

文章编号: 1001-4322(2004)04-0531-04

高电荷态金属离子的产生实验研究^{*}

孙良亭, 马 雷, 曹 云, 赵红卫, 马保华, 张雪珍, 张子民

(中国科学院 近代物理研究所, ECR 离子源研究室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 为满足兰州重离子加速器的实验要求, 在 14.5 GHz 高电荷态 ECR 离子源上做了一系列产生金属离子的实验, 尝试了多种方法, 包括炉子加热及 MIVOC (Metallic Ion form Volatile Compounds) 两种方法, 其中, 用炉子做的结果较理想。实验主要研究了铜、锌、镍多种电荷态离子的产生, 具有代表性的是 39euA 的 Cu^{13+} , 30euA 的 Zn^{15+} 和 29euA 的 Ni^{10+} 。分别给出了这三种金属离子产生的多电荷态束流峰谱图, 以及实验的一些其它现象及结果, 并对其进行了讨论与总结。

关键词: ECR 离子源; 金属炉子; 高电荷态

中图分类号: TL56 **文献标识码:** A

1974 年, 法国 Grenoble 研制成功了世界上第一台多电荷态 ECR (electron cyclotron resonance) 离子源^[1]。到 20 世纪 80 年代末 90 年代初, 由于 ECR 离子源在重离子加速器技术和原子物理实验中的出色表现, 以及它本身具有的各项优秀特性, 许多国家和地区的科学家相继研制成功一批各具特色的 ECR 离子源。离子源的种类也从最初的第一代经典 ECR 离子源发展到今天的双频源、超导 ECR 源。ECR 离子源所能提供的离子种类越来越多, 已从最初的气体元素的中低电荷态离子, 增加到高电荷态气体元素离子, 乃至超高电荷态金属元素离子。

由于在常态下, 绝大多数金属元素都是以固态形式存在的, 因此要想在 ECR 源中产生这些元素的离子, 首先需要得到它们的气态物质。可见, 要获得这些元素的离子比氧、氮、氩等这些气态元素的离子要困难得多, 这也是目前世界离子源界所面临的一个重大问题。当前, 要获得这些金属元素的蒸气主要有以下几种方法: 等离子体加热、离子溅射、炉子加热、激光熔化以及 MIVOC (metallic ion form volatile compounds) 法等^[2]。

我们于 1999 年根据我所 14.5 GHz ECR 源的特点与实验条件, 先后采用炉子法和 MIVOC 法获得了多种金属离子束, 并在此后的在线供束与离线实验中, 都取得了较好的结果。但此前, 只是产生了一些低熔点的金属离子, 如 Ca, Mg 等。近期, 我们用炉子法做出高熔点金属离子的产生实验, 实验主要研究了 Cu, Ni, Zn 各种电荷态离子的产生, 取得了较为理想的实验结果, 先后引出了 Ni^{10+} , Ni^{12+} , Zn^{13+} , Zn^{15+} , Cu^{13+} , Cu^{14+} , Cu^{15+} 等的一定流强的离子束。

1 工作原理

当把待供料的金属装入炉子, 置于 ECR 源体中, 并直接送达离子源的主极时, 绕在炉子上的电阻丝通电加热, 由金属相变的知识我们知道, 随着金属样品温度的不断升高, 金属的饱和蒸汽压也将不断升高, 当金属的饱和蒸汽压等于或者大于此时炉腔内的气压时, 金属发生比较剧烈的固气相变, 即有相当数量的固态金属开始连续不断地变为气态的金属的蒸汽, 这些蒸汽通过炉子前端的小孔源源不断地扩散进入源体弧腔中, 在弧腔中的电子加热逐级碰撞电离, 形成该金属高电荷态的离子, 最后通过 ECR 源的引出系统形成相应的高电荷态离子束。理论上, 用炉子产生金属蒸汽的方法只需固态金属样品的饱和蒸汽压 (以后称作工作气压) 达到 0.1 Pa, 一般作为我们估计实验工作温度的标准, 但是实验中我们是以束流大小和束流的稳定性作为调节炉子工作温度的, 只要引出的束流达到要求, 电源的输出功率即为工作功率。由于实验平台所采用的是同轴馈入微波模式的 ECR 源, 同轴馈入的微波对炉子也有一定的加热作用, 因此如果实验中要得到炉子的最佳工作点, 除要调节炉子的加热功率外, 还必须对与之相应的 ECR 源各参数进行调节以达到它们之间的最佳匹配。同时为了避免处理一些低熔点而又相对具有较高蒸汽压的金属, 一般直接加入的是该金属的氧化物而不是该金属的单质。

