

扫描电子束曝光机复合物镜的研究与设计

夏善红 朱协卿

(中国科学院电子学研究所,北京)

摘要 在综合研究已有的各种复合物镜(如移动物镜、变轴物镜和摆动物镜等)的基础上,本文对复合物镜的一般理论进行了探讨,推导了普遍化计算公式,并提出新的复合物镜(弯曲物镜)系统.采用解析函数近似表示系统场分布,对弯曲物镜系统象差进行了理论分析,并设计出一个实际系统.数值计算结果给出该系统在 $5 \times 5 \text{mm}^2$ 扫描场内,束孔径角 5mrad 和能散 2.5eV 下,最大彗差 $0.005 \mu\text{m}$, 横向色差 $0.001 \mu\text{m}$.

关键词 电子光学;复合物镜;电子束曝光机;像差

一、引言

为了寻求低像差、大扫描场的电子束聚焦偏转系统,对于聚焦偏转复合物镜的研究显得十分重要.自 1971 年 Ohiwa 等人首先提出 MOL^[1] (移动物镜)以来,相继出现了 VAL^[2] (变轴物镜)、SOL^[3] (摆动物镜)、VAIL^[4] (变轴浸没物镜)和 PFDS^[5] (摆动复合聚焦偏转系统)等复合物镜系统.但迄今为止,还没有形成关于复合物镜的一般理论,尤其缺乏对静电复合物镜的研究.本文在综合研究已有的各种复合物镜的基础上,对于包括静电复合物镜系统在内的复合物镜一般理论进行了探讨,推导了普遍化计算公式,并提出和设计了新的复合物镜 BOL (弯曲物镜)系统.本文包括两部分:第一部分给出复合物镜系统的普遍化计算公式,并对其进行讨论;第二部分介绍 BOL 系统的概念、像差研究和实际系统设计.

二、复合物镜系统的普遍化计算公式

根据复合系统的电子光学理论,本节推导了复合物镜系统中偏转场普遍表示式和像差系数公式,并给出了用于对像差进行理论分析的聚焦磁场和电子轨迹解析表示式.

1. 偏转场表示式

在复合聚焦偏转系统中,聚焦场、偏转场和电子轨迹三者构成电子轨迹方程,因此确定三者中任意两个,第三个也就随之确定.为研究复合物镜系统,一般是给定聚焦场分布和电子束主轨迹,然后求偏转场分布.偏转场表示式可由复合场中电子轨迹方程导出.

在三级近似下,复合系统中电子轨迹方程表示为^[7]:

$$\begin{aligned}
 w'' + \frac{\varphi'}{2\varphi} w' + \frac{\varphi''}{4\varphi} w - i \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} \left(Bw' + \frac{1}{2} B'w \right) \\
 = -\frac{VF_1}{2\varphi} + \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} ID_1 + P_3
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中,

$$\begin{aligned}
 P_3 = & \frac{1}{\sqrt{\varphi}} \frac{d}{dz} \left[\sqrt{\varphi} w' \left(\frac{\varphi''}{8\varphi} w\bar{w} + \frac{VF_1}{4\varphi} \bar{w} + \frac{\bar{V}\bar{F}}{4\varphi} w + \frac{1}{2} w'\bar{w}' \right) \right] \\
 & - \left(\frac{\varphi''}{4\varphi} w + \frac{VF_1}{2\varphi} \right) \left(\frac{\varphi''}{8\varphi} w\bar{w} + \frac{VF_1}{4\varphi} \bar{w} + \frac{\bar{V}\bar{F}_1}{4\varphi} w + \frac{1}{2} w'\bar{w}' \right) \\
 & + \frac{\varphi''''}{32\varphi} w^2\bar{w} + \frac{VF_1''}{8\varphi} w\bar{w} + \frac{\bar{V}\bar{F}_1'}{16\varphi} w^2 - \frac{3\bar{V}\bar{F}_3}{2\varphi} \bar{w}^2 \\
 & - i \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} \left(\frac{B''}{4} ww'\bar{w} + \frac{B'''}{16} w^2\bar{w} \right) \\
 & - \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} \left(\frac{ID_1}{2} w'\bar{w} - \frac{\bar{I}\bar{D}_1}{2} ww' + \frac{ID_1'}{4} w\bar{w} - \frac{\bar{I}\bar{D}_1'}{8} w^2 + 3\bar{I}\bar{D}_3\bar{w}^2 \right) \quad (2)
 \end{aligned}$$

