

ECR源用于重离子回旋加速器的情况

许士元 叶美玲

一、引言

在重离子加速中，离子的荷质比 ($e = Q/A$) 是关键参量之一。 e 越小，离子的加速效率就越低，加速器的尺寸、规模、投资也就越大，尤其是回旋加速器。因为，回旋加速器能获得的离子能量是与电荷数的平方成比例的。所以，目前许多离子源小组都为高电荷态的离子源问题进行着工作。

在广泛使用的PIG源上，虽然在提高高电荷态的重离子流强和改进工作的可靠性，获得了一些进展。如用混合气体加速，可使质量数 ≤ 20 的较高电荷态的重离子流增加5倍⁽¹⁾。用快速反应(2ms)的压电阀控制离子源的供气系统，从而得到稳定的较大的重离子流⁽²⁾。但是由于高电荷态离子流的强度受两个阴极块提供的有限的电子密度和短的离

子约束时间的限制，进展总是不够理想。

新的高电荷态离子源的研制，经过多年的努力，有的已达到实用水平。如电子回旋加速共振 (ECR) 离子源、电子束离子源 (EBIS) 等。表1给出PIG、ECR、EBIS三种源可得到的一些典型的离子流⁽³⁾。它明显地表示ECR源在高电荷态的流强所处的优势。另外，ECR源引出的离子流负载因子是100%，并且没有像PIG源那样需要经常更换溅射的阴极块，寿命可达1000小时⁽³⁾。它的主要缺点是功率损耗大，建造费用贵。但现在功率损耗大的缺点已被采用超导线圈所克服。因此，在西欧有较多的用ECR源的重离子加速器计划⁽⁴⁻⁷⁾。

法国GANIL的重离子加速器，第一台注入器(CO_1)是用内部的PIG源，加速器已建成运行。但他们计划将第二台注入器(CO_2)重新设计，建造成能使用ECR源⁽⁷⁾。

表 1. 由各种高电荷态离子源引出的典型束流强度

离子	电荷数	束流强度 (粒子数/秒)		
		PIG	ECR (Sup-MAF-B)	EBIS
N	2 ⁺	1×10^{15}		
	5 ⁺	1×10^{13}	5×10^{13}	2×10^{10}
	7 ⁺		5×10^{12}	1×10^{10}
Ar	3 ⁺	2×10^{15}		
	8 ⁺	4×10^{12}	3×10^{13}	1×10^{10}
	12 ⁺		1×10^{12}	8×10^9
	18 ⁺			6×10^9
Xe	3 ⁺	2×10^{14}		
	10 ⁺	1×10^{12}	4×10^{12}	1×10^{10}
	26 ⁺		4×10^{10}	4×10^9
	44 ⁺			2×10^9

美国LBL的88"回旋加速器,在对实验室内的EBIS源和欧洲研制的ECR源仔细地评价后,决定建造ECR源⁽⁸⁾,使该加速器能量增加2—4倍,可加速到A=80。目前也已建成运行。

下面将简要介绍西德Julich的ISIS计划,和兰州的重离子加速器装置(HIRFL)采用ECR源的初步设想。

二、ISIS计划

ISIS是为一台K=180的等时性回旋加速器建造一台ECR源以及束流输运和注入系统。它包括设计和建造一台能产生比Geller研制的ECR-SMB源更高的电荷态和较强束流的ECR源,各种进行Q/A选择的子系统,束流输运,相空间匹配,消色差弯曲及等时性回旋加速器内的双曲线偏入器等。计划要求加速器能在e等于0.33到0.5之间加速,重离子的能量为22.5到45MeV/A。

