

用于 EBIT 装置的小型 MEVVA 源及其 离子注入实验

朱丹峰¹ 杜光天¹ 郭盘林¹ 朱周侠¹ 朱希恺¹ 傅云清² 胡伟² 邹亚明²

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (复旦大学现代物理研究所 上海 200433)

摘要 为给上海电子束离子阱(Electron Beam Ion Traps, EBIT)装置提供低电荷离子, 我们研制了小型金属蒸汽真空弧 (Metal Vapor Vacuum Arc, MEVVA)离子源, 可产生多种金属以及半导体材料的低电荷离子。本文介绍小型 MEVVA 离子源的特性及其在上海 EBIT 装置上的离子注入实验。实验结果显示, 合理控制注入参数可以使注入并被束缚在 EBIT 中的离子数密度达到 $10^8 \sim 10^9/\text{cm}^3$ 。

关键词 MEVVA 离子源, 电子束离子阱, 离子注入

中图分类号 TL503.3

电子束离子阱(Electron Beam Ion Traps, EBIT)装置是产生高电荷离子和研究高电荷离子相关物理问题的新型实验装置^[1-5]。上海 EBIT 是我国研制的第一台电子束离子阱装置, 相关设计指标达到国际先进水平^[6,7]。

EBIT 的基本原理, 是超导磁场压缩的高密度电子束不断碰撞电离被静电势阱束缚的离子, 直至达到高电荷态^[4]。EBIT 的工作元素(离子或原子)的来源有多种途径^[8], 最易获得的元素来自电子枪阴极蒸发物, 如 Ba、W 等, 但它们数量少且种类有限。因此, 人们开始采用其他注入方式。

利用差分抽气原理进行气体原子注入的方式被广泛使用, 可用于诸如 Ne、Ar、Kr 和 Xe 等气体的注入。采用外置离子源注入低电荷离子的方式, 则能提供元素周期表上的大部分固体元素离子。目前, 常用的此类离子源主要有小型金属蒸汽真空弧 (Metal Vapor Vacuum Arc, MEVVA)离子源^[9,10]和激光离子源(Laser Ion Source, LIS)^[11,12]。

MEVVA 离子源能产生大部分金属离子、经特殊处理的半导体离子甚至绝缘材料离子, 具有结构紧凑、体积小、束流强度大、价格便宜等优点。但 MEVVA 源对结构设计和加工要求高、配套电子学复杂、维护麻烦、触发频率低、寿命短, 故有的 EBIT 实验室采用 LIS 产生低电荷离子^[11]。LIS 可产生元素周期表上几乎所有的固体元素离子, 结构简单, 可有很高的注入频率, 寿命长。当然 LIS 也有

不少缺点, 如离子发射度大、造价高、体积大等。

除离子源外, 一些 EBIT 实验室也采用金属丝插入和激光蒸发方式为 EBIT 提供工作元素^[8], 但仅用于提供一些非常稀有的元素的注入。

鉴于 MEVVA 源是各国 EBIT 装置最为广泛使用的离子源, 能满足绝大部分的物理实验要求, 因此上海 EBIT 装置也设计了 MEVVA 离子源。针对现有小型 MEVVA 源的缺点, 我们仔细设计了离子源的结构^[13,14], 使其流强足够大、维护方便、触发可靠、寿命长, 对配套电子学部件的要求低。

本文介绍该离子源的特点和束流性能测试。离子源产生的离子须顺利地注入到离子阱中, 接受高密度电子束的不断轰击电离, 如何将离子输送到阱区也是本文的重要内容。本文还讨论了离子源电参数、传输透镜参数、离子阱电参数以及时序控制等对离子注入效率的影响, 给出了寻找最佳注入参数的途径。

1 小型 MEVVA 源的特性

1.1 MEVVA 离子源的结构

MEVVA 离子源主要由阴极、阳极、触发极、抑制极、引出极以及相应的绝缘部分组成(图 1)。针对小型 MEVVA 源存在的问题, 我们对其作了一些改进, 并使其具有以下特点:

第一作者: 朱丹峰, 男, 1983 年出生, 2005 年毕业于哈尔滨工业大学, 现为中国科学院上海应用物理研究所硕士研究生, 测控技术与仪器专业

通讯作者: 杜光天

收稿日期: 2007-01-19, 修回日期: 2007-10-23

1.1.1 绝缘改善 源芯绝缘材料用 BN，它在高温、高金属蒸汽压的工作环境下绝缘不易破坏。抑制极和地电极旁边打抽气孔，以减少蒸汽沉积于绝缘体表面，延长维护周期。

