

一种改进型 ECR 离子源的设计计算

许永兴 刘占稳 魏宝文

(中国科学院近代物理研究所, 兰州, 730000)

摘 要

本文介绍了具有 ω_{ecr} 共振面, $2\omega_{rf}$ 闭合等值面的 ECR 离子源的设计思想。文章同时给出了二峰值约为 0.8T 的轴向磁镜场和最大场强为 0.8T 的径向六极约束磁场的设计计算数据。设计结果表明这种改进型 ECR 离子源的 ω_{ecr} 共振面在轴向展宽比现在引进的 CAPRICE 型离子源的 ω_{ecr} 共振面在轴向展宽有极大提高, 并产生闭合的 $2\omega_{rf}$ 等值面。这些设计参数表征着高电荷态的离子束强度将有很大提高。

一、前 言

ECR 离子源是采用轴向和横向磁场约束, 通过电子回旋共振来加热的一种等离子体装置。它一般分为两级。在第一级中产生冷的、高密度的等离子体通过扩散进入第二级, 经进一步加热后成为高温的、低密度的等离子体。电子与离子的多次碰撞导致逐级电离, 最终产生高电荷态离子。这种类型离子源能产生具有一定流强的高电荷态离子, 束流质量指标(发射度和能散)也比较理想, 同时能长期连续工作, 寿命长。这些其它类型离子源无法比拟的优点使得它在重离子核物理学和原子物理研究领域获得了广泛的重视。

兰州重离子研究装置(HIRFL)为了扩展其性能, 提高被加速粒子的单核能量, 目前正在配备着 CAPRICE 型 ECR 离子源。关于这种类型离子源的一般工作原理, 结构上特点及其约束磁场分布形态我们已在另文作了专门介绍^[1]。由于兰州重离子研究装置是一个能量常数 $K = 69$ 的常规扇形回旋加速器(SFC)和一个能量常数 $K = 450$ 的分离扇回旋加速器(SSC)串级而成的, 两个加速器之间的匹配效率和剥离器的剥离效率在 1% 至 23% 范围内变化。若进一步把各段输运线上的传输效率和两个器本身的加速效率计算进去, 则总效率还会低得多。典型的数据为, Xe^{19+} 的 ECR 源的产额约为 $12e\mu A$, 经垂直注入和 SFC 的加速后引出的流强估计为 $0.48e\mu A$ 。经剥离后成为 Xe^{35+} 的剥离效率为 12.61%, 束流强度为 $0.06e\mu A$, 最后经前输运线和 SSC 加速后引出的束流为 $3.6 \times 10^{-3}e\mu A$ 。这说明整个系统经加速后高电荷态离子束的强度是极为有限的。为了适应各类重离子物理实验的要求, 提高束流强度将是我们今后面临的一个重要课题。提高 ECR 离子源的产额, 改善这种类型离子源的性质是解决这个问题的一个重要途径。为了适应

ECR 离子源技术发展十分迅速的局而,使得我们能及时跟踪下一代的 ECR 离子源水平,这里提出了在 CAPRICE 型离子源基础上一种改进型 ECR 离子源的设计方案.其轴向磁场造型有别于国外现有的设计思想,并不改变原先源的永磁装置体各元件的结构尺寸条件下建立我们所需要的横向磁场.

二、改进型 ECR 离子源设计思想

ECR 离子源最基本的工作机制是在一定的轴向和横向磁场分布形态中高频功率通过电子迴旋共振效应有效地输入到第二级的等离子体中去.根据拉摩(Larmor)公式,其共振频率为

$$\omega_{ecr} = \omega_{rf} = eB/m_e c, \quad (1)$$

公式中 ω_{ecr} 和 ω_{rf} 分别为共振和高频频率, B 为共振磁场, e 和 m_e 分别为电子电荷和电子质量.一旦高频频率决定之后,则在源的腔体中就存在一个等高斯曲面,一般称之为 ECR 共振面,如图 1 所示.电子多次穿越 ECR 共振面得到统计意义上的加速,导致

等离子体电子温度的增加使得高电荷态离子产生成为可能.由于 ECR 共振面所包围的是含有高温电子的等离子体,所以最后能获得的高电荷态的离子流强度很大程度上取决于这共振面的几何尺度的大小及其内含的高温电子密度.这就为提高 ECR 离子源的束流强度指出了几个途径:

