

# 板筒复合镜电子能量分析器的设计计算

王良国\* 姚骏恩

(中国科学院科学仪器厂,北京)

## 提 要

本文所讨论的复合板筒镜电子能量分析器,和通用的筒镜分析器一样,具有二级聚焦和传输率高的优点。其主要特点是:当一次入射束垂直入射于试样表面,激发出的次生电子以喷泉状通过弯曲的轨道绕过试样,重新会聚到试样背后的对称轴上。因此,在用于电子枪位于分析器外的扫描俄歇电子显微镜中作俄歇电子能谱仪时,可以缩短电磁物镜的工作距离,减小物镜的球差系数,增加一次电子束流密度,从而提高俄歇分析的灵敏度。其次,与电子枪在内筒中的筒镜分析器相比,可以简化内筒的结构,并便于电子枪的调整。

## 一、引 言

Edelmann 等<sup>[1]</sup>利用平行平板电容器作成一种喷泉式电子能谱仪;筒镜分析器 CMA 经 Zashkvara<sup>[2,3]</sup>, Aksela<sup>[4]</sup>, Sar-El<sup>[5]</sup> 和 Risley<sup>[6]</sup> 等人的计算,给出了满足带电粒子二级聚焦的设计参数。近年来,为了实现直径仅为数百 Å 的微区分析,发展了扫描俄歇电子显微镜,把扫描电子显微镜技术和筒镜分析器结合成一体。要使 CMA 具有足够的分辨率和试样分析范围,其外筒直径不应过小(一般约 100 mm)。另外,使入射电子束聚焦的电磁透镜的工作距离  $l$  (下极靴内端面至试样的距离) 不宜过长。因此,如何解决体积很大的筒镜分析器和电镜筒间的最佳配置是一个值得探讨的课题<sup>[7]</sup>。

本文所讨论的一种复合板筒镜电子能量分析器<sup>[8]</sup>,与筒镜分析器一样,具有二级聚焦和传输率高的优点。在这种分析器中,从电子枪发出的电子束,经电磁物镜会聚成入射电子探针,在试样表面激发出俄歇电子。这些电子通过弯曲的轨道再会聚到试样背后的轴上(图 1)。这就提供了在使用大分析器的条件下缩短电磁物镜工作距离的可能性,从而提高俄歇分析的功能。

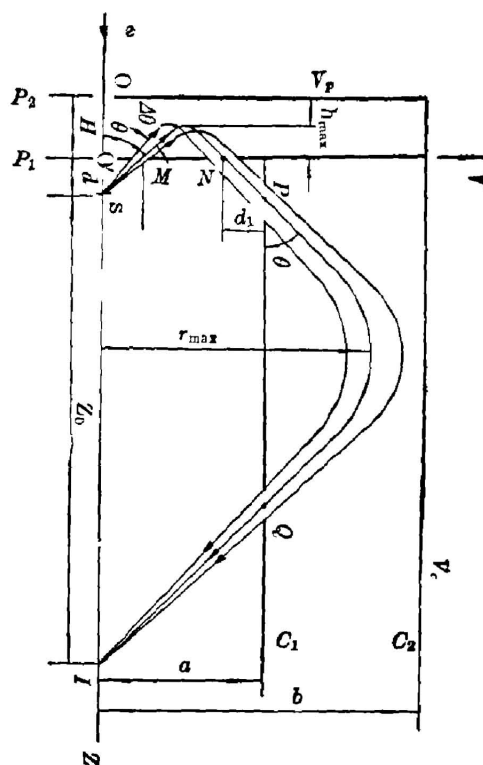


Fig. 1 Schematic diagram of a plane-cylindrical mirror energy analyzer

收稿日期: 1985年6月17日

\* Dept. of Physics, Ohio State University, Columbus, Ohio, 43210, USA.

