

科学仪器资料汇编

•
1

中国科学院
图书馆
藏书之章

中国科学院北京科学仪器厂技术情报组

编 者 的 话

遵照华主席抓纲治国的战略决策以及必须充分认识科技现代化的重要意义，科研要走在生产建设前面的指示，为尽快把科学研究搞上去提供新的技术装备，我们决定不定期地出版技术性的《科学仪器资料汇编》。主要报导：电子光学、离子光学仪器的进展和动态及其有关技术，为社会主义革命和建设服务。

由于我们水平有限，缺点和错误一定不少，欢迎同志们批评指正。

中国科学院北京科学仪器厂技术情报组

一九七七年三月

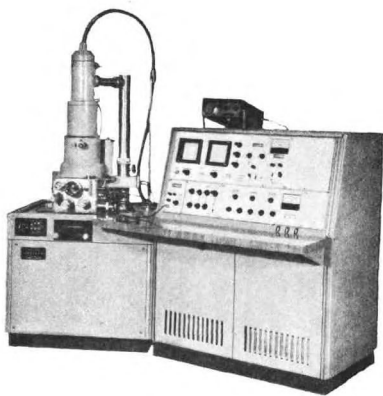


图1-1 DX-3型扫描电镜外形

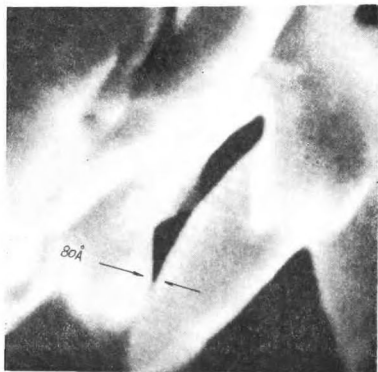


图1-13
每英寸1500目的银网,
10万倍 $1\text{mm}=100\text{Å}$

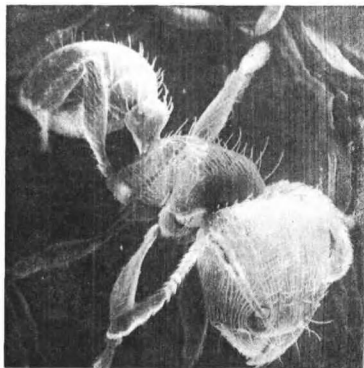


图1-14 蚂蚁40倍

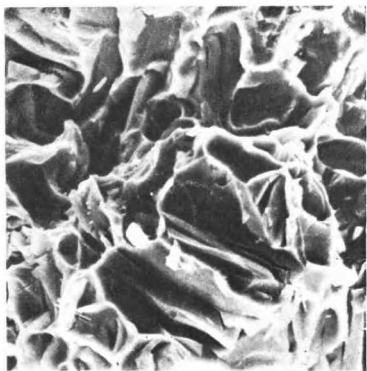


图1-15 铝断口1400倍

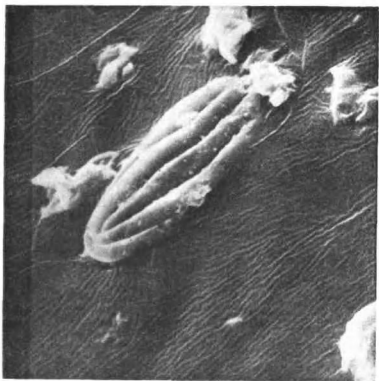


图1-16
希指蕨孢子化石，1000
倍。距今年代约1400至
800万年。

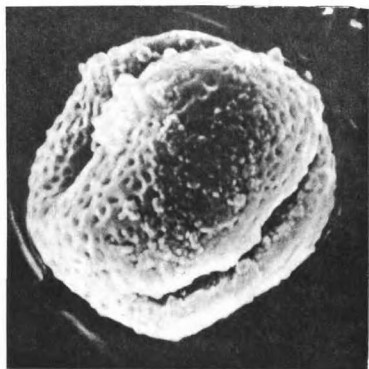


图1-17
铁力木孢子1000倍

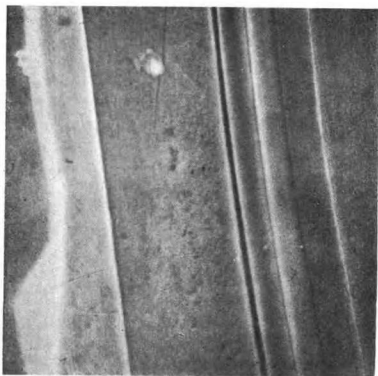


图1-18
双异质结激光器外延片
从照片中可以清楚地看到六层结构： $\text{GaAs}-\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}-\text{GaAs}-\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}-\text{GaAs}-\text{GaAs}$ ，3000倍。

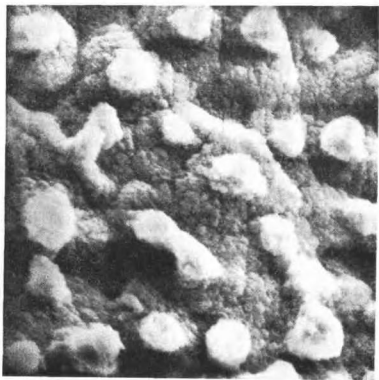


图1-19
荷叶表面细微结构，可
以看到钉形毛及拟蜡物
质的分布情况。

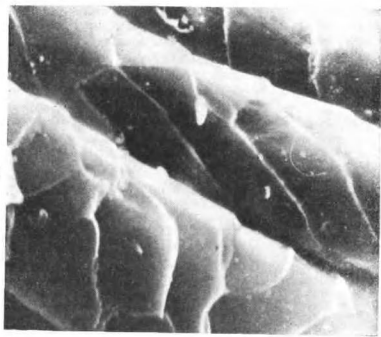


图1-20
羊毛纤维表面

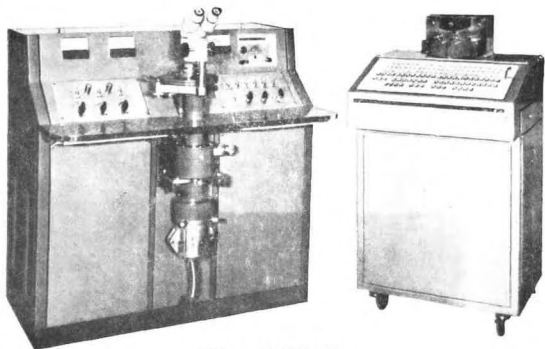


图3-1 电子束制版机外形图

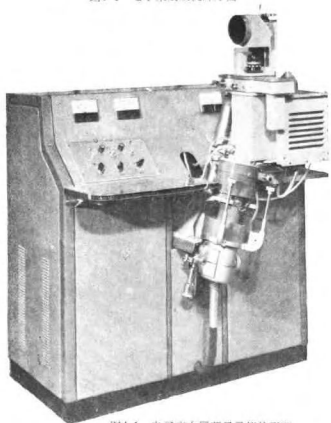


图4-1 电子束大屏幕显示仪外形图

目 录

DX-3 型扫描电子显微镜	(1)
DX-3 型扫描电子显微镜中的二次电子探头	(20)
DB-1 型电子束制版机	(25)
电子束大屏幕显示仪	(45)
电子束加工机的电子光学设计	(51)
具有最短焦距的电磁电子透镜	(63)
电子显微镜铝片光栏孔的一种加工工艺	(68)
电子显微镜的发展动态	(73)
对称和非对称型磁透镜	(87)
岛津 ASM 型扫描电子显微镜	(114)
全国电子探针、扫描电镜技术经验交流会在桂林召开	(129)
主要国家商品扫描电子显微镜的主要技术性能	(130)

DX-3型扫描电子显微镜

中国科学院北京科学仪器厂 扫描电镜组

前 言

扫描电子显微镜是一种大型电子光学仪器，用它可以进行对各种试样的图象观察，加附件后逐步进行元素分析和晶体结构分析。扫描电子显微镜与光学显微镜及普通的电子显微镜相比，有下列特点：

(1)分辨能力较高。通过二次电子图象可以看到100埃或更小的物体结构形态。

(2)放大倍数可以很方便地在20~100,000倍间连续变化。高放大倍数下也可得到高亮度的图象。

(3)景深长、视场大、成象富有立体感。可以直接观察金属试样凹凸不平的断面等。例如整个蚂蚁都能看得清清楚楚，这是其它显微镜无法达到的。

(4)试样制备简单。表面导电的试样可以立即放入扫描电子显微镜中观察。一般试样，稍加处理（表面真空蒸涂一层导电金属膜，或经过脱水处理），就可观察，不破坏试样。因而更接近于物体的自然状态，并能迅速得到结果，无需如一般透射电子显微镜那样要将试样制成超薄切片、薄膜或表面形态的复型等冗长而繁复的过程。试样的大小也比较随便，一般尺寸在直径10~25mm，高10~20mm的试样均可直接观察。

(5)试样综合分析。扫描电子显微镜加上X光微区分析器及电子衍射等附件，可以在观察微观形貌的同时逐点分析其化学成分及晶体结构。打破了显微镜只能观察、成分分析仪器（如电子探针、电子衍射仪等）只能分析成分的局限，兼具电子显微镜、电子探针、电子衍射仪等特点，而成为一种快速综合分析、检验工具。

(6)观察半导体器件及集成电路的工作状态，寻找其失灵原因以提高成品率。加上附件后，还可以观察试样的电、磁、发光性能等，应用范围广泛。

所以，扫描电子显微镜（以下简称扫描电镜）的应用范围很广，在现代工农业及科学技术中已日益成为一种重要的工具。在冶金、矿物、半导体材料、物理、化学、电子学、医学、生物、轻工业等各个领域中有极为广泛的应用。例如，可以检测金属材料的質量，找寻大型钢材断裂的原因。观察孢子花粉壁、种皮和果皮表面纹饰和叶子表皮结构等特征，特别是研究植物化石，如孢粉化石，具有特殊的意义。因为孢粉对于陆相沉积的地层划分具有决定作用，可以据以确定钻并取得的各地层岩芯中的古生物种类，为找寻石油及其他矿物提供可靠根据。生物医学方面，可直接观察癌细胞与正常细胞的差异，为分析致癌原因提供线索。在轻工业中，扫描电镜可以用来检查纸张、纺织品的質量，控制工艺流程等。

根据国家计委及中国科学院有关大型科学仪器试制生产计划的要求，我厂试制成功了DX-3型扫描电镜。DX-3型扫描电镜（图-1），经过一年多的调试，拍摄了成百种低倍数、中倍数、高倍数的照片，其中有金属、植物、动物、医学、地质、物理、轻工业等方面的样品。一九七五年八月，中国科学院组织了有关单位对仪器进行了鉴定。经过审查和实测，仪器的性能达到原设计指标，分辨本领为100埃，放大倍数从20倍至10万倍可调，图象立体感较强，可以满足一般使用要求。DX-3型扫描电镜的特点是：整个仪器自行设计、自行制造，材料和元件全部国产，分辨能力高，放大倍数连续可调；全部电子线路晶体管化；真空操作全自动化。

本文介绍DX-3型扫描电镜的主要技术性能，仪器的总体考虑及结构，电子光学系统设计，及影响扫描电镜分辨本领的因素等。

一、DX-3型扫描电镜技术性能

DX-3型扫描电镜（图1-1）包括电子光学系统（镜筒）、真空系统及电气系统三部分，在设计时考虑到实际使用的要求，我们确定了整个仪器的总体设计思想为（1）具有高分辨本领100埃，（2）仪器的电气线路采用全晶体管化，（3）真空系统自动。具体的设计指标和技术性能为：

分辨本领：保证 100\AA （二次电子图象）

放大倍数： $20\times\sim 100,000\times$ ，连续可调

观察图象：二次电子图象、背散射电子图象、吸收电子图象、透射电子图象和电子通道效应图象

加速电压：5，10，15，20，25，30KV 六挡（细调连续）

加速电压稳定度： $5\times 10^{-5}/10$ 分

束流：最大 $200\mu\text{A}$

灯丝：叉叉形

偏压：自偏压（七挡）

灯丝更换：局部破坏真空

电子枪对中：电磁对中（倾斜，平移）

透镜系统：三个电磁透镜

物镜电流稳定度： $2\times 10^{-5}/10$ 分

物镜光阑可调： $\varnothing 100\mu, 200\mu, 600\mu$

扫描线圈：双层磁偏转线圈

消象散器：二组四极透镜，独立调节

试样台：X位移 $0\sim 10\text{mm}$

Y位移 $0\sim 25\text{mm}$

Z位移 $13\text{mm}, 33\text{mm}$ 二挡

倾斜 $-5^{\circ}\sim +45^{\circ}$

旋转 $0\sim 360^{\circ}$ 连续

样品更换：局部破坏真空，1分钟

最大样品尺寸： $\varnothing 15\text{mm} \times 10\text{mm}$

$\varnothing 25\text{mm} \times 20\text{mm}$

显象管：长余辉1个（ $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ ）

短余辉1个（ $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ ）

扫描速度：行扫（ms） 2 10 20 50 500

帧扫（S） 0.5 5 10 50 500

线条（条） 250 500 500 1000 1000

扫描方式：点，线，面；全幅，选区

图象记录：DF型135相机

图象电位移： $\pm 10\mu$

真空：机械泵二个（60升/分）

扩散泵一个（450升/秒）

真空度 5×10^{-6} 托

真空计 皮氏计三个

真空控制 全自动或手动

二、总体考虑和仪器简介

为了得到 100\AA 的分辨本领，打在试样上的电子探针直径要求在 80\AA 左右。我们采用锥形栅极的三极电子枪，这样电子枪的最小交叉圆斑直径大约为 $12\sim 16\mu$ ，亮度在 1×10^6 安培/厘米²·立体角以上，可以满足要求，如（图1-2，2）所示，阴极采用 $\varnothing 0.1\sim 0.12\text{mm}$ 钨丝，高频电流直接加热。

在理想成像情况下，以电子枪最小交叉圆斑为物，经透镜系统缩小成电子探针。因为透镜系统的象差及衍射象差的影响，理想成像下的电子探针直径必须比 80\AA 还要小（考虑分辨本领优于 100\AA ），令理想成像情况下电子探针直径为 $d_g = 60\text{\AA}$ ，所以总的电子光学缩小倍数 M 为

$$M = \frac{d_0}{d_g}$$

d_0 ~电子枪交叉斑直径

d_g ~试样上的最小电子探针直径， M 为 $2000\sim 2700 \times$ 左右。

为了使扫描电镜的透镜系统能获得缩小2000倍以上的能力，我们采用三个透镜，二个聚光镜和物镜。用三个透镜的优点为：

- (1) 和二透镜相比，同样的镜筒高度，缩小倍数大得多；
- (2) 缩小倍数和调焦可以相互独立地进行；
- (3) 仪器的工作状态比较灵活，如可以方便地进行选区衍射等工作；
- (4) 二个聚光镜，每个透镜的缩小倍数都不大，透镜的孔可大些，里面加防污染套筒，清洗方便。

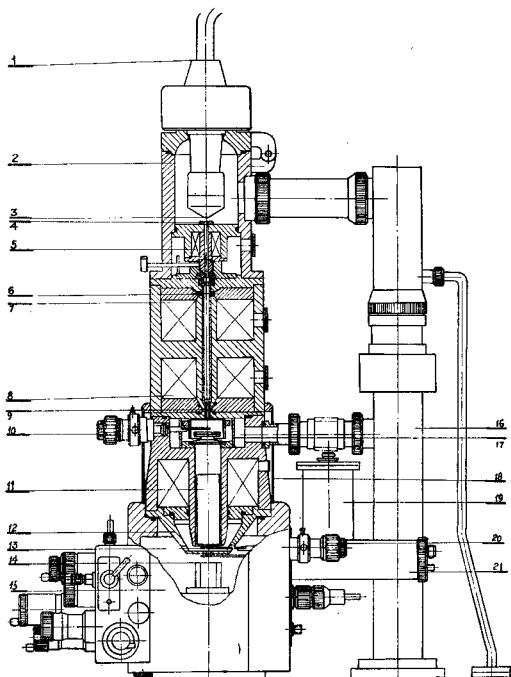


图1-2 DX-3型扫描电镜筒剖视图

- (1)高压电缆; (2)电子枪; (3)灯丝和栅极组件; (4)阳极; (5)电磁对中线圈; (6)第一聚光镜;
 (7)第一聚光镜线包; (8)第二聚光镜线包; (9)第二聚光镜; (10)聚光镜光阑; (11)扫描线圈、消
 象散器组件; (12)物镜; (13)物镜光阑; (14)试样座; (15)试样室; (16)真空管道; (17)双层磁屏蔽
 外套; (18)外层磁屏蔽套; (19)冷屏; (20)物镜光阑调节手把; (21)二次电子接收器。

从阴极发出的电子，经电子枪栅极、阳极会聚成一交叉斑（在阳极孔附近），再经二个聚光镜缩小，由物镜会聚在试样上。电子枪灯丝与栅极组件相对阳极能机械倾斜（半可调），电子枪与透镜系统间装有电磁对中线圈（图1-2，5），能进行电子束的平移和倾斜调整（独立调整）。当换了新灯丝后，适当调整机械半可调及电磁对中，可方便地获得最大束流。

双聚光镜的结构如（图1-3），由于采用整体结构式，二个聚光镜用一整块纯铁加工而成，每个透镜的磁路和极靴为一整体，这样，减少了中间过渡配合，能较好地保证透镜之间的对中要求，并可减低对机械加工精度的要求。适当地选择二个聚光镜电流组合，就可以得到不同的电子探针电流（ $10^{-7} \sim 10^{-12} \text{A}$ ）。

第二聚光镜与物镜之间，装置有聚光镜活动光阑，有三个孔分别为 $\varnothing 50\mu$ ， 100μ 及 200μ ，主要是控制选区衍射时电子束的发散角，以提高角分辨率。

物镜采用非对称型透镜（图1-2，12）物镜下极靴孔较小（ $\varnothing 5\text{mm}$ ），使试样上的透镜磁场小，有利于磁性试样的观察和二次电子的收集。上极靴孔内装有扫描线圈~消象散器组件（图1-4）。

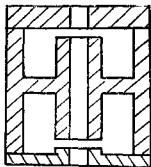


图1-3 双聚光镜磁路图

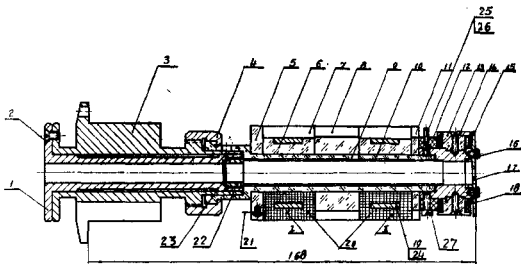


图1-4 扫描线圈~消象散器组件

其中：（I）上偏转线圈；（II）下偏转线圈；（13）消象散器骨架；（18）消象散器线包（其它从略）。

扫描线圈采用双偏转系统，使偏转中心与物镜光阑中心相重合后，便于实现低倍象并降低偏转象差。消象散器位于扫描线圈下方，二组四极透镜相交 45° 角，电流可以独立

调节(图1-4, 11)。

为了保证获得高分辨本领。并能考虑接收X射线及其他信号, 试样位置采用二种:

$L = 20\text{mm}$, 在高分辨本领时使用, 保证放大倍数为10万倍。(L~试样离物镜光阑的距离)。

$L = 40\text{mm}$, 用在一般工作情况。束斑直径要能小于 150\AA , 以便保证在一般观察二次电子图象时, 有 $200\sim 250\text{\AA}$ 的分辨本领。另外, 束斑直径能达到 $0.5\sim 1\mu$, 以便在接收X射线时又有足够的束流。

物镜活动光阑, 用以选择电子探针的孔径角。光阑片为 0.05mm 厚的钨片, 孔径有二种组合: ($\varnothing 50\mu, 100\mu, 200\mu$)和($\varnothing 100\mu, 200\mu, 600\mu$)。在观察二次电子图象时主要用 $\varnothing 100\mu, 200\mu$ 光阑。 $\varnothing 50\mu$ 用于获得高焦深的图象。 $\varnothing 600\mu$ 用于吸收电子图象及X射线分析。

此外镜筒内有数个固定光阑, 以阻挡杂散电子, 降低噪声本底, 防止绝缘物充电等。

二次电子接收器由聚焦极、闪烁体、光导管和光电倍增管组成(图1-5)。聚焦极上加 $+25\text{V}$, 闪烁体上加 $+10\sim 12\text{KV}$ 。二次电子经聚焦、加速后打到闪烁体上, 转换成光信号, 经光电倍增管放大输出视频信号。

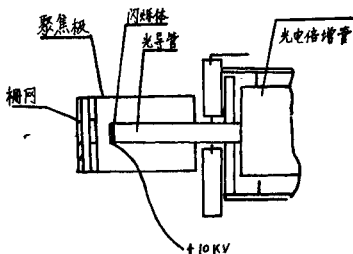


图1-5 二次电子接收器

聚焦极上加 -26V , 能阻挡二次电子, 仅得背散射电子信号。

在试样室下方有透射电子室。内有透射电子接收器。利用二块光阑片, 保留中心束时可得明场象, 挡住中心束时则得暗场象。此室另有一组扫描线圈, 用以获得一般的电子衍射图象。挡片上涂有荧光粉, 通过观察窗可观察电子束斑点, 以利对中调整。

为了减弱外界环境杂散电磁场对电子束的干扰, 在物镜外部置有一坡莫合金屏蔽套(图1-2, 18), 在物镜与聚光镜之间也装有双层坡莫合金屏蔽环。

试样室装有冷阱附件。冷阱内可以充液氮。使冷却片降温, 冷却片伸至试样与物镜

极靴之间，在试样附近造成一低温环境，能减小镜筒污染。冷却主要在作X射线分析时用。

本仪器除电子光学镜筒外，尚有电器系统及真空系统。

电气系统包括高压电源、透镜电源、光电倍增管电源、扫描部件、微电流放大器及低压电源等。

真空系统是用以保证在整个工作时间内扫描电镜镜筒中获得 5×10^{-6} 托的高真空。真空系统包括机械泵、扩散泵、气动蝶阀、真空管道、真空测量及真空保护装置等。真空系统的控制分全自动及手动两种，仪器正常时用自动控制，开机时只须按下真空“启动”按钮，仪器即可自动按操作顺序工作。自动系统失灵时，可用手动操作程序，各阀门能分别独立控制。停机时，只消按下“停机”按钮，30分钟后，自动断电、断水停机，操作方便。

三、电子光学系统设计

在设计扫描电镜时，物镜的设计是很重要的，因为它对分辨本领起决定性作用。其次是要考虑整个光路设计，以满足对电子探针直径的要求。

1、物镜设计

在扫描电镜物镜设计中要考虑：

(1) 扫描电镜的物镜，是用在缩小倍率情况。球差系数有：C

$$C_s = C_{s0} \left(1 + \frac{1}{M} \right)^4 \quad (1)$$

M——缩小倍率

C_{s0} ——透镜焦点处的球差系数

因为一般 M 在 $6 \sim 10 \times$ ，所以 $C_s \sim 2C_{s0}$

(2) 在整个光学系统光路的尺寸确定后，物镜的最小焦距 f 基本上也就确定了。这时，极靴孔径 D 大时，球差系数下降。

因为

$$\frac{f}{D} = \left[0.68 + 3.2 \left(\frac{S}{D} \right)^2 \right] \left[46 - \frac{V}{(NI)^2} + 0.25 \right] \quad (2)$$

$$\frac{C_s}{f} = 3000 \left[\frac{V}{(NI)^2} \right]^2 + 0.8 \quad (3)$$

这里 S 是极靴间隙距离

从式(2)，(3)可知，当 f 和 $\frac{S}{D}$ 一定时，随着 D 的增大，要求透镜的激励加强

(V一定时 NI 增大)，球差系数 C_s 变小。所以采用大孔径物镜极靴为好。

(3) 希望在色差(受电气电源稳定度的限制)和球差一定时有最长的工作距离。若定义工作距离 l 是物镜下极靴内表面至试样的距离(图1-6),

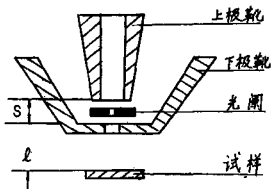


图1-6 物镜工作距离

因为
$$l = Z - \frac{S}{2} \quad (4)$$

这里, Z ——物镜中心至试样的距离。

有
$$\frac{l}{R} = \frac{Z}{R} - \frac{S}{D} \quad (5)$$

所以
$$\frac{1}{C_G} = \frac{\frac{Z}{R} - \frac{S}{D}}{\frac{C_G}{R}} \quad (6), \quad \frac{1}{C_S} = \frac{\frac{Z}{R} - \frac{S}{D}}{\frac{C_S}{R}} \quad (7)$$

其中 C_G ——色差系数, C_S ——球差系数

$\frac{Z}{R}$, $\frac{C_G}{R}$, $\frac{C_S}{R}$ 是透镜激励强度 $\frac{V_r}{(NI)^2}$ 及 $\frac{S}{D}$ 的函数。我们选择不同的 $\frac{S}{D}$,

求得 $\frac{1}{C_G}$, $\frac{1}{C_S}$ 与 $\frac{V_r}{(NI)^2}$ 的关系, (图1-7) 列出了它们的关系曲线。从图1-7可知:

a、 $\frac{1}{C_S}$ 与透镜激励强度 $\frac{(NI)^2}{V_r}$ 有极值关系。

b、当 $\frac{S}{D}$ 减小时, $\frac{1}{C_S}$ 增大, 但 $\frac{S}{D}$ 趋近 0.2 时 $\frac{1}{C_S}$ 趋向 0.61, 再减小 $\frac{S}{D}$ 没有实际意义, 因为间隙太小容易产生磁饱和。

c、 $\frac{1}{C_G}$ 与 $\frac{V_r}{(NI)^2}$ 没有极值关系。 $\frac{1}{C_G}$ 随透镜激励强度的增大而单调下降。在 $\frac{V_r}{(NI)^2} \sim 0.05$ 时趋向于 1。

d、当 $\frac{V_r}{(NI)^2}$ 一定时，随 $\frac{S}{D}$ 的增大， $\frac{1}{C_s}$ 会减小，而 $\frac{1}{C_o}$ 也会急剧减小，所以选取小的 $\frac{S}{D}$ ($\frac{S}{D} = 0.2$ 或 0.3)， $\frac{V_r}{(NI)^2} = 0.01 \sim 0.008$ 比较合适。

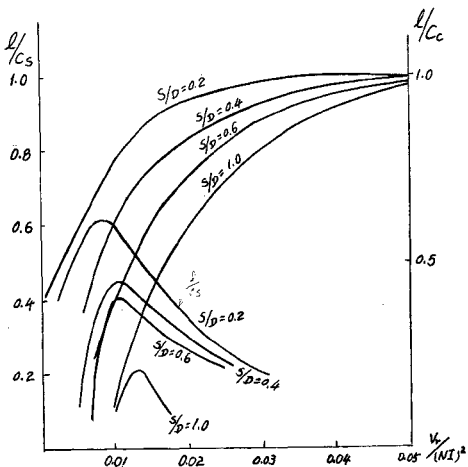


图 1-7 $\frac{1}{C_s}$, $\frac{1}{C_o}$ 与 $\frac{V_r}{(NI)^2}$ 的关系曲线

(4)为了在物镜上极靴孔中装置扫描线圈消象散器组件，以及降低球差及色差，极靴孔径要选择大些。但又为了避免透镜磁场影响试样的二次电子逸出及其运动轨迹，和对磁性材料的观察，物镜下极靴易取得较小。所以物镜的极靴形状是不对称的，上极靴孔大，下极靴孔小(图 1-8)

(5)考虑到不同的工作需要，试样有两个位置(高位置及低位置)，所以物镜的工作状态有二个。

我们采用的物镜参数为：

最高加速电压， $V = 30\text{KV}$

电子探针最小直径， $d \leq 50\text{\AA}$

最佳孔径角， $\alpha_{最佳} = 5 \times 10^{-3}$ 弧度

透镜激励强度 $\frac{V_z}{(NI)^2} = 0.01$

透镜相对间隙， $\frac{S}{D} = 0.3$

透镜上极靴孔径， $D_1 = 4$ 厘米

透镜下极靴孔径， $D_2 = 0.5$ 厘米

透镜间隙距离， $S = 0.675$ 厘米

透镜最小焦距， $f_{最小} = 1.045$ 厘米

球差系数， $C_s = 1.023$ 厘米

色差系数， $C_c = 0.675$ 厘米

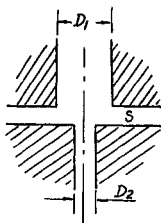


图1-8 不对称物镜极靴的内孔径 D_1 和 D_2

为了使改变扫描电镜的加速电压时，图象的聚焦基本不变，物镜（及二个聚光镜）的激励参量 $\frac{(NI)^2}{V}$ 须按比例与加速电压 V 同时变化，所以透镜线包均有七组抽头，一至六组在加速电压分挡变换时，同时改变匝数，以保证加速电压变化时，透镜聚焦能力基本不变。第七组在获得选区通道图象时，减小聚光镜匝数，以获得合适的工作条件。其匝数和加速电压值见表一。

表一 透镜线包匝数与加速电压间的关系

加速电压	聚光镜 1, 2	物 镜
5KV	870匝	840
10KV	1250匝	1170
15KV	1510	1460
20KV	1750	1700
25KV	1970	1900
30KV	2180	2080
衍 射	540	2080

2、电子光学光路

要确定光路的尺寸，首先应根据总的指标要求，考虑机械结构和电气线路等的可能性，整个仪器的高度，操作使用方便等，大致定一个尺寸。经过计算，若不能满足要求，则再进一步调整尺寸。当然，有时因机械强度或结构的要求，变动总体尺寸。这

样，经过相互配合，最后定下光路尺寸，并确定对机械及电气线路等的要求。

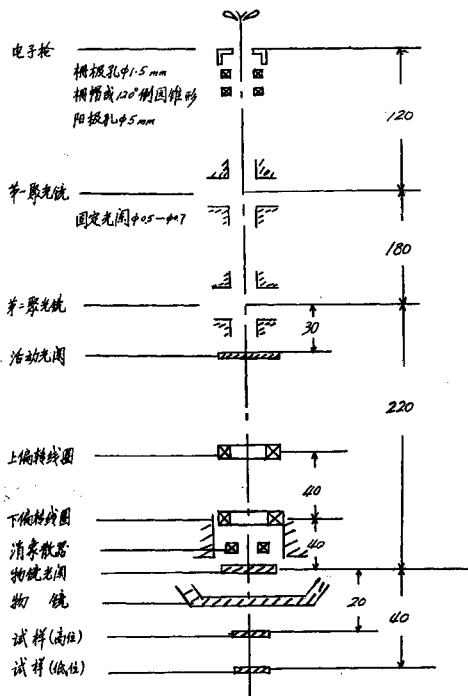


图1-9 DX-3型扫描电镜总体尺寸

DX-3型扫描电镜总体尺寸如(图1-9)所示;镜筒总高1010毫米。

我们以电子枪的最小交叉斑直径 $d_0 = 15\mu$ 出发,考虑试样工作在二个位置时,计算了电子探针直径与透镜焦距的关系,确定了三个透镜的尺寸及电流范围。

(图1-10)表示三个透镜的焦距与透镜电流的关系曲线。(图1-11)表示试样在高位置时高斯象斑与聚光镜电流的关系曲线。表二列出了三个透镜的主要参数。

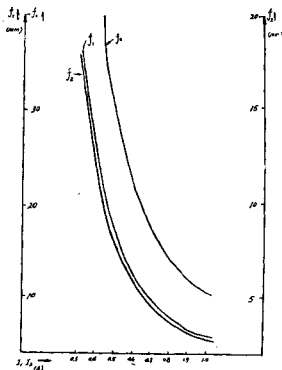


图1-10 透镜的焦距与透镜电流的关系曲线

表二 透镜参数汇总

参数	透镜	第一聚光镜	第二聚光镜	物镜
S/D		0.5	0.6	0.3
D_1 (mm)		12	6.8	40
D_2 (mm)		12	5.8	5
匝数		2160	2160	2080
线包截面(mm^2)		3100	3100	3200
导线直径(mm)		0.91	0.91	1.0
最大电流(A)		1.0	1.0	1.0
最小电流(A)		0.3	0.3	0.3
焦距范围(mm)		8~33	3~110	10~23

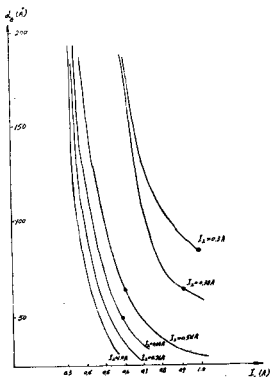


图1-11 高斯象斑直径与透镜电流间的关系曲线

注：以电子枪交叉点直径为 16μ 计

实际工作中，选择第一聚光镜电流 I_1 为 1A，第二聚光镜电流 I_2 为 0.3A，或二个聚光镜电流都为 0.5A，均能满足电子探针直径小于 100\AA 的要求。

四、扫描电镜的分辨本领、放大倍数及影响

分辨本领的主要因素

1、分辨本领和放大倍数。

分辨本领就是能够清楚地辨认物体细节的本领，以能分清为二点或二细节间的最短距离 S 来衡量。显然，这与细节的形状及其相对于环境的反差等有关。当二点间的强度差大于 20% 时，即可认为是分清的。物体位于明视距离，即 250 毫米处时肉眼可以分清的二点间的距离约为 0.1~0.2 毫米，即分辨本领为 0.1~0.2 毫米。更小的细节就需用放大镜、显微镜放大后才能观察到。一般光学显微镜的分辨本领更高为 2000 埃左右。扫描电镜的分辨本领约为 100 埃。在扫描电镜中，物体的形貌经扫描显示系统放大而成象于荧光屏上。如果肉眼能分清荧光屏上大小为 $d' = 0.2$ 毫米的距离，那么扫描

电镜的有效放大倍数 M 应为：
$$M = \frac{d'}{d} = \frac{0.2\text{mm}}{100\text{\AA}} = 2 \times 10^4$$
。即应放大 2 万倍，为了观察舒适和提高信噪比起见，可以使放大倍数增加到 10 万倍，即把能分辨的 100 埃的细节放大到 1mm。应该注意的是比有效值 M 更高的放大倍数并不能提供更多的信息，看不清楚细节依旧还是看不清，只是把它再放大而已。放大倍数比有效值小时，便不能充分发挥仪器的作用。由此可见，显微镜的主要指标是分辨本领，分辨本领确定后，有效放大倍数也就随之而定。

值得指出的是：一台扫描电镜的分辨本领为 100 埃，并不意味着所有小至 100 埃的细节都能看清楚。这不仅和仪器本身的分辨本领有关，而且和入射电子束、试样本身的性质，细节的形状和位置以及反差条件有关。在许多情况下，大于 100 埃的细节也可能看不见。因此，拍摄的照片上看不到 100 埃的细节，并不一定说明仪器本身不能达到 100 埃的分辨本领。电镜制造厂家给出的最高分辨本领只是在仪器的最佳状态下，用特殊制备的检测试样，由最熟练的操作者（包括照相技术），也就是说在最理想的条件下才能表现出来。一般情况下，观察真实的试样时达到的图象分辨率往往要低得多。（注：分辨本领是一台仪器所能达到的最好结果。分辨率表示一张照片上象的完满程度。）

2、影响扫描电镜分辨本领的主要因素

现在来讨论影响扫描电镜分辨本领的主要因素。它们是：

(1) 入射电子束斑点的大小——分辨本领一般不能小于电子束斑点的直径。可得到的斑点尺寸取决于电子的加速电压、透镜系统的缩小倍数及其象差（包括各种电源的稳定度）等；

(2) 试样对入射电子的散射，因此有效斑点尺寸大于入射斑点。散射程度依赖于加速电压、接收的信号种类和试样本身的性质等；

(3) 信号/噪音比——增加透镜系统的缩小倍数就可以进一步缩小入射电子束斑，从而提高分辨本领。但信号电平也随着降低。最后信号噪音比限制了分辨本领；

(4) 杂散电磁场——包括外界的干扰场及镜筒内各种污染引起的无规律电场；

(5) 机械振动等。

3、利用各种信号成象时的分辨本领：（图1-12）

(1) 利用二次电子成象时，接收的信号是从试样表面约 50 埃深度内发出的二次电子，其能量约为 0~50 电子伏特。二次电子有两种途径产生：1. 入射电子束进入试样时可激发出二次电子；2. 从试样射出的背散射电子和 X 射线也产生二次电子。前者试样对电子的散射作用小，因此主要显示试样的表面细节；后者则形成本底噪音。分辨本领主要由前一种二次电子决定，可达 100 埃。特别适合于研究试样表面等；

(2) 利用背散射电子成象时，接受的信号是从 100 埃~1 微米试样深度内背散射出

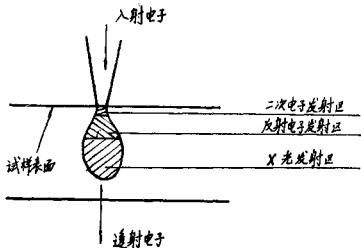


图1-12 试样对电子的散射作用(信号发射区)

来的一次电子,其能量范围大多数和入射电子接近。分辨本领一般是500~2000埃。背散射电子反映的是试样表面较深处的情况。同时,背散射电子信号强弱与试样的平均原子序数效应有关。因此背散射电子不仅可以显示出试样凹凸不平的形貌,而且还可反映试样的平均原子序数效果;

