

微米束离子聚焦系统的研究

方 天 止

(中国科学院科学仪器厂)

〔摘要〕 本文介绍了离子探针用微米束离子聚焦系统的设计方法, 讨论了冷阴极双等离子体离子源、对称式三膜片静电双聚光镜系统、非对称式静电物镜、无象差双静电偏转式离子束扫描系统及12.6°磁分析器。本装置在加速电压为20千伏时, 离子源亮度优于 4.2×10^{10} 毫安/米²·立体角, 阴极寿命超过1000小时, 很易获得直径2~200微米的离子束。

一、引 言

微米离子束装置近年来发展很快, 应用范围日趋广泛, 例如离子束微细加工、离子束掺杂和离子束曝光、离子探针、核物理的重离子分析、生物组织的扫描诊断等。这种装置一般由以下几个部份组成: 离子源、聚焦透镜系统、离子纯化器、扫描偏转系统、消象散器等。

二、离 子 源

1. 要求

离子源是离子束装置中极其重要的部件。离子探针用的离子源需满足下列要求: (1) 为了能进行微区和大面积的高灵敏度分析, 所发射的离子束必须是小直径大密度, 即亮度大; (2) 能产生活性气体离子和惰性气体离子, 为防止绝缘物试样的表面电荷积累, 还要能发射负离子; (3) 为减小聚焦系统的物镜色差, 从而获得微小束斑, 发射的离子束能量分散应尽可能的小; (4) 离子流稳定; (5) 离子纯度高; (6) 寿命长, 拆装维护方便。根据上述要求, 离子探针宜采用冷阴极双等离子体离子源。这种源产生的氢离子流可达500毫安^[1,2]。至于亮度, 因束流和其它条件不同而异, 归一化亮度可达到 10^{11} 毫安/米²·立体角。与其它离子源比较, 双等源气体离化率较高, 束能量分散较小, 寿命超过1000小时。

2. 原理与结构

冷阴极双等离子体离子源的结构如图1所示。它由冷阴极、中间电极、阳极、吸极、压缩等离子体的磁场线包和气体输入装置等组成。中间极和阳极构成磁路, 在中间极和阳极间隙的近轴心处, 形成几百高斯的强磁场。放电后, 中间极电位处于阴极和阳极之间。中间极

