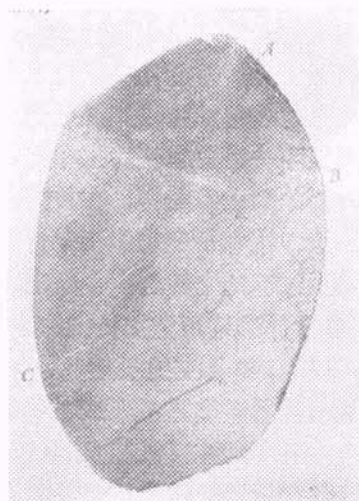


图 5

(100) 解理面晶片的反射形貌图 [CrK $\alpha$  辐射, (220)反射,  $\delta = 45^\circ$ ,  $\theta = 53.35^\circ$ ,  $\beta = 98.35^\circ$ ,  $\alpha = 8.35^\circ$ , 放大倍数为  $\times 2.3$ ]. 图中可看到许多大的亚晶粒因相互间取向有微小的差异而形成的衍射衬度, 晶粒间界  $E$  十分明显. 图中右部白色的狭长条  $C$  及三角形部分  $D$  为双晶区, 交界线的取向为  $[100]$  和  $[110]$ . 由于双晶区与基体部分取向不同, 不满足衍射条件, 故为白色. 白的宽曲带为解理晶体时产生的高低不平的解理阶梯, 白的曲线  $A$  为表面微划痕. 由于反射法穿透深度小, 对表面微损伤的反映很灵敏. 图 6 是 GaAs (100) 晶片的形貌图 [CuK $\alpha$  辐射, (311)反射,  $\theta = 26.90^\circ$ ,  $\delta = 25.24^\circ$ ,  $\beta = 52.14^\circ$ . 理论计算的  $\alpha = 1.66^\circ$ . 由于晶片表面与 (100) 有偏离, 故实际的  $\alpha$  约为  $5^\circ$ . 图中边缘  $A$  是晶片



GaAs (100) 晶片反射形貌图 [CuK $\alpha$  辐射, (311)反射,  $\times 3$ ]

图 6

加工后留下的自然生长外形, 一些黑的线 (如  $B$ ) 为接近表面的缺陷, 白的线  $C$  是表面损伤划痕. 可见用于反射法的晶片其表面加工处理是很重要的一环, 在机械切割、研磨和仔细抛光后, 要用化学抛光等手段去除表面残余的损伤层.

### 参 考 文 献

- [1] A. R. Lang, *J. Appl. Phys.*, **30**(1959), 1748; *Acta Cryst.*, **12**(1959), 249.
- [2] L. G. Berry, *The Powder Diffraction File*, Compiled by Joint Committee on Powder Diffraction Standards, (1977).

## 一个静电式电子能量分析器系统

许自图

陈基辅

张水顺

(中国科学院贵阳地球化学研究所) (中国科学院沈阳科学仪器厂) (中国科学院电子学研究所)

电子能谱技术是近年来迅速发展的表面物理研究手段及化学成分与结构的有力分析工具. 它的基本思想是测量在各种激发 (如 X 射线、紫外光、电子、离子) 下由物质表面逸出的电子动能谱, 据以推断物质的电子能级结构, 由之探讨有关的物理、化学问题<sup>[1]</sup>. 准确测定电子动能谱当然是电子能谱仪器的最基本的要求

物理

了. 由于实际所要测量的是低能 (2000 eV 以下) 电子, 采用静电式能量分析器有显著的优点, 主要是可以安排得很紧凑, 工作体积小, 便于采用  $\mu$  金属屏蔽来消除外磁场的干扰. 常用的静电式能量分析器如: 同心球面电容器、同轴圆柱面及同轴圆柱镜分析器等, 它们的基本原理可参见文献 [1]. 它们的共同特点是: 对

应于内外两面的一个电位差值只允许一个能量值的电子能通过分析器而在出口处聚焦。连续改变两面间电位差值就可以扫描电子动能谱。在电子能谱仪中一种更方便的工作方式是用一个能量分析器作电子单能器，在其前面加上预减速透镜系统。在电子源和能量分析器之间加进减速透镜系统有几个好处：在给定的总分辨本领下，将电子预减速可增加谱仪的照度<sup>[2]</sup>，可做成直读式仪器，结构安排灵活等。我们设计的电子能量分析器系统是在半球聚焦单能器前面加上一个由三节圆柱透镜组成的预减速系统。半球聚焦分析器的性能是已经为人们充分了解的，主要问题在于确定预减速系统。我们利用容量不大的 DJS-6 型电子计算机计算透镜中的电位分布和电子轨迹，从而确定透镜的几何尺寸和电参数。用电子枪做源，做了在各电子动能下的分辨率实验，表明在减速比到 1:30 时性能仍是良好的。