* 收稿日期: 2003-03-24; 修订日期: 2003-08-04

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 孙良亭 (1978 -), 男, 博士生, 主要从事 ECR 离子源技术研究。

- 1.ion yoke
- 2.extraction axial coil
- 3.inlet axial coil
- 4.insulator tube
- 5.extraction electrode
- 6.plasma electrode
- 7.plasma
- 8. permanent sextupole magnet
- 9.plasma chamber
- 10.quartz tube
- 11.magnetic pole at injection
- 12.coaxial inner tube
- 13.waveguide
- 14.microwave windows
- 15.gas inlet
- 16.turbo moleculer pump

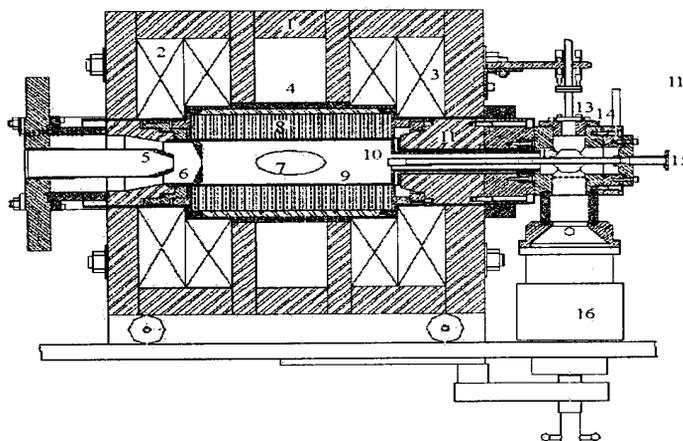


Fig.1 Mechanic plar of LECR2
图1 LECR2 的结构设计简图

2 实验装置及特点

2.1 试验平台

我们使用的试验平台是我国自行设计建造的第一台 14.5GHz 高电荷态 ECR 源 (LECR2), 它投入兰州重离子加速器 (HIRFL) 运行两年多平稳可靠,其设计结构如图 1 所示,其相应参数如表 1。

2.2 炉子

此次设计的炉子为体积小、结构紧凑的钽高温金属蒸发炉。它的整体是用一根完整的钽棒加工而成的,内设驱动装置、电阻丝加热装置以及限流孔和绝缘部分,具体设计简图如图 2

所示,与之相应配备一台 10A/20V 的的直流供电电源,同时利用金属热电偶探头测温。最佳工作温度在 600 ~ 1 300 之间(工作气压 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Pa)。加热功率和温度的曲线如图 3(离线测试结果)。

表 1 LECR2 主要参数

Table 1 Main parameters of LECR2

| | |
|--|-------------------------|
| typical axial mirror ratio | 4 |
| axial magnetic field | 15T, 1.1HT |
| current in the coil | 1 100A |
| the power consumption in coil | 80kW |
| water pressure in cooling coil | 0. 1MPa/cm ² |
| the material of permanent sextupole magnet | NdFeB |
| magnetic energy product | 42MGOe |
| the field value on the surface of sextupole magnet | 1. 25T |
| the inner radius of permanent sextupole mangnet | 76mm |
| the radius of plasma chamber | 76mm |
| extraction voltage | 10 ~ 25kV |
| the maximum power of microwave | 2. 0kW |
| high voltage power | 30kV , 30mA |