1. 提高微波的频率

一定强度的高电荷态离子与 $n_e \tau$ 的劳申(Lawson)判据有着密切的关系,其中 n_e 为电子体密度, τ 为离子约束时间.而离子从电荷态 i 到电荷态 $i+1$ 的游离率直接正比于电子密度^[1].所以高电荷态离子的强度是直接正比于高温电子密度的.但是等离子体物理指出:当等离子体中电子密度超过一

定数值 n_c 时,微波便不能在其中传播.这 n_c 称为截止密度,并存在如下关系式:

$$n_c = \frac{\omega_{rf}^2 m_e \epsilon_0}{e^2},$$

这里 ϵ_0 为真空中介电常数, e 和 m_e 分别为电子电荷和质量.所以提高输入的微波频率是改善高电荷态离子束流强一个途径. R.F. Bourg^[2] 等人就尝试着把频率由 10 GHz 提高到 16.6GHz 以改善其原来 Minimafios 型 ECR 离子源性能.我们的 CAPRICE 型 ECR 离子源工作频率也是在 10GHz,就目前经营预算情况,要购置新的频率范围的发射机有困难,所以我们放弃了这个方案.

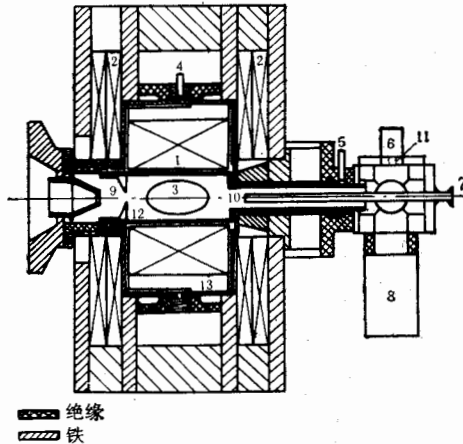


图1 ECR 离子源结构图

- 1.永磁体,2.线圈,3.ECR 共振面,4、5.冷却水进出口,6.波导,7.工作气体入口,8.分子泵,9.离子源引出系统10.进气管 11.微波窗,12.等离子体腔,13.永磁体装配架.

2. 加长第二级源体长度

根据上述对共振面的分析, 加长第二级源体的长度并使轴向磁镜场展宽, 从而导致 ECR 共振面在轴向扩大是提高多电荷态离子束强的另一途径。在 CAPRICE 型 ECR 离子源发展的早期, B. Jacquot^[3] 等人曾把原来 14cm 第二级离子源腔体增长到 16cm, 使 ECR 共振面所包围的体积有所增加致使微波输入功率由原来的 250—300W 增加到 500—600W。由于这种方法使源体的几何结构要做较大改动, 所以也是我们不愿采取的。

3. 调整轴向磁镜场分布以扩展 ECR 共振面

由铁轭及二组线圈构成的轴向双峰磁镜场分布形态直接决定了 ECR 共振面的大小。因而我们有可能插入合适尺寸的铁元件, 在不加大线圈电流情况下, 提高引出处磁场峰值而减小场峰的宽度, 使得二峰之间的谷区增大。这样在不增加源体长度情况下可以使闭合的 ECR 共振面扩大。但是如何选择合适的附加铁元件需要精确的磁场分析计算, 由于我们有这方面的经验, 所以这项措施对我们还是很有吸引力。

