

10cm×30cm 矩形射频离子束源的研制

苏志伟 陈庆川 韩大凯

(核工业西南物理研究院 成都 610041)

摘要 本文介绍了射频(Radio frequency, RF)感应耦合等离子体(Inductive couple plasma, ICP)离子束源的设计研究。该射频离子束源可工作于Ar,在使用四栅引出系统时,可获得100—1000 eV的离子束。当射频功率为900 W,在Ar为工作气体时,束流可达到600 mA。在束流为120 mA时,距源26 cm处,在主轴方向27 cm的范围内不均匀性小于±6%。该离子束源可作为大面积离子束刻蚀、离子束抛光等的离子束源。

关键词 射频离子束源,电感耦合等离子体,离子束刻蚀,离子束抛光

中图分类号 O461.1

随着高新技术领域中大工程项目如LAMOST天文望远镜工程、同步辐射工程、激光核聚变工程的陆续开展,高精度光谱分析仪器的应用领域和范围越来越广泛,对高衍射效率、大刻划面积全息离子刻蚀光栅的需求量也在逐步加大^[1]。因而,急需用于离子束刻蚀的大面积离子源。而大多数的离子束源都是圆桶型的^[2-6],圆桶型的离子束源在做成大面积离子束源时,引出栅极的加工存在很大的困难,另外若结合靶台扫描系统,周围则存在很大部分的无效束流区。矩形离子束源结合靶台扫描系统,克服了圆桶形离子束源对大面积栅极加工难的缺点,提高了有效束流的面积,满足了刻蚀大刻划面积光栅对大面积离子束源的需求。

传统的离子束源采用热灯丝放电产生等离子体。由于灯丝的污染,很难产生纯净的等离子体,而用于光学加工的离子束源又必须要求在纯净无污染的等离子体中引出纯净的离子束。射频感应耦合等离子体(Inductive couple plasma, ICP)离子束源采用无灯丝射频感应耦合方式产生等离子体,不存在灯丝污染,易产生高密度纯净的等离子体,克服了灯丝放电污染的问题,十分适合于光学加工要求^[7-10]。另外,射频ICP离子束源还具有结构简单、使用寿命长、可扩展性好以及性价比高等优点,深受人们的青睐^[11,12]。本文主要介绍引出束流面积为100mm×300mm的矩形射频ICP离子束源的设计和性能分析。

示,采用四栅、无约束磁场设计。主要由放电室、射频天线、引出栅、射频电源和进气系统组成。放电室是由矩形不锈钢内套和石英耦合窗组成,射频线圈绕在石英耦合窗的上部,通过匹配网络连接到射频电源,工作时射频线圈通水冷却。工作气体从穿过石英耦合窗的进气管导入,进气管下端焊有挡板,以保证放电室的进气均匀,同时通过质量流量计可以调节工作气压。当射频功率通过匹配网络加到天线时,天线中就有射频电流流过,于是产生感应磁场。根据法拉第电磁感应定律,磁场又在放电室中感应产生感应电场,放电室中的电子被此感应电场加速,这些被加速的电子不断地与中性气体分子碰撞离化产生高密度的等离子体。同时天线的能量被耦合到等离子体中以维持等离子体放电。

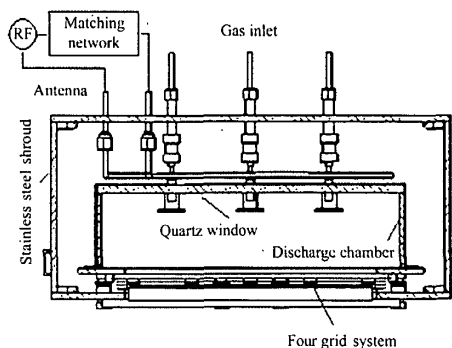


图1 射频ICP离子束源的基本结构
Fig.1 Schematic of the RF ICP ion beam source

1 射频ICP离子束源的基本结构

矩形射频ICP离子束源的基本结构如图1所

等离子体产生区的等离子体能量为^[13]

