

# ECR 离子源金属离子的产生\*

张子民 赵红卫 赵玉彬 张雪珍 郭晓虹 刘占稳

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 讨论了 ECR 离子源金属供料方法, 在 14.5GHz ECR 离子源上应用炉子加热和 MIVOC 法获得了  $^{40}\text{Ca}^{11+}$  140e $\mu\text{A}$  和  $^{56}\text{Fe}^{10+}$  65e $\mu\text{A}$ , 并对实验过程和结果作了分析.

**关键词** ECR 离子源 金属离子 MIVOC 法

## 1 引言

ECR 离子源创建时, 其工作物质是气体元素, 随着加速器技术的发展和高离化态物理研究的不断深入, 要求离子源能产生质量更重、电荷态更高的离子, 而这些元素多数是金属元素. 目前产生金属离子常用的方法主要有炉子加热法, MIVOC (Metallic Ion form Volatile Compounds) 法, 等离子体加热法和离子溅射法等<sup>[1]</sup>.

根据我们的 14.5GHz 离子源<sup>[2]</sup> 的特点和实验条件, 选用炉子法和 MIVOC 法在中国科学院近代物理研究所 (IMP) 离子源上产生金属离子.

## 2 ECR 离子源高电荷态离子产生的物理机制

ECR 离子源是产生高电荷态离子的有效装置, 结构如图 1 所示, 它的工作原理是利用电子在磁场中的拉摩回旋频率等于馈入的微波频率时产生共振现象, 电子被横向电场加速成高能电子, 然后与原子碰撞电离产生 ECR 等离子体, 等离子体又受到由轴向磁镜场和径向多极场构成的三维“最小 B”磁场的稳定约束. 被约束的等离子体再受到高能电子的逐级游离而产生高电荷态离子, 高电荷态离子由热电子形成的空间电荷场(势阱)约束, 逃

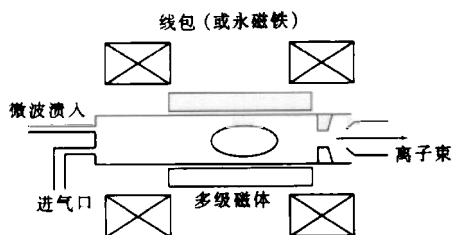


图 1 ECR 离子源结构简图

1998-08-10 收稿

\* 中国科学院九五基础性研究青年科学基金资助(ZD981305)

974—978

离约束的高电荷态离子最终经引出系统引出。

产生高电荷态金属离子的关键是要在腔体内形成金属等离子体,也就是如何使金属在腔体内汽化,产生一定的蒸气压。

### 3 炉子加热法

采用体积小、结构紧凑的金属蒸发炉,内装金属样品,直接送入离子源第二级,炉子加热后产生的金属蒸气扩散进入等离子体,实现金属元素的供料。炉子温度可适当调节,以获得最佳蒸气压。

(1) 离线实验:炉子放在真空室内(气压为  $4 \times 10^{-5}$  Pa)加热,利用热偶测温探头来监测炉子温度,炉子由一台 10A/20V 的直流电源供电。炉子结构如图 2(a)所示,电阻丝绕在

