

扫描质子微探针扫描系统优化与分辨率测量

刘江峰^{1,2} 岳伟生^{1,2} 万天敏^{1,2} 程 硕^{1,2} 李晓林¹ 张桂林¹ 李 燕¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 介绍了中国科学院上海应用物理研究所扫描质子微探针 (Scanning Proton Microprobe, SPM) 扫描线圈的改进与系统扫描分辨率的测试, 设计了匝数可调的空心马鞍形扫描线圈, 通过以单片机为核心的遥控系统来实现线圈匝数的调节和线圈的过载保护; 给出了改进后 SPM 的扫描图像分辨率的测量计算方法以及测量结果, 并初步研究了四膜虫和单颗粒大气气溶胶的元素分布。

关键词 扫描质子微探针, 扫描线圈, 分辨率

中图分类号 TL503

扫描质子微探针 (Scanning Proton Microprobe, SPM) 是一种常用的分析工具, 通过将聚焦的质子束在样品上扫描辐照, 检测由质子在样品上激发的特征 X 射线, 可以得到 PPM 级检测灵敏度的二维元素分布图。虽然通过样品的移动可以实现质子束在样品上的扫描, 但这种扫描方式需要用非常精确的机械机构, 而且扫描速度也远低于通过电场或磁场偏转质子束的扫描方式。电场扫描可以有较高的扫描频率, 但需要将偏转电极放在真空室内, 不利于散热, 且相距很近的两对偏转电场易于产生干扰, 同时安装和调节都有诸多不便。磁场偏转高频扫描有较大的困难, 但扫描线圈可安装在束线管道之外, 调节和维护方便。虽然偏转质子束使束流在样品上不同区域的人射角度有微小的变化, 同时也造成一定的散焦, 但在扫描范围小于 1mm×1mm 的情况下, 这些不利因素是可以接受的^[1]。本文介绍一个采用磁场偏转扫描的系统。

扫描线圈在束线上的放置区域通常有三种选择, 分别是物孔与透镜之间 (前置)、透镜内部或透镜与像平面之间 (后置)。前置方式安装方便, 且由于线圈和样品之间距离大, 易于实现大范围扫描; 但扫描使束流偏离透镜轴心, 使聚焦效果变差。采用后置方式通过透镜轴心的束流不受任何偏转, 聚焦不受影响; 该方法的缺点是透镜和靶室间狭小的空间限制了线圈的大小; 同时线圈距像平面的距离小, 可实现的扫描范围也相对较小。所以有人就采用了折中的方式, 将扫描线圈放在聚焦四极透镜内

部^[1,2], 但由于实现起来难度较大而收效甚微, 所以很少被采用。近年来上海应用物理研究所 SPM 系统主要用于大气气溶胶单颗粒及细胞等微米量级样品的研究, 对扫描分辨率的要求高, 而对扫描范围的要求较低, 所以我们设计了空心的马鞍形扫描线圈, 并采用了后置方式。该线圈电感只有 0.8 mH, 扫描范围 760 μm×900 μm 时扫描频率可达 1000 Hz。

1 上海应用物理研究所扫描质子微探针系统

上海应用物理研究所扫描质子微探针系统建立在由美国国家静电公司生产的 4UH 型低能粒子加速器上。微探针系统的四极电磁铁聚焦透镜的光学平面距物孔 8 m, 距试样表面约 0.4 m, 物孔在 10—300 μm 范围内分级可调。靶室装有一 Au(Si) 面垒探测器用于探测散射粒子; 另有一 Si(Li) 探测器用于 X 射线探测。系统原有的扫描线圈采用前置方式, 线圈匝数可以通过手工接线进行调节, 扫描范围可达 3mm×3mm。由于该 SPM 的数据获取系统直接从扫描信号发生器的 DAC 级电路前获取数字的扫描位置信号, 而该带有铁芯的线圈电感较大 (40 mH), 在三角波电压信号驱动下, 扫描频率高于 10 Hz 时, 线圈中的电流与数据获取系统获得的扫描位置信号间有附加的相位差, 使获得的图像出现重影甚至是多个图像; 而且在三角波电流信号驱动下扫描时易于出现振荡, 加衰减电阻又使现有的扫描输出功放 (由 MURR1531 改装) 难以承受负载; 另外,