国家自然科学基金(10376010)资助

第一作者:苏志伟,男,1981年出生,2006年6月于核工业西南物理研究院获硕士学位,主要从事射频离子源及离子束刻蚀工艺研究工作

收稿日期:2006-04-19,修回日期:2006-06-02

$$E_p = n_e k T_e V \tag{1}$$

其中， $n_e=n_i$ 为电子密度， T_e 为电子温度， V 为等离子体的体积。考虑到引出面上的等离子体是由等离子体中心扩散而来的，这里的扩散速度要比引出速度低得多。产生等离子体的输入功率为

$$W = E_p / \tau_e \tag{2}$$

其中， τ_e 为能量的约束时间。 W 的数值可以作为射频电源的参数要求。

当气体放电产生等离子体后，离子束由引出系统引出。本文对引出系统采用四栅结构设计，这四栅分别为屏栅、加速栅、聚焦栅、减速栅。与二栅和三栅结构设计相比，采用这种四栅结构设计具有以下优点：当导流系数与 Γ/f ($\Gamma=V_{\text{加速}}/V_{\text{屏}}$, $f=d_2/d_1$, d_1 和 d_2 分别为加速和减速间隙) 匹配好时，可获得比较小的散角 ($\leq 0.3^\circ$)；在最佳导流系数处，散角随导流系数的关系不灵敏；耐压性能好；电极功率负荷小^[14]。满足了刻蚀不同材料对不同束流性质的要求。进入屏栅附近的等离子体鞘层的离子流密度为^[15]：

$$J = n_i (k T_e / M_i)^{1/2} = n_i V_i \tag{3}$$

式中， J 为离子流密度， n_i 为离子密度， V_i 为玻姆速度， T_e 为电子温度， k 为玻尔兹曼常数， M_i 为离子质量。从式中可以看出，当放电室内离子密度越高，则离子束源可引出的束流越大，从而达到使离子束源不仅具有大的束流密度均匀区，而且具有引出高的束流密度的能力。

为了提高导流系数，设计中引出栅系统采用多孔引出形式，屏栅和加速栅连接正电位，聚焦栅连接负电位，减速栅接地电位，如图 2 所示。

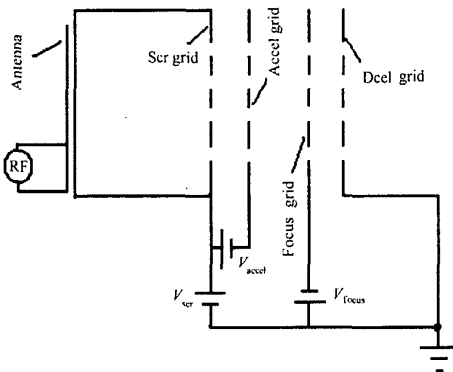


图 2 离子源引出系统电源连接图

V_{scr} ：屏栅电压， V_{accel} ：加速电压， V_{dcel} ：减速电压

Fig.2 Electric schematic of the ion beam source extraction system. V_{scr} : screen grid voltage, V_{accel} : accelerating grid voltage, V_{focus} : focus grid voltage

栅极由铝加工而成，每个栅极都有四个对中用的小孔，安装栅极时对中杆穿过对中小孔，校准栅极的对中。四栅极安装成一体，方便维护和拆卸。对于作为刻蚀非金属用的离子源，为了保证离子流的中性化，在出射离子束的地方放一个提供电子流的中和器，以中和带电的离子束。另外，该离子束源采用内置式设计，工作时离子束源安装在真空室内部，可随意调节离子源的角度，安装拆卸及维护十分方便。

2 实验及分析

本文设计的矩形射频 ICP 离子束源，加水冷的不锈钢外壳大小为 507mm×296mm×205mm，放电室的大小为 300mm×100mm×105mm，石英耦合窗上绕有三圈射频天线，四栅极上在 300mm×100mm 的范围内钻一系列孔。实验是在原有的圆筒型真空室上进行的，离子束源安装在真空室的一侧。真空室的抽气由分子泵加一台前级机械泵来完成，当真空系统本底真空度为 5×10^{-4} Pa 时，离子源通入 Ar 至工作真空度为 1.2×10^{-2} Pa。

射频 ICP 离子束源的放电与射频功率有密切的关系。射频功率的增加将引起气体的放电效率的增加，从而提高放电室中气体的离化率，增加离子源的束流。图 3 为实验中测得的一定束压下束流随功率变化的曲线。从图中可以看出束流随射频功率的增加基本上是线性的，增加幅度大约为 0.7 mA/W。工作气体流量对离子源的放电也同样具有很重要的影响，因为气流量的增加将改变工作气压的大小。图 4 为束压为 1000 V 时，在一定束流下射频功率随气体流量的变化曲线，可以看出随着气流量的增加，射频功率逐渐减小，即在一定的射频功率下气流的增加将使离子源的引出束流随之增加。