## 二、分析器的几何形状

复合板筒镜分析器的外形很象一个平行平板分析器和筒镜分析器的联合。如图 1 所示,  $Z$  轴是旋转对称轴, 内外圆板  $P_1$  及  $P_2$  间的距离为  $H$ , 内、外圆筒半径分别为  $a$  和  $b$ 。内板和内筒处于地电位, 外板和外筒的电位分别为  $V_p$  和  $V_o$ 。一束沿  $Z$  轴, 通过内外圆板中心小孔  $O, O'$  射向置于轴上  $S$  处的试样, 试样上发出的初始能量为  $E$  的俄歇电子以  $\theta$  角通过环状入口缝  $M$  进入两平板间的均匀电场, 发生偏转而从环状出口缝  $N$  射出, 又进入内筒环状入口缝  $P$ , 在径向电场的作用下再被偏转, 经出口缝  $Q$  最后会聚在轴上点  $I$  处。

为减少边缘场, 可在内外筒两侧边及内外板中心孔及周侧分别加一高电阻膜片进行修正, 并在各缝口处加一金属网栅, 如同在筒镜分析器中一样。

## 三、分析器原理

现在来考虑自试样发出的轴上电子(对于接近  $Z$  轴而不与之相交的电子的情况, 将在以后加以讨论)。因为电子经过轴, 所以电子对于  $Z$  轴的角动量为零。在图 1 所示的旋转对称场中, 场的方向只在子午面上, 与子午面垂直方向上的分量为零。因为电子对于  $Z$  轴的角动量守恒, 所以电子最终还要通过  $Z$  轴。对于能量相同的电子, 在一定的入射角  $\theta$  下, 选择适当的几何形状及电压  $V_p, V_o$ , 我们将证明它们是可以角度二级聚焦在轴上的。对于不同能量的电子, 电场对它们的偏转作用不同, 最后与轴的交点也不同, 从而达到能量分析的目的。

### 1. 电子的运动轨迹与运动方程

(1) 电子在进入平板电场前在无场空间运动, 所以从  $S$  到  $M$  点的电子轨迹是一条直线(图 1)。 $M$  点的圆柱坐标  $(r, Z)$  是:

$$\left. \begin{aligned} R_M &= d \cdot \operatorname{tg} \theta, \\ Z_M &= -d. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

这里取源点  $S$  为坐标原点,  $d$  为  $S$  到内板的距离。

(2) 内外板间的电场是均匀场, 场强  $e_z = -\frac{V_p}{H}$ , 方向平行于  $Z$  轴。电子的运动方程是:

$$\begin{aligned} \ddot{r} &= 0, \\ \ddot{Z} &= -\frac{V_p}{H} \cdot \frac{e}{m}. \end{aligned}$$

电子经过一段抛物线运动后到达内板  $N$  点:

$$\overline{MN} = 2(EH/eV_p) \cdot \sin 2\theta, \quad (2)$$

其中,  $E$  为电子初始动能,  $-e$  及  $m$  分别为电子的电荷值和质量。

(3) 电子在无场空间的路程  $NP$  及  $QI$  也是一直线, 而在内、外筒间, 只有径向电场, 电子的运动方程是:

$$\begin{aligned} \ddot{r} &= -[eV_o/\ln(b/a)]/mr, \\ \ddot{Z} &= 0. \end{aligned}$$

能量为  $E$  的电子, 经  $N, P, Q$  到轴上像点  $I$  的运动轨迹与在筒镜分析器<sup>[4]</sup>中一样, 因此从  $N$  点到  $I$  点沿  $Z$  轴的总距离 ( $Z_0+d$ ) 有:

$$Z_0+d = (d_1+a)\cot\theta + 4aK^{\frac{1}{2}}\cos\theta e^{K\sin^2\theta} \int_0^{\sqrt{K}\sin\theta} e^{-u^2} du, \quad (3)$$

其中

$$K = (E/eV_0)\ln(b/a), \quad (4)$$

$K$  为与筒镜分析器有关的参数,  $Z_0$  为源  $S$  到像  $I$  间的距离,  $V_0$  为外筒电位,  $d_1$  为  $N$  点到内筒的距离:

$$d_1 = a - d \tan\theta - \overline{MN},$$

由式(2)得:

$$d_1 = a - d \tan\theta - 2(EH/eV_p)\sin 2\theta, \quad (5)$$

代入(3)式整理后得到:

$$Z = 2a \cot\theta + 4aK^{\frac{1}{2}}\cos\theta e^{K\sin^2\theta} \int_0^{\sqrt{K}\sin\theta} e^{-u^2} du - 2d - 4K_p \cos^2\theta, \quad (6)$$