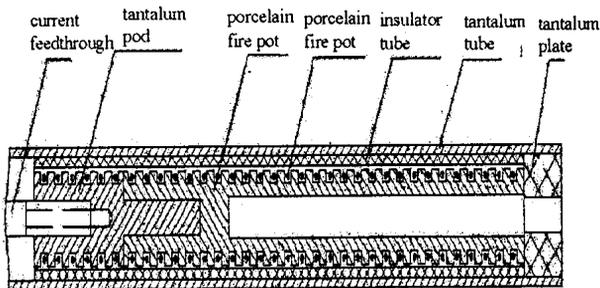


Fig.2 Schematic picture of oven in IMP
图2 IMP 炉子设计简图

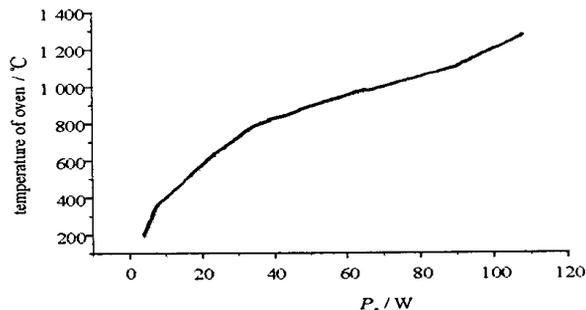


Fig.3 Relation between oven output power and it 's temperature
图3 炉子加热功率和温度的关系

2.3 炉子设计特点及依据

2.3.1 小孔流导限流法

为易于控制并保持从炉子中扩散进入源体弧腔中的蒸汽流量,采用了简单的小孔流导限制方法,即在炉内坩埚的前端放置一开有小孔的钽环,依据实验要求的蒸汽流量,通过理论计算和试验,最后决定小孔的最佳直径,在本实验中小孔直径为 2mm。蒸汽的流量最终是由这一小孔的流导决定而不直接取决于金属的蒸发量。因为当坩埚加热供给某元素时被蒸发材料的蒸发率近似服从表达式 $W = D - 0.5LnT - A / T(g \cdot cm^2 \cdot s^{-1})$,其中

A, D 是常数由文献[8]可查出。假设其蒸发面积为 $S(\text{cm}^2)$,则蒸发速率为 $WS(\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$ 。蒸发量还和坩埚内物质的含量和状态有关,如果其蒸汽流量为 Q ,则单位时间内的蒸发量 $Q = WS$ 。为保持流量不变,就需不断调节温度,这样非常不方便。当在坩埚前放一小孔限流时,蒸汽的流量由小孔的流导限制,又因为 ECR 源所需的蒸汽量非常小(约毫克量级每小时),所以, $Q \ll WS$,当温度一定时,通过小孔的蒸汽流量也就一定,工作时就可以用温度来控制金属蒸汽的供应量了。

2.3.2 炉子插入深度的在线微调

因为炉子插入的深度直接影响到金属蒸汽扩散入弧腔等离子体中的效率,插入深则扩散效率高,插入浅则扩散效率低,但是过深的插入又会使炉子和弧腔内的等离子体之间发生强烈耦合,进而引起等离子体的不稳定。所以炉子插入的深度是影响供束的一个重要因素。但是,一个特定的 ECR 离子源在供特定的金属蒸汽时,究竟炉子应该插多深在供束之前是无法精确知道的,为此我们在实验中设计了一套炉子插入深度的在线微调系统,已经调出了理想的束流。

3 实验结果与讨论

3.1 铜离子

金属铜的熔点为 1 083.4 ,达到工作气压所需温度为 1 133 [7],炉子的工作功率为 62W。图 4 是在实验中,以自然丰度的铜作样品,对 $^{63}\text{Cu}^{13+}$ 优化时,得到的 Cu 离子束多电荷态谱图。

实验中,我们引出了稳定的 Cu^{13+} (39e μA) Cu^{14+} (34e μA)和 Cu^{15+} (10e μA) 离子束,随着炉子温度的升高以及注入微波功率的增加,引出束流流强还在增大。我们还发现用 Ne 气做掺气气体时,能有效地提高 Cu 离子束流强度,特别是高电荷态的 Cu 离子,如 Cu^{15+} , Cu^{14+} , Cu^{13+} , Cu^{11+} 等的束流强度,引出束流的稳定度也有较大幅度的提高。但是当用 O_2 做 Cu 的掺气气体时,引出束流值相对很小,且不稳定,具体原因有待进一步实验研究与证实。我们还发现,由于炉子的工作温度比 Cu 的熔点高,故每次做实验时,应将料烧完,否则炉腔会被剩余的 Cu 堵塞,不利于下次实验。