(1)、(2)式中, $w(z) = x + iy$ 表示电子轨迹, $\varphi(z)$ 为轴上电位, $B(z)$ 为轴上聚焦磁场, $F_1(z)$ 和 $D_1(z)$ 为一级静电和磁偏转场函数, $F_3(z)$ 和 $D_3(z)$ 为三级电和磁偏转场函数, V 和 I 为复数偏转电压和偏转电流, 撇号“'”表示该量对坐标“ z ”的导数, “ $\bar{}$ ”表示对该量取复数共轭, η 表示电子荷质比。

对磁聚焦系统, 电位 φ 为常数, $\varphi' = \varphi'' = 0$, (1)式成为

$$w'' - i \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} \left(Bw' + \frac{1}{2} B'w \right) = -\frac{VF_1}{2\varphi} + \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} ID_1 + P_3 \quad (3)$$

对静电聚焦系统, 磁场 $B(z)$ 为零, (1)式成为

$$w'' + \frac{\varphi'}{2\varphi} w' + \frac{\varphi''}{4\varphi} w = -\frac{VF_1}{2\varphi} + \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} ID_1 + P_3 \quad (4)$$

本文只讨论磁聚焦系统, 但所采用的推导方法同样适用于静电聚焦系统。为简便且不失一般性, 在以下公式推导中取偏转电压和电流为 $V = I = 1$ 。

令(3)式中 $P_3 = 0$, 得到一级电子轨迹方程为

$$w'' - i \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} \left(Bw' + \frac{1}{2} B'w \right) = -\frac{F_1}{2\varphi} + \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} D_1 \quad (5)$$

若采用磁偏转(即 $F_1 = 0$), 由(5)式得

$$D_1 = \sqrt{\frac{2\varphi}{\eta}} w'' - i \left(Bw' + \frac{1}{2} B'w \right) \quad (6)$$

若采用静电偏转(即 $D_1 = 0$), 由(5)式得

$$F_1 = -2\varphi w'' + i\sqrt{2\eta\varphi} \left(Bw' + \frac{1}{2} B'w \right) \quad (7)$$

(6)、(7)式分别为一级近似下复合物镜系统中磁偏转场和静电偏转场的普遍表示式。式中 w 可以是任意实函数,也可以是任意复函数。对不同的轨迹 w , 不仅得到相应复合物镜中的偏转场表示式,而且表明相应的复合物镜模型。例如,在移动物镜 MOL 中,如图 1,电子轨迹为固定子午面内平行于 z 轴的直线,即 $w = d = \text{实常数}$, $w' = w'' = 0$ 。并将它们代入(6)和(7)式,得到 MOL 系统中磁偏转场和静电偏转场表示式为

$$D_1 = -iB'd/2, F_1 = i\sqrt{\eta\varphi/2} B'd$$

在摆动物镜 SOL 中,如图 2,电子轨迹是交轴直线,设直线斜率 s , 与 z 轴交点 z_0 , 即

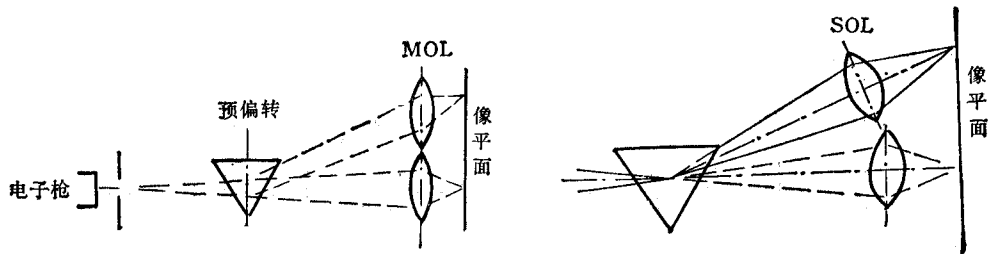


图 1 MOL 系统示意图

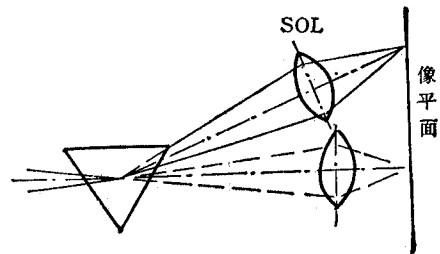


图 2 SOL 系统示意图

$$\left. \begin{aligned} w &= s(z - z_0) \\ w' &= s = \text{实常数} \\ w'' &= 0 \end{aligned} \right\}$$