1.1.2 换阴极方便快捷 本设计方案力图以中心棒作阴极，换阴极时只要松开定位螺钉，旋开螺盖，即可拉出阴极组件、换掉靶头，而不动其他部件和接线。如用触发极作阴极，则拆大法兰、压板和引线，取出触发极组件，换掉靶头。

1.1.3 电极同轴性好，拆装快捷 所有电极都同轴装在同一基准法兰上，BN 易加工到准确的尺寸，用一压板固定所有的电极，操作方便、快捷。

1.1.4 特殊的三电极引出系统 三电极引出系统保留原有平板引出的电场特性，但抑制极板和地电极旁打抽气孔，减少蒸汽在绝缘表面的沉积。

1.1.5 对电子学部件要求低 电极和绝缘体紧密配合，保证 MEVVA 源的触发极和阴极之间为表面放电，使 MEVVA 源对配套的电子学部件要求降低，触发电压在 2 kV 时即可正常起弧。

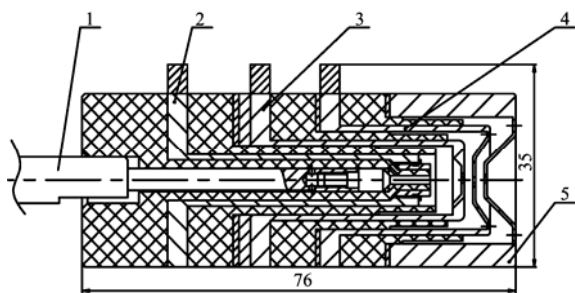


图 1 MEVVA 离子源的源芯结构

1. 阴极, 2. 触发极, 3. 阳极, 4. 抑制极, 5. 引出极

Fig.1 Structure of MEEVA ion source

1. Cathode electrode, 2. Trigger electrode, 3. Anode electrode, 4. Suppressor electrode, 5. Extractor electrode

1.2 MEVVA 离子源的电极布局和供电

如图 2 所示，阴极、触发极、阳极悬浮在 0~15 kV 阳极电源上，阳极电源用直流稳压电源带 0.02 μF 的储能电容供电。在阴极和触发极之间连接触发电源，触发电源采用升压变压器输出脉冲原理。最高输出电压可达 15 kV，触发功率管为晶体管，脉宽 6~12 μs 可调，触发频率 1 Hz(主要由储能电容的充电时间决定)，在控制信号作用下产生触发电流。在阴极和阳极间连接弧流电源产生弧流，其为简单的 RC 放电线路，最大电流>200 A。

1.3 触发、起弧和引出束流性能

在控制信号的作用下，触发电源产生脉冲高压，通过触发极和阴极间的绝缘表面在阴极表面的突出

点形成强电场，引起场致发射，产生高密度电子流。电子流在路径中与突出点蒸发的气体和蒸汽碰撞，产生电离，正离子轰击阴极，进一步加热，产生雪崩发射中心。突出点熔去后，电场变小，又去轰击其他突出点，从而在阴极和阳极间积累起足以起弧的蒸汽压，在直流正弧压的作用下形成主弧流。当蒸汽压低到不能维持主弧流时，弧流熄灭。通过阳极孔的等离子体在直流正高压形成的引出场作用下，正离子便被引出，形成一个脉冲束流。

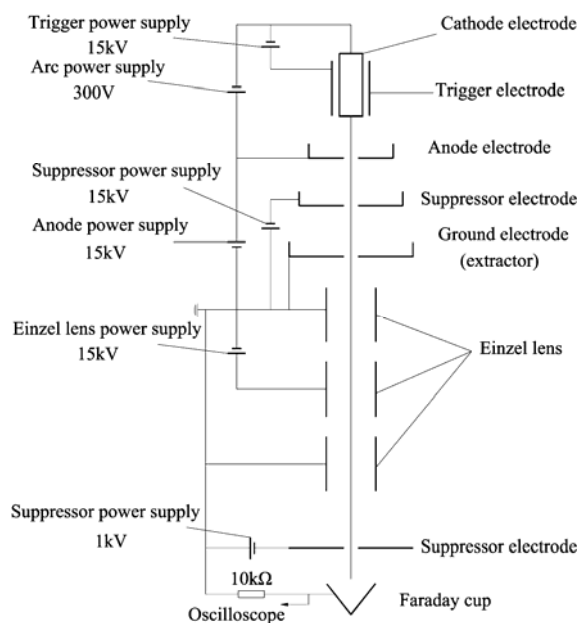


图 2 MEVVA 离子源电极组成和电源接线简图

Fig.2 Schematic diagram of electrodes and electronics arrangement for MEVVA ion source