ISIS的ECR源是由注入和剥离两级等离子体组成⁽⁹⁾。在具有小的波导和 10^{-3} 托气压的注入级内,产生“冷”的等离子体。电子回旋加速共振是由微波注入到适当的轴向磁场内发生的。以低电荷态为主组成的“冷”等离子体扩散到具有大的波导和低气压(10^{-7} 托)的剥离级共振区内。剥离级是一个具有在轴向和径向上升磁场的磁瓶,所谓 B_{min} 的场形。 B_{min} 场形是由一个反射磁场和一个六极磁场迭加形成的。 B_{min} 场形和低气压导致电子在等离子体内有较长的约束时间(10—15毫秒)。从一个秒级的大功率发生器产生的微波注入到这一级,便产生具有高密度的快电子流($3 \times 10^{11}/\text{cm}^3$)的等离子体(“热”的等离子体)。这种“热”等离子体中的离子与高能电子多次碰撞被剥离而达到高电荷态。

ECR源的磁铁系统被设计为完全超导的磁铁。它是由一个用于第一级等离子体的短的螺线管、两个反射线圈、一个附加的能调整反射率的弱的螺线管和一个用于第二级等离子体的六极磁场组,如图1所示⁽⁹⁾。

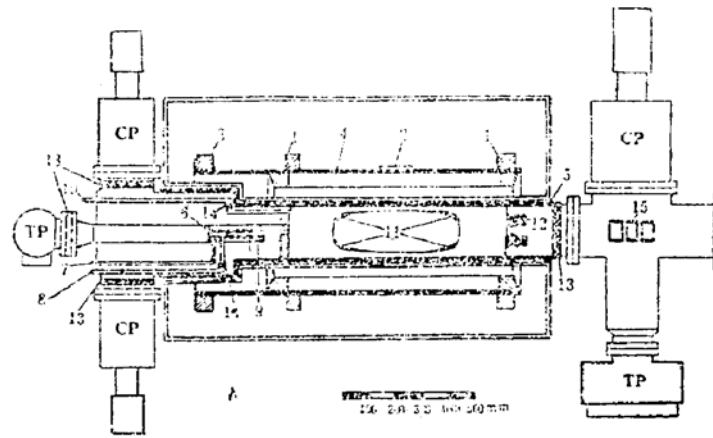


图1 Julich回旋加速器用的ECR源的简图

- | | |
|---------------|-------------------|
| (1) 反射线圈 | (8) 微波注入到第一级 |
| (2) 薄的附加螺线管 | (9) 共振区和第一级冷的等离子体 |
| (3) 第一级螺线管 | (10) 微波注入到第二级 |
| (4) 六极磁铁 | (11) 18GHz第二级的共振区 |
| (5) 水冷真空室 | (12) 引出电极 |
| (6) 水冷第一级等离子体 | (13) 高压绝缘 |
| (7) 气体入口 | (14) 微波窗 |
| | (15) 单透镜 |

整反射率的弱的螺线管和一个用于第二级等离子体的六极磁场组,如图1所示⁽⁹⁾。

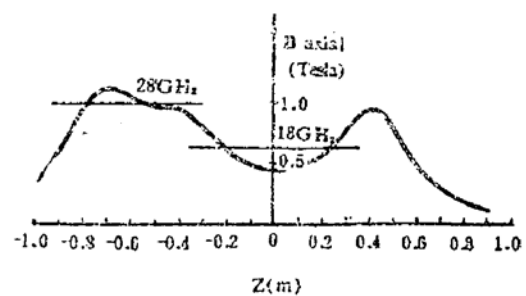


图2 磁场沿离子源的轴向(Z轴)分布

图2表示在线圈为最大电流时磁场沿离子源轴(Z轴)的分布。最大的反射场大约是1Tesla($Z = 42\text{cm}$ 处)。在这种情况下,反射率 $B_{(Z=0.4)}/B_{(Z=0)} = 2.1$;但它能在较宽的范围内调整。

