

电子回旋加速器共振离子源 (ECRIS)

车芳裕

一、前 言

近三十年来,常规的潘宁离子源(PIG)一直是产生多电荷态重离子的有力工具,并在重离子加速器中占重要的地位。然而,PIG源作为重离子源存在严重的缺点:其一,阴极受重离子轰击被腐蚀,不仅寿命短(一般几小时到十几小时),而且产额不稳定;其二,它虽具有足够高的等离子体密度,但高能电子很少,且离子的约束时间极短,以致在电荷态方面没有根本的突破。

六十年代中期,一些研究者根据PIG源的使用经验提出研制长寿命高电荷态的新离子源,到七十年代中期出现了各种形式的新源,归纳起来有四大类:(1)等离子体电子被加热离子源(PEHIS);有电子回旋加速器共振源(ECRIS)和束-等离子体相互作用源(BPIIS);(2)脉冲等离子体离子源(PPIS);有火花源(SIS)、激光源(LIS)等;(3)电子云离子源(ECIS);有HIPAC源、电子束离子源(EBIS)、飞行时间电子束源(TOFEBIS);(4)质子束离子源。这些源中,有些是因为技术上的困难,有些是因为高电荷态离子产额少或者束流品质差无实用价值而中断研究或者逐渐消声匿迹。目前国际上最有希望而且取得了巨大成功的是ECRIS和EBIS,尽管前者对较重的元素($A \geq 132$)产生的离子电荷态只有后者的一半,但其可靠性和实用性都优于后者。本文介绍一种最先进的多电荷重离子源——电子回旋加速器共振源,在重离子束应用日益广泛而深入的今天也许有所裨益。

二、ECRIS发展概况及现状

1964年法国格勒诺布尔核子研究中心R.Geller和他的研究小组最先研制ECR源,第二年他们建成了只有一个电子回旋共振级的ECR装置叫'Mafios',用这一简单的装置获得了可与径向引出的PIG源相比拟的离子电荷态和流强,而且克服了PIG源寿命短的缺点,这在当时是一个令人鼓舞的结果。七十年代末,用带有两级电子回旋共振的'Supermafios'获得了几微安的 C^{6+} , N^{7+} , Ne^{9+} 和 Ar^{11+} 的离子束,其他束流有: C^{5+} (16微安); N^{6+} (7.7微安); O^{6+} (~29微安); Ar^{12+} (~2微安); Xe^{26+} (~0.2微安)。这样高的电荷态是PIG源达不到的,如此大的流强甚至EBIS源也远所不及。'Supermafios'的研制成功,引起了人们对ECR源的极大兴趣。七十年代末到八十年代初,ECR源方面的努力主要集中在欧洲。比利时(Louvain-La-Neuve)、西德(Karlsruhe)最早仿Grenoble研制ECR源,随后西德Jülich、GSI也开始了这方面工作,R.Geller等人,继'Supermafios'之后,建成了二级的小型源叫'Micromafios'(或Minimafios)。Karlsruhe有两台ECR源,小源叫'Pico-HISKA',大源叫'HISKA'。Louvain-La-Neuve加速器实验室也建成两台,小源叫'KCRVETTE',大源叫'ECRVIS'。目前,西德(Karlsruhe)、比利时(Louvain-La-Neuve)、荷兰(Groninge)和法国(Grenoble)已将ECR源产生的重离子束注入到加速器中。美国伯克利、劳伦斯实验室82年计划建一台小型ECR源,将于今年底在88英寸四旋加速器上注入试

验。法国GANIL在R.Geller教授的协助下，于明年十一月将用‘Minimafios’作为第二注入器的外离子源。正在研制的还有苏联和日本，我国也计划用ECR源作为重离子加速系统注入器的外离子源。

最近五年内，至少有十二台ECR源建成和试验，这些源基本上都成功地获得了稳定可靠的多电荷重离子束。

ECR源国际性学术讨论会共举行了五次。单从80年以来就举行了三次，最后一次是去年四月在Louvain-La-Neuve召开的，第六次讨论会将于1985年1月在美国LBL召开。内容有ECR源的理论、设计、建造、运行及其在各方面的应用。近几年来，关于ECR源讨论会频繁召开并且涉及的内容非常广泛，说明ECR源发展的喜人形势。

三、ECR源的原理及特点

大家知道，运动着的电子在磁场作用下将在与磁力线垂直的平面内作圆周运动，电子的旋转半径 $r_e = \frac{m_e v}{eB}$ （其中， v 为垂直于磁力线方向的电子速度， m_e 为电子质量， e 为电子电荷， B 为磁感应密度），则电子旋转角频率 $\omega = \frac{Be}{m_e}$ 。在ECR源中，电离电子