触发电流和弧流分别用一个互感器测量。互感器分别套在阴极和触发极的地回路上，用四通道记忆示波器同时记录触发电流和弧流。阴极靶材为金时，测得的触发电流和束流波形如图 3 所示。触发

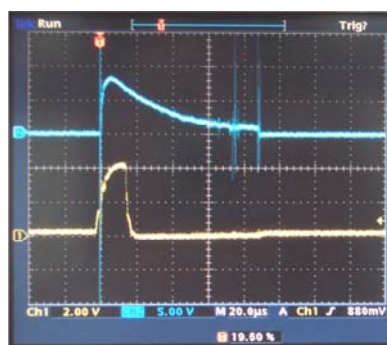


图 3 示波器测量到的触发电流和弧流波形

(1) 触发电流, (2) 弧流

Fig.3 Pulse shape of trigger current and arc current measured with oscilloscope

(1) Trigger current, (2) Arc current

电压在 4.2 kV 时，触发电流的峰值为 4.4 A，脉宽为 20 μs。弧压为 100 V 时弧流的峰值为 80 A，脉宽为 90 μs(示波器第一通道测得的电压 1 V 对应触发电流 1 A，示波器第二通道测得的电压 1 V 对应弧流 10 A)。用铁靶进行实验时，触发电压在 2.2 kV 时就可以正常触发，弧压在 30 V 时就能正常起弧。

束流的测量是在孔径为 Φ15 mm 的法拉第筒上串 10 kΩ 电阻接地，用记忆示波器测量该电阻上的电压，换算成束流，如图 2 所示，法拉第筒距离引

出孔 70 mm。法拉第筒测得的束流的大小与弧流、引出电压、聚焦透镜的电压以及法拉第筒的尺寸有关。弧流和引出电压会影响从引出极的束流大小，而法拉第筒的半径会影响法拉第筒上收集的束流大小。调节聚焦透镜，可改变离子的束斑，从而改变打在法拉第筒上离子的多少。实验表明，法拉第筒的直径偏小，因此只能测到部分束流。表 1 为几种靶材的引出束流的大小。

表 1 几种靶材的引出束流
Table 1 Peak beam current intensities of some target elements

靶 Target	引出束流 Output beam current /mA	引出电压 Extraction voltage / kV	弧流 Arc current /A	脉冲宽度 Pulse width /μA
Fe	3.3	10	90	80
Au	1.7	10	150	90
Ge	3	12	70	50

2 离子注入实验

2.1 离子注入参数的设定

MEVVA 离子源产生的低电荷态离子到达阱区前，须经过一系列的光学部件，如出口单透镜、收集器、传输线圈 A、传输线圈 B、漂移管等(图 4)，上海 EBIT 装置的结构可参见文献[6]。为获最佳的注入效率，须对各部件的参数进行配置。引出离子能量由引出电极电压决定，一般在 6 kV 左右。引出离子束经出口单透镜聚焦后进入收集器，收集器处

在负电位上，电压的大小按照 EBIT 电子束能量需要确定。为使离子能进入漂移管中央的阱区，漂移管的电压也应在 6 kV 左右。要使更多的离子在阱区能被束缚，则离子进入阱区的速度越慢越好，离子在阱区的渡越时间长，阱区关闭时，束缚离子也越多。模拟计算表明，Au 离子脉冲前沿到达漂移管 DT3 的飞行时间为 16 μs 左右，而 Au 束流脉宽为 90 μs 左右，故要使注入到阱区的离子数目最多，飞行时间应在 16~106 μs 范围内选择，最佳飞行时间的大小由光谱实验确定，下文有详细介绍。