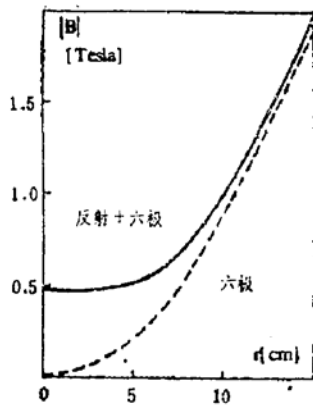


图3 在反射中心磁场与半径的关系

在离子源中间的磁场沿径向的关系见图3。较低的曲线代表单独的六极磁场 ($|B| \sim r^2$)。另一条曲线是六极磁场和反射磁场的迭加磁场。在真空室内部的直径 $r = 10\text{cm}$ 处, 总的磁场大约有像最大反射磁场 ($\approx 1\text{Tesla}$) 相同的值。在热等离子体级的这种重迭的磁场内, ECR源能发生并形成 一个封闭的表面, 18GHz 微波注入到 0.64Tesla 磁场区, 引起的共振表面的范围被表示在图 2 中。反射磁场和六极磁场必须是足够的强, 以保持共振区完全处在真空室内。为了使许多被加速的电子达到足够的约束时间, 磁场必须从共振区向热等离子体级的壁大大地增加。选取的磁场场形至少提供增加 1.5 倍的 $|B|$ 。即在第二级壁的任何点上, $|B| \geq 0.96\text{Tesla}$ 。

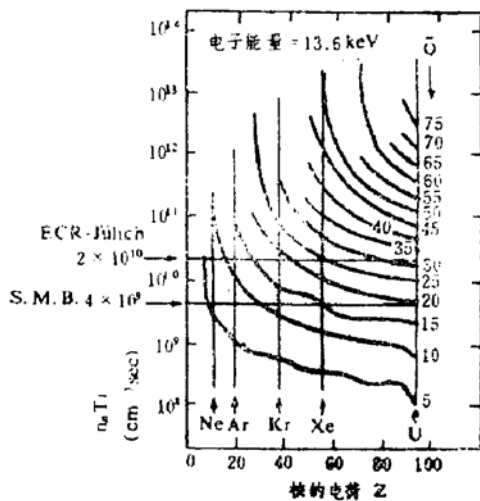


图4 各种 $n_e \tau_i$ 在等离子体中产生的平均电荷态 \bar{Q} 和离子种类核电荷 Z 的关系。

图 3 中表示的磁场场形允许在第一级和第二级分别用 28 和 18GHz 的微波功率。这些频率是比那些用在现有的 ECR 源 (Grenoble⁽¹⁰⁾) 或在复制中的 ECR 源 (Karlsruhe⁽¹¹⁾, Louvain-La-Neuve⁽¹²⁾) 高。因为, 争取获得的电子密度 n_e 是随微波频率的平方增加的。这样能够期望改进产生高的剥离的离子。如图 4 所示: Grenoble 的 S.M.B 源, 它的第二级等离子体的微波频率为 8GHz, $n_e \tau_i = 4 \times 10^9 \text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}$, 能得到的各种离子的平均电荷态较低。而 Julich 的 ECR 源, 第二级等离子体的微波频率为 18GHz, 预计 $n_e \tau_i$ 可增加 5 倍, 即 $2 \times 10^{10} \text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}$, 能得到的各种离子的平均电荷态也增加。因为要求的微波功率是与电子密度成比例的, 所以 ECR 源需要强大的、昂贵的微波发射机, 第一级 28GHz 时, 大约为 1.5kw, 第二级 18GHz 时, 大约为 10kw。

ECR 源的真空系统, 使用制冷机的冷凝泵 (CP) 和涡轮分子泵 (TP)。在冷和热的等离子体级之间要求高的压力梯度, 由微分抽气来实现。

因为引出的重离子流将以每个电荷 10 keV 的能量注入到等时性回旋加速器, 所以整个源的等离子体室必须在相对于引出电极为正的 10kV 电位上。

三、HIRFL 采用 ECR 源的初步设想

HIRFL 是两台回旋加速器组成的重离子加速器系统。注入器 SFC 是一台能量常数 $K = 69$, 用内部 PIG 源的等时性回旋加速器; 主加速器 SSC 是一台 $K = 450$ 的 4 扇回旋加速器。由于 PIG 源的电荷态较低, 对于 Ar 等离子, HIRFL 装置必须采用剥离技术。而 Xe 的能量也只能到 5 MeV/A 左右。同时束流强度由于经过剥离而损失。如果用 ECR 源, 在现有的条件下, 不剥离就能使 U 离子达到 7 MeV/A 以上。如果采用剥离, 则 U 离