(3)利用吸收电子成像时,以试样到地的电流为信号,二次电子或背散射电子的任一局部增加,将引起吸收电流的相应减小,因此吸收电子象是和二次电子象、背散射电子象的反差互补。其分辨本领主要受信噪比的限制,一般为0.1~1微米。

(4)利用透射电子成像时,接收的信号是透过试样薄膜的那些电子,与普通透射式电子显微镜相比,在相同的加速电压下可检验更厚的试样和得到更好的反差。象的分辨本领受电子束斑点大小和信噪比的限制,一般为50~100埃。

(5)利用感生导电率的差别成像,是在试样上加一电压,以试样电流为信号,入射到试样表面的一次电子的作用是在试样内产生额外载流子。这些载流子引起试样导电率的局部变化,因此试样电流也随之而变。这种方法特别适用于检查半导体试样的电阻率变化和P-N结。

(6)利用阴极发光成像时,接收的信号是试样受电子束照射时发出的光波。这种方法对研究荧光材料和发光半导体材料等很有用。

(7)利用X射线作为信号,可以有两种办法来进行微区探针分析,即光谱法和能谱法,也可显示X射线图象。

在感生导电、阴极发光和X射线方法中,分辨本领主要受试样对电子的散射作用和信号/噪音比的限制。分辨本领一般为0.3~1.0微米。

改变加速电压对电子束斑点大小、试样对电子的散射作用和信/噪比都有影响,一般说来,电压增加,使电子束斑点减小和使信/噪比提高,因而有利于改善二次电子象

的分辨本领；但提高电压，会增加试样对电子的散射作用，因而也会使二次电子及背散射电子等图象的分辨本领变坏。

五、调整及分辨本领照片的拍摄

影响扫描电镜分辨本领的因素前面我们已经说了。要拍摄一幅高分辨本领的照片，除了仪器的电子光学性能有保证之外，仪器的调整，光阑的选择、象散的消除以及高分辨率拍照等都是获得一张好照片要注意的。

1、调整和安装

图象细节边缘的清晰程度主要与下述因素有关：

- (1) 电子束直径
- (2) 外界杂散电磁场干扰或电器部分故障引起的干扰
- (3) 振动
- (4) 试样本身的性质

电子束直径可适当选择聚光镜电流来控制，增大第 I，第 II 聚光镜电流可减小电子束直径，提高细节边缘的清晰度，但这是以减小探针电流，降低倍/噪比为代价的，所以要适当掌握。特别是透镜电流增大到一定程度时，电子束直径已为象散等象差所限制，进一步增加透镜电流只会减小探针电流而无任何好处。

当透镜工作电流合适而电子束直径仍嫌过大时，应检查象散，电流稳定度等因素。若电子束直径太大，在图象上表现为细节的边缘在所有方向上都不清晰。

有时细节的边缘出现锯齿状毛刺，这种毛刺大多取水平方向，这时应检查 50 周干扰和振动。当减慢扫描速度时，50 周干扰引起的毛刺将由于同步的引入而显著改善，而振动引起的毛刺则与同步无关。

在仪器安装时，应选择地点，使镜筒旁的杂散磁场小于 3 毫高斯，在保证此条件下，还有较大 50 周干扰就需仔细检查电器部件的性能。

为减小振动的影响，镜筒的各部分应尽量紧固牢靠而悬浮于弹簧上。同时应注意使仪器附近无强的振动源（气锤等）。当试样本身太大或观察试样上很突出部分的结构时，也会由于振动而使细节边缘出现毛刺，此时应设法改进试样的固定办法。

2、光阑的选择

物镜活动光阑直径的选择主要考虑下述二个因素：

- (1) 保证最佳孔径角，以求在束斑小于预定值下获得最大的探针电流，光阑小虽可减小束斑直径，但会减小探针电流所以要适当选择。
- (2) 最大的焦深，这可减小光阑直径来达到。

看高倍率图象时，主要考虑第一个因素，我们通常采用 200μ 的光阑。

3、象散

象散产生的原因是：

(1) 透镜加工中机械精度不良、材料的不均匀性。

(2) 物镜光阑、或其他光阑、电子束通道的逐渐污染等。

当光阑孔产生污染层时，受电子束轰击后就会积累静电电荷，它们会影响电子探针的对称，使电子探针发生畸变，束直径变椭圆。当有象散时，改变物镜电流使欠聚焦和过聚焦时，图象细节会在互为 90° 的方向拉长。用消象散器来消除象散时，要逐步从低倍率象至高倍率象。尤其是在高倍率下消象散的工作要很小心、很仔细地进行。当象散不能被消象散器消除时，也就是说消象散器的幅度调节到最大也没有用了，这时就要换物镜光阑来判断是光阑或镜筒已污染，应该清洗了。

4、提高探针电流，降低噪声。

当要求看高倍率图象时，探针电流一般已很小，图象的信/噪比较差，为保证图象质量，要注意电子枪工作状态的选择，提高电子枪的亮度，并仔细调节电子枪对中使试样上的吸收电流值尽量大。

从探头方面看要注意闪烁体是否老化，必要时应更换新闪烁体。

5、高分辨率拍照

拍照是扫描电镜工作很重要的一环，因为在高倍率情况下，试样不是总能观察的，逐渐产生的污染会掩盖住试样表面的细节。

当要拍高分辨本领照片时，整个系统包括光阑要小心地清洗。然后，选择要用的光阑，再细心地消象散。聚焦、消象散等都需要在所拍照的区域附近进行，而所要拍照的区域只能很快地在拍照之前聚焦。

下面是拍高分辨本领的条件：

加速电压： $25\text{KV}\sim 30\text{KV}$

灯丝：饱和

束流： $150\sim 200\mu\text{A}$

透镜像流： I_1 及 $I_2\sim 0.5\text{A}$

$I_3\sim$ 聚焦

光阑：直径 200μ

试样电流： $1\times 10^{-11}\text{A}\sim 5\times 10^{-12}\text{A}$

拍照记录时间：50秒或100秒

试样：每英寸1500目的银网

试样台倾斜， 25° 左右

测量方法：照片上两个亮区之间的暗区宽度。

我们在两台 DX-3 型扫描电镜样机的鉴定期间，均拍了分辨本领为 100\AA 的照片，样机交付使用单位后，又拍摄了如（图1-13）的照片。

六、应用实例

为了检测仪器的性能，除了拍摄分辨本领照片之外，我们也拍摄了一些诸如金属、生物等试样的照片（图1-14，蚂蚁）。另外，还应有关单位的要求，结合仪器的调试和交付使用单位的过程，拍摄了许多照片，简单介绍如下：

1、在金属、冶金学方面的应用

利用扫描电镜景深长、视场大、成象富有立体感的特点，进行对金属断口表面的观察，是近年来在金属、冶金学方面极为广泛的。我们曾为北京钢厂、北京钢铁研究院等单位观察了合金钢断口、铝合金断口等试样。（图1-15）是铝合金断口照片，1400倍。

2、在生物学、医学方面的应用

我们知道，在植物分类学和形态学上，通过扫描电镜对孢子花粉壁等特征的研究，能够解决许多问题，如过去由于光学显微镜不能区别的细微形态结构，扫描电镜能看得清清楚楚，对植物分类提供了有效的工具。尤其是扫描电镜对化石植物，其中包括对孢粉化石的研究，是考古学和地质学研究中一项有力的工具。（图1-16）是我们为地质科学院拍摄的希指蕨孢子化石照片，地质时代为上白垩——老第三系，距今年代约1400至800万年。利用准确鉴定化石孢粉，能确定地层时代，研究古植物在地质时代中的发展、变化，从而为找矿及其它工程地质服务。（图1-17）为北京植物所提供的铁力木孢子。

3、在半导体材料、微电子学方面的应用

扫描电镜的发展是与微电子学的应用紧密相关的。在半导体制造工艺中生产大规模集成电路或超高频率低噪音的微波三极管，都需要精细线条的边缘清晰度。如14KC超高频低噪音微波晶体管的基区宽度为 700\AA ，发射区宽度为 1200\AA ，已超出了光学显微镜分辨本领，同时景深也成问题，用扫描电镜则能清楚地观察到半导体器件表面立体图形。对外延硅片的外延层也能获得层错、位错及表面凹凸不平的清楚的照片。我们在北京半导体所按装仪器过程中，曾拍摄了双异质结激光器外延片，从照片上可以清楚地看到外延片的六层结构（图1-18）。

4、在其他方面的应用

扫描电镜不仅在科学研究上有广泛应用，而且在造纸工业、陶瓷工业、化学纤维、纺织造酒等工业方面都得到应用。甚至考古学中，也要利用扫描电镜来分析观察。如75年在湖北省江陵县凤凰山发掘一座西汉早期墓葬，这是继马王堆一号汉墓女尸之后，又出土的一具至今二千一百四十多年的男尸。我们曾协助有关单位对该具男尸的牙齿进行了扫描电镜观察，帮助考古学和医务工作者进行判断。

大家知道，荷叶表面是不沾水的。通过扫描电镜可以清楚观察到荷叶表面具钉形毛，研究这种毛的形态、它在荷叶表面上分布的密度以及荷叶表面拟蜡物质分布的特点，可以进一步研究荷叶表面不沾水的特点，并利用这种特点到各种工程及日常生活中，这是植物仿生学重要课题之一。（图1-19）为荷叶表面细微结构。

（图1-20）是羊毛纤维表面，可以清楚地看到羊毛表层的鳞片状结构。

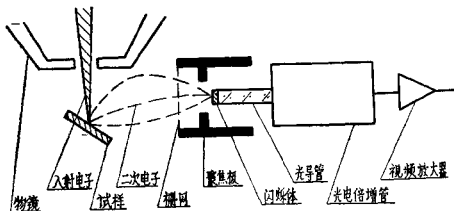
DX-3型扫描电子显微镜中的二次电子探头

中国科学院北京科学仪器厂 扫描电镜组

扫描电子显微镜可以检取从试样上发出的多种信号来成象，但其中图象质量（分辨率，立体感，景深等）最好的则要算二次电子信号，所以二次电子探头是扫描电镜的重要部件之一。本文介绍 DX-3 型扫描电镜试制中有关二次电子探头（以下简称探头）的一些考虑和实验，特别是对北京综合仪器厂的国产元件作的一些试验。

一、二次电子信号的特点及探头的基本组成

电子束打到试样上，试样发射出来的能量低于 50eV 的电子通常称为二次电子。由于二次电子是从试样表面层约 100\AA 范围内发射出来的，在这范围内入射电子束尚未充分弥散，所以二次电子的发射区主要由入射电子束直径决定，只要入射束足够细，就能保证图象有较高的分辨率。二次电子发射率随一次电子的入射角而变，因此随试样表面形貌而有明显的反差，图象的立体感很强。



在扫描电镜的工作高压下，二次电子发射系数一般在 0.1 左右。一次电子流最小为 $1 \times 10^{-11}\text{A}$ 左右，所以二次电子流最小达 10^{-12}A 。这是一个很微弱的信号。

探头的结构如图所示。栅网上加 +250V 电压，闪烁体上加 +10KV 高压，二次电子受栅网吸引，并大部穿过栅网打到闪烁体上发光，此光信号经光导管传递到光电倍增管上进行信号放大。从倍增管输出的信号达 $10\mu\text{A}$ 左右，只要接上视频放大器稍加放大即可用以调制显象管亮度而获得图象。

对探头的基本要求为：

1. 高放大倍数：从 10^{-12} A 放大到 10^{-5} A，即需 10^7 倍。
2. 足够快的响应速度，以满足扫描电镜图象的通频带要求。（一般约 50KC，电视扫描时约需 1MC）
3. 低噪声放大，以提高信/噪比。

二、探头的基本问题—信/噪比的理论极限 及低噪声放大

大家知道，电子具有量子性，我们平常谈的电流值只是指电子流的平均值，而事实上，在平均值上下存在着统计性涨落，这种统计涨落所决定的噪声即称为统计噪声。它是电子流所固有的，其值为

$$N = \sqrt{2e I \Delta f}$$

其中 I 为电子束电流的平均值， $e = 1.6 \times 10^{-19}$ 库仑为电子电荷， Δf 为放大器通频带。由它决定着信/噪比 $\left(\frac{S}{N}\right)$ 的理论极限：

$$\frac{S}{N} = \sqrt{\frac{I}{2e \Delta f}}$$

扫描电镜中电流很小，而频带又较宽，所以使信/噪比的问题突出出来。

探头在放大信号时，将把统计噪声同样放大；探头的关键在于尽量不引进附加的噪声，而使输出信号的 $\frac{S}{N}$ 比不致比理论极限坏得过多。

考察一下探头中的基本转换过程：

一次电子 → 二次电子 → 光子（闪烁体） → 光电子（倍增管光阴极） → 二次电子倍增（倍增极）

这些过程均属于量子转换过程，都存在着统计涨落，引进附加的统计噪声。

但由基本公式可见， $\frac{S}{N}$ 与 \sqrt{I} 成正比， I 愈小则 $\frac{S}{N}$ 愈低，所以 $\frac{S}{N}$ 比主要将由最小电流决定。以试样上发射的二次电子为信号，只要在转换过程中，产生的电流值均大于二次电子流，附加的统计噪声即可忽略。

事实上，一个二次电子以 10KV 能量打到闪烁体上，大约能产生 50 个光子，设光导管传输系数为 40%，光电子的量子效率为 20%，则每个二次电子能产生约 4 个光电子，这就能满足上述要求。在后面的二次电子倍增过程中，电流不断增大，其统计噪声更可忽略。

所以为提高 $\frac{S}{N}$ 比到极限, 应该使探头对二次电子有很好的收集效率, 同时提高闪烁体和光电阴极的性能, 光导管的传输效率等使附加的统计噪声可忽略。

下面将从这个基本要求来分析探头的各个主要组成部分。

三、二次电子收集系统

这是由栅网, 聚焦环, 闪烁体组成的聚焦加速系统。

试样上的物镜漏磁场较小(10高斯以下)所以栅网电压取+250V已足够吸引二次电子。

聚焦环的位置可适当调整, 以调节闪烁体前的加速场的分布, 使透过栅网的二次电子能集中打到闪烁体中央2~3mm范围内, 这样对光传输较有利, 同时又要要求二次电子不要过分集中, 以避免闪烁体上个别区域电流密度过高, 降低寿命。

带栅网的结构当然会截获一些二次电子, 但改变栅网电压可方便地选择二次电子信号(+250V)或背散射电子信号(-30V), 所以也有一定优点。

四、闪烁体

对闪烁体的基本要求为:

1. 有合适的发光光谱: 通常用的倍增管的光谱响应在4000Å(兰光)附近量子效率最高, 为求匹配, 要求闪烁体发光光谱的主峰位也在4000Å附近。

2. 发光效率要高。

3. 余辉短: 对一般速度成像(行扫周期最快达2ms)余辉时间约10μs即够, 对电视扫描(行扫周期约20μs)余辉时间应在10⁻⁶秒以下。此外最好选余辉以指数型衰减的材料。

4. 寿命长, 特别是作X光分析或观察电子通道效应图象时, 二次电子流较强, 闪烁体应能耐受这剂量而不致过快老化。

下面介绍经试验证明有用的几种材料。

1. ST-401型塑料闪烁体。其发射光谱主峰位4200Å, 发光效率较高, 约相当于蓝宝石发光效率的33~40%。余辉时间5ns, 可供电视扫描用。10KV的电子在塑料闪烁体中的射程小于10μ, 我们选用0.3~0.7mm厚的薄片对电子射程而言已足够厚, 同时却可减少光吸收, 更薄的片易于变形扭曲, 对光耦合不利。

2. P15荧光粉。发射光谱主峰位有3900Å和5600Å二种, 我们得到的是5600Å的, 虽然与倍增管光谱响应匹配稍差, 但由于发光效率较高, 总效果与塑料闪烁体相当, 余辉约10μs。荧光粉可用沉淀法涂敷, 厚度最好能控制在10个晶体层左右, 这样效率最高。

3. P47荧光粉。主要发兰光。余辉也更短, 可作电视扫描, 所以是一种较理想的

材料。

其他如 P46 萤光粉也可用。

闪烁体上需蒸以 800\AA 厚的铝膜，它一方面作为 10KV 高压的电极，另一方面作为反光层可提高效率并减弱杂散光的干扰。

五、光电倍增管

信号的放大主要由光电倍增管承担，所以这是一关键元件，我们采用了北京综合仪器厂生产的 GDB-53L 型倍增管，它有下述特点：

1. 有十三级百叶窗式倍增级，总增益可达 $10^7 \sim 10^8$ 倍，与我们的增益要求吻合。

2. 采用铯钾铯光电阴极，阴极兰光灵敏度，有利于降低统计噪声。

3. 阳极灵敏度达到 2000A/L 时的高压较低，据北京综合仪器厂同志实验，高压低的管子工作时内部发光较弱，光反馈效应小，有利于降低噪声。

4. 53L 型倍增管的暗电流稍大，在阳极灵敏度为 2000A/L 时暗电流约为 1nA ，但此时阳极输出电流已大于 $10\mu\text{A}$ ，故暗电流可忽略，暗电流统计噪声更可忽略。

为了证实这种管型的适用性，北京综合仪器厂的同志曾与我们一起在扫描电镜上对十个 GDB-53 型管子作了信/噪比测量，并与英国 EMI 公司产的 6256 型和 9502 型管子作了比较。测量方法为：取加速电压 20KV ，吸收电流 $1 \times 10^{-10}\text{A}$ ，倍增管阳极电流 $10\mu\text{A}$ ，负载为 $100\text{K}\Omega$ 电阻与 150P 电容并连，样品为抛光的铜块。在上述固定条件下，更换倍增管，调节倍增管高压使输出平均电压达 1V 时（相当于阳极电流 $10\mu\text{A}$ ）测出相应的倍增管高压及噪声电压 V_{pp} （以 SBR-1 型示波器测量）其典型结果如下表所示。B55，B58，B84 为 GDB-53 型管子。

管号	兰光灵敏度 $\mu\text{A/L}$	阳极灵敏度 200A/L		信/噪比测量（信号为 1V 时）	
		高压 (V)	暗电流 (nA)	高压	噪声电压 V_{pp} (V)
B58	24.5	840	0.1	990	0.2
B55	28	965	0.15	1120	0.25
B84	14	1220	0.6	1400	0.35
9502型 7212号	16	910	1	1020	0.25
6256型 29268号				1200	0.3

从上述结果可以看出：

1. B58 号等管子兰光灵敏度高，工作电压较低，相应地噪声电压也低些，优于英国管子。一般的（如 B55 所代表）则与英国管相当。

2. 个别管子兰光灵敏度较低，工作电压较高者，（如 B84）噪声电压稍大。

3. 从探头角度看, 管子的暗电流效应可忽略不计。

实践表明, GDB-53L 型管子是较理想的。

六、影响噪声的其他因素

实践中, 为降低图象噪声应注意:

1. 尽量提高一次电子流强度。由于噪声主要属统计涨落, $\frac{S}{N}$ 与 \sqrt{I} 成正比, 电流大 $\frac{S}{N}$ 也相应提高。

2. 尽量限制通频带。视频放大器的通频带是由行扫周期和每行需分辨的点数决定的, 在保证视频信号通过的前提下尽量压缩通频带, 即能提高 $\frac{S}{N}$ 比。通常在倍增管输出端接 RC 积分网络, 并随扫描速度而变化 RC 时间常数。照相记录时采用慢速扫描也就是为了降低噪声。而采用电视扫描时, 噪声就较显著。

3. 严格避光措施, 防止杂散光线射到倍增管光阴极上。

4. 闪烁体上的铝膜损坏或污染严重, 均会引起 10KV 放电而产生噪声。

5. 闪烁体在大电流轰击下易老化而使发光效率降低, 必要时更换之。

6. 光耦合良好, 在闪烁体——光导管——倍增管的界面上可适当涂以硅油, 以改善光耦合。

在采取上述各项措施后, 探头基本上已能满足需要。但对今后希望以电视扫描速度来看象时, 估计仍有一定差距。

DB-1型电子束制版机

中国科学院北京科学仪器厂 电子束制版机组

前 言

为满足半导体集成电路的迫切需要，我们与中国人民解放军兰字 826 部队，中国科学院自动化研究所等单位合作试制电子束布线制版机（简称电子束制版机）。

布线制版可以有多种方式：光束布线式；飞点扫描管式；微焦斑电子束管式；扫描电镜式；国内亦有试制电子束精密曝光和制版二用机及专用电子束制版机等。光束布线机需有精密机械工作台，且布线速度低。飞点扫描管式布线宽度不易小到 20μ ，精度亦不够高。作热塑料记录用的微焦斑电子束管，束斑直径报导可达 10μ ，扫描面积为 $\varnothing 25$ 毫米，但工件处于 10 千伏高压上。扫描电镜式的扫描范围过小，一般不大于 1—2 毫米，需用精密工作台来扩大其布线制版范围。电子束精密曝光及制版二用机会使仪器复杂，增加成本。专用电子束制版机可以直接在感光材料上选择布线以制造掩模，不需要精密工作台及精密定位。也可用来制作集成电路一次版（粗缩版），再用分步重覆照相机精缩（ $4\times$ 或 $10\times$ ）而成二次版（掩模），以节约制版工作的大量繁重劳动，提高精度及工作效率，解决部分手工刻图二步照相缩小难以解决的问题。这里虽要用真空系统，给操作带来一定麻烦，但也有其优点：感光材料在真空中易于保持清洁，不易沉积灰尘，电子束还能穿过脏物而使感光材料曝光，因此我们决定试制专用电子束制版机。

一、仪器描述

设计指标如下：

1. 扫描面积——最大 $32\times 32\text{mm}^2$ ；
2. 扫描线宽——10, 20, 30, 40, $50\mu\text{m}$ ；
3. 布线制版精度——a) 选择布线： $20\times 20\text{mm}^2$ 内套版精度为 $20\mu\text{m}$ ，
b) 粗缩版：以第一块版的图案为准，位置精度为 $20\mu\text{m}$ ；
4. 图案边缘整齐（小于 $10\mu\text{m}$ ）；
5. 连续制版片数（不破坏真空条件下）——5片；
6. 加速电压——30 千伏；
7. 真空度—— 10^{-4} 托。

DB-1 型制版机由电子计算机控制（图 3-1）。二台制版机分别由中国科学院自动化研究所的 DZ-1 型电子计算机及中国人民解放军兰字 826 部队的 815-II 型微型组件

电子计算机控制。

DZ-1 型电子计算机的主要性能为：

1. 二进制、定点、字长 26 位；
2. 主频 400 仟周，存储周期 $5\mu\text{S}$ ；
3. 内存容量： 8192×26
4. 基本指令：32 条
5. 输出：a) 数模转换输出 0~10 伏，分成 8192 步，精度为 0.005%，共二套；
b) 电子束快门通断信号

815-II 型电子计算机采用微型组件。主要性能为：

1. 二进制、定点、字长 24 位；
2. 运算速度每秒 5 万次；
3. 容量为 4096×24 ；
4. 基本指令 31 条；
5. 输出：a) 数模转换输出 0~10 伏，分成 4096 步，精度为 0.02%。共二套；
b) 电子束快门通断信号。

鉴于电子束斑点直径约为 10 微米，用一般光学显微镜就可以清晰地判别其在荧光材料上的聚焦情况。为了能直接观察在直径 35 毫米范围内的电子束斑点形状及其扫描轨迹，将透明荧光屏置于工作台面方，电子光学系统为倒立式。自位于最下面的电子枪发出的电子束经二个磁透镜聚焦于荧光屏或感光板上。计算机控制偏转扫描线圈中的电流大小，而使电子束按所需的图形进行扫描。用 $-160 \times \sim 7 \times$ 连续变倍双目显微镜便可通过视窗进行观察。

如所周知。电子光学系统的合轴是降低象差，获得足够大的工作束流的重要条件。为简化操作，使用方便，只用了一个调节机构即阳极调节旋钮以补偿电子枪灯丝的不对中。透镜系统的合轴则由机械结构设计，材料处理及精密机械加工来保证。三个活动光阑小孔装在物镜极靴间隙中，可以在工作时调节电子束孔径角。工件台上装有荧光材料及五片感光板，能在不破坏真空及不切断加速电压下连续曝片，以提高工作效率及增加稳定度。整个电子光学系统、电气线路及真空系统等都装在 $-1.1 \times 1.1 \times 0.8$ 米³ 的机架内。电气操作旋钮集中在左右侧面板上。真空系统中设有机械联动阀、操作一手把便可使系统分别处于“工作”、“予拍”、“换片”及“停止”状态。

电源系统包括 30 仟伏高压在内部采用了晶体管，分成七个插件装在总机架内。

二、电子光学系统

为使电子束斑点能在 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 微米之间变化，同时电子光学系统不致过长，故采用聚光镜使电子束斑点缩小 $0.09 \sim 0.8 \times$ 左右；再经物镜放大大约 $1.34 \sim 1.6 \times$ 。电子枪为自给栅偏压式，由发叉式钨丝阴极、栅极及阳极组成。交叉点直径约为 30 微米。阳极、聚光镜及物镜中心平面与感光材料间之距离分别为 45、200

及 260mm (图 3-2)

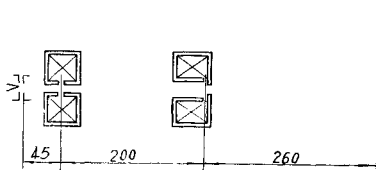


图3-2 电子光学系统图

若偏转线圈产生一均匀磁场 H ，其轴向长度为 l ，离感光材料之距离为 L ，电子在磁场 H 中的偏转角为 θ ，

则

$$\sin \theta = 0.30 \frac{Hl}{\sqrt{V_r}}$$

式中 V_r 为电子的加速电压。

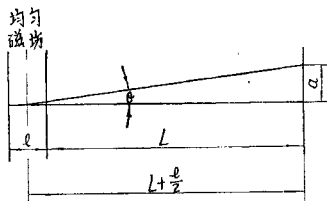


图3-3 电子束在均匀磁场 H 中的偏转

由 (图 3-3) 得:

$$\text{偏转距离} \quad a = \left(\frac{l}{2} + L\right) \tan \theta = \left(\frac{l}{2} + L\right) \sin \theta$$

$$\therefore a = 0.30 \frac{Hl \left(\frac{l}{2} + L\right)}{\sqrt{V_r}} \quad (1)$$

当 $\tan \theta = \frac{1}{15}$ 弧度时，由 $\sin \theta = \tan \theta$ 带来的误差约为 0.015%。可以认为此时

偏转距离 a 与磁场强度 H 成正比。

$$\text{今偏转距离} \quad a = 15 \text{ mm},$$

$$\text{偏转角} \quad \theta = \frac{1}{15} R = 3^\circ 48',$$

$$\text{磁场长度} \quad l = 40 \text{ mm}$$

$$\therefore \text{偏转工作距离} \quad L + \frac{Q}{2} = \frac{a}{\tan \theta} = 225 \text{ mm}$$

$$L = 205 \text{ mm}$$

要使电子束在 30×30 平方毫米范围内直接扫描, 扫描精度在 1.5×10^{-4} , 而不采用动态聚焦等复杂措施, 必须尽量减小偏转象差。所以采用了大的偏转工作距离 $L + \frac{Q}{2}$, 小的电子束孔径角 ω 和小的偏转角 θ 。

物镜的工作距离 W 显然应大于偏转工作距离 $L + \frac{Q}{2}$ 。因此制版机的物镜工作距离比电子探针、扫描电镜的要大得多, 设计时应在大工作距离 W 的条件下, 选择适当的透镜极靴间隙 S , S 与内孔直径 D 之比 $\frac{S}{D}$ 和激励参数 $\frac{V_r}{(NI)^2}$ (NI 为激励安匝数), 使得在一定的电子束斑直径内能得到足够的工作电子束流 I , 从而保证必需的扫描速度。

众所周知, 由于透镜存在球差使聚焦斑点增大。如总斑点大小 d 已定, 不存在球差时的斑点大小为 d_0 , 球差弥散圆斑直径为 d_s ,

$$d_s = \frac{1}{2} r_s \omega^3 \quad (2)$$

其中 r_s —— 球差系数

$$\text{则} \quad d = d_0 + d_s$$

可以证明, 孔径角 ω 有一最佳值 $\omega_{\text{最佳}}$ 。

$$\omega_{\text{最佳}} = \left(\frac{d}{2 r_s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

此时在直径为 d 的斑点上的电子束流为 $I_{\text{极大}}$ 。

$$I_{\text{极大}} = 0.0885 \pi^2 \beta \frac{d^{3/2}}{r_s^{2/3}} \quad (4)$$

式中 β 为电子枪亮度。

由此可知, 要 $I_{\text{极大}}$, 球差系数 r_s 就应该小。

一般文献中给出的球差系数 C_s 都是物或象在无穷远时的值。当象点在离透镜中心平面 Z_m 处, 其放大倍数为 m 时, 球差系数 r_s 与 C_s 间存在下列关系:

$$\frac{r_s}{R} = \frac{C_s(f, m)}{R} = \frac{C_s}{R} \Big|_{\substack{m=0 \\ Z=Z_0}} (1+m) \quad (5)$$

式中 $\frac{C_s}{R} \Big|_{\substack{m=0 \\ Z=Z_0}}$ 是某一虚构透镜交点处的球差系数与极靴内孔半径之比。虚构透

镜的焦平面与实际透镜的象平面 Z 重合 (图 3-4), 此二透镜的几何参数 $\frac{S}{D}$, S 是相同的。

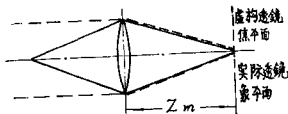


图3-4 实际透镜(实线——)和虚构透镜(虚线——)

定义透镜工作距离 W 等于下极靴端面离工件的距离,

$$\text{工作距离 } W = Z_m - \frac{S}{2}$$

其中 Z_m —透镜中心平面至虚构透镜焦平面之距离, 也就是透镜中心至工件的距离, 则工作距离 W 与透镜球差系数 C_s 之比

$$\frac{W}{C_s} = \frac{Z_m}{C_s} - \frac{S}{\frac{C_s}{R}} \quad (6)$$

工作距离 W 与透镜内孔半径 R 之比

$$\frac{W}{R} = \frac{Z_m}{R} - \frac{S}{D} \quad (7)$$

$\frac{W}{C_s}$ 、 $\frac{Z_m}{C_s}$ 、 $\frac{W}{R}$ 及 $\frac{Z_m}{R}$ 是激励参数 $\frac{V_r}{(NI)^2}$ 及 $\frac{S}{D}$ 的函数。根据 Karch 等给出的透镜参数, 可以求得它们之间的关系, 见 (图 3-5, 图 3-6)。由曲线可知, 当 $\frac{V_r}{(NI)^2}$ 在 0.008~0.021 时有一极大值 $\frac{W}{C_{s\text{极大}}}$; $\frac{V_r}{(NI)^2}$ 在 0.007~0.010 时 $\frac{Z_m}{C_s}$ 有一极大值 $\frac{Z_m}{C_{s\text{极大}}}$, 其值随 $\frac{S}{D}$ 而异。详见表 (一)。 $\frac{W}{R}$ 值一定时与不同 $\frac{S}{D}$ 相对应的 $\frac{W}{C_s}$ 及 $\frac{V_r}{(NI)^2}$ 值, 列在表 (二) 中。由此可见, 要得到最大的 $\frac{W}{C_{s\text{极大}}}$ 值, $\frac{S}{D}$ 应尽可能小。此时 $\frac{W}{R}$ 值分别在 0.46~1.52 之间。

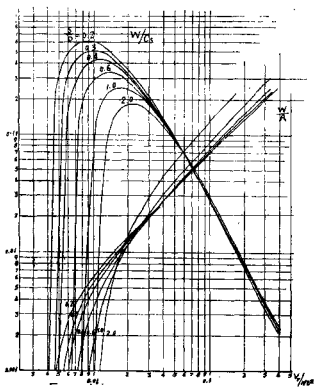


图3-6 透镜工作距离 W 和球差系数 C_s 之比 $\frac{W}{C_s}$ 及与极靴孔半径 R 之比 $\frac{W}{R}$ 在不同 $\frac{S}{D}$ 值和透镜激励参数 $\frac{(NI)^2}{V_r}$ 间的关系

表(一) 不同 $\frac{S}{D}$ 值时, $\frac{W}{C_s}$ 极大与 $\frac{V_r}{(NI)^2}$ 及 $\frac{W}{R}$ 之间的关系

$\frac{S}{D}$	$\frac{W}{C_s}$ 极大	$\frac{V_r}{(NI)^2}$	$\frac{W}{R}$
0.2	0.605	0.0081	0.46
0.3	0.505	0.0098	0.52
0.4	0.426	0.0115	0.59
0.6	0.331	0.0135	0.64
1.0	0.245	0.0160	0.75
2.0	0.184	0.0210	1.52

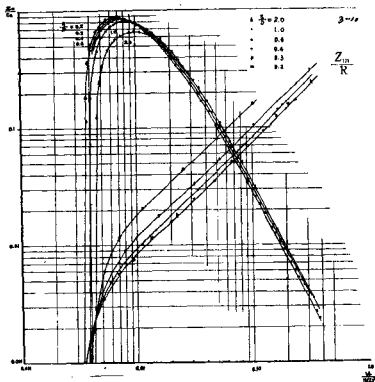


图 3-6 透镜中心平面至焦点距离 Z_m 与球差系数 C_s 之比 $\frac{Z_m}{C_s}$ 及与内孔半径 R 之比 $\frac{Z_m}{R}$ 在不同 $\frac{S}{D}$ 值和透镜激励参数 $\frac{V_z}{(NI)^2}$ 间的关系。

表(二) 透镜工作距离 W 与内孔半径 R 之比相对工作距离 $\frac{W}{R}$ 一定,

$\frac{S}{D}$ 不同时的 $\frac{W}{C_s}$ 及 $\frac{V_z}{(NI)^2}$ 值

参数 S/D	1		2		3		4		10		15		20	
	$\frac{W}{C_s}$	$\frac{V_z}{(NI)^2}$	$\frac{W}{C_s}$	$\frac{V_z}{(NI)^2}$	$\frac{W}{C_s}$	$\frac{V_z}{(NI)^2}$	$\frac{W}{C_s}$	$\frac{V_z}{(NI)^2}$	$\frac{W}{C_s}$	$\frac{V_z}{(NI)^2}$	$\frac{W}{C_s}$	$\frac{V_z}{(NI)^2}$	$\frac{W}{C_s}$	$\frac{V_z}{(NI)^2}$
0.2	0.475	0.0148	0.210	0.030	0.122	0.043	0.072	0.058	0.0130	0.150	0.0057	0.230	0.0034	0.36
0.3	0.400	0.0160	0.200	0.030	0.120	0.043	0.072	0.058	0.0145	0.145	0.0062	0.220	0.0038	0.29
0.4	0.360	0.0170	0.190	0.031	0.118	0.044	0.072	0.058	0.0160	0.140	0.0068	0.210	0.0040	0.28
0.6	0.300	0.0180	0.180	0.031	0.115	0.044	0.077	0.058	0.0175	0.133	0.0078	0.200	0.0048	0.26
1.0	0.245	0.0188	0.185	0.029	0.130	0.0398	0.092	0.050	0.0230	0.116	0.0115	0.170	0.0070	0.22
2.0	0.187	0.0175	0.178	0.025	0.155	0.0310	0.126	0.038	0.0440	0.080	0.0235	0.115	0.0150	0.15

在短的相对工作距离 $\frac{W}{R} < 2$ 的情况下，取小的 $\frac{S}{D}$ 是合适的。但当工作距离 W 很大，极靴孔半径 R 因机械结构等原因又不能取得太大，即当相对工作距离 $\frac{W}{R}$ 不能太小而 $\frac{W}{R} \geq 4$ 时，与此相反，取大的 $\frac{S}{D}$ 可得到大的 $\frac{W}{C_s}$ 值，也就是在工作距离 W 一定时，球差系数 C_s 值较小。

在我们的情况下，透镜工作距离 $W = 255\text{mm}$ ，为了使透镜的尺寸不致过大，选内孔半径 $R = 17.5\text{mm}$ ，则 $\frac{W}{R} = 14.55$ 。与不同 $\frac{S}{D}$ 值相对应的 $\frac{W}{C_s}$ 及 $\frac{V_r}{(NI)^2}$ 值列在表(三)中。

表(三) 相对工作距离 $\frac{W}{R} = 14.55$ 时，对应的 $\frac{V_r}{(NI)^2}$ ， $\frac{W}{C_s}$ ， C_s 及 S 值

$\frac{S}{D}$	$\frac{V_r}{(NI)^2}$	$\frac{W}{C_s}$	C_s	S
0.2	0.220	0.0062	40.5	7
0.3	0.217	0.0066	38.6	10.5
0.4	0.206	0.0070	36.5	14
0.8	0.194	0.0080	31.9	21
1.0	0.164	0.012	23.2	35
2.0	0.112	0.024	11.1	70

由此可见， $\frac{S}{D} = 0.2 \sim 0.6$ 之间， C_s 值相差不多， $\frac{S}{D}$ 值增大时， C_s 变小。

鉴于总体设计考虑，倒立式镜筒的下方应留有足够空间便于在更换灯丝时翻出电子枪头；上方还需装一台 $7 \times \sim 160 \times$ 连续变倍的双目显微镜以便电子束斑点聚焦等，因而镜筒长度受到一定限制。考虑机械结构、操作方便及所允许的球差系数 C_s 等因素，我们取 $\frac{S}{D} = 0.3$ ，此时球差系数 $C_s = 38.6$ 米，极靴间隙 $S = 10.5$ 毫米。透镜中心离工件之距离 $Z_m = 260.5$ 毫米。