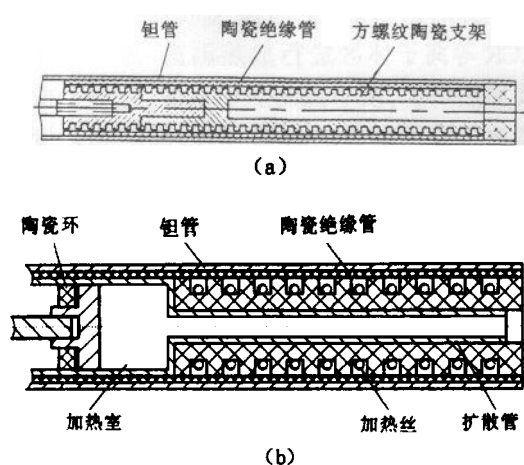


图 2 IMP 炉子结构简图

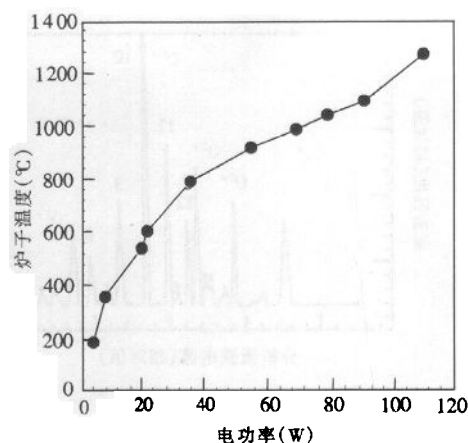


图 3 炉子加热功率和温度的关系

带有矩形螺纹的陶瓷支架上,支架中空、内装可放金属料的陶瓷坩埚,电阻丝外用一陶瓷筒绝缘,最外层罩一薄钽管,用来导电和固定炉体。该炉子加热后温度可达  $1300^{\circ}\text{C}$ ,此时所加电功率为 110W,图 3 给出了炉子温度和电功率的关系。当温度为  $800^{\circ}\text{C}$  时,钙的消耗量为  $4\text{mg/h}$ , $1300^{\circ}\text{C}$  时镍的消耗量为  $2\text{mg/h}$ 。

由文献[3]可知,当用坩埚供给蒸气时,材料的蒸发率近似服从于

$$W = D - 0.5 \ln T - A/T (\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}), \quad (1)$$

其中常数  $A, D$  可由文献[4]中查得。

假设蒸发面积为  $S(\text{cm}^2)$ ,则蒸发量为  $WS(\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$ ,蒸发量还与坩埚内物质的含量和状态有关,如果蒸气流量  $Q$  由蒸发量限制时( $Q \approx WS$ ),为了保持流量不变,就需不断调节温度,这样非常不方便。所以,在炉内坩埚的前端放一开有小孔( $\varphi 2$ )的钽环,蒸气的流量由小孔的流导限制,而不完全取决于蒸发量,又因为 ECR 离子源所需的金属蒸气量很小(约每小时毫克量级),所以, $Q \ll WS$ ,这样,当温度一定时,通过小孔的蒸气流量也就一定,工作时就可以用温度来控制金属蒸气的供给量。

鉴于调试时的诸多不便,我们做了一组比较实验.以金属钙为实验样品,分装在几个炉子内加热蒸发,分别从样品的质量、温度、加热时间等方面进行比较,比较结果见表1.其中,炉子1与2比较的是加热时间不同;炉子1与3比较的是加热温度不同;炉子1与4比较的是金属质量不同.从表中可以看出,决定金属蒸发量的是加热温度.

表1 几种条件下钙的蒸发量

炉子序号	Ca 金属质量(mg)	温度(°C)	加热时间(h)	蒸发量(mg)	每小时消耗量(mg/h)
1	80	800	6	24	4
2	80	800	3	10	3.3
3	80	500	6	8	1.3
4	50	800	6	22	3.7

(2) 在线实验:将出过气的炉子通过金属离子驱动装置送入离子源,炉子喷气孔靠近

离子源的第二级,金属蒸气可直接扩散进入 ECR 等离子体区进行加热剥离.为了避免微波加热炉子,便于控制炉子温度,把炉子放在微波传输同轴管的内部,炉端部距同轴管口约 12—15mm.

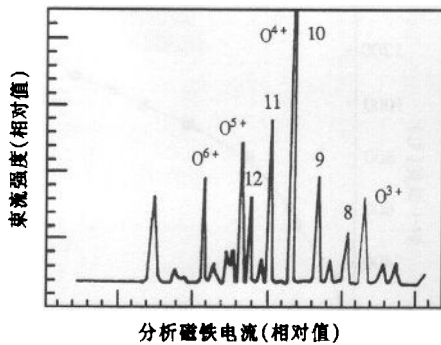


图4 优化  $\text{Ca}^{11+}$  的多电荷态谱图

在调试  $\text{Ca}^{11+}$  时,用氧气作支撑气体,当炉子的电功率为 10W 左右时,所得结果最好,束流最高可达  $150\mu\text{A}$ ,在  $140\mu\text{A}$  比较稳定,此时所加微波功率约 700W. 图 4 是优化  $\text{Ca}^{11+}$  的多电荷态谱图,  $\text{Ca}^{11+}$  的峰值要高出  $\text{Ca}^{9+}$  的峰值,这就是高电荷态 14.5GHz ECR