将上式代入(6)和(7)式,得到 SOL 系统中偏转场表示式为

$$D_1 = -i[Bs + B's(z - z_0)]/2$$

$$F_1 = i\sqrt{2\eta\varphi} [Bs + B's(z - z_0)]/2$$

利用三级电子轨迹方程,还可导出三级近似下复合物镜系统偏转场表示式。以变轴物镜 VAL 为例,它的电子轨迹与 MOL 相同,也是平行于 z 轴的直线。若采用磁偏转, $F_1 = F_3 = 0$, 由(3)式求得 VAL 系统中一级和三级磁偏转场为

$$D_1 = -iB'd/2, D_3 = iB'''d/24$$

表 1 列出了几种复合物镜中电子轨迹和偏转场表示式。在这些复合物镜中,聚焦场和偏转场组成的总效应相当于透镜光轴随电子束预偏转量的变化而平行移动或摆动,使得电子束在聚焦场和偏转场的合力作用下始终维持在固定子午面内的直线状态。

2. 像差系数公式

按照文献[6]的方法,可求出复合系统像差系数公式。基于目前动态修正已广泛用于消除电子光学系统的场曲、像散和畸变,但对彗差和色差还未找到有效的校正方法,因此本文主要就减小复合物镜系统的彗差和横向色差进行讨论,而关于复合物镜的场曲将在另一篇文章中探讨。下面给出磁聚焦复合系统彗差和横向色差系数公式。彗差系数

$$C_o = \frac{1}{w_a'^2 \bar{w}_a' \bar{w}_d} \int_{z_0}^{z_i} \left\{ \frac{1}{2} w_a'^2 \bar{w}_a' \bar{w}_d + i \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} w_a \bar{w}_a \bar{w}_d \left(\frac{B''}{4} w_i + \frac{B'''}{16} w_a \right) \right\}$$

表1 复合物镜中电子轨迹和偏转场表示式

物镜名称		MOL, VAL, VAIL	SOL, PFDS
电子轨迹		$w = d = \text{实常数}$ $w' = w'' = 0$	$w = s(z - z_0)$ $w = s = \text{实常数 } w'' = 0$
偏转场	一级近似	磁偏转 $D_1 = -i \frac{1}{2} B' d$	$D_1 = -i \left[Bs + \frac{1}{2} B's(z - z_0) \right]$
		电偏转 $F_1 = i \sqrt{\frac{\eta\varphi}{2}} B' d$	$F_1 = i \sqrt{2\eta\varphi} \left[Bs + \frac{1}{2} B's(z - z_0) \right]$
	三级近似	磁偏转 $D_1 = -i \frac{1}{2} B' d$ $D_3 = i \frac{1}{24} B'' d$	$D_1 = -i \left[Bs + \frac{1}{2} B's(z - z_0) \right]$ $D_3 = i \frac{1}{z - z_0} \left[\frac{1}{2} B's + \frac{1}{3} B''s(z - z_0) + \frac{1}{24} B''s(z - z_0)^2 \right]$
		电偏转 $F_1 = i \sqrt{\frac{\eta\varphi}{2}} B' d$ $F_3 = 0$	$F_1 = i \frac{2 \sqrt{2\eta\varphi}}{2 + s^2} \left[Bs + \frac{1}{2} B's(z - z_0) \right]$ $F_3 = -i \frac{\sqrt{2\eta\varphi} s^2}{48(2 + s^2)} [4B''s + B''s(z - z_0)]$

$$+ \frac{\bar{F}_1}{4\varphi} w_a w_a' \bar{w}_a - \frac{\bar{F}_1'}{16\varphi} w_a^2 \bar{w}_a - \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} \left(\frac{\bar{D}_1}{2} w_a w_a' \bar{w}_a + \frac{\bar{D}_1'}{8} w_a^2 \bar{w}_a \right) \} dz \quad (8)$$

横向色差系数

$$C_c = \frac{1}{\bar{w}_{a_i} w_{a_i}} \int_{z_0}^{z_i} \bar{w}_a \left[\frac{i}{2} \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} \left(B w_a' + \frac{1}{2} B' w_a \right) - \frac{F_1}{2\varphi} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} D_1 \right] dz \quad (9)$$

(8)和(9)式中,积分限 z_0 和 z_i 表示物平面和像平面, $w_a(z)$ 表示聚焦系统中的电子主轨迹,其初始条件为 $w_a(z_0) = 0$ 和 $w_a'(z_0) = 1$; $w_d(z)$ 表示电子偏转轨迹,其初始条件为 $w_d(z_0) = 0$ 和 $w_d'(z_0) = 0$; 参量下标“i”表示该量在像平面 z_i 处取值。