中国科学院知识创新工程项目 (KJCX2-SW-N01)、国家自然科学基金重大项目 (10490182)、国家自然科学基金 (NNSFC、10375084) 资助
第一作者: 刘江峰, 男, 1970 年出生, 1993 年毕业于华中师范大学物理系, 信阳师范学院讲师, 现为在职博士研究生, 从事核技术应用研究
通讯作者: 李 燕
收稿日期: 2006-05-17, 修回日期: 2006-07-11

随着扫描范围的增大, 探针的空间分辨率降低。所以, 为满足研究需求, 我们对扫描线圈进行了本文所述的改进。

2 扫描线圈系统设计

2.1 扫描线圈设计

扫描系统是 SPM 的主要部件, 要求扫描系统有偏转像差小、线性好、偏转灵敏度高、扫描范围大等技术特性^[3,4]。匝数较多的线圈有利于进行大范围的扫描, 但在线圈匝数较多的情况下进行小范围扫描时需要相对小的扫描电流, 因该系统的扫描输出功率增益不可调节, 此时只能通过设定较小的扫描范围来减小功耗的输入而实现小范围扫描。设定的扫描范围小就使得所得图像的像素减少, 图像数字分辨率降低; 另一方面, 小的扫描电流受噪声和干扰的影响大, 降低了扫描的精度; 同时匝数多的线圈电感大, 可支持的扫描频率低。所以一个匝数可调的线圈是必需的。因靶室和透镜间只有约 15 cm 长可放线圈的区域, 用手工接线改变线圈的匝数很不方便, 又容易影响其他设备。鉴于上述原因, 我们设计了匝数可变的马鞍形线圈, 采用遥控方式实现线圈匝数的选择。为避免以前出现的前级电路输出异常烧坏线圈的情况, 还设计了线圈温度检测、报警及自动保护电路。重新设计的扫描线圈为两侧对称的空心马鞍形(图 1), 线圈中间部分直线长度为 9 cm, 两端圆弧的半径为 2 cm。每对线圈有 6 个插头, 可实现 40 匝、80 匝和 120 匝三种选择。垂直和水平两组扫描线圈安装在同一段束线管道处, 线圈几何中心距靶平面 20.5 cm, 水平扫描线圈包裹在垂直扫描线圈之外。图 2 是用 OPEAR-3D^[5]模拟计算的一对 120 匝线圈在 2A 的电流驱动下的磁场分布。图中方框部分的面积和曲线与水平轴所围成部分的面积相等, 用曲线的峰值作为线圈磁场的平均值, 用方框在水平轴上的宽度 $2l$ 作为线圈的等效长度, 扫描范围可利用如下公式估算^[6]:

$$\Delta y = 2 \times \frac{eB_x(2l)L}{mv_z} = 789\mu\text{m} \quad (1)$$

式中, Δy 为束流在垂直方向偏转幅度; $e=1.602 \times 10^{-19}\text{C}$ 为质子所带电荷; $B_x=43 \times 10^{-4}\text{T}$ 为 120 匝线圈在 2A 电流驱动下在线圈中心所产生的磁场强度; $2l=0.112\text{m}$ 为线圈的等效长度; $L=0.205\text{m}$ 为线圈中心距靶平面的距离; $m=1.67 \times 10^{-27}\text{kg}$ 为质子的质量; v_z 为在不考虑相对论效应情况下的 3 MeV 能量的质子的速度。由于计算时未考虑束线管道材料的磁导率等因素的影响, 实际的扫描范围比

估算值略小 (X 方向扫描范围为 $760\mu\text{m}$; 安装时 Y 线圈被包裹在 X 线圈之内, Y 线圈直线部分比 X 线圈更靠近束线管道, 圆弧部分半径小于 2 cm, 所以 Y 方向扫描范围较 X 方向大)。该线圈系统安装后的测试结果表明, 系统扫描频率和扫描分辨率有明显提高, 工作稳定可靠, 使用方便。

