

# 用于同位素电磁分离系统的强流离子源设计

武启<sup>1,2</sup> 刘玉国<sup>1,2</sup> 刘建立<sup>1</sup> 孙良亭<sup>1,2</sup> 赵红卫<sup>1,2</sup>

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 随着我国核科学与核技术的发展,高丰度同位素的产量无法满足市场需求,极大地限制了相关领域的发展。因此,迫切需要发展高产额、高效率的电磁同位素分离装置。离子源作为电磁同位素分离器中的关键部分,其性能直接影响目标同位素的分离与产额。设计了一台2.45 GHz微波驱动离子源用于稳定同位素电磁分离器的注入,目标是在引出能量40 keV下产生20 emA Xe<sup>+</sup>及5 emA Mo<sup>+</sup>。为了获得高密度等离子体,设计了双线圈管产生放电磁场,并通过仿真软件CST微波模块计算优化了高耦合效率的磁场位型和匹配波导。为了产生强流金属离子束,设计了内置放电室坩埚熔化金属氧化物。模拟结果表明:当加热丝电流为70 A时,坩埚温度最高为917 °C,可以高效地产生金属钼蒸气,进入放电室进行离子化。

**关键词** 电磁分离器, 同位素, 强流重离子束流, 2.45 GHz微波离子源

**中图分类号** TL501.5

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030202

## Design of a high current ion source for an electromagnetic isotope separator

WU Qi<sup>1,2</sup> LIU Yuguo<sup>1,2</sup> LIU Jianli<sup>1</sup> SUN Liangting<sup>1,2</sup> ZHAO Hongwei<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract** [Background] Stable isotopes play a crucial role in a variety of fields such as energy, military, semiconductor, agriculture, medicine, pharmacology, biology, food industry, and chemistry. With the rapid growth of nuclear science and technology applications in China, there has been an increasing demand for isotopes that cannot be met by current production capacities. Thus, the development of electromagnetic isotope separators capable of producing high yields and high isotopic purity has become necessary. [Purpose] This study aims to develop an electromagnetic isotope separator based on a 2.45 GHz microwave ion source and isotopic magnet for studying a number of important heavy isotopes, such as xenon and molybdenum isotopes. [Methods] Firstly, adjustable axial magnetic field in the source was designed by a double-solenoids to obtain high density plasma, and a high coupling efficiency matching waveguide was optimized by CST microwave computing module. Then, a crucible built in the discharge chamber was used to melt metal oxide for generating heavy metal ion beams. Finally, the discharge chamber, microwave coupling waveguides and heating oven of the ion source were simulated and designed for the generation of heavy ions. [Results] Simulation result shows that the temperature around the crucible is 917 °C when the current of heating wire is set to 70 A, and 100 mA hydrogen beam is generated during commissioning. The

国家重点研发计划项目(No.2016YFA0302202)、国家杰出青年科学基金(No.12025506)资助

第一作者: 武启, 男, 1983年出生, 2011年于大连理工大学获硕士学位, 现为博士研究生, 从事强流ECR离子源及低能传输线研究

通信作者: 赵红卫, E-mail: zhaohw@impcas.ac.cn

收稿日期: 2022-08-14, 修回日期: 2022-10-11

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2016YFA0302202), National Foundation for Distinguished Young Scientists (No.12025506)

First author: WU Qi, male, born in 1983, graduated from Dalian University of Technology with a master's degree in 2011, focusing on strong current ECR ion source and low energy transmission line

Corresponding author: ZHAO Hongwei, E-mail: zhaohw@impcas.ac.cn

Received date: 2022-08-14, revised date: 2022-10-11

designed crucible in the discharge chamber can generate metal vapor efficiently for ionization, and achieve producing 20 emA Xe<sup>+</sup> and 5 emA Mo<sup>+</sup> respectively at the energy of 40 keV. **[Conclusions]** The feasible scheme of the magnetic field and microwave coupling design of this study are verified. The design of the 2.45 GHz electron cyclotron resonance (ECR) ion source provides a feasible and effective solution for the high yields isotope ions.

**Key words** Electromagnetic mass separator, Isotope, Intense heavy ion beams, 2.45 GHz microwave ion source

稳定性同位素由于无放射性,在分离制备、合成、使用过程中无须特殊防护,可以安全操作,在能源、军工、半导体、农业、医学、药理学、生物学、食品、化学等领域都有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。如<sup>13</sup>C 尿素进行呼气试验,检测胃上皮的幽门螺杆菌;高丰度<sup>10</sup>B 有很强的防辐射和吸收中子的能力,可用于硼中子俘获治疗;高丰度<sup>87</sup>Rb 应用于卫星导航系统的核心部件原子钟;高丰度<sup>62</sup>Ni 是微型镍电池核心材料;高丰度<sup>100</sup>Mo 用于医用放射性核素的前驱原料;高纯度<sup>48</sup>Ca 用于核物理实验<sup>[2]</sup>。