当电子束斑点直径 $d = 10\mu$ 时，物镜之放大倍数 $m = 1.35 \times$ ，由公式(5)可得球差系数 $r_B = 90.6$ 米。由公式(3)得最佳孔径角 $\omega_{最佳} = 3.8 \times 10^{-3}$ 弧度。为了改变电子束孔径角，我们在物镜极靴间隙 S 中装一可调活动光阑，视工作需要可以随时插入不同的光阑孔。

根据 Liebmann 的资料计算出电子透镜的光学数据。物镜及聚光镜的参数列在表(四)中

表(四) 聚光镜及物镜的参数(加速电压 30 千伏)

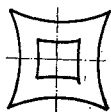
参 数	透 镜	聚 光 镜	物 镜
$\frac{S}{D}$		0.6	0.3
S(mm)		4.8	10.5
D(mm)		8	平均直径 $\bar{D}=35$ 上孔直径 $D_1=50$ 下孔直径 $D_2=20$
NI(安匝)		1450~1740	560~710
N(匝)		1330	1040

三、电子束扫描偏转线圈

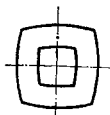
扫描偏转线圈的精度直接影响着电子束扫描图案的质量。如果偏转线圈的磁场分布是枕形的(图 3-7 a)则引起桶形畸变(图 3-7 b),即电子束的偏转角度 θ 与激励电流 I 不成正比,而 $\frac{\Delta\theta}{\Delta I} < 1$;反之,若磁场分布是桶形的,则为枕形畸变,一般“+”字形线圈产生桶形场。为了保证偏转角 θ 与电流 I 之间的线性关系,应该得到一均匀场,这时需要将线圈绕组做成余弦分布如(图 3-8),

即

$$n(\alpha) = \cos \alpha$$



(a) 磁场分布枕形



(b) 扫描时变桶形

图 3-7 偏转场及其畸变

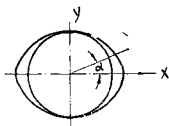


图 3-8 偏转线圈的余弦分布

这里 $n(\alpha)$ 是绕组匝数随角度 α 的分布函数。要完全满足余弦分布是十分困难的。通常采用半集中分布的方法,也就是把整个绕组分成几段。我们在有机玻璃圆棒上按一定的角度铣出 24 个槽(图 3-9)。每对 X, Y 偏转线圈分为二组,每组又分为三段。线圈绕制应该平整均匀, X, Y 二对绕组互相垂直,每一对的二组也要分布对称。由于加工

及绕制精度有限，在试验过程中发现扫描图案仍可能存在畸变。应根据实际情况修改每段绕组的匝数。因此，匝数不宜过少，否则就很难调整。另一方面，由于偏转线圈的电感直接影响到扫描偏转放大器的频宽，所以要求电感小，匝数少。实际采用的匝数见（图3-9）

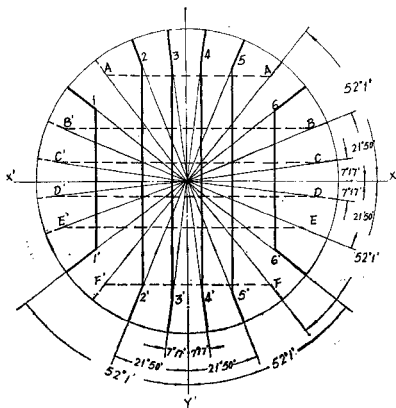


图3-9 偏转线圈的绕组分布
 X方向 AA', BB', CC', DD', EE', FF' (虚线)
 Y方向 1', 2', 3', 4', 5', 6' (实线)
 每段 5 匝

四、萤光材料

用光学显微镜直接观察直径小于 10μ 的电子束斑点的聚焦情况及其扫描轨迹的主要问题是寻找一种分辨率 δ 高、发光强度大、制造方便并易于获得面积大的萤光材料。

表（五）列出了几种有代表性的萤光材料的性能

表(五)

几种荧光材料的性能

参 数 材 料	发 光 强 度 E (相对)	分 辨 率 $\delta(\mu)$	质 量 因 素 $\frac{E}{\delta^2}$
铀玻璃	0.003	2	1
ZnS 单晶	0.05	2	20
$\frac{\text{ZnS}}{\text{CdS}}$ 多晶	1	40	1

一般多晶荧光材料发光强度很高,但分辨率低;单晶材料分辨率高,可惜发光强度太小。国外曾研制了几种高分辨率的荧光材料,但制造很困难。近年来激光器得到了蓬勃发展,激光晶体亦日趋完善。我们将红宝石($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$)、钹玻璃、掺钹的钇铝石榴石 $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (简称 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$)等激光材料,磨成厚 $0.2\sim 1\text{mm}$ 的薄片,二面抛光、用光学显微镜作透射观察。红宝石是一种比较成熟的激光材料,可以制成直径大于20毫米,其激光波长为 6943\AA 。在电子束激发下亦发出深红色光。可以初步满足要求。钹玻璃比红宝石更易于制造,产生 1.06μ 的红外激光。在直径为 30μ ,束流为 $\sim 10^{-9}$ 安的电子束激励下发出很强的橙色光;弱激励时发出弱淡蓝色光。其缺点是在电子束轰击下易于疲劳损坏,弱激励时发光强度低。掺钹的钇铝石榴石YAG是一种高效率的激光材料,近年来发展极快。它发出 1.06μ 的红外激光,室温时效率 η 可达 $0.2\sim 0.6\%$ (红宝石为 0.1%)。在电子束轰击下还发出波长为 $\lambda_{\text{最大}}=4007\text{\AA}$ (紫色)、 4358\AA (蓝紫色)及 5250\AA (绿色)的可见光,在 293°K ,波长为 $0.39\sim 0.5\mu$ 及 $0.5\sim 0.6\mu$ 时,效率可分别达 2.5% 及 4% 。由于其效率高,人眼对 5300\AA 的绿光的光谱灵敏度比 6900\AA 的红光要高近百倍,即使在日间的环境光下,斑点直径为 $10\mu\sim 20\mu$,束流为 10^{-9} 安培数量级的电子束激发时,能见到一明亮的浅绿色斑点,比红宝石等单晶要亮得多。由于YAG的热导率高,熔点高,在电子束轰击下亦不易损坏。因此我们认为 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 亦是一种良好的荧光材料。其缺点是制造比较困难。我们现用直径为 24mm 的红宝石及 $35\times 13\text{mm}^2$ 的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 薄片作为荧光材料。

五、电子束显示记录材料

近年来显示技术飞速发展,电子束显示记录方法也日益增多。表(六)列出了一些电子束显示记录材料的特性。

高分辨率银盐、光致抗蚀剂分辨本领很高,但不能实时显示,需要显影等操作;液晶屏的分辨本领尚达不到10微米;热塑料需用特殊光学系统纹影仪观察。酸敏变色片(酸敏指示剂—含卤素聚合物薄膜)可以实时显示和记录线宽约10微米的电子束扫描图形,灵敏度较高(10^{-7} 库仑/厘米 2)。它是在涤纶基片上涂复一极薄的导电层,再

表(六) 电子束显示记录材料

材 料	性 能	分辨率	感光度 (库仑/厘米 ²)	注
高分辨率银盐材料		1—2 μ	10 ⁻⁹ (15KV电子束)	不能实时显示
光致抗蚀剂 KPR, KTFR, A-Z1350		1 μ	10 ⁻⁹ (15KV电子束)	同上
液晶		~30 μ	~10 ⁻⁹ (15KV电子束)	可实时显示存储和擦除图象
热塑料		~10 μ	>5×10 ⁻⁴	需用纹影仪显示
铁磁		>100 μ	~1	
静电		>50 μ		
无机电子束变色材料如KCl; Na ₂ Al ₃ Si ₃ O ₂₄ B ₂		决定于电子束直径		可实时显示、记录及擦除图象
酸敏变色片		~10 μ	~10 ⁻⁷	可实时显示记录图象

涂一层由酸敏指示剂和卤素聚合物粘合剂组成的膜(指示剂均匀地分散在整个含卤素聚合物中)见(图3-10)。我们以酸敏变色片作为检测显示材料,正式制版时则用银盐。

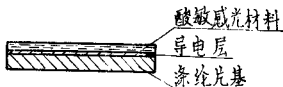


图3-10 酸敏变色感光片

六、电 源 系 统

所有电器线路包括 30 千伏高压电源都采用了晶体管。分成七个插件装在总机架内。

供给偏转线圈电流的偏转放大器要求线性度很高,为万分之一左右,零点漂移小于 1 毫伏/30 分钟,输出±5 伏,频宽>20 千周,是一电流放大系数近万倍的运算放大

器。极易产生高频寄生振荡。我们用大功率低频硅管 3DD2 及 3DD6 作为功率放大级，其截止频率 $f_c = 10$ 兆周，减少了产生寄生振荡的可能性。此外，选用 BG-304 对管作第一级差分放大器并以高稳定稳压二极管作参考电压标准来减小零点漂移。

七、调试中的几个问题

调试中的主要矛盾是扫描精度及图形规整问题。经过近千次试验，“实践、认识、再实践、再认识，……”，基本上解决了精度及克服了图形不规整的现象。主要有：

(1) 扫描图案出现枕形或梯形畸变，根据实际情况改变线圈绕组分布（图 3-9）；
(2) 图形不规整（表七之 (8), (10), (11), (12), (19), (20), (21) 等），主要是由于偏转磁场因线圈存在电感而需要一定的建立时间，并受到附近铁磁材料的感应及磁滞影响。采用静电偏转可以克服这些缺点，但会使偏转象差增大，这里采用了增加等待时间，单方向扫描图形，适当编制计算机程序，减低扫描频率，屏蔽扫描磁场等方法基本解决了这些问题（详见表七）。

(3) 静电干扰。电子束扫描轨迹不仅由偏转磁场控制，而且还受通道中杂散静电场的干扰。特别是在束控板上加一电压使电子束偏转了一大角度（这时电子束不能投射到感光材料上而处于“断”状态），如果有绝缘物存在便会充电、产生一干扰场。当束控板再恢复零电位（“通”状态）而绝缘物尚未放电完毕，则将影响电子束的轨迹而降低扫描精度。（表七之 15）因此，应该把通道附近的绝缘物都用金属屏蔽起来，镜筒内保持高度清洁。

(4) 感光材料的静电积累（表七之 16, 17, 18）

当电子束在绝缘感光层上扫描时，静电积累会引起图案变形。感光层（如明胶、酸敏变色层）与基板间必须涂一导电膜。特别是图案复杂，或同一版上连续重复扫描几种图案，以检验套版精度时，尤为显著。变色层外再蒸涂一导电膜后效果更好。铬版上涂敷电子束快速感光胶（北京化工总厂试制的 PVFM 胶等）时，因其本身导电，故未发现静电积累现象。

(5) 扫描图案绝对尺寸的变化，会影响套刻精度。显然加速电压及偏转电流应该保持在一定的稳定度内，但是，当装电子枪灯丝时，离栅极孔的距离很难保持精确不变，为达到最佳亮度，栅偏压必须作相应的调整，灯丝电位因而电子束的能量即随之而变，导致电子束偏转灵敏度的变化。我们用光学显微镜通过视窗观察荧光材料上的电子束位置，改变偏转放大器的放大倍数来预先校正，从而基本上控制了扫描图案的绝对尺寸。

(6) X、Y 方向扫描线不垂直（表七之 2）。这在作选择布线时是一个很严重的问题，因为要和原来的一次布线套刻，而对于制粗缩版，则可以自身为标准，所以能容许一定的不垂直度。

二方向扫描线不垂直的主要原因是 X、Y 二对偏转线圈产生的磁场不正交。提高线圈骨架的机械加工精度并不总是有效的，因为绕制线圈时也会产生误差。一个简单而经

济的办法是采用补偿法。即在 Y 偏转线圈上再绕一与 X 偏转线圈并联的补偿绕组，调节电流方向及串接电阻 R 的数值就可以改变产生 X 偏转的磁场方向及大小，从而使 X, Y 二个偏转场互相垂直。(图3-11)。

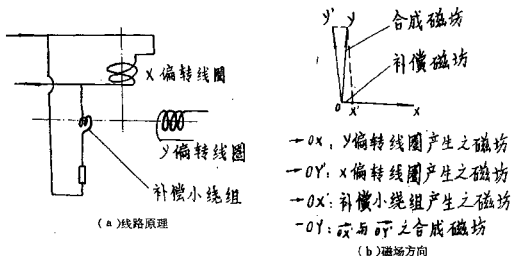


图3-11

如果中心的 X, Y 扫描线 (X, Y 轴线) 已正交，而边缘的仍不垂直 (表七之 (4))，则是由于各段绕组不呈平面对称，应提高线圈精度；

表(七) 各种图形畸变及其消除方法


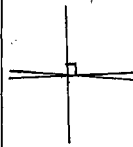
图 形	现 象	原 因	解 决 办 法
(1) 	扫描线呈波浪形 (50周)	附近有电源变压器 及大电流交流线， 接地不妥等。	屏蔽电源变压器，交 流线远离镜筒，改善 接地。
(2) 	X、Y扫描线不垂 直	偏转线圈骨架及绕 线精度不够。	在Y偏转线圈上再绕 一与X偏转线圈并联 的补偿小绕组，使 二个偏转场互相垂直 (图3-11)

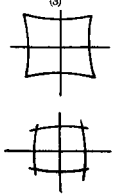
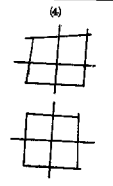
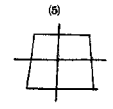
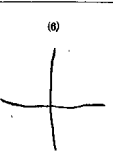
图 形	现 象	原 因	解 决 办 法
<p>(3)</p> 	<p>偏转畸变 边缘扫描线呈枕形 (应为正方形)</p> <p>桶形</p>	偏转畸变	<p>采用半集中余弦分布 马鞍形线圈, 通过实 验确定线圈绕组分布 (图3-9)</p>
<p>(4)</p> 	<p>边缘扫描线为不规 则的四边形 (应为正方形)</p> <p>(经磁场补偿后一 边可为直角)</p>	<p>(1)偏转线圈不对称 一线圈架加工及线 圈绕制精度不够。</p> <p>(2)镜筒有剩磁</p>	<p>(1)提高线圈架加工及 线圈绕制精度 (2)采用电补偿</p> <p>镜筒退磁</p>
<p>(5)</p> 	边缘扫描线呈梯形 (应为正方形)	偏转线圈不是平面 对称	<p>(1)提高线圈骨架加工 精度及线圈绕制精 度。 (2)用电补偿法</p>
<p>(6)</p> 	中心扫描线弯曲	<p>(1)线圈不呈平面对 称 (2)线圈架中心屏蔽 筒不对称 (3)偏转磁场未建立 起来时电子束已开 始扫描</p>	<p>(1)提高线圈精度 (2)改用对称屏蔽筒 (3)增加等待时间, 待 磁场建立后电子束开 始扫描</p>

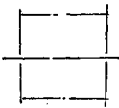



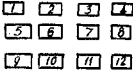



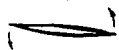



图 形	现 象	原 因	解 决 办 法
(7) 	扫描线中心断裂	数模转换在轴中心点有大跳变	减低电子束扫描频率或提高数模转换器开关特性。
(8) 	小方块图案入口线联接不好	偏转磁场未完全建立时电子束已开始扫描	(1)增加等待时间,待磁场建立后电子束开始扫描 (2)提高偏转放大器频宽 (3)减少偏转线圈时间常数
(9) 	小方块入口处有一小斜线,方向与束控不工作时相同	束控通断特性不好,脉冲上升时间太长	改进束控放大器前沿
(10) 	入口第一条线有位移(增加磁场等待时间亦不能消除)	扫描线圈外壳铁磁材料有磁滞	(1)减少铁磁材料磁滞回线的影响 (2)延迟触发电子束快门信号
(11) 	大跳步后小方块间距离变短	同第 8 项	同第 8 项
(12) 	按计算机程序相连的小方块间连接不上	同第 8 项	同第 8 项 编程序时增加图案间搭接
(13) 	小方块包络呈不规则曲线	偏转放大器漂移	提高偏转放大器稳定度,减少零点漂移

图	形	现	象	原	因	解	决	办	法
	04		图案在X、Y方向同时有位移		(1)加速电压不稳定 (2)灯丝在烧断前,发射不稳		(1)提高高压稳定度, (2)更换新灯丝(并预热二十分钟)		
	05		分划线向一方向漂移(束控不工作时无此现象)		束控板及镜筒内有绝缘脏物,在电子束由束控板控制通断时充电,产生静电排斥		(1)屏蔽镜筒内绝缘物及清洗镜筒 (2)减少杂散电子束		
	06		靠边缘小方块(应为正方形)成对称平行四边形		感光板不导电、静电排斥		(1)感光层明胶与玻璃之间涂一导电层 $S_{n}O_{2}$, $1K\Omega/cm^2$ (2)用变色片时,在涤纶基片上涂Cu I导电膜,变色层外再蒸一层铝。 (3)用铬版及PVFM电子束感光胶等		
	07		单个小方块呈梯形(应为正方形)		同06, 磁场未建立		同06 增加等待时间		
	08		三次图案在一块板上重复曝光,中心能套上,四周向边缘排斥		同06		同06		

图 形	现 象	原 因	解 决 办 法
	S形扫描时, 奇数行与偶数行间有规律性错位	扫描线圈外壳铁磁材料的磁滞回线等影响	(1)减少铁磁材料的磁滞回线的影响 (2)单方向扫描图形
	扫描长度随扫描频率增大而变短	扫描线圈外壳铁磁材料的频率响应	(1)减低扫描频率 (2)减少铁磁材料的影响
	来回扫描线不重合和扫描方向随扫描频率而变	扫描磁场与物镜磁场间相互作用	屏蔽扫描磁场, 减少与物镜磁场间相互作用
	图案突然跳动或增减图形	计算机故障	修理计算机
	几块版的图形绝对尺寸变 (1)X、Y方向同时变 (2)X或Y方向变	(1)加速电压变化 (2)偏转放大器零点漂移	(1)提高加速电压稳定度 (2)减小偏转放大器零点漂移 (3)用光学显微镜校正偏转灵敏度
	图案颜色深浅不均	(1)灯丝变形 (2)感光层不均、显影不均	(1)调整灯丝 (2)涂匀感光层及显影均匀

八、试 验 结 果

1974年5月由中国科学院三局、北京市科技局、中国人民解放军兰字826部队、中国科学院自动化研究所及有关使用单位参加的总结会上测量了在总结期间制出的套刻精度检验图案: $32 \times 28 \text{mm}^2$ 范围内的2000个三极管芯。在同一块版上依次重覆扫描①基极; ②发射极和集电极; ③三个极的欧姆孔。图(3-12)是各次曝光图案; 图(3-13)是三次重覆曝光后的图案。认为:

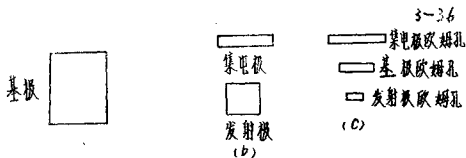


图3-12

- a 第一次曝光图案单元在 $32 \times 28 \text{ mm}^2$ 内重复2000个。
 b 第二次曝光图案单元在 $32 \times 28 \text{ mm}^2$ 内重复2000个。
 c 第三次曝光图案单元在 $32 \times 28 \text{ mm}^2$ 内重复2000个。

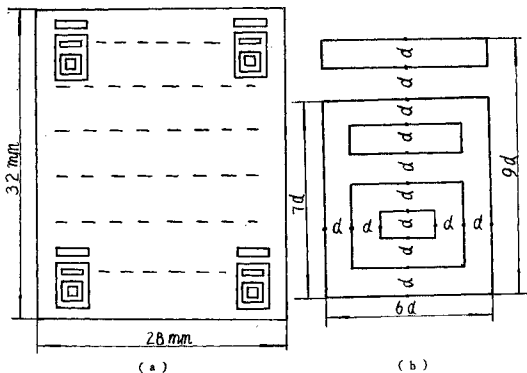


图3-13

- a) 40行60列共2000个三极管管芯依次在 32×28 毫米²范围内重复三次曝光版示意图。
 b) 图(a)中三极管管芯单元套版图案。各管芯、各板间的距离及欧姆孔的宽度 d 为80微米。

①扫描面积达到 $32 \times 28 \text{ mm}^2$ ，位置精度在10微米以内，可以满足一般集成电路制版工作的需要；

②与同类仪器相比，结构紧凑，体积小，操作方便，易于推广。

DB-1型电子束制版机正在科学院自动化研究所制作微型计算机所需的128(16×8)位存储器(静态)粗缩版,其中包括6管存储单元128个、移码器、读取电路、倒相管等;管子总数约1100个,线条宽度75~100微米;套刻精度25微米,面积25×25毫米²;精缩十倍后面积为2.5×2.5毫米²,套刻精度为2.5微米。现已制成粗缩版,经分步重覆照相缩小10倍后,套刻精度可基本满足制版工作的要求。76年初用氮化硅新工艺初步做出了16×4位存储器。目前正在进一步试验中。

九、结 束 语

遵循伟大领袖毛主席“**要狠抓一下雷达,光学仪器。要减轻重量,提高质量,增加数量**”的教导,我们在试制过程中力求做到“质量好,价钱便宜,结构简单,使用方便,安全可靠。”通过二年多的实践,DB-1型电子束制版机达到了原设计指标,可基本满足一般二次选择布线及一次版的要求,也发现了原设计中许多不足之处:如铁磁材料磁滞回线等对扫描精度的影响;电气部件布局不够合理等,有待改进。

这台电子束制版机亦可用于自动描绘高精度图形;加光学投影成像系统后可用作大屏幕实时显示。若能增大制版面积到80×80毫米²,精度保持在10微米以内,再用分步重覆照相机精缩10倍,则有可能用来制造非周期性大规模集成电路的一次版。

工作过程中,我们与中国人民解放军兰字826部队及中国科学院自动化研究所,科学院化学研究所密切合作,并得到了物理研究所,北京市分析仪器厂、东城电子机械厂、化工总厂、有色金属研究院、综合元件厂、700厂、清华大学、北京大学等单位的大力支援,特此致谢。

注:参考文献从略

电子束大屏幕显示仪

中国科学院北京科学仪器厂 显示仪组

一、前 言

随着科学技术特别是火箭、卫星和航空事业的发展，在遥控、遥测技术中需要把结果迅速地显示出来，给控制中心提供目标的精确座标和参数。为了适应这方面的工作需要，中国科学院北京科学仪器厂、四机部 1028 所、中国科学院化学研究所共同协作，在科仪厂 DB-1 型电子束制版机的基础上改制成一种电子束大屏幕显示仪（图 4-1）。它是一种画面大、清晰度高、亮度大的实时显示仪，并能长期记录下目标的座标轨迹及有关参数，供以后分析、存档。

这台仪器可供指挥控制中心、交通管制部门作为势态分析、指挥控制、运行调度的显示设备。

二、结 构 原 理

1. 仪器设计指标：

屏幕上画面： 2×2 米²

分 辨 率：1500~2000 行，屏幕上最细线条小于 1 毫米

座 标 精 度：优于 1×10^{-2}

屏幕上照度：在一般室内的照度下，能看清屏幕上的图案。

显示方式：实时显示、长期记录。

2 结构原理概述：

仪器由电子光学系统（镜筒）、光学投影系统、真空系统、电气系统和电子计算机等组成（图 4-2）。

电子光学系统产生一束直径为 10 微米左右的细而强的电子束，加速电压为 30KV。遥测系统测得运动目标的各种参数经电子计算机综合处理，得出目标的轨迹和有关参数的数字量，再经数模转换器变成电压量供给本机偏转放大器，驱动扫描线圈，使电子束在酸敏变色感光片上扫描，画出运动目标的轨迹和写出有关参数。电子束以随机方式扫描，可同时记录多批目标。当记录的座标位置需要跳动时，电子计算机发出命令通过

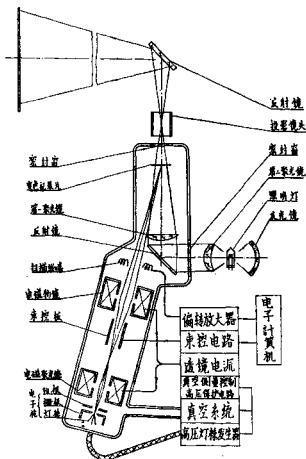


图4-2 电子束大屏幕显示仪原理图

束控开关电路及其偏转板可以准确地通断电子束。

光学照明系统发出的强光源对酸敏变色片上的图案进行照明，再经一投影镜头放大到银幕上，银幕上还可同时投影地图或座标图。

真空系统由一台机械泵和油扩散泵串联运行，保证可拆式镜筒的真空度优于 1×10^{-4} 。有一机械组合阀门，使真空系统的四种状态（“工作”、“预抽”、“换片”及“停止”）能方便地相互转换。另外，配有真空测量、保护系统。当真空度因某种原因变坏时可立即切断高压供电，保证安全运转。

电气系统主要有30KV的高压及电子枪灯丝发生器、两个电磁透镜电源、束控开关电路、偏转放大器、真空计电源及控制电路等。为了保证电子束扫描的座标精度，要求偏转放大器的漂移和线性度均优于 $1 \times 10^{-4}/30$ 分钟。30KV高压和物镜电源的稳定度优于 $2 \times 10^{-4}/30$ 分钟。

电子计算机根据具体控制目标的需要进行选配。要求给出的束控信号电压为5V。

数模转换器输出信号为 $-5V \sim +5V$ ，精度为 $2 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-4}$ 。

三、电子光学系统

电子光学系统的设计和结构与DB-1型电子束制版机是相同的（详见前文）。系统由电子枪、两个磁透镜、束控偏转板和磁偏转线圈组成。由发叉式钨丝阴极、栅极和阳极组成的三极式电子枪，在阳极附近形成直径约为 30μ 的电子束交叉斑点，经电磁聚光镜缩小10倍左右，最后由电磁物镜把缩小的斑点聚焦在酸敏变色感光片上，形成 10μ 左右的电子束斑点，物镜放大约1.6倍。两对磁偏转线圈完成电子束X、Y方向扫描，扫描面积为 $30 \times 30 \text{mm}^2$ 。为了保证整个扫描面积范围内的座标精度优于 1×10^{-3} ，我们采用了大的偏转距离（大于210mm）和小的偏转角（小于 4° ）。

电子束大屏幕显示器要求电子束在酸敏变色片上记录时有足够的电流密度，保证图象在强光源投影时有良好的对比度。因此，所用光阑孔直径比原电子束制版机的要求大些。当然这会象差和图象分辨率。

在电子光学镜筒上加光学投影系统，我们是采用垂直照明，电子束倾斜扫描的方法。若用同轴照明就必须要在光学聚光镜上开孔，让电子束通过，光损失大，而且难于做到均匀照明。然而电子束倾斜扫描又会带来偏转象差和扫描图形的梯形失真，因此倾斜角不能太大。另一方面，为了两者互不影响，倾斜角也不能太小，否则会使光学照明系统的焦距过长。权衡结果，又根据机械结构的可能，我们采用了y方向倾斜 15° ，把第一聚光镜和反光镜放在电子光学系统的真空镜筒里，聚光系统的焦距为340mm。由于只有y方向倾斜，而x、y方向的扫描角度仍保持在 4° 以内，其扫描误差可以忽略。因此扫描图形的梯形失真校正和动态聚焦电路就可考虑用线性放大器，只取y方向扫描信号这一个自变量。

为了便于调焦，用了一台7X~160X的光学显微镜来直接观察电子束的斑点聚焦状态和扫描轨迹，这就要求有一种发光强度大和分辨本领高的荧光材料。多晶荧光材料的发光强度高，但分辨本领低；一般单晶材料分辨本领高，可惜发光强度太低。国外曾报导了几种高分辨本领的荧光材料，未见实用而制造又很困难。近年来激光器得到了蓬勃发展，激光晶体亦日趋完善，我们对最近发展起来的高效率激光基质掺钕的钇铝石榴石 Nd^{+++} ；YAG（磨成厚0.2毫米以下的透明薄片）进行了试验，在电子束流为 10^{-8}A ，加速电压为30KV，束斑为几微米时，即使在一般白昼的室内环境下，仍能见到一明亮的蓝白色光斑。石榴石熔点高、热导率高、耐电子轰击、不易损坏、不易疲劳，是一种良好的荧光材料。缺点是制造比较困难。但可以把它的小片粘合在易于获得的大块透明材料上来使用。

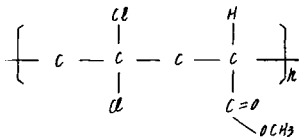
四、电子束显示记录材料

近年来显示技术飞速发展，电子束显示记录方法也日益增多。

高分辨率银盐、光致抗蚀剂分辨本领很高，但不能实时显示，需要显影等操作，液晶屏的分辨本领尚达不到10微米；热塑料需要用特殊光学系统投影仪观察。酸敏变色片（酸敏指示剂——含卤素聚合物薄膜）可以实时显示和记录线宽约10微米的电子束扫描图形。它是在涤纶基片上涂复一极薄的导电层，再涂一层由酸敏指示剂和卤素聚合物粘合剂组成的膜（指示剂均匀地分散在整个含卤素聚合物中）。

该材料在紫外光、电子束直接轰击下分解出分子量较低的卤化物，使指示剂立即改变颜色，给予人们一种直观感觉。因此一般称为酸敏变色片。

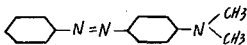
目前采用的含卤素聚合物为偏二氯乙烯——丙烯酸甲酯的共聚物。其分子式如下：



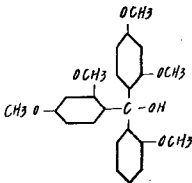
经分析该样品含氯量达55%。

酸敏指示剂为：

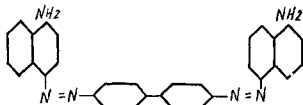
二甲苯黄：



五甲氧基红：



刚果红A:



它们的PH值均在2.0~5.0之间。

不同的酸敏指示剂产生不同的颜色，例如含有二甲基黄指示剂的卤素聚合物，轰击前后由黄色变为红色图象；五甲氧基红由无色变为紫色；刚果红A由浅红变为蓝色。

我们对科学院化学所研制的酸敏变色片进行了试验，其优点是：

1. 可以立即显示电子束扫描图案，并能记录下来；免去了一般银盐体系、曝光胶所需的显影、定影等繁琐操作；

2. 分辨本领高，可记录电子束斑直径为 10μ 左右的电子束扫描轨迹；

3. 灵敏度高： $\sim 10^{-7}$ 库仑/厘米²。

因此用酸敏变色片作为电子束大屏幕显示仪的记录材料是比较合适的。不足之处是酸敏变色片尚不能重复使用，图象在高温下有退色现象。

五、光学投影系统

光学投影系统的任务是把感光片上 $30 \times 30\text{mm}^2$ 的图象投影放大66倍左右，在屏幕上得到 $2 \times 2\text{m}^2$ 的图象。因此 10μ 的线条在屏幕上成了小于1mm的线条，人在离屏幕一米远的地方可以看清。投影镜头的分辨率必须优于50行/mm，投影距离要求在5米左右。因此我们选用了 $f = 75\text{mm}$ ， $\frac{D}{f} = 1:2$ （最好相对孔径再大些）的电影摄影镜头。

另外，要求照明光源要有足够的亮度，保证在室内能看书的情况下（照度大于10勒克斯）屏幕上的线条清晰可见。我们选用了1000W的溴钨灯作光源并在溴钨灯后面加了一个大包角的球面反射镜，以充分利用光源。通过两个玻璃聚光镜对感光片 $30 \times 30\text{mm}^2$ 的面积进行均匀照明。由于酸敏变色片对紫外线敏感，而且温度超过 80°C 时酸敏指示剂就会挥发，涤纶片基也会变形，要求对光源必须滤紫外、红外线和采取降温措施，保证连续工作半小时内升温不致太高。我们用了紫外线较少的溴钨灯，并用一循环薄水套包围灯泡进行冷却。所有透镜都用石英玻璃，以防炸裂。聚光镜和反光镜采用多层冷镀膜分别反红外和透红外，使感光片温度控制在允许范围以内。在真空中距离电子束比较近的聚光镜玻璃必须镀透光电层（如高温下喷涂一层四氧化锡）以防止电荷积累而干扰电子束的聚焦和偏转。

六、结 束 语

用电子束在酸敏变色片上记录显示是一项新技术。经过调试仪器基本上达到了原设计指标。实验证明，这是实现大屏幕显示的一个途径。由于我们缺乏经验，又加之是在DB-1型电子束制版机基础上进行改制，希望不作大的更动，因此仪器存在一些缺点和不足之处，尤其在简化结构、小型轻便和稳定可靠方面还有待进一步提高。下面就几个改进方向提出一些设想。

(1)可以把镜筒横放与水平轴有一夹角，光学投影系统沿水平轴照明、投影，并把投影镜头放在镜筒一侧。这样就能简化光学照明投影系统，还可减小电子束与光学系统之间的夹角，以减小扫描图形的梯形失真和电子光学象差。

(2)用正反面涂有两种颜色的酸敏变色片，双电子束同时从两面扫描记录，再用一个光学投影系统，就可以显示更多的目标或者作为目标识别。

(3)采用新型阴极如六硼化铷(L.B₆)和适当改进感光材料，减少真空系统的放气次数，使用钛泵提高真空度，就可考虑做成半可拆的真空系统，以简化结构、缩小体积，使用方便，工作时不用机械泵和油扩散泵。

(4)进一步提高扫描精度和扩大扫描面积，由电子计算机控制就可用来绘制微缩地图或其它大面积精密图案等。

注：参考文献从略

电子束加工机的电子光学设计

黄 兰 友

一九六六年三月

一台电子束加工机的电子光学设计要按具体要求而定。这里我将谈一些一般性的概念，一些有用的经验公式及近似公式。讨论将限于磁透镜。

(一) 电子透镜设计中自变数的选择

电子光学的一个基本方程是旁轴电子轨迹方程

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{\eta}{8V} B_0^2 r = 0 \quad \left(\eta = \frac{e}{m} \right) \quad (1)$$

以透镜中某一长度 L 为长度单位，以某一点的场强譬如峰值 B_0 为 B 的单位，并令

$$\frac{z}{L} = \xi \quad \frac{r}{L} = \rho$$

$$\frac{B_0(\xi)}{B_0} = \beta(\xi)$$

则式(1)可写为

$$\frac{d^2 \rho}{d\xi^2} + \frac{\eta B_0^2 L^2}{8V} \beta^2(\xi) \rho = 0 \quad (2)$$

假如一个电子光学系统的绝对尺寸 L 、加速电压 V 及绝对场强 B_0 有了变化，但是保持

1) 几何比例不变，这时分布函数 $\beta(\xi)$ 也不会变

2) 无量纲参量 $\frac{\eta}{8V} B_0^2 L^2$ 不变

这样的系统可称为相似的系统。因为对这样的系统式(2)的解是不变的。也就是说在相似系统中电子轨迹是相似的。

在一般电子透镜中，上下极靴端面是平面，相距为 S 。上下极靴孔径分别为 D_1 及 D_2 。唯一影响场分布的几何比例参量是 $\frac{S}{D}$ 及 $\frac{D_2}{D_1}$ 。其中

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (3)$$

是上下孔径的平均值。Liebmann 曾经指出 $\frac{D_1}{D_2}$ 对透镜的光学性能影响不大。(Dugas 等人计算过 D_1 、 D_2 不等时光学性能的修正) 因此唯一要考虑的几何比例是 $\frac{S}{D}$ 。Liebmann 把

$$k^2 = \frac{\eta}{8V} B_0^2 L^2$$

叫作励磁参量。他取 B_0 为场分布中的峰值。取 L 为极靴孔的半径 R ，以 k^2 及 $\frac{S}{D}$ 为自变量给出了一系列的透镜光学常数的曲线。这些曲线是最全的，也是国际上最常用的。不幸的是 k^2 并不是一个合理的参量。因为 k^2 中的峰值场强不是一个预先能知道或容易测量的量。它与电参量 NI 有关又与几何参量 $\frac{S}{D}$ 有关。这使得 k^2 在应用时很不直观。物理概念往往搞错。

其实在 B_0 及间隙场强 B_F 之间是一个只与 $\frac{S}{D}$ 有关的比例关系。在某一任意长度 L 及间隙宽度 S 之间也是如此。因此 $B_0 L \propto B_F S$ 。比例常数只与 $\frac{S}{D}$ 有关。因 $B_F S = \mu_0 H_F S$ ，又因 $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = H_F S = NI$ ，故 $B_F S = \mu_0 NI$ 或 $B_0 L \propto \mu_0 NI$ 。所以

$$\frac{\eta}{8V} B_0^2 L^2 = g \frac{(NI)^2}{V}$$

其中 g 是一个只与 $\frac{S}{D}$ 有关的量。这样电参量 $\frac{(NI)^2}{V}$ 就与几何参量 $\frac{S}{D}$ 分开了。所有的透镜光学参数被 $\frac{(NI)^2}{V}$ 或 $\frac{V}{(NI)^2}$ 及几何比例参量 $\frac{S}{D}$ (忽略 $\frac{D_1}{D_2}$ 的影响) 唯一所定。可以证明不仅对一些从旁轴方程算出的常数(如焦距等)是如此，对像差系数也是如此。 $\frac{V}{(NI)^2}$ 是一个纯电的量，其意义很直观。Liebmann 后期也改用了此参量。

