

文章编号: 1007-4627(2004)01-0026-04

## 高电荷态 ECR 离子源的金属离子产生\*

曹 云, 马 雷, 孙良亭, 张子民, 赵红卫, 马保华

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 简单介绍了采用炉子加热、挥发性金属化合物和溅射产生 ECR 离子源的金属离子的 3 种方法和实验结果, 主要研究了铜、锌、镍和铁等多种电荷态离子的产生. 对 3 种方法分别进行了探讨.

**关键词:** ECR 离子源; 加热炉; 挥发性金属化合物法; 高电荷态; 溅射

**中图分类号:** TL503.3 **文献标识码:** A

### 1 引言

高电荷态 ECR 离子源是国际上公认的可提供强流高电荷态离子束最有效的装置, 被广泛地应用于各种重离子加速器、放射性束产生、高离化态原子、表面物理和半导体工业等领域. 自 1989 年中国科学院近代物理研究所从法国引进一台 10 GHz 高电荷态 ECR 离子源以来, 我们先后自行研制成功 10 GHz, 14.5 GHz 和双频 ECR 离子源, 并正在建造一台超导 ECR 离子源. 随着核物理研究的深入, 中国科学院近代物理研究所放射性束流线(RIBLL)的建设成功, 特别需要 ECR 离子源提供更重、更高电荷态和更强的金属离子束流.

由于在常态下, 绝大多数金属元素都是以固态形式存在的, 要想在 ECR 源中产生这些元素的离子, 首先必须得到它们的气态物质. 可见, 要获得这些元素的离子比获得氧、氮和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问题. 当前, 在 ECR 离子源中, 要获得它们的蒸气主要有以下几种方法: 内部炉子法、等离子体加热法、等离子体溅射法、激光熔化以及挥发性金属化合物法(MIVOC: Metallic Ion form Volatile Compounds)等<sup>[1]</sup>.

从 1999 年开始, 我们分别采用了内部炉子法、等离子体溅射法及 MIVOC 法 3 种方法, 在 14.5 GHz LECR2 及 10 GHz+14.5 GHz 双频离子源 LECR3 上进行了多次实验, 获得了较好的结果.

### 2 内部炉子法

实验的炉子为体积小、结构紧凑的钽高温金属蒸发炉, 具体结构如图 1 所示. 最佳工作温度在 600—1 300 °C(工作气压  $10^{-4}$ — $10^{-5}$  Pa), 炉子温度随加热功率的增大而增高<sup>[3]</sup>.

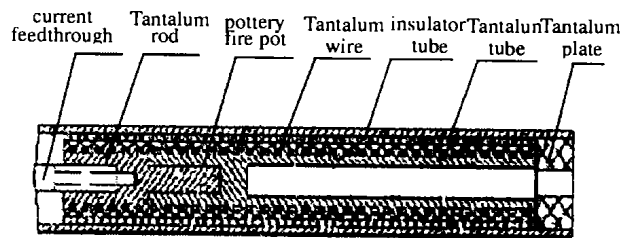


图 1 IMP 炉子结构简图

**工作原理:** 当把待供料的金属装入炉子, 并将其置于离子源的主极时, 绕在炉子上的电阻丝通电加热, 随着金属样品温度的不断升高金属的蒸气压也将不断升高. 当温度升高到金属的相变温度时, 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金属的蒸气. 这些蒸气通过炉子前端的小孔源源不断的扩散进入源体的弧腔中, 再由弧腔中的高能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 源的引出系统引出.

我们用此炉子在 14.5 GHz ECR 离子源

收稿日期: 2003 - 06 - 05; 修改日期: 2003 - 07 - 04

\* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KJ CX1-90); 国家杰出青年科学基金资助项目(10225523)

作者简介: 曹 云(1973-), 男(汉族), 安徽合肥人, 硕士, 助工, 从事 ECR 离子源发射度探测器的研制及金属离子研究.