随着我国核科学与核技术应用的发展,同位素丰度、纯度、种类及产量无法满足需求,极大地限制了相关领域的发展。因此,我国迫切需要发展高产量、高纯度及高运行效率的电磁同位素分离装置。稳定同位素的生产方法主要包括精馏法、化学法、离心法及电磁分离法,其中电磁分离法分离同位素种类多且纯度高,是获得高丰度稳定同位素的唯一可行方法<sup>[3-6]</sup>。目前,该类电磁同位素分离装置已经成功实现了高流强(~100 mA)、低纯度(<50%)和低流强(<10 mA)、高丰度的运行模式。但是,同时满足高产量和高纯度的同位素目前在国内外电磁分离技术领域仍为技术瓶颈。其中,高流强的同位素离子束的产生及分离、高分辨本领及富集丰度是关键核心技术,特别是强流重离子束的产生及传输存在一系列物理和技术上的挑战。

传统的电磁分离装置使用 Calutron 型离子源、弗里曼离子源和 Bernas 离子源,该类离子源的优点是结构简单、体积小且技术成熟。它的缺点是放电需要灯丝,灯丝有寿命限制和污染,且放电电极表面会受到污染沉积,需要频繁清理,导致后期维护极为复杂。为了解决灯丝寿命,科研工作者做了大量的实验进行研究,主要是增加灯丝尺寸,如增加灯丝直径。对多种灯丝材料(钨~铼)进行了测试及实验,都无法解决灯丝寿命短的问题<sup>[7-10]</sup>。

针对当前国内外电磁同位素分离器在较高丰度的运行模式下,富集产量低、运行周期短及维护复杂等问题,亟需一台高稳定、长寿命的强流离子源来提升同位素产量。基于以上原因,提出了使用 2.45 GHz 电子回旋共振 (Electron Cyclotron Resonance, ECR) 离子源技术来解决电磁同位素装

置中运行存在的问题,如源体寿命、装置运行效率及束流强度<sup>[11-13]</sup>。

本文设计了一套微波频率为 2.45 GHz 新型离子源用于同位素电磁分离器离子注入,目标是产生 20 emA Xe<sup>+</sup> 及 5 emA Mo<sup>+</sup> 的强流离子束,主要产生金属离子和气体离子。主要针对强流金属离子的产生,对离子源放电室、微波耦合单元及加热炉进行了仿真与设计,同时利用氢气为工作气体对设计的强流 2.45 GHz ECR 离子源进行了初步调试,验证了磁场设计与微波等离子体耦合设计方案的可行性。

## 1 实验装置

同位素电磁分离装置如图 1 所示,该实验装置主要由 4 部分组成,即 2.45 GHz 微波驱动离子源、180° 电磁分离器、收集靶及高压平台。离子源包含了微波传输及耦合系统、放电室、坩埚及引出系统,离子源的主要设计参数如表 1 所示。微波驱动频率为 2.45 GHz,产生的 TE<sub>10</sub> 微波经矩形波导传输馈入放电室,然后加速电子与工作物质碰撞,形成等离子体。产生的等离子体经引出电极加速成束流进入电磁分离器。设计的引出电极为加减速电极,即三电极系统。等离子体缝长为 60 mm,宽为 2 mm。由于离子源最大加速能量为 50 keV,所以设计了一套高压平台用于束流的二次加速。整个离子源及辅助设备悬浮于 100 kV 的高压平台上。

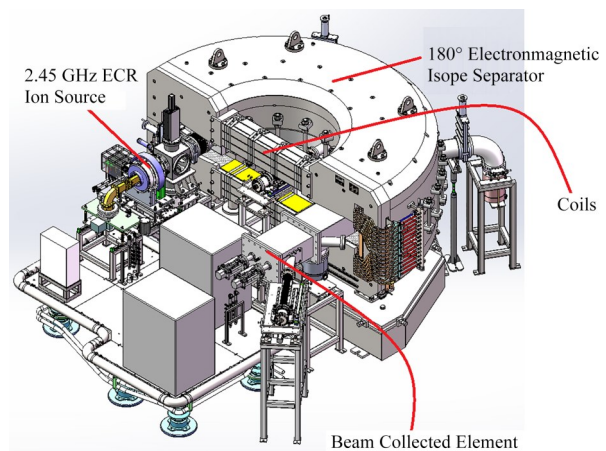


图 1 电磁同位素分离器示意图  
Fig.1 Diagram of electromagnetic isotope separator

表1 离子源主要设计参数  
Table 1 Design parameters of ion source

参数 Parameter	设计指标
微波频率 Microwave frequency	2.45 GHz
引出高压 Lead out high pressure	30~100 kV
离子种类, 束流强度 Ion type, beam intensity	$^{129}\text{Xe}$ , $^{131}\text{Xe}$ , $^{100}\text{Mo}$ , 20 emA $\text{Xe}^+$ , 5 emA $\text{Mo}^+$
狭缝尺寸 Slit dimension	60 mm×2 mm
微波功率 Microwave power	2 kW
炉子温度 Furnace temperature	500~1 000 °C