因为这里牵涉到的一些“相似”的透镜。因此被求的光学常数都必须以无量纲的形式出现，以下我们将用 $\frac{S}{D}$ 及 $\frac{V}{(NI)^2}$ 作为自变量， $\frac{S}{D}$ 以及 $\frac{V}{(NI)^2}$ 相等的透镜被称为相似的透镜。

(二) 物 镜 焦 距

一般电子光学书中有一个弱透镜焦距公式

$$\frac{1}{f_0} = \frac{\eta}{8V} \int B^2(z) dz = \frac{\eta B_0^2 L^2}{8V} \frac{1}{L} \int \beta^2 d\xi$$

或

$$\frac{L}{f_0} = \left[g \int \beta^2 d\xi \right] \frac{(NI)^2}{V}$$

这儿 $g \int \beta^2 d\xi$ 是纯 $\frac{S}{D}$ 的函数。上式可以写成

$$\frac{f_0}{L} = A \frac{V}{(NI)^2} \quad (4)$$

其中 A 是一个 $\frac{S}{D}$ 的函数。在相似的透镜之间当透镜的绝对尺寸 L 放大时，焦距也按同样比例变长。

当透镜逐渐加强 $\frac{(NI)^2}{V}$ 增大时，弱透镜近似越来越不准。我们将 $\frac{f_0}{L}$ 假设为一个 $\frac{(NI)^2}{V}$ 的幂级数

$$\frac{f_0}{L} = A \frac{V}{(NI)^2} \left(1 + \frac{B}{A} \frac{(NI)^2}{V} + \frac{C}{A} \frac{(NI)^4}{V} + \dots \right)$$

其中弱透镜近似作为第一项，级数中不出现奇次项，因为我们知道将线圈电流反向时（ NI 变负）焦距是不变的。忽略高次项则得

$$\frac{f_0}{L} = A \frac{V}{(NI)^2} + B \quad (5)$$

可以严格计算的，以及外国作者用数值计算法得出的焦距曲线都证明此公式不但对弱透镜适合，（它比弱透镜近似公式更准确得多）而且可以应用于很强的透镜工作状态，甚至当焦点缩到透镜场的中心部分时都能用。

式(5)中的 A 与 B 都是 $\frac{S}{D}$ 的函数。我们知道，当极靴间隙 S 很小时，透镜场分布将与 S 无关，焦距将与 D 成正比，即 $\frac{f}{D}$ 将与 $\frac{S}{D}$ 无关，因此我们可以假定在小 $\frac{S}{D}$ 范围内

$$\frac{f_0}{D} = \sigma \left(a \frac{V}{(NI)^2} + b \right)$$

σ 一个为 $\frac{S}{D}$ 的幂级数

$$\sigma = 1 + C \left(\frac{S}{D} \right)^2 + \dots$$

忽略高次项并以 Liebmman, Lehz 等外国作者用模拟法及数值计算法得出的曲线确定常数 a 、 b 及 C 可得

$$\frac{f_0}{D} = \sigma \left[32 \frac{V}{(NI)^2} + 0.17 \right] \quad (6)$$

$$\sigma = \left[1 + 0.47 \left(\frac{S}{D} \right)^2 \right] \quad (7)$$

此公式在 $0 \leq \frac{S}{D} \leq 1$, $0.001 \leq \frac{V}{(NI)^2} \leq \infty$ 范围内误差不超过 4%。可惜在 $\frac{S}{D} > 1$ 时误差迅速增加。在 $\frac{S}{D} = 2$ 时已达到 30%。一个误差稍大一些 (10%) 但适用于任何 $0 \leq \frac{S}{D} \leq \infty$ 的公式是

$$\frac{f_0}{\sqrt{S^2 + D^2}} = 31 \frac{V}{(NI)^2} + 0.19 \quad (8)$$

在 $\frac{S}{D} \ll 1$ 时此公式可化为与式 (6) 相近似的公式。从物理概念出发, 可以设想, 当 $\frac{S}{D} \rightarrow 0$ 及 $\frac{S}{D} \rightarrow \infty$ 时, 场分布分别与 S 及 D 无关, 故当 $\frac{S}{D} \rightarrow 0$ 时 $f_0 \propto D$, 当 $\frac{S}{D} \rightarrow \infty$ 时 $f_0 \propto S$ 。式 (8) 正具有此性质。

透镜中心平面至焦点的距离一般以 z_0 表示。在透镜较弱焦距较长时可以近似地把中心平面看为主面, 这时 $z_0 \approx f_0$ 。随透镜电流增加焦距缩短 z_0 与 f_0 之差逐渐扩大, 可以把 $\frac{z_0}{f_0}$ 以 $\frac{(NI)^2}{V}$ 的幂级数表达

$$\frac{z_0}{f_0} = 1 + a \frac{(NI)^2}{V} + \dots$$

其中第一项是弱透镜极限。以上公式与国外作者的曲线相比, 证明在一般应用中只取两项就足够了, 但第一项取 1.1 更为准确。其原因很难解释, 只能作为经验接受, 并在具体应用时注意 $\frac{z_0}{f_0}$ 不会超过一。上式中的 a 是一个 $\frac{S}{D}$ 的函数。用前作者的曲线可定出

$$\frac{z_0}{f_0} = 1.1 - \sigma \frac{(NI)^2}{V} \quad (9)$$

$$\sigma = \left(25 + 4 \frac{S}{D} \right) \times 10^{-4} \quad (10)$$

以 $\frac{4z_0}{f_0}$ 表达误差, 在 $0 \leq \frac{S}{D} \leq 2$ 及 $0.005 \leq \frac{V}{(NI)^2} \leq 0.025$ 的常用范围内此公式的误差不大于 3%。

在设计电子束加工机时需要知道 f_0 以计算放大 (或缩小) 倍数, 为了把工件放在焦点上也需要知道焦点位置 z_0 。

(三) 其它透镜焦距 f_1

以上谈的是物镜焦距及焦点位置。所谓物镜焦点就是平行入射的电子与轴相交的

“实”焦点，在透镜很强时，这焦点处于场内，电子交轴以后继续在场内运动。电子轨迹在出场以前还会改变方向，出场以后的轨迹的延线与轴相交之点构成一个虚焦点，虚焦点与虚主面之间的距离叫投影镜焦距。除去有实物放在实焦点附近的透镜如电子显微镜的物镜或电子束加工机中的靠近工件的透镜（也可以叫物镜）其他的透镜一般都把整个透镜场全利用上。（如电子显微镜中的投影镜或者电子束加工机中的第一缩小透镜）因此必须作为投影镜设计。

在透镜很弱时焦点处于场外，上述两种焦距是相等的。随透镜增强，焦点向场内缩，投影镜焦距 f_1 就越来越脱离 f_0 。 f_1 缩短的速率比 f_0 慢。在很强的透镜工作状态下与轴平行入射的电子会在场中心与轴相交。因为场的后半部对电子的作用跟前半部完全相等，所以在电子出射时轨迹又会与轴平行。这时 $f_1 = \infty$ （虽然 f_0 很短）总之随励磁增加， f_1 先下降到一个最小值，然后又增加直至无穷。把 f_1 的极值称为 f_m ，对应的安匝数称为 $(NI)_m$ 。Liebmann 曾经指出过以 f_m 及 $(NI)_m$ 规一化的曲线即 $\frac{f_1}{f_m}$ 与 $\frac{(NI)}{(NI)_m}$ 的关系曲线与 $\frac{S}{D}$ 无关，是通用的。 f_m 及 $(NI)_m$ 分别是 $\frac{S}{D}$ 的函数。Durandea 等人指出连 $\frac{S}{D} = \infty$ （均匀场）透镜的数据（可以严格计算）都落在上述曲线附近。所以可以用均匀场模型推算出来的公式作为一般投影镜焦距的经验公式

$$\frac{f_1}{f_m} = \frac{0.897}{\frac{(NI)}{(NI)_m} \sin 2.029 \frac{(NI)}{(NI)_m}} \quad (11)$$

投影镜焦距的几个重要环节是

$$(NI) \leq 0.7(NI)_m \text{ 或 } \frac{V}{(NI)^2} \geq 2 \frac{V}{(NI)_m^2} \text{ 时 } f_1 = f_0$$

$$(NI) = (NI)_m \quad f_1 = f_m \quad (12)$$

$$(NI) \approx 1.5(NI)_m \text{ 时 } \frac{V}{(NI)^2} \approx 0.42 \frac{V}{(NI)_m^2} \quad f_1 = \infty$$

f_m 及 $\frac{V}{(NI)_m^2}$ 可以用以下经验公式计算

$$\frac{f_m}{D} = 0.47 \sqrt{0.62 + \left(\frac{S}{D}\right)^2} \quad (13)$$

$$\frac{V}{(NI)_m^2} = \left(47 + 7 \frac{S}{D}\right) 10^{-4} \quad (14)$$

式(13)及(14)在常用的 $0 \leq \frac{S}{D} \leq 4$ 范围内比作者给出的更为准确，误差不大于 5%。

(四) 球 差 系 数 C_s

磁透镜的球差系数可用以下积分计算

$$C_s = -\frac{\eta}{96V} \int_{z_0}^{z_1} \left(\frac{2\eta}{V} B_z^2 + 5B_z'^2 - B_z B_z'' \right) y_{(z)}^4 dz \quad (15)$$

式中的 $y_{(z)}$ 是一条以 45° 角度与轴在像面上相交的电子轨迹的径向坐标。

在透镜很弱时式中第一项可以忽略。此外在弱透镜状态下物面像面都离透镜很远， y 在透镜附近近似等于像距，所以也是很大。相对说来 y 在场内的变化很小所以可以从积分符号中取出

$$C_s = \frac{\eta B_0^2}{96VL} y^4 \int (5\beta'^2 - \beta\beta'') d\xi \quad (16)$$

其中

$$\beta = \frac{B_z}{B_0}, \quad \beta' = \frac{dB_z}{d\xi}, \quad \xi = \frac{z}{L}$$

积分符号里的量只与场的相对分布有关，所以是一个 $\frac{S}{D}$ 的函数，故

$$C_s \propto \frac{\eta B^2 L^2}{96V} \frac{y^4}{L^3} \propto \frac{(NI)^2}{V} \frac{y^4}{L^3} \quad (17)$$

因为 y 近似等于像距，所以球差系数不是一个单一的量，一般书上给出的值都是指当像距等于焦距时(物距等于无穷)的球差系数。这时

$$y = f_0 \\ C_s \propto \frac{(NI)^2}{V} \frac{f_0^4}{L^3}$$

又因在透镜弱时 $\frac{f_0}{L} \propto \frac{V}{(NI)^2}$ 故

$$\frac{C_s L^2}{f_0^3} \text{ 仅为 } \frac{S}{D} \text{ 的函数} \quad (18)$$

或

$$\frac{C_s}{f_0} = A \left[\frac{V}{(NI)^2} \right]^2 \quad (19)$$

与以前一样，设

$$\frac{C_s}{f_0} = A \left[\frac{V}{(NI)^2} \right]^2 \left[1 + \frac{B}{A} \frac{(NI)^2}{V} + \frac{C}{A} \frac{(NI)^4}{V^2} + \dots \right] \quad (20)$$

以国外作者曲线求出 A, B, C 。结果表明 $B \approx 0$, A 与 C 与 $\frac{S}{D}$ 的关系很小，而各作者之间数据零散性很大，有时达 30% 以上。在一般设计中对象差系数的准确度要求并不高。由于上述原因进一步辨别 $\frac{C_s}{f_0}$ 与 $\frac{S}{D}$ 的关系是不值得的。一个误差不大于 20% 的经验公式是

$$\frac{C_s}{f_0} = 3000 \left[\frac{V}{(NI)^2} \right]^2 + 0.7 \quad (21)$$

可用于 $0 \leq \frac{S}{D} \leq 2$; $0.005 \leq \frac{V}{(NI)^2} \leq \infty$

球差会使一个点成像为一个弥散斑,其半径在高斯面上是 $C_s \alpha^3$ 。在最小弥散圆的平面上斑点的直径

$$d_s = \frac{1}{2} C_s \alpha^3 \quad (22)$$

对于电子束加工机,后者较更符合实际。

(五) 色差系数 C_C

由于色差(电源不稳)所引起的弥散圆斑的半径是

$$\delta_C = C_C \alpha \frac{dV}{V} \quad (23)$$

或

$$\delta_C = C_C \alpha 2 \frac{dI}{I}$$

其中 $\frac{dV}{V}$, $\frac{dI}{I}$ 分别是加速电压及透镜电流变化的百分比。如果稳压稳流措施允许的话,应该把 δ_C 压到比正常的电子束斑点小几倍以下。

可以一般证明,色差系数 C_C 在弱透镜状态下等于焦距 f_0 。与球差系数相同,以 $\frac{C_C}{f_0}$ 表达色差系数是一个很好的型式。它与 $\frac{S}{D}$ 几乎无关。 $\frac{C_C}{f_0}$ 变化范围很小,只会从弱透镜的 1 变到很强透镜时的 0.7。在透镜设计中,知道以下几个工作点就够了。

$$\begin{aligned} 0 < \frac{V}{(NI)^2} < 0.01 & \quad \frac{C_C}{f_0} = 0.7 \rightarrow 0.8 \\ 0.01 < \frac{V}{(NI)^2} < 0.04 & \quad \frac{C_C}{f_0} = 0.8 \rightarrow 0.9 \\ 0.04 < \frac{V}{(NI)^2} < \infty & \quad \frac{C_C}{f_0} = 0.9 \rightarrow 1 \end{aligned} \quad (24)$$

(六) 像散焦距差 Δf_a

透镜材料不均匀,光路通道不干净引起静电充电或者机械加工的不对称性等都会引起像散,使本来聚为一点的焦点变为两条相距 Δf_a 互相垂直的焦线,焦线的长度是

$$a = 2 \Delta f_a \alpha \quad (25)$$

原来以许多像点组成的一个圆斑点现在由于每个点变为一条线而变为椭圆。其长轴与短轴之差正好是焦线之长 a (见图 5-1)

在电子束加工机中对电子束斑的椭圆度是有要求的,所以必须控制 Δf_a 。前面提到的几个像散的来源中除机械加工的影响外,其他的不好计算。对机械加工精度的影响 Archard 曾经做过数值计算,并绘出了曲线。可以用以下的公式较准确地近似上述作

者的曲线

$$\frac{\Delta f_s}{\delta_s} = \left(100 + 290 \frac{S}{D}\right) \frac{V}{(NI)^2} + 0.6 \frac{S}{D} \quad (26)$$

其中

$$\delta_s = R_{\max} - R_{\min}$$

代表透镜极靴孔的椭圆度。R 是孔的半径。除椭圆度以外其他加工误差也会引起像散。根据 Archard 上下极靴端面的不平度引起的像散与椭圆度引起的像散是差不多大小的。所以应该也可以用式(26)计算。上下端面的不平度或上下孔的不对中所引起的像散很小,以一般的精度加工就可以满足要求。由于种种难以控制的因素如材料、充电等,另外有时电子枪本身就存在着像散,所以要求高一些的电子束加工机应该配有消像散器。

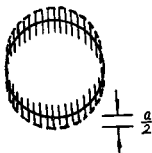


图5-1

(七) 物距像距都不在无穷时的像差系数

像差系数与物距像距有关,一般给出的系数都是在焦面上计算的值即或者是物距或者是像距被假定为无穷远。若两者都不在无穷,按理来说应该重新计算。不过经常这种情况是在透镜工作状态不是很强的同时出现的。对于弱透镜有些计算公式而且这些公式可以近似地应用于较强的透镜上。

(1) 球差系数

式(15)中的 $y_{(z)}$ 在弱透镜情况下是一个常数,可以取出积分符号。在第四节中我们假定了物距在无穷远,所以 $y = f_0$, 若物距不在无穷远,则 $y = l$ 等于像距。这时球差系数 C_s' 与前种情况相比

$$\frac{C_s'}{C_s} = \left(\frac{l}{f_0}\right)^4 \quad (27)$$

因此知道物距为无穷时的球差系数 C_s (见式(21)), C_s' 就可以算出来。不过式(27)只适用于弱透镜。

(2) 色差系数

色差本来是由于像距的变化而产生的。设像距为 l , 当加速电压波动 ΔV 时, 像距移动 Δl 。在固定的像面上产生的模糊圆斑的半径是

$$\begin{aligned} \delta_0 &= \alpha \Delta l & l &= f_0 \\ \delta_c &= \alpha \Delta f_0 & l &= f_0 \end{aligned}$$

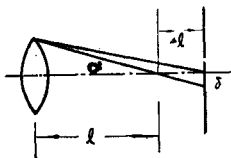


图5-2

根据色差系数的定义

$$\delta_{01} = C_G' \alpha \frac{\Delta V}{V} \quad l \neq f_0$$

$$\delta_{02} = C_G \alpha \frac{\Delta V}{V} \quad l = f_0$$

故

$$C_G' = \frac{\Delta l}{\Delta V} V$$

$$C_G = \frac{\Delta f_0}{\Delta V} V, \quad \frac{C_G'}{C_G} = \frac{\Delta l}{\Delta f_0}$$

实际上 l 的变化是由 f 的变化所引起的, 用透镜公式

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{n} = \frac{1}{f_0} \quad (28)$$

可算出

$$\frac{\Delta l}{l^2} = \frac{\Delta f_0}{f_0^2} \quad (29)$$

所以可得

$$\frac{C_G'}{C_G} = \left(\frac{l}{f_0} \right)^2 \quad (30)$$

其他地方若需把焦距差换算为像距差 (或物距差) 可以用类似的方法。(如换算像
物焦距差为像距差) 此外把物距差换算为像距差, 根据式 (28) 可用 $\frac{\Delta l}{l^2} = \frac{\Delta n}{n^2}$ 即

$$\frac{\Delta l}{\Delta n} = \left(\frac{l}{n} \right)^2$$

(八) 电子束加工机物镜设计的原则

物镜的若干像差或者可以控制或者可以补偿, 唯有球差不能完全消除。当然可以用小光栏把孔径角缩得很小, 使球差不起作用, 但这样作会截去大量的电子束电流。

在工件面上的电子束斑 (直径为 d) 可以看成是几何成像的斑点 (直径为 d_0 , 是光源直径乘以缩小倍数) 与球差弥散斑 (直径为 d_s) 之叠加。(如图 5-3)

$$d = d_0 + d_s \quad (31)$$

把光源平面及光栏平面分为若干个环状区域, 在工件面上的总电子束电流是每个区域的贡献之和。把光源缩小一个环, d_0 也跟着缩小一个环。把光栏缩小一个环, d_s 也跟着缩小一个环。不论 d_0 或 d_s 的缩小都会带来电子束电流之减小。如果总斑点大小 d 已定, 把 d_0 或 d_s 两者之一缩得很小, 显然都是不

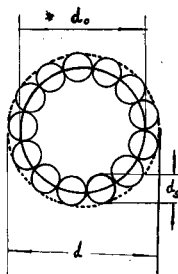


图 5-3

合算的。有一个最佳的情况，详细计算可以证明这时

$$d_0 = \frac{3}{4}d \quad (32)$$

$$d_s = \frac{1}{4}d$$

最佳情况下的孔径角

$$\alpha = \left(\frac{d}{2C_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (33)$$

这时的电流是能落在直径为 d 的斑点中最大的电流

$$I = 0.0885\pi^2 R \frac{d^{\frac{3}{2}}}{C_s^{\frac{3}{2}}} \quad (34)$$

其中 R 是电子枪的亮度。只有在电子枪的各个参量（偏压，栅极孔径，灯丝高度）设计得当时它才能达到理论值

$$R = \frac{j_0}{\pi} \frac{eV}{kT}$$

T 与 j_0 是电子枪灯丝温度及发射电流密度。

根据式 (34) 物镜的球差系数越小功率密度就越大。我们拿弱透镜情况来说明一下影响球差的几个因素。在弱透镜状态下式 (21) 及式 (8) 是

$$\frac{C_s}{f_0} = 3000 \left[\frac{V}{(NI)^2} \right]^2, \quad \frac{f_0}{\sqrt{S^2 + D^2}} = 31 \frac{V}{(NI)^2}$$

或

$$C_s = \frac{3.1 f_0^3}{(S^2 + D^2)}$$

对减小球差系数起作用的是 f_0 。但往往由于对工作距离的要求焦距不能缩得很短，只好在加强 $\frac{(NI)^2}{V}$ 的同时放大 $(S^2 + D^2)$ 以保持一定的 f_0 。这原则即使在强透镜状态下也是对的。我们定义工作距离为透镜下极靴端面至工件的距离。

$$l = z_0 - \frac{S}{2}$$

要求工作距离长一些就必须把 $\frac{S}{D}$ 设计得小一些，确定 NI 后最小的 S 被材料饱和和磁通密度所定。透镜最容易饱和的部分是铁心的根部。当 $S \ll z_0$ 时， $l \approx z_0$ 。
根据式 (21) 及 (9) 可知

$$\frac{C_s}{z_0} = \frac{3000 \left[\frac{V}{(NI)^2} \right]^2 + 0.7}{1.1 - \sigma \frac{(NI)^2}{V}}$$

此比值在很大及很小的 $\frac{V}{(NI)^2}$ 两端都会大起来。在

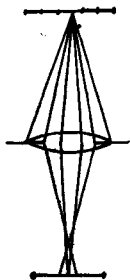


图 5-4

$$\frac{V}{(NI)^2} \approx 0.01$$

时有一个最小值。设计在这一点最为合算。不过如果这样设计工作距离不够长的话，则不必强调 $\frac{C_s}{z_0}$ 取最小值。

(九) 电子枪——透镜的合轴要求

由于电子枪灯丝不易准确定位，电子束往往是歪的。我们区别以下两种情况：①光源在轴上，电子束与轴倾斜一个角度，②电子束通过透镜中心，但光源不在轴上，离轴距离为 ρ (如图 5-5、5-6) 若 α_0 是电子束本身的张角，(一般在 10^{-3} 数量级) 必须

$$\gamma \ll \alpha_0$$

才能使电子束中心最亮的部分通过透镜中心。因此必须针对此要求采取合轴措施。采取措施后只可能存在第二种情况。这种情况不影响斑点的亮度。不过当透镜电流变化时斑点会(在散焦的同时)围绕轴旋转，从而产生斑点的移动。

磁透镜使电子像的旋转角度在不太小的 $\frac{V}{(NI)^2}$ 时可以用以下公式计算

$$\psi = 0.18 \frac{NI}{\sqrt{V}}$$

当透镜电流起变化时，旋转角度的变化是

$$\frac{\Delta\psi}{\psi} = \frac{\Delta I}{I}; \quad \Delta\psi = \frac{\Delta I}{I} \psi$$

因斑点离中心距离是 $M\rho$ ，($M < 1$ 是缩小倍数) 故斑点的移动

$$\Delta S = \Delta\psi M\rho = \frac{\Delta I}{I} \psi M\rho$$

斑点移动量与直径之比

$$\frac{\Delta S}{d} = \frac{\Delta I}{I} \psi \frac{M\rho}{d} = \frac{\Delta I}{I} \psi \frac{\rho}{D}$$

D 是光源(交叉点)的直径。色差对电源稳定度的要求一般在 $\frac{\Delta I}{I} \approx 10^{-4}$ 。以 $\frac{V}{(NI)^2} = 0.015$ 计算即 $\psi = 1.47$ 弧度，那么

$$\frac{\Delta S}{d} \approx 1.47 \times 10^{-4} \frac{\rho}{D}$$

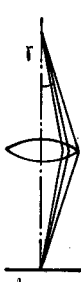


图5-5



图5-6

如果我们要求由于电源不稳所引起的斑点移动量比其直径小一百倍，则定位情况必须是

$$\frac{\rho}{D} = \frac{100}{1.47} = 68$$

即光源离轴距离允许比光源直径大 68 倍。以 $D = 30\mu$ 计算，则 $\rho = 2\text{mm}$ ，这个要求是非常松的。

如果要求在合轴过程中人为地调透镜电流时斑点作散焦聚焦的动作而没有明显的移动，那么 $\frac{dI}{I}$ 就要取得大一些。比如取 $\frac{dI}{I} = 10^{-3}$ ，那么 $\rho = 0.2\text{mm}$ 。这样的要求在机械加工可以保证的范围之内。其实图 5-5 和图 5-6 两种不合轴的效果可以互相抵消。所以实际加工精度要求比这个还能更低得多。

补 充 说 明 (1978年4月)

本文是 1966 年 3 月份在北京召开的一次电子束加工机技术交流会上的一次报告。文章中有些是一般性概念。不是什么新鲜东西。写入文章是为了不很熟悉电子光学的读者的方便，或者是为了说明一种观点。例如我们认为用 k^2 作为激励参量不如用 $\frac{V}{(NI)^2}$ 看问题概念清楚。根据电子枪——透镜合轴要求的估计我们当时认为象电子束加工机这样的电子光学系统只需要一个电子枪倾斜就足够满足合轴要求。其他都可以用机械加工保证，后来的实践证明这是对的。

文章中的 f_0 , C_s , z_0 , df_s , $\frac{f_m}{D}$, 和 $\frac{V}{(NI)_m^2}$ 的公式是自己的东西。当时的电子束加工机（后来作电子束曝光机用）的设计用了这些公式。具体计算是由杨志杰同志作的。杨志杰等同志后来试制成功的第二台电子束曝光机的设计中也用了这些公式。实践证明这些公式是适用的。不过最近利用了 1966 年以来国际上新发表的数据将这些公式作了些修改。与这儿有关的公式如下：

$$\frac{f_0}{D} = 30\sqrt{1.1 + \left(\frac{S}{D}\right)^2} \frac{V}{(NI)^2} + 0.22\sqrt{0.56 + \left(\frac{S}{D}\right)^2}$$

$$\frac{f_m}{C} = 0.46\sqrt{0.63 + \left(\frac{S}{D}\right)^2}$$

$$\frac{V}{(NI)_m^2} = \left[48 + 6.6\left(\frac{S}{D}\right)\right]10^{-4}$$

在 $0.2 \leq \frac{S}{D}$ 之间这些公式的误差都不超过 2%。

最后一点要说明的是：除物镜以外的透镜可以用“最短焦距公式”。

具有最短焦距的电磁电子透镜

黄 兰 友

在设计一个电子光学系统的透镜时需要考虑的因素当然很多,但也有时候要求将透镜的焦距设计得最短。磁电子透镜的最短焦距值最终被极间场强所限。在某一额定的间隙场强下的最短透镜焦距及与其对应的激励值在文献中有曲线可查。这儿用简单的推导以公式的方式绘出这些结果。概念更清楚,计算更方便。

(一) 物 镜

一个物镜的焦距可以用以下公式表达

$$\frac{f_0}{\sqrt{1+\left(\frac{D}{S}\right)^2}} = \left[31 \frac{V}{(NI)^2} + 0.19 \right] S \quad (1)$$

其中 D 及 S 分别为极靴孔径及间隙宽度, V 是相对论修正后的加速电压

$$V = V_0 [1 + 0.978 \times 10^{-6} V_0] \quad (2)$$

NI 是安匝数。对于任何 $\frac{S}{D}$ 的透镜, 要焦距短必须减小 S 或加大 NI 。不过在 S 及 NI 及间隙场强 H_F 之间存在着以下关系:

$$H_F = \frac{4\pi NI}{S} \quad \text{〔奥斯特〕} \quad (3)$$

注意这儿用的单位是 S (mm), I (A), V (V)。要 S 小 NI 大必然 H_F 要高。不过间隙场强最高不得超过铁磁材料的饱和值。一般还要留有一定的余地。在规定 H_F 为某一额定值下减小 S 与增加 NI 是矛盾的。倒底那一个合算就看式(1)的变化趋势。

将 S 利用式(3)作为 NI 的函数代入式(1); 得

$$\frac{f_0}{\sqrt{1+\left(\frac{D}{S}\right)^2}} = \frac{4\pi\sqrt{V}}{H_F} \left[31 \frac{V}{NI} + 0.19 \frac{NI}{\sqrt{V}} \right] \quad (4)$$

显然存在着一个 $\frac{f_0}{\sqrt{1+\left(\frac{D}{S}\right)^2}}$ 的最小值。微分式(4)并求极值可得:

$$\frac{V}{(NI)_{\min}^2} = \frac{0.19}{31} = 0.00613 \quad (5)$$

这时对应的 S 根据式(5)、(3)应是

$$S = 161 \sqrt{\frac{V}{H_P}} \quad (6)$$

这儿 H_P 是额定的间隙场强。将式(5)代入式(1)得最短物镜焦距

$$f_{\text{Omin}} = 0.38 \sqrt{S^2 + D^2} \quad (7)$$

这儿 S 已不是任意可变的参量了, 但 D 还可以任意选。显然 D 小 f_{Omin} 也小。但当 D 小到一定程度后再小下去也就不起什么作用了。如: 当 $\frac{S}{D} = 2$, 即 $\frac{D}{S} = 0.5$ 时, $D^2 = 0.25 S^2$, D 再小也就起不了多大作用了。

检查一下式(4)会发现在 $\frac{V}{(NI)^2} = \frac{V}{(NI)_{\min}^2}$ 附近曲线是很平坦的。在 $\frac{V}{(NI)^2}$ 为 0.004 至 0.01 之间 $\frac{f_0 H_P}{V} \sqrt{1 + \left(\frac{D}{S}\right)^2}$ 之差只有 3%。因此在某些设计中若要节约 NI 完全可以取更小些的 NI 值, 同时当然必须取更小些的 S 和 D 值以保持 H_P 不变和 $\frac{S}{D}$ 不变。反过来若需要大些的 S 和 D 值以满足另一些设计要求可以采用大些的 NI 值(保持 H_P 不变)。在一定范围内这些变动不会使最短焦距增长多少。

式(1)本身的误差在 $0.6 \leq \frac{S}{D} \leq 2$ 之间为 7% 左右。这儿之所以先用它作推导是因为推导出来的结果简单明了。其精度作为一个初步估计完全可以。若需要更高一点的精度则可以用以下物镜公式作为出发点:

$$f_0 = 30 \sqrt{S^2 + 1.1D^2} \frac{V}{(NI)^2} + 0.22 \sqrt{S^2 + 0.56D^2} \quad (8)$$

在 $0.2 \leq \frac{S}{D} \leq 3$ 及 $0.003 \leq \frac{V}{(NI)^2} \leq 0.05$ 范围内此公式的误差不超过 3%。用与上面同样的方法可得出最短物镜焦距时的激励

$$\frac{V}{(NI)_{\min}^2} = \frac{0.22 \sqrt{1 + 0.56 \left(\frac{D}{S}\right)^2}}{30 \sqrt{1 + 1.1 \left(\frac{D}{S}\right)^2}} \quad (9)$$

最短焦距值是

$$f_{\text{Omin}} = 0.44 \sqrt{S^2 + 0.56D^2} \quad (10)$$

其中的 S 必须满足式(3), 即:

$$S = \frac{4\pi NI_{min}}{H_p} \quad (11)$$

其中的 H_p 是额定的间隙场强。 NI_{min} 是由式 (9) 规定的安匝数。

(二) 其他透镜

除物镜以外的其他透镜的焦距的变化规律都象电子显微镜的投影镜焦距一样，所以经常就被称为投影镜焦距。最短投影镜焦距比最短物镜焦距更有实际意义。因为经常物镜设计需要考虑的因素比较多。顾不上焦距是否最短，而其他许多透镜如电子显微镜的投影镜，中间镜，第一聚光镜，或扫描电子显微镜和电子束曝光机中的聚光镜等往往都希望设计得使焦距尽量短，这样才能使镜筒短而放大倍数（或缩小倍数）尽量高。

投影镜焦距的变化规律是：随 NI 的增加它开始与物镜焦距一样地变短。但在某一较强的激励下焦距会出现一个最小值，以 f_m 表示。与此对应的 NI 值以 NI_m 表示。当 $NI > NI_m$ 时焦距反而会增加。文献曾给出一个通用的投影镜焦距公式。适用于任何的 $\frac{S}{D}$ ：

$$\frac{f}{f_m} = \frac{0.897 \frac{NI}{NI_m} \sin 2.029 \frac{NI}{NI_m}}{\frac{NI}{NI_m}} \quad (12)$$

f_m 是 S 和 D 的函数。它与绝对尺寸成正比。 NI_m 是 $\frac{S}{D}$ 的函数。 f_m 及 NI_m 可分别用以下公式计算：

$$f_m = 0.46 \sqrt{S^2 + 0.63D^2} = 0.46 \sqrt{1 + 0.63 \left(\frac{D}{S}\right)^2} S \quad (13)$$

$$\frac{V}{(NI)_m^2} = 0.0048 + 0.00066 \frac{S}{D} \quad (14)$$

或

$$\frac{\sqrt{V}}{NI_m} = \sqrt{48 + 6.5 \left(\frac{S}{D}\right)} \times 10^{-2}$$

式 (13)、(14) 的误差在 $0.2 \leq \frac{S}{D} \leq 2$ 范围内不大于 2%。

这儿必须说明一下。上面讲的投影镜焦距的最小值实际上指的是相对于透镜尺寸的最小值，也就是说是 f 与透镜尺寸之比例的最小值。在式 (12) 中是指 $\frac{f}{f_m}$ 在 $NI = NI_m$ 时出现最小值 1。但因 f_m 与绝对尺寸成正比，所以若绝对尺寸 S 及 D 小则 f 的绝对值也会小。具体地从 (13) 式看， S' 小则 f_m 也小， f 的绝对值也会小。但在规定间隙场强 H_p 为某一额定值以后， S 与 NI 之间的关系就被式 (3) 所规定。 S 小则要求 NI 小。在 $NI < NI_m$ 这一端当 NI 从 NI_m 往小里变时 $\frac{f}{f_m}$ 会大起来，但因为在 $NI \approx NI_m$ 附近 $\frac{f}{f_m}$

是一极值所以变化很慢,可是S却能与NI成正比地变小。所以在一段范围内降低NI及S能使f的绝对值减少。可以预料最短投影焦距(指绝对值) f_{min} 应出现在 $NI < NI_m$ 一端。在这一端 $\frac{f_{min}}{f_m} > 1$ 。人们可能要问:为什么不能在这基础上再加大一下NI使 $\frac{f}{f_m} = 1$;这样f岂不更小吗?答复是:绝对尺寸已定,再加大NI场强 H_p 就超过额定值了。

引入额定 H_p 下S与NI的关系,则式(13)变为

$$f_m = 0.46 \sqrt{1 + 0.63 \left(\frac{D}{S}\right)^2} \frac{4\pi\sqrt{V}}{H_p} \frac{NI_m}{\sqrt{V}} \frac{NI}{NI_m}$$

令 $\sigma = 0.46 \sqrt{1 + 0.63 \left(\frac{D}{S}\right)^2} \left(\frac{4\pi\sqrt{V}}{H_p}\right) \left(\frac{NI_m}{\sqrt{V}}\right)$ 。它是 $\frac{S}{D}$ 的函数。代入式(12),得

$$f = \sigma \frac{0.897}{\sin 2.029 \frac{NI}{NI_m}} \quad (15)$$

f的最短值出现在

$$2.029 \frac{NI}{NI_m} = \frac{\pi}{2}$$

即

$$\frac{NI}{NI_m} = 0.774 \quad (16)$$

代入式(12)

$$\frac{f_{min}}{f_m} = 1.159$$

利用式(13)得最短焦距值为

$$f_{min} = 0.533 \sqrt{S^2 + 0.63D^2} \quad (17)$$

根据式(16)及(14)得

$$NI_{min} = 77.4 \frac{\sqrt{V}}{\sqrt{48 + 6.5 \frac{S}{D}}} \quad (18)$$

注意式(17)中的S必须满足

$$S = \frac{4\pi NI_{min}}{H_p} \quad (19)$$

与物镜一样D小 f_{min} 也短(见式(17))。不过超过 $\frac{S}{D} = 2$ 也就变不了多少了。

式(15)在极值 $\frac{NI}{NI_m} = 0.774$ 附近是很平坦的。若不取f的最小值 f_{min} 而允许它比最小值大比如1%则可选用

$$\frac{NI}{NI_m} = 0.7 \quad (20)$$

与式(16)相比 NI 可节约 10%。当然这时 S 必须跟着小 10% 以保持 H_p 不变。 D 也得小 10% 不然 $\frac{S}{D}$ 就会变小, f 的增大就不至 1% 了。在这种情况下的焦距是

$$f = 0.595 \sqrt{S^2 + 0.63D^2} \quad (21)$$

$$NI = 70 \frac{\sqrt{V}}{\sqrt{48 + 6.5 \frac{S}{D}}} \quad (22)$$

同样道理, 假如在设计中希望 S 或 D 大些, 那么采用 $\frac{NI}{NI_m}$ 略大于 0.774 也不会使 f 比 f_{min} 大多少。

本文中的最短投影镜焦距公式在我厂最近的电子显微镜设计中被广泛地用于第一聚光镜、中间镜, 投影镜的设计。计算结果与查书中表格所得的结果是符合的。不过查表格法求最短焦距很烦琐, 要查许多数据, 根据给定间隙场强将许多激励参量及 S 值下的焦距列在一起进行对比才能确定最短焦距。比用公式直接计算要麻烦得多。

