

文章编号: 1007-4627(2011)04-0439-05

# 用于聚焦离子束系统的离子源\*

尚勇<sup>1,2</sup>, 赵环昱<sup>1</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 介绍了现阶段两种用于聚焦离子束系统的离子源——液态金属离子源和气体场发射离子源的基本原理, 并对比了它们的优缺点。由于目前这两种离子源都难以满足纳米加工领域不断提高的技术要求, 因此提出了一种用于聚焦离子束的新型离子源——电子束离子源, 并介绍了电子束离子源的基本原理, 给出了设计参数、模拟结果(20 kV 的  $\text{Ar}^+$  离子束, 发射度约为  $5.8 \times 10^{-5} \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ , 束斑约为  $1 \mu\text{m}$ )和初步的实验结果。

**关键词:** 聚焦离子束系统; 液态金属离子源; 气体场发射离子源; 电子束离子源

**中图分类号:** O562      **文献标志码:** A

## 1 引言

离子束加工是利用荷能离子轰击样品表面, 实现材料剥离、沉积、注入和改性等的技术。由于离子束不仅具有粒子的特性, 还具有元素特性, 因此, 与电子束和光子束相比, 在机械加工行业和半导体集成电路制造业的应用范围更加广阔。特别是聚焦离子束(Focused Ion Beam, 简称 FIB)技术, 利用直径为几纳米到几微米的 FIB 对样品表面进行点状轰击来达到加工目的, 并且集材料刻蚀、沉积、注入和改性于一身, 已成为当今微纳米加工和半导体行业的热点。目前, FIB 的主要应用包括: (1)光掩模的修补; (2)微电子器件的缺陷分析和修整; (3)三维纳米器件加工。除此之外, 它在其它领域也具有广泛的应用前景: (1)扫描离子束显微技术; (2)FIB 直接注入; (3)FIB 曝光; (4)FIB 微结构制造(刻蚀、沉积); (5)FIB 质谱技术等<sup>[1]</sup>。

FIB 系统的核心部件是离子源, 它是产生离子束的装置。目前, 成功应用于 FIB 的离子源主要有两种: 液态金属离子源(Liquid Metal Ion Source, 简称 LIMS)和气体场发射离子源(Gas Field Ion Source, 简称 GFIS)。其中, LIMS 的离子束斑可小至  $50 \sim 100 \text{ nm}$ , 亮度高达  $10^6 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ , 离子发射稳定。而 GFIS 的亮度达  $10^9 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ ,

束斑尺寸小至  $1 \text{ nm}$ , 并可提供 H, He, O 和 Ne 等离子, 但这种离子源要求超高真空和低温环境, 因此它的应用范围受到限制。对目前的 FIB 技术来说, 希望能够研发出同时满足高亮度、小尺寸、离子种类多、结构简单和工作稳定等条件的新型离子源。

电子束离子源在基础研究领域已广泛应用, 我们提出了利用这种离子源来产生 FIB 所需离子束的方案, 并根据 FIB 系统的要求做出了重要改进。

## 2 液态金属离子源(LMIS)

LMIS 的基本原理是利用液态金属在强电场作用下发生场致离子发射。LMIS 的基本结构如图 1 所示。它主要由发射尖、液态金属储备槽和离子引出电极构成。由金属 W 制作的发射尖, 尖端半径只有几个微米。发射尖对着引出电极, 发射尖的底部是螺旋状镓容器的液态金属储备槽。在引出电极上加有几千伏的电压, 使发射尖和电极之间形成一个很强的电势差。当液态金属储备槽被加热到一定温度时, 金属顺着针尖流下来并且浸润整个发射尖。液态金属在外加电场力的作用下形成一个极小的尖端, 液体尖端的电场强度可以达到  $10^{10} \text{ V/m}$ , 致使针尖的液态金属电离, 产生的正离子由引出电

\* 收稿日期: 2010-09-23; 修改日期: 2011-01-05

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60706006, 10225523)

作者简介: 尚勇(1981—), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 从事核技术及应用研究; E-mail: shangyong@impcas.ac.cn