为便于数值计算和理论分析,下面对(8)、(9)式采取两种处理措施。

(1) 用分部积分将(8)、(9)式中的高阶导数降为低阶,以便于数值计算。即彗差系数公式为

$$C_c = \frac{1}{w_{a_i}^2 \bar{w}_{a_i} \bar{w}_{a_i}} \int_{z_0}^{z_i} \left[\frac{1}{2} w_a'^2 \bar{w}_a \bar{w}_a' \right. \\ \left. + i \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} \frac{B''}{16} (2w_a w_a' \bar{w}_a \bar{w}_a' - w_a^2 \bar{w}_a' \bar{w}_a - w_a^2 \bar{w}_a \bar{w}_a') \right. \\ \left. - \frac{\bar{F}_1}{16\varphi} (w_a^2 \bar{w}_a' + 2w_a w_a' \bar{w}_a + 2w_a'^2 \bar{w}_a) \right]$$

$$+ \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} \frac{\bar{D}_1}{8} (w_a^2 \bar{w}_a'' - 2w_a w_a' \bar{w}_a - 2w_a^2 \bar{w}_a) \Big] dz \quad (10)$$

横向色差系数公式为

$$C_c = - \frac{1}{\bar{w}_{a_i} w_{d_i}} \int_{z_0}^{z_i} \left(\frac{1}{2} \bar{w}_a' w_d' + \frac{F_1}{4\varphi} \bar{w}_a \right) dz \quad (11)$$

(2) 将(6)和(7)式代入像差系数公式(8)和(9)式,以便于进行像差分析.对磁偏转系统

$$F_1 = 0, D_1 = \sqrt{2\varphi/\eta} w_d'' - i (B w_d' + B' w_d/2)$$

将上式代入(8)、(9)式,得到磁偏转系统彗差和横向色差系数公式为

$$\begin{aligned} C_{oM} = & \frac{1}{w_{a_i}^2 \bar{w}_{a_i} \bar{w}_{d_i}} \int_{z_0}^{z_i} \left\{ \frac{1}{2} \left(w_a'^2 \bar{w}_a' \bar{w}_d' - w_a w_a' \bar{w}_a \bar{w}_d'' - \frac{1}{4} w_a^2 \bar{w}_a \bar{w}_d''' \right) \right. \\ & - i \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} \left[B \left(\frac{1}{2} w_a w_a' \bar{w}_a \bar{w}_d'' + \frac{1}{8} w_a^2 \bar{w}_a \bar{w}_d''' \right) \right. \\ & \left. \left. + B' \left(\frac{3}{4} w_a w_a' \bar{w}_a \bar{w}_d' + \frac{5}{16} w_a^2 \bar{w}_a \bar{w}_d'' \right) + B'' \frac{1}{4} w_a^2 \bar{w}_a \bar{w}_d' \right] \right\} dz \quad (12) \end{aligned}$$

$$C_{cM} = \frac{1}{\bar{w}_{a_i} w_{d_i}} \int_{z_0}^{z_i} \frac{1}{2} \bar{w}_a w_d'' dz \quad (13)$$

对静电偏转系统

$$D_1 = 0, F_1 = -2\varphi w_d'' + i \sqrt{2\eta\varphi} (B w_d' + B' w_d/2)$$

将上式代入(8)、(9)式,得到静电偏转系统彗差和横向色差系数公式为

$$\begin{aligned} C_{oE} = & \frac{1}{w_{a_i}^2 \bar{w}_{a_i} \bar{w}_{d_i}} \int_{z_0}^{z_i} \left\{ \frac{1}{2} \left(w_a'^2 \bar{w}_a' \bar{w}_d' - w_a w_a' \bar{w}_a \bar{w}_d'' + \frac{1}{4} w_a^2 \bar{w}_a \bar{w}_d''' \right) \right. \\ & + i \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} \left[B \left(-\frac{1}{2} w_a w_a' \bar{w}_a \bar{w}_d' + \frac{1}{8} w_a^2 \bar{w}_a \bar{w}_d'' \right) \right. \\ & + B' \left(-\frac{1}{4} w_a w_a' \bar{w}_a \bar{w}_d + \frac{5}{16} w_a^2 \bar{w}_a \bar{w}_d' \right) \\ & \left. \left. + B'' \left(\frac{1}{4} w_a w_a' \bar{w}_a \bar{w}_d + \frac{1}{4} w_a^2 \bar{w}_a \bar{w}_d' + B''' \frac{1}{8} w_a^2 \bar{w}_a \bar{w}_d \right) \right] \right\} dz \quad (14) \end{aligned}$$

$$C_{cE} = \frac{1}{\bar{w}_{a_i} w_{d_i}} \int_{z_0}^{z_i} \bar{w}_a \left[w_d'' - \frac{i}{2} \sqrt{\frac{\eta}{2\varphi}} \left(B w_d' + \frac{1}{2} B' w_d \right) \right] dz \quad (15)$$