LECR2 和双频 ECR 离子源 LECR3 上先后做了多种金属离子产生的实验，取得了较好的结果。表 1

给出了一些重点研究的高电荷态金属离子引出束流强度，图 2 给出了实验中所获得的典型电荷态谱。

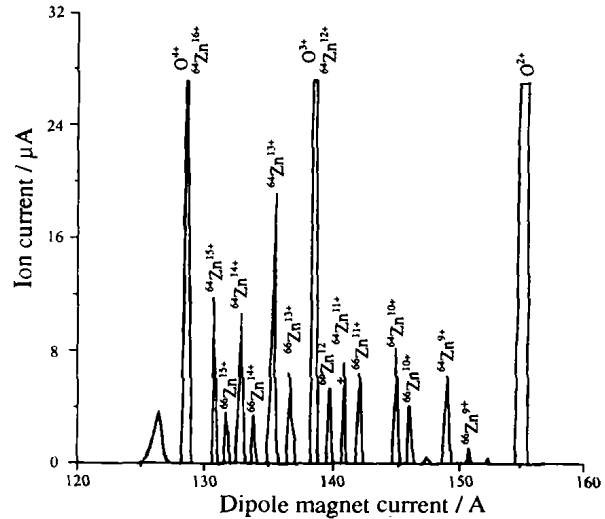
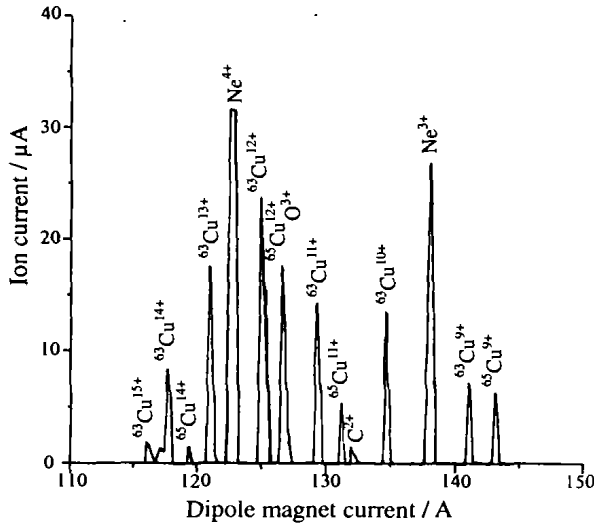


图 2 优化  $^{63}\text{Cu}^{13+}$  和  $^{64}\text{Zn}^{13+}$  电荷态谱

表 1 高电荷态金属离子束流强度  $\mu\text{A}$

金属离子	+10	+11	+12	+13	+14	+15	+16
铜	20	31		39	34	10	
锌				50		30	
镍	29		26.5		40	27	10
铁	74	30	25	20.5		19	

实验中，掺气后的效果比较明显，束流的强度和稳定性都有较大地提高，其中，掺入氖气的效果最佳。这主要是因为离子源没有加冷阴极电子枪（加负偏压），不能提供更多的电子与金属原子及离子碰撞，而利用掺气效应，通过掺气的原子和电离的离子与金属原子及离子多次碰撞，逐级电离的结果。如果加上冷阴极电子枪，估计会较大地提高引出束流强度。

从引出镍和铁的实验中发现，当炉温达到预定值时，束流强度偏小，随着炉子功率的升高，束流会进一步提高。所以有必要设计一个工作温度能达到  $2000\text{ }^\circ\text{C}$  以上的炉子，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、难挥发的样品更是如此。另外，炉子的容量偏小，一般情况下只能提供 70—80 h 的束流，有必要增大炉子的容量。

### 3 MIVOC 法

所谓 MIVOC 法就是挥发性金属化合物法，其原理是，基于 ECR 离子源的气耗量极小，利用挥发性有机金属化合物（如二茂金属化合物）挥发出来的含有待供应束流离子元素的化合物气体作为离子源的工作气体，进入等离子体弧腔中。当挥发性金属在常温下的饱和蒸气压达到或者高于  $1 \times 10^{-3}\text{ mb}$  时，仅靠挥发出来的有机化合物气体就能够满足 ECR 离子源的供气要求。气体分子进入弧腔后，由高能电子逐级碰撞游离至所需要的高电荷态金属离子，再通过 ECR 离子源的引出系统引出，最后达到提供金属离子的目的。我们使用的实验装置示意图如图 3 所示。

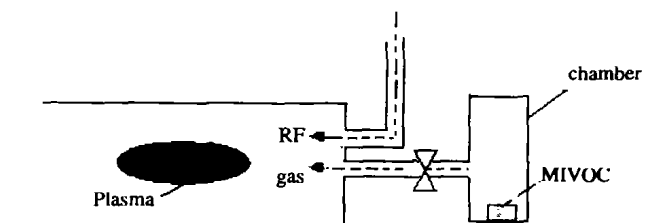


图 3 实验装置示意图

由 MIVOC 的工作原理可以看到，该方法和金属炉子法、插入法等传统方法相比较具有其独特的优点。首先，它的整个操作过程都是在常温下进行的，对环境没有特殊的要求；其次，由于整个过程

都不需要加热, 所以系统中不需要额外的供电装置, 避免了使用炉子法时在离子源高压端增加炉子供电系统所带来的困难. 因此, 结构相对非常简单, 造价低廉. 另外, 对某些高熔点的金属, 在用炉子法和插入法难以同时保证获得强束流和高稳定性时, MIVOC 法更显优势. 当然, 实验中也发现了它的一些缺点, 首先是一般挥发性的有机金属化合物都有一定的毒性, 所以装料时一定要小心, 最好在配有通风厨的地方. 另一方面, 所有的金属有机化合物分子中都含有相当比分的碳、氮和氧等原子, 长时间的供束后会污染等离子体弧腔和传输管道, 同时多余的氮、碳不利于高电荷态离子的产生和传输, 因此在提供高电荷态金属离子时要细心调节离子源的状态.