### 一、半球聚焦能量分析器

两个同心半球面的内外半径为  $R_i$ ,  $R_o$ , 加上电位分别为  $V_i$ ,  $V_o$  (图 1)。中心轨道半径  $R_a = \frac{1}{2}(R_i + R_o)$ 。理论计算表明：当内外球面上的电位差为  $V_p = V_i - V_o$  时，能在中心轨道上作圆周运动的电子能量  $E$  由下式决定：

$$E = eV_p/G. \quad (1)$$

$G$  是由几何因素决定的分析器常数，

$$G = \frac{R_o}{R_i} - \frac{R_i}{R_o}. \quad (2)$$

分析能量  $E$  与中心轨道上电位  $V_a$  并不一定相

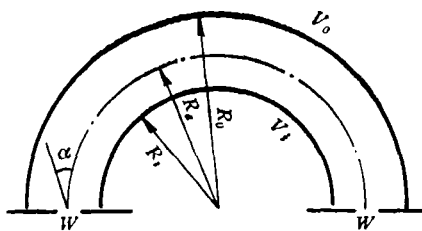


图 1 半球聚焦电子能量分析器示意图

同，如令中心电位  $V_a$  就等于分析能量  $V_a = E/e$ ，则应使

$$\begin{aligned} V_i &= \frac{R_o}{R_i} V_a, \\ V_o &= \frac{R_i}{R_o} V_a. \end{aligned} \quad (3)$$

如令中心电位为零，则应使

$$\begin{aligned} V_i &= \left(\frac{R_o}{R_i} - 1\right) V_a, \\ V_o &= \left(\frac{R_i}{R_o} - 1\right) V_a. \end{aligned} \quad (4)$$

在入口处有一束能量为  $E$  的电子束，经过半球后聚焦在出口缝上，但是由于象差的存在，入射单能电子得到的却是有一定的能量分布的峰 (图 2)。一般用半峰高处的宽度 (FWHM)  $\Delta E_{1/2}$  表示分析器的分辨率  $F$ 。对半球分析器，分辨率 (相对) 为

$$F = \frac{\Delta E_{1/2}}{E} = \frac{\omega}{2R_a} + \frac{1}{2} \alpha^2, \quad (5)$$

其中  $\omega$  为入射缝和出口缝中大的一个的宽度， $\alpha$  是入射束发散角。

在与轨道平面垂直方向上的缝长及发散角对分辨率的影响比轨道平面内的小得多，在一般分析中可以忽略。

### 二、预减速透镜系统的设计

等直径两节圆柱透镜或三节圆柱单透镜 (einzellenses) 在成象电子光学中广泛应用，它们的性质已有相当充分的研究<sup>[3]</sup>。在这种应用中，特别重要的是透镜要能给出质量良好的象。在电子能谱仪中要求的是能将源处出来的很大能量变化范围内的电子都在单能器入口处成象，上面的透镜系统都不能满足这个要求。D. W. O. Heddle 提出了一个依靠已知的两节透镜的数据来决定要求的三节透镜的参数设计步骤<sup>[4]</sup>，指出三节不等直径的圆柱透镜可以做到在相当大的首末节电压比范围内 (见图 3)，入口的“物”都在出口处成“象”，且放大率在有限的范围内，为此第二节上的电位要随首末节电压比适当变化。有意思的是，当把电位变化函