(12)至(15)式表明,像差系数大小只取决于 $B(z)$ 、 $w_a(z)$ 、 $w_d(z)$ 及其导数.根据这组公式,可对复合物镜系统的彗差和横向色差进行理论分析.以 MOL 系统为例.图 3 为 MOL 系统中 $B(z)$ 、 $w_a(z)$ 和 $w_d(z)$ 的示意图.由图看出,物像面之间可分为两部分:(a) z_0 至 z_{DF} 为预偏转区,电子在预偏转场作用下发生偏转,聚焦磁场接近于零,即 $B \approx B' \approx B'' \approx 0$ 和 $w_a' \approx 1$; (b) z_{DF} 至 z_i 为聚焦区,经过预偏转的电子束主

轨迹平行于 z 轴通过聚焦系统,即 $w_d = \text{常数}$ 和 $w_d'' = w_d' = 0$ 。根据(12)和(13)式,预偏转区的彗差和横向色差系数为

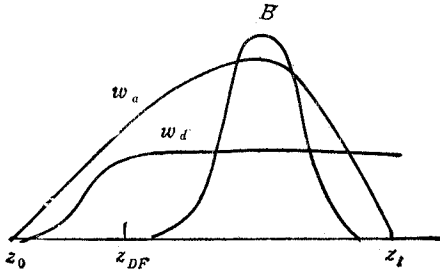


图3 MOL 系统 B 、 w_a 和 w_d 示意图

$$C_{o(\text{MOL})} \approx \frac{1}{w_a'^2 \bar{w}_a' \bar{w}_{di}} \times \int_{z_0}^{z_{DF}} \frac{1}{2} \left(\bar{w}_d' - w_a \bar{w}_a \bar{w}_d'' - \frac{1}{4} w_a^2 \bar{w}_a \bar{w}_d'''' \right) dz$$

$$C_{c(\text{MOL})} \approx \frac{1}{\bar{w}_a' w_{di}} \int_{z_0}^{z_{DF}} \frac{1}{2} \bar{w}_a w_d' dz$$

聚焦区的彗差和色差系数均为零。根据上述对 MOL 系统像差的分析,可得出两点结

论:(a) 对采用磁偏转的 MOL 系统,物镜部分不造成对彗差和色差的影响,彗差和色差大小取决于预偏转。(b) 在预偏转区像差系数的积分与 w_a 值的大小有关,预偏转区越靠近物面 z_0 。则 w_a 越小,也越有利于减小 MOL 系统的象差。对 SOL 系统的象差可做类似分析。

3. 聚焦磁场 $B(z)$ 和电子轨迹 $w_a(z)$ 、 $w_d(z)$ 的近似解析表示式

为便于对复合物镜系统进行理论分析和解析计算,本文用图 4 所示的解析函数表示实际系统中聚焦磁场分布。其中, $z_1 \leq z \leq z_2$ ($z_2 - z_1 = 2l$) 区域为强度 B_0 的均匀场,中心位于 $z_L = \frac{1}{2} (z_1 + z_2)$, 两边分别为半宽度 a_1 和 a_2 的钟形场,解析表示式为

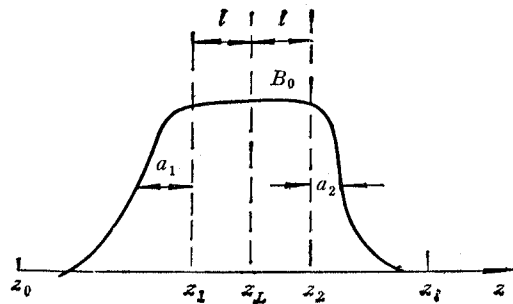


图4 聚焦磁场分布的解析函数曲线

$$B(z) = \begin{cases} B_0 / \{1 + [(z - z_1) / a_1]^2\}, & (z < z_1) \\ B_0, & (z_1 \leq z \leq z_2) \\ B_0 / \{1 + [(z - z_2) / a_2]^2\}, & (z_2 < z) \end{cases} \quad (16)$$