的能量是由微波功率加热等离子体获得的，当微波频率等于电子旋转频率时，电子就象在回旋加速器中一样作共振回旋运动，ECR源其名即由此而得。

ECR源一般分两级（如图1所示）。第一级称为注入级或第一回旋共振级，第二级称为主级或第二回旋共振级。

注入级的作用主要是建立等离子体，其真空室中充以 10^{-3} 托的中性气体，微波电场使中性气体电离形成所谓“冷”等离子体，尔后沿着磁场梯度向全级扩散。主级的作用是约束等离子体，使电子在回旋共振中获得较高能量，高能电子与等离子体中离子多次碰

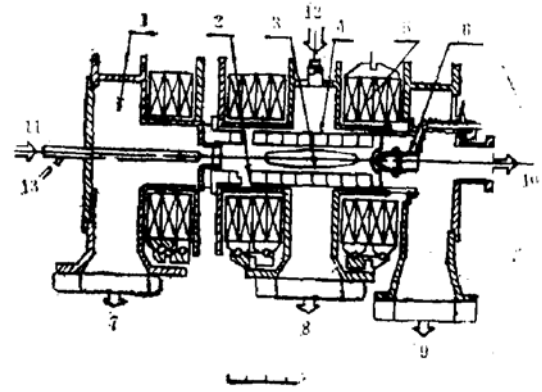


图1. ECR离子源剖面图
1.注入级；2.主级；3.共振区；4.多极磁铁；5.螺旋管线圈；6.引出电极；7, 8, 9.真空泵；10.离子束；11.注入级微波功率；12.主级微波功率；13.送气管道

撞将离子剥离到高电荷态。主级中螺旋管线圈建立一个磁镜场，其场形像瓶子一样，中间弱两端强。在磁镜场中，带电粒子的运动可以分解成三部份（见图2）：（1）围绕磁力线作回旋运动（拉摩旋转），在非相对论情况下，粒子的旋转周期 τ_1 与粒子的能量无关；（2）由两个磁场极大值之间的反射引起的沿磁力线的振荡，振荡周期 τ_2 反比于粒子的速度；（3）由磁场径向梯度引起的沿方位角的漂移，漂移时间 τ_3 与粒子的能量成反比。

三者的关系是： $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$

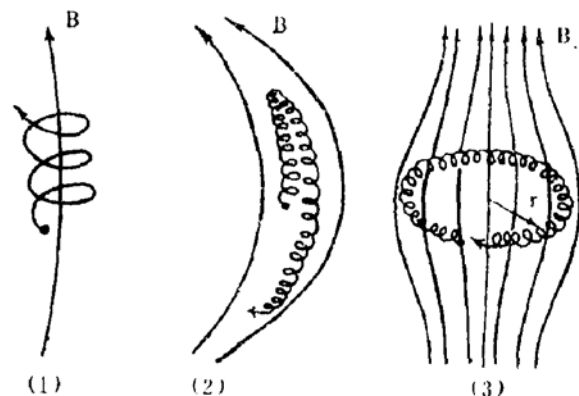


图2. 磁镜场中带电粒子的运动

当任何一个带电粒子经受大角度散射时，可以摆脱磁约束，散射时间为：

$$\tau_{COLL} = KE^{-1.5}$$

对于高能电子:

$$\tau_1 < \tau_2 < \tau_3 < \tau_{COLL}$$

所以在磁镜场中,热电子能很好地受到磁约束,其约束时间 $\tau_{CONF} \approx \tau_{COLL} = KE^{-1.5}$,另一方面,对于低能离子:

$$\tau_{COLL} \approx \tau_1 \ll \tau_2 \ll \tau_3$$

它不受磁约束,低能离子将从真空室中心向壁漏泄,因此在磁镜场中等离子体的约束是不稳定的。

如果建立一种场形使磁瓶边缘的磁场强而内部的较弱,如图3所示,这样等离子体边界是稳定的。这种所谓‘极小B’磁场可用螺旋线圈和多极磁铁的组合而获得,多极磁铁一般是六极的,还有人打算用十极的,ECR源中多极磁铁是稀土永久磁铁。ECR源主级中场形见图4。