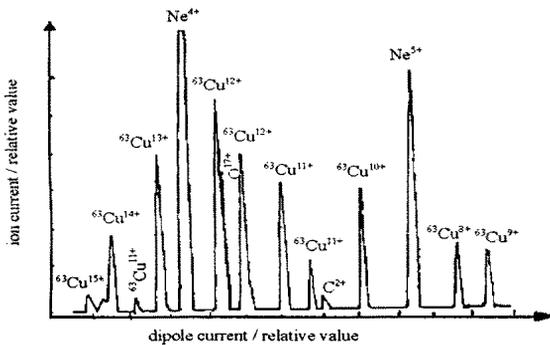


Fig. 4 Ion beam spectrum, optimization for Cu^{13+} (relative value)

图 4 Cu 的束流峰位谱图

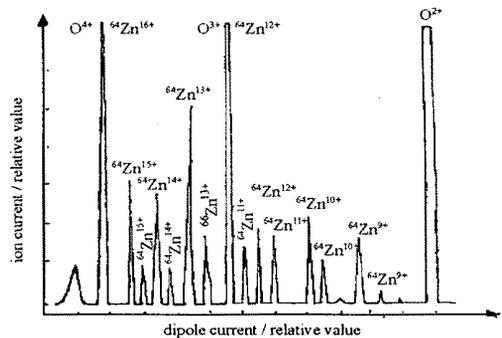


Fig. 5 Ion beam spectrum, optimization for Zn^{13+} (relative value)

图 5 Zn 的峰位谱图

3.2 锌离子

由于单质锌的熔点较低容易液化,因此不适合直接做为锌离子产生实验的炉料。故采用了熔点为 1 975 自然丰度的氧化锌粉末为炉料。在实验中,优化 $^{66}\text{Zn}^{13+}$ 时,得到如图 5 的锌离子束多电荷态谱图。

实验中,得到 Zn^{13+} (50e μA) 和 Zn^{15+} (30e μA) 稳定束流,炉子的工作功率为 47 ~ 65W。实验发现,供 Zn 离子束时,以 O_2 作掺气比 He 效果好,能更有效地提高离子源的稳定性,且调节时引出束流变化比较稳定,有规律可循。

3.3 镍离子

镍金属的熔点为 1 453 ,达到工作气压所需温度为 1 023 [7],炉子所需工作功率为 58W。图 6 是用自然

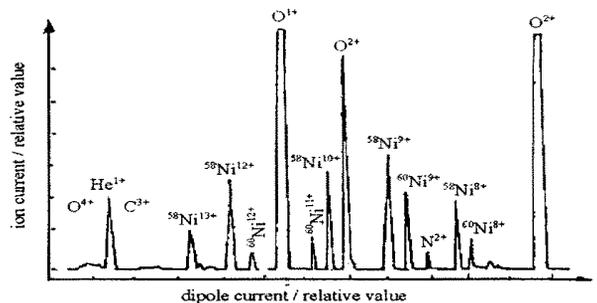


Fig. 6 Ion beam spectrum, optimization for Ni^{13+} (relative value)

图 6 Ni 的束流峰位谱图

丰度的镍作样品,对 $^{58}\text{Ni}^{10+}$ 优化时,得到的镍离子束的多电荷态谱图。实验中,得到 Ni^{10+} (29e μA)和 Ni^{12+} (15e μA)。正如所估计的,在炉子加热功率为57W时,就已得到一定大小的 Ni^{10+} 束流,但随着炉子温度继续升高时, Ni 离子引出束流增长缓慢,只有当炉子电压升到较高值时,束流才有较大幅度的增加。限于炉子所能承受的工作温度有限,故未能做进一步的实验。我们先后尝试了用 O_2 , He 和 Ne 作掺气,发现 He 的效果最好, O_2 次之,而 Ne 却不太适合作 Ni 离子束时的掺气。