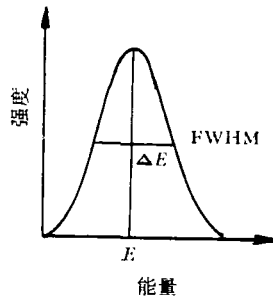


图2 典型的谱峰形状

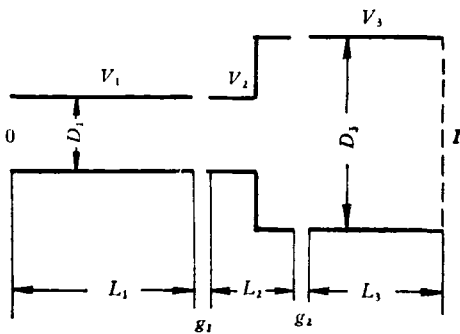


图3 三节圆柱透镜参数的示意图

数在等分坐标图上(而不是原文中在对数坐标图上)画出时,发现在  $V_2 < V_1$  一段,  $V_2$  随  $V_3$  变化是近似于直线性的,果真如此就带来很大方便,电压扫描将是直线性的,而且电子动能是直读式的. 由于设计步骤实行时靠的是图上作业法,并且两节透镜数据本身就有误差,显然用这种方法确定的参数准确度不高. 然而,这样一个透镜系统所要确定的参数有十个以上,完全靠电子计算机计算解出,计算量是十分巨大的,所需机器容量也很大. 一时还没有满足这种需要的计算机. 可行的办法是使用 Heddle 步骤初步选定参数,然后用电子计算机计算来使参数准确化. 我们就是这样进行的,利用电子计算机计算初选参数下透镜中电位分布和电子轨迹,由人们对其分析判断后更改参数,直到认为满足要求为止.

众所周知,在忽略空间电荷影响下,静电场的电位分布满足 Laplace 方程

$$\Delta V = 0. \quad (6)$$

在共轴圆柱下,静电场有圆柱对称性,只须计算子午面内的分布,子午面内方程为

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0. \quad (7)$$

在进行数值计算时,把偏微分方程差分化,然后用超松弛迭代法解算. 为有效利用机器容量而保证足够高的精度,采用不等间距网格点,在透镜场区网格点加密. 一般地不等间距网格点的电位公式为

$$V_0 = \left( \frac{2}{h_1 h_2} + \frac{2r_0 - h_3 + h_4}{r_0 h_3 h_4} \right)^{-1} \left[ \frac{2}{h_1 (h_1 + h_2)} V_1 + \frac{2}{h_2 (h_1 + h_2)} V_2 + \frac{2r_0 + h_4}{r_0 h_3 (h_3 + h_4)} V_3 + \frac{2r_0 - h_3}{r_0 h_4 (h_3 + h_4)} V_4 \right]. \quad (8)$$

记号的意义见图 4(a).

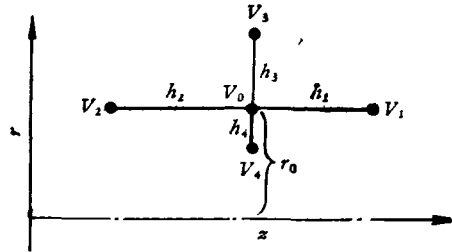


图 4(a) 网格点电位公式中记号的意义

轴上点 ( $h_4 = 0$ ) 的公式为

$$V_0 = \left( \frac{2}{h_1 h_2} + \frac{4}{h_3^2} \right)^{-1} \left[ \frac{2}{h_1 (h_1 + h_2)} V_1 + \frac{2}{h_2 (h_1 + h_2)} V_2 + \frac{4}{h_3^2} V_3 \right]. \quad (9)$$

给定边界条件就可求出电位,圆柱电极间隔处的边界值是用插值法给出的. 当所有边界上网点的电位值给定后,对空间所有网点的电位赋予初值(例如零值),然后逐点应用(7)或(8)式,再对迭代出来的电位值进行超松弛修正,

$$V_{ij}^{(n+1)} = V_{ij}^{(n)} + c(V_{ij}^{(n+1)} - V_{ij}^{(n)}), \quad (10)$$

其中  $V_{ij}^{(n)}$  表示第  $ij$  网点上第  $n$  次迭代所得的数值,  $c$  称为超松弛系数,当网点数在 5000 以下时,  $c$  可取 1.78—1.81. 反复运用(7), (8), (9)式,直至第  $n$  次结果与第  $n+1$  次结果的误差满足

$$(V_{ij}^{(n+1)} - V_{ij}^{(n)}) / V_{ij}^{(n)} < \epsilon \quad (11)$$

为止。ε是指定的精度要求，我们计算中的ε = 10<sup>-6</sup>。

超松弛系数c的引入是为了加快收敛的速度。为了使计算速度提高，在程序中对反复迭代运算部分采用代码语句，速度提高了14倍，这样使用一般水平的国产DJS-6机，计算静电透镜的一种状态，只需半小时左右。

电子在轴对称场中的运动方程是

$$\begin{aligned} \ddot{z} &= -\eta E_z, \\ \ddot{r} &= -\eta E_r. \end{aligned} \quad (12)$$