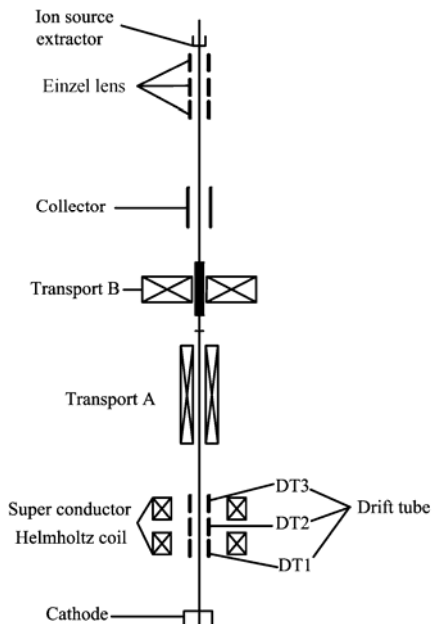


图 4 离子注入路径上电极布局
Fig.4 Electrodes arrangement for ion injection

2.2 离子注入时序

离子注入时序如图 5 所示。在开阱时，由时序发生器发出一个触发信号，使 MEVVA 源的触发电源产生一个触发电压，在引出电极的作用下引出离子，离子经过一段飞行时间(TOF)后，时序发生器给出一个信号控制阱区的电压，使阱关闭，束缚住离子，所束缚的离子只是引出离子束的一小部分。因为阱区关闭时，它所束缚的只是那时刚好在阱区

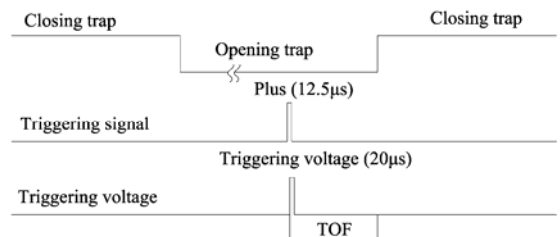


图 5 离子注入的时序
Fig.5 Timing of ion injection

的离子束,这部分离子束的时间宽度在数微秒范围,引出电压和漂移管电压一定,此时间宽度也不变。时序发生器设置不同的 TOF,可寻找最佳的注入时间,使被束缚在阱区的离子数最多。至于开阱、关阱时间的长短由物理实验要求决定。

2.3 Au 离子注入实验

本文的离子注入实验以 Au 离子为例,通过设置不同的引出电压、漂移管电压、飞行时间、聚焦极电压,寻找最佳注入条件。用高纯锗探测器测量阱区发出的 X 射线,由 Au 的特征谱线强度判断 Au 的注入效率。经过大量实验,确定出最佳注入参数(表 2)。图 6 是该条件下测量到的谱线,与对照谱(无离子注入)相比,Au 离子显然已注入到阱区。实验结果表明,合理控制注入参数可使束缚在 EBIT 中的离子数密度达 $10^8 \sim 10^9/\text{cm}^3$ [15],满足使用要求。

表 2 Au 离子注入参数
Table 2 Parameters for Au ion injection

参数 Parameters	数值 Settings
触发电压 Trigger voltage / kV	4.2
弧压 Arc voltage / V	80
抑制电压 Suppression voltage / kV	-0.8
引出电压 Extraction voltage / kV	6.1
单透镜 Einzel lens / kV	4.3
收集器电压 Voltage on collector / kV	-16
漂移管 3 Drift tube 3 / kV	6.214
漂移管 2 Drift tube 2 / kV	6.014
漂移管 1 Drift tube 1 / kV	6.364
关阱时间 Time of closing trap / s	7
开阱时间 Time of opening trap / ms	5
飞行时间 TOF/ μs	65