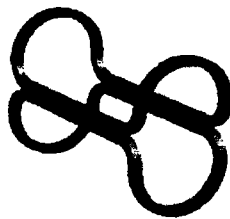


图 1 马鞍形扫描线圈
Fig.1 Picture of the saddle-backed coil

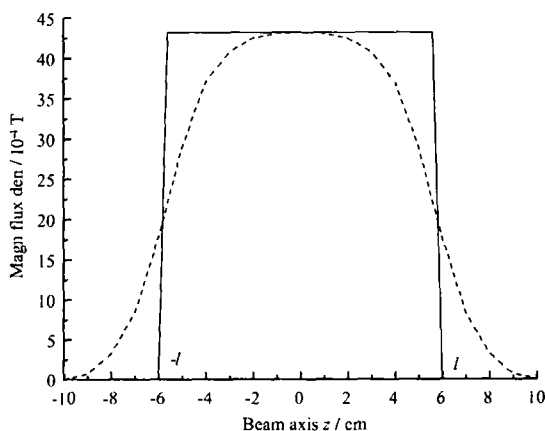


图 2 扫描磁场分布仿真曲线
Fig.2 Simulation of the magnetic-field distribution

2.2 扫描线圈控制系统

线圈控制系统分为线圈控制器和遥控器。控制器功能框图如图 3 所示。线圈控制器以 PHILIPS 公司的 LPC922 单片机为主控元件^[7], 通过对继电器的控制完成对线圈匝数的切换。PTR2000 无线通讯模块接收遥控器的线圈选择命令, 并经通用串口传

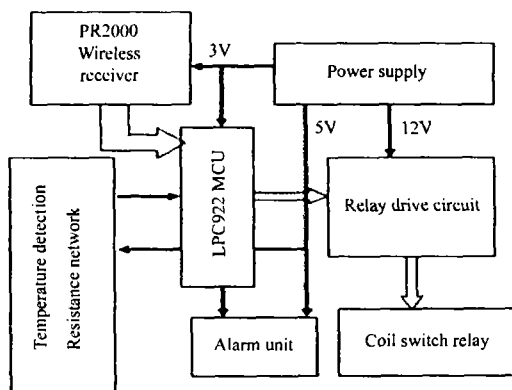


图 3 扫描线圈控制器功能框图
Fig.3 Block diagram of the coil controller

输给单片机。单片机据所收指令向继电器控制电路发出相应的控制命令。温度传感器的输出经分压电阻网络后送到单片机的模拟比较器输入端, 单片机根据比较器输出作出对报警电路和继电器的控制。电源模块输出 3 V 电压给单片机和无线通讯模块、输出 5 V 电压给温度检测电路和报警电路、输出 12 V 电压给继电器驱动电路。

遥控器由单片机、无线通讯模块及键盘组成, 单片机完成对键盘的扫描、读取、数据编码、发送工作。

在线圈控制器的软件设计中利用了 LPC922 单片机的内在应用编程功能, 将程序的状态参数保存在片内的程序 FLASH 存储器中, 在系统掉电时可保存当前运行参数, 重启后恢复先前工作状态。

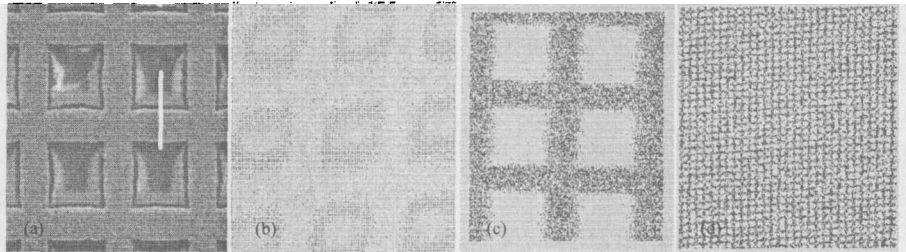


图 4 (a)1000 目每英寸 Ni 网的扫描电镜图片, 图中白线处为线扫描区域; (b)系统改进前的 PIXE 扫描图片; (c)系统改进后的 PIXE 扫描图片; (d) 1000 目每英寸 Ni 网的扫描图片, 扫描范围为 $760\mu\text{m}\times 890\mu\text{m}$