4. $2\omega_{ce}$ 工作模式

随着对 ECR 离子源工作机制的进一步研究, 目前产生了一个新观点^[4]: ECR 离子源除了经典的工作模式 $\omega_{rec} = \omega_{rf}$ 外还存在着 $\omega_{rec} = 2\omega_{rf}, 3\omega_{rf}, \dots$ 的工作模式, 只要对应于 $2\omega_{rf}, 3\omega_{rf}, \dots$ 的 B 等值面在源腔内是闭合曲面。虽然这种新的工作模式的具体机制目前还有争议, 但有一点是得到公认的, 即它对改善等离子体约束会带来明显好处。预计 ω_{rf} 共振面迭加 $2\omega_{rf}$ 闭合 B 等值面工作模式所能产生的高电荷态的束流强度是单纯 ω_{rf} 共振面工作模式的 4 倍左右。为了产生一个闭合的 $2\omega_{rf}$ 的 B 等值面, 我们需要对轴向及横向磁场作进一步分析。显然, 对当前的 CAPRICE 型 ECR 离子源, 在其特定的轴向及横向磁场设计参数下 ω_{rf} 的共振面是闭合的, 但由于磁场数据一般偏低, $2\omega_{rf}$ 的 B 等值面是不闭合的。所以目前源的参数难于在这种新的工作模式下运行。考虑到目前我们发射机的工作频率为 10GHz, 其对应的共振磁场为 0.36T, 由公式 (1) 可知 $2\omega_{rf}$ 闭合等值面所对应的磁感应强度为 0.72T。因而轴向磁场的两个峰值都应大于 0.72T, 否则 $2\omega_{rf}$ 的 B 等值面不可能在轴上闭合。同时横向的最高六极子场也应由目前 0.4T 增加到 0.8T 左右, 否则 $2\omega_{rf}$ 的 B 等值面可能碰到真空室壁, 也不能在腔体内产生闭合曲面。当然, 根据目前 ECR 离子源所能达到磁场水平要改进到产生闭合的 $3\omega_{rf}$ 的 B 等值面是很困难的。

根据以上几点分析, 结合我们目前实际情况采取第三点及第四点措施是适宜的。首先改变现有 ECR 离子源的磁路结构, 通过插入适当成形的铁元件, 在不增大线圈电流情况下使引出端轴向磁场的峰值提高到 0.75T 左右, 以满足扩大 ω_{rf} 共振面的几何尺度的目的, 并为建立 $2\omega_{rf}$ 的 B 等值面创造了条件。在这同时使引出端轴向磁场的峰宽度减小, 这样有利于高电荷态离子传输引出, 提高引出效率增大束流强度。其次为了产生闭合的 $2\omega_{rf}$ 的 B 等值面, 必须提高横向永磁六极子的最高场强至 0.8T 左右。这些目标就成为我们以下横向及轴向磁场设计的依据。

三、横向磁场的设计计算

由总体设计考虑,横向最大磁场需要达到 0.8T 左右。根据目前永磁材料可能达到的最佳性能,若仍采用原先的六极子结构是不行的^[1]。为了缩短磁通回路在空气中的长

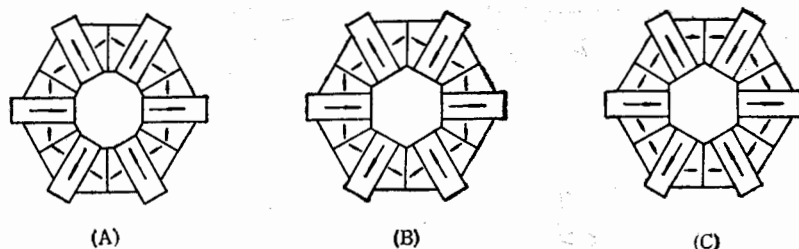


图2 3个可能的横向永磁磁路结构

度,新的结构则是在永磁主极之间插入磁化强度为 M 且具有合适取向的同样的永磁材料,如图2所示.对图2所示的三种不同磁路结构形式,我们用 PANDIRA^[2] 程序对横向磁场分布进行了计算.所选用的钕钴永磁材料 $B_r = 0.87\text{T}$, $H_c = 8.2\text{kOe}$. 计算结果示于图3. 其中曲线(1),(2)是磁路结构(a),(b)在 30° 方向上磁场的分布. 曲线(3)是磁路结构(a),(b)在 0° 方向上磁场分布状态. 显然,这两种结构在不同方位角上磁场