### 1.1 离子源设计

#### 1.1.1 微波耦合单元设计

为给高温炉以及加热设备预留安装空间,设计的离子源放电室为矩形,长度为90 mm,放电室内部尺寸与BJ-32波导内部尺寸相同,为了实现微波功率从波导系统到放电室内部的高效耦合,离子源放电室与传输波导之间通过多节脊波导过渡连接,实现BJ-32波导与放电室之间的阻抗匹配,减小微波功率反射。根据微波传输的阻抗匹配理论,设计了具有4节不同高度双脊结构的阻抗匹配脊波导,如图2所示。

每节脊波导的长度均为 $\lambda_g/4$ ,脊宽为20 mm,脊波导的总长度为175 mm,宽边72 mm,窄边34 mm。使用CST软件模拟计算了 $\text{TE}_{10}$ 模式的微波在设计的脊波导和放电室中的电场分布以及对应的功率分布,模拟中放电室内部阻抗为100  $\Omega$ ,结果如图3所示。

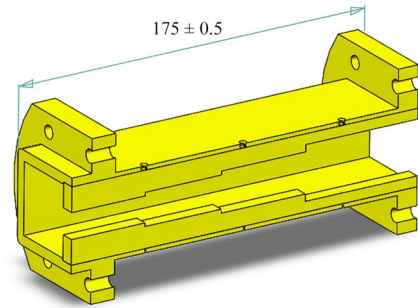


图2 双脊匹配波导设计结构图  
Fig.2 Layout of the double ridged waveguide

模拟结果表明,设计的4节脊波导能够很好地实现BJ-32波导与离子源弧腔之间的阻抗匹配,微波功率能够有效地馈入离子源矩形放电室中。

#### 1.1.2 磁场位型设计

图4给出了2.45 Hz微波离子源的剖面图。该源体由磁场线包、进气组件、弧腔、内衬及坩埚组成。线包使用无氧铜线绕制而成,两组线圈可以灵活地

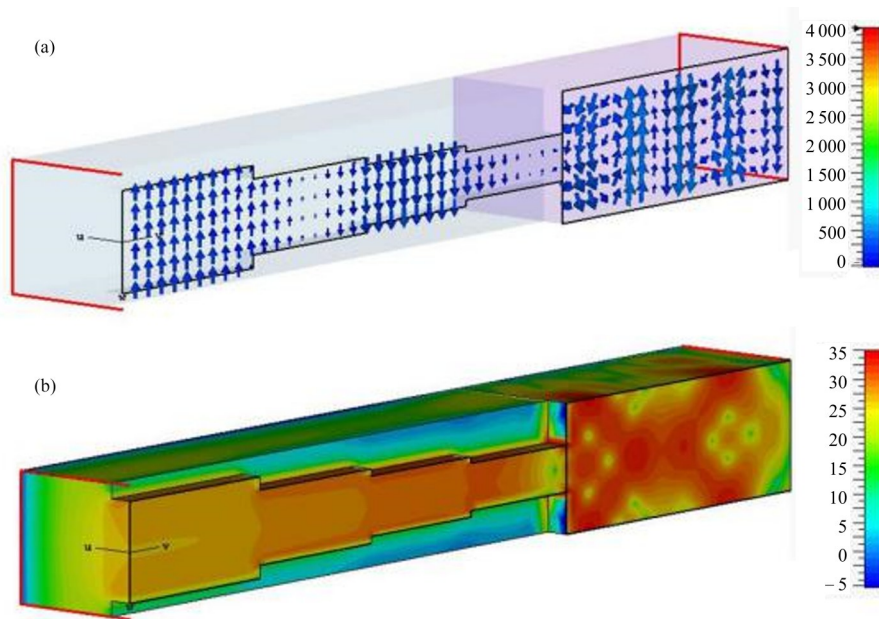


图3 脊波导内部微波电场(a)及功率分布(b)  
Fig.3 Microwave electrical field (a) and power density distribution (b) excited by  $\text{TE}_{10}$  mode port