Fig.4 (a) SEM image of a 1000 lines per inch nickel net, the white line showing line scan regions; (b) PIXE images from the 1000 lines per inch nickel net before the improvement of the system; (c) PIXE images from the 1000 lines per inch nickel net after the improvement of the system; (d) PIXE images from the 1000 lines per inch nickel net with a scanning range of $760\mu\text{m}\times 890\mu\text{m}$.

3.2 实验结果

3.2.1 扫描步距

对 40 匝、80 匝、120 匝三个线圈扫描数据分析后, 得到了不同匝数线圈的扫描步距如表 1 所示。

表 1 各线圈所对应的扫描步距
Table 1 Step size of different coils

| 线圈 Coil | 步距 Step ($\mu\text{m}/\text{step}$) | |
|-----------------|---------------------------------------|------|
| | X | Y |
| 40 匝 40-turns | 0.14 | 0.16 |
| 80 匝 80-turns | 0.26 | 0.31 |
| 120 匝 120-turns | 0.38 | 0.45 |

由图 4(d)测得, 在现有功放的最大输出情况下, 最大的扫描范围可达 $760\mu\text{m}\times 900\mu\text{m}$ 。扫描范围的不对称性是由功放输出能力的不对称以及 X 和 Y 线圈空间位置的差异造成的。从图上很难看出边沿区域和中心区域网格的几何形状有什么区别, 说明扫描的线性和分辨率在此范围内都没有明显的变化。

图 4(c)是用 40 匝线圈、扫描范围设定为 400 道 \times 400 道 (每道对应一个扫描步距, 见表 1)、扫描频率为 50 Hz 时扫描所得的 1000 目镍网的网格图

3 扫描分辨率的测量

3.1 实验条件

实验所用质子能量为 3 MeV, 物孔直径为 $20\mu\text{m}$, 光阑孔直径为 0.25 mm, 束流强度为 10 pA, 扫描输出增益为 10。实验采用每英寸 1000 目的 Ni 网做标准样品(图 4(a)), 网格线的线宽为 $7.4\mu\text{m}$, 网孔边长为 $18\mu\text{m}$ ^[8], 可以看出在此扫描范围内扫描保持很好的分辨率。

设定合适的 X 和 Y 扫描频率可以实现对样品的随机扫描 (避免出现李萨如图像)。所以该扫描方式虽然在微观上以按步增加或减小的方式进行扫描, 但宏观上是随机的, 在扫描频率较高、束流相对较弱的情况下可以保证对样品扫描的均匀性。

像。从图 4(b)可以看出, 改进前的扫描图像模糊、倾斜, 正方形的网格经扫描后得到的是菱形的倾斜图像, 网格的线-孔比例失真, 这是因为扫描系统的散焦使束斑变大、系统分辨率降低造成的; 另外, 因为水平和垂直两组扫描线圈的安装没有达到严格的垂直, 致使图像倾斜。而图 4(c)图像清晰, 比例和 SEM 图片基本一致, 虽仍有一些倾斜, 但对于表达样品的元素分布来说, 已经基本满足研究的需要了。

3.2.2 扫描分辨率

在 3.1 所述实验条件下, 得到了多组扫描数据, 图 5(a)是在 X (水平) 方向的扫描范围为 10 道、Y (垂直) 方向扫描范围为 400 道、用 40 匝线圈、扫描频率为 50 Hz 的条件下所得到的数据曲线。根据分析需要, 只取了一条网格线边沿处的扫描数据。为计算扫描分辨率, 对图 5(a)中的拟合曲线进行微分得到图 5(b)。图 5(b)中曲线的半高宽为 9 道, 由表 1 知 Y 方向 40 匝线圈每道对应的扫描步距为 $0.16\mu\text{m}$, 所以图 5(b)中曲线的半高宽为 $9\times 0.16\approx 1.5\mu\text{m}$ 。此峰的半高宽基本代表了 Y 方向的扫描分辨率^[9]。用同样的方法测得在 X 方向的扫描

