有明显的“S”型相图畸变.当离子束流为较低电荷态时,束流的发射度较大,相空间密度分布的均匀性较差;而电荷态较高时,束流的发射度较小,相空间密度分布的均匀性较好.

6 结束语

我们针对高电荷态 ECR 离子源研制了适合低

能离子束发射度测量系统 ESS 探测器,并利用它对 LECR3 离子源引出束流发射度进行了测量,获得了 ECR 离子源发射度的初步测量结果.经分析,发现所测结果和目前通过 ECR 等离子体模型预言结果不相符,至今未找到合理解释,对 ECR 等离子体模型提出新的问题.进一步的实验结果我们将会在今后的实验中陆续给出.

参考文献 (References)

- 1 Paul W Allison, Joseph D Sherman, David B Holtkamp. An Emittance Scanner For Intense Low-Energy Ion Beams. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1983, **30**(4):2204
- 2 SUN Liang-Ting, ZHANG Zi-Ming, ZHAO Hong-Wei et al. Nuclear Technology, 2002, **25**(9):1—5 (in Chinese)
(孙良亭,张子民,赵红卫等.核技术,2002, **25**(9):1—5)
- 3 Septier. Applied Recharged Particle Optics (Volume 1). Beijing: Atomic Energy Press, 1987. 122—124 (in Chinese)
(赛普蒂.应用带电粒子光学(第 1 卷).北京:原子能出版社, 1987. 122—124)
- 4 ZHANG Hua-Shun. Ion Sources. Beijing: Science Press, 1999. 437
- 5 Leitner M A, Wutte D C, Lyneis C M. Design of the Extraction System of the Superconducting ECR Ion Source Venus. Luccio A, MacKay W. Proceeding of the 2001 Particle Accelerator Conference. USA, Chicago: IEEE Computer Society Press, 2001. 67—69
- 6 Yamashita Y, Isoya Y, Sekiguchi M. Emittance Measurement at a 14GHz ECR Ion Source (HyperECR). Proceedings of the 11th International Conference on ECR Ion Source. Netherlands, 1993. 240—244
- 7 Wutte D C, Leitner M A, Lyneis C M. Physica Scripta, 2001, **T92**:247—249
- 8 WANG Chang-Li. Designs and Applications of Industrial Control Computer System. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1993 (in Chinese)
(王常力.工业控制计算机系统设计与应用.北京:电子工业出版社, 1993)

Emittance Measurement of Highly Charged Ion Beams Extracted from ECR Ion Source Using Electric Sweep Scanner *

CAO Yun¹⁾ MA Lei ZHAO Hong-Wei ZHANG Zi-Min SUN Liang-Ting LI Jing-Yu FENG Yu-Cheng LI Xi-Xia
(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract We have designed and built an emittance scanner which was installed at the beam line LECR3 of the heavy Ion Accelerator Facility in Lanzhou. The scanner measures the emittance of beams from the ECR ion source by the electric-sweep method, named as Electric-Sweep Scanner (ESS). From analyzing the measured results we found it is contrary to the behavior expected from normal theory of ECR plasma. Typical results are as follows: when the extracted voltage is 15.97kV, total current is 190 μ A, the horizontal and vertical emittance of O⁴⁺ are 137 π mm \cdot mrad and 120 π mm \cdot mrad respectively.

Key words electric sweep scanner, ECR ion source, emittance

Received 8 December 2003

* Supported by Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (KJ CX1-09), National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scientist (10225523)

1) E-mail: caoyun@impcas.ac.cn