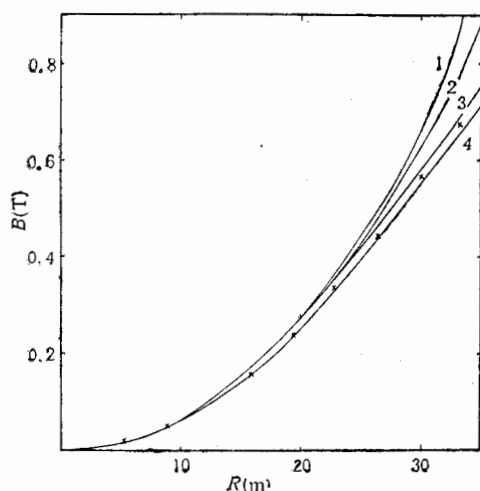


图3 3个永磁磁路结构在 0° 和 30° 方位角方向上沿半径的磁场分布

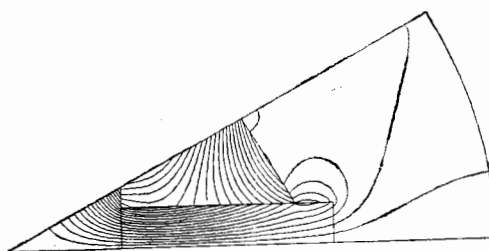


图4 永磁磁路结构(c)的磁力线分布

差异较大,这是我们不希望的. 结构(c)在 0° 方向上磁场分布曲线如曲线(4)所示. 其在 30° 方向上磁场分布以 x 点表示. 其磁力线分布如图4所示, 由于对称性, 只取其 $1/12$. 但这种结构最高磁场约为 0.7T, 不能满足设计上要求. 为了提高最大工作场强, 我们采用最高允许工作温度 200°C 的型号为 FHLN200 钕铁硼的永磁材料, 其 B_r 至少

可达 1.05T, H_c 约为 8.5kOe, 在室温下最大六极子磁场可达 0.82T. 这种材料的温度系数为 $-0.07\%/^{\circ}\text{C}$. 永磁铁采用低温冷却水冷却, 进水温度为 15°C , 出水温度为 25°C . 因而即使在最恶劣情况下能保证横向磁场大于 0.79T 仍能避免 $2\omega_{rf}$ 的闭合面碰上真空壁. 这样具有图 2(c) 所示的磁路结构的钕铁硼永磁既使横向磁场达到设计值, 又保证了沿方位角的足够均匀性.

四、轴向磁场的设计计算

为了在不增加激磁电流情况下, 提高引出端轴向磁场的峰值, 并不致太多地改动 ECR 源体的结构, 经多种方案比较我们在靠近引出端的线圈处附加一个厚为 15mm 的软铁环, 如图 5 的阴影部分所示. 对这种附加的软铁环, 我们选择了三种不同的端部形状, 即楔形, 矩形, 反楔形来研究对该处轴向峰值场的影响. 计算结果表明, 不同端部形状对其分布影响极小. 为加工简便起见, 我们采用矩形端部的圆环. 显然, 从图 6 中可见, 该圆环对该处的轴向磁场的峰值由原来的 0.65T 增加