电子显微镜钼片光阑孔的一种加工工艺

中国科学院北京科学仪器厂 技术一室

用钼片做电子显微镜光阑的优点是清洁度高，因为它可以放在真空中加热到很高的温度进行清洗。对光阑小孔的加工，我们采用了用针刺穿钼片，然后用电解抛光的方法将孔腐蚀到规定的直径，孔径的增加可以用腐蚀的时间来控制。

(一) 针 刺

1、针和针卡子

在薄的（如厚 30μ ）未退火的钼片上扎孔，可以用质量好的绣花针或直径为 1mm 经淬火处理的工具钢（ $\varnothing 0.1$ 或 $\varnothing 0.2$ 粗柄麻花钻头废柄也可以）。尾部安装在手捻（钟表工具）的卡头上，顶部用金相砂纸（ $M20=N0.02$ ）磨成 $60^\circ-90^\circ$ 锥体（针与砂纸平面成 $30^\circ-45^\circ$ ）。为了获得较圆的针尖，磨针时需要一边用手转捻一边磨，往复几十次即可磨尖，绣花针的针尖可磨到 $R=2\mu$ 以下。每扎一次孔，针就要重磨一次。为了准确地控制针尖在钼片上的压力，最好在手捻上部装一弹簧，用弹簧的压缩量来控制针尖在钼片上的压力。（如图7-1所示）

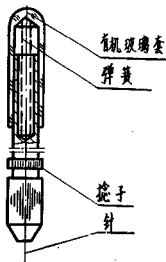


图 7-1

2、砧垫

针刺小孔不切削，完全是靠挤压的原理，将针尖部的钼片材料挤到周围去（见图7-2）。这就要求针尖部位的压力很集中，用材质硬的板做钼片下面的砧垫就有助于这个压力的集中，并能减少钼片的变形，从而防止钼片光阑孔周边的裂纹，所以普通

玻璃板做砧垫比较合适。刺孔时针要与铝片垂直，如果砧垫是反光镜，当手捻与镜子里

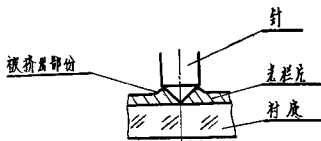


图 T-2

的投影成一直线就说明针与铝片垂直了，因此我们采用普通玻璃镜片做砧垫，效果很好。

3、针刺

光栏孔的形成最后是靠电解抛光腐蚀的，但为了能很好地掌握腐蚀开始以前的起始状态，最好将孔刺穿，针刺的目的就是在光栏片小孔的位置上形成有小孔而周围成锥度的坑。扎孔时用手压住铝片，用另一只手的食指压住手捻的上部，以拇指和中指转动（手）捻子，转十几下至二十几下铝片就扎穿，如果不透可加大压力，扎穿的孔必须小于最后光栏所要求的孔径一般扎出的孔径在 10μ 左右。

(二) 电解抛光腐蚀

4、电解抛光腐蚀的装置

针刺透的铝片，孔不会圆，孔径尺寸也不准，下一步是用电解抛光的方法将孔腐蚀圆，并达到规定的直径，用的抛光液配方如下：

硫酸	250 毫升
磷酸	1150 毫升
铬酸酐	180 克
水	350 毫升
电流密度	$1\text{A}/\text{cm}^2$ 左右
温度	室温

我们用的电解抛光装置如（图 7-3）所示，所用的电解液容器口径约为 $\varnothing 30\text{mm}$ ， 20Ω 的限流电阻是为了使电解电流稳定。电源电压固定在 20 伏。在这种条件下腐蚀约 5mm 宽的铝片，电流能稳定在 0.5A 左右。如果铝片浸入电解液后电解电流起不来，

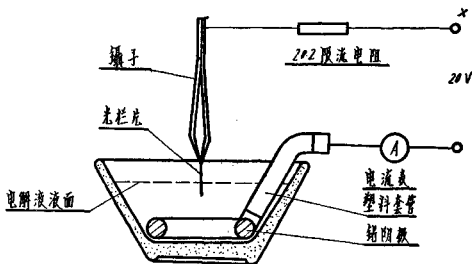


图7-3

可以将铅片的一个角沾上点水再放入电解液中，电流就会起来。在电解电流起来以前，电流可比起来后小一个数量级，腐蚀效果几乎等于零。

5、电解抛光腐蚀小孔的几个规律

①电解抛光腐蚀出来的小孔大多数都很圆，在工具显微镜下放大100倍观察不到不圆度，这是因为一般来说，小孔越腐蚀（孔）越圆。但是如果腐蚀时间过长会造成铅片腐蚀穿而报废，因此直径在 60μ 以下的光栏孔针刺的底孔要圆一些，而对 90μ 以上的光栏孔在扎出小孔后还要用粗针扩孔，然后才能电腐蚀到规定的直径，决不能全靠腐蚀大幅度的扩大孔径。

②用图7-3的装置腐蚀小孔，腐蚀速度与铅片离液的深度有很大

的关系。一个典型试验结果如（图7-4）所示，这很明显的看出，腐蚀速度在液面附近

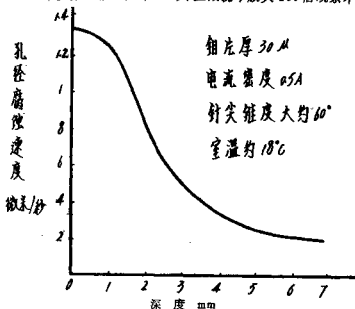


图7-4

最大，并且抛光性能好，液面以下7mm的腐蚀速度比液面附近的速度（就）几乎降低一个数量级。如果将一片铝片一直腐蚀穿透，那末首先腐蚀的部位是铝片在液面附近的部份（见图7-5）或者铝片会在液面水平上被拦腰切断。利用腐蚀速度在液面附近最快这一规律可以做多孔光栏，将要腐蚀的孔放在液面附近，其他孔处在液面之外或浸入离液面有一定的深度就不会被腐蚀或少腐蚀。

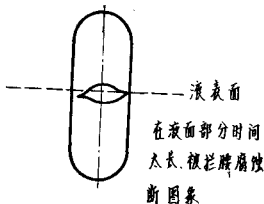


图7-5

③光栏孔径的增大与腐蚀时间基本上成线性关系。例如在一次试验中曾得出的光栏孔径的增大速度平均为 1.4μ /秒，这个数据是在液面以下约0.6mm处光栏孔的平均增长速度，而且孔径从 20μ 一直腐蚀到 60μ 速度基本保持不变。当然，铝片浸入电解液的深度不易准确地控制，因而孔径增长的速度会有误差，但总结经验，掌握规律，控制腐蚀时间和铝片离液面的深度就可以较有把握的腐蚀出规定的孔径。

（三）制作四孔光栏片的实例

在厚度为 30μ 铝片上加工四个直径为 30μ 的光栏孔（见图7-6）的工艺过程如下：

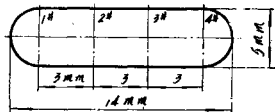


图7-6

①针扎四个孔，扎一个磨一次针。定位可以用适合的模具在孔扎以前用扎坑的方法解决。

②在电解抛光液中很快过一次（通 $0.5A$ 的电流约一秒钟），这样针孔的毛刺被腐蚀掉。

③在100倍的读数显微镜下测

量每个孔的直径，与光栏孔规定的直径比较，记下差别。

④将孔1°及孔2°放入抛光液腐蚀，将2号孔放在液面部位，腐蚀过程中将此孔在液面上下来回摆动 $\pm 1mm$ ，按预先测定好的腐蚀速度及2号孔与规定值的差别确定腐蚀时间，但应留有余地以免超差。

⑤从抛光液中取出光栏片，过一下清水，洗去抛光液，用另一杯清水再洗一下然后用过滤纸吸干铝片上的水。

⑥测量2号孔直径以确定下一次腐蚀时间。

⑦2号孔达到规定值后（一般两三次腐蚀就达到），测量1号孔（比第一次测量会

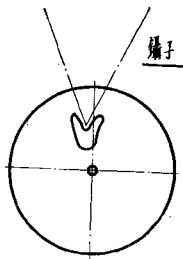
略大些)，用同样方法腐蚀1号孔，这时2号孔处在液面之外不受腐蚀。

⑥将光栏片掉过头来用同样步骤加工3号孔和4号孔。

制作这种4个孔光栏约用时间16分钟，其中孔四个孔，包括磨针时间约4分钟，腐蚀四个孔包括中间测量时间约12分钟。最后测量四个孔的孔径分别为30, 29, 30, 30(μ)，误差为 $\pm 1\mu$ 。

(四) 圆片光栏的腐蚀

有些电子显微镜不用长条光栏片而用圆片，制作方法并没有什么差别，不过由于一般圆片直径较小，容易产生如图所示的情况（见图7-7），用此方法我们曾成功的加工过圆片直径为 $\varnothing 2\text{mm}$ 孔径为 20μ 的光栏片。



圆片光栏因掌握不当，在镊子尖处被腐蚀穿透的图象。
建议：当光栏需要多次腐蚀的时候，镊子尖持的位置一定要固定在一处。

图7-7

※参考文献略

电子显微镜的发展动态

姚 骏 恩

1976年4月

一、前 言

伟大领袖毛主席指出：“任何知识的来源，在于人的肉体感官对客观外界的感觉，……”，“无数客观外界的现象通过人的眼、耳、鼻、舌、身这五个官能反映到自己的头脑中来，……”，说明了人类在认识客观世界过程中包括视觉在内的感觉的重要作用。然而人的视力是有限的，显微镜和望远镜延伸了人眼的观察能力；望远镜扩大了视距，而显微镜则使人们见到了肉眼无法见到的微观世界。十六世纪光学显微镜的出现，曾经促进了科学技术的发展；二十世纪三十年代问世的电子显微镜（以下简称电镜）使人们看到了病毒以及大小为数十埃到数埃的物体内部结构。三、四十年来电子显微学的奋斗目标，是力求从试样上得到更多的信息，以便对试样进行各种研究。主要是：

1. 观察试样中单个原子的象

提高一般透射式电镜的分辨本领至 3\AA ，试制成功分辨本领为 5\AA 的高分辨本领扫描电镜，改进试样制备技术和研究成象理论，以便直接观察大分子的结构和单个原子象。

2. 观察试样在自然状态下的形貌

(1) 发展超高压电镜，期望观察“活”细菌、有机体的活动情况以及接近块状性质的薄膜试样等；

(2) 发展扫描电镜，可以直接观察块状试样如金属断口表面的三维空间结构等；

注：本文在“电子显微镜的新发展”“物理”3-3(1974)，156的基础上，增添了近年来的发展动态，并作了适当修改。

我国的上海电子光学技术研究所和中国科学院科学仪器厂也于1965年分别制成DXA3-8型及DX-2型高分辨本领电子显微镜，点分辨本领达到了 $3\sim 4\text{\AA}$ 。

(3) 发展各种附件, 以观察试样在加温、冷却、拉伸、弯曲等过程中的形变。

3. 对试样进行综合分析

电镜与 X 光微区分析、选区衍射和俄歇 (Auger) 电子谱仪等相结合, 可在观察形貌的同时, 对试样进行微区化学成份及结构分析; 检查半导体集成电路工艺过程和寻找其失原原因等。

近年来电子显微术有了很大发展, 仅就下列几方面作一简要介绍。

二、高分辨本领透射式电子显微镜

观察试样中单个原子象是电镜工作者长期追求的目标。米勒 (Muller, 1957) 用场离子显微镜在液氢温度下获得了钨单晶针尖的单个原子象。试样必须制成针尖状, 氦在极高的电场强度 (450 兆伏/厘米) 下电离而投影成象, 因而只限于研究象钨这样可以制成针尖的金属。应用范围很窄。透射式电镜利用穿过试样 (薄膜) 的电子成象, 五十年代点分辨本领达到 10\AA 左右, 六十年代中期提高到 $3-4\text{\AA}$, 接近了理论值。可是要获得这样高的分辨本领, 对试样的要求十分苛刻, 必须制成厚度不超过数十埃的薄膜, 并减少支持膜本身的噪声。此时象的反差也不够理想。美国芝加哥大学的克鲁 (Crewe, 1970) 用超高真空高分辨本领透射扫描电镜观察到了铀和钍-BTCA 中的铀原子 ($Z=92$) 和钍原子 ($Z=90$)。日本的 H. Hashimoto (1971) 等在透射式电镜 JEM-100B 上用倾斜照明暗场法提高了象的反差, 用同样的试样也观察到了铀和钍原子。德国的托恩 (Thon 等 1972) 在西门子公司 Elmiskop 101 型电镜上用空心锥电子束照明暗场法观察到汞原子 ($Z=80$)。试样是氧化铝支持膜上的三乙酰氧汞基玫红酸 (triacetoxymercury aurine, 简称 TAMA)。所谓空心锥电子束照明暗场法 (图 8-1), 就是在聚光镜中加一环状光阑, 形成空心锥状电子束照射于试样上, 物镜光阑挡住了非散射的电子, 而只允许散射的轴上电子束进入物镜成象。其主要优点是:

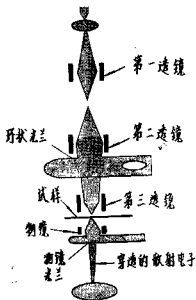


图 8-1 空心锥电子束照明暗场法

1. 照明是旋转对称的;
2. 物镜后焦面上的非散射电子束也是旋转对称的, 因而减少了物镜光阑引起的象散等。英国 AEI 公司的 EM801 型电镜为此增设了第三聚光镜。最近加拿大的奥滕斯迈尔 [Ottensmeyer 等 (1973)] 用倾斜照明暗场法在飞利浦公司的 EM-300 型电镜上

获得了四乙酰氧汞基噻吩 (Tetraacetoxy mercurithiophene) 的照片。作者宣称经电子计算机进行信息处理后显示出了原子序数为 16 的硫原子象。

此外, 耶达 (Yada) 还拍摄到了间距为 0.88Å 的镍晶格平面象。

近年来, 利用光学传递函数, 研究了成象理论——位相反差理论, 指出: 以往认为“电镜的理论极限分辨本领受透镜球差的限止的观点是不够确切的, 球差将不是限制分辨本领的根本因素。使观察 1Å 左右的细节有了比较明确的途径。

观察到试样中单个重原子象标志着电子显微术已得到了重大发展。更有实际意义的是在大分子中有意地引进重原子, 放入电镜中直接观察和拍摄照片 (或再进行信息处理)。根据重原子所占据的位置就可以给判断大分子的结构提供有价值的信息, 把人们的视野扩展到分子水平, 为分子生物学等学科创造了重要的观察工具。

应该指出: 到目前为止, 能看到的只是一些特殊试样中的重原子及原子晶格平面。对于已染色的生物试样中的规则结构, 一般只能观察到 20~30Å 的细节, 而未经染色的则结果更差。至于直接观察生物体如蛋白质、核酸中的炭、氢、氧等原子的排列情况, 这个对研究生命起源可能有极大意义的问题则还有待于克服一系列的困难。

三、扫描电子显微镜

扫描电镜自 1965 年有正式商品以来, 由于 (1) 分辨本领高、景深长、成象富有立体感、试样制备简单, (2) 可以和 x 光微区成分分析、俄歇电子谱仪, 电子能量分析, 选区电子衍射 (沟道效应) 等结合在观察微观形貌的同时逐点分析其化学成份及晶体结构, (3) 观察半导体器件工作状态及检查其失灵原因; (4) 研究材料的阴极发光性质等, 应用范围日益广泛, 技术不断完善, 成为物理、化学、地质、冶金、半导体材料、电子学、医学、生物等各个现代科学技术领域及工农业生产中的有力分析工具。

目前, 一般商品扫描电镜的分辨本领 (二次电子象) 已提高到 100Å, 如国产 DX-3 型, 日本 JSM-35, 英国 S-180, 法国 Camebax 等。但还远不如透射电镜, 尚不能满足研究原子尺度微观世界的要求。众所周知, 影响扫描电镜分辨本领的主要因素有:

(1) 入射电子束斑点的大小 决定于电子光学系统, 如电子枪、电子透镜及其象差等。分辨本领一般不能大于入射电子束斑。

(2) 实际电子束斑点的大小 电子束射入试样时发生散射, 因此实际斑点大于入射束斑点。散射程度与加速电压、接收的信号和试样本身的性质有关。显然, 分辨本领也不能大于试样中电子束实际斑点的大小。

(3) 信号噪音比 利用多个电子透镜虽然可以进一步缩小入射电子束斑直径, 但与此同时, 电子束流也就是信号电平即随之下降, 最后信号噪音比限制了分辨本领。

(4) 各种干扰 如杂散电磁场、机械震动等等。

因此, 为了进一步提高分辨本领, 研制比一般发叉式热钨丝阴极亮度更高的电子枪是近年来扫描电镜发展的一个重要课题。其突出成果就是场发射式超高真空电子枪。利用这种场发射枪的高分辨本领透射扫描电镜 (在上面已经提到过) 达到了 3~5Å 的分辨

分辨本领，接近了透射电镜的水平。此外，采用 $L_A B_0$ 阴极，也使分辨本领提高到 30\AA 。另一个值得注意的方向是利用低能量损失的散射电子成象，使背散射电子图象的分辨率由一般的 1000\AA 左右提高到 20\AA 。其次，在试样的综合分析等方面也有了很大发展。

1. 高分辨本领扫描电镜

这种扫描电镜的主要特点是采用了亮度比一般叉式钨丝阴极高三~四个数量级的场发射式枪，其它则与一般扫描电镜相似，其原理见（图 8-2）。

(1) 场发射式电子枪 在金属表面上加电场，当强度达 10^8 /厘米量级时，即使在室温下，金属表面也会发射电子，称为场致发射。电子显微镜中很早就利用了这种现象。使单晶（310面）钨丝针尖处于强电场下发射电子来代替热发射，可以得到亮度高、相干性强的电子源。但是其发射很不稳定。克鲁（Crewe, A.V）把场发射枪和超高真空技术结合起来，使钨丝针状阴极处于 10^{-10} 毛下，减少了表面吸附的分子数；同时将阴极针尖的曲率半径减小到 1000\AA 以内，这样又缩小了吸附分子的表面积，提高了发射束流的稳定性。但是，工作一段时间（约半小时~1小时）后，阴极表面仍吸附了一定量的气体分子，影响了发射，所以还得采用瞬时加热——闪弧法以驱散吸附的分子。由于阴极尖的曲率半径极小，在第一阳极（图 8-2）上施加一个约三千伏的电压便可产生场发射。这时阴极处于室温下，因此寿命很长，一般是半年到一年左右，发射电子的能量宽度约为 0.4 伏，交叉点直径约 100\AA 。经聚光镜聚焦后便可以得到直径仅为数埃、束流足够强的电子束斑点。



图 8-2 高分辨本领扫描电镜原理图

用这种扫描电镜已观察到脱氧核糖核酸中的轴、钽原子。为观察更厚的试样，得到更高的分辨本领，克鲁（1972）正在试制 10 万伏的，物镜焦距约为 1 毫米，其分辨本领应为 2.3\AA 。二次电子象的分辨本领还取决于电子与试样间的相互作用。卡托（Catto, 1971）对此进行了理论研究；当场发射枪及聚光镜产生的直径为 5\AA 的电子束垂直照射于一光滑而平整的试样表面时，假定全部二次电子都被接收，则达到 5\AA 的分辨本领是可能的。先不论仪器本身，制备接近理论上假定的理想试样表面就是一个问题。对于扫描电镜中常用的粗糙而不规则的试样，要得到这样高的分辨本领是很困难的。

(2) 商品高分辨本领扫描电镜 日本电子株式会社及日立公司于 1972 年起分别试制了 JFSM-30 型及 HFS-2S 型场发射式扫描电镜；二次电子象的分辨本领保证 30\AA ，

透射电子象为 15\AA ，真空系统为压差式，即电子枪内为 10^{-10} 托，试样室内为 10^{-7} 托，分别用离子泵抽真空，换试样时间为数分钟。仅就分辨本领而言，这是目前商品扫描电镜中的最高水平，但还不够成熟，在试用范围和操作性能等方面远不如一般扫描电镜。

在这种场发射式扫描电镜中，除了提高二次电子图象的分辨率外，还能：在显示管萤光屏上得到分辨率为 100\AA 的静止图象——快速电视扫描图象，即每秒 25 帧的扫描速度，基本上解决了扫描电镜长期以来不能在分辨率为 100\AA 的情况下，进行快速扫描观察和记录图象的问题，此外还可提高低压扫描电镜的分辨本领及元素分析的能力等。

应该指出，场发射式电子枪的突出优点是能得到一个强度极高、斑点极小的电子源，但并不是在所有的情况下都是合适的。电子源的斑点小，发射电流不大（约 10 微安），使这种场发射枪只适用于那些需要照明束斑直径约与电子源尺寸（几百埃）相等的情况。而当照明束直径为微米数量级，如在透射电镜、电子探针微区成份分析的情况下，场发射枪并不能象一般亮度较低、电子源尺寸较大而总发射电流大的发叉式钨丝阴极那样在一个大斑点上给出足够大的电子束流。另外，由于其发射电流不够稳定（有 3~5% 的变化），价格昂贵及需要超高真空系统，使用维护复杂等也限制了其应用范围。最近在透射电镜上（如 JEM100B 上）可采用热-场发射式阴极，即让阴极加热，并在极高的电场作用下引起热发射及场发射，这样不仅可以得到束流足够大（数十微安）、亮度高、相干性好的电子源，而且还降低了对真空度的要求（ 10^{-8} 托），缺点是束流也不够稳定，发射电子流的能量分布宽（3 电子伏，场发射枪为 0.2~0.4 电子伏）等。

目前，场发射阴极除了采用钨丝单晶外，还在研究功函数小的其它材料，如 YB_6 ， LaB_6 ， ZrC ， TiC 等。

2. 六硼化镧电子枪用于常规扫描电镜

发叉式热钨丝阴极的发射电流密度一般为 2 安培/厘米²，六硼化镧 (LaB_6) 阴极在比较低的温度下 (1750°K)，可获得 50 安培/厘米²，场发射枪则高达 1000 安培/厘米²，但必须在 10^{-10} 托的超高真空下工作，给操作带来不便。过去 LaB_6 阴极虽然具有亮度高、寿命长（几百小时），获得了足够强的直径为 30\AA 的电子束斑，可是由于 LaB_6 在高温下很活泼，对很多金属材料都有腐蚀作用，所有的夹持材料都必须处于低温，大部分 LaB_6 枪都是旁热式，耗电功率大，并需用液体冷却。在一般扫描电镜上使用时应更换电子枪结构及灯丝电源，而且 LaB_6 阴极在 10^{-8} 托或更高的高真空下工作时发射才足够稳定，所以还应提高电子枪室的真空度，如在其旁增加钛泵等，因而 LaB_6 阴极在扫描电镜上实际应用得不多。最近费利斯 (Ferris, S.C., 1975) 及拿卡加代 (Nakagawa 等 1975) 等分别采用了直热式 LaB_6 阴极，压在二小块定向石墨之间，或直接用钨丝夹紧加热，减少了灯丝加热功率，提高了束流稳定度，可以和一般发叉式阴极互换，在 JSM-U3 扫描电镜上进行了试验。拿卡加代获得了 30\AA 的分辨本领。为在常规扫描电镜上采用 LaB_6 阴极创造了条件。据报导，日本 JSM-35 型电镜已备有这种可以互换的 LaB_6 电子枪阴极组件。因此， LaB_6 阴极在扫描电镜上将会得到更多的

应用。

3. 提高背散射电子象——“低—损失”象的分辨本领

上面讨论的二次电子象主要反映试样的表面形貌，接收的信号一般是从试样表面约 $20\sim 200\text{ \AA}$ 深度内发出的二次电子。这时电子束的有效斑点尺寸接近于入射斑点，所以分辨本领高，可优于 100 \AA 。背散射电子象不仅可以反映试样凹凸不平的形貌，而且还能表征组成元素的平均原子序数。但当利用背散射电子成像、电子束垂直入射试样时，电子穿透很深，发出背散射电子的区域大，因而分辨本领很差约 1000 \AA 。为了提高分辨本领，就必须减少入射电子的有效穿透深度。为此，使电子以掠射角，即入射束与试样表面的夹角很小，例如 $20^\circ\sim 30^\circ$ ，并选用与试样作用后能量损失很小的那部分散

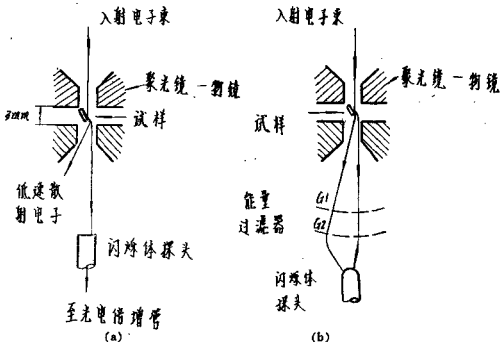


图8-3 获得“低—损失”象的二种方法：

- (a) 试样位于聚光镜—物镜的前半个强磁场中；
- (b) 用能量选择器滤去慢速背散射电子。

射电子（“低—损失”信号）来成像，信号的逸出深度很小（ $< 100\text{ \AA}$ ），点分辨率可达 30 \AA 。这时，试样是放在聚光镜—物镜的前半个强磁场中，极靴间隙为 3 mm ，电子以 $20^\circ\sim 30^\circ$ 的掠射角入射，直径为 1 cm 的闪烁体接收器置于透镜下方 10 cm 处，利用透镜的后半个磁场使低—损失电子聚在接收器上，而能量损失大的慢速电子则因偏转角度大而搜集不到（图8-3a），或者用能量选择器来滤去损失能量大的电子（图8-3b）。勃劳斯（Broers, A.N, 1975）用这个方法，把生物试样放在极靴中心，闪烁体位于间

隙下方 14 厘米处，获得了 20 \AA 的点分辨率。此外，还对背散射电子探测器进行了研究，检测极限可接近于入射电子束斑直径。可以期望扫描电镜中将会更多地利用背散射电子象来获得各种信息对试样进行研究。

4. 低压扫描电镜

如所周知，非导体试样在电镜中观察时会发生充电现象。对于常规使用的钨丝电子枪，因亮度不够高，需要的曝光时间长（几十秒），如果不采取适当措施来消除这种充电现象，就根本无法仔细观察和拍摄图象。采用在非导体试样表面上喷涂导电膜等方法虽可解决这一问题，但却使试样制备工作复杂化。若降低加速电压到 1 千伏左右，让试样表面发出的二次电子数等于入射电子数，即二次电子发射系数为 1，这时试样便不会充电。然而，降低加速电压 V ，又会减少电子枪的亮度 β 、增大色差、各种杂散电磁场及污染的影响变大等，使分辨率降低。利用高亮度的场发射式电子枪，维脱（Welter 等 1974）设计出一种只用一个聚光透镜的扫描电镜，在 900 伏的加速电压下，获得了分辨率为 180 \AA 的清晰图象，基本上避免了试样表面的充电现象。此外，低压电子束对试样的损伤较小，因此也有利于观察易受辐射损伤的试样。

四、百万伏超高压电子显微镜

生物试样在一般电镜中观察时，需制成超薄切片并置于高真空中。因而在研究其内部结构时，试样早已丧失了生命力。为了观察“活”显微组织及“活”细菌，法国于 1960 年首先制成了高穿透力的一百万伏，最高一百五十万伏超高压电镜。“活”细菌和细胞保持在一充气及含水的小室内，再放入电镜中观察。现在看来，电子束的辐射剂量是如此之大，以致对于光学显微镜无法察觉的微小生物体，即使不是致命的，也至少是只能观察到受辐照后已发生严重变化了的现象，所以前途并不乐观。然而，利用这种小室能研究潮湿状态下的材料性质，以免产生很多干燥及化学假象等。超高压电镜的主要优点还有：

1. 穿透能力强

提高加速电压，亦即增加电子的穿透能力，可以观察厚试样。这不仅简化了试样制备技术，更主要的是观察结果更符合实际情况。大部分晶体的内部结构和相变过程等与试样厚度有关。对于常用的 10 万伏电镜，试样的厚度不能超过数千埃，而厚数千埃的薄膜性能，如材料的再结晶过程及位错运动会受到上、下二表面的严重影响，因而往往不能完全代表块状金属材料的性质。百万伏超高压电镜可以直接观察几微米（例如 5—10 微米厚的铝）厚的试样，此时已接近大块材料的性质，从而得到材料的宏观性能与其显微结构间的关系，为改进质量提供可靠依据。由于试样在高压电镜中观察时仍能

保持大块材料的性质，所以进行动态研究是有意义的。而且超高压电镜中物镜的体积小，有更大的空间可供对试样进行比10万伏电镜更复杂的各种操作。

生物工作者对在观察厚试样时也能达到很高的分辨率这一点很感兴趣。为获得立体信息，以前不得不把试样制成连续薄片，在电镜中观察照相，找出对应区，再重组三维象。这样不仅效率低，而且过程复杂。用超高压电镜观察厚切片($\frac{1}{2}$ —3微米)，并拍摄一组立体照片，就可以得到容易理解的三维信息。因此，看来已经可以克服常规电镜中细胞等三维象重组上的困难。•雷布(Rawbourg 1973)在一百万伏下曾见到了3~7微米切片中的高尔基器官。加速电压为三百万伏时甚至可能观察10微米的厚切片(法伐 Favard 等 1973)。

2. 有可能进一步提高电镜的分辨本领

电子的有效波长随加速电压的增加而减小：10万伏时为0.04 Å，而在100万伏时仅为0.0087 Å。因此，超高压电镜的分辨本领从理论上讲可以比10万伏的高得多。但由于技术上的困难，所以至今尚未超过10万伏电镜的水平。目前，西德、美国等实验室中开展了研制机械、电气性能极稳定的超高压电镜。超导透镜的电流稳定度可达 10^{-7} ~ 10^{-8} /数小时(塞普蒂尔 Septier, 1972)，美国沃尔塞姆(Worsham 等 1970)试制成15万伏的高压电源，声称稳定度已达 1×10^{-8} /分(0.01 PPM/分)。因此，预计超高压电镜将会发挥其极高分辨本领的特点。

此外，超高压电镜可以提高象的反差，减少对高分子材料和生物试样的损伤，微区衍射范围缩小到200 Å左右(10万伏时约为1微米)，并改善了与微区象间的对应关系，可以直接观察金属薄膜中的位错，对材料进行电子辐照效应和临界电压效应等研究。

超高压电镜体积庞大，结构复杂。英国AEI公司的EM-7型百万伏电镜分辨本领为5 Å、放大倍数为63—1,600,000倍，高约7.5米，镜筒高2.7米，直径46厘米；每个透镜约重半吨。整个电镜安装在特制的防震地基上。所用的100万伏(最高120万伏)高压电源由瑞士Haefely公司制造。莱因霍尔德(Reinhold, 1972)报导其高压稳定度在拍摄照片的时间内达 1×10^{-6} 。日本电子株式会社的JEM-1000D型百万伏电镜分辨本领为2.7 Å(晶格)，放大倍数最高为50万倍。电镜高6.6米、镜筒高2.9米，直径56厘米。为提高机械稳定性、加速管直接固定在镜筒上，而100万伏高压电源(最高125万伏)与镜筒间为挠性连接，稳定度为 1×10^{-8} /分。已试制成扫描附件。据悉，该公司还在试制一千万伏超高压电镜，其优点还有待于将来的实践。

美国Arizona大学的斯特罗尼克(Strojnik, 1972)设计了一台百万伏卧式透射扫描电镜。荷兰的罗斯(Rus 等 1972)制造了一种折迭式百万伏电镜：电子自垂直安装的百万伏“凡得霍夫”发生器向下射出，经一双聚焦磁场(作为能量过滤器)旋转180°后向上，再通过聚光镜、物镜及投影镜成象。电镜总高仅三米左右，结构比较紧凑。可以在一般实验室中安装，而不必如上述超高压电镜那样需要一栋二层楼高的建筑

物。目前的分辨本领为 20 \AA 。如果确能做到操作简便，分辨本领高，满足一般使用要求，就能克服超高压电镜体积庞大的缺点，有利于推广。

十余年来在超高压电镜本身的研制上花费了大量人力物力。共制造了二十台左右百万伏超高压电镜。每台价约一百万美元，扫描超高压电镜还处于摸索阶段。从上面提到的各特点来看，超高压电镜已显示出了它的优越性，预期今后会得到更大的发展。

五、电子显微分析技术

电子显微镜可以提供有关试样的图象。透射电镜象能反映试样中各种化学元素散射能力的不同；扫描电镜则提供试样表面的某些性质如形貌及元素的平均原子序数效应，但二者都不能精确给出试样的化学成份。如果能在观察形貌的同时，又能对感兴趣的部位进行微区成份的定性定量分析，则对于解决很多实际问题及科研工作都是十分有利的。因此，近年来电子显微分析技术有了很大发展。目前主要有以下几种：

1. X光微区成份分析与扫描电镜

电子探针仪中一般使用 X 光晶体分光法——X 光光谱法来分析试样的微区化学成份。随着高能物理及半导体电子学的发展，最近制成锂漂移硅 $\text{Si}(\text{Li})$ 等半导体探测元件，可以对自试样发出的 X 光进行能谱分析——X 光能谱法，从而分析试样的化学成份。光谱法与能谱法的主要优缺点如表(1)所示。除需精确定量及超轻元素等分析外，能谱法得到了广泛的应用。目前，很多扫描电镜中已配备了能谱分析装置。虽然生物试样中大部分为碳氢化合物，但对细胞内痕量重元素的分析也是很有意义的，例如用能谱法对厚 1500 \AA 的生物切片，当电子束斑直径为 350 \AA 时，可以在相距 700 \AA 的二微区上进行定点分析，检出了含有 1.8×10^{-18} 克的硫及 2.3×10^{-18} 克的钙〔拉斯(Russ)，1972〕。诺母拉用一台场发射扫描电镜配备了 X 光能谱附件对薄膜试样进行了研究，指出：可以检测到直径为 100 \AA 的金颗粒，分析的薄膜试样体积接近于入射电子束切割的体积；能检出在此体积内含量大于 10^4 个原子的元素。

为了克服能谱法的缺点，如不能分析氟以下的超轻元素等，最近在半导体探测器方面取得了一些进展。如对 $\text{Si}(\text{Li})$ 探测器采用活动式铍窗，即当分析重元素时，关上铍窗以减小污染及噪音；而在分析超轻元素时，打开铍窗，避免对软 X 射线的吸收，并在 $\text{Si}(\text{Li})$ 探测器周围加一个磁性电子俘获器来防止电子直接射到探头而减小噪音。这个俘获器处于低温状态能吸附探头前面的游离杂质以降低 $\text{Si}(\text{Li})$ 的污染。实验表明：无铍窗的 $\text{Si}(\text{Li})$ 探测器经过近 50 小时的工作后，分辨率和其它性能都没有明显的变化；在 7.5 千伏的加速电压下，测得了 C, N, O 的谱峰。在 10 千伏时， Al_2O_3 中氧的探测极限小于 10^{-18} 克。此外，还在继续研制高纯锗探测器，优点是可在室温下保存，低温下工作；而不必如 $\text{Si}(\text{Li})$ 那样，连保存都要求维持在低温状态，

从而减少了维护的费用及负担。

电子探针与扫描电镜基本技术相似。因此，有将二者结合成一体的趋势，可在获得高分辨率图象的同时，进行微区成份分析；如法国的 Camebax 型扫描电镜电子探针仪，日本岛津公司的 ASM 型扫描电镜，日本电子株式会社的 JSM-35 型扫描电镜电子探针还可配备电子计算机来控制分析过程及进行数据处理，大大提高了分析速度及精度。也有为了发挥各自的特长，制成二种结构互不相同的仪器；如由同一个英国剑桥仪器公司生产的 S180 型扫描电镜及 Microscan 5 型电子探针仪。前者电子光学系统为直立式，可以配备全聚焦 X 光光谱仪及半导体能谱分析装置以进行定性或半定量分析。后者为了满足精确定量分析的需要，二个光谱仪是全聚焦式的，罗兰圆直径为 500 毫米，取出角为 75° ，晶体在同一水平面内运动以提高精度。电子光学系统是卧式的。又如日本岛津公司除了生产上述 ASM 型外，还供应 EMX-SM 型电子探针扫描电镜，最多可同时安装七个 X 光光谱仪。美国 ARL 公司的扫描电镜能量计 SEMQ 最多可装 12 个固定光谱仪或二个扫描线性光谱仪和 8 个固定光谱仪，能同时分析多种元素。

表 1 X 光光谱法与能谱法比较

项 目	X 光 光 谱 法	X 光 能 谱 法
能量分辨率	~10电子伏	150—200电子伏(峰背比差)
分析范围	铍(B _K)—铀(U ⁹²)	氟(F ⁹)钠(Na ¹¹)以上
电子束电流	10^{-9} — 10^{-12} 安培	10^{-11} — 10^{-12} 安培
最小电子束直径	1000—2000埃	50—70埃
空间分辨率	~1微米	~1微米(对薄膜及颗粒试样可小于1000埃)
分析时间	分析区域上得全谱需15—30分钟	1—1/2分钟
分析灵敏度	~ 10^{-10} 克(重量百分比为0.001%~0.1%)	~ 10^{-10} 克
试样几何形状	全聚焦谱仪难于分析粗糙表面	粗糙表面
谱仪尺寸	有机械运动部分, 占用空间大	无机械运动部分, 占用空间小, 但要用液氮的杜瓦瓶。
使用条件	室温	Si(Li)需在液氮温度下保存和工作
定量分析	容易(校正方法已成熟)(低含量时精度较高)	可用相同方法进行校正, 一般用于定性分析及薄膜微区分析, 低含量时精度差。