极引出从而形成离子束<sup>[2]</sup>。

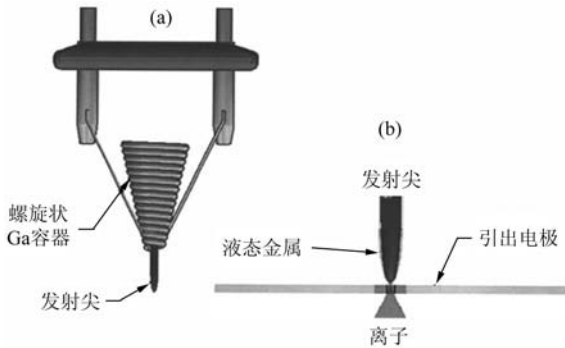


图 1 LMIS 结构示意图

LMIS 具有角电流密度高、设备相对简单、工作稳定、工作寿命长等优点。但是这种离子源的工作性质决定了用于液态离子源的金属在液态时必须具备表面张力高和蒸汽压低的特性，并且不能腐蚀发射尖，因此 LMIS 只能提供以 Ga 为主的少数几种金属离子束。而这些金属离子质量都比较大，并且易与多种元素发生化学反应，由此产生的金属离子污染和溅射现象比较严重。

### 3 气体场发射离子源(GFIS)

GFIS 与 LMIS 的基本工作原理类似，也是利用强大的电场电离气体原子或分子产生离子，然后利用引出电极引出形成离子束。不同之处在于：GFIS 没有液态金属储存槽，取而代之的是惰性气体供气系统。GFIS 发射的离子束性能不仅与电压和气压等有关，还与尖端附近的气体温度有关，离子束流强随发射尖附近气体温度的下降急剧上升，因此必须配备低温系统。GFIS 的基本结构如图 2 所示。

GFIS 能够提供多种惰性气体离子束，产生的离子污染很小，同时离子束的能散小、亮度高(特别是最近研究的新型发射尖，例如，超级尖(Supertip)和单原子尖(Single-atom Tips)<sup>[3]</sup>，显著地提高了离子束的角电流密度)。但是 GFIS 需要不断地补充气体，还必须配备冷却系统，因此整个系统的结构相当复杂，另外针尖非常脆弱，导致 GFIS 的工作寿命普遍很短。尽管目前 GFIS 能够提供比 LMIS 更好的离子束，但还是不能全面取代 LMIS 在 FIB 系统中的应用。

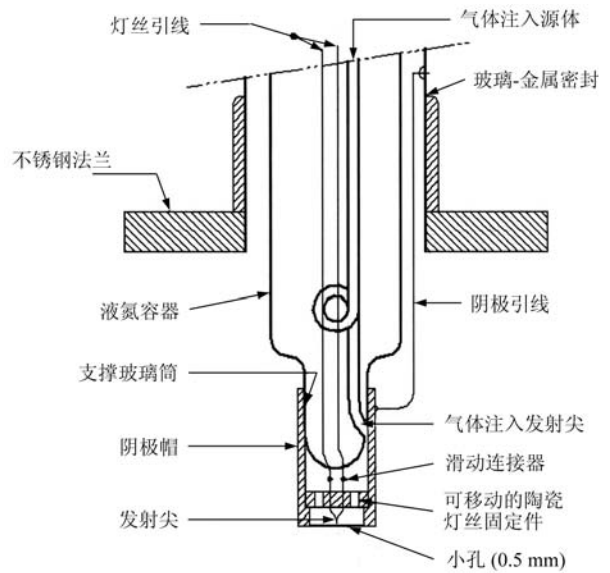


图 2 GFIS 结构示意图

## 4 电子束离子源

目前，许多实验室都在针对 FIB 系统开发新型的离子源，如激光离子源<sup>[4]</sup>、潘宁离子源<sup>[5]</sup>、电子轰击离子源<sup>[6]</sup>和双等离子体离子源<sup>[7]</sup>等，但实验结果都不理想。原因是这些离子源都是基于等离子体的离子源，而从等离子体中引出的离子束往往具有很高的离子温度，这导致离子束的发射度较大，很难将离子束聚焦到纳米量级，在 FIB 系统中的应用范围有限。

针对等离子体离子源离子温度高的缺点，本课题组提出利用电子束离子源制作聚焦离子束系统(E-FIB)。该离子源的基本工作原理是由电子枪产生电子束注入漂移管，在外加磁场的帮助下，电子束被聚焦，再通过电子束碰撞电离工作气体产生离子。通过选取合适的电子能量，使得由电子传递给离子的能量很小，离子的温度很低。在引出区形成离子后马上被引出，不会被电子持续加热；在非引出区形成的离子，会由于扩散和迁移过程，到达引出区，在这个过程中由于受到电子碰撞加热，所以这部分离子的温度较高，但利用加有弱磁场的小孔电极引出，能够将高温的离子阻挡在小孔电极内(小孔筛选)。因此引出离子束的能散很小，亮度很高。同时该离子源的结构简单，能够提供几乎所有的气体离子，更换离子种类简单快捷，离子束稳定，工作寿命长。