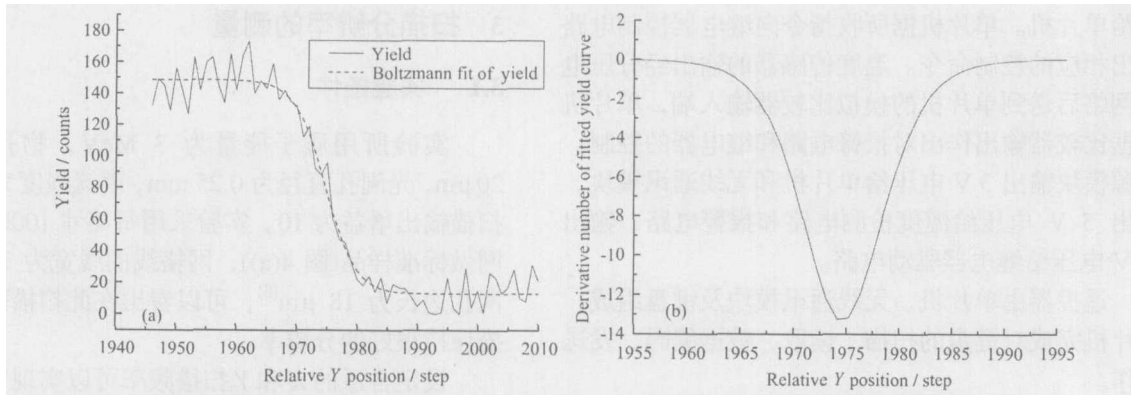


图 5 (a) Ni 网水平网格边线的线扫描(垂直扫描)特征 X 射线计数; (b) Ni 网边线计数曲线的微分
 Fig.5 (a) Vertical line scan over the edge of the Ni net; (b) Differential of the dashed line in (a), showing a FWHM of 9 channels

分辨率为 1.3 μm。因是在扫描状态下测得，除了束斑大小之外，扫描步距的均匀性、机械振动、聚焦透镜电源的稳定性、以及 Ni 网格线厚度的分布等都对系统的分辨率有影响^[9,10]。

3.2.3 束斑大小的计算

SPM 所获得的元素分布图像(系统输出 I)是由质子束流(系统输入 B)辐照样品(系统响应 O)、探测激发的特征 X 射线产生的。该过程可由如下卷积公式表示:

$$I(x, y) = \iint O(\eta, \phi) B(x - \eta, y - \phi) d\eta d\phi \quad (2)$$

具体到本文介绍的 SPM 系统,某一元素的二维分布图像 I 是由束流按照一定的步距扫描样品获得的,所以对样品的采样是离散的,上述卷积公式应写为:

$$I(j, k) = \sum_m \sum_n O(j - m, k - n) B(m, n) \quad (3)$$

因为 X 方向的扫描范围只有约 1.4 μm,问题可简化为一维线扫描,所以(3)式简化为一维卷积形式:

$$I(n) = \sum_{m=0}^n O(n - m) B(m) \quad (4)$$

显然,如果已知 Ni 网边线的形貌特征,从而构造出其分布函数 O ,对 Ni 网的线扫描数据进行反卷积,便可以得到束斑的一维分布数据。但为消除反卷积的病态问题,反卷积的计算过程相当复杂^[11],所以在此采用了正向拟合的处理方法。具体做法如下:据美国 SPI 公司提供的网格线参数^[8]及网格线的 SEM 图像(图 6(a)),构造网格线横截面的分布函数曲线(图 6(b)中的 Object)。以道(一个扫描步距)为单位,用 92 个元素的一维数组表示镍网格线及其周围网孔的分布函数。网格线边沿厚度为 1.6 μm,对应函数值为 10,中间圆弧顶部厚度为 2.5 μm,其函数值为 16。网格线宽度为 7.4 μm,共占用 46 个