自 2000 年至今, 我们已先后在 14.5 GHz ECR

和 14.5 GHz+10 GHz 双频 ECR 离子源上使用 MIVOC 法获得了  $^{56}\text{Fe}^{9+}$ ,  $^{56}\text{Fe}^{10+}$ ,  $^{56}\text{Fe}^{11+}$ ,  $^{56}\text{Fe}^{12+}$ ,  $^{56}\text{Fe}^{13+}$ ,  $^{56}\text{Fe}^{15+}$ ,  $^{56}\text{Fe}^{16+}$ ,  $^{58}\text{Ni}^{9+}$ ,  $^{58}\text{Ni}^{10+}$ ,  $^{58}\text{Ni}^{12+}$ ,  $^{58}\text{Ni}^{13+}$ ,  $^{58}\text{Ni}^{14+}$ ,  $^{58}\text{Ni}^{15+}$ ,  $^{58}\text{Ni}^{16+}$  和  $^{58}\text{Ni}^{17+}$  等金属高电荷态离子稳定束流, 特别是 2002 年 8 月在 14 GHz+10 GHz 双频 ECR 离子源 (当时只是单频注入 14 GHz) 时获得了相当好的结果, 如表 2 所示. 图 4 给出了典型的谱图.

表 2 实验中得到的各种电荷态下金属离子束流强度  $\mu\text{A}$

金属离子	+9	+10	+11	+12	+13	+14	+15	+16
镍	37	64		74	57		31	17
铁			210	175	141			25

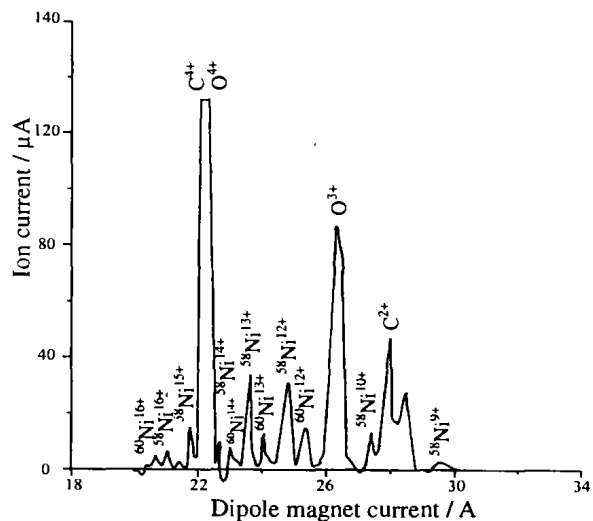
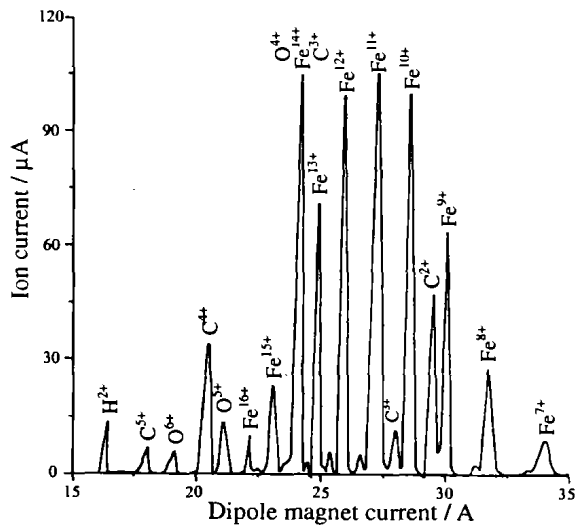


图 4 实验中所获得的优化  $^{56}\text{Fe}^{12+}$  和  $^{58}\text{Ni}^{13+}$  时的谱图

### 4 等离子体溅射法

此方法是将金属样品直接插入到等离子体弧腔内, 在样品上相对于等离子体施加一负偏压, 一般在 0.5—3 kV 之间. 由于此负偏压的作用, ECR 等离子体内的离子即可被加速而轰击金属样品, 从样品表面溅射出来的金属原子和离子直接进入腔体中, 被等离子体中注入微波加速的高能电子逐级电离至高电荷态, 最后被离子源引出系统引出.