表 2. Julich的ECR源提供的Ar以上离子束经HIRFL系统加速的结果

离子种类	SFC										SSC					组合加速效率(%)
	$\frac{R_2}{R_1}$	$\frac{N_1}{N_2}$	$\frac{H_1}{H_2}$	$\frac{E_i}{\text{MeV/A}}$	Z_1	F_1 (MHz)	f_1 (MHz)	B_1 (KG)	E_k (MeV/A)	Z_2	F_2 (MHz)	f_2 (MHz)	B_2 (KG)	B_k (KG)		
Ar	3/4	1	3/4	1.977	12	4.924	14.77	10.8	20.34	12	3.69	14.77	8.10	14.02	100	
	3/4	43/21	2/2	4.313	12	7.27	7.27	15.95	44.36	18*	5.455	10.91	7.975	13.802	50	
Kr	3/4	1	3/4	1.536	20	4.34	13.02	12	15.803	20	3.256	13.02	9.00	15.576	100	
	3/4	1	3/4	2.43	20	4.54	13.62	12.57	25	28*	3.41	13.62	6.735	11.656	100	
Xe	3/4	1	3/4	1.053	26	3.59	10.78	12	10.82	26	2.69	10.78	9.00	15.576	100	
	3/4	1	3/4	1.859	26	4.77	14.25	15.95	19.12	36*	3.55	14.25	8.639	14.95	100	
U	3/4	1	3/4	0.701	32	2.44	7.332	12	7.214	32	1.83	7.332	9.00	15.576	100	
	3/4	1	3/4	1.24	32	3.25	9.76	15.95	12.79	46*	2.44	9.76	8.32	14.40	100	

说明: * 为经剥离后的电荷态。

R_2/R_1 为SSC注入半径与SFC引出半径(平均值)。

N_1/N_2 为SFC与SSC组合加速匹配数(正值)。

H_1/H_2 为SFC与SSC中加速电压的频率谐波数。

E_i, Z_1, F_1, f_1, B_1 为SFC的引出能量、电荷态、粒子回旋频率、加速电压频率、平均磁场。

E_k, Z_2, F_2, f_2, B_2 为SSC的引出能量、电荷态、粒子回旋频率、加速电压频率、平均磁场。

B_k 为SSC扇片上的磁场。 $\eta\% = \frac{1}{N_1}\%$ 。

子从SSC引出可达到12MeV/A以上。这就使HIRFL装置达到全粒子加速的目标。其效果是十分显著的。

用图4 Julich的ECR源给出的Ar以上离子的平均电荷态,经SFC和SSC组合加速,它们的参数及计算结果列在表2中。

SFC在改建中曾为轴向插入PIG源在下磁轭及磁极中心预留了 $\phi 250$ 和 $\phi 200$ mm的孔。此孔为建造轴向注入系统提供了方便。而ECR源及其输运系统需要的空间,可利用现有的地下室,它的布局参照ISIS如图5所示。为了便于操作和维修ECR源安装在无放射线的049房间内,并将049与050墙打通。ECR源和束流线的匹配,采用二套球面透镜(LS),使发射度为 $160\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 的束流以较小的包络进入输运系统。束流经二次 90°

弯曲系统(QS、MS)及螺线管(LH)输运完成电荷分析,并送到加速器大厅的底层(051)。再经相空间匹配系统(QM)及 90° 弯曲的双消色差系统(MI、QI),然后进入轴向注入的入口(LVI),再经过聚束器(B)等部件与回旋加速器中心区粒子运动的特性同步,由双曲线偏入器(H)偏入粒子的加速轨道。