数组元素。网孔区域对应数据为 0。用高斯分布函数生成一维数组来仿真束斑的一维分布(图 6(b)中 Beam spot)。束斑的实际大小在 1 μm 左右,其 FWHM 约为 6 道,为保证计算精度,该数组共取 21 个数据,对应约 3.4 μm 的宽度^[11,12]。将一维的 O 和 B 函数数据代入公式(4),按照 3.2.2 中介绍的方法计算出束斑的半高宽,不断修正一维高斯函数的参数,直到计算所得 FWHM 值处于 9 ± 0.5 道范围内为止。用上述方法得到满足要求的计算结果时,由高斯分布函数产生的仿真束斑的半高宽为 6.5 道,由此可知束斑在 Y 方向的大小为 1 μm 左右。同样方法计算得出束斑在 X 方向的大小为 0.9 μm。 X 方向束斑小于 1 μm 是因为实验所用的物孔安装稍有偏差,物孔在 X 方向的实际尺寸不足 20 μm,束流在进入透镜前为月牙形造成的。

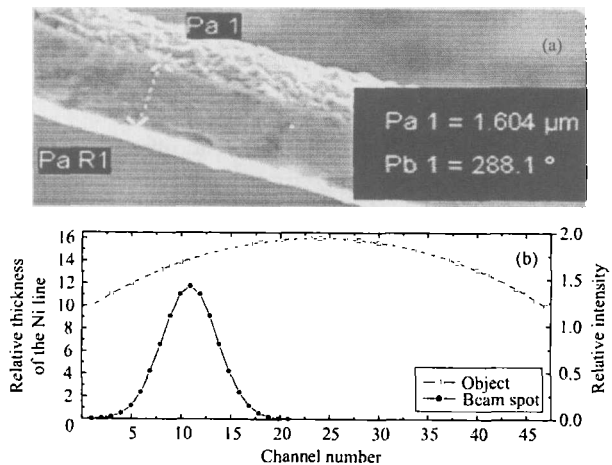


图 6 (a) 1000 目每英寸 Ni 网网格线的侧面 SEM 照片,可以看出 Ni 线的边沿厚约 1.6 μm,线的上表面轮廓为弧形; (b) Object 为 Ni 网格线横截面的仿真数据; Beam spot 为由高斯函数仿真的束斑一维分布数据,其半高宽为 6.5 道
 Fig.6 (a) SEM picture from the 1000 lines per inch nickel net showing the thickness of the line's lateral is 1.6 μm, and the outline of the line's upper is a piece of arc; (b) Object: Simulation of the Ni line's cross section. Beam spot: Gaussian function of the beam spot in 1D, with a FWHM of 6.5 channels.

4 SPM 扫描系统应用实例

4.1 Pb 染毒四膜虫元素分布

对生物样品的元素分析一直是核探针的一个主要应用领域^[13]，分析的效果也代表了该核探针的性能水平。作为扫描系统改进后的性能测试，我们选用了四膜虫这一单细胞生物作为分析样品。这是因为四膜虫具有大小适中(约几十个微米)、易于培养和染毒等特性。图 7 箭头所示区域为一约 12 μm ×25 μm 的梭形四膜虫，其它散斑为四膜虫碎片。该样品是将四膜虫用 50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的醋酸铅溶液染毒后采用酒精固定，冷冻干燥于迈拉膜上制成的。扫描选用中号线圈，扫描范围为 65 μm ×75 μm ，束斑直径 1 μm ，质子能量为 3 MeV，束流强度 10 pA，扫描时间为 320 min。从扫描图中可以看到四膜虫