离子源的优点所在.表 2 是该离子与国际上其它离子源结果<sup>[5-7]</sup>的比较.从表中可以看出

表2 几台离子源的钙离子结果比较

离子	IMP	LBNL	GANIL	Catania	Dubna
$\text{Ca}^{6+}$					120
$\text{Ca}^{11+}$	140	200	58		
$\text{Ca}^{12+}$	70			52	

此结果除低于 LBNL 的 AECS-U 外,均高于其它离子源产额, LBNL 的炉子从径向插入离子源,故炉子体积可以做得很大,离子源本身又是双频加热,所以结果比较好,而其它离子源和我们的 14.5GHz ECR 离子源属同一类型.

#### 4 MIVOC 法

将某些在常温下易挥发的金属化合物装在真空容器内,形成一定的蒸气压,再通过针阀送入离子源进行加热剥离.这样的化合物有茂金属(如  $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ ,  $\text{Ni}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$  等)和六羰基金属(如  $\text{Cr}(\text{CO})_6$ ,  $\text{W}(\text{CO})_6$  等).

调试  $\text{Fe}^{10+}$  离子束时选用  $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$  作为工作物质,它是一种易挥发有毒粉末状固体.将约 500ml 的  $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$  粉末装在容积为 500ml 的容器里,通过送气阀与离子源对接,调节阀可控制蒸气流量.  $\text{Fe}^{10+}$  的最终调试结果为  $65\mu\text{A}$ ,图 5 是优化  $\text{Fe}^{10+}$  所得的多电荷态谱图.

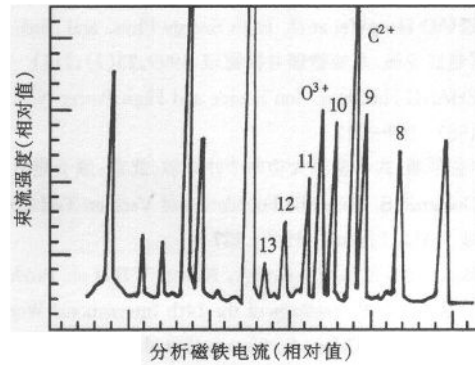


图 5 优化  $\text{Fe}^{10+}$  的多电荷态谱图

## 5 讨论

由图 3 可知,在所加功率为 10W 时,炉子温度约为  $350^\circ\text{C}$  左右,由文献[3]可知,在  $350^\circ\text{C}$  时钙的蒸气压约为  $10^{-3}\text{Pa}$ ,离线实验中也证明了温度在  $350^\circ\text{C}$  时钙基本没有挥发,更不会熔化.而本实验后取出炉子,发现钙基本上已经熔化,后又因变冷而胶着在一起.分析其原因是,在正常工作时,炉子的温度肯定超过  $350^\circ\text{C}$ ,甚至达到熔点,那么,除炉子本身的加热电流外,肯定另有热源,而这也只有两种可能,一是微波加热,另一是等离子体加热.在调试过程中发现,当增加一定微波功率后,束流仍缓慢上升,这种现象与调试气体元素时截然不同,只能是在微波功率上升后,炉子的温度也随之慢慢升高,使喷出的钙蒸气增多.

判断使炉子温度升高的原因.首先提高注入端磁场,降低引出端磁场,把整个等离子体推向引出区以减小等离子体加热炉子的可能,但效果不明显,我们又把炉子向后退,使其远离等离子体区,也无明显效果,这说明炉子是被微波加热的.因为炉子与微波同轴传输管之间又形成了一个同轴线,利于微波的传输,而炉子本身的结构也利于吸收微波,所以炉子在升高微波频率后温度继续上升.我们又在同轴管的端部放一孔为  $\phi 2$  的铝环,发现炉子所需的电功率明显增加,进一步证实了微波加热炉子的假设.