其中  $K_p$  为与平板分析器有关的参数, 具有长度量纲,

$$K_p = EH/eV_p. \quad (7)$$

在这里我们可以看到源像间的总距离  $Z$  的表达式(6)中, 前二项与筒镜分析器的相同, 比筒镜分析器多出的后二项是由于存在板镜的缘故。

## 2. 聚焦条件

对于复合板筒镜分析器, 我们把源与像都置于对称轴上。适当选取入射角  $\theta$ , 参数  $K$  及  $K_p$ , 该分析器能够将自  $S$  处发出的电子, 二级聚焦成像在轴上  $I$  点。这时需要满足二级聚焦的条件是:

$$\frac{\partial Z}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} = 0. \quad (8)$$

关于  $\frac{\partial Z}{\partial \theta}$ ,  $\frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2}$  及  $\frac{\partial^3 Z}{\partial \theta^3}$  的表达式见附录。

为了解方程组(8), 引入一个参量  $M$ :

$$M = K_p/aK = (V_0/V_p) \cdot (H/a \ln(b/a)), \quad (9)$$

或

$$K_p = aMK = EH/eV_p.$$

这样, (6)式可以写成:

$$Z_0 = 2a \cot\theta + 4aK^{\frac{1}{2}}\sin\theta \exp(K\sin^2\theta) \int_0^{\sqrt{K}\sin\theta} \exp(-u^2) du - 2d - 4aMK \cos^2\theta. \quad (10)$$

对于每个给定的  $M$  值, 数值解方程组(8), 便可得到一组满足二级聚焦的  $\theta$  值和  $K$  值。在表 1 中列出了对于不同的  $M$  值, 满足二级聚焦条件(8)的设计参数  $\theta$ ,  $K$  及  $\frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2}$  等值, 供实际设计复合板筒镜分析器用。

从表 1 可以看出, 当  $M=0$  时, 满足二级聚焦条件的  $\theta$  值为  $42.307^\circ$ ,  $K$  值为 1.3098,  $Z_0+2d$  值为 6.1298, 这与筒镜分析器当物、像都在轴上时的情况<sup>[6]</sup>一样。

从表 1 中还可以看到, 当  $M=0.5$  时, 内平板上电子入口点与出口点间的距离  $\overline{MN}$  已很接近内筒半径  $a$  了。该距离随  $M$  值的增大而增大。因此,  $M>0.5$  的那些设计参数没有实用价值。

## 四、板筒镜分析器的色散、角度像差和能量分辨率

### 1. 泰勒展开

为了讨论分析器的能量色散, 分辨率和角度像差, 将物像距离  $Z$  展成关于能量变化量  $\Delta E$  及入射角度变化量  $\Delta\theta$  的泰勒级数:

$$Z = Z_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i!} \left( \Delta\theta \frac{\partial}{\partial\theta} + \Delta E \frac{\partial}{\partial E} \right)^i Z(\theta, E) \Big|_{\substack{\theta=\theta_0 \\ E=E_0}},$$

其中  $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ ;  $\Delta E = E - E_0$

或写成:

$$\begin{aligned} \Delta Z &= Z - Z_0, \\ \Delta Z &= \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i!} \frac{\partial^i Z}{\partial\theta^i} \Big|_{z_0} (\Delta\theta)^i + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j!} \frac{\partial^j Z}{\partial E^j} \Big|_{z_0} (\Delta E)^j \\ &\quad + \sum_{i,j=1}^{\infty} \frac{C_{ij}}{(i+j)!} \frac{\partial^{i+j} Z}{\partial\theta^i \partial E^j} \Big|_{z_0} (\Delta\theta)^i \cdot (\Delta E)^j, \end{aligned} \quad (11)$$

其中  $C_{ij}$  是二项展开式的系数。等号右边第一项级数是由于入射角变化  $\Delta\theta$  所引起的  $Z$  的变化, 第二项级数是入射电子初始能量的变化  $\Delta E$  所引起的。一般只考虑这两个级数的前几项, 忽略更高次项及第三项级数 ( $\Delta\theta$  及  $\Delta E$  交叉项)。作为一个色散型能量分析器, 希望第一项级数越小越好, 即角度像差越小越好; 第二项级数越大越好, 即能量分散越大越好。