目前,我国在超导和微波技术方面已有借鉴,而ECR源的工作尚是空白。因此,应尽早建立ECR源的实验室,以便取得更多的经验。

参考文献

1. E. D. Hudson, IEEE NS24—No3(1977) 1590

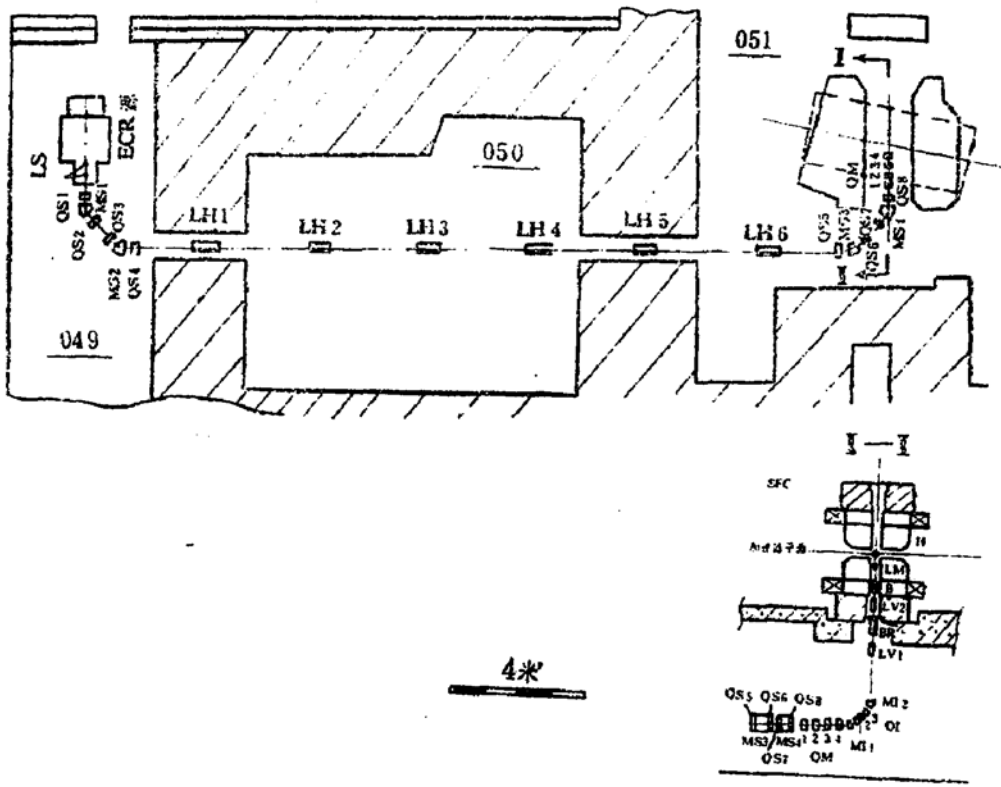


图5. HIRFL注入器用ECR源的布置图

LS球面透镜, QS、QM、QI四极磁铁, MS、MI双极磁铁, LM磁透镜, LH、LV螺线管透镜, B聚焦器, H双曲线偏入器, BR可调整束流旋转坐标的螺线管。

- | | |
|---|---|
| 2. Y. Sakurada, IEEE NS26—№2(1979) 2175 | 8. D. J. Clark, LBL—15846 |
| 3. J. Clark, 9th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications(1981), P.231 | 9. H. Beuscher, 同3, P. 285 |
| 4. R. K. Bhandari, 同3, P.261 | 10. R. Geller, IEEE NS26—№2 (1979)2120 |
| 5. M. Lieuvin, 同3, P. 81 | 11. V. Bechthold, IEEE NS26—№3(1979) 3630 |
| 6. H. Schweickert, 同3, P. 221 | 12. Y. Jongen, IEEE NS26—№2(1979) 2160 |
| 7. J. Ferme, 同3, P.3 | |