调试时,虽然尽量减少微波加热炉子,但仍不能避免,这就给控制炉子的温度带来不便,不得不在升高微波功率的同时适当减小炉子的电功率,以控制蒸气流量.同时,我们还发现了这种炉子的缺点,喷气口的散射角太大,大部分钙蒸气都凝结在紫铜管的端部,另外,炉口的钽块属于冷端,当蒸气到达出口处,部分就会凝聚,时间长了,便形成一条状钙金属堵住出气口,使内部的蒸气不易扩散出去.

鉴于调试时出现的种种问题,今后的炉子加热供料拟做如下改进:(1) 离子源本身采用波导直接馈入代替同轴馈入,以有效地避免微波加热炉子.另外,装配恒温装置,对于一些蒸气压温度较低的金属可以自动调节温度.(2) 改进炉子的结构,如图 2(b)所示,炉子末端安放钽坩埚,导气管的温度高于坩埚的温度,即可克服上述缺点.

MIVOC 法原理简单,操作方便,但应用离子种类少,由于所用的化合物含碳量高,严重污染离子源.所以不易长时间运行.

## 参考文献 (References)

- 1 ZHANG ZiMin. Master Thesis, IMP. (in China), 1999, 51

- (张子民. 硕士论文, 中国科学院近代物理研究所, 1999, 51)
- 2 ZHAO HongWei et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1999, **23**(7):717  
(赵红卫等. 高能物理与核物理, 1999, **23**(7):717)
  - 3 ZHANG HuaShun. Ion Source and High Power Neutralized Beam Source. Beijing: Atomic Energy Press (in China), 1987, 169—717  
(张华顺. 离子源和大功率中性束源, 北京: 原子能出版社, 1987, 169—171)
  - 4 Dushman S. Scientific Foundation of Vacuum Technique, New York John Wiley & SONS. Inc. and London Chapman & HALL Limited, 1949, 127
  - 5 Bogomolov S L, Efremov A, Kutner V B et al. Production of Ions of Metals with an ECR Ion Source at FLNR(JINR) Cyclotrons, Proceedings of the 14th International Workshop on ECR Source, Geneva, Switzerland, 1999, 71
  - 6 Gammino S, Celona L, Ciavola G et al. Installation of ECR2 at LNS and Preliminary Tests, Proceedings of the 14th International Workshop on ECR source, Geneva Switzerland, 1999, 139
  - 7 Barue C, Been T, Dupuis M et al. Metallic Ion Developments at GANIL, Proceedings of the 14th International Workshop on ECR Source, Geneva, Switzerland, 1999, 111

### Production of Metallic Ions Beam in ECR Ion Source \*

ZHANG ZiMin ZHAO HongWei ZHAO YuBin ZHANG XueZhen  
GUO XiaoHong LIU ZhanWen

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

**Abstract** The production of metallic ion beam by means of many methods in high charge state ECR (Electron Cyclotron Resonance) ion source is reviewed. A small evaporation oven with external diameter 8 mm and length 70 mm was tested for metallic ion beam production. The small oven could reach more than 1300°C with 110W electric power. 140eμA of Ca<sup>11+</sup> and 70eμA of Ca<sup>12+</sup> beams were achieved on the 14.5 GHz ECR at 1MP ion source by using the oven. The Ca<sup>11+</sup> beam had been provided to the IMP cyclotron for three weeks with a good stability. In order to obtain intense metallic ion beam, MIVOC (Metallic Ion from Volatile Compound) method was tested successfully on the 14.5 GHz ECR ion source. 65eμA of Fe<sup>10+</sup> by MIVOC method was obtained. During running of the ion source with Ca<sup>11+</sup>, the oven temperature was not controlled easily by changing the electric power because of extra heating by microwave which was already tested. So a new type of oven was designed in order to avoid this problem. MIVOC method is easy to be performed and beam intensity is high, but it is only suitable for a few metallic elements, on the other hand, the vacuum chamber of the ion source could be seriously contaminated if the ion source runs for a long time.

**Key words** ECR ion source, metallic ion, MIVOC method

Received 10 August 1999

\* Supported by 95' Research Foundation for Young Scientists of Chinese Academy of Science(ZD981305)