### 2. 角度像差

复合板筒分析器在采用二级聚焦设计参数  $\theta$  与  $K$  时, 满足二级聚焦条件, 即  $\frac{\partial Z}{\partial\theta} = 0$ ,  $\frac{\partial^2 Z}{\partial\theta^2} = 0$ 。因此, 角度像差是由  $\frac{\partial^3 Z}{\partial\theta^3}$  项引起的:

$$\Delta Z = \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 Z}{\partial\theta^3} \Big|_{z_0} (\Delta\theta)^3。$$

这里忽略了  $\Delta\theta$  三次以上的各项。对于入射范围从  $(\theta_0 - \Delta\theta)$  到  $(\theta_0 + \Delta\theta)$  的电子, 总的角度像差  $\Delta Z_T$  有:

$$\Delta Z_T = |\Delta Z(\Delta\theta) - \Delta Z(-\Delta\theta)| = 2|\Delta Z(\Delta\theta)| = \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 Z}{\partial\theta^3} \Big|_{z_0} (\Delta\theta)^3。 \quad (12)$$

### 3. 色散(能量分散)

方程式(11)中, 由于能量变化  $\Delta E$  引起的物像距离变化为:

$$\Delta Z(\Delta E) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j!} \frac{\partial^j Z}{\partial E^j} (\Delta E)^j。$$

因为  $\Delta E$  的二次项及二次以上项与一次项相比很小, 可以忽略不计, 则能量分散可用级数的第一项表示。色散的定义为:

$$D = E \frac{\partial Z}{\partial E}。 \quad (13)$$

板筒镜分析器的  $D$  的表达式见附录。表 1 中给出了对于不同的  $M$  值, 满足二级聚焦时的色散  $D$ 。

### 4. 底分辨率

能量分辨率是表征能量分析器的重要指标, 它的定义是:

$$R = \Delta E / E, \quad (14)$$

这里  $\Delta E$  是谱底宽度,  $E$  为谱峰的能量。

由于电子入射角变化  $\Delta\theta$ , 造成分辨率变差 ( $R$  值增大),  $\Delta\theta$  越大, 分辨率越差。我们可以从公式 (11) 中反推, 并考虑到 (13)、(14) 式, 该分析器的表观能量分辨率为:

$$R_{1.0} = \frac{\Delta Z_T}{D} \quad (15)$$

由于电子源常是一个试样, 在  $Z$  方向有一个很小的扩展范围  $ds$ , 同时, 接收缝在  $Z$  方向也有一个宽度  $d_s$ , 它们对分辨率的影响为:

$$R_{s,s} = (d_s + d_s) / D. \quad (15)'$$

其次, 由于电子源有一定的尺寸, 因此不是所有从源发出的电子都通过  $Z$  轴 (指它们的轨迹或其延长线)。设在自由空间中某一电子轨道 (或其延长线) 距轴的最近距离为  $r_0$ , 且  $r_0 \ll a$ , 电子被平行板及内、外筒间的电场偏转后, 保持角动量守恒, 因此在像点附近电子将以同样的距轴最近距离  $r_0$  通过  $Z$  轴的另一侧, 这与筒镜分析器中的情况<sup>[6]</sup> 一样。因为只是动能的径向部分被分析器所分析, 所以当初始能量相同时, 离轴电子将比过轴电子落在离源更近的像点上。对于入射角为  $\theta$  的电子, 动能的径向部分为:

$$E_r = [1 - (r_0/a)^2] E \sin^2 \theta, \quad (16)$$

而过轴电子的动能径向部分为:

$$E_{r0} = E \sin^2 \theta. \quad (17)$$

因此, 离轴电子引起的分辨率增量为:

$$R(r_0) = (E_r - E_{r0}) / E_{r0} = (r_0/a)^2. \quad (18)$$

考虑到上述几种因素, 可以得到复合板筒镜分析器的底分辨率的一般表达式:

$$R = (d_s + d_s) / D + (r_0/a)^2 + (1/3D) \cdot \frac{\partial^3 Z}{\partial \theta^3} \Big|_{z_0} (\Delta\theta)^3, \quad (19)$$

计算  $R$  时, 可从表 1 中查出色散  $D$  和  $\partial^3 Z / \partial \theta^3$  的值。  $r_0$  为电子源边缘距  $Z$  轴的最大距离。当电子源是一个圆斑, 且中心与  $Z$  轴重合, 则  $r_0$  可取为圆斑的半径。在设计分析器时, 可取 (19) 式中的第一项和第三项的值为同一数量级。