E-FIB 基本结构如图 3 所示。它主要包括：电

子枪、漂移管、磁场线包、供气系统和离子束传输系统等。

$$\tau_c = (\sigma_{0 \rightarrow 1} n v)^{-1}, \quad (1)$$

式中： $\sigma_{0 \rightarrow 1}$  是中性气体原子到单电荷态的电离截面； $n$  是中性气体密度； $v$  是电子束中电子的速度。电离截面与电子的能量密切相关，通过对电子能量的调节，可以很好地控制离子源中的电荷态分布。

以 Ar 为例，当电子能量为 44.5 eV 时， $\text{Ar}^+$  的电离截面为  $(2.39 \pm 0.05) \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ ；当电子束能量大于 44.5 eV 时，将会产生  $\text{Ar}^{2+}$ 。电子束能量为 108 eV 时， $\text{Ar}^+$  的电离截面达到最大值  $(2.57 \pm 0.05) \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ ，同时  $\text{Ar}^{2+}$  的电离截面为  $(2.10 \pm 0.12) \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ ， $\text{Ar}^{3+}$  的为  $(2.00 \pm 1.20) \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 。为了增大单电荷态氩离子的产额，电子束的能量应当选取在 44.5~108 eV 之间。

### 4.2 电子束的传输

根据电子枪的位置以及电子束的聚焦方式，电子枪可以分为磁场内和磁场外两种模式。本系统采用的是磁场外电子枪模式，利用栅极、阳极、电透镜屏蔽磁场，使电子枪处于磁场影响之外。这种结构的优点是能够提供稳定的电子束，且电子束通过磁场聚焦，形成一个很小的斑点，从而大大提高电子束的密度。120 eV 的电子束通过 620 V 的电透镜聚焦，在漂移管内传输的情况如图 4 所示。电子束在引出电极处形成半径约为 0.25 mm 的焦点，电流密度达到  $0.64 \text{ A/cm}^2$ 。

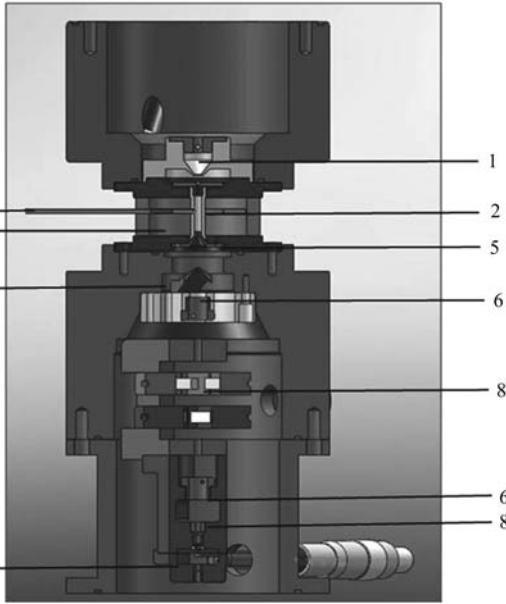


图 3 E-FIB 源体结构示意图

- 1 电子枪, 2 漂移管, 3 进气孔, 4 磁场线包, 5 引出小孔电极,
- 6 电透镜, 7 吸极, 8 电偏转系统, 9 束斑测量系统。

### 4.1 离子的产生和电子束能量的选择

在电子束离子源中，离子主要由电子碰撞电离过程产生。如果不考虑电子俘获过程，对于单电荷态离子来说，电离时间可以由下面的公式表示：

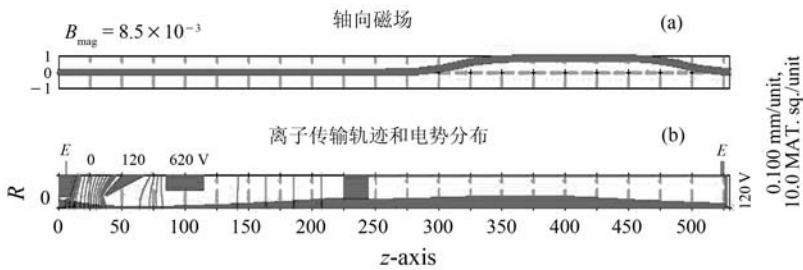


图 4 PBGUN 模拟电子束在最大磁场为  $8.5 \times 10^{-3} \text{ T}$  时的传输

### 4.3 磁场

磁场的主要作用是聚焦并且压缩电子束。此外，小孔电极附近的磁场，可以使高温离子被小孔电极阻挡，从而达到小孔筛选的目的。因为我们的设计目标是提供单电荷离子束，电子束的流强和能量并不高，不需要很强的磁场。以 Ar 为例，电子束的流强 0.05 mA，能量 120 eV，所需磁场的最大