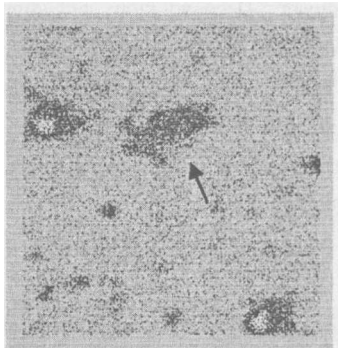


图 7 染毒四膜虫的铅元素分布图
Fig.7 Distribution of lead element in tetrahymenas

的轮廓及铅浓度分布。因四膜虫主要通过吸食方式在体内富集铅，其体内铅含量普遍较高，但从扫描结果仍然可以明显看到四膜虫体内铅分布的不均匀性。更详细的实验正在进行。

4.2 大气气溶胶单颗粒元素分布

大气颗粒物中微量元素的研究是大气环境科学的重要内容之一。对单颗粒大气气溶胶研究的主要出发点是若若干单个气溶胶颗粒来代表不同污染源排放物的特征^[14,15]。通过对一定数量的单个气溶胶颗粒的元素组分和分布状态的特征提取，可得到该类污染源的指纹特征。目前大多数研究中将单颗粒的元素组分作为颗粒物的主要特征，对元素分布状态的分析则由于条件的限制而做得较少。事实上颗粒物中元素的位置分布信息对了解颗粒物中元素所处的化学种态有很大帮助。元素在颗粒物中的分布为颗粒物的来源、颗粒物的形成、元素的化学种态、颗粒物的大气化学过程以及颗粒物对人体健康和环境的影响提供了重要的信息。本工作对上海市重工业区大气颗粒物的元素分布做了研究。图 8 是一个采集自上海市重工业区的颗粒物的元素分布图。实验中束斑直径 1 μm ，质子能量为 3 MeV，束流强度为 10 pA，扫描时间为 270 min。可以看出一些元素如 S、K、Ca、Fe 在颗粒中并不是均匀分布的，而另外一些元素则在颗粒中分布较均匀。这可能与颗粒物形成时元素的沸点有关系。该方法用一次扫描，得到了多种元素的分布信息。

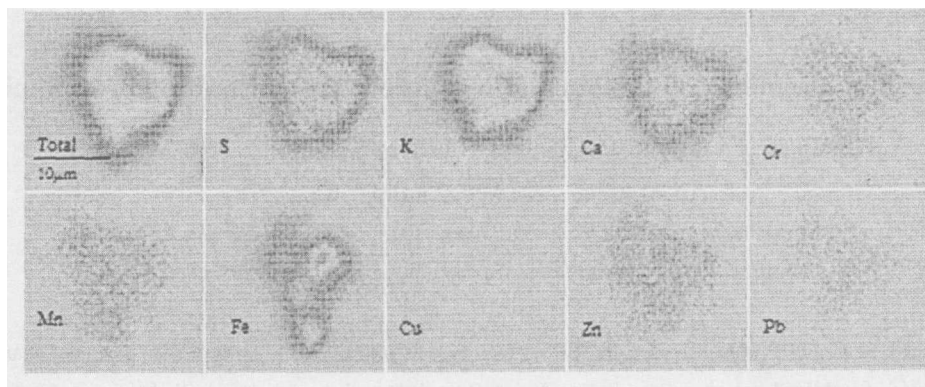


图 8 一个重工业污染区的颗粒物元素分布图
Fig.8 Element maps of a 25 μm ×25 μm scan area in a single atmospheric aerosol particle from a heavy industry region

5 结论

采用匝数可变的扫描线圈可以满足不同范围的扫描需求。在扫描范围较小时采用小的扫描线圈，既可以得到数字分辨率高的图像，又降低了噪声和干扰的影响；同时空心小线圈支持相对较高的扫描频率。线圈形状的规整性和安装的准确程度直接影

响图像形状的失真程度；扫描线圈安装在透镜和靶室之间对束斑的散焦作用明显低于扫描线圈放在物孔和透镜之间的情况。

具有相对规则几何形状的金属网是较理想的 SPM 扫描分辨率测试样品。本实验所用镍网边缘形状规则、边沿整齐光滑，在质子轰击时有较高的荧光产额、有标准的间距尺度，所以扫描镍网不但能