## 五、能量标定常数

与筒镜分析器一样, 该分析器在满足二级聚焦条件下,  $V_0/E$  是一个常数。因此, 分析器偏转电压  $V_0$  与被分析的电子能量  $E$  之间存在一一对应的线性关系:

$$eV_0/E = \left[ \ln \frac{b}{a} \right] / K = C, \quad (20)$$

$C$  称为分析器的标定常数。由于实际工艺制造误差, 常数  $C$  也可以实际测定值为标准。

## 六、满足二级聚焦条件的设计参数 (表 1 的说明)

我们用电子计算机计算了在不同比值  $M = K_p/K$  下, 满足 (8) 式的  $\theta$  值和  $K$  值, 并且进而计算了我们所关心的其它一些参数, 列于表 1。参数中凡具有长度量纲的量, 都以内筒

半径  $a$  为单位。一些参数的说明如下:

1.  $Z_0+2d$ :  $Z_0$  为源、像间的距离,  $d$  为源到内平板的距离。二级聚焦条件的满足与  $d$  的选取无关, 但内平板与内筒上升缝的位置要由入射角  $\theta$  及一个给定的  $d$  值来确定。

2.  $D$ : 能量分散,  $D = E \cdot (\partial Z / \partial E)$  (见附录)。

3.  $\partial^3 Z / \partial \theta^3$ : 在计算能量分辨时是很重要的(见式(19))。

4.  $r_{\max}$ : 电子轨迹离轴最远的径向距离(图1)

$$r_{\max} = a \exp(K \cdot \sin^2 \theta) \quad (21)$$

5.  $h_{\max}$ : 电子在内、外板间的轨迹距内平板的最高距离(必须使内、外板间距  $H > h_{\max}$ )  
 $h_{\max} = K_p \cos^2 \theta$ , 由式(9)可得:

$$h_{\max} = aMK \cos^2 \theta \quad (22)$$

6.  $\overline{MN}$ : 电子在内、外板间走过的径向距离。由式(2)、(7)、(9)得:

$$\overline{MN} = 2aMK \sin 2\theta \quad (23)$$

7.  $C$ : 分析器能量标定常数。由式(20)、(7)、(22),

$$C = eV_c / E = (H / h_{\max}) \cdot (V_c / V_p) \cos^2 \theta,$$

或

$$C = A \cos^2 \theta \quad (24)$$

为满足  $b > r_{\max}$  及  $H > h_{\max}$ , 我们取

$$H = 1.2h_{\max} \quad (26)$$

为方便计, 取

$$V_c = V_p \quad (27)$$

所以

$$C = 1.2 \cos^2 \theta, \quad A = 1.2, \quad (28)$$

式(26)、(27)、(28)也可以取其它值。

8.  $b$ : 外筒半径, 由式(4)、(20)得:

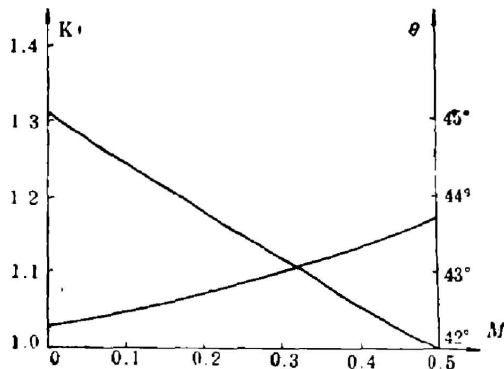


Fig. 2a Parameter  $K$  and entrance angle  $\theta$  vs.  $M$  in case of second-order focusing in PCMA

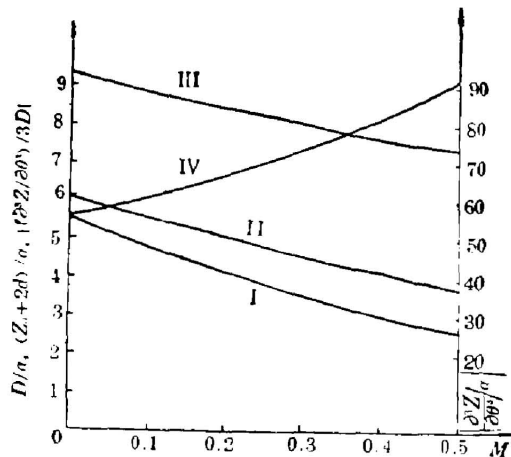


Fig. 2b Dispersion (I)  $D/a$ ,  $Z$  component of the electron trajectory (II)  $(Z_0+2d)/a$ , (III)  $(\partial^3 Z / \partial \theta^3) / a$  and (IV)  $(\partial^3 Z / \partial \theta^3) / 3D$  as functions of  $M$  in case of second-order focusing in PCMA