1984年4月23日收

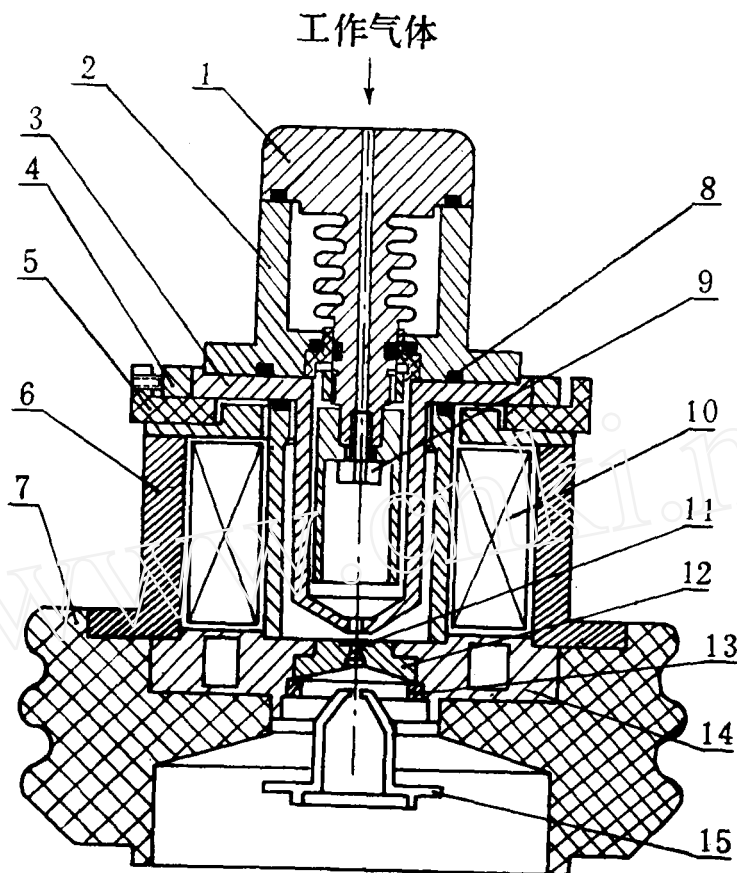


图1 双等离子体离子源

- | | | | |
|---------|---------|---------|---------|
| 1. 冷却器 | 2. 阴极座 | 8. 中间极 | 4. 调整套 |
| 5. 调整座 | 6. 支承座 | 7. 绝缘体 | 8. 密封圈 |
| 9. 螺钉 | 10. 线包 | 11. 阳极片 | 12. 膨胀杯 |
| 13. 压紧帽 | 14. 冷却套 | 15. 吸极 | |

有自给栅偏压作用,以保证电弧放电的稳定。工作时,气体通过针阀使放电室内压强保持在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 托。当阴极和阳极间加数百伏电压,由阴极发射的电子先在阴极和中间极间激励放电,生成等离子体,它受中间极形成的电场作用而收缩,使等离子体密度增大。在中间极和阳极间,由于不均匀的强磁场作用,等离子体中的电子又使气体强烈电离,在近阳极处产生非常集中、浓度很高的等离子体,其密度高达 $5 \sim 7 \times 10^{14}$ 离子/厘米³。这些等离子体通过阳极中心小孔向外喷射,在吸出电压作用下形成离子束。离子在出口处,由于空间电荷效应使离子束发散,为此要求采用高的吸出电压,但因出口处离子密度大,吸出电压太高会引起击穿,为缓和此矛盾,可在出口处加一膨胀杯以降低离子密度。吸出电压一般可选用 $10 \sim 20$ 千伏。

控制双等离子体离子源特性的参量有:离子源内压强、磁场强度、弧流和吸出电压。仔细调节工作压强和磁场可获得最大流强。在一定条件下,流强密度与弧流成正比,而后趋于饱和。

3. 离子源工作参数选择

(1) 电极材料选择 1) 阴极,主要考虑寿命,用镍或不锈钢; 2) 中间极和阳极,

因二者兼作磁路，需采用纯铁；3）阳极孔片，这是等离子体集中之处，需用高熔点合金，采用钨或钨；4）吸极，选用不锈钢。

(2) 电极几何尺寸的选择 几何尺寸直接影响离子源的性能，各尺寸又相互影响。选定阴极内径15毫米，长32毫米，中间极孔径3毫米。阳极孔径0.4毫米。中间极与阳极距离2毫米。吸极孔径4毫米（布局见图1）。两年实验结果表明上述选择是正确的。

(3) 电源系统参数选择 离子源供电系统如图2所示。1）高压电源，为使离子源能输出稳定的不同能量的正离子和负离子，要求高压电源参数如下：高压输出，4档，±8千伏、±12千伏、±16千伏、±20千伏。电流100微安。稳定度 2×10^{-4} /30分钟。高压电源还

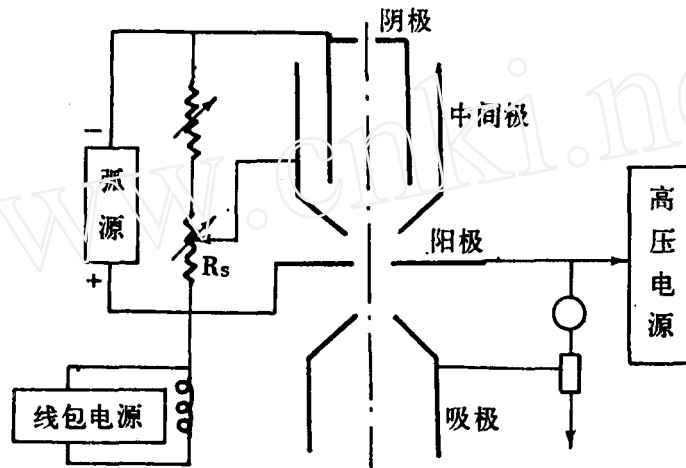


图2 离子源供电图

需给聚焦系统的各组透镜供电。各组分压器能单独连续可调。2）磁场电源，它处于20千伏高压下，要求输出电流为52~100毫安，连续可调（电压为25~38伏）。3）电弧电源，也要求处于20千伏高压下，空载电压大于1千伏，最大负荷电流100毫安，最大输出功率为50瓦。稳定度为 $1 \sim 5 \times 10^{-4}$ /30分钟。