给出直观的网格图像,还能利用其数据进行束斑大小的定量计算。采用此方法定量地给出上海应用物理研究所 SPM 系统在 10 pA 的束流强度下扫描图像的空间分辨率可达 $0.9\mu\text{m}\times 1.0\mu\text{m}$ 。

初步的应用实践说明,改进后的微探针扫描系统可用于单细胞、单颗粒等样品的多元素二维分布分析。

致谢 感谢本所周巧根老师在线圈设计过程中所做的理论计算和磁场分布模拟分析,感谢本所 4 兆伏加速器组的王永其、贾文红、陆文忠老师以及倪志春、李勤涛同学在实验过程中给予的支持。

参考文献

- 1 Grime G W, Takacs J, Watt F. Nucl Instr Meth, 1984, **B3**: 589—593
- 2 Alexander D D, Glass G A, Bibhudutta Rout. Nucl Instr Meth, 2005, **B239**: 250—266
- 3 任焯刚, 承焕生, 汤国魂, 等. 质子 X 荧光分析和质子显微镜. 北京: 原子能出版社, 1981. 172—188
REN Zhigang, CHENG Huansheng, TANG Guohun, *et al.* Proton induced X-ray analysis and proton microscopy. Beijing: Atomic Energy Publishing Company, 1981. 172—188
- 4 Watt F, Grime G W. Principles and applications of high-energy ion microbeams. Bristol: Adam Hilger, 1987
- 5 ©Vector Fields Limited. OPERA-3d.GETTING STARTED.VF-01-98-D5. 1998. 53—73
- 6 赵玉清. 电子束离子束技术. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. 145—148
ZHAO Yuqing. Technology of electron beam & ion beam. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002. 145—148
- 7 LPC922 单片机用户手册. Philips 半导体公司. 2001. 1—63
LPC922 MCU User's Manual. Philips Semiconductors. 2001. 1—63
- 8 <http://www.2spi.com>
- 9 Datzmann G, Dollinger G, Goeden C, *et al.* Nucl Instr Meth, 2001, **B181**: 20—26
- 10 Ryan C G, Jamieson D N, Griffin W L, *et al.* Nucl Instr Meth, 2001, **B181**: 12—19
- 11 邹谋炎. 反卷积和信号复原. 北京: 国防工业出版社, 2001. 91—113
ZOU Mouyan. Deconvolution and signal recovery. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. 91—113
- 12 Rokita E, Maj B, Mutsaers P H A, *et al.* Nucl Instr Meth, 1997, **B130**: 138—143
- 13 Ren M Q, Thong P S P, Kara U, *et al.* Nucl Instr Meth, 1999, **B150**: 179—184
- 14 岳伟生, 李晓林, 李燕, 等. 核技术, 2004, **27**(3): 801—808
YUE Weisheng, LI Xiaolin, LI Yan, *et al.* Nucl Tech, 2004, **27**(12): 185—187
- 15 Reinert T, Reibetanz U, Schwertner M, *et al.* Nucl Instr Meth, 2002, **B188**: 1—8

Improvement of scanning coil system and resolution test of scanning proton microscope

LIU Jiangfeng^{1,2} YUE Weisheng^{1,2} WAN Tianmin^{1,2} CHENG Shuo^{1,2}
LI Xiaolin¹ ZHANG Guilin¹ LI Yan¹

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

2 (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The Scanning Proton Microprobe (SPM) facility was improved by using a new designed scanning coil system. A pair of saddle-shape air core coil was designed, and the coils can be controlled by a remote controlling system. The performance of SPM was tested by a sample (nickel net). The results show that the system has the scanning area of $760\mu\text{m}\times 900\mu\text{m}$ for a 3 MeV proton beam. The lateral resolution was $0.9\mu\text{m}\times 1.0\mu\text{m}$ at 10 pA beam current. Individual aerosol particles and tetrahymenas were studied by the facility. The elemental distributions in these samples were obtained.

Key words Scanning proton microscope, Scan coil, Resolution

CLC TL503