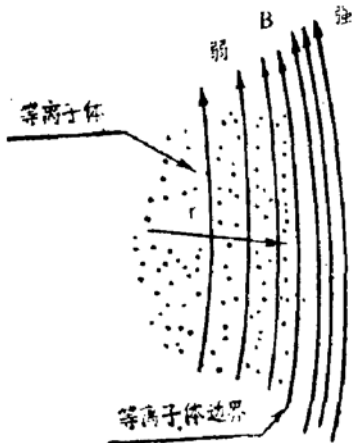


图3. 等离子体边界稳定性

为在ECR源中建立这种场形而获得束流大、电荷态高的离子束花了十多年的时间!这正是从‘Mafios’到‘Supermafios’为什么经历这么长时间的主要原因。

主级中的等离子体由主级微波功率加热,事实上,加热功率大部份耦合给等离子体中的电子。

在回旋共振的条件下,当电子越过某一与微波电场发生共振的磁表面时,其能量获得增加(目前的ECR源电子的能量可达到~20KeV),这种高能电子与等离子体中离子

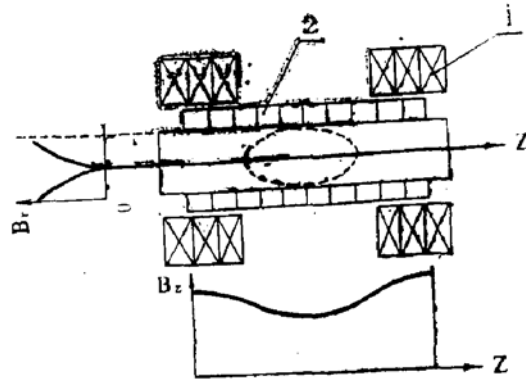


图4. 主级中的‘极小B’场形
1.螺旋管线圈, 2.多极磁铁,
 B_r 径向磁场分布,
 B_z 轴向磁场分布。

多次碰撞产生高电荷态离子,然后由相对于等离子体负电位的电极引出离子束,所以两级的真空室都处在高压端。

ECR源的特点是: 1) 具有高的电子温度(6KeV—20KeV)。电子密度与等离子体约束时间之积($n\tau$)约 $10^7 \sim 7 \times 10^8$ ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$),与PIG源的差不多; 2) 对于质量数小于40的元素能产生高荷质比、高流强的离子束; 3) 由于无电极,源的寿命长(约2000小时); 4) 离子束可连续引出,负载因子可达百分之百(而EBIS只有25%); 5) 能散小(约60eV)、发射度小(0.3~1mmrad),仅次于EBIS; 6) 对较重的元素荷质比下降,离子电荷态约是EBIS的二分之一。

四、ECR源的应用

ECR源能提供高电荷态强离子束,在加速器工程、重离子核物理、原子物理、束箔光谱、天体物理、半导体工艺等领域无疑是很受欢迎的。这里仅举以下几方面的例子:

1. 加速器工程

在回旋加速器中粒子的能量E与粒子的电荷数q的平方成正比,即 $E \propto q^2$,而直线加速器粒子能量 $E \propto q$ 。所以对一定能量常数的加速器来说,用ECR源比用常规源提供同样的离子可以获得高得多的能量,或者说,为了

得到一定能量的粒子可以将加速器做得小些,减少投资。ECR源寿命长,停机时间少,提高运行效率,离子束稳定、能散和发射度小提高了加速器的束流品质。

表一

离子	$^{12}\text{C}^{6+}$	$^{14}\text{N}^{7+}$	$^{16}\text{O}^{7+}$	$^{20}\text{Ne}^{9+}$	$^{40}\text{Ar}^{16+}$	$^{84}\text{Kr}^{20+}$	$^{132}\text{Xe}^{24+}$
加速方式和粒子能量 SFC + ECRIS E (兆电子伏/核子)	17.3	17.3	13.2	14.0	11.0	3.9	2.3
SSC + SFC + ECRIS E (兆电子伏/核子)	112.5	112.5	86.1	91.1	72.0	25.5	14.9

1) 重离子核反应机制与入射粒子的能量有强烈的依赖关系。一般感兴趣的能量范围是10—40兆电子伏/核子,特别是在过渡区的核反应机制的研究。已有数据证明当粒子能量在10—100兆电子伏/核子范围内存在过渡。用常规源(PIG)在此能量范围内只能做极有限的工作,用ECR源则在相当宽的质量数范围内的粒子能量能满足重离子核反应机制研究的需要。作为一个例子,用我国即将建成的重离子加速系统(分离扇SSC+扇形聚焦回旋加速器SFC)来加速ECR源产生的具有足够流强的几种离子所能得到的能量见表一。