三、聚 焦 系 统^[3]

1. 系统设计——倍率分配

本聚焦系统应满足以下三个要求：小束斑、大流强和束斑连续可调。为此除要求如前所述具有高亮度，小交叉斑点的离子源外，还需用透镜系统对离子束进行聚焦调节。此类聚焦系统可用单聚光镜和物镜组合或双聚光镜和物镜组合。本装置采第二种组合方式其布局和有关参量如图3所示。

要获得最小束斑，除了按照离子源交叉斑计算所需缩小倍数外，还需进一步考虑该系统的象差，而且主要是物镜的象差。离子束斑直径 d 由高斯象直径 d_G ，球差所产生的弥散园直径 d_s 和色差所产生的弥散园直径 d_c 所组成，

$$d = (d_G^2 + d_s^2 + d_c^2)^{1/2} \tag{1}$$

其中： $d_s = \frac{1}{2} C_s \alpha^3$ (2)

设计了如图4所示的非对称透镜。该透镜工作距离不小于25.4毫米，外径不大于27毫米。用实验方法测出了焦距*f*、*C_s*与透镜电压比*V₁/V₀*的关系如图5所示。

第一，二聚光镜的几何参数见表1。图6是第二聚光镜结构图。

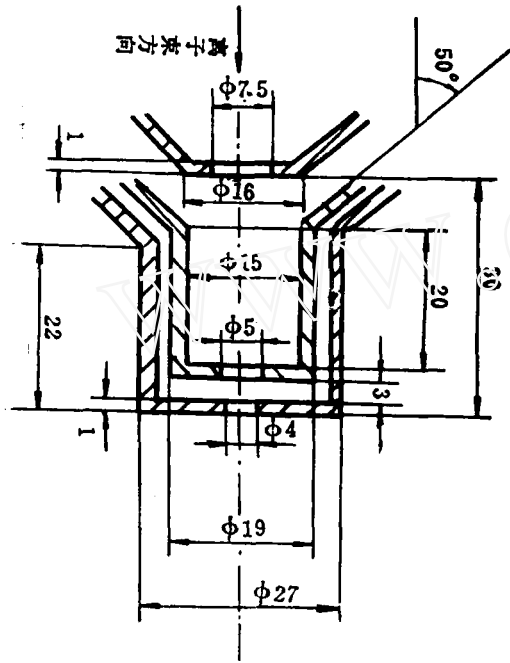


图4 非对称透镜(物镜)