其中η = e/m是电子的荷质比，E<sub>r</sub>, E<sub>z</sub>分别是电子所在点的r向和z向的电场强度。利用求得的空间网点上的电位值，就可求出任意点P的电位和电场[图4(b)]，公式如下：

$$\begin{aligned} V_P &= V_0 + A_1 \Delta z + B_1 \Delta r + A_2 \Delta z^2 \\ &+ B_2 \Delta r^2 + C \Delta r \Delta z. \end{aligned} \quad (13)$$

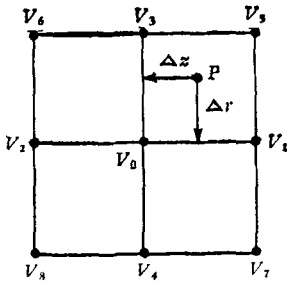


图4(b) 任意点电位公式中记号的意义

式中

$$\begin{aligned} A_1 &= (V_1 - V_2)/2h_z, \\ B_1 &= (V_3 - V_4)/2h_r, \\ A_2 &= (V_1 - 2V_0 + V_2)/2h_z^2, \\ B_2 &= (V_3 - 2V_0 + V_4)/2h_r^2, \\ C &= (V_5 - V_6 - V_7 + V_8)/4h_r h_z. \end{aligned} \quad (14)$$

而

$$\begin{aligned} E_r \Big|_P &= -\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)_P = -(B_1 + 2B_2 \Delta r + C \Delta z), \\ E_z \Big|_P &= -\left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)_P = -(A_1 + 2A_2 \Delta z + C \Delta r). \end{aligned} \quad (15)$$

利用泰勒法，就有

$$r_{n+1} = r_n + \dot{r}_n \Delta t - \frac{1}{2} \eta E_{r_n} \cdot \Delta t^2,$$

$$\begin{aligned} z_{n+1} &= z_n + \dot{z}_n \Delta t - \frac{1}{2} \eta E_{z_n} \cdot \Delta t^2, \\ \dot{r}_{n+1} &= \dot{r}_n - \eta E_{r_n} \cdot \Delta t, \\ \dot{z}_{n+1} &= \dot{z}_n - \eta E_{z_n} \cdot \Delta t. \end{aligned} \quad (16)$$

式中下标n标记了电子轨迹中的步数，而Δt表示步长，其数值大小将影响轨迹精度。我们人为地选取电子最快处走一步不超过网格点距的一半所对应的时间为步长，省去了判断精度、修改步长等手续。这样，给出电子运动的初值

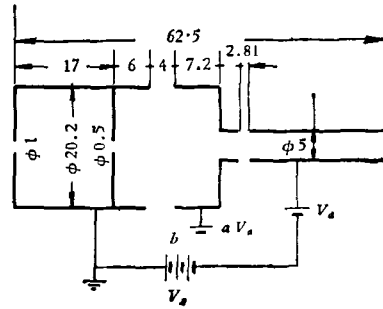


图5

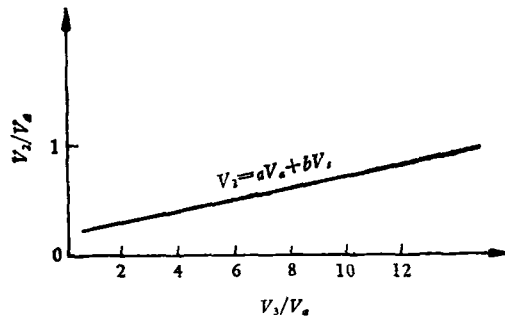


图6 中间节透镜上电位与扫描电位的关系

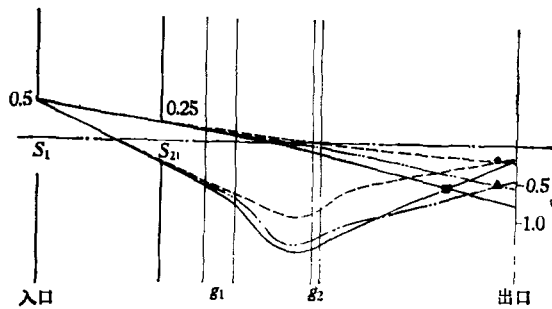


图7 几种能量的电子轨迹

- 为 E = 24 eV 的电子轨迹;
- - -▲- 为 E = 500 eV 的电子轨迹;
- 为 E = 1500 eV 的电子轨迹;

各节圆柱上电位如图5, 6所示，取V<sub>0</sub>为100V，a = 0.23，b = 0.95，图中r方向尺寸比z方向尺寸多放大五倍

条件  $r_0, z_0, \dot{r}_0, \dot{z}_0$ , 利用 (14), (15), (16) 式就可求出电子轨迹全貌. 为了在最后作轨迹图方便, 轨迹计算结果经过处理, 打印出轨迹与  $r$  方向网格线相交的坐标 (即  $r$  值).

