板筒复合镜电子能量分析器原理

姚 骏 恩 王 良 国*

(中国科学院科学仪器厂)

这里介绍一种新的电子能量分析器—板筒复合镜电子能量分析器 (PCMA), 与目前通用的筒镜分析器 CMA 一样, 具有二级聚焦和传输率高的优点. PCMA 的主要特点是从电子源 (样品) 发射出来的喷射状锥形电子束通过弯曲的轨道重新会聚到样品背后的轴上. 因此在用于扫描电镜 SEM 中作 Auger 电子能量分析时, 与利用一般的非同轴电子枪 CMA 相比可以缩短 SEM 物镜的工作距离, 减小物镜球差, 增加一次电子束流密度, 从而提高 Auger 分析的灵敏度.

板筒镜分析器 PCMA 的原理如图 1 所示, 将喷泉式平板分析器^[1]和筒镜分析器结合在一起. Z 轴是旋转对称轴, P_1, P_2 是内、外圆形平板, 间隔为 H , C_1, C_2 是内外圆柱筒, 半径分别为 a, b . 其它几何参数如图所示. 内板、内筒为零电位, 外板及外筒分别处于负电位 V_p 及 V_c . 与 CMA 一样, 可以采取适当措施以消除边缘场的影响. 一次电子束沿 Z 轴通过外、内板中心小孔 O, O' 射到样品 S 上, 所产生的 Auger 电子中具有能量 E 并与轴夹角为 θ 的电子先后经平板间及圆筒间电场的偏转而会聚在轴上点 I 处. 设 SI 间距为 Z_0 , 则有 (证明详见另文):

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

其中常数 $K = (E/eV_c) \ln(b/a)$,

$$M = \frac{V_c}{V_p} \cdot \frac{H}{a \cdot \ln(b/a)}.$$

d 为样品 S 到内板 P_1 的距离.

对于每个固定的 M 值, 满足二级聚焦条件 $\frac{\partial Z}{\partial \theta} = 0$ 及 $\frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} = 0$ 时的设计参数 $\theta, K, (Z_0 + 2d)$ 和 $\frac{\partial^3 Z}{\partial \theta^3}$ 值可用数值计算方法求出 (见表 1). 这时由入射角变化 $\pm \Delta \theta$ 所引起的主要是三级象差:

$$\Delta Z_T = \left| \frac{1}{3} \left(\frac{\partial^3 Z}{\partial \theta^3} \right)_{Z_0} (\Delta \theta)^3 \right|, \quad (2)$$

能量色散 D 可表示为

$$D = E \frac{\partial Z}{\partial E} = aK \sin 2\theta - 4aMK \cos^2 \theta + (2K^{\frac{1}{2}} \cos \theta + 4K^{\frac{1}{2}} \cos \theta \sin^2 \theta) a \cdot \exp(K \sin^2 \theta) \cdot \int_0^{\sqrt{K} \sin \theta} e^{-u^2} du. \quad (3)$$

本文 1981 年 7 月 15 日收到.

* 现在地址: 美国 Kentucky 大学物理及天文系.

考虑到 Auger 电子源的大小 r_e (径向), 电子源及接收缝在 Z 轴方向的宽度分别为 d_s, d_r , 则 PCMA 的底分辨率可表示为^[2]

$$R = (d_s + d_r)/D + (r_e/a)^2 + \left| \frac{1}{3D} \left(\frac{\partial^3 Z}{\partial \theta^3} \right)_{\theta_0} (\Delta \theta)^3 \right|, \tag{4}$$

能量标定常数 $C = eV_c/E = [\ln(b/a)]K^{-1}$. (5)

表 1 给出了一些满足二级聚焦条件时的设计参数。其中长度均以内筒半径 a 计。由表 1 可知, 当 $M = 0$ 时, 满足二级聚焦条件的 θ 值为 42.307° , K 值为 1.3098, $Z_0 + 2d$ 值为 $6.1298a$, 这与 CMA 在物、象都位于对称轴上时的情况相当^[2]。当 $M = 0.1$, 则 $\theta = 42.498^\circ$, $K = 1.2435$, $D = 4.8832a$; 取 $c = 1.2 \cos^2 \theta = 0.6523$, 且 $a = 30\text{mm}$, 则 $b = 67.52\text{mm}$; 当 $V_p = V_c$ 时, $H = 2.43\text{mm}$; 若取 $d_s + d_r = r_e = 0.2\text{mm}$, $\Delta \theta = \pm 5^\circ$, 则底分辨率 $R_{\text{PCMA}} = 0.546\%$ 。在 CMA ($M = 0$) 具有相同的 $a, d_s + d_r, r_e, \Delta \theta$ 等情况下, 底分辨率 $R_{\text{CMA}} = 0.49\%$ 。 $R_{\text{PCMA}}/R_{\text{CMA}} = 1.1$ 。