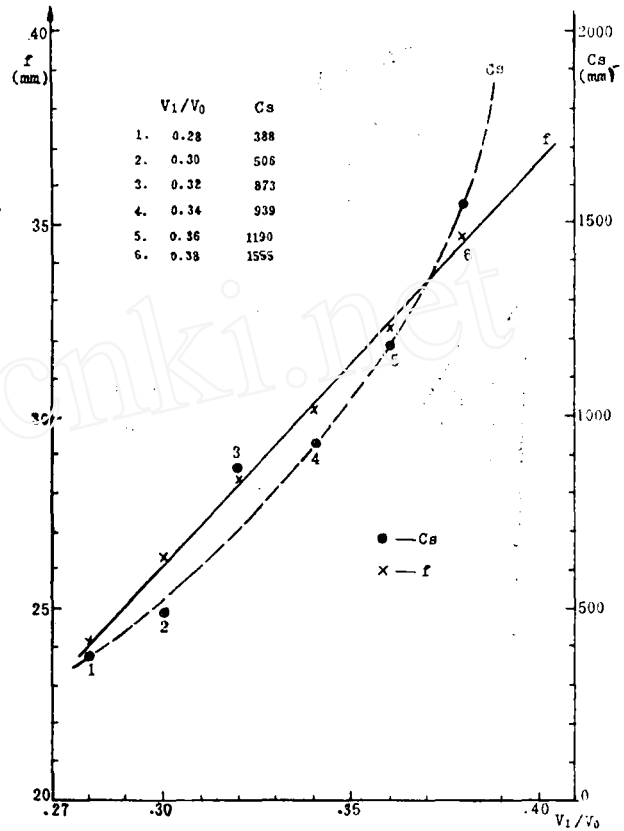


图5 *f*, *C_s*与*V₀/V*关系

3. 扫描偏转器

离子探针要求聚焦束在试样表面上进行自动扫描，扫描面积应为500×500平方微米。现设计扫描步数为2^{*n*}，*n* = 1, 2, 3...9。*n*可根据束斑直径和所需扫描的面积进行选定。扫描部分选用了双偏转无畸变系统^[8,9]，为了消除慧差，要求离子束都必须通过物镜主面中心，应与消象散器进行统一考虑设计，其布局图如图7所示

扫描偏转器与物镜和试样之间距离关系如下式：

$$\frac{l_i (l_i^2 - l_o^2)}{l_o^2} = \frac{2}{3} l_i' \quad (7)$$

根据要求，*l_i'*选为40毫米，*l_i*为45毫米，则*l_o*应为35.8毫米。偏转角 $\alpha = t/l_i'$ 。
 $\alpha_1 = \alpha l_i/l_o$ ， $\alpha_2 = \alpha (l_o + l_i) / l_o$ 。偏转距离*t*要求为250微米，则 $\alpha = 6.25 \times 10^{-3}$ 弧度， $\alpha_1 = 7.85 \times 10^{-3}$ 弧度 $\alpha_2 = 1.41 \times 10^{-2}$ 弧度。确定偏转电压时还需考虑二次离子的加速电压导致聚焦束的偏转 Δ 。实测结果为，二次离子加速电压为3千伏，聚焦束加速电为8千伏和20千伏， Δ 分别为1.2毫米和0.4毫米。因此总偏转量 Δ_0 为1.45毫米。为保证偏转区位于均匀电场区，扫描偏转板的宽度*h₁*，*h₂*和长度*L₁*，*L₂*分别定为15，25和30，30毫米。偏转电压由