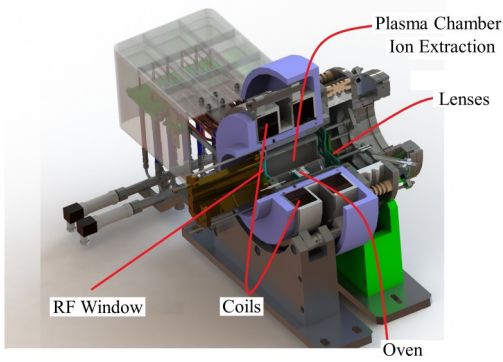


图4 2.45 GHz微波离子源及引出系统剖面图  
Fig.4 Sectional view of 2.45 GHz microwave ion source and extraction system

进行磁场调控,来满足不同放电条件下所需的场型。对于强流2.45 GHz ECR离子源,其磁场的产生方式有两种:一种是常温螺线管产生磁场;另一种是永磁方式产生磁场。针对实验装置对束流的参数要求(表1),离子源磁场采用螺线管包的方式产生耦合磁场,如图5所示。采用双螺线管可以精确调节

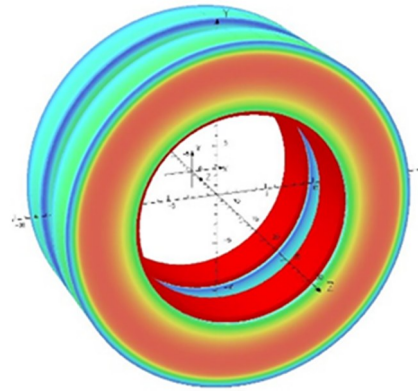


图5 离子源螺线管磁场三维计算模型  
Fig.5 3-D computing model for magnetic field distribution of the ion source

离子源放电室内轴向磁场分布,进一步提高微波和磁场的耦合效率,有利于产生高密度等离子体。图6给出了离子源放电室内轴向磁场分布。微波窗位于坐标3 cm处,引出电极孔位于坐标12 cm处。

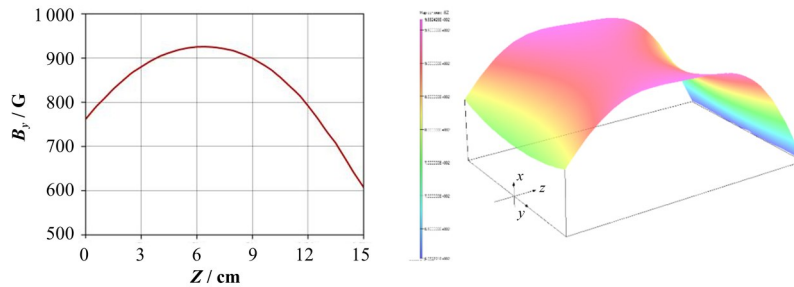


图6 离子源Z轴向磁场分布  
Fig.6 Axial magnetic field distribution along the Z-axis

### 1.1.3 放电室设计

进入放电室的微波加热电子与工作物质碰撞反应形成高密度等离子体。由于实验装置产生部分非气态离子,该同位素的反应物质大部分以固态的形式存在,因此需要加热炉产生蒸气进入放电室产生束流。对于固态离子的产生方案有三种:1)固态单质元素直接加热产生蒸气,进入放电室电离成等离子体,然后在引出电压下形成束流。2)溅射法,把物质放置于放电室内,然后用气态等离子体对其进行轰击,产生离子。3)化合物加热产生蒸气,进入放电室和支撑气体电离成等离子体,然后引出。方案一的优点是离子纯度和束流强度高,缺点是加热炉所需温度高,高压绝缘表面会沉积金属,降低微波传输效率和绝缘电阻。方案二的优点无需加热炉,离子易产生,缺点是很难获得强流束,绝缘层表面受污染。方案三的优点是金属离子易产生,化合物加热成蒸气所需温度较低,对绝缘表面污染较小,可以引

出强流离子束;缺点是引出离子种类复杂,不同的实验条件,离子比例差异较大,尤其卤素化合物离子易腐蚀放电室表面。因此,炉子法是获得强流重离子束流的最佳方案。根据获得物质蒸气的温度区间,主要可以分为低温炉( $T < 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、中温炉( $800\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 1\ 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ )和高温炉( $T > 1\ 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。对于钨、锶金属元素离子束,一般通过加热对应的金属化合物产生蒸气,通入放电室进行电离。

综合以上考虑,设计的离子源采用了电阻加热的金属炉来提供所需的金属蒸气。配备炉子后的放电腔结构如图7所示,放电腔外部套有氮化硼(BN)陶瓷套筒,工作时电阻丝加热BN套筒,以维持放电腔内部的高温。为了防止放电腔高温对微波窗密封结构产生损坏,微波窗密封法兰内部设有水冷槽。金属炉位于放电腔侧面,内径10 mm,材料为氧化铝陶瓷,金属炉外部有用于加热的电阻丝,加热金属炉后产生的金属蒸气进入放电腔完成电离。