2. 分析电子显微镜——扫描技术用于透射电镜

透射电镜的高分辨本领(3Å)是它的突出优点, 可是其应用范围不如扫描电镜。扫描技术应用于透射电镜可以在保持高分辨本领的同时兼有扫描电镜的长处。如英国 AEI 公司的 EMMA-4 型分析电镜, 试样室上装有二个 X 光晶体分光光谱仪; 点分辨

本领为 10 \AA ，X 光微区分析和电子衍射微区范围为 2000 \AA 。但是，由于 X 光晶体谱仪机械结构复杂，占用空间大，在试样室上安装存在很大困难等原因，发展前途不大。而如日本电子株式会社的 JEM-100B 型高分辨本领电镜则装置了 X 光微区分析能谱仪扫描附件，侧插入倾斜试样台。其透射电子象分辨本领为 4.5 \AA ；二次电子象为 100 \AA （可达 70 \AA ）；扫描透射象为 50 \AA （可达 30 \AA ）；化学成份分析范围为 $\text{N}_2^{11}-\text{U}^{92}$ ；微区成份分析及电子（扫描）衍射范围分别为 500 \AA 及 200 \AA 。西德西门子公司公司的 Elmiskop 102，日本日立公司的 H500 型高分辨率透射电镜等性能与此相似，可以：

①在 100KV 下，观察厚 5 微米的试样；

②直接比较亮场与暗场象；

③局部增加某一区域的反差；

④进行衍射分析；

⑤对晶体试样进行选区沟道衍射；

⑥试样的形貌图像；

⑦研究晶体试样的缺陷等，而成为一种大有发展前途的高性能综合分析仪器。缺点是试样必须放在物镜极靴中心面附近，大小受到一定限制，观察磁性材料时也存在一定困难等。

3. 扫描电镜与俄歇电子谱仪

入射电子与试样作用时还激发出俄歇电子。俄歇电子是一种可以表征元素及其化学价态的二次电子。由于其能量很低，只有自表面几个原子层中激发出的俄歇电子才能逸出金属。众所周知，自元素激发出的 X 射线的产率 ω 随原子序数 Z 而减小，当 $Z < 11$ 时， ω 已小于 1% 。而俄歇电子的产率为 $1-\omega$ ，所以超轻元素的产率很高。因此，利用俄歇电子谱仪测定其能量便可对试样表面上二、三个原子层深度进行成份分析，能测出超轻元素 Be, C 等。然而，电子谱仪只能分析成份，无法观察形貌。在扫描电镜上附加俄歇电子谱仪后，便能有目的地、对微小区域作成份分析；例如研究钢内晶界处磷、砷、锡等有害杂质对材料脆性断裂的影响等，解决了用其它手段很难分析的难题。分辨本领约为 1 微米。

俄歇电子能谱分析的只是表面几层原子，试样表面不应有任何油污，所以试样室中应保持超高真空（ 10^{-8} 托）或充以低压氦气来防止形成炭污染。最近勃兰德斯在“常规”扩散泵真空系统扫描电镜上，当试样室内充以氦气而真空度为 1×10^{-8} 托时，对金属试样获得了高分辨率电子能谱。增加了在扫描电镜上添加俄歇电子谱仪的可能性。

4. 电子能量分析

具有一定能量的入射电子击出原子内层轨道上的电子时会损失一部分特征能量，其能量大小与元素的种类有关，因而也可利用这种特征能量损失谱来作元素分析。由于其产率及收集效率高，特别在对超轻元素分析时，比特征 X 光法有效得多。目前有好几种

办法，现举一例说明如下：

电镜镜筒下方装一能量分析器。只让穿透试样而在萤光屏上的一部分成象电子经入射光阑进入能量分析器，使电子减速经磁场偏转 90° ，再用光电倍增管接收，最后在显示管上得到一能谱。这个方法的突出优点是能分析超轻元素 Be, B, C, N 等，而且与观察电子显微像的同时能在显示管或 X, Y 记录仪上得到试样中选区范围小到 50 \AA 的元素能谱。日本电子株式会社的 JEM-100C 电镜上已可附加这种能量分析器。尹塞松在场发射扫描电镜上利用能量损失电子测得了 Li, Be, B, C 等超轻元素，探测极限可低于 10^{-13} 克，能量分辨率可达 0.2 电子伏。因此，电子能量分析法和俄歇电子谱仪可分别用来分析薄膜及试样表层的超轻元素，解决了一般电子探针难以解决的问题，预期会得到广泛的应用。

六、象增强器、信息处理和提高象的分辨本领

1. 象增强器

为记录试样的动态变化及观察低电流密度的电子象等，很早以前就开始了象增强器的研制工作。现在电镜中应用的大多是“闭合电视系统式”象增强器。例如在透明荧光屏上显示的电子光学象，经纤维光学面板自电镜中引出到二级静电式象增强器的光电阴极，增强了的象再由电视摄像管摄出（经一闭合电视系统），最后在显示管上成象，以便寻找试样观察范围和聚焦之用。电子照片则由一照相系统直接自静电式象增强器的象面摄得〔希尔沙普（Heerchap）等1972〕。这种方法比较复杂。也可用通道电子倍增板（每个通道的直径是 40 微米），入射电子象直接由通道电子倍增板增强，经电场加速后投射于一透明荧光屏上（图 8-4），电子倍增板与荧光屏间的电压约 1—3 仟伏（板二端间约 1 仟伏），增益可达 10^3 — 10^4 。分辨本领为 0.1 毫米。英格利希（English 等）用外径为 27 和 54 毫米的通道板式象增强器，其增益为数百倍，分辨本领为 80 微米（略优于其它象增强器），通道板二端的电压为 1.2—1.3 仟伏，相距 1.5 毫米处的 P20 荧光屏上为 9 仟伏。使用通道直径为 15 微米的倍增板可望得到更高的分辨本领。

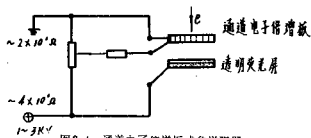


图 8-4 通道电子倍增板式象增强器

2. 信息处理及提高象的分辨本领

由于电子透镜存在象差、拍摄照片时的失焦、支持膜及照相底片的噪声、试样漂移等原因，在电镜中摄得的照片往往是模糊的。可以用电子计算机〔霍佩 (Hoppe), 1972〕, 光学衍射仪〔托恩 (Thon) 等 1970〕以及全息傅利叶变换象增强法〔斯特罗克 (Stroke), 1972〕等进行信息处理、象差校正及提高象的分辨本领。斯特罗克利用莱塞光、全息傅利叶变换分度滤波器和一套特殊的光学系统对电子显微照片进行信息处理 (光学透镜完成傅利叶变换) 得到了明显的效果: 将分辨本领为 5 \AA 的照片提高到 2.5 \AA 、显示出了病毒的内部螺旋结构。该作者认为在电镜中使用大的照明角以减少物镜的衍射差, 而由此增加的球差则用全息象增强法加以校正, 可期得到 1 \AA 的分辨本领。但进行全息象增强时需要知道电镜的电子光学系统参数及拍摄照片时的实际条件。

七、仪器化及小型化

一般电镜的结构十分复杂, 操作者需要经过专门训练, 而且电子显微照片的质量很大程度上取决于使用人员的操作水平。近年来采取了很多措施, 如国产 DX-3 型扫描电镜的真空系统实现了全自动化, 通过一套电磁真空气动阀门及逻辑线路可按指令自动启动、更换各种操作状态及停机, 并有各种安全保护系统; 供电线路, 包括 30 千伏高压电源在内, 都采用了晶体管及集成电路; 镜筒上增加了电磁屏蔽及防震措施减少了对环境条件的要求, 改变加速电压时放大倍数联动指示; 日本岛津公司 ASM 扫描电镜采用了新的图象处理方法, 如简化聚焦和消象散操作; 图象亮度及对比度自动调节; 四种图象同时显示; 局部改变图象对比度, 采用快速晶体 X 光光谱仪等, 简化了操作。透射电镜中的电磁合轴调整, 电子束摇摆聚焦, 改变放大倍数及加速电压时不必重新对中和保持聚焦基本不变, 放大倍数数字显示, 照相机构自动化, 镜筒起重装置, 同时安放多个试样, 置换试样时不需切断加速电压, 改用自对中灯丝等等来简化结构、改进操作性能及提高自动化程度。此外还配备了各种附件, 如倾斜试样台 ($\pm 60^\circ$), 旋转试样台, 扫描附件, X 光微区分析装置; 防污染器——冷泵, 用以减少试样污染; 加热、冷却、拉伸、弯曲等动态试样台; 象增强器等, 在应用范围和使用方便等方面前进了一大步 (如西德西门子公司 Elmskop 102 型, 日本的 JEM-100C 等)。

小型化也是一个发展方向。如英国 AEI 公司的 Corinth 500 型台式透射电镜, 点分辨本领为 5 \AA , 加速电压 20~80 千伏; 日本日立——明石公司的 MSM-4 型台式扫描电镜, 分辨本领为 250 \AA ; 日立台式 310 型超高真空扫描电镜, 采用场发射枪, 分辨本领达 100 \AA 等等。

八、小 结

作为微观世界眼睛的电子显微镜现在已可能直接观察到单个重原子的象以及大分子

的结构；观察大块试样、整个细胞等的三度空间结构；试样的各种动态过程及物理化学变化；同时进行形貌、成份及结构等综合分析，成为现代科学技术中一个不可缺少的重要工具。这些特点是其它仪器所无法替代的。但也有它的局限性：仪器复杂、价格昂贵，试样制备（除扫描电镜观察的金属试样外）环节繁多，使用及观察范围又有一定限制。电镜的发明曾经促进了科学技术和工农业生产的发展，而科学技术和工农业的发展又给电镜提出了各种不同的新课题，反过来推动了电镜的发展。毛主席指出：“…人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进①”。电子显微术也一定会在现有的基础上得到进一步的发展：提高分辨本领，扩大使用范围，简化结构，方便操作，对试样进行全面分析等，为探索微观世界的奥秘作出新的贡献。

在毛主席革命路线指引下，我国电子光学仪器制造事业得到了迅速的发展。1958年在大跃进的高潮中，中国科学院长春光学精密机械研究所、电子学研究所等单位打破迷信、解放思想、自力更生、艰苦奋斗、发扬共产主义大协作，试制成功了电子显微镜。1959年科学院光机所又与上海精密医疗器械厂、电子所协作自行设计制造了DX-100型电子显微镜，全部采用国产元件器材。1965年上海电子光学技术研究所在此基础上试制成DXA₁-8型一级电子显微镜，与此同时中国科学院北京科学仪器厂试制成DX-2型电镜，点分辨本领为4Å，达到了国际先进水平，随后都进行了小批生产。南京江南光学仪器厂也生产了DX-201型中型电镜。无产阶级文化大革命中上海电子光学技术研究所又试制成DXB₁-12型电镜，分辨本领5Å，最高放大倍数40万倍，并生产DXA₁-10型一级电镜，分辨本领7Å，放大倍数200,000X。1975年中国科学院北京科学仪器厂试制成功了DX-3型扫描电镜，分辨本领为100Å，放大倍数为20~100,000X，可以满足一般使用要求，填补了这方面的空白。使我国成为世界上几个生产这种大型科学仪器的国家之一。我们一定要以阶级斗争为纲，以实际行动来实现伟大领袖毛主席的教导：“中造人民有志气、有能力，一定要在不远的将来赶上和超过世界先进水平”。

※参考文献略

① 转引自《周恩来总理在第三届全国人民代表大会第一次会议上的政府工作报告》。

对称和非对称型磁透镜

(法) J. Dugas 等

摘要: 本文研究了磁透镜, 特别是二个极靴孔直径不同的透镜(非对称透镜)。头二部分讨论了磁路, 极靴设计和轴上磁场分布的一些结果, 最后部分则在高斯光学近似下讨论了很多对称和非对称透镜的性质。对于这些透镜的色差和球差系数也作了计算。

引 言

在前一篇论文中, 给出了设计磁透镜的规则。我们曾提出了一种表达式, 这种表达式对使用者来说是方便的。

但前文中, 我们仅限于讨论对称透镜即极靴开有相同直径孔的情形。

对于非对称透镜的性质则研究得较少, 而对它的综述文章更是没有, 因此我们决定研究它, 以便为设计磁透镜的工作者提供更完善的资料。

如果知道轴上的磁场分布 $B(z)$ 和它的导数。我们就可能绘出电子轨迹, 根据这些轨迹即能建立透镜的光学性质。

从前文发表以来, 测量磁场 $B(z)$ 和它的导数的方法已经有了重大的改进; 这个方法已被作者利用, 具体设备可参考文献; 最后, 我们已经有相当有效的手段来使用这种方法, 并来计算透镜的电子光学性质。

在考察非对称透镜前, 采用了这种新方法重新处理了对称透镜的情形。

在前人测量的精度内, 前文所示的结果被证实了; 但同时我们还可以提出几点新的意见。

为了避免此文零散, 我们想最好还是把对称和非对称透镜一起来讨论一下, 而只求读者去参考前文中那些几乎完全没改动的章节, 特别是第四章。

本文根据本实验室的工作而写, 结论与实际相当吻合, 但为避免文章过长, 将不作这种比较。

表对称透镜的光学性质的那种方式看起来对于非对称透镜是同样适用的; 经验表明这种表达方式是方便的, 所以本文也采用这种方式。

一、概 论

电子透镜是个具有轴对称性的电磁铁, 它的磁极心柱内开有一通道以允许电子束通

过，图 9-1 给出了一个普通形状透镜的截面图。

当透镜被激励时，在这个透镜的轴 zz' 和它的邻近就建立了一个磁场 $\vec{B}(x, y, z)$ ，这个磁场的作用与光学透镜的作用是一样的。如果已知磁场分布 $\vec{B}(x, y, z)$ 就可以计算这个透镜的电子光学参量。由于磁场分布应满足拉普拉斯方程，所以知道轴上的磁场分布 $B(z)$ 就可计算轴外相邻区域内的场分布，由此可计算电子光学参量。

因此只要给定轴上场分布 $B(z)$ 就确定了一个透镜，最好能同时给出 $B'(z) = \frac{dB}{dz}$ ，

$B''(z) = \frac{d^2B}{dz^2}$ 的分布。

对于导磁率为无穷大的情形，这些分布可由计算得到但也可由测量得到，当可能饱和时，测量往往是更精确的方法。

图 9-2 和图 9-3 给出了二种场分布，其一是对称透镜（极靴孔直径相同），另一个是非对称透镜（极靴孔直径为 D_1 和 D_2 ）

这时激励都很弱，曲线趋于钟形分布。我

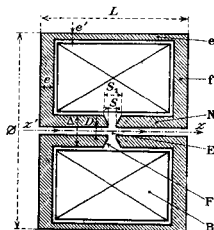


图 9-1 电磁透镜

N, 磁极芯柱（极心）；F, 极靴端面；E, 隙缝；B, 励磁线圈；f, 盖盘；e, 外筒；对电子显微镜的物镜或投影镜当加速电压为 100KV 时其基本尺寸的数量级为：

- S 和 D, 3—8mm
- S_1 和 D_1 , 10—30mm
- 直径 \varnothing 150—200mm
- e 10—20mm
- e' 5—10mm

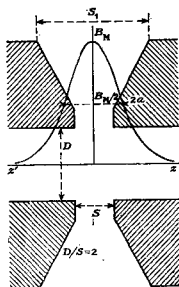


图 9-2 在隙缝内的轴上场分布。
（对称透镜）

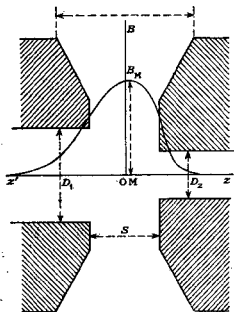


图 9-3 在隙缝内的轴上场分布。
（非对称透镜）

们以 B_M 记磁场极大值，当透镜对称时，以 $2a$ 记 $B = \frac{B_M}{2}$ 的轴上点间的距离（分布的宽度）

下面首先考察磁透镜的设计问题，场分布 $B(z)$ 仅用作计算的手段，本文利用了文献的结果。

关于安培定理的附注：——安培定理可写成，

$$\int_{-\infty}^{+\infty} B(z) dz = \mu_0 NI \quad (\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}) \quad (1)$$

其中 NI 为线圈的安培匝数。

有时需要计算积分 $\int_{z_0}^{z_1} B(z) dz$ ，为方便起见，我们以下式来定义在 z_0 到 z_1 ，二点间的安培匝数 nI

$$\int_{z_0}^{z_1} B(z) dz = \mu_0 nI \quad (2)$$

为方便起见，我们将人为地称在 z_1 到 z_0 间有 nI 个安培匝数，同时在 $-\infty$ 到 $+\infty$ 间则分布着 NI 个安培匝数。

二、磁透镜的磁路

在磁透镜中，磁路的作用在于获得尽量狭窄的场分布，或者说把所有的安培匝数都集中在狭缝和它的邻域内。

当激励很弱时，这容易做到，但当激励增强时，情况将改变。

1. 基本现象

假设一个典型的透镜如图 9-1 所示由测量磁场或磁通得到的下面的结果将显示出磁路的作用，并启发我们设计磁路的规则：（注 1）

A，强激励时的轴上场

当激励很弱时，（注 2）场分布将趋于钟形，它的极大值处于隙缝间。离开极大值处，磁场下降得很快，而在极靴的通道中变成可以忽略。（图 9-2 和 9-3），各点的磁场强度将比例于励磁电流而变。

当激励的安培匝数很大时，在通道处将有场出现，其形状视磁路而变，图 9-4 绘出了一个例子。用上节规定的术语来说，这时磁路不能再完成它把安培匝数集中在隙缝间的任务了，同时磁场极大值比励磁电流增长得要慢。

B，通过磁路截面上的磁通。

注 1：有兴趣者可进一步参考文献

注 2：在第三章末尾将精确指出：从磁学观点讲，弱和强激励的确切含义。

一般书在描写一个电磁铁的磁路的作用时，总是假设纯铁制成的磁路的所有截面上的磁通量是不变的，基于这种假设，才形成磁通势和磁阻的概念。

这个假设常常很不精确，即使假设纯铁的导磁率为无穷大时，通过纯铁各截面的磁通仍然是沿着磁路变的。

特别是对于(图9-1)所示的透镜，通过极心的磁通自隙缝到盖盘是逐渐增加的，因此磁通密度 $\frac{\Phi}{S}$ 也随之增加

这个现象可解释当激励增加时，通道内出现的磁场分布：一个不很大的圆柱状极心，首先在盖盘端出现饱和，此处导磁率下降，结果在通道内出现磁场。

(图9-4)

根据很多理由，隙缝外的场应尽量避免。

对于由隙缝间的场所组成的透镜来说，分布在通道内的安培匝数是一种损失。

电子将受通道内的弥散场的作用，这种作用改变了透镜的电子光学性质，一般而言，如某些例子所指出的这种作用是不利的，并且使透镜的对中发生困难。

为避免在隙缝外出现场，对于磁透镜的设计提出了下列问题：必须根本避免在隙缝外的磁路上发生饱和现象。

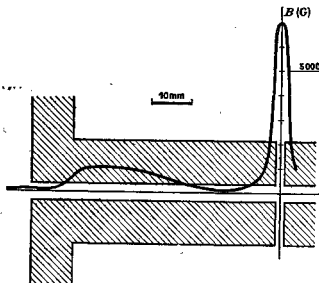


图9-4 强激励时磁透镜的轴上场分布。
激励 $NI=8000At$ 隙缝宽 $S'=2mm$
孔直径 $D=4mm$ 圆柱状极靴

2. 磁路设计的规则

通常用纯铁来作磁透镜的磁路，只要磁路内的磁感应强度不超过1.25—1.4T时，其导磁率很高—大于1000。为使通道内出现的场可忽略，就必须给磁路各部分以足够的截面积，使其中的磁感应强度低于此值。(注3)

A, 极靴

注3：这儿是对纯铁说的，也可采用一些铁合金作磁路，它们可容许较高的磁感应强度而不致饱和，但这样的好处并不大，因为适当选取截面积已可避免饱和，相反，对极靴端部，选择适当的合金可能是有益的。

在极靴 N 中，磁通自隙缝到盖盘逐步增加，因此极靴的截面积也应相应地逐步增加，以求在磁路的各截面上，磁通密度 $\frac{\Phi}{S}$ 总是很低而不致饱和。

文献曾指出这样做的一个方法。它使极靴表面变成一个平面部分 MN (图 9-5)，然后接上一个角度 Q 在 $60^\circ-80^\circ$ 间的锥状部分 WPQ (注 4)，最后则延伸为圆柱形的磁路 QQ'。在此条件下，在纯铁的截面 σ_0 和 σ_2 间，虽然磁通增加了，但 $\frac{\Phi}{S}$ 都大为下降。在截面 σ_2 到 σ_3 间，磁通密度增加，如图 9-5 所示。但是只要锥体 NPQ 足够长， $\frac{\Phi}{S}$ 始终不超过饱和值。

有人却宁愿缩短锥角为 θ 的锥体部分，这从透镜结构设计角度看是方便的。他采用一个锥角 θ_2 在 $10-15^\circ$ 间变化的锥体作极靴，这时， $\frac{\Phi}{S}$ 的变化如图 9-5

实线所示，和前面一样， $\frac{\Phi}{S}$ 在截面 $\sigma_0-\sigma_1$ 间逐渐减小，但如 θ_2 适当选择时，则将沿着极靴保持为恒定，此时在截面 σ_2 上的磁通的数值将比前一种办法为小，因而在 σ_2 外的极靴直径也可以小些。

这种结构对于象电子显微镜中所用的物镜或投影镜 (即具有高安培匝数的透镜) 而言，是有利的，实现锥角为 θ_2 的锥体及相应形状的线圈实际上没有太大的困难。

在第三章中我们将确定 θ_2 角的大小，并将看到轴上场分布随极靴端面形状，特别是锥体的存在，而变化的情形。

B, 盖盘和外筒

到达极靴的底部的磁通量将分散到盖盘 f 中，一般给盖盘以厚度 e 近似地等于 $\frac{r}{2}$ ，以使磁路的截面积不致减小，但通常再薄些也足够了，因为一部分磁力线在未到达盖盘前就离开了极心，并且在盖盘的那边重新流入。

当离开轴时，盖盘中的磁通将占有越来越大的面积，结果通量的密度很小，导磁率

注 4：在第三章中 will 看到，这时轴上场分布的变化。

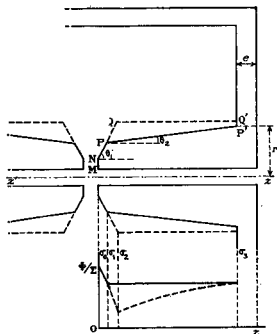


图 9-5 一个强透镜的磁路及极靴内的磁通密度 $\frac{\Phi}{S}$ 分布

不连续线：锥状极靴端面，柱状磁路的情形。
连续线：锥状极靴端面，锥状磁路的情形。

很大。可以逐步减少厚度 e ，但这不带来任何优点，却会使机械加工复杂化。

至于最外的外筒随着离开盖盘的距离磁通量将减小。一个比较宽稍大些的面积是合适的。

经验指出，对于满足这些规则的透镜，即使当激励很强时，通道内的场仍可忽略。

附注：当透镜始终工作于弱激励状态时，通道内的磁场就可忽略，本章所述的一些要求可适当放松。

三、极靴端面

假设一个透镜，其磁路满足了上章所述的要求，那么对于所有实用的激励而言，通道内的磁场将可忽略，磁场分布就趋近于一钟形分布，其极大值处于隙缝内，并且此隙缝中集中了所有的激励的安培匝数。

这里我们则要确定，对于给定的隙缝宽度，极靴端面该如何设计，才能使场分布最理想，也就是说，对于给定的激励得到尽可能窄的分布。

1. 基本现象

强激励时的分布：

对于一给定极靴，绘制强激励时的 $\frac{B(z)}{B_m}$ 曲线，经验指出：当激励不强时，安培匝数增加时此曲线不变，磁场的极大值 B_m 正比于 NI 增加。从某一个激励 NI_0 起（对通常用的软铁比值约为 $100-1100S$ ， S 以 mm 表示），轴上每一点的磁场不再正比于 NI 变化，而磁场分布的宽度将逐渐变大。

图 9-6 针对一个对称透镜的例子绘出了 B_m 和 $2a$ 作为 NI 的函数。这个图显示出，从某一个激励的极限值 NI_0 开始，现象的反常变化的情形， NI_0 的值一般视极靴端

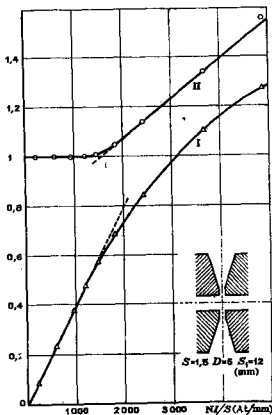


图9-6 磁场极大值和磁场宽度随激励的变化；
纯铁极靴端面，对称透镜

曲线 I: B_m (T)

曲线 II: $\frac{a_0}{a}$

部材料的性能而定，对纯铁它近似为 1100S。经过一个过度区后，宽度 2a 将随 NI 线性增大。

此现象可这样解释，对弱激励及一个仔细设计的磁路在磁路各点上（包括极靴端面）铁的导磁率都很高。 B_m 正比于 NI 的性质， $\frac{B(z)}{B_m}$ 与 NI 无关的性质均基于这个假设。正是在这个假设下，对磁透镜的场分布进行了数值计算。

还可以从下述角度来解释由实验得到的 $\frac{NI_0}{S}$ 值。

假设极靴端面是平行的平面，且考虑的区域是远离透镜轴和孔的隙缝区域，则可以认为，在隙缝中，场是均匀的，其值为 $B = B_1 = \frac{\mu_0 NI}{S}$ 。（设导磁率为 ∞ ） B_1 所代表的不仅是真空中的磁感应值，也是磁铁内部，极靴端面外的场，这是由于在铁与真空的界面上必须满足磁感应强度的法向分量连续的原理。当 B_1 达到 1.4 T 时，饱和效应开始显著，此时即有

$$\frac{NI}{S} = \frac{B_1}{\mu_0} = 1.1 \times 10^6 \frac{\text{At}}{\text{m}} = 1100 \frac{\text{At}}{\text{mm}}$$

这正是实验结果。

注意，对 $\frac{NI}{S} = 1100$ ，仅在极靴端面出现饱和，而只要很好地遵守第二章中的规则，在磁路的其他部分是不会饱和的。当 $\frac{NI}{S}$ 超过 1000 到 1100 时（S 以 mm 为单位），磁场分布 $B(z)$ 就变宽，但在远离隙缝的通道中仍不会出现磁场。

2. 极靴端面形状的影响

A, 弱激励：当 $\frac{NI}{S} < 1000$ 或 1100（纯铁），实验指出磁场分布 $B(z)$ 与极靴端面的形状几乎无关（图 9-7），在这几种形状下，只要其 S, D_1 , D_2 的数值一样（图 9-3）， $B(z)$ 实际上与极靴端面为平行平面，导磁率为 ∞ 时的情形一样。（注 5）

这就证实了某些作者的研究结果的有效性，他们总是采取这些假设来计算轴上场分布的，特别是表明了李普曼所作的一系列工作的重要性。

如果为方便取隙缝长 S 为单位，绘出 $\frac{B(\zeta)}{B_m}$ 作为归一化坐标 $\zeta = \frac{z}{S}$ 的函数，那不管隙缝宽 S 和 N 激励取任何值，只要它们不超过上面已指出的极限值，对于 $\frac{D_1 + D_2}{2S}$

注 5 当 $\frac{(D_1 + D_2)}{2S}$ 等于或超过 1 时，这是相当真实的，对于大隙缝情形， $\left[\frac{(D_1 + D_2)}{2S} \leq 0.5 \right]$ 曲线开始依赖于极靴端面的形状，特别是以锥面代替平面时，改变很显著，但这种改变对电子光学参量的影响却不很大。

和 $\frac{D_1}{D_2}$ 二参量相同的各种形状的透镜，曲线将取统一的形状。

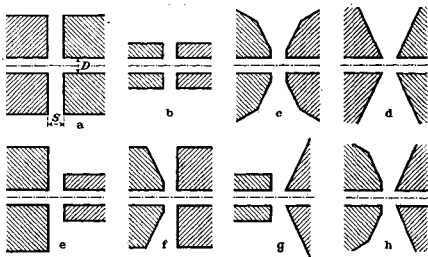


图 9-7 对图上的各种极靴形状，S 和 D 的数值相同。

实验指出，当 $\frac{NI}{S} < 1100$ 时，在一级近似下，其磁场分布亦将相同。

有时，需知道磁场的极大值 B_m ，在一级近似下，它由下式给出：

$$B_m = \frac{\mu_0 NI}{\sqrt{S^2 + 0.45 \left[\frac{(D_1 + D_2)}{2} \right]^2}} \quad (3)$$

图 9-8 绘出了由这式计算得的值与实验值的偏离情况，可以看出，当 $\frac{(D_1 + D_2)}{2S}$ 由 0.5—2 变化， $\frac{D_1}{D_2}$ 在 $3 - \frac{1}{3}$ 变化时，误差低于 5%。

由磁场极大值点 M 到缝隙中心 O 的距离 OM 示于 (图 9-9)。

最后，对称透镜 ($D_1 = D_2$) 分布的宽度 $2a$ 值在一级近似下为 (注 6)

$$2a = 0.97 \sqrt{S^2 + 0.45 D^2} \quad (4)$$

B, 强激励。

我们曾经指出，如 $\frac{NI}{S}$ 超过某极限值 $\frac{NI_0}{S}$ ，曲线 $\frac{B(z)}{B_m}$ 将变宽，同时 B_m 将不再正比于 NI 而增加 (图 9-6)

这种现象随极靴端面的形状而变。

为了得到最小的宽度，极靴端面的形状应选择为：在孔附近取平面形状，而后紧接

注 6 (4) 式的误差小于 $\pm 3\%$ 。

一角度 $\theta_1 = 60^\circ - 70^\circ$ 的锥体。

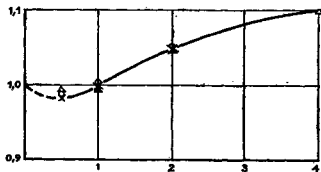


图9-8 轴上场分布的极大值作为 $\frac{(D_1+D_1)}{2S}$ 的函数: 由公式(3)

算得的值与实验值的比较。这曲线是对 $\frac{D_1}{D_2}=1$ 的情形绘制的。

纵坐标 $\frac{B_m(\text{计算值})}{B_m(\text{实验值})}$: $\circ - \frac{D_1}{D_2}=2$ 或 $\frac{1}{2}$; $\triangle - \frac{D_1}{D_2}=3$ 或 $\frac{1}{3}$ 。

事实上, 这个锥体部分在第二章中已提请注意: 它构成磁路的始端, 而它的作用也已讲过了。实验指出, 它应该一直延伸, 直到宽度 S_1 (图9-10) 已能使 $\frac{NI_m}{S_1} \leq 400$, 其中 NI_m 为所用的最强激励。

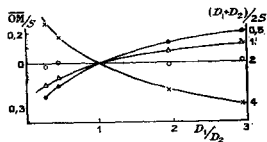


图9-9 透镜中磁场极大值处到隙缝中心 O 的距离。
(参看图3)

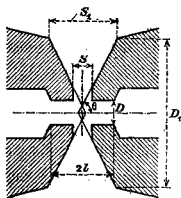


图9-10 极靴端面的形状。

3. 开在极靴内的通道的影响

迄今, 我们一直假设开在极靴内的通道具有圆柱的形状, 实际上, 可以维持这圆柱状的通道到离隙缝一定的距离, 而后最好是扩大它。这不仅对清洗有利, 也可避免电子在通道内的反射。

实验指出, 如圆柱状的通道足够长, 大约为极靴孔的直径的数量级, 那么场分布将无明显变化。

4. 极靴端面的设计

上面指出了为得到尽量窄的磁场分布所应遵从的规则。图 9-10 综合了这些结果。

(a) 在所有情形下，极靴端部开的孔应保持一段足够长的圆柱形状，其长度相当于相应的极靴孔的直径的数量级。这条件即使当 $\frac{NI}{S} < 1100$ 时也应遵从。

(b) 极靴端面在孔附近应取平面形状，而后紧接一个锥角为 $60^\circ-70^\circ$ 的锥体。这锥体要充分延伸，直到 $\frac{NI}{S} < 400$ ，这条件仅当 $\frac{NI}{S} \geq 1100$ 时才需要严格遵守。

附注 1 如超过极限值 NI_c ，分布将变宽。作为初级近似，可认为场分布将与未饱和时一样，但参量 S ， D_1 ， D_2 均乘上同一因子 $1+E$ ，这因子与图 9-6 中的 $\frac{a}{a_0}$ 数量级相近。这可作为考虑饱和效应的一个粗糙的近似。（柱 7）

附注 2 现在可确定强激励与弱激励的意义。并确定通过磁场性质的研究得到的一些规则的应用范围，这些规则已列于第 I 和第 II 章中。

如 $\frac{NI}{S} < 1000-1100$ ，（纯铁）即称为弱激励，这时极靴端部的磁场强度将比达到饱和和所相应的场要小。如磁路设计得很好，那么尽管磁通量在隙缝到盖盘间的磁路内逐步增加，磁路上各点的磁场强度也将小于饱和值。除一个例外以后将另作分析外对所有这些情形，磁路的结构均可简化，例如，磁路中心部分可采用圆柱形。

当 $\frac{NI}{S}$ 超过 1000 时称为强激励。对这种情形，应遵从 I、II 章中所述的规则。并且当计算 B_0 时，要考虑到上述分布变宽的特点。

附注 3 以上所谈的强激励或弱激励概念均是相对磁学问题讲的，是根据 $\frac{a}{a_0}$ 值，从磁学观点来判断激励的强或弱。

不要把这与电子光学角度讲的强或弱激励概念相混，在下章中，我们将引进激励的电子光学参量 $\frac{NI}{NI_0}$ ，它反映着电子光学观点。例如一个电子显微镜的物镜可以在很高的电子光学参量 $\frac{NI}{NI_0}$ ，同时都是很弱的磁激励 $\frac{NI}{S}$ 下很好地工作。

四、磁透镜的电子光学特性

1. 概 述

现在问题的表述可改变如下：给定一个透镜，其磁路已良好地设计以避免达到饱

注 7 如所述规则被遵守的话，实验指出 $\frac{a}{a_0}$ 随 $\frac{NI}{S}$ 的变化，与极靴端面的形状关系不大。

和, 试确定电子光学参量与结构参量间的关系。

让我们先限于讨论条件 $\frac{NI}{S} < 1100$ 被满足的情形。(极靴端部将没有明显的饱和。)
 根据前章所看到的, 函数 $\beta = \frac{B(z)}{B_m}$ 将仅依赖于参量 $\frac{(D_1 + D_2)}{2S}$ 和 $\frac{D_1}{D_2}$, B_m 正比于 $\frac{NI}{S}$, 其比例因子将仅是 $\frac{(D_1 + D_2)}{2S}$ 和 $\frac{D_1}{D_2}$ 的函数。对于这些情况, 轨迹的普遍表达式指出, 对于具有参量 $\frac{(D_1 + D_2)}{2S}$ 和 $\frac{D_1}{D_2}$ 的透镜, 如果所有的长度都除以同一个参考长度单位, 例如 S , 那么以归一化参量给出的轨迹将仅依赖于激励系数 $\frac{NI}{\sqrt{V}}$, (其中 NI 是安培匝数, $V^* = V(1 + 0.98 \times 10^{-6} V)$, V 是电子的加速电压。(注 8))

附注: 用归一化坐标写出的普遍轨迹方程, 就能证实这个结论, 设 X, y, z 是电子的坐标, S 是由任意原点标起的轨迹的弧长, \vec{T} 是轨迹切向的单位矢量, 那么, 由于在磁场中速度的数值保持为常数, 因此电子的质量在运动中也将不变。(以 m_0 记电子的静止质量。)考虑了相对论效应的普遍的运动方程可写为:

$$m \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = -c [\vec{\nabla} \times \vec{B}]_x$$

(对 y 和 z 有相同的方程) 利用对一个新参量 S 的导数, 考虑到 $\frac{d}{dt} = V \frac{d}{dS}$, 可消去时间 t , 而轨迹方程变为

$$mV \frac{d^2 \vec{x}}{dS^2} = -e [\vec{T} \times \vec{B}]_x$$

如引入 $mV = \sqrt{2e m V^*}$ 和 $\vec{B} = a \frac{NI}{S} \vec{\beta} \left(\frac{z}{S} \right)$, 其中比例因子 a 是透镜形状的特征参量, 就得到:

$$S \frac{d^2 \vec{x}}{dS^2} = -\sqrt{\frac{e}{2m_0}} a \frac{NI}{\sqrt{V^*}} [\vec{T} \times \vec{\beta}]_x$$

最后引进归一化的坐标, $\xi = \frac{X}{S}$, $\eta = \frac{y}{S}$, $\zeta = \frac{z}{S}$, $\sigma = \frac{s}{S}$ 有

$$\frac{d^2 \xi}{d\sigma^2} = -\sqrt{\frac{e}{2m_0}} a \frac{NI}{\sqrt{V^*}} [\vec{T} \times \vec{\beta}]_x \quad (5)$$