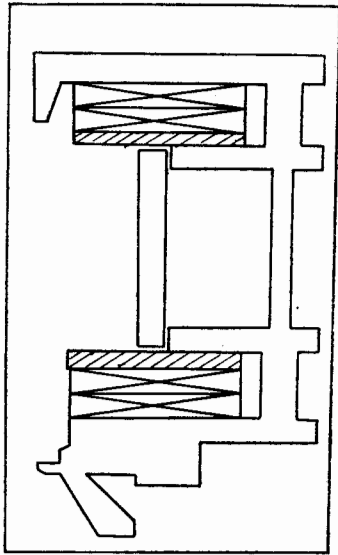


图 5 二块附加软铁环在 ECR 离子源中位置

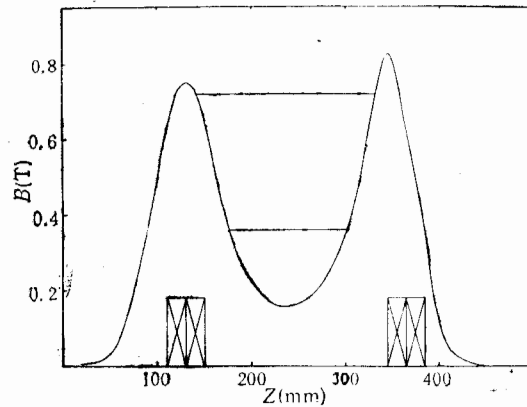


图 6 新的 ECR 离子源的轴向磁场分布

到 0.75T 和减小该峰的宽度是起不小作用的. 另外为了减小靠近注入部分的轴向磁场的峰宽度以利于冷等离子体向第二级扩散, 我们在另一组线圈的内侧加了一个如图 5 阴影部分所示的厚 10mm 的软铁环. 最后成形的轴向场分布如图 6 所示. 其磁镜系数分别为 $R_1 = 5.15$ 和 $R_2 = 4.69$. 这种新的磁路结构的磁力线分布如图 7 所示. 在新设计的横向磁场及轴向磁场共同作用下, ω_{cer} 共振面在轴向展宽由原来的 54mm 扩大为 125mm, 而 $2\omega_{rf}$ 的等值闭合面轴向展宽为 180mm. 它们的形状如图 8 所示. 它表明产生高密度高温电子的等离子体区域有很大扩展. 这为获得足够强度的高电荷态的离子束创造了最基本的条件. 轴向磁场计算采用了 MT-2D^[6] 程序和 POISSON^[7] 程序, 并相互校核.

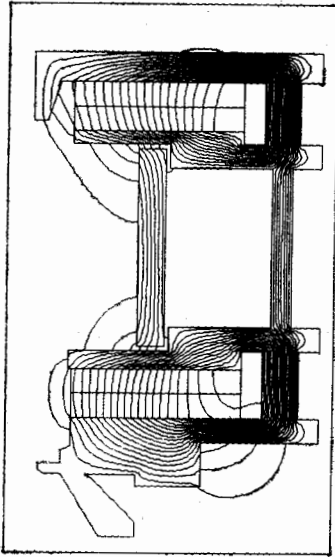
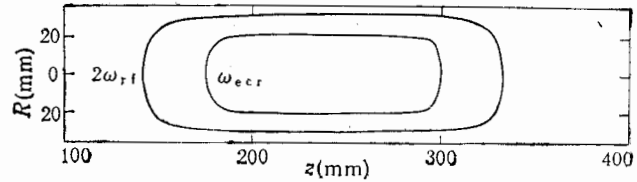


图7 新的磁路结构的磁力线分布

图8 ECR 离子源中 $\omega_{e cr}$ 共振面及 $2\omega_{r f}$ 的等值面

五、结 论

对一种改进型 ECR 离子源的横向及轴向磁场的设计计算结果表明,在现引进的 CAPRICE 型 ECR 离子源的原结构基础上,不改变发射机的频率,只需在两端线圈内侧分别加上厚 15mm 和厚 10mm 的铁环,并改变横向磁场的永磁铁的磁路,使最大六极子磁场由 0.4T 增加到 0.8T 左右,则在源体第二级的 $\omega_{e cr}$ 的共振面轴向展宽由原来的 54mm 扩大到 125mm。在这同时产生了轴向展宽为 180mm 的 $2\omega_{r f}$ 的闭合面。这样就从磁场分布形态上保证了产生强流高电荷态离子束。

参 考 文 献

- [1] 刘占稳、许永兴、魏宝文,“ECR 离子源原理及其磁场分析计算”,原子能科学技术,待发表。
- [2] F. Bourg, J. Debernardi, R. Geller et al., Workshop on the 6 th Inter. ECR Ion Source, P1, Berkeley, 1985.
- [3] B. Jacquot, P. Briand, F. Bourg, R. Geller et al., Note Scientifique No.887, CENG, DRFG-PADSI.
- [4] R. Geller and B. Jacquot, 7 th Workshop on ECR Ion Source, P.31, Jülich, 1986.
- [5] R. F. Holsinger, Private Communication, Part V, P. 7.
- [6] 许永兴、马英杰,全国粒子加速器论文集,(1979),P. 377.
- [7] A. M. Winslow, UCRL 7784-T(1964).

Design Calculation of a Improved ECR Ion Source

XU YONGXING LIU ZHANWEN WEI BAOWEN

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

ABSTRACT

The design of a ECR ion source in a working mode with a $\omega_{e cr}$ resonance surfaces and a $2\omega_{r f}$ enclosed surface is presented. The 0.8 T axial mirror field and 0.8 T radial hexapole field are introduced with detailed discussions. The computational results show that the axial length of the $\omega_{e cr}$ resonance surface in the improved ECR ion source is extended significantly compared with the original CAPRICE one and a closed $2\omega_{r f}$ equigauss surface is also formed. The new topology of the magnetic field in the improved ECR ion source will largely raise the intensity of high charged ion on the basis of the analysis of ionization mechanism.