通过有限元软件 ANSYS 对设计的加热炉进行了模拟计算,当加热丝电流为 70 A 时,弧腔及炉子温度分布如图 7 所示。模拟结果表明,当加热丝电

流为 70 A 时,坩埚温度最高为 917 °C。温度的精确控制采用电源精度 0.01%, 稳定度 0.01%, 确保温度变化小于 0.5 °C。

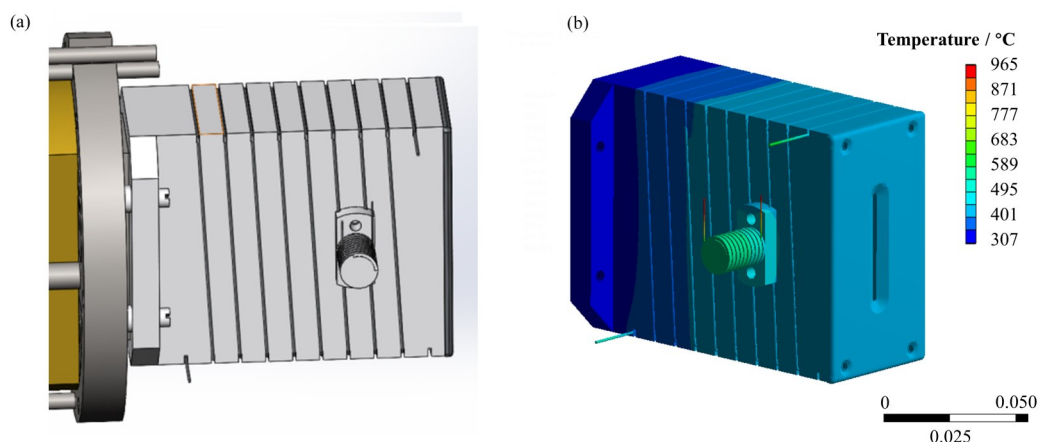


图 7 放电室结构(a)及温度分布(b)  
Fig.7 Discharge chamber setup (a) and temperature distribution of the chamber (b)

## 1.2 引出系统设计

同位素电磁分离装置中,所需注入束流为带状型。为了提高电磁分离系统的分辨率,对引出电极狭缝尺寸进行优化,获得高品质束流。电磁分离器中二极铁的偏转半径 1 000 mm, 偏转角度 180°, 极面宽度 600 mm, 中心轨道处极面间距 300 mm。对于质量数相差 1% 的同位素, 当  $r_0=1\ 000\ \text{mm}$ ,  $n=0.5$  时, 色散  $D=20\ \text{mm}$ , 假设接收器处束斑宽度为 6 mm, 分离磁铁中心轨道半径  $r_0=1\ 000\ \text{mm}$  时, 分离系统的分辨本领好于 300。考虑到束流在传输过程中的空间电荷中和效应, 系统运行真空维持在  $10^{-3}\ \text{Pa}$  量级。对于不同质量的元素, 电磁分离器注

入束流能量差异较大。实验中要求给 Xe 同位素注入能量需要 40 keV<sup>[14]</sup>。为了 Xe<sup>+</sup> 束流能够更好地传输及分离, 设计 Xe<sup>+</sup> 束流强度 20 emA, 离子源引出能量 40 keV, 图 8(a) 给出了 X 方向上的 Xe<sup>+</sup> 束流的传输包络, 图 8(b) 给出了 X 方向上束流的发射度相图分布。模拟计算中狭缝的长度为 60 mm (Y 方向), 宽度为 2 mm (X 方向)。图 9 给出了 Y 方向上束流传输轨迹及相图分布。上述计算结果使用了 IBSIMU 软件<sup>[15-16]</sup>, 据此模拟结果可以准确地计算出匹配的电极间距、束流的 Twiss 参数。模拟计算出等离子体电极与抑制电极的匹配间距是 12 mm, 抑制电极与地电极的间距为 5 mm。考虑到实验中引出束流功率较大, 电极可能存在打火、烧蚀等问题。