对 η 和 ζ 有相同方程, 这就证实了上述的结论。

因此, 如把所有的电子光学参量均除以同一个单位长度, 例如 S , 并给出这些参量作为激励系数 $\frac{NI}{\sqrt{V}}$ 的函数, 那么对于给定形状的透镜就会得到一条与透镜的实际大

注 8 以 V^* 代替 V 可以考虑狭义相对论效应。

小无关的通用曲线。原则上应该对每一种结构参量 $\frac{(D_1+D_2)}{2S}$ 和 $\frac{D_1}{D_2}$ 的组合，对每一种电子光学参量给出一条曲线。当 $\frac{NI}{S}$ 超过相应于极靴端部开始达到饱和的极限时，只要代替真实的 S ， D_1 和 D_2 ，采用第三章中所确定的修正值，那么就可以同样地利用这组曲线。应该经常注意使激励不要过分超过极限值，这样修正就较小并可比较精确地确定。

2. 符号和简短的说明

假定我们已熟悉电子光学参量的经典定义，它们列于图 9-11 中。为了避免对所列的结果的解释发生根本的错误，我们将对某些问题作些说明，更详细的研究请参考电子光学的专著。

在高斯近似下，光学成像的位置和放大率的经典公式（成像关系，牛顿公式等）只对渐近线成像适用，电子显微镜中的投影镜就是实现这种成像的一个例子。这时，可以定义唯一的焦距 $f_1 = \overline{P_1'F_1'} = \overline{F_1P_1}$ ，同时也可定义主面 P_1 ， P_1' 和焦点 F_1 ， F_1' 来表征由透镜所确定的成像对应关系。

对于电子显微镜的物镜，当实际的物浸没于聚焦场中时，那么物方焦点 F_0 是指这样一个轴上点，当实物置于此处时，其旁轴的共轭象将在无穷远处；同样可以把平行的投射光的会聚点 F_0' 称为象方焦点；正是在 F_0' 平面处应安放电子束 X 光微区分析仪的靶面或者 X 光投射显微镜的对阴极。通常把图 9-11 上的长度 $f_0 = \overline{F_0P_0}$ 和 $f_0' = \overline{P_0'F_0'}$

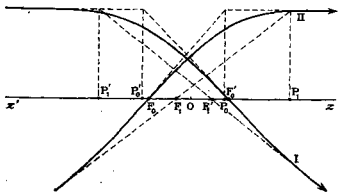


图 9-11 电子光学中高斯光学参量的定义：I 和 II 在场外平行于轴入射的轨迹（I 从 D_1 边射入，II 从 D_2 边射入）。这些轨迹是对于 $\frac{(D_1+D_2)}{2S} = 0.5 \frac{D_1}{D_2} = 2 NI = 1.096 NI$ 的一个透镜绘出的。在图上，没有考虑图象的旋转。

称为焦距，但对于非对称透镜，其 f_0 ， f_0' 一般将取不同数值；一般的说，要用这些参

量来确定实物和实象间的成像关系已不再可能了，只有当物、象分别距 F_0 点和其象方共轭点（焦距 f_0 ）或距 F_0' 及其物方共轭点（焦距 f_0' ）很近时，它们才能适用。

很显然，对于弱透镜（ $NI \ll NI_0$ ），（注 9）当焦点以及物、象均跑出场外时，投影镜和物镜的参量将一致，并且将确定唯一的，相同的成像关系；此时 $f_1 = f_0 = f_0'$ 。

作为例子图 9-12 对 $\frac{(D_1 + D_2)}{2S} = 1, \frac{D_1}{D_2} = 1$ 型的透镜绘出了参量曲线，对于不同的结构参量，曲线将不同，但他们都呈现同样的趋势。对非对称透镜， $\frac{f_1}{S}$ 曲线仍是唯一的，但对 f_0 和 f_0' ， z_0 和 z_0' ， z_1 和 z_1' 的曲线应分别定出。如我们所已经指出的，当 $\frac{NI}{\sqrt{V^*}}$ 趋于零时（弱透镜）， f_1 和 f_0 趋于同一数值，同时有 z_1 和 z_0 趋于一致。

3. 归一化坐标

代替 $\frac{NI}{\sqrt{V^*}}$ 作横坐标， $\frac{f_1}{S}$ 、 $\frac{f_0}{S}$ 等作纵坐标，我们改取下列坐标；对给定的加速电压，如果 NI_0 表示使 f_1 取极小值的激励（A 点），那么我们以 $\frac{NI}{NI_0}$ 来代替 $\frac{NI}{\sqrt{V^*}}$ 作横坐标；

假定 f_{1m} 表示激励为 NI_0 时所对应的最短焦距，我们把 $\frac{f_1}{f_{1m}}$ 和 $\frac{f_0}{f_{1m}}$ 取为纵坐标。

我们称这些坐标为归一化坐标，而用这些坐标绘出的曲线称为归一化曲线。为了实际利用这些归一化曲线应该知道 NI_0 和 f_{1m} 的值作为结构参量的函数，对于一系列的透镜，这些数值已由图 9-13 绘出，其中

$$L = \sqrt{S^2 + 0.45 \left(\frac{D_1 + D_2}{2} \right)^2} \quad (6)$$

长度 L 在第三章 B_0 的表达式中就已引入过。

这个图需作些说明。

作为一级近似， $\frac{f_{1m}}{L}$ 与 0.5 相差不大，为了近似计算，可简单地取成

注 9 NI_0 将在下节中定义。

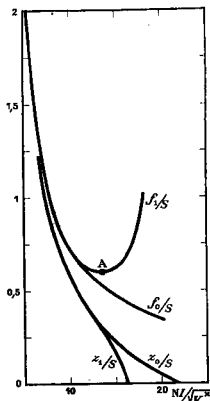


图9-12 透镜的电子光学参量作为激励的函数 $\frac{D}{S} = 1$

$$f_{1m} = 0.5\sqrt{S^2 + 0.45\left(\frac{D_1 + D_2}{2}\right)^2} \quad (7)$$

同样, 只要 $\frac{(D_1 + D_2)}{2S}$ 等于或大于 1, 可有

$$NI_0 = 13.5\sqrt{V^*} \quad (8)$$

这两个简单关系式通常已足够精确, 它们使用起来很方便, 有必要时, 可用图9-13得到更精确的值。

现在我们将采用归一化的坐标, 对一系列的透镜绘出特性曲线。

通常 $\frac{NI}{NI_0}$ 的值多大呢? 对电子显微镜的物镜, 电子束 X 光微区分析仪或扫描显微镜的缩小透镜等, 它们从 0.8 (强电子光学激励的物镜) 到 0.4 (弱激励的物镜) 间变化。对投影镜 $\frac{NI}{NI_0}$ 一般在 1 附近, 但不超过 1, 对会聚镜, 中间镜和衍射镜, $\frac{NI}{NI_0}$ 在很大范围内变化, 由很小值 (例如 0.1) 变到接近于 1。

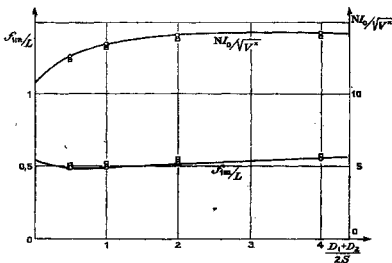


图9-13 最小焦距 f_{1m} 和相应的激励 $\frac{NI_0}{\sqrt{V^*}}$

我们将看到, 以这种方式来表达结果, 对于 $\frac{NI}{NI_0}$ 在 0.5—1 的范围内是方便的, 对于低于 0.5 的值, 即弱透镜情形, 我们将给出简单的公式来正确地计算这些特性。

4. 当 $\frac{D}{S}$ 趋近于零的极限情形

高斯光学近似, 把一般透镜的性质与一种极限情形比较一下是有趣的, 这种极限情

形相当于隙缝孔相对于隙缝宽度很小的情形, ($\frac{D}{S}$ 趋于零), 它的性质很容易确定。这时极靴端面是一个延伸得相当长的平行表面, 在隙缝中的磁场是均匀的, 在 $-\frac{S}{2}$ 到 $\frac{S}{2}$ 间均等于 $B = \frac{\mu_0 NI}{S}$, 在隙缝中的旁轴轨迹方程即变为:

$$y'' + \frac{e B^2}{8m_e V^*} y = y'' + \omega^2 y = 0$$

其中 ω^2 是常数, 在隙缝外轨迹为直线。电子光学特性的计算是简单的, 如果绘出它们作为 $\frac{NI}{\sqrt{V^*}}$ 的函数, 就将得到与图 9-12 很相仿的图, 由图 9-13 可知, 当 $\frac{D}{S}$ 趋于零时, $NI_0 = 10.9\sqrt{V^*}$ 而

$$f_{i0} = 0.55S$$

归一化的曲线可以下式表示:

对投影镜
$$\frac{f_i}{f_{i0}} = \frac{0.897}{\frac{NI}{NI_0} \sin 2.029 \frac{NI}{NI_0}} \quad (9)$$

$$\frac{z_i}{f_{i0}} = 0.91 + \frac{0.897}{\frac{NI}{NI_0} \tan 2.029 \frac{NI}{NI_0}} \quad (10)$$

对物镜

$$NI \leq 0.774 NI_0 \quad f_0 = f_i \quad z_0 = z_i \quad (11)$$

$NI \geq 0.774 NI_0$ 时

$$\frac{f_0}{f_{i0}} = \frac{0.897}{\frac{NI}{NI_0}} \quad (12)$$

$$\frac{z_0}{f_{i0}} = \frac{1.409}{\frac{NI}{NI_0}} - 0.91 \quad (13)$$

下面将看到, 这些表达式的适用程度。

5. 对 称 透 镜

A, 高斯光学近似

图 9-14 对一系列的对称透镜 ($\frac{D_1}{D_2} = 1$) 绘出了归一化曲线, 我们发现, 由于采用了归一化坐标, 不管 $\frac{D}{S}$ 多大, $\frac{f_i}{f_{i0}}$, $\frac{f_0}{f_{i0}}$ 作为 $\frac{NI}{NI_0}$ 的函数可以同一条曲线代表, 只要是 $\frac{NI}{NI_0} < 1.3$, 也就是说在 $\frac{NI}{NI_0}$ 的所有实用范围内 $\frac{D}{S} = 1$ 的曲线与其他 $\frac{D}{S}$ 值的

曲线的偏离竟低于1%。这些归一化曲线可很好地用 $\frac{D}{S} = 0$ 的极限情形的表达式所表

示；表1给出了由这些表达式所算得的一些值，在绘图的精确度内，这些数值都很好落在图9-14的曲线上。

表 1

$\frac{NJ}{NI_0}$	$\frac{f_1}{f_{1m}}$	$\frac{f_o}{f_{1m}}$	$\frac{z_1}{f_{1m}}$	$\frac{z_o}{f_{1m}}$
0.5	2.11	2.11	2.02	2.02
0.75	1.2	1.2	0.96	0.96
1	1	0.897	0.49	0.50
1.25	1.257	0.717	0.00	0.217

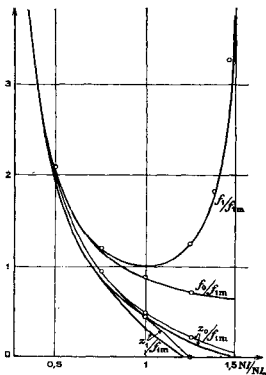


图9-14 对称透镜归一化曲线，细线绘出了 $\frac{D}{S} = 0.5$

时的 $\frac{z_o}{z_{1m}}$ 和 $\frac{z_1}{f_{1m}}$ 曲线，小圆点相应于 $\frac{D}{S} = 0$ 的极限情形。

公式(7)和(8)就可找到一系列的对称透镜的电子光学特性作为结构参数(隙缝宽 S 极靴孔直径 D ，激励 NI 和加速电压 V)的函数。

B. 色差(物镜)

色差系数可以容易地由(图9-15)的曲线求得，但我们却宁愿由下列表达式进行计算，

$$C_o = \int_{z_o}^{z_1} z_1 y'^2 dz \quad (14)$$

$y(z)$ 代表一条在轴上物点 z_o 处以斜率 $y' = 1$ 发出的傍轴轨迹， z_1 为其共轭点。转换到 z_o 面上的色差圆斑的半径为

$$\rho = C_o \alpha \left[\frac{1}{V^*} + 2 \frac{dI}{I} \right] \quad (15)$$

其中 α 是物镜相对于轴上物点 z_o 的半张角， $\frac{dV^*}{V^*}$ 和 $\frac{dI}{I}$ 分别为加速电压和物镜

电流的跌落。我们只给出当以无穷远处的轴上点为象点时的物方参数，显然这正是电子显微镜中的物镜或者电子束 X 光微区分析仪的最后一个缩小透镜的实际工作状态。作为初级近似，对所有的对称透镜存在着唯一的一条归一化的 $\frac{C_c}{f_{10}}$ 曲线，它显示 C_c 随 $\frac{NI}{NI_0}$ 的变化（图9-15），在同图中，我们也绘出了 $\frac{C_c}{f_{10}}$ 作为 $\frac{NI}{NI_0}$ 的函数，因为有时这曲线用起来更方便。对 $\frac{D}{S} = 0$ 的极限情形，由公式（9）—（13）可以方便地算出 C_c 来。当 $\frac{NI}{NI_0} \geq 0.774$ 时很简单地有 $\frac{C_c}{f_{10}} = \frac{\pi}{4}$ ，图9-15指出，这个数值与对其它 $\frac{D}{S}$ 情形算出的数值偏离不大，这种偏离使我们联想起上面已经指出过的对 $\frac{D}{S} = 0$ 和 $\frac{D}{S} = 1$ 的二种情形，其 $\frac{z}{f_{10}}$ 值间的偏离，这是很自然的，因为 C_c 的值与 $\frac{z_0}{f_{10}}$ 曲线的斜率相联系。

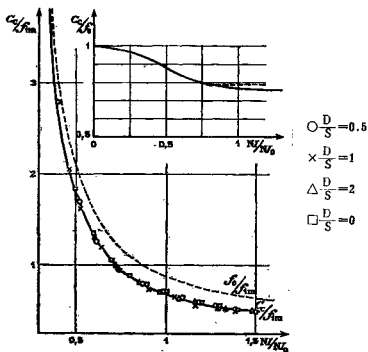


图9-15 对称透镜的色差系数 C_c

C, 球差

物镜的球差系数,

$$C_s = \frac{e}{96 m_0 V^*} \int_{z_0}^{z_1} \left(\frac{2e}{m_0 V^*} B^4 + 5B'^2 - BB'' \right) y^4 dz \quad (16)$$

$y(z)$ 是在计算 C_0 时已用过的傍轴轨迹，对于象点在无穷远处的情形作了计算，由于我们对 $B B' B''$ 的测量已很精确，这个计算已能很好地进行。

图 9-16 对一系列的对称透镜绘出了 $\frac{C_s}{f_{1m}}$ 曲线，可以看到，在实际测量的精度下，对 C_s 不存在一条通用的归一化曲线，在同图中绘出了 $\frac{f_{1m}}{f_0}$ 曲线，以便于迅速地计算 $\frac{C_s}{f_0}$ 。

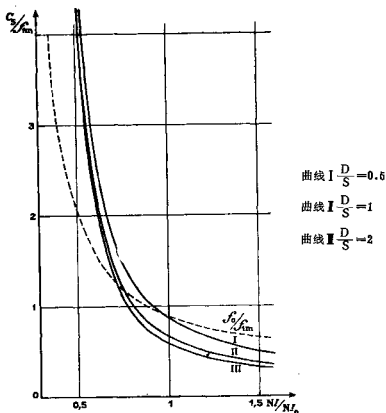


图9-16 对称透镜的球差系数 C_s

D, 象的旋转

象的旋转虽然比起前面的一些特性来讲不太重要，但有时却需要知道。我们知道在高斯近似下，在 z_0 到 z_1 面间象的旋转等于

$$\theta = \sqrt{\frac{e}{8 m_0 V^*}} \int_{z_0}^{z_1} B dz = \sqrt{\frac{e}{8 m_0 V^*}} \mu_0 \frac{n l}{V^*} = 0.1863 \frac{n l}{V^*} \quad (17)$$

$n l$ 是在 z_0 到 z_1 间的安培匝数，上面的数字是对电子而言的。

让我们取相应于 $NI = NI_0$ 的旋转角为参考旋转角，即

$$\begin{aligned}\theta_0 &= 0.1863 \frac{NI_0}{\sqrt{V^*}} \text{弧度} & (18) \\ &= 10.67 \frac{NI_0}{\sqrt{V^*}} \text{度}\end{aligned}$$

这个参考转角可由图 9-13 (它表示 $\frac{NI_0}{\sqrt{V^*}}$ 随 $\frac{D}{S}$ 的变化) 立刻算得。例如对

$$\frac{D}{S} = 1, \quad \frac{NI_0}{\sqrt{V^*}} = 13.5 \text{ 有 } \theta_0 = 2.515 \text{ 弧度或 } 144^\circ.$$

如果以 θ 来表示由物镜引起的旋转角 (自实际物面到成象面); 以 θ_1 来表示由投影镜引起的旋转角 (渐近线成象) 则有

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{nI}{NI_0} \quad (19)$$

$$\frac{\theta_1}{\theta_0} = \frac{NI}{NI_0} \quad (20)$$

其中 nI 是分布在物 (实) 和象面间的安培匝数; nI 可以由 $B(z)$ 分布以及焦点 F_0 的位置进行计算, 图 9-17 指出了对不同的透镜 $\frac{\theta}{\theta_0}$, $\frac{\theta_1}{\theta_0}$ 如何改变。

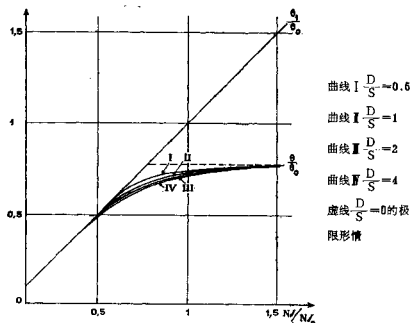
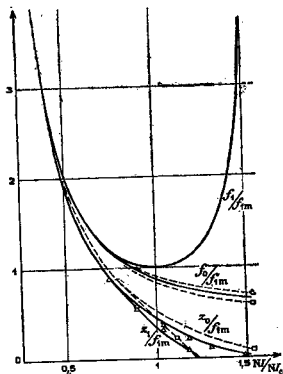


图 9-17 对称透镜象的旋转

6. 非 对 称 透 镜

A, 高 斯 光 学 近 似,

几个非对称透镜的归一化特性曲线绘于图 9-18, 9-19, 9-20 中, 每个图都相应于



$$\frac{(D_1+D_2)}{2S}=0.5, \text{ 实线代表}$$

$$\frac{D_1}{D_2}=1 \frac{D}{S}=0.5, \text{ 的情形虚}$$

$$\text{线是 } \frac{D_1}{D_2}=0.5 (\Delta) \text{ 和 } \frac{D_1}{D_2}$$

$$=2 (\square) \text{ 情形下的 } \frac{f_0}{f_{1m}} \text{ 线,}$$

为了使图线不过分密集, 对

焦点曲线只绘出了几个数值

$$(\Delta \text{ 对 } \frac{D_1}{D_2}=0.6 \square \text{ 对 } \frac{D_1}{D_2}$$

$$=2) \text{ 曲线 } \frac{f_1}{f_{1m}} \text{ 非对称透镜有}$$

效。

图 9-18 非 对 称 透 镜

一个 $\frac{(D_1+D_2)}{2S}$ 的数值和不同的 $\frac{D_1}{D_2}$ 数值。

表面上看来, 这种图好象很不完整, 对于给定透镜, 绘出了焦距后, (实际物在 F_0 处, 而象却在无穷远) 都没给出焦距 f_0' , (物在无穷远, 实际象在 F_0')。但实际上, 图 9-11 告诉我们, 如果透镜 I 和 II 具有相同的 $\frac{(D_1+D_2)}{2S}$, 而它们的 $\frac{D_1}{D_2}$ 值却互为倒数, 那么透镜 I 的 f_0' 等于透镜 II 的 f_0 , 因为只要倒一下透镜两部分的标志, D_1 变成 D_2 , 而 D_2 变 D_1 , 那么除了方向正好颠倒外, 轨迹将保持不变。(注 10)

结果, 在图 9-18, 9-19, 9-20 中, 对 $\frac{D_1}{D_2}=0.5$ 的 $\frac{f_0'}{f_{1m}}$ 曲线正好与 $\frac{D_1}{D_2}=2$ 的 $\frac{f_0}{f_{1m}}$ 曲

注 10 这儿我们不考虑坐标系 Oz 的旋转。

线重合了。

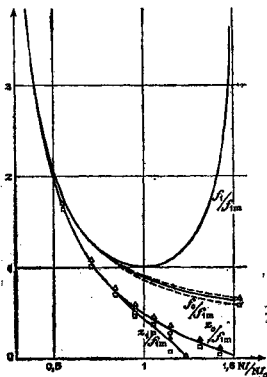


图9-19 非对称透镜

$\frac{(D_1+D_2)}{2S}=1$, 实线相当于

$\frac{D_1}{D_2}=1$ $\frac{D}{S}=1$ 情形, 曲线

$\frac{f_1}{f_{1m}}$ 对非对称透镜有效其他符号同图9-8, 但这儿以虚线绘出了 $\frac{z_0}{z_{0m}}$ 曲线; 而对

$\frac{z_1}{z_{1m}}$ 则与图9-18一样, 仅限于绘出某些数值。

同样对 $\frac{z_0}{f_{1m}}$ 和 $\frac{z_0'}{f_{1m}}$, 对 $\frac{z_1}{f_{1m}}$ 和 $\frac{z_1'}{f_{1m}}$ 以及象差系数也有类似的结果。

在所有的情形下, $\frac{f_1}{f_{1m}}$ 随 $\frac{NI}{NI_0}$ 的变化可以用对称透镜的通用曲线表示, 只要 $\frac{NI}{NI_0}$ 低于 1.3, 误差小于 1%。前已指出, 这条通用曲线可由 (9) 式很好地表达。参考值 f_{1m} 也已经知道了。(图 9-13 和近似公式 (7))

当 $\frac{D_1}{D_2}$ 不等于 1 时, f_0 和 f_0' 就不再相同, 图 9-18, 9-19 和 9-20 中绘出了他们对 $D_1=D_2$ 曲线的偏离, 同时这偏离随 $\frac{(D_1+D_2)}{2S}$ 而增加。为了使曲线不致过分密集, 我们仅以点线绘出了 $\frac{D_1}{D_2}=2$ 和 0.5 的情形; 我们也曾对 $\frac{D_1}{D_2}=3$ 和 $\frac{1}{3}$ 的情形作过计算, 结果表明, 他们偏离 $\frac{D_1}{D_2}=2$ 和 $\frac{1}{2}$ 的情形很小, 并且当取 $\frac{D_1}{D_2}=2$ 和 $\frac{1}{2}$ 的 f_0 (或 f_0') 数值时, 在数量级上已足够精确。

同样，我们以实线表达对称型透镜的 $\frac{z_0}{f_{im}}$ ， $\frac{z_1}{f_{im}}$ 变化，而对非对称透镜仅限于讨论 $\frac{D_1}{D_2} = 2$ 或 $\frac{1}{2}$ 的情形，相应的曲线以点线绘出，并且当它们与 $\frac{D_1}{D_2} = 1$ 的相应曲线很靠近时，我们就停止绘线而仅以几个点表示。图旁的注解标出了符号，可使我们准确地利用这些图。

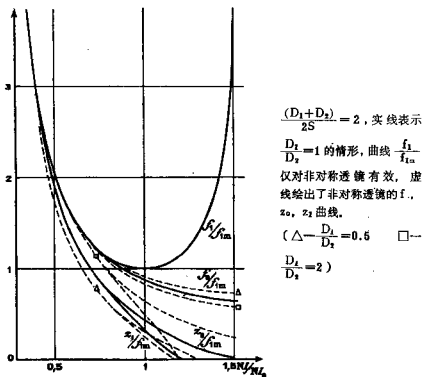


图9-20 非对称透镜

B, 色差 (物镜)

$\frac{C_0}{f_0}$ 的曲线与图 9-15 中在同样条件下对称透镜的曲线重合，有了这些曲线就足够了，我们不再对非对称透镜绘出 $\frac{C_0}{f_0}$ 曲线了。

C, 球差 (物镜)

我们对一系列透镜的 $\frac{C_B}{f_{im}}$ 和 $\frac{C_B}{f_0}$ 值作了计算，这儿不存在通用曲线。为简单起见，我们只对 $\frac{(D_1 + D_2)}{2S} = 0.5, 1$ 和 2 而 $\frac{D_1}{D_2} = 2, 3, \frac{1}{2}$ 和 $\frac{1}{3}$ 的情形绘出了 $\frac{C_B}{f_0}$ 随 $\frac{NI}{NI_0}$ 的变化。(图9-21—9-23)

其它的值可由检值法求得。

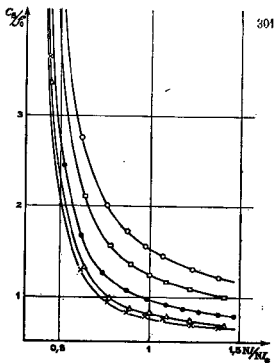


图9-22 非对称透镜
 $\frac{(D_1+D_2)}{2S} = 1$ 型透镜的球

差系数

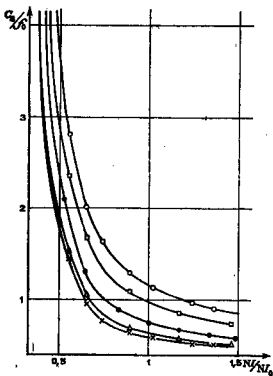
○ $\frac{D_1}{D_2} = 3$

□ $\frac{D_1}{D_2} = 2$

· $\frac{D_1}{D_2} = 1$

△ $\frac{D_1}{D_2} = 0.5$

× $\frac{D_1}{D_2} = 0.33$



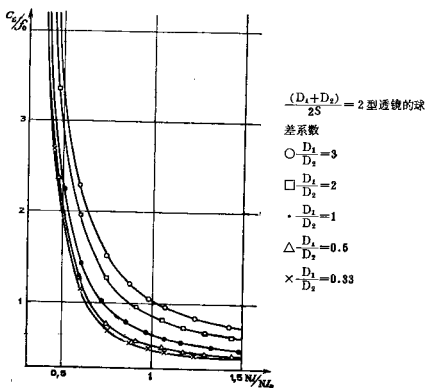


图9-23 非对称透镜

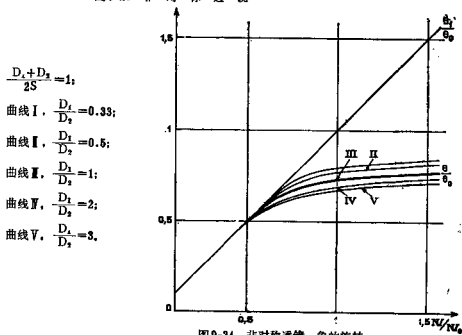


图9-24 非对称透镜, 象的旋转

D, 象的旋转

图 9-24 对一个物镜和一个投影镜当 $\frac{(D_1+D_2)}{2S} = 1$ 和不同的 $\frac{D_1}{D_2}$ 值情形, 绘出了象旋转, 采用的符号和对称透镜的情形一致。

7. 弱 会 聚 透 镜

A, 高斯近似

为了直接绘出 $\frac{NI}{NI_0}$ 很小的透镜的特性曲线, 需要采用对数坐标, 这种坐标在 $\frac{NI}{NI_0}$ 接近于 1 时就不方便了。事实上, 当 $\frac{NI}{NI_0}$ 小时, 存在着一些近似公式可计算出所有有用的参量; 其中有些公式前面就已列出来了。我们已经讲过的所有的结果都表明, 当 $\frac{NI}{NI_0} < 0.4$ 时, $f_1 = f_0 = f$ 和 $z_1 = z_0$ 。可以用公式 (9) 和 (10) 来计算 f 和 z_1 , 并且 z_1 的值与 f 的值相差很小, 即

$$\frac{f}{f_{1m}} = \frac{0.897}{\frac{NI}{NI_0} \sin 2.029 \frac{NI}{NI_0}} \quad (9)$$

当 $\frac{NI}{NI_0}$ 减小时, 这表达式趋于

$$\frac{f}{f_{1m}} \approx \frac{0.442}{\left(\frac{NI}{NI_0}\right)^2} \quad (21)$$

当 $\frac{NI}{NI_0} = 0.2$ 时其误差才 3%, 并且误差将随着 $\frac{NI}{NI_0}$ 迅速减小。

B, 色差 (物镜)

弱透镜的色差系数总是可用图 9-15 中的 $\frac{C_0}{f_0}$ 曲线表示, 当激励变弱时, C_0 迅速地趋于 f_0 。

C, 球差 (物镜)

文献曾计算了薄透镜的球差系数, 这儿我们简单地列出它们的结果。

对于弱透镜参量 $\frac{C_3 D^2}{f^3} \left[D = \frac{(D_1 + D_2)}{2} \right]$ 将独立于激励和穿过透镜的方向, 但却依赖于形状因子 $\frac{(D_1 + D_2)}{2S}$ 和 $\frac{D_1}{D_2}$ (对于薄透镜可很方便地避免发生饱和)。这个结果指出, 对于给定形状的薄透镜, 焦点处的球差系数 C_3 将正比于焦距的立方变化。这结果曾为实验很好地证实。如果改变透镜的大小而不改变形状, 对于给定的 f , 只要 f 始终大于 D , 那么 C_3 将比例于 $\frac{1}{D^3}$ 变化。如果绘出 $\frac{C_3 D^2}{f^3}$ 作为 $\frac{(D_1 + D_2)}{2S}$ 和 $\frac{D_1}{D_2}$ 的函

数，那么就可以对各种薄透镜，各种焦距算出 C_B 来。这就是图 9-25。

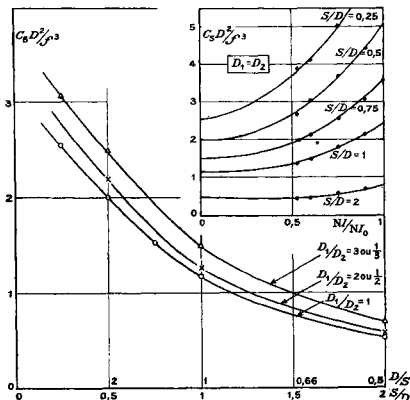


图 9-25 弱会聚透镜，球差系数 C_B 。

图中右角的小图可以确定出 $\frac{C_B D^2}{f^3}$ 保持为常数时的激励范围，并绘出一个修正。

由图可见，对 $\frac{D}{S}$ 很大的透镜当激励不太小时，这修正就很快地变得重要起来，而对

$\frac{D}{S} = 1$ 情形，只要是 $\frac{NI}{NI_0}$ 小于 0.3，这修正值仍很小。

D, 象的旋转

自然，这旋转角正好是 $\theta_1 = \frac{\theta_0 NI}{NI_0}$ ，因为在这种情形所有的安培匝数都对成象有贡献。

前面所绘出的结果几乎可以直接用来设计透镜，在前文中我们已指出了应用的例子。为了不使本文过长，我们就不再处理这种问题，我们只指出，非对称性可用来满足一些特殊的条件，例如下面二种情形：

对于电子显微镜的物镜，使接近物方的极靴端面开有较大的孔是有益的，例如可使

于安置物的加热系统或定位设备。

对电子探针设备（微量分析器、扫描显微镜）中的最后一级缩小透镜使接近于靶面的极靴端面开有较小的孔可能是有益的，例如，这样可以减小靶面上的场。

对所有这些情形，由本文的较为简单的结果出发，可以很可靠地设计出磁透镜来满足各种复杂的要求。

刘绪平译自法文《Revue D'optique》
1961, Vol. 40, 277 （本刊作了删节）

※参考文献略

岛津 ASM 型扫描电子显微镜

(日)若林忠男等

摘 要

近年来,人们对扫描电子显微镜的要求提高了,想要用它获得二次电子和其它信号,如特征 X 射线等,并尽可能多的获得有关试样的讯息。

为了满足这一要求,我们研制了能用二次电子观察试样表面、同时也能满足以下要求的新式扫描电子显微镜 ASM。这些要求是:

(1)用双目立体显微镜,对试样表面进行观察;

(2)用两道 X 射线出射角为 52.5 度的 X 射线分光光谱仪(波长分散式 X 射线分光器),作元素分析。

此外,还为了使扫描电子显微镜易于操作,而且对进行分析的试样,尽可能多地获得讯息,我们研制了二次电子像的对比度及亮度的自动调节机构和许多附属装置。

一、前 言

近年来,扫描电子显微镜在生物、金属、化学、陶瓷、电气、电子和地理学等领域方面得到了广泛的应用。扫描电镜的发展已久,在本世纪三十年代 M. Knoll, 提出了扫描电镜的原理,以后,经过 M. V. Ardenne, K. Zworykin 等人的研究,在 1965 年,才由英国 G. W. Oatley 等做出了能够实际应用的扫描电子显微镜。

扫描电子显微镜是利用物体表面产生的二次电子来观察物体的表面形态。为了分析物体的内部结构,研制了 X 光谱仪和能谱仪。在 EMX-SM 型扫描电镜上,既能高分辨本领地观察二次电子图像,又能高分辨率地进行元素分析。此外,该仪器在图像处理、元素分析的数据处理和操作简单等方面具有许多优点。

关于该仪器的原理、构造、附属装置及其应用叙述如下。

二、原理及构造

1. 用于分析的信号

用具有一定能量的电子束照射试样表面，一般说来，照射电子束（入射电子束）的大部分能量在试样上转变为热能，另外一部分能量用来产生特征 X 射线、连续 X 射线、背散射电子、吸收电子、二次电子、俄歇电子和阴极萤光等。当试样非常薄的话，一部分入射电子透过试样形成透射电子束，用此法可以观察透射图像。而且在观察半导体（具有 p-n 结）时还可以产生感生电动势，用此信号可观察电动力图像。

这些信号是由于入射电子与物质的相互作用产生的。背散射电子的强度与试样的原子序数有关，为此可以用来确定试样上某一点的平均原子序数。因为背散射电子与样品吸收电流成互补关系，用吸收电流也可以确定某一点平均原子序数。

因为二次电子具有背散射电子所没有的许多特点，所以成为扫描电镜中最重要的信号。这些特点为：

- (1) 焦深大，可以用来观察凹凸很大的试样，如断口表面、催化剂表面等；
- (2) 分辨率高，二次电子分辨率比背散射电子分辨率大约高十倍，几乎等于入射电子的分辨率，为此利用二次电子信号能够观察试样很细微的结构；
- (3) 低电压下二次电子产生的效率高，适于观察经不起高能电子束照射的试样，例如生物和有机物试样等；
- (4) 因为二次电子能反映试样表面的微弱电位变化，故能用来检查晶体管和集成电路的内部缺陷。

还有，入射电子在试样上损失的能量中，仅有 0.1% 的微小部分产生特征 X 射线。因为特征 X 射线和原子序数之间存在莫斯莱（Moseley）的关系，故可以进行试样定点点定性分析；并且特征 X 射线强度与元素的密度大体成比例关系，因而也可进行定量分析；如果进行适当的修正，能够很精确地确定元素的密度。

2. 基本原理

具有一定能量的很细的电子束照射到试样上，用扫描线圈使电子束在试样上进行面扫描，这样就从试样上产生了种种信号，如二次电子信号等。二次电子信号的大小随试样表面形貌，材料等因素而变，产生信号反差。通过接收系统和放大系统把信号送到显像管的栅极上来调制显像管的亮度。由于显像管上的偏转线圈和镜筒中扫描线圈中的扫描电流是严格同步的，所以由接收系统逐点检取试样上的信号将一一对应地调制显像管上相应点的亮度，这样在显像管上就产生了试样的图像。如果电子束是定点照射到试样上，利用光谱仪或能谱仪就能定性或定量地分析该点的元素种类及其含量。

ASM 型扫描电镜能同时接收二次电子(背散射电子)、X 射线和阴极荧光等信号。

扫描电子显微镜的分辨本领高,以前多限于用其二次电子观察试样表面形态。影响仪器的分辨本领的因素很多,而且对分辨本领的定义也各不相同。但是,影响分辨本领的主要因素是入射电子打在试样上的束斑直径。该直径由电子枪的电子束交叉点直径及电磁透镜的特性决定。电磁透镜的特性包括缩小率、球差、像差和色差等。为了获得高分辨本领,必须有一个优良的电子光学系统。

以钨丝为灯丝的扫描电镜中,拍摄高分辨本领图像时的电流(试样上的吸收电流)一般为 10^{-12} 安培;应用 X 射线光谱仪分析元素时的电流为 10^{-8} 安培以上。这样就必须在物镜中装不同孔径的光阑以满足上述要求,但这给操作带来了不便。

扫描电子显微镜在做元素分析时应具有:

- (1)在元素分析的位置上能有 10^{-8} A 以上的电流和最高的分辨率;
- (2)在电子束照射时应能同时用光学显微镜确认分析点;
- (3)X 射线应具有较高的出射角;
- (4)为了观察大的凹凸不平的断面要求光学显微镜具有大的焦深。