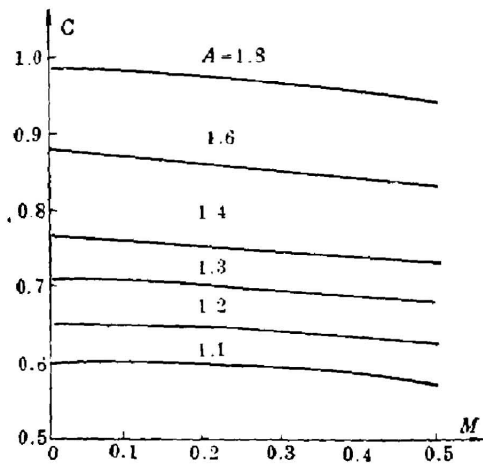


Fig. 2c Calibration constant  $C$  as a function of  $M$  for various values of constant  $A$  in case of second-order focusing in PCMA

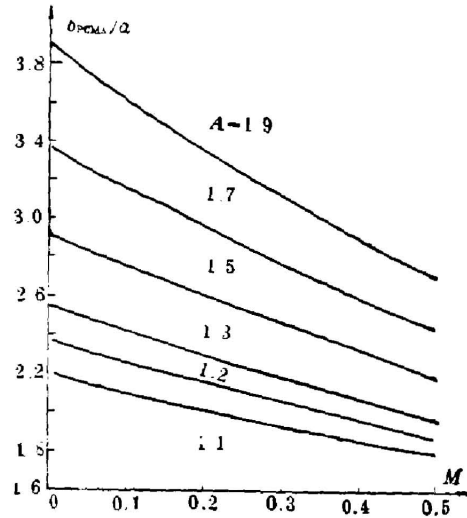


Fig. 2d Ratio of outer cylinder radius to inner radius  $b_{PCMA}/a$  as a function of  $M$  for various values of constant  $A$  in case of second-order focusing

$$b = a \exp(K \cdot C). \quad (29)$$

9.  $H$ : 内、外平板间距,

$$H = aMKC(V_p/V_o). \quad (30)$$

在二级聚焦的情况下, 板筒复合镜电子能量分析器的参数  $K, \theta, D/a, (Z_0+2d)/a, (\frac{\partial^3 Z}{\partial \phi^3})/a, (\frac{\partial^3 Z}{\partial \theta^3})/3D, C$  及  $b_{PCMA}/a$  与参数  $M$  间的关系分别表示在图 2a, b, c, d 中。

### 七、一个实际板筒镜分析器设计

取内筒半径  $a=30$  mm, ( $C = 1.2 \cos^2 \theta, V_p=V_o$ )

比值  $M=0.10$ , 由表 1 可算得:

外筒半径  $b=67.52$  mm,

二平板间距  $H=2.43$  mm,

取试样距内平板距离  $d=5.0$  mm,

$C=0.6523$ ,

$\theta=42.498^\circ$ ,

$K=1.2435$ ,

色散  $D=4.8832a$ ,

底分辨率

$$R = 0.205(d_s + d_e)/a + (r_c/a)^2 + 6.09(\Delta\theta)^2,$$

取

$$\Delta\theta = \pm 5^\circ, d_s + d_e = 0.2 \text{ mm}, r_c = 0.2 \text{ mm},$$

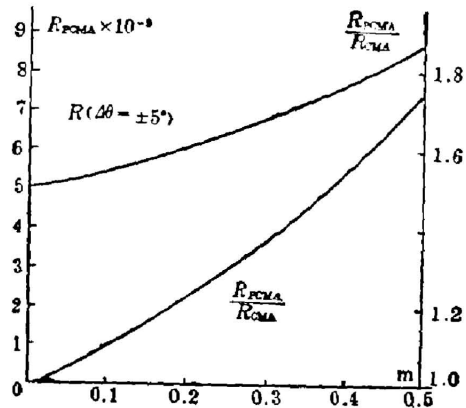


Fig. 3 The base resolution  $R_{PCMA}$  and  $R_{PCMA}/R_{OMA}$  as functions of  $M$