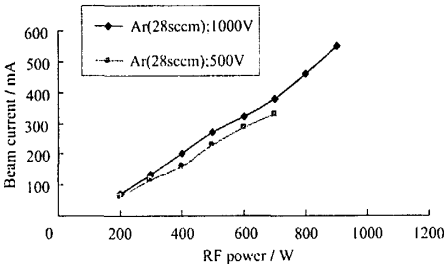


图 3 束流随射频功率的变化曲线

Fig.3 Beam current as a function of RF power

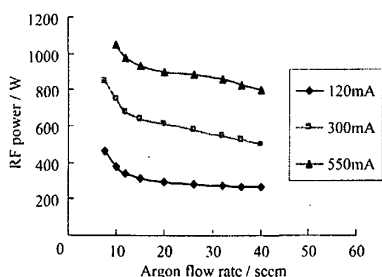


图 4 束压为 1000 V 时功率随气流量的变化曲线

Fig.4 RF power as a function of argon flow rate of ion source operating at 1000 V and different beam currents

图 5 示出了在工作气体为 Ar 时束流和束电压的关系。从图中可以看出在较低束电压下引出的束流较小,其原因在于:当放电室内等离子体密度增加时,屏栅附近的等离子体鞘层的发射面将随之前移,发射面逐渐由凹变凸,从而严重破坏离子束的聚焦,使多数引出离子直接轰击加速栅而未能利用。最小束流大约为 60 mA,随着束电压的增加,在本实验所加的确定射频功率下最高可达 600 mA。

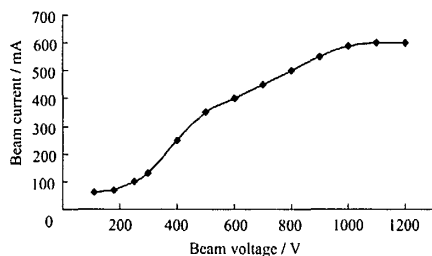


图 5 束流随束电压的变化曲线

Fig.5 Beam current as a function of beam voltage

离子束的均匀性是离子源性能非常重要的一个参数。图 6 中的曲线为该离子束源在 850 V 束电压下采用四栅引出时测得的离子束流密度分布曲线。图 6 中(a)、(b)分别为沿主轴方向(即长方向)和次轴方向(即宽方向)的束流密度分布曲线。束流密度的测量用阵列式法拉第筒,测定时法拉第筒距离子束源的距离为 26 cm。图中给出了束流分别为 120 mA、300 mA 和 500 mA 时的束流密度分布曲线。测量结果表明,在距离离子束源 26 cm 处,束流为 120 mA 时,Ar 离子束在主轴方向上不均匀性小于±6%的区域大于 27 cm;束流为 500 mA 时,Ar 离子束在主轴方向上不均匀性小于±9%的区域大于 26 cm。用于离子束刻蚀、抛光时,由于扫描系统是沿次轴方向扫描的,所以沿主轴方向离子束的均匀性是决定刻蚀、抛光结果均匀性的重要因素,而沿次轴方向离子束的均匀性对刻蚀、抛光的均匀性影响不大。

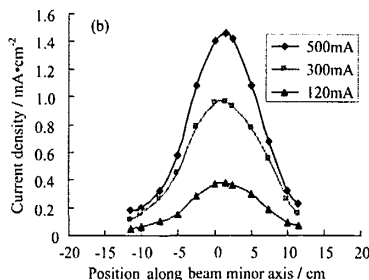
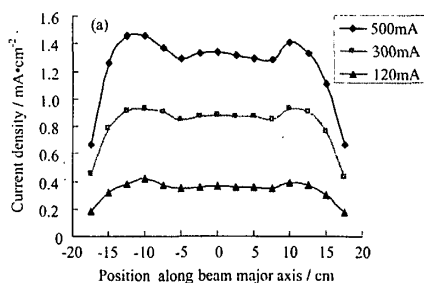