值为  $8.5 \times 10^{-3} \text{ T}$ ，引出小孔电极内部磁场达到  $3.5 \times 10^{-4} \text{ T}$ 。

为了测试电子束在不同强度磁场下的传输情况，使用的是常规线包，其磁场的变化范围为 0~0.1 T。磁场的分布如图 5 所示。在掌握了磁场对于电子束传输以及离子产生的影响后，将把磁场线包更换为永磁铁结构，进一步简化系统。

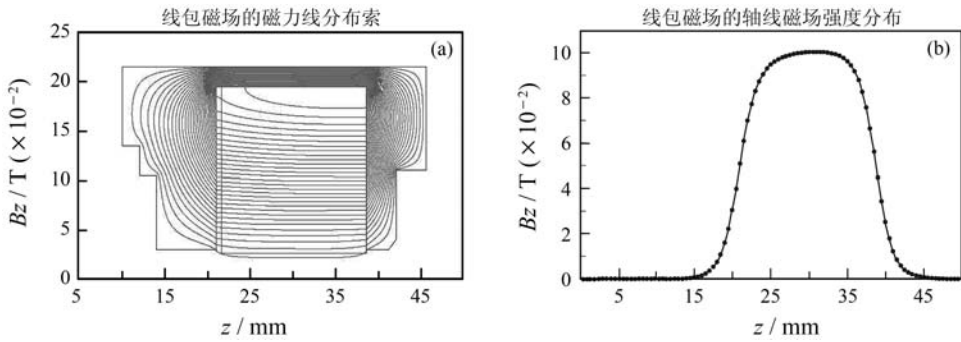


图 5 Poisson 程序模拟计算的小孔电极附近最大磁场分布(1.2 A 线包电流)

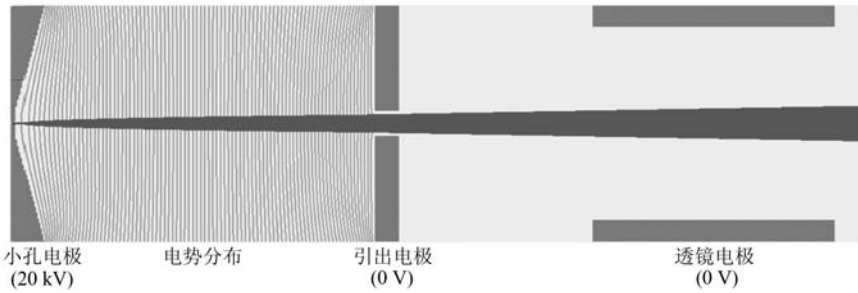


图 6 Simion 模拟束流引出

### 4.4 离子束引出

离子源的引出系统决定了引出离子束的性能，基本的设计目标是：(1)引出稳定的离子束；(2)离子束流强大、发射度小，使离子束的亮度尽可能的高；(3)引出电极上的截流以及引出空间内产生的各种次级粒子流尽可能的小，提高引出效率；(4)维持等离子体电极两侧的气压差，提高气体利用率；(5)利用引出小孔电极吸收电子束中多余的电子。图 6 给出了 simion 程序模拟的离子束流的引出及传输情况。

另外，根据下式，可以得到离子的发射度：

$$\alpha_{\max} = X_{\text{outmax}} X_{\text{outmas}} \pi$$

$$= \pi \frac{r}{\sqrt{2U}} \left( Br \sqrt{\frac{q}{m}} + \sqrt{\frac{qB^2 r^2}{4m} + \frac{\rho_1}{2\pi\epsilon_0}} \right),$$

其中：\$q\$ 是离子的电荷态；\$B\$ 是磁场强度；\$m\$ 是离子质量；\$\rho\_1\$ 是电子束电荷线密度；\$U\$ 是电势。由此可以得到 \$\text{Ar}^+\$ 的发射度约为 \$5.8 \times 10^{-5} \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}\$。

### 4.5 离子束聚焦

为了减小球差、像差等不利因素，传输系统采用静电透镜来实现离子束的聚焦。使用 simion 模

拟静电透镜聚焦离子束情况(图 7)，模拟结果显示，当离子温度为 0.5 eV 时，离子束斑为 10 \$\mu\text{m}\$ 左右；离子温度为 0.1 eV 时，离子束斑为 1 \$\mu\text{m}\$ 左右。