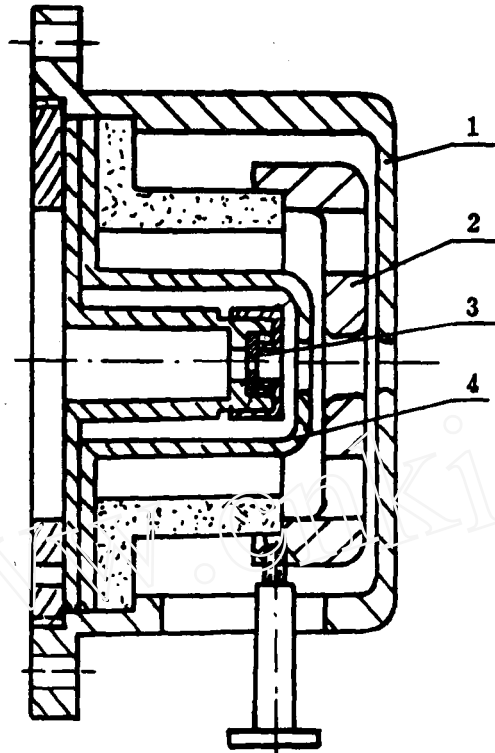


图6 第二聚光镜结构

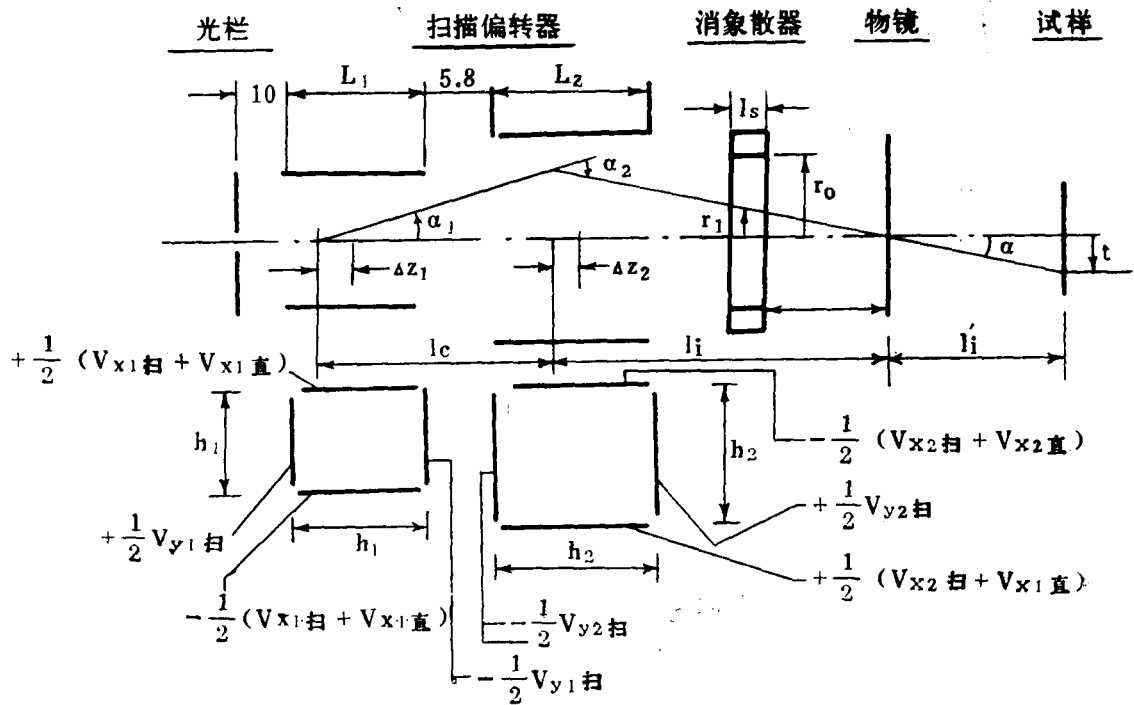


图7 扫描偏转器

下式决定:

$$V = \frac{2\Delta_0 V_a h}{L\left(\frac{L}{2} + l\right)} \quad (8)$$

式中 V_a 为离子束加速电压, l 为扫描器出口端与成象处距离。将有关参量代入上式, 则 $V_{x1}(\text{直}) = 200$ 伏; $V_{x2}(\text{直}) = 410$ 伏; $V_{y1}(\text{直})$ 和 $V_{y2}(\text{直})$ 都为零; $V_{x1}(\text{扫}) = V_{y1}(\text{扫}) = 100$ 伏; $V_{x2}(\text{扫}) = V_{y2}(\text{扫}) = 210$ 伏。

4. 消象散器

因聚焦系统在设计 and 加工中不可避免有误差, 或光路上有电荷积累, 这些都会引起象散 ΔN , 为此本系统采用了八极静电消象散器, 其结构如图8所示, φ_1 和 φ_2 是加在电极上的电压, 且 $\varphi_1 = -\varphi_2$ 。当消象散器所形成的象散等于系统象散, 则得到

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \frac{\Delta N \pi v_0 r_0^2 \alpha}{4\sqrt{2} r_e^2 l z}$$

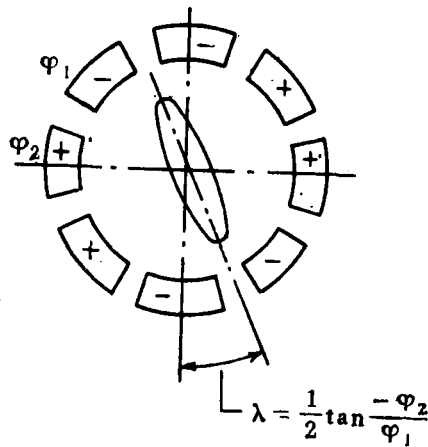


图8 消象散器

ΔN 可假设为束斑的0.5倍, 则 $\Delta N = 0.1$ 毫米 $V_a = 20$ 千伏, $r_0 = 6$ 毫米, $\alpha = 5 \times 10^{-2}$ 弧度, $r_e = 2.2$ 毫米, 再考虑长短轴的改变, φ_1 和 φ_2 分别取为 ± 70 伏。