Table 1 Design Parameters for the Plane-Cylindrical Mirror Analyzer with Second Order Focusing (All Lengths are in Units of the Inner Cylinder Radius  $\alpha$ )

$M$	$\theta^\circ$	$K$	$Z_0+2d_{(a)}$	$D_{(a)}$	$\frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} / (a)$	$(\frac{\partial^3 Z}{\partial \theta^3}) / 3D$	$r_{\max(a)}$	$h_{\max(a)}$	$\overline{MN}_{(a)}$
0.00	42.3069	1.30980	6.12984	5.60381	-93.1775	-5.5425	1.81018	0.000000	0.000000
0.01	42.3237	1.30311	6.07277	5.52855	-92.7778	-5.5939	1.80539	0.007123	0.025948
0.03	42.3590	1.28977	5.95996	5.38015	-91.9798	-5.6987	1.79592	0.021127	0.077057
0.04	42.3773	1.28312	5.90425	5.30704	-91.5809	-5.7522	1.79124	0.028008	0.102220
0.05	42.3962	1.27648	5.84899	5.23462	-91.1819	-5.8063	1.78659	0.034808	0.127121
0.06	42.4156	1.26986	5.79419	5.16294	-90.7835	-5.8612	1.78199	0.041528	0.151764
0.07	42.4355	1.26325	5.73983	5.09194	-90.3855	-5.9169	1.77741	0.048166	0.176147
0.08	42.4559	1.25666	5.68594	5.02167	-89.9875	-5.9733	1.77288	0.054724	0.200274
0.09	42.4768	1.25009	5.63250	4.95209	-89.5897	-6.0304	1.76838	0.061202	0.224144
0.10	42.4982	1.24353	5.57950	4.88320	-89.1922	-6.0884	1.76391	0.067599	0.247758
0.12	42.5424	1.23016	5.47488	4.74751	-88.3975	-6.2066	1.75508	0.080153	0.294225
0.14	42.5887	1.21745	5.37202	4.61451	-87.6048	-6.3282	1.74638	0.092386	0.339680
0.16	42.6368	1.20452	5.27096	4.48425	-86.8125	-6.4531	1.73782	0.104302	0.384135
0.18	42.6867	1.19165	5.17166	4.35665	-86.0218	-6.5817	1.72939	0.115900	0.427597
0.20	42.7386	1.17887	5.07414	4.23170	-85.2325	-6.7138	1.72108	0.127183	0.470078
0.25	42.8760	1.14723	4.83797	3.98070	-83.2669	-7.0612	1.70084	0.154027	0.572040
0.30	43.0242	1.11611	4.61257	3.64552	-81.3143	-7.4351	1.68135	0.178954	0.668073
0.35	43.1826	1.08553	4.39772	3.37568	-79.3777	-7.8382	1.66255	0.202011	0.758342
0.40	43.3507	1.05552	4.19317	3.12061	-77.4604	-8.2741	1.64443	0.223250	0.843015
0.50	43.7134	0.99731	3.81394	2.65275	-73.6987	-9.2607	1.61005	0.260522	0.996308

可得

$$R(d_s, d_e) = 1.37 \times 10^{-3},$$

$$R(r_o) = 0.04 \times 10^{-3},$$

$$R(\Delta\theta) = 4.05 \times 10^{-3}.$$

所以底分辨率  $R_{PCMA} = 0.546\%$ 。

在 CMA (对应于  $M=0$  时的 PCMA) 具有相同的  $a, d_s+d_e, r_o, \Delta\theta$  等情况下, 底分辨率  $R_{CMA} = 0.49\%$ , 则  $R_{PCMA}/R_{CMA} = 1.1$  (图 3)。

## 附 录

### 1. 板筒镜分析器的能量色散:

$$D = E \frac{\partial Z}{\partial E} = aK \sin 2\theta - 4aMK \cos^2 \theta + (2K^{\frac{1}{2}} \cos \theta + 4K^{\frac{3}{2}} \cos \theta \sin^2 \theta) aWI, \quad (31)$$