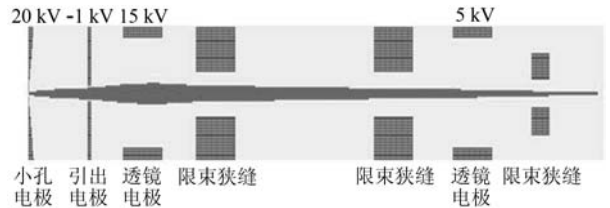


图 7 Simion 模拟离子束传输

### 4.6 初步实验结果

初步的实验结果如图 8 所示。离子束的能量为 20 kV，当两个电透镜各加 5 kV 电压时，根据测量

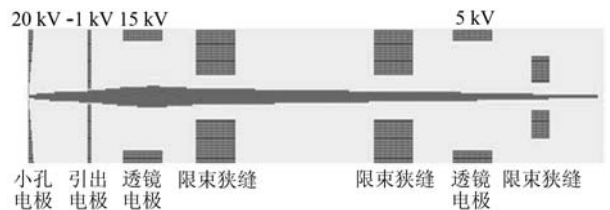


图 8 Simmion 模拟初次实验中离子束的传输情况

到的离子束流强分析，离子束有明显的聚焦，聚焦情况符合模拟计算的结果，即两个限束狭缝上分别

观察到 0.9 和 0.4 nA 离子束, 终端法拉第探测器上观察到 0.02 nA 的离子束, 终端的离子束束斑约为 0.1 mm。但是由于实验条件限制, 前透镜达不到理论计算的 15 kV 最佳值。目前正在改进结构, 减小狭缝, 缩短两个透镜之间距离, 从而使品质更加优良的离子束能够更好地聚焦。

## 5 总结

针对场发射离子源以及等离子体离子源的优缺点, 本文建议了利用电子束离子源制备聚焦离子束系统。根据模拟计算的结果, 该系统能够提供亚微米量级的离子束。该离子源虽然亮度无法与场发射型离子源相比, 但比其他的等离子体离子源高, 而且具有工作寿命长和离子束种类多等优点, 仍然具有一定的潜力应用于 FIB 系统。目前, 初步的实验表明, 20 kV 和 1.3 nA 的  $\text{Ar}^+$  离子束具有明显的聚焦作用。如果透镜的聚焦力足够大, 将得到亚微

米量级的离子束。但是由于实验条件限制, 透镜的电压加不到 15 kV, 因此正在改进结构, 准备进一步的实验。

## 参考文献 (References):

- [1] Guharay S K, Orloff J, Wada M. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2005, **33**: 1911.
- [2] Tondare V N. *J Vac Sci Technol*, 2005, **A23**(6): 1498.
- [3] Hong-Shi Kuo, Ing-Shouh Hwang. *Appl Phys Letters*, 2008, **92**: 063106.
- [4] Freinkman B G, Eletsii A V, Zaitsev S I. *Microelectron Eng*, 2004, **73-74**: 139.
- [5] Giharay S K, Douglass S, Orloff J. *Appl Surf Sci*, 2004, **231-232**: 926.
- [6] Barth J, Gruyter C B, Koets E, *et al.* *Microelectron Eng*, 1985, **3**: 147.
- [7] Prewett P D, Kellogg E M. *Nucl Instr and Meth*, 1985, **B6** (1/2): 135.

# Ion Sources for Focus Ion Beam System<sup>\*</sup>

SHANG Yong<sup>1, 2, 1)</sup>, ZHAO Huan-yu<sup>1</sup>

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** There are two kinds of ion sources, Liquid-Metal Ion Source and Gas Field Ion Source, used to provide ion beams for the Focus Ion Beam system. The working mechanism of the two kinds of sources is presented and their advantages and disadvantages are summarized. With the rapid development in the nano technology, the requirements are hardly met with these two kinds of ion sources. Therefore, a new kind of ion source, electron beam ion source, is developed for the Focus Ion Beam system. The basic principle of the electron beam ion source is introduced and the design parameters, the result of the simulation (20 kV  $\text{Ar}^+$ , extracted emittance is  $5.8 \times 10^{-5} \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ , radius of the ion beam about 1  $\mu\text{m}$ .) and the primary experimental results are presented.

**Key words:** focus ion beam system; liquid-metal ion source; gas field ion source; electron beam ion source

\* Received date: 23 Sep. 2010; Revised date: 5 Jan. 2011

\* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(60706006, 10225523)

1) E-mail: shangyong@impcas.ac.cn