5. 纯化器

在离子源中产生的离子有工作气体的分子离子和原子离子, 另外还有残余气体的离子。多种类型的离子轰击样品, 使分析工作带来了困难, 为此要求对这些离子进行纯化, 一般采用磁分析器或交叉场分析器。本系统中采用了磁分析器, 其优点是分辨缝与其下方的聚光镜的焦点一致, 使结构紧凑, 聚焦调整容易。本系统采用的磁分析器偏转角 $\phi_m < 15^\circ$, 其质量分散和能量分散分别为

$$A_r r = \frac{1}{2} \phi_m r f \quad (9)$$

$$A_s \delta = \frac{1}{2} \phi_m \delta_f \quad (10)$$

式中 f 为透镜焦距。根据要求 $r = \frac{\Delta M}{M} = \frac{1}{50}$, $f = 9.1$ 毫米, 可得到 $A_s r = 2 \times 10^{-2}$ 毫米, $A_s \delta = 1 \times 10^{-3}$ 毫米, $\phi_m = 12.6^\circ$ 。磁场偏转半径为 500 毫米。

四、实验结果

- 1 离子源亮度 B : 由实测束斑和束流得到亮度 $B = 4.2 \times 10^{10}$ 毫安/米² · 立体角。
2. 离子源交叉斑点直径 d_s : 在吸极下的离子束斑点 $d_s = 100$ 微米 (最佳值 $d_s = 20$ 微米)。
3. 聚焦束直径 d : 使离子束在直径为 10 微米的钨丝 (位于试样表面位置) 上扫描, 用示波器测量法拉第筒上接收到的离子流的变化。图 9 (a) 为束径计标图, (b) 为实测结果。 ϕ_w 为钨丝直径, ϕ_h 为峰高 50% 处的峰宽, ϕ_1 为峰高 10% 至 90% 间的宽度。束斑直径 d 由下式决定。

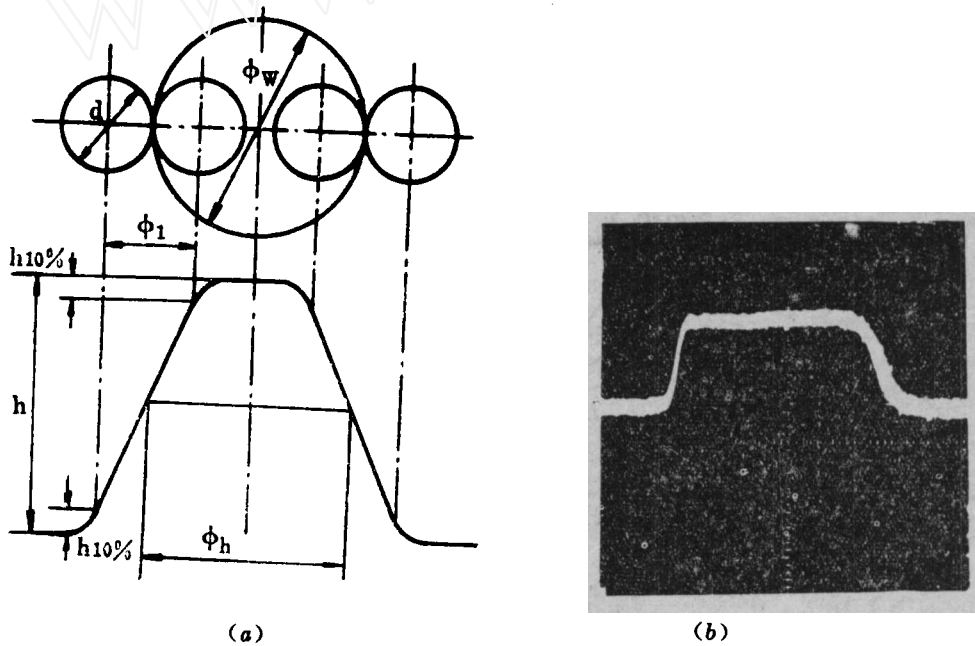


图 9 聚焦束直径的测量

$$d = \phi_w \cdot \phi_1 / \phi_h \quad (11)$$

实测离子束直径小于 2 微米, 其最大可到 200 微米。

4. 束径 d 与束流的关系: 图 10 所示为束径和束流的关系曲线, 其中虚线为计算值, 实线为实测结果, 束斑为 2 微米时流强可达到 8×10^{-10} 安培。