我们做了铜和钽两种金属的溅射实验, 总的结果不好, 仅引出了铜离子束, 且束流强度很小, 稳定性也较差. 另外, 我们还尝试移动铜样品在等离子体弧腔中相对于等离子体的位置, 但基本上对流强无影响. 经初步分析认为, 产生这种现象的原因

主要是: (1) 溅射法和金属炉子方法相比, 溅射原子的能量比蒸发原子要高出 1—2 个数量级, 一般为 10—100 eV 左右, 使其和高能电子的碰撞几率下降, 致使电离效率变低, 引出束流偏小; (2) 溅射原子进入等离子体区域后, 大量的原子逃逸, 破坏了等离子体的稳定性, 引起等离子体振荡, 所以导致引出束流不稳定. 由于钽离子溅射率比铜要低许多, 一次溅射出来的钽原子产量较小, 因此在实验中没有引出钽离子束.

针对这个问题, 我们准备改进溅射装置, 尽可能提高溅射产量, 降低溅射出的原子和离子的能量, 进一步实验引出束流.

## 5 结束语

从这些实验中, 我们发现炉子法和 MIVOC 法较为成熟, 用它们产生多种稳定的高电荷态金属离子束, 并已经成功地运用在原子核物理实验和加速器供束中. 目前, 我们正在设计新的高温金属炉子,

进一步开展这方面的实验研究; 另外, 我们还将利用 MIVOC 法继续进行一些高熔点及稀有同位素金属高电荷态离子束产生的研究工作. 同时, 我们也正在寻找新的产生金属离子方法.

## 参 考 文 献:

- [1] Wei B W, Liu Z W, Zhang W, *et al.* Proceedings of the 13th International Conference on Cyclotron and Their Applications [M]. Singapore, Vancouver, Canada: World Scientific, 1992: 334.
- [2] Liu Z W, Zhang W, Zhao H W, *et al.* The Development of an Electron Cyclotron Resonance Ion Source for the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou[J]. Rev Sci Instr, 1998, 69(2): 685.
- [3] Zhao H W, Zhang X Z, Liu Z W, *et al.* Proceedings of the 14th International Conference on ECR Ion Source[C]. CERN, Geneva, 1999, 216.
- [4] Xie Z Q, Lyners C M. Proceedings of 13th International Conference on ECR Ion Source[C]. Texas, USA, 1997, 16.
- [5] Nakagawa T, Kidera M, Kurita T, *et al.* Proceeding of the 14th International Conference on ECR Ion Source[C]. CERN, Geneva, 1999: 1.
- [6] 袁 平. 高电荷态 ECR 离子源及其游离机制的研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 1998, 4.
- [7] Xie Z Q. Symposium on Charged Particle Sources and Beams [C]. Hunan, China, October 10-16, 1997, 7.
- [8] 达道安 主编. 真空设计手册(修订版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991, 97.
- [9] 孙良亭, 张子民, 赵红卫. 双频加热的 LECR3 离子源设计及初步调试[J]. 核技术, 2002, 25(9): 1.

# Experiments and Researches on Production of Highly Charged Metallic Ions in ECR Ion Source\*

CAO Yun, MA Lei, SUN Liang-ting, ZHANG Zi-ming, ZHAO Hong-wei, MA Bao-hua  
(*Institute of Modern Physics, 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 have been tested, in which MIVOC (Metallic Ion from Volatile Compounds), heating oven methods and plasma sputter methods are all included. According to the experiments, the results of using MIVOC methods and heating oven methods are very good. In most of our researches, emphasis was put upon the ion production of iron, Nickel, Tantanum, copper of different charge states. Among the ion beams we have obtained, 210  $\mu\text{A}$   $\text{Fe}^{11+}$ , 175  $\mu\text{A}$   $\text{Fe}^{12+}$ , 142  $\mu\text{A}$   $\text{Fe}^{13+}$ , 25  $\mu\text{A}$   $\text{Fe}^{16+}$ , 64  $\mu\text{A}$   $\text{Ni}^{10+}$ , 57  $\mu\text{A}$   $\text{Ni}^{13+}$ , 31  $\mu\text{A}$   $\text{Ni}^{15+}$  and 15  $\mu\text{A}$   $\text{Ni}^{16+}$  are representative results.

**Key words:** ECR ion source; heating oven; metallic ion form volatile compound; highly charged state; plasma sputter.

\* **Foundation item:** Knowledge Innovation Program, Chinese Academy of Sciences (KJ CX1-09), National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scientist (10225523)