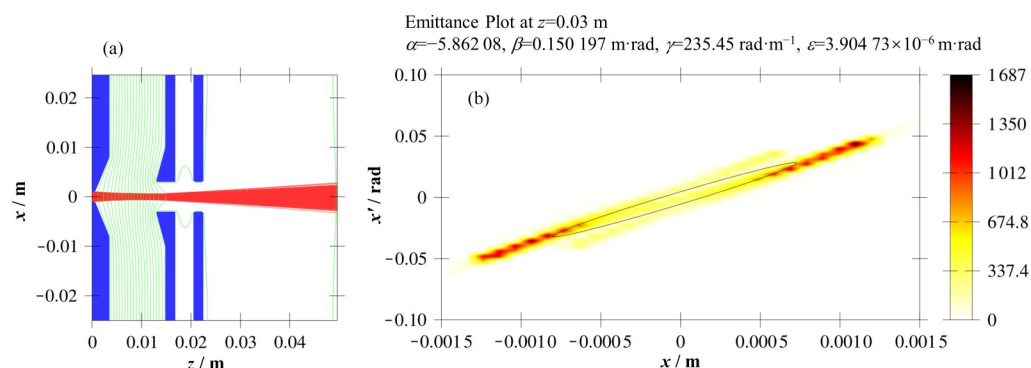


图 8 40 kV 引出高压下, 20 emA Xe<sup>+</sup> X 方向引出束流包络(a)及发射度相图分布(b)  
Fig.8 20 emA Xe<sup>+</sup> beam extraction at 40 kV potential, the beam envelope in the horizontal direction (a), and simulated phase space distribution (b)

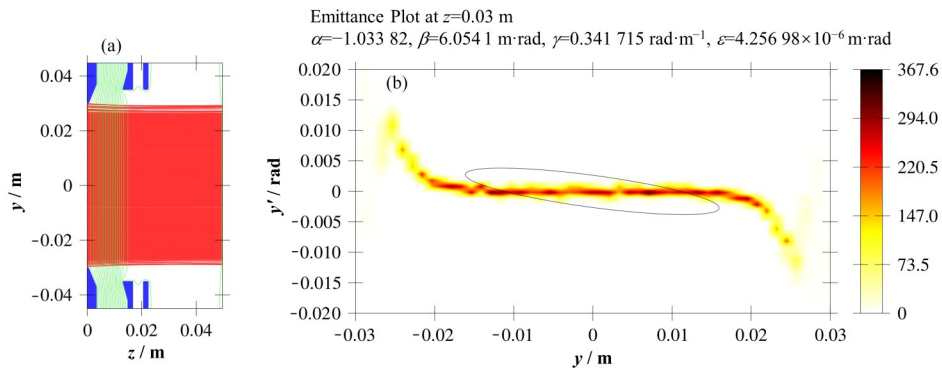


图9 40 kV引出高压下, 20 emA Xe<sup>+</sup> Y方向束流传输轨迹(a)及发射度相图分布(b)  
 Fig.9 20 emA Xe<sup>+</sup> beam extraction at 40 kV potential, the beam envelope in the vertical direction (a), and simulated phase space distribution (b)

## 2 初步实验结果

为了验证螺线管的磁场和过渡波导的微波耦合效率, 前期加工了一套双螺线管和过渡波导进行实验研究。离线测试平台如图10所示。测试平台包括2.45 GHz双螺线管离子源、引出系统、诊断室、法拉第筒及真空系统。法拉第筒垂直安装于距离引出孔650 mm处。为了获得高真空, 安装了两套1 300 L分子泵。图11给出了放电室内轴向磁场分布。离子源磁场是用双线包组合调节磁场强度, 通过加载不同的电流值获取了离子源放电室内轴向磁场分布。S1和S2分别代表第一组和第二组螺线管加载电流。当S1加载电流为90 A时, 微波注入处均可产生满足放电共振磁场875 Gs。当加载一定的微波功率值后, 离子源均可正常放电形成等离子体。产生的微波通过过渡波导可以很好地传输匹配至放电室, 同时验证了过渡波导设计的合理性。

以上主要测试了双螺线管的轴向磁场分布, 从不同的磁场构型中获取ECR共振面的具体位置。为了进一步验证微波耦合的效率, 对引出束流强度进行测试。离子源放电时真空为 $1.5 \times 10^{-3}$  Pa, 通过优化螺线管的电源值进行调试, 当S1设置92 A, S2

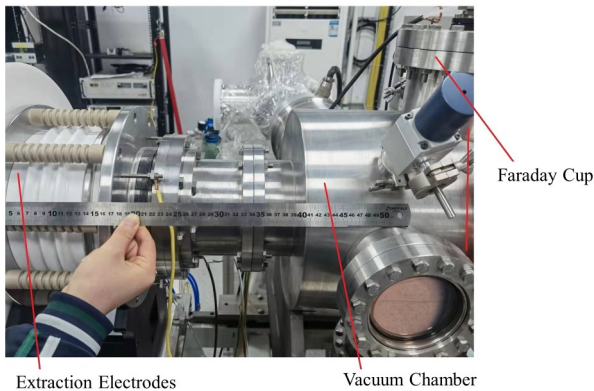


图10 离子源测试平台  
 Fig.10 Snapshot of 2.45 GHz ECR ion source test bench

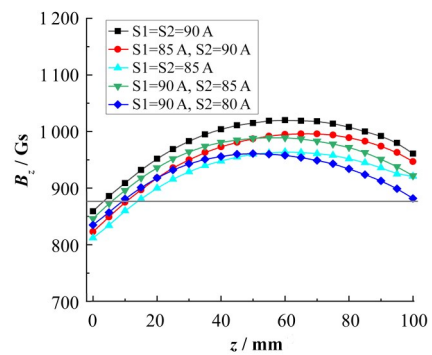


图11 不同线包电流下, 离子源放电室内轴向磁场分布  
 Fig.11 Source magnetic field distribution under different solenoid currents