图 6 离子束源束流密度分布曲线

Fig.6 Beam currents density profiles along the axes of the ion beam source

3 结论

本文对 10cm×30cm 矩形射频离子束源的结构、离子流的均匀性进行了研究,并对该离子束源进行了实验分析,结果表明该源具有较好的性能。在低能(150—1000 eV)范围内能引出 60—600 mA 的束流;在束流为 120 mA 时,主轴方向上束流密度不均匀性小于±6%的区域大于 27 cm;引出的离子束纯净无污染。

该离子束源可满足大型离子刻蚀机的要求,用作离子束抛光和刻蚀,以解决在 863 工程中刻划大口径光栅的燃眉之急,也使在国内制造各种大面积衍射元件成为现实。同时,该离子源的成功研制对提高我们在微米和纳米量级的微电子学、集成光学、微机械系统的超微细加工中的技术水平有重要的作用。

参考文献

- 1 赵博, 齐向东. 光学精密工程, 2001, 9(2): 109—114
ZHAO Bo, QI Xiangdong. Opt Precis Eng, 2001, 9(2): 109—114
- 2 Reader P D, Kaufman H R. J Vac Sci Technol, 1975, 12(6): 1344—1347
- 3 Kaufman H R, Robinson R S. AIAA Journal, 1982, 20(6): 745—760
- 4 许沐华, 任兆杏, 沈克明, 等. 真空科学与技术, 2002,

- 22(4): 310—312
XU Muhua, REN Zhaoxing, SHEN Keming, *et al.* Vac Sci Tech, 2002, 22(4): 310—312
- 5 Kuang Y, Feng Y C, Lou Z P. Rev Sci Instrum 1994, 65(4): 1374—1376
- 6 黄光周, 张书生, 于继荣, 等. 真空与低温, 1998, 4(1): 52—56
HUANG Guangzhou, ZHANG Shusheng, YU Jirong, *et al.* Vac Cryo, 1998, 4(1): 52—56
- 7 辛企明. 近代光学制造技术. 北京: 国防工业出版社, 2001. 46—59
XIN Qiming. Modern optics manufacture technique. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. 46—59
- 8 徐向东. 全息离子束刻蚀真空紫外及软 X 射线衍射光栅研究. 中国科学技术大学博士论文, 2001
XU Xiangdong. Fabrication of VUV and soft X-ray diffraction gratings by holographic ion beam etching technique. PhD thesis, USTC, 2001
- 9 Bovard B G, Zhao T J, Macleod H A, *et al.* Appl Opt, 1992, 31: 2366—2369
- 10 Patrick R, Schoenborn P, Toda H. J Vac Sci Technol, 1993, A11(4): 1296—1300
- 11 Lee Y J, Kim K N, Song B K. Thin Solid Films. 2003, 275—279
- 12 Keller J H. Plasma Phys Control Fusion, 1997, 39: A437—A443
- 13 CHEN F F. 等离子体物理学导论. 林光海译. 北京: 人民教育出版社, 1980. 1—88
CHEN F F. Introduction to plasma physics and controlled fusion, Vol 1, Plasma Physics, 2nd edition, Translated by LIN Guanghai. Beijing: People's Education Press, 1980. 1—88
- 14 张华顺, 万春侯, 王耿介, 等. 离子源和大功率中性束源. 北京: 原子能出版社, 1987. 59—129
ZHANG Huashun, WAN Chunhou, WANG Gengjie, *et al.* Ion source and large power neutral beam source. Beijing: Atomic Energy Press, 1987. 59—129
- 15 葛波维奇. 等离子体离子源物理与技术. 万春侯译. 北京: 科学出版社, 1976. 211—295
Gapovich. Plasma ion source physics and technology. Translated by WAN Chunhou. Beijing: Science Press, 1976. 211—295

Design of 10cm×30cm rectangular radio frequency ion beam source

SU Zhiwei CHEN Qingchuan HAN Dakai

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041)

Abstract A radio frequency ion beam source with a 10cm×30cm rectangular cross-section beam is developed and tested. This source is designed to provide large cover area for ion beam etching and polishing. With a four grid extraction system, this source can operate in argon at beam energies from 100 eV to 1000 eV. When the RF power is about 900 W, beam currents can reach to 600 mA in argon. The beam current uniformity is better than $\pm 6\%$ along the major axis over 27 cm length at a distance 26 cm from the ion beam source.

Key words RF ion beam source, Inductive couple plasma (ICP), Ion beam etching, Ion beam polishing

CLC O461.1