预减速透镜系统的几何尺寸如图 5 所示. 第一节透镜接在地电位上以和样品室衔接, 第三节透镜的电位是分析能量  $V_a$ . 加在扫描电压  $V_s$  上, 这样入口处能量为  $E_s = eV_s$  的电子到达第三节透镜时其能量就变为分析能量  $E_a = eV_a$ ,  $V_s$  的读数直接指示了入射电子的动能. 为了使不同  $E_s$  的电子能聚焦在出口处, 第二节透镜上的电位  $V_2$  要随  $V_s$  作线性变化 (见图 6):

$$V_2 = aV_s + bV_a \quad (17)$$

当取  $a = 0.23$ ,  $b = 0.95$  时, 算得的几种能量的电子轨迹如图 7 所示. 选择由  $s_1, s_2$  两缝所限制的两条最极限初始电子射线, 计算其轨迹, 它们在出口处所限定的最大宽度就是我们关心的“象宽”, 而这就是单能器的“源宽”. 根据算得的轨迹, 得到在  $s_1$  和  $s_2$  所限定的人射条件下, 几种能量的电子在出口处的“象宽”. 在 24 eV 时, “象宽”为 0.5 mm; 在 500 eV 时, “象宽”为 1.2 mm; 在 1500 eV 时, “象宽”为 1.7 mm. 对不同电子能量, “象放大率”不一样. 对高能量电子, 单能器的实际入射“源宽”将变得大些, 但这并不会有多大害处, 结果会对各能量得到相当一致的实际分辨率. 因为根据 (5) 式, 单能器的分辨率

$$F_a = \frac{\Delta E_{1/2}}{E_a} = \frac{w}{2R_a} + \frac{1}{2} \alpha^2,$$

故

$$\Delta E_{1/2} = E_a \cdot F_a = E_a \left( \frac{w}{2R_a} + \frac{1}{2} \alpha^2 \right).$$

而实际分辨率为

$$F_s = \frac{\Delta E_{1/2}}{E_s} = \frac{E_a}{E_s} \left( \frac{w}{2R_a} + \frac{1}{2} \alpha^2 \right). \quad (18)$$

虽然  $E_s$  增加时  $\Delta E_{1/2}$  增加, 但  $F_s$  甚至可能减小. 从绝对线宽说, 对 1000 eV 能量, 近于 1 eV

的半宽度也是相当满意的了.

### 三、实验分析器系统

将计算确定的预减速透镜系统和半球分析器接起来, 就构成所要求的分析器系统, 连接处的边缘场用与中心轨道在同电位上的边缘场修正板来消除<sup>[2]</sup>. 整个分析器系统的原理示于图 8. 为了检定分析器系统的特性, 用热灯丝发射电子枪做源进行实验. 实验装置中半球分析器用内外双层  $\mu$  金属磁屏蔽起来. 对铝制球、铜制透镜、油扩散泵真空系统构成的装置和不

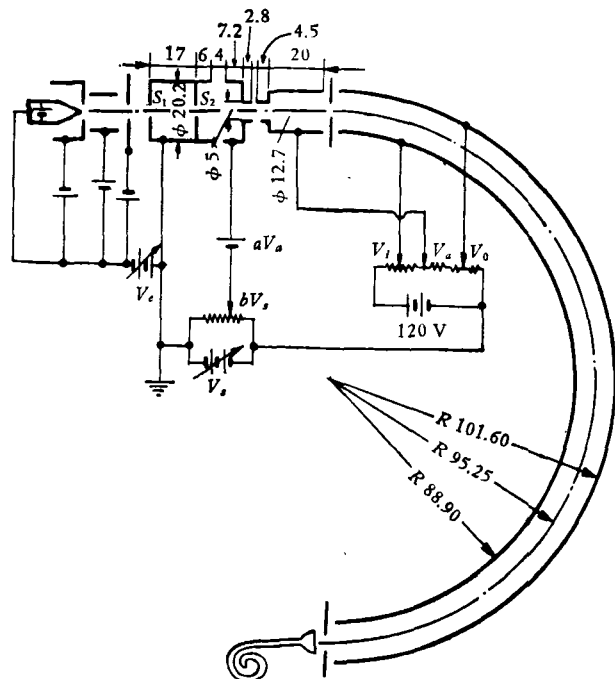


图 8 分析器系统实验原理图

锈钢制成的分析器系统, 钛离子泵真空系统构成的装置都进行过实验. 电子探测器采用国产管弯形槽电子倍增管, 实验中使用的电源多数是国产商品仪器.