设置75 A时, 法拉第筒最大可以获得95 mA的脉冲束, 实验结果如图12所示。脉冲的重复频率50 Hz, 脉宽3 ms, 微波输入峰值功率800 W, 引出高压50 kV, 工作气体为氢气。实验结果表明, 采用文中设计的双脊波导可以高效地传输微波至放电室。通过以上实验结果, 离子源微波等离子体耦合设计及磁场构型设计的合理性得到了初步验证。

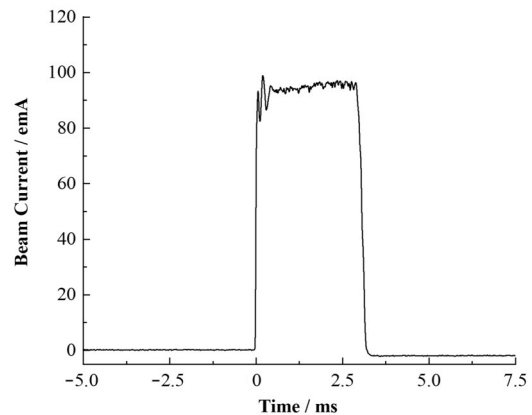


图12 重复频率50 Hz、脉宽3 ms下离子源法拉第筒引出束流强度  
 Fig.12 Beam pulsed shape measurement with a Faraday cup, frequency at 50 Hz, pulse width 3 ms

### 3 结语

传统的电磁分离装置使用 Calutron 型离子源、弗里曼离子源和 Bernas 离子源,上述离子源存在运行寿命短、维护频率高等问题,从而降低了同位素生产效率。2.45 GHz ECR 放电属于无极放电,不存在电极寿命的问题。因此,本文设计了一套新型 2.45 GHz ECR 离子源代替热阴极放电型离子源,以解决上述问题。设计的新型 2.45 GHz ECR 离子源具有产生气体元素与金属元素离子束的能力,如产生气体元素重离子束( $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Kr}^+$ ,  $\text{Xe}^+$ 等)和最大 20 mA 的金属元素离子束流(如  $\text{Mo}^+$ )。

针对强流离子束的产生,主要对离子源微波等离子体耦合、磁场构型、金属蒸气产生及强流条形离子束引出几个方面进行了模拟计算。同时以氢气为工作气体,对设计的强流 2.45 GHz ECR 离子源进行了初步实验,在微波功率为 800 W 的条件下,获得了能量为 50 keV,流强为 95 mA 的强流脉冲离子束,验证了微波等离子体耦合设计与双螺线管磁场设计方案的可行性。

为了获得高产额的金属离子,设计了一套集成式的放电室。加热坩埚内置于放电室,可以有效地避免了金属蒸气冷凝、堵塞等问题。同时利用 ANSYS 软件对离子源放电腔与金属炉整体进行了模拟,计算了工作时金属炉以及放电腔的温度分布,模拟计算表明设计的金属炉与弧腔能够满足绝大多数金属元素蒸气的产生条件。但是离子源可能存在一系列技术难点及挑战,如金属离子对微波窗的污染,强流束在引出电极中打火及电极的烧蚀问题,这些都需要在后续的实验调试中加以解决。

目前该实验装置的电磁分离器已安装完成,为此,亟需研制一套强流离子源用于实验。目前完成了离子源的微波系统、源体及引出系统的设计,并对设计的磁场构型与微波等离子体耦合波导进行了实验验证。目前该离子源计划进行总装调试。后期实验任务主要针对  $\text{Xe}^+$ 、 $\text{B}^+$  及  $\text{Mo}^+$  束流进行实验,将对引出束流发射度、束流截面分布、束流传输及分离进行实验研究。