另外,为了观察和分析凹凸不平的断面试样,把二次电子探头和 X 光谱仪安装在同一个方向上。

二、仪器的结构

岛津扫描电子显微镜,分为带 X 光谱仪的 ASM-SX 型和不带 X 光谱仪的 ASM-ST 型。ASM-SX 型包括主体镜筒、真空控制系统及电器部分。电器部分包括电子的加速、聚焦、电子束信号和 X 光信号的接收等部分。为了能同时观察高分辨本领的图像和做微区元素分析,该仪器做了如下考虑:

- (a)试样放在能得到高分辨本领图像的高位置上(即试样距物镜中心很近);
- (b)能用光学显微镜对试样表面进行观察;
- (c)能产生大角度的 X 射线(X 光出射角为 52.5°)。

上述考虑和设计是在岛津 ARLEM-SM 型的基础上改进的。现将电子光学系统、光学观察系统、试样微动装置、X 光谱仪等介绍如下:

1. 电子光学系统

(1) 特性

从阴极发出的电子受一定高压的加速,经过二级磁透镜缩小,形成一束直径小于 100 \AA 的电子束聚焦于样品上。物镜极靴采用称为 Wiffry 形的非对称大口径的,观察试样的光线和试样上产生的大角度 X 射线均能从极靴内侧射出。物镜的高度做成约 30 mm 的超薄形,二次电子信号从物镜的下侧接收。这个非对称透镜在试样附近的磁场分布,如图 10-1 所示那样成为非对称形,向小口径外侧扩散的磁场极少。这样,虽然

在观察或分析强磁性试样的情况下很少会出现入射电子束位置的移动、发生像散和对二次电子图像产生异常的影响。由于用了这样形状的物镜，能够使物镜，光学显微镜和X光谱仪的三个焦点一致，因此就可以在得到高分辨本领的二次电子图像的试样位置上，进行光学的试样表面观察及用X射线做精确的元素分析。

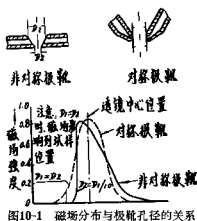


图10-1 磁场分布与极靴孔径的关系

能满足微区分析领域中的一切要求。例如，用软X射线进行状态分析和微区俄歇分析等，在低电压（~10KV）、大电流（~1μA）的情况下，要求把电子束径调得比图10-2的更小。用现在的钨丝叉型电子枪是难以满足上述要求的，只有用高亮度电子枪（六硼化镧型或场发射型）才能达到。目前，高亮度电子枪，正在研究之中，不久就可以安装到ASM上。

一般，对于一定电子束直径的试样电流，由电子枪的亮度和透镜系统的球差决定。电子枪交叉点的亮度B与灯丝的材料性质、加热温度T及加速电压V_a的关系为：

当电子通道上各点电位相同时，通道上各点的电子束亮度与电子枪交叉点的亮度是一样的，均不受磁透镜对电子束扩大或缩小的影响。因此试样上的束流是与其束斑和物镜光阑的面积成比例。考虑到球差的因素，获得最大束流时的光阑，由球差系数决定。即在电子束斑的半径为γ时，按照产生 $\frac{1}{4}\gamma$ 的球面像差来选择光阑，此时束流最大。若是按照半径为γ的电子束斑的束流达到最大值的方式，选择物镜光阑，其束流由 $r^{\frac{3}{2}}$ 决定。当缩小束斑时，其束流的减少比束斑尺寸的缩小变得更快。

$$B = K \cdot \left[T \exp\left(-\frac{e\phi_0}{KT}\right) \right] V_a$$

图10-2表示。物镜光阑为 $\varnothing 200\mu$ 时，试样电流与电子束径的关系。从能得到100Å分辨本领的试样电流到进行正常的X射线分析时的试样电流值(0.01~0.1μA)，电流值虽然改变，但X射线分析时的分辨本领并不降低。这个试样电流和电子束径的关系，在实用上大致是可以满足的，但不是

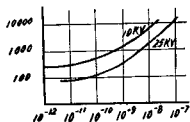


图10-2 电子束直径与加速电压、试样电流的关系曲线

(2) 结构

图10-3表示ASM-SX型的结构剖面图。电子枪是钨丝叉型、自给栅偏压式。电子枪下部是一隔断阀门，用来隔断电子枪与镜筒真空。更换灯丝，把需换的灯丝插入管

座即可。更换灯丝后，合轴的调整方式为：首先调整灯丝的顶端与栅极的顶端到图10-4

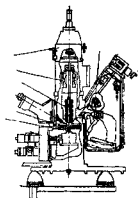
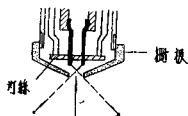


图10-3 ASM-SX的镜筒剖视图



从右方看，将栅极
图筒控制可以见到灯丝
的位置
用灯丝顶调整大致中心

图10-4 灯丝的核装位置

所示的位置上；其次加上高压，在发射电流通过的状态下，相对于栅极调整灯丝的轴位置，使试样电流达到最大。新换的灯丝由于热变形，非常容易发生对于栅极的轴位移，因此造成发射电流的长时间不稳定。还有，为了得到最小的交叉斑点，以及束流能够长时间稳定，必须把灯丝和栅极的位置调到最佳的位置上。为了达到上述目的，ASM和EMX一样，可以在引出电子束的同时，从电子枪的外部进行调整。

自电子枪以下的镜筒为内外两层结构。内层由磁透镜、光阑、扫描线圈和消像散器等构成，外层用来屏蔽杂散磁场和兼作抽气管道。X光谱仪安装在镜筒外层上。构成内层镜筒的部件是经过精密加工的，并使其在安装时保证精密的透镜合轴。这样在安装外层镜筒后，就不需要对内层部件进行合轴调整。在内层镜筒电子通道上，安放极靴和聚光镜光阑等另件，这些另件能够在卸下电子枪的情况下，向上取出。因此，在不拆卸整个装置的情况下，就可以很容易地进行电子通道的清洗。

图10-5是表示ASM电子光学系统的方块图。在ASM上采用了聚焦调整镜、动态聚点、像分割系统、像旋转和像倾斜校正等一些新的扫描部件。这些部件装在聚光镜和物镜之间。

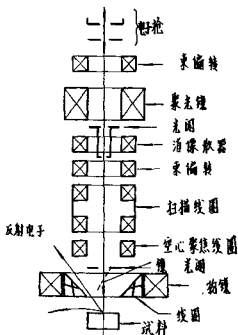


图10-5 ASM的电子光学系统

2. 光学观察系统

为了对分析的试样进行光学观察，使用具有工作距离为 65mm，放大倍数为 80 倍的各自独立光路的双目立体显微镜。这个立体显微镜焦深大（150 μm ），能够立体地看试样。因此，不仅便于选定分析场所，而且对于观察凹凸不平很大的试样也很方便。

用 X 光能谱仪进行元素分析时，对于试样上下位置的精度要求，在这个立体显微镜的焦深以内，故是足够的，而用 X 光谱仪分析元素时，试样的上下位置精度要求必须在 $\pm 5\mu\text{m}$ 以内，用 150 μm 焦深的立体显微镜来确定试样的位置就不能满足要求了。

为了解决这个问题，采用了下述方法，如图 10-6 所示。从光源 A 照射需要观察的试样表面的全部视场，通过置于物镜中间的镜子从垂直方向来观察试样表面。与这个观察光轴成一角度的光源 B，将狭缝像投影到试样表面上。试样上下移动时，狭缝像将作横向移动（图 10-6 的 A、B、C）。

用这个方法得到试样上下位置的读数精度为 $\pm 3\mu\text{m}$ ，为此可以把 X 射线源调到罗朗圆上。

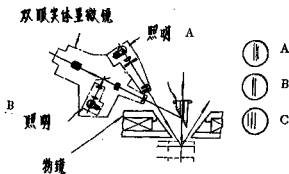


图 10-6 试样位置确定方法原理图

3. 试样装置系统

扫描电镜 (SEM) 和电子探针 X 光微区分析仪 (EPMA)，十多年来已广泛的应用到金属、非金属、矿物、电气材料、化学材料和生物组织等领域。对于这些性质完全不同的材料，制造能够适应使用者所有要求的万能试样装置，虽然并非不可能，但对某些使用者来说，有的机能既无用，又带来操作上的不方便和成本的增加。关于这一点，在多年的电子探针 X 光微区分析仪 (EPLA) 的制造经验上，研究整理各领域的许多使用者的要求，试样装置系统应该作为：让试样室、试样台、试样更换装置和试样处理装置成为各自独立的部件，根据使用者的要求可以任意地更换某一部件，但是又不影响试样装置系统的完整性。为了实现上述要求，其考虑为：

- (1) 试样室尽可能要大些，而且要与镜筒分开成为独立部件；
- (2) 试样室能独立进行真空抽气；
- (3) 试样台的 X、Y、Z、倾斜和旋转等五个自由度运动的部件为标准装备，以便能与拉力、冷冻特殊试样台互换；
- (4) 试样更换室要和试样室及试样台分开设置，以便在使用特殊试样台的情况下也能和标准试样台一样简单地更换试样；

(5) 设置一个能观察试样室内部情况的观察窗等等。

试样装置系统前面为试样台，左面为试样更换室，后面与下面为一些附属装置，右面为二次电子探测器。

试样台的运动范围为：X轴方向10mm、Y轴方向26mm、Z轴方向40mm、旋转 $\pm 180^\circ$ 和倾斜 $-5^\circ \sim 45^\circ$ 。倾斜机构的中心与光学观察系统的焦点相重合，在倾斜机构上装有旋转和X轴移动部件。X轴移动与倾斜的方向是相同的，Y轴则与倾斜方向垂直地移动。因而，虽然试样倾斜并在XY方向移动和旋转，但试样表面的光学观察点始终与X光谱仪的焦点一致，为此能迅速选定试样的分析视野。并且利用观察窗能很方便地看到试样室的全貌。

可以分析试样的尺寸为，标准试样 $\varnothing 25 \times 10\text{mm}$ 和 $10(\text{H}) \times 10(\text{W}) \times 10(\text{D})\text{mm}$ 两种。也可装置 $24 \times 48\text{mm}$ 的大型试样座。

4. 射线分光系统

镜筒右侧，可以安装二台X射线分光系统。二次电子探测器两边安装两台5"晶体X光谱仪，可以分析 B^6-U^{92} 的特征X射线。其中一台X光谱仪装有LiF、ADP晶体和气流正比计数管，用于重元素和轻元素的分析；另一X光谱仪装有RAP、 P_6SD 晶体和聚丙烯窗的气流正比计数管，用于轻元素和超轻元素分析。

如图10-7所示，把二次电子探测器与X光谱仪安装在同一个方向，使试样向该方向倾斜。为此可以分析凹凸不平很大的试样。镜筒左侧（原文为右侧——译者）可以安装X光能谱仪或半扫描谱仪和小型衍射光栅分光谱仪等，这些谱仪X射线的出射角都是 52.5° ，关于这些谱仪各另有介绍，在此从略。下面

介绍新研制5"晶体的X光谱仪。笔者们一直制作用于EMX上的4"晶体和11"晶体的X光谱仪。4"晶体X光谱仪的X射线强度大；11"晶体X光谱仪的分辨率高。此次，新研制5"晶体X光谱仪的性能在上述两种X光谱仪之间。如考虑以分析一般元素为主，则X射线强度大的为好，其分辨率在4"晶体X光谱仪上是足够了。5"晶体X光谱仪，在狭缝为0.25mm时的分辨率较4"晶体X光谱仪为好，当狭缝为0.50mm时，5"晶体X光谱仪的X射线强度与4"晶体X光谱仪相同。

5"晶体X光谱仪的结构与4"晶体X光谱仪相同，都是直进式X光谱仪。其改进在于用从罗朗圆的中心的杠杆和将探测器拉向分光晶体的金属丝来限制探测器的位置。结果，可以省略在4"晶体X光谱仪中探测器的导向机构，所以整个谱仪的尺寸比4"晶

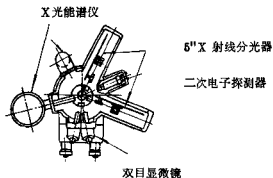


图10-7 谱仪的安置

体 X 光谱仪为小。

以步进马达进行传动，最小的步进波长为 0.00005 \AA (LiF 晶体)。传动控制，统一安装在 X 射线控制台的控制柜上，作远距离操作。一台 X 光谱仪装有两块分光晶体，该晶体在波长最长的一端用晶体变换器可以使其互换。波长表示计数器有两组，以便能够直接读出相对应晶体的波长。传动部分的变速箱内，装有电位计式号码器，以便检测分光晶体的机械位置和自动控制谱仪及表示元素的名称的信号。

三、图象处理的新方法

二次电子像的反差，主要是由样品的凹凸状态产生的，像的立体感很强。二次电子像在表面形貌观察上是很重要的，但另一方面，为了对样品作更详细的分析，必须从带有各种样品讯息的信号中，选出所需要的讯息再加以利用。

为此研究了几个新的图像处理方法：

- (1) 简化聚焦和消像散操作程序；
- (2) 自动化调整亮度和对比度；
- (3) 多种图像（不同放大倍数或不同信号）同时显示系统；
- (4) 对所需要的讯息加以选择和强调的信号处理。

由于这些机能，使操作技术易于掌握和迅速提高，并且可能表示微细的组织 and 排除反常对比度，而这对一般的图像处理方法是很难实现的。此外并大量采用监视机构和联动机构，以提高操作性能。

随着今后扫描电子显微镜应用领域日益扩大，不仅要高质量的像，而且也提出了要得到对分析者有特殊用途的像。从这个意义讲，在此叙述的图像处理方法应当起一些作用，可以认为是今后发展的方向之一。

1. 简易的聚焦系统

通常图像的聚焦是与电子束的加速电压和样品表面上下位置联动进行粗调。但在样品刚放进样品台或移动凹凸过甚的样品时，电子束的焦点和样品表面不一定一致。在此情况下，使用图 10-8 所示的系统，使聚焦工作易于进行。物镜线圈与物镜磁场中的空心聚焦线圈及消像散器线圈为重叠励磁，重叠励磁电流与扫描信号同步。因而扫描样品表面的电子束焦点随着扫描而变化，如图中 A、B、C、各点所示。这样，在面扫描中的某处，样品表面和电子束的焦点一致，也就是说在图像上对应的某处应出现清晰图像。

这一系统，分粗调与细调两部分。粗调程序如下。因为电磁物镜为直流和与 Y 轴扫描信号同步的锯齿波电流重叠励磁，在显示管的图像上，只有聚焦的地方见到横纹。调节物镜电流手控旋钮，使横纹恰在显示管画面的中央，其次切断与 Y 轴扫描信号同步的重叠励磁电流，这时焦点的位置便扩展到全画面。细调的程序如次。使空心聚焦线

圈的励磁电流与 X 轴扫描信号同步。在画面上的某处出现了成为纵线的清晰部分。其次用物镜旋扭，把画图上清晰的部分移至中央，切断聚焦线圈的励磁电流，画面全部清晰了。

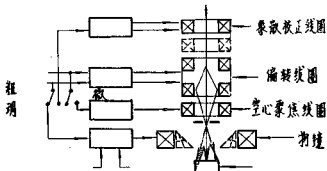


图10-8 ASM的聚焦调整系统

在需要消除电子束像散时，则 Y 用轴扫描信号使消像散器线圈重叠励磁，用 X 轴扫描信号使空心聚焦线圈励磁，可以同样简单地聚焦。旋转消像散器的方向旋扭，就在显示管上的某处出现清晰的图像。再旋转强度旋扭和物镜手动旋扭，让清晰的图像移到显示管的中央部分。然后去掉与 X、Y 轴扫描信号同步的重叠励磁电流，则清晰的图像即扩展到显示管全部。原来的消像散方法，是所谓捕捉像流的操作。判断有无像散必需训练有素才行，消除像散不易。本方法只需判断清晰的像，并移到画面的中心位置即可，操作极为容易。

2. 自动图像控制系统

电子束照射样品时，从样品表面发射的电子的强度，按样品表面的组成和凹凸而变化，将这些信号放大后在显示管屏幕上显示出来，就成为二次电子像或反射电子像。这些信号由直流和交流成分组成，决定图像整体的亮度，交流成分，决定图像的对比度。但限于显示管的亮度调制范围，有必要把放大的信号调整到一定数值之内。也就是必须把直流成分大致调整到显示管亮度范围的中间，把交流成分调整到，其幅度在亮度的调制范围以内。图10-9表示这一关系。通常不仅是变更样品和分析条件，即使是对同一样品，在变更样品视野或改变放大倍数时也必须单独用手调整前述直流成分和交流成分。这一操作既要有经验又很麻烦。同时这也是在摄影时不能得到适当色调的图像的原因之一。采用下述自动图像控制系统，虽然图像信号因某种原因变化，也能即刻得到高质量的图像。

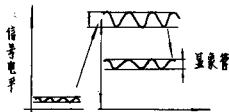


图10-9 视频讯号的调整

图10-10表示这一系统的方块图。这一系统是由检测图像信号的交流成分，使交流

成分的最大振幅限制在显示管的亮度调制范围内以便控制增益的电路,和自动调节偏压以使图像信号的直流成分正在显示管亮度调制范围的中部的电路(由电阻 R , 电容 C 及放大器组成)所构成。输入信号 e_i 中交流成分的最大振幅值,由峰值检测器检测,所检测的信号由采样保持器保持。然后由被保持的信号,控制除法器的增益,以保持输出信号 e_o 的交流成分最大值固定。也就是能在显示管的亮度调制范围内自动调整图像信号的交流成分。同时利用开关 S_1 的闭合,

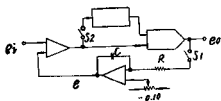


图10-10

使 A_2 输出补偿电压 e , 虽然在启开开关 S_1 时, 补偿电压 e 仍由放大器 A_2 和电容 C 所组成的保持电路所保持, 以便 e_o 的直流成分为最佳值。因而, 同时开, 闭开关 S_1 , S_2 , 输出信号 e_o 的直流及交流成分即能保持为最合适值。此外并将与补偿电压 e 成比例的电压, 控制光电倍增管最后一级的二极管电压, 虽然探头输入信号从 $\frac{1}{10}$ —10倍变化, 仍能控制光电倍增管的增益使输出为最佳值。图 10-11 示此特性。采用这种方式组

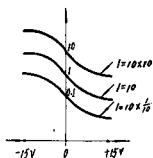


图10-11

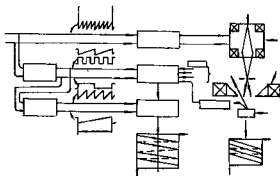


图10-12

合的自动控制系统, 信号电平虽从 $\frac{1}{50}$ —50 倍变化, 也可以自动得到最合适的图像色调。如果回忆一下在通常情况下, 信号电平虽只变化 20% 也必须再调整, 就可以理解本系统在广泛范围内的有效性。

3. 多种图像同时显示系统

此一系统是所谓多路调制显示器, 是将显示管的画面分成四份成两份使用而同时显示不同的图像, 称为图像组合器。图 10-12 为此系统的方块图。典型的扫描方式是扫描样品表面的电子束和显示管的扫描电子束同步, 各自一一对应地扫描。而在这里所述的扫描方法, 是将 X、Y 扫描信号通过分频器和锯齿波发生器再送到显示管。在此情况

下镜筒中电子束如按(a)→(b)→(c)→(d)的顺序在样品上扫描时,在显示管上的扫描顺序则成为(A)→(B)→(C)→(D),因而使画面的上半部分分为左右两个像。其次在样品上按(e)→(f)→(g)→(h)的顺序扫描时,在显示管上则按(E)→(F)→(G)→(H)的顺序扫描,使画面的下半部分也分为左右两个像。这样在显示管上一个画面共分为四个像。

假若使样品上的电子束与显示管上电子束的扫描周期,在X方向为一比二,在Y方向为一比一,则显示管画面上的像分成两个。

在这些分开的区域里,可以各自表示任意的像。所谓任意的像,是指不同倍数(某一倍数的2、4、8倍)的像和不同信号的像(二次电子像、反射电子像、吸收电子像、特征X射线像、其他被检测的一切信号及以下所说的色调制控制器处理过的信号等)的组合。此外利用前述的自动图像控制使图像的亮度和对比度保持固定不变。

4. 色调处理系统

在扫描电子显微镜,只将从样品得到的微弱信号比例放大时,经常难于得到合适的图像。由于样品的电子发射特性、检测方法、人的视觉特性等、在各种样品条件下,不一定能经常得到合适的图像。同时在有特殊的照像目的时(例如,只观察图像的轮廓、只想看微细的表面构造等)只想把所要的信号强调、放大,用原来的方式是办不到的。有鉴于此研制了把信号在电性能上予以处理,以控制色调的装置。即所谓色调控制器。其原理是将信号分成各种频率成分,可任意组合各成分以适应特殊的照像要求。图10-13是其方块图。

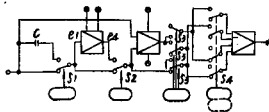


图10-13

3.4.1 直流、交流耦合器

如前所述,信号的直流成分决定图像的亮度,交流成分决定图像的对比度。直流流耦合器,则将直流成分和交流成分分离之后,再以适当比例予以混合。这样,可以不用提高全体的对比度而只提高局部的对比度。

3.4.2 反差—— γ 控制

二次电子像,能很好地表现样品的凹凸状态,宛如在可见光下观察原物的形象。这是因为二次电子信号在显示管屏幕上成像之前的放大过程作了某些信号处理——通常是将接近噪音电平的信号和某一幅度以上的信号加以抑制,让中间部分的信号对比度经非

线性放大而提高。可是，在注视图象的整个时候，依靠视觉的像的亮度，既与亮度的强弱有关，又与亮的部分在画面中占多大面积有关。有时候需要更强调亮的部分，也有时只要把某种亮度以上的部分成像。这样就要把通常所用的反差控制的补偿量作成可变的。这里新采用的补偿量，除一般的补偿量 γ 外，还有 $\gamma^{\frac{1}{2}}$ ， $\gamma^{\frac{1}{4}}$ 及特性相反的 γ^2 、 γ^4 。其特性如图10-14。

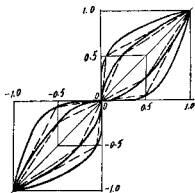


图10-14

3.4.3 有源滤波器

信号中交流成分的频率随样品的组织，构造和扫描速度而变化。同时在弱信号的情况下，信号内会出现强烈的干扰尖脉冲，致使图象质量变坏。有源滤波器是利用信号的频率特性而取出某种频率范围的信号。利用高通滤波器、低通滤波器可以如图10-15所示，取出全频率信号、较高频率的信号、较低频率的信号(都可以分成数段选择)及特定频带的信号。

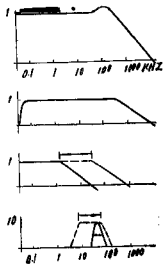


图10-15

4.4.4 极性

对于图像中应给予注意的部分，可以利用信号的极性，也就是在图像明暗的反转，来选择究竟用白的表示还是用黑的表示更易于看清。还有，透射电子显微镜像(或STEM像)和普通的SEM像，明暗大致相反。为将这两者对应比较，采用极性反转即可作到。此外制做幻灯片时，可用正像底片摄影，或者为了不需将负像底片再反转印片，只需通常使用的负像胶片拍摄极性反转的图像，即可得正像。这也是方便之处。

具有以上机能的色控制器，装在视频放大器之后。当然，不通过色控制器也能成像。色控制器和图像组合器并用，可以同时表示使用和未使用色控制器的像，这有利于对比色调变化的程度。

5. 图像旋转及倾斜校正

4.5.1 图像旋转

图像旋转是以显示管的画面中心为轴，且与样品的倾斜、偏移的位置等无关。利用这一点，还可以对连接画面中任意两点的直线进行线分析。

4.5.2 倾斜校正

在样品倾斜的情况（有时将样品倾斜是为了提高信号的检测灵敏度）扫描的纵横比不再是一比一。这时圆形的样品在画面上将表现为椭圆形。倾斜校正，是校正扫描的纵横比将变形恢复为正确形像的机能。

四、新的分析方法

1. 透射电子法（用靶子法观察透射电子像）

在扫描电子显微镜上用透过薄膜试样的电子束作观察的方法，称为STEM观察法，这种方法原来用的就很广泛。将试样做成薄膜而观察透射电子象的目的为：

(1) 用透射电子可以得到试样内部的讯息。

(2) 将试样做成薄膜，由电子束激发的范围较用厚试样时为小，可提高分辨率。

(3) 能和普通的透射电子显微镜（TEM）相应，有时对比度比TEM象要好。

最近，用STEM法观察薄膜试样的同时，盛行同时进行元素分析。但是，此时X线强度和STEM象分辨率之间存在着矛盾。在能得到对比度恰好的STEM象的条件下（例如，试样厚度为1000Å，加速电压40KV），所能得到的X线非常弱，因此，采用能谱仪，虽然试样电流很微弱，也能在短时间内作定性分析。定量分析时，就必需用波长色散法的X线光谱仪。此时，希望能得到强的X线。

为了增加X线强度而增加试样厚度，就会使STEM检测方法所检测的信号量不足，STEM象也会不清晰。

本文著者想出的靶子法，消除了这一缺点，并具有以下的特长：

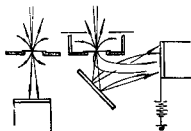
(1) 透射电子象的观察，不需要复杂的专用检测器，可以使用一般的二次电子检测器。

(2) 装置非常简单，操作也容易。

(3) STEM检测灵敏度高。

(4) 可以用波长色散法X线光谱仪作元素分析，状态分析（自然，也能使用能量色散法X线光谱仪）。

图10-16所示是原来的STEM检测法和靶子检测方法之比较。原来的STEM观察，如同图(a)所示，在试样下部设有专用的检测器，采用检测透过材料的电子的方法；靶子法，如图(b)所示，是让透过试样的电子先碰到靶子，变成反射电子后，利用SEM观察用的检测器而检测，还加一屏蔽以使试样上方产生的电子不能混进。这一方式，只要采用装有靶子的试样夹具，便可以作STEM观察。另外，这种试样夹具和



(a) 原来的方法 (b) 靶子检测方法

图10-16 透射扫描图象的检测方法

一般的相同，能安装试样微动装置，不需要特殊的试样台。采用靶子法，不仅能在厚膜试样上得到高灵敏度的 STEM 象，而且对波长色散式 X 线检测器来讲，也能得到足够强的 X 射线。此外，靶子法与原来的方法比较，所以能得到高灵敏度的 STEM 象，是因为在原来的方法中，如图 10-16(a)，用放在试样下面的专用检测器接收透过试样的电子。由于试样和检测器之间，装有试样台，或者在特殊情况下，装有电磁透镜等电子光学系统，就只能检测透过试样的能量高的电子，低能量的电子几乎就不能检测到。与此相反，靶子法中，如图 10-16(b)，试样与靶子接近，其周围无任何阻碍，透过试样的电子中能量高的电子打到靶子上，打出较多的二次电子，被二次电子检测器接收，另一方面，能量低的电子，透过试样后，直接由检测器接收。就这样，用靶子法后，到达检测器的信号量比原来的方法多，因此能得到灵敏度更高的 STEM 象。

靶子法，如上所述，非常实用，而且具有高性能，可以期待今后将会普及于 STEM 象的观察。

2. 定性、定量分析的迅速化

用扫描电镜和微区分析器作定性、定量分析的方法已逐渐完善起来，但是，人们也要求提高效率，如分析时间的缩短，操作性能的提高，定量修正计算的迅速及简化等等。

自然，这些要求在一旦使用大型电子计算机后可以大部分得到满足，这种技术也正使用到 EMX 和 ASM 上。这里，简单介绍一些有用而简单的提高效率的技术。

2.1 高速定性分析装置

扫描电镜和电子探针上的定性分析，一般使用能量色散 X 线分析器 (EDS) 和波长色散 X 线分析器 (WDS)。关于两者的得失详情已另有报导，这里不再说了。从分析的意义上讲，波长色散法比能量色散法具有更多的优点，只是定性分析速度慢是其最大的缺点。能量色散法把由半导体检测器接收到的全部 X 线能量，用多道脉冲分析器同时作信息处理；而波长色散法用马达机械地移动分光晶体及检测器，只能一个元素一个元素地处理。例如，波长色散法使用 LiF 晶体，以 $0.1 \text{ \AA}/\text{分}$ 的移动速度，分析 $1.0 \sim 3.7 \text{ \AA}$ 的波长范围，约需 27 分钟。而能量色散法虽因对象的浓度不同有差别，一般 5 分钟以内的时间是足够了。

这里讲的高速定性分析装置，是为消除波长色散 X 线分析器的以上缺点而研制的。此装置采用在一定的采样时间内，将到达检测器的 X 线信号的脉冲间隔和装在本装置内的标准发生器的脉冲间隔进行比较，判断 X 线信号峰值的有无，只在判断有峰值的波长范围，才缓慢移动 X 线分光晶体。也就是说，一般的波长色散法，对于一切波长范围是以同一速度移动 X 线分光晶体的，对不存在峰值的范围也是缓慢地移动分光晶体，本装置则自动判断 X 线的信号峰值，在无峰值的波长范围内加快分光晶体移

动的速度。

用一般方法及使用本装置的方法，对不锈钢进行重元素范围的定性分析结果可知，一般的方法要 15 分钟，而使用本装置则缩短到只有其六分之一的时问，约 2.5 分钟。

傅崇德译自日文《岛津评论》
1975, Vo L. 32, No:1, 35~59。
(本刊作了整理和删节)

※参考文献略

全国电子探针、扫描电镜技术 经验交流会在桂林召开

全国电子探针、扫描电镜技术经验交流会于一九七五年十月十五日到十月二十二日在桂林召开。参加会议的有来自全国有关电子探针、扫描电镜工作的主管机关，研制单位和部门共五十一个单位。会议进行了八天的经验交流，讨论、参观等活动。

这次会议是在国内外一片大好形势下召开的。自1973年全国电子探针技术经验交流会以来，我国的电子探针、扫描电镜工作有了很大的发展，技术队伍也不断地扩大。到目前为止，全国共有电子探针27台，扫描电镜19台，技术队伍达300余人。更可喜的是在这两年中中国科学院北京科学仪器厂，上海新跃仪表厂等单位，在会上介绍了他们试制的具有国际水平的扫描电镜、离子探针，打破了西方资产阶级的垄断，为我国填补了在这方面的空白，它标志着我国电子光学仪器的制造和使用已达到了一个新的水平。两年来，许多单位在仪器的使用、维护和管理工作中积累了很多的宝贵经验，通过这次会议，交流了经验，促进了各单位工作的开展，尤其是促进了科研、试制、生产单位的三结合，为进一步发展电子探针、扫描电镜仪器的试制生产和应用，起了积极的作用。

这次会议共有25个单位，提出四十多篇报告。其中扫描电镜方面的资料九篇，有科学院北京科学仪器厂关于DX-3型扫描电镜试制工作报告，介绍了我国第一台扫描电镜的试制简况、仪器的工作原理、结构及设计。扫描电镜的应用近年来发展很快，清华、北大及北京电子管厂、昆明钢铁厂等就扫描电镜在钢铁、冶金、生物、高分子、电子学技术等方面的应用做了报告。冶金部钢铁研究院作了扫描电镜近年来的发展动向的报告，着重介绍了场致发射扫描电镜的进展和场致发射电子枪的工作原理特点和电镜的性能。

这次会议关于电子探针的资料有三十篇，主要是电子探针在钢铁、冶金、地质、机械制造、半导体材料等方面的应用报告。江南光学仪器厂在会上介绍了该厂电子探针试制工作进展，以及电子探针用光学显微镜的设计。

另外，会上还报告了离子探针、俄歇能谱方面的资料三篇。上海新跃仪表厂介绍了国产离子探针技术性能。

这些资料大都是通过电子探针、扫描电镜，离子探针研制、使用，作了大量的实践而得到的总结，是对生产、科研工作很有价值的。

在这次会议上，除了进行技术经验交流外，各单位的同志们还提出了许多供有关主管领导机关参考的意见和建议。

(本刊通讯员)

主要国家商品扫描电子显微镜的主要技术性能

主要性能		放大倍数	加速电压	样品尺寸	主要性能	备注
生产国	型号					
中国	DX-3型	100Å	5-30KV	∅15mm×h10mm ∅25mm×h20mm		
	JSM-15	保证200Å 可达150Å	4KV, 15KV不可调	∅15mm×h10mm		小型台式
	JSM-15P	250Å	15KV不可调	∅10mm×h10mm ∅32mm×h10mm		台式小型电镜
	JSM-S1	250Å	4-10KV	∅15mm×h10mm		简易型
	JSM-U ₁	100Å	1-50KV	∅10mm×h10mm ∅26mm×h20mm	两透全聚焦X射 或长色散谱仪 (简称光谱仪)	
	JSM-35	100Å	0-35KV	∅10mm×h10mm ∅33mm×h20mm ∅76mm×h20mm	光谱仪	谱仪和样品台的 驱动可用计算机 控制
	JSM-50A	70Å	0-50KV	∅10mm×h10mm ∅33mm×h25mm	光谱仪 能显色散谱仪 (简称能谱)	
	JFSM-30	30Å(二次电子) 15Å(透射电子)	1-30KV	∅10mm×h10mm ∅25mm×h15mm	能谱, 能量分析 器	采用场发射电子 枪以上为JEOL 产品
	MSM-4	250Å	15KV不可调			台式小型电镜
	SSM-2A	250Å	4KV, 10KV, 20KV	∅15mm×h10mm		电子光学系统在 工作台面之下
日本	HSM-2A	保证160Å 可达100Å	3-40KV	∅14mm×h12mm ∅26mm×h12mm ∅38mm×h12mm	两透光谱仪	

主要性能 型号	分辨本领	放大倍数	加速电压	样品尺寸	主要性能	备注
HHS-2R	100Å	20X-100,000X	1-30KV	∅13mm×h10mm ∅26mm×h10mm		
HHS-2X	70Å(二次电子) 160Å(探针用)	20X-200,000X	1-30KV	∅6mm×h10mm ∅15mm×h10mm ∅26mm×h10mm	光谱, 能谱	两个显示屏一个 显示样品的高倍 数图像一个同时 显示样品低倍数 图像
HFS-2	50Å					采用场发射电子 枪
HFS-2S	30Å	20X-300,000X	1-25KV	∅10mm×h25mm	能谱	采用场发射电子 枪
S-310	100Å					台式小型电脑, 场发射电子枪
S-600	70Å	20X-200,000X	1-30KV	∅14mm×h10mm ∅26mm×h10mm	能谱	以上为日立公司 产品
EMX-SM	100Å	10X-100,000X	0-50KV	∅25mm×h17mm 子32mm×h17mm	光谱	
ASM-ST	100Å 特殊设计80Å	20X-140,000X	0-30KV	∅35.4mm×h10mm 10×14×10mmh	两谱光谱仪	X射线出射角较 大为52.8° 以上为岛津公司 产品
100-2	260Å	10X-70,000X	16KV			
100-4	90Å	20X-100,000X				采用场发射电子 枪
10ASEM	90Å	10X-200,000X	0.3KV-20KV			采用场发射电子 枪
10BSEM	60Å	10X-200,000X	0.3KV-20KV		能谱	采用场发射电子 枪

生产国	主要性能型号	分辨率	放大倍数	加速电压	样品尺寸	主要性能	备注
英	Model 180	36 Å					为超高分辨本领的台式扫描电镜 以上为 Coates & Welter 公司产品
	TV	500 Å					小型台式
	MINI-SEM	750 Å	20 X - 10,000 X	10KV			小型台式
	MINIRAPIDSCAN	250 Å	30 X - 40,000 X			能谱	小型台式
	Super	70 Å	30 X - 100,000 X	2-25KV	∅15mm × h10mm	能谱	超小型台式场发射电镜 以上为 ISI 公司产品
	MINI-SEM	150~200 Å				光谱, 能谱	MAC 公司产品
	SX2	150 Å	30 X - 80,000 X	15KV 可调		能谱	
	MMS-5	76~125 Å				俄歇电子谱仪	附有 La, B _K 电子枪
	SM-3	400 Å	10 X - 20,000 X				镜筒为水平式
	BAUSCH & LOMB SEM	100 Å	1 X - 240,000 X			光谱, 能谱	EITEC 公司产品
Aero Scan. TM	250 Å	7 X - 80,000 X	1-25KV	50 × 50 × 25mm			
S-800	100 Å	10 X - 200,000 X	1-30KV		能谱, 组合 X 射线显微分析仪		
S _r -10							

生产国	主要性能 型号	分辨本领	放大倍数	加速电压	样品尺寸	主要性能	备注
英国	S-180	优于100Å 70Å(透射电子)	10X-1,000,000X	1-60KV	∅12mm×h3mm ∅26mm×h12mm ∅32mm×h5mm	光潜(半及全聚焦)扫描及组合X射线分析	
西德	AMR-1000	150Å	5X-100,000X	1-30KV	∅38mm×h19mm		
西德	AMR-900	100Å	5X-200,000X				具有对整个X射线分析的能力
法国	SEM-07	200Å	20X-100,000X	1-50KV		光潜,能潜	
法国	CAMEBAX	100Å(二次电子) 70Å(透射电子)	35X-100,000X	1-50KV		一至三道光潜	
荷兰	PSEM-500	150Å	10X-80,000X	1-50KV	∅35mm×h25mm		

注:苏联及东欧各国由于缺乏资料未统计在内