2) 深部非弹性散射研究中,理论上和实验上的课题都集中在高激发态旋转双核系统中产生的角动量分布上。重核所带的内在角动量由热激发产生角动量分散(或角动量宽度)。理论上企图用研究 ^{32}S 能量在7.4MeV/核子时的 $^{32}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 反应来证明角动量宽度与入射道质量不对称性有关。用常规源只能产生 $^{32}\text{S}^{7+}$,否则束流强度不能满足,现有的加速器加速 S^{7+} 达不到所需的能量。用ECR源提供 $^{32}\text{S}^{12+}$ 束则可超过所需的能量,而且有足够的流强以及负载因子100%很容易地完成深部非弹性散射中困难的角关联符合实验。

3) 目前核结构的研究,特别是那些具有高自旋核子态的研究需要能量在融合位垒以上的多种入射粒子。ECR源不仅能提供各种气体离子而且也很有可能提供金属离子。

2. 重离子核物理研究

重离子核物理与加速器工程密切相关,ECR源的应用对重离子核物理研究的深入和发展有重要意义。

ECR源寿命长、电荷态高等独特的优点有利于核结构的研究。

3. 原子物理学

原子物理是ECR源应用又一个领域。目前人们对低能多电荷离子用于原子物理学有极大的兴趣。其原因是:其一,这个领域中的基础研究;其二,实验研究在天体物理、聚变及其他高温等离子体等许多方面有重要的应用。

实验研究的两个主要方面是离子-原子碰撞和离子-电子碰撞。前者的例子是选择态的电子俘获。在电子俘获碰撞中测出处于选择态电子俘获的最终态数目从而确定进入特殊量子态的俘获。后者的例子是在离子-电子碰撞中的电离和激发。这两种过程的研究能为理论模式、聚变或其他高温等离子体的诊断、天体物理和离子源本身的发展等方面提供必要的实验数据。用常规源,实验只能限于低电荷态,例如 Xe^{6+} ,而对高电荷态情况,只有用半经验公式外推,结果的精度要差两倍或更多,应用ECR源可以扩大试验范围、提高实验精度。

五、结束语

ECR源的研制阶段经历十四、五年之久,足见此源理论和技术上的难度。就目前来看,现有的ECR源还远远没有达到极限性能。近几年来,关于ECR源的理论概念出现

了一些与实验事实不相符的地方。例如，在‘Supermafios’之后，人们认为，为增加等离子体约束时间，源的尺寸大些好，但奇怪的是，比‘Supermafios’小四倍的‘Micromafios’产生的离子电荷态分布完全比得上前者；又如，一般认为电子能量、电子密度和约束时间是提高电荷态的主要因素，为使电子密度大应有尽可能高的等离子体密度。但 ECREVIS 和 ECREVETTE 上发现获得最佳电荷态分布时的等离子体密度并不是可能达到的最高密度；冷等离子体向主级扩散必需有平滑的磁场梯度。但试验表明，在梯度方向相反甚至根本不存在梯度的情况下，扩散仍可进行而且能满足要求，……如此等等，充分说明原先对 ECR 源的本质以及等离子体各参数的相互影响、相互制约关系了解还不深刻。ECR 源理论方面的工作有待继续探索和完善。其次在技术上改进源的性能，例如，期望用磁钢磁轭提高磁效率、减小杂散场使等离子体免受外磁场的干扰；将采用多重并联速调管以获得大的加热功率；采用了超导线圈，减少功耗、提高了磁场，相应地提出了提高微波频率的要求。诸如此类的技术问题有很多。ECR 源正面临应用、提高

和发展阶段。

ECR 源是当前世界上唯一已具有实用性的新源，它必将对各重离子束应用领域的发展起着促进作用。

参 考 文 献

1. J. Arianer, Proc. 7th Inter. Conf. on Cyclotrons and Their Applications 19—22 Aug. 1975 P.341
2. R. Geller, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26 №2, 2151 (1979)
3. V. Bechtold, et al., Nucl. Inst. Meth. 178, 305 (1980)
4. Y. Jongen, et al., Proc. 9th Inter. Conf. on Cyclotrons and their Applications P.281 and P.249 (1981)
5. Y. Jongen, Proc. 10th Inter. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Michigan State University, East Lansing, MI April 30—May 3, 1984. “Electron Cyclotron Resonance Ion Sources”.
6. “Proposal To construct an Electron Cyclotron Resonance Ion Source For the 88—Inch Cyclotron”, Nuclear Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory University of California Sep. 1982.