4 结 语

通过初步实验,确定了LECR2可以提供 Cu , Zn , Ni 的较高电荷态稳定的离子束流,同时还在实验中发现,当以氖气作掺气调铜离子束时,离子源工作于两种截然不同的状态下。当注入磁镜峰值较大时,调节引出磁镜峰值大小,观察到的束流流强较小;而当注入磁镜峰值较小时,调节引出磁镜峰值大小,会发现产生的高电荷态铜离子束流流强比前者提高了约一倍,而且束流的稳定性要好得多。初步考虑其原因是:ECR离子源在后一种工作情况下,形成的磁场场型正好适合产生高电荷态的铜离子的形成,也就是在当时的离子源工作条件(包括弧腔壁状态、掺气情况、微波馈入状态等)下所形成的场型降低了ECR等离子体势,形成的约束高电荷态离子的势阱更有利于高电荷态离子的产生与引出。在今后的高电荷态离子产生实验中,还将继续关注这种工作模式。

从实验中可看出,金属炉子的工作温度范围还不够大,所能提供的温度还不够高,有必要设计一个工作温度能达到2000的炉子,这样,在做金属离子产生实验时,金属蒸气进气量可调度会更大,特别是对于难熔、难挥发的样品。在此实验中所用的样品都是自然丰度的,因此产生了较多的同位素离子峰,不易实验分析,因此在今后的实验中,应用同位素纯样品。金属离子产生的实验,今后还会继续在LECR2上做下去,新的结果将会陆续给出。

参考文献:

- [1] Geller R. Electron cyclotron resonance sources: historical review and future prospects[J]. *Rev Sci Instrum*, 1998, **69**:1302.
- [2] Lang R, Bossler J, et al. Investigation of different oven types for sample evaporation in the CAPRICE electron cyclotron resonance ion source[J]. *Rev Sci Instrum*, 2000, **71**:651.
- [3] 赵红卫,刘占稳,张雪珍,等. 一台14.5GHz新型高磁场高电荷态ECR离子源[J]. 高能物理与核物理, 1999, **23**(7):717. (Zhao H W, Liu Z W, Zhang X Z, et al. A 14.5GHz new ECR ion source with high charge state and high magnetic field. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 1999, **23**(7):717)
- [4] Zhao H W, Wei B W, Liu Z W, et al. Development of ECR ion sources in China[J]. *Rev Sci Instrum*, 2000, **71**:646—648.
- [5] 张子民,赵红卫,赵玉彬,等. ECR离子源金属离子的产生[J]. 高能物理与核物理, 2000, **24**(10):975. (Zhang Z M, Zhao H W, Zhao Y B, et al. The production of metallic ion beam on ECR ion source. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2000, **24**(10):975)
- [6] Melin G, Drentje A G, Girard A, et al. Ion behavior and gas mixing in electron cyclotron resonance plasmas as sources of highly charged ions[A]. Proceedings of the 14th International Workshop on ECR Ion Sources[C]. CERN, Geneva, 1999. 16.
- [7] 张华顺. 离子源和大功率中性束流源[M]. 北京:原子能出版社, 1987. 524—531. (Zhang H S. Ion sources and high energy neutral beam sources. Beijing: Atomic Energy Press, 1987. 524—531)
- [8] Dushman S. Scientific fundation of vacuum technique[M]. New York John Wiley & SONS Lnc and London Chapman & HALL Limited, 1949. 127.

Experiments on production of highly charged metallic ions

SUN Liang-ting, MA Lei, CAO Yun, ZHAO Hong-wei, MA Bao-hua, ZHANG Xue-zhen, ZHANG Zi-min
(ECR Ion Source Workstation of Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To satisfy the requirements of HIRFL (Heavy Ion Research Facility in Lanzhou), series of experiments have been done to produce metallic ion beams. By now, numerous methods, including oven heating and MIVOC (metallic ion from volatile compounds), have been tested. Experiments results show that oven heating is much better than MIVOC. In most of our researches, emphasis was put upon the ion production of copper, zinc, nickel of different charge states. Among the obtained ion beams, 39 μA Cu^{12+} , 30e μA Zn^{15+} , 29e μA Ni^{10+} are the very representative ones. This paper presents the spectrums of the production of these three kinds of metallic ions as well as some phenomena and analysis on the oven heating experiment.

Key words: ECR ion source; Metallic oven; Highly charged state