**致谢** 感谢中国科学院近代物理研究所离子源室提供同位素分离器实验场地。

**作者贡献声明** 武启:负责离子源的设计,论文起草及后续修订;刘玉国:负责引出系统的模拟计算;刘建立:负责平台建设;孙良亭:负责基金资助,论文指导;赵红卫:文章指导与审阅。

### 参考文献

- 徐大刚, 李良君, 杜晓宁, 等. 稳定同位素技术的研究与发展[C]. 中国核科学技术进展报告——中国核学会 2009 年学术年会论文集(第一卷·第 8 册), 北京, 2009: 377 - 381.  
XU Dagang, LI Liangjun, DU Xiaoning, *et al.* Research and development of stable isotope technology[C]. Progress Report on Nuclear Science and Technology in China—Proceedings of the 2009 Annual Conference of the Chinese Nuclear Society (Vol. 1-No. 8), Beijing, 2009: 377 - 381.
- 苏士俊, 林治洲. 稳定同位素的电磁分离[J]. 同位素, 1991, 4(1): 49 - 53.  
SU Shijun, LIN Zhizhou. Electromagnetic separation of isotopes[J]. Journal of Isotopes, 1991, 4(1): 49 - 53.
- 任秀艳, 曾自强, 吴灵美, 等. 电磁法分离铷同位素用接收器的研制[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(12): 2308 - 2312. DOI: 10.7538/yzk.2018.youxian.0285.  
REN Xiuyan, ZENG Ziqiang, WU Lingmei, *et al.* Research of receiver for separating Rb isotope[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(12): 2308 - 2312. DOI: 10.7538/yzk.2018.youxian.0285.
- 李公攀, 于丽华, 王朝驹, 等. 同位素电磁分离器离子束成形的试验研究[J]. 原子能科学技术, 1981, 15(1): 46 - 51.  
LI Gongpan, YU Lihua, WANG Chaoju, *et al.* Experimental study on ion beam forming of isotope electromagnetic separator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1981, 15(1): 46 - 51.
- 刘如楠. 甘肃省同位素实验室启动建设[EB/OL]. 中国科学报. [2020-1-20]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/1/435050.shtm>.  
LIU Runan. Gansu isotope laboratory starts construction [EB/OL]. China Science News. [2020-1-20]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/1/435050.shtm>.
- 任秀艳, 米亚静, 曾自强, 等.  $^{62}\text{Ni}$  同位素的分离制备[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(11): 2111 - 2115. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.11.2111.  
REN Xiuyan, MI Yajing, ZENG Ziqiang, *et al.* Separation and preparation of  $^{62}\text{Ni}$  isotope[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(11): 2111 - 2115. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.11.2111.
- Tracy J G, Bell W A, Veach A M, *et al.* Stable isotope enrichment techniques and ORNL separation status[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research

- Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 1987, **26**(1 - 3): 7 - 11. DOI: [10.1016/0168-583X\(87\)90723-3](https://doi.org/10.1016/0168-583X(87)90723-3).
- 8 Maier-Komor P. Uranium isotope separation from 1941 to the present[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, **613**(3): 465 - 472. DOI: [10.1016/j.nima.2009.10.005](https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.10.005).
- 9 Egle B J, Hart K J, Aaron W S. Stable isotope enrichment capabilities at Oak Ridge National Laboratory[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014, **299**(2): 995 - 999. DOI: [10.1007/s10967-013-2630-8](https://doi.org/10.1007/s10967-013-2630-8).
- 10 F-3 电磁分离器磁场改进组. F-3 电磁分离器聚焦性能的测试[J]. 原子能科学技术, 1976, **10**(4): 360 - 370. Improvement group of F-3 electromagnetic separator. Measurement of focusing performance of F-3 electromagnetic separator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1976, **10**(4): 360 - 370.
- 11 赵籍九, 尹兆升. 粒子加速器技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 429 - 430. ZHAO Jijiu, YIN Zhaosheng. Particle accelerator technology[M]. Benjing: Higher Education Press, 2005: 429 - 430.
- 12 Clarkegayther M A. A fast beam chopper for next generation high power proton drivers[C]. Proceedings of IPAC, 2005: 1637 - 1639. DOI: [10.1109/PAC.2007.4440848](https://doi.org/10.1109/PAC.2007.4440848).
- 13 Caruso A, Longhitano A, Torrisi G, *et al.* Experimental performance of the chopper for the ESS LINAC[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, **1067**: 042015. DOI: [10.1088/1742-6596/1067/4/042015](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1067/4/042015).
- 14 Liu Y G, Wu Q, Zhang X, *et al.* Design of a 180° electromagnetic isotope separator with inhomogeneous magnetic field[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, **1006**: 165428. DOI: [10.1016/j.nima.2021.165428](https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165428).
- 15 Kalvas T, Tarvainen O, Ropponen T, *et al.* IBSIMU: a three-dimensional simulation software for charged particle optics[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, **81**(2): 02B703. DOI: [10.1063/1.3258608](https://doi.org/10.1063/1.3258608).
- 16 Aleksandrov A, Deibele C, Roseberry T. New design of the SNS MEBT chopper deflector[C]. 2007 IEEE Particle Accelerator Conference. Albuquerque, NM, USA. IEEE, 2007: 1817 - 1819. DOI: [10.1109/PAC.2007.4440908](https://doi.org/10.1109/PAC.2007.4440908).