上述场分布的特点是:(a) 可以逼近大多数实际电子光学系统中的聚焦磁场分布,改变 z_L 表示移动磁场中心位置,改变 B_0 、 l 、 a_1 和 a_2 表示调整场分布曲线形状;(b) 磁场中的电子轨迹可以解析求解。

令 $w = r e^{i\theta}$ 表示电子轨迹,并定义

$$\alpha = \tan^{-1}[(z - z_1)/a_1], \quad \beta = \tan^{-1}[(z - z_2)/a_2], \quad T_0 = \sqrt{\eta/8\varphi} B_0$$

$$P_\alpha = (1 + a_1^2 T_0^2)^{1/2}, \quad P_\beta = (1 + a_2^2 T_0^2)^{1/2}, \quad z_1 = z_L - l, \quad z_2 = z_L + l$$

$$\alpha_0 = \alpha(z_0), \quad \alpha_1 = \alpha(z_1), \quad \beta_2 = \beta(z_2), \quad \beta_i = \beta(z_i)$$

求得聚焦场中电子轨迹为

$$r = \begin{cases} (C_1 \cos P_\alpha \alpha + C_2 \sin P_\alpha \alpha) / \cos \alpha, & (z < z_1) \\ C_3 \cos T_0 z + C_4 \sin T_0 z, & (z_1 \leq z \leq z_2) \\ (C_5 \cos P_\beta \beta + C_6 \sin P_\beta \beta) / \cos \beta, & (z_2 < z) \end{cases} \quad (17)$$

$$\theta = \begin{cases} T_0 a_1 (\alpha - \alpha_0), & (z < z_1) \\ T_0 a_1 (\alpha_1 - \alpha_0) + T_0 (z - z_1), & (z_1 \leq z \leq z_2) \\ T_0 a_1 (\alpha_1 - \alpha_0) + 2l T_0 + T_0 a_2 (\beta - \beta_2), & (z_2 < z) \end{cases} \quad (18)$$

根据轨迹初始条件 $w_a(z_0) = 0$ 和 $w'_a(z_0) = 1$, 在 $z = z_1$ 和 $z = z_2$ 处轨迹的连续性, 可确定上式中系数 C_1 至 C_6 .

实际系统中的电子偏转轨迹也可视具体情况选择适当的解析函数近似表示。见图 5, 电子由物点 z_0 沿 z 子轴发出, 在 z_{D1} 至 z_{D2} 区域发生偏转, 然后以直线射入像平面。在偏转区 z_{D1} 至 z_{D2} , 图 5(a) 为抛物线, 其解析式为

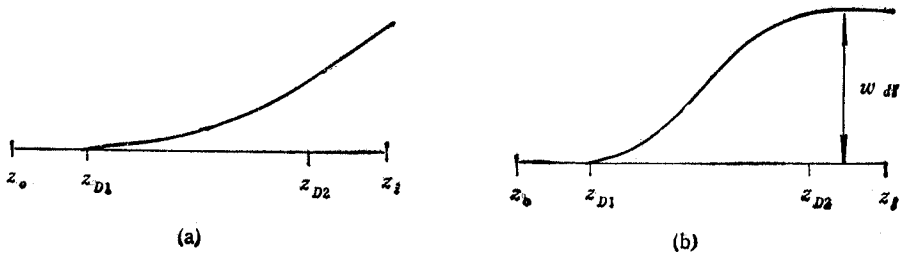


图 5 偏转轨迹示意图

$$w_d(z) = A(z - z_{D1})^2 \quad (19)$$

图 5(b) 为反正切曲线, 其解析式为

$$w_d(z) = w_{di} [\tan^{-1} A(z - z_D) + \pi/2] / \pi \quad (20)$$

(19)和(20)式中, A 反映电子轨迹斜率, $z_D = (z_{D1} + z_{D2})/2$ 表征偏转区中心位置。

三、弯曲物镜 (BOL) 系统

1. BOL 系统的提出

已有的复合物镜 MOL 和 SOL 在结构上的共同特点是: (1) 电子束先在透镜之外进行预偏转, 然后以一定的初始位置和斜率进入复合物镜; (2) 电子在物镜中的主轨迹是直线。上述结构是在不考虑预偏转像差和假设预偏转轨迹与物镜完全匹配的条件下提出的。而在实际系统中, 预偏转像差对系统总像差的影响有时很严重, 不可能完全忽略, 实现预偏转轨迹与物镜完全匹配并非轻而易举。