表 1 板筒镜分析器二级聚焦时的参数

M	θ (度)	K	$(Z_0 + 2d)(a)$	$D(a)$	$\partial^3 Z / \partial \theta^3 (a)$	$\frac{\partial^3 Z}{\partial \theta^3} / 3D$
.00	42.3069	1.30980	6.12984	5.60381	-93.1775	-5.5425
.01	42.3237	1.30311	6.07277	5.52855	-92.7778	-5.5939
.03	42.3590	1.28977	5.95996	5.38015	-91.9798	-5.6987
.04	42.3773	1.28312	5.90425	5.30704	-91.5809	-5.7522
.05	42.3962	1.27648	5.84899	5.23462	-91.1819	-5.8063
.06	42.4156	1.26986	5.79419	5.16294	-90.7835	-5.8612
.07	42.4355	1.26325	5.73983	5.09194	-90.3855	-5.9169
.08	42.4559	1.25666	5.68594	5.02167	-89.9875	-5.9733
.09	42.4768	1.25009	5.63250	4.95209	-89.5897	-6.0304
.10	42.4982	1.24353	5.57950	4.88320	-89.1922	-6.0884
.12	42.5424	1.23046	5.47488	4.74751	-88.3975	-6.2066
.14	42.5887	1.21745	5.37202	4.61451	-87.6048	-6.3282
.16	42.6368	1.20452	5.27096	4.48425	-86.8125	-6.4531
.18	42.6867	1.19165	5.17166	4.35665	-86.0218	-6.5817
.20	42.7386	1.17887	5.07414	4.23170	-85.2325	-6.7138
.25	42.8760	1.14723	4.83797	3.93070	-83.2669	-7.0612
.30	43.0242	1.11611	4.61257	3.64552	-81.3143	-7.4351
.35	43.1826	1.08553	4.39772	3.37568	-79.3777	-7.8382
.40	43.3507	1.05552	4.19317	3.12061	-77.4604	-8.2741
.50	43.7134	0.99731	3.81394	2.65275	-73.6987	-9.2607

附录: 板筒复合镜能量分析器中 Z 对 θ 的前三阶偏导:

$$\frac{\partial Z}{\partial \theta} = 4aK\cos^2\theta - 2a\sin^2\theta + 8MKa \cos\theta\sin\theta + (8K^{3/2}\sin\theta\cos^2\theta - 4K^{1/2}\sin\theta)2WI, \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} = & 4a\sin^{-3}\theta \cos\theta - 12aK \cos\theta\sin\theta + 8aK^2\cos^3\theta\sin\theta + 8aMK\cos^2\theta + (8K^{3/2}\cos^3\theta \\ & - 24K^{3/2}\sin^2\theta \cos\theta - 4K^{1/2}\cos\theta + 16K^{5/2}\sin^2\theta\cos^3\theta)aWI. \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 Z}{\partial \theta^3} = & -32aMK \cos \theta \sin \theta + 16aK^2 \cos^4 \theta + 16aK^3 \sin^2 \theta \cos^4 \theta - 12a \sin^{-4} \theta \cos^2 \theta - 4a \sin^{-2} \theta \\ & + 12aK \sin^2 \theta - 16aK \cos^2 \theta - 48aK^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta + (24K^{3/2} \sin^3 \theta + 4K^{1/2} \sin \theta \\ & + 48K^{3/2} \sin \theta \cos^4 \theta - 80K^{3/2} \sin \theta \cos^2 \theta - 96K^{3/2} \cos^2 \theta \sin^3 \theta + 32K^{7/2} \sin^3 \theta \cos^4 \theta) a W I. \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$I = \int_0^{\sqrt{K} \sin \theta} e^{-u^2} du, \quad W = \exp(K \sin^2 \theta).$$

参 考 文 献

- [1] Edelmann, F. und Ulmer, K., *Zeits für Angew. Phys.*, **18** (1965), 308.
- [2] Risley, J. S., *Rev. Sci. Instrum.*, **43** (1972), 95.