如图 8 所示, 分析器系统的入射电子能量是用电源  $V_s$  来标定的. 对于标定为  $V_s$  能量的电子, 分析器系统应在相应的扫描电位  $V_s$  处记录到一个峰. 实验结果如图 9 所示, 显然是如所预期的, 记录到的峰宽是电子源能量分散、分析器系统分辨率、倍增管分辨率、电源稳定度等

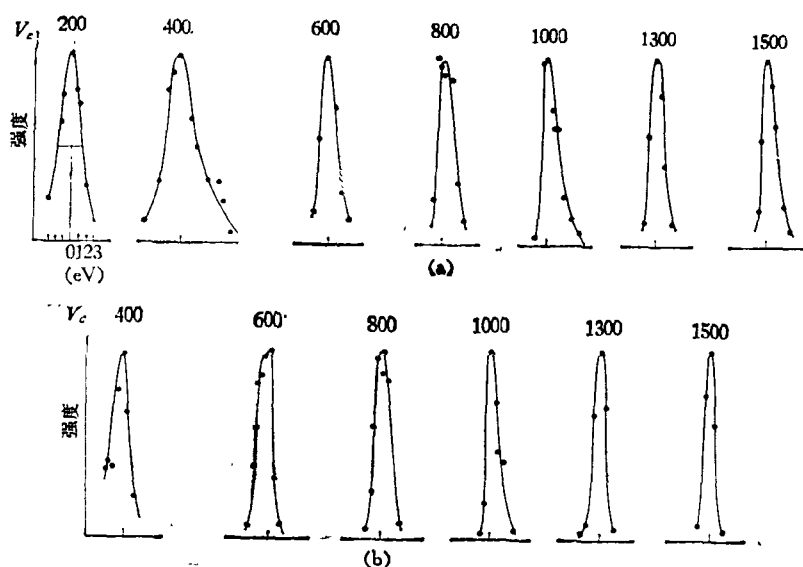


图9 实验得到的不同电子能量下的峰  
(a) 分析能量  $V_a$  为 100 eV; (b) 分析能量  $V_a$  为 50 eV. 强度是将最高计数率归一化为 1

的综合表现。要真正获得分析器系统本身的分辨特性,必须设法排除其他因素,比如预先将电子源单色化。

从在尽可能简单易行的实验装置上所得到的这些初步结果看,不论分析能量用 100 V 还是 50 V,对 1500 eV 以下的电子分辨都是良好的,分析能量为 50 V 时峰更锐些。在各个电子能量下,绝对半高峰宽都在 2 eV 左右。

实验表明,所设计的分析器系统在电子动能为 1500 eV 以下范围内能良好地工作,工作方式是很简便的、直读式的,预减速透镜上的扫描电位  $V$ ,就直接指示电子动能(仪器常数另作修正),扫描是直线性的。结果表明,利用一般水平的小容量计算机,进行较复杂的静电透镜

系统的设计,能获得相当满意的结果。

本工作中多方请教了梅镇岳先生,特致谢意。计算工作在电子学研究所 DJS-6 机上进行,得到该组同志热情帮助。实验装置由沈阳科学仪器厂设计制造,参加工作的主要有张延坤、张国山、姜铁军等同志,一并表示深切的谢意。

### 参 考 文 献

- [1] 梅镇岳,原子核与化学环境,科学出版社,(1977).
- [2] B. Wannberg et al., *J. Phys. E. Sci. Instr.*, 7 (1974), 149—159.
- [3] F. H. Read, *J. Phys. E. Sci. Instr.*, 4(1971), 625; *J. Phys. E. Sci. Instr.*, 5(1972), 150—155.
- [4] D. W. O. Heddle, *J. Phys. E. Sci. Instr.*, 2 (1969), 1046.

## 空间正交方位信息传递系统的光学设计和分析

宋 菲 君

(北京西城光学仪器厂)

在工程技术的许多领域中,都要求精确传递一个与传递方向垂直的基准方位,或测定两个与同一轴线正交的基准方位之间的夹角。这

类系统我们称之为“空间正交方位信息传递系统”。例如,要求地面上相隔一定距离的望远镜对于同一星体或航天目标作同步的追踪;测定