为解决复合物镜系统中预偏转与物镜匹配的问题,并减小系统总像差,本文提出了图 6 所示的新系统.新系统在物理模型上与上述 MOL 和 SOL 系统有两点不同:(1)将

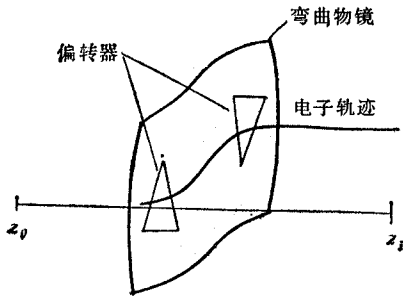


图 6 BOL 系统示意图

“预偏转器”移入主透镜中;(2)物镜中电子轨迹为任意曲线.新系统的优点可以概括如下:(1)对电子束的偏转和聚焦同时进行,避免了预偏转与物镜的匹配问题;(2)通过偏转场与聚焦场的适当配置(即适当选择轨迹形状),可保持较小的系统像差;(3)有利于缩短系统总长度;(4)电子轨迹可根据需要加以选择,大大增加了系统设计的灵活性.由于新系统物镜中的电子束主轨迹不是直线,而是任意曲线,故称为“弯曲物镜”系统,简称 BOL (Bent Objective Lens).

2. BOL 系统像差的研究

对 BOL 系统像差的研究是根据第一部分中像差公式(8)、(9),聚焦场分布解析式(16),聚焦轨迹解析式(17)、(18)以及偏转轨迹的反正切函数表示式(20),通过计算分析进行的.由于场分布和轨迹都是解析表示式,像差计算十分迅速,这就为进行大量计算分析提供可能,并得出以下两点结论:(1)当透镜场分布和位置固定的情况下,只有某个偏转轨迹条件(即(20)式中的 z_D 和 A)才能得到小的彗差和横向色差.这意味着偏转器的位置和宽度一定要与透镜场良好匹配.(2)透镜场分布的斜率越小(即场分布平坦),得到的像差也越小.

3. BOL 系统的设计实例

设计 BOL 系统的过程可分为两步.第一步根据上述的计算分析找出像差较小的理想聚焦和偏转场分布;第二步根据理想场分布找出实际透镜和偏转器结构.

(1) 理想场分布的确定 (a) 假设透镜场为一个典型的钟型场,其半宽度 $a_1 = a_2 = 0.1$ (为了简便,所有几何尺寸和位置都相对于物像面间距 $z_i - z_0$ 归一化),透镜位置 $z_L = 0.7$,其场分布见图 7 (a). (b) 计算找出彗差和横向色差最小的反正切函数形式的偏转轨迹,中心位置 $z_D = 0.55$,参量 $A = 57.11$,见图 7 (b). (c) 由(6)式求出偏转场分布 $D_1(z)$,一般说来 $D_1(z)$ 是一个复函数,图 7 (c) 给出偏转场的实部和虚部曲线. (d) 在上述的理想场分布情况下,计算出复合物镜系统的彗差系数为 $|C_o| = 0.00132$,横向色差系数为 $|C_c| = 0.00533$.

(2) 实际 BOL 系统尺寸的确定 确定实际 BOL 系统的透镜和偏转器尺寸,使所得场分布尽可能与图 7 (a) 和 7 (c) 所示的理想场分布一致. (a) 磁透镜 由于理想磁场分布是典型的钟形场,所以比较容易找到一个与此钟形场一致的磁透镜.具体结构见图 8,透镜内直径为 0.3,间隙 0.08,透镜位置 0.7. (b) 磁偏转线圈 由于计算所得的偏转场分布是一个复函数,确定偏转线圈尺寸要比确定透镜尺寸困难些.采用四对正交的环形偏转线圈组能较好地实现要求的偏转场分布.每对线圈用来实现一个方向(实部或虚部)的偏转场,其结构见图 8,参量见表 2. (c) 对于上述实际 BOL 系统,用文献[6]所述的计算机程序计算出彗差系数 $|C_o| = 0.4932$,横向色差系数 $|C_c| = 0.0789$.当