### 2. $Z$ 对 $\theta$ 的前三级偏导:

$$\frac{\partial Z}{\partial \theta} = 4aK \cos^2 \theta - 2a \sin^2 \theta + 8aMK \cos \theta \sin \theta + (8K^{\frac{1}{2}} \sin \theta \cos^2 \theta - 4K^{\frac{3}{2}} \sin \theta) aWI, \quad (32)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} = 4a \sin^{-3} \theta \cos \theta - 12aK \cos \theta \sin \theta + 8aK^2 \sin \theta \cos^3 \theta + 8aMK \cos 2\theta + (8K^{\frac{3}{2}} \cos^3 \theta - 24K^{\frac{5}{2}} \sin^2 \theta \cos \theta - 4K^{\frac{1}{2}} \cos \theta + 16K^{\frac{5}{2}} \sin^2 \theta \cos^3 \theta) aWI, \quad (33)$$

$$\frac{\partial^3 Z}{\partial \theta^3} = -32MKa \cos \theta \sin \theta + 16aK^2 \cos^4 \theta + 16aK^3 \sin^2 \theta \cos^4 \theta - 12a \sin^{-4} \theta \cos^2 \theta - 4a \sin^{-2} \theta + 12aK \sin^2 \theta - 16aK \cos^2 \theta - 48aK^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta + (2^4 aK^{\frac{7}{2}} \sin^3 \theta + 4aK^{\frac{3}{2}} \sin \theta + 48aK^{\frac{5}{2}} \sin \theta \cos^4 \theta - 80aK^{\frac{3}{2}} \sin \theta \cos^2 \theta - 96aK^{\frac{5}{2}} \cos^2 \theta \sin^3 \theta + 32aK^{\frac{7}{2}} \sin^3 \theta \cos^4 \theta) WI.$$

其中

$$K = (E/V_o) \cdot \ln b/a,$$



$$W = \exp(K \sin^2 \theta),$$

$$I = \int_0^{\sqrt{R \sin \theta}} e^{-u^2} du.$$

## 参 考 文 献

- [1] F. Edelmann und K. Ulmer; *Zeits für Angew. Phys.*, 1965, **18**, No. 4 (Jan), 308.  
 [2] V. V. Zashkvara, et al.; *Sov. Phys. Tech. Phys.*, 1966, **11**, 96.  
 [3] V. V. Zashkvara, et al.; *ibid.* 1970, **14**, No. 1 (Jan), 1089.  
 [4] S. Aksela, et al.; *Rev. Sci. Instrum.*, 1970, **41**, No. 3 (Mar), 351.  
 [5] H. Z. Sar-El; *ibid.* 1967, **38**, No. 9 (Sep), 1210; 1968, **39**, No. 4 (Apr), 533; 1971, **42**, No. 11 (Nov), 1601.  
 [6] J. S. Risley; *ibid.* 1972, **43**, No. 1 (Jan), 95.  
 [7] 姚骏恩;《扫描电子显微学》, (姚骏恩主编, 1979 年会议资料选编, 原子能出版社, 北京, 1983), 64~70.  
 [8] 姚骏恩, 王良臣;《科学通报》, 1981, **26**, No. 23 (Dec), 1423;《Kexue Tongbao》, *Special Issue*, (中国科学院主办, 1983), 297~299.

## Calculation on plane-cylindrical mirror energy analyzer

WANG LIANGGUO\* AND YAO JUNEN

(Scientific Instrument Factory, Academia Sinica, Beijing)

(Received 17 June 1985)

## Abstract

The Combined Plane-Cylindrical Mirror Analyzer (PCMA) has the advantage of high transmission and the possibility of second-order focusing, just like the conventional cylindrical mirror analyzer (CMA). In the PCMA all fountain electrons emitted from the specimen (electron source) on the cylinder's coaxis will be focused behind the specimen on the axis after travelling through 180 degrees. By using PCMA as the electron energy analyzer in a scanning electron microscope (SEM), the working distance of the SEM magnetic objective lens could be shortened, and its spherical aberration reduced as compared with non-coaxial gun type CMA, thus the primary electron beam current density could be increased. As a result, the sensitivity of the Scanning Auger Microprobe (SAM) might be enhanced. Furthermore, the structure within the inner cylinder of PCMA is much simpler than the conventional CMA with coaxial gun.

\* Present address: Department of Physics, Ohio State University, Columbus, Ohio, 43210, U.S.A.