5. 聚焦束的稳定性: 束流在 15 分钟变化大约为 $\pm 1\%$, 束径和位置在 15 分钟变化为 ± 0.2 微米。

6. 空间分辨

离子束最小直径基本上决定了空间分辨本聚焦束直径小于 2 微米, 所以空间分辨优于 2 微米。图 11 所示为 Al-Ca 合金样中 Ca⁺ 的分布图, 该合金中 Ca 间距离约为 2 微米。

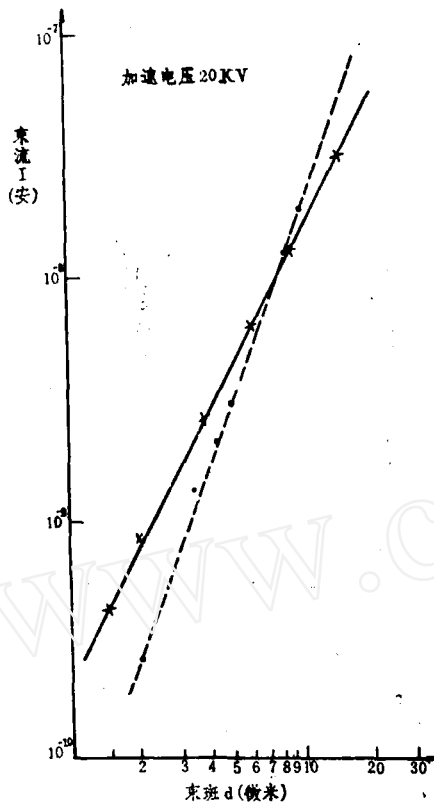


图 10



图11 Ca⁺分布图

参 考 文 献

- 〔1〕 R. C. Davis, O. B. Morgan, L. D. Stewart, W. L. Striling, Rev. Sci. Instrum., 43, 278 (1972)
- 〔2〕 K. L. Chopra, M. R. Randleet, Rev. Sci. Instrum., 38, 1148 (1967)
- 〔3〕 方天止, 分析仪器, (2), 45 (1980)
- 〔4〕 F. H. Read, J. Sci. Instrum., 2(8), 679 (1969)
- 〔5〕 K. Kanaya, H. Kawakatsu, H. Yamazaki, S. Sibata, J. Sci. Instrum., 43, 416 (1966)
- 〔6〕 Г. В. Дер-швари, И. С. Макарова, Радиотехника и электроника, 11(10), 1802 (1966)
- 〔7〕 Г. В. Дер-швари, И. С. Макарова, Радиотехника и электроника, 14(2), (1969)
- 〔8〕 金谷光一, 电气试验所汇报, 25(4), 1(1961)
- 〔9〕 金谷光一, 电气试验所汇报, 25(7), 641(1961)

A Study on the Micrometer Ion Beam Focus System

Fang Tianzhi

(Scientific Instrument Factory, Academia Sinica)

Received 23, April 1984

Abstract

In this paper, the design methods of the focus system for micrometer diameter ion beam are described. The douplasmator ion source of cold cathode, the double condenser system of the symmetrical three-aperture electrostatic lenses, unsymmetrical electrostatic objective lens, the ion beam scanning system of the double electrostatic deflection type without aberrtion, the magnetical analyzer with 12.6° are discussed. The device provides high brightness of $4.2 \times 10^{10} \text{mA/m}^2 \cdot \text{str}$ at 20Kv, the lifetime of cathode for 1,000 hours or more. The ion beams of 2-200 μm diameter are gotten easily.