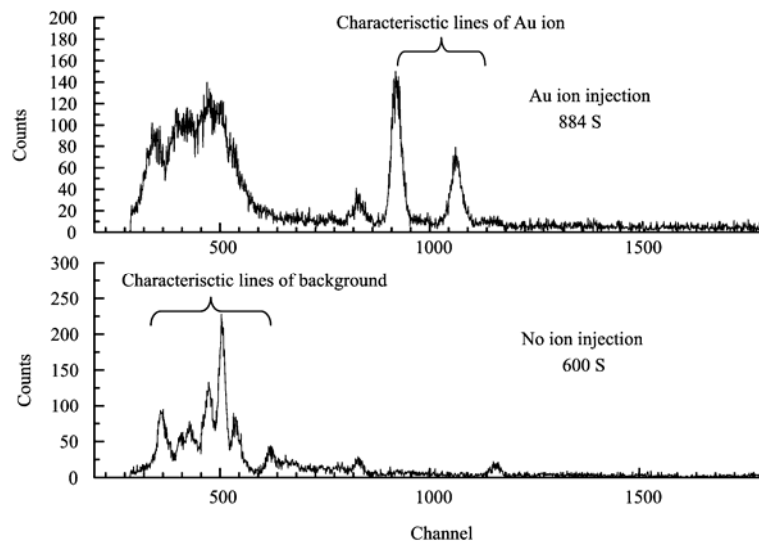


图 6 Au 离子注入 X 射线光谱
Fig.6 X-ray spectra after Au ion injection

3 结论

长时间的离子注入实验表明,上海 EBIT 装置的 MEVVA 离子源的束流强、维护方便、触发可靠、寿命长、对配套电子学部件的要求低、换靶方便。0.2 mA 的 Au 束注入时,测得阱区离子数密度达 $10^8 \sim 10^9/\text{cm}^3$,注入效率较高,可满足使用要求。本文离子注入实验中以 Au 离子为例,其他离子的注入可采用同样的方式,只是飞行时间 TOF 须重新设定。

参考文献

- 1 Marris R E, Levine M A, Knapp D A, *et al.* Phys Rev Lett, 1988, **60**(17): 1715—1718
- 2 Marris R E, Elliott S R, Knapp D A, *et al.* Phys Rev Lett, 1994, **72**(26): 4082—4085
- 3 Nakamura N, Asada J, Currell F J, *et al.* Rev Sci Instrum, 1998, **69**(2): 694—696
- 4 Crespo J R, Dom A, Moshhammer R, *et al.* Phys Scr, 1999, **T80B**: 502—503

- 5 Biedermann C, Foerster A, Fussmmm G, *et al.* Phys Scr, 1997, **T73**: 360—361
- 6 ZHU Xikai, JIANG Dikui, GUO Panlin, *et al.* J Phys: Conf Ser 2, 2004. 65—74
- 7 ZOU Yaming, Hutton R. Nucl Sci Tech, 2003, **14**(4): 230—237
- 8 Nobuyuki Nakamura, Tohru Kinugawa, Hiroshi Shimizu, *et al.* Rev Sci Instrum, 2000, **71**(2): 684—686
- 9 Brown L G, Galvin J E, Gavin B F, *et al.* Rev Sci Instrum, 1986, **57**(6): 1069—1084
- 10 Zhou F S, Wu X Y, Zhang H X, *et al.* Rev Sci Instrum, 1994, **65**(4): 1263—1265
- 11 Trinczek M, Werdich A, Mironov V, *et al.* Nucl Instr Meth Phys Res B, 2006, **251**: 289—296
- 12 Mironov V, Trinczek M, Werdich A, *et al.* Nucl Instr Meth Phys Res B, 2003, **205**: 183—186
- 13 Guangtian Du, Panlin Guo, Manli Huang, *et al.* Rev Sci Instrum, 2006, **77**: 03A908
- 14 杜光天, 黄漫莉, 郭盘林. 2004 全国荷电离子源、粒子束学术会议论文集, 乌鲁木齐, 2004. 40—44
DU Guangtian, HUANG Manli, GUO Panlin. Symposium on charged particle sources and beams, Urumqi, 2004. 40—44
- 15 郑志坚, 李月明, 杨国洪. EBIT 阶段指标测试报告. 2006
ZHENG Zhijian, LI Yueming, YANG Guohong. Report of EBIT StageTest. 2006

Ion injection into EBIT with a miniature MEVVA ion source

ZHU Danfeng¹ DU Guangtian¹ GUO Panlin¹ ZHU Zhouxia¹ ZHU Xikai¹
FU Yunqing² HU Wei² ZOU Yaming²

1 (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2 (Insititue of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract A modified miniature metal vapor vacuum arc ion source has been developed for the Shanghai electron beam ion trap. Several kinds of elements were tested to extract lowly charged ions, such as Fe, Au, Ge and Ti. In this paper, we describe the design and features of the MEVVA. And experiment results of Au ions injection demonstrate that the Au ions were successfully injected and trapped in the drift tubes.

Key words MEVVA ion source, Electron beam ion traps, Ion injection

CLC TL503.3