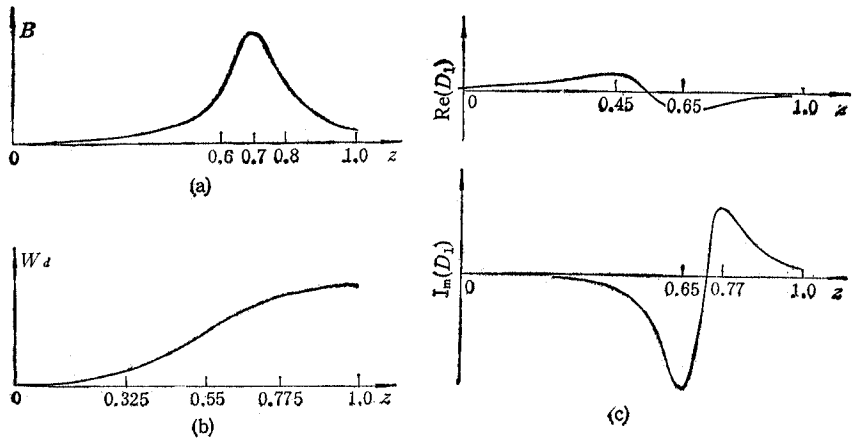


图7 BOL 系统理想场分布和电子轨迹

(a) 聚焦磁场 $z_L = 0.7, l = 0, a_1 = a_2 = 0.1$ (b) 电子轨迹 $z_D = 0.55, A = 57.11$
 (c) 偏转磁场

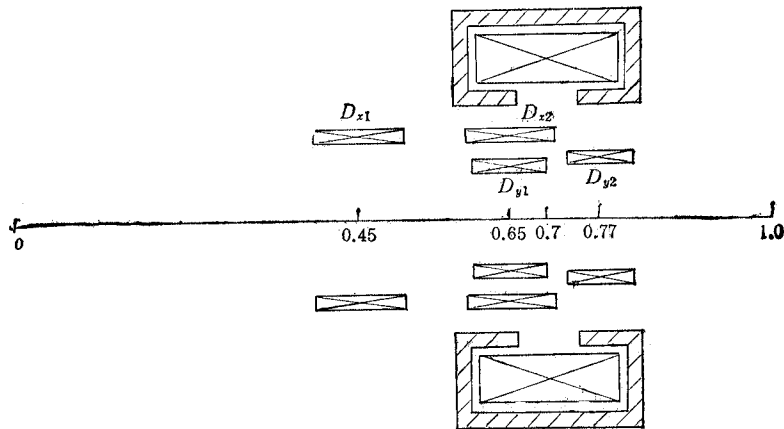


图8 实际 BOL 系统结构

表2 实际 BOL 系统偏转器结构参数

结构参数	线圈名称	x 方向线圈		y 方向线圈	
		D_{x1}	D_{x2}	D_{y1}	D_{y2}
位置		0.45	0.65	0.65	0.77
转角($^{\circ}$)		60	60	60	60
宽度		0.12	0.12	0.10	0.09
内半径		0.10	0.10	0.06	0.07
外半径		0.12	0.12	0.08	0.09

物像距为 500mm, 像面扫描范围为 $5 \times 5\text{mm}^2$, 束孔径角 5 mrad, 能散 $\Delta V/V = 0.0001$ 下, 彗差为 $0.097\mu\text{m}$, 横向色差为 $0.028\mu\text{m}$. 可见这两项像差是比较小的, 当然像差系数仍大于理想计算值, 这是因为实际场分布与理想场分布不完全一致的缘故. 但只要稍微

调整四对偏转线圈的相对电流值,这两项像差系数就减小为 $|C_c| = 0.0238$ 和 $|C_s| = 0.0036$ 。在与上述同样聚焦条件下,彗差为 $0.005 \mu\text{m}$, 横向色差为 $0.001 \mu\text{m}$ 。

四、结 论

采用复合物镜有利于大幅度减小聚焦偏转系统的电子光学像差。本文根据复合场中的电子轨迹方程,导出磁复合物镜和静电复合物镜系统中偏转场一般表示式和象差系数公式,并对其进行了讨论。综合研究了 MOL 和 SOL 等系统的设计思想,提出新的复合物镜 BOL 系统。基于对 BOL 系统象差系数随场分布变化规律的研究,设计了实际系统,该系统获得很小的彗差和横向色差。在 $5 \times 5\text{mm}^2$ 扫描范围内,孔径角 5mrad 和能散 2.5eV 下,彗差 $0.005 \mu\text{m}$, 横向色差 $0.001 \mu\text{m}$ 。可以认为这里采用的设计方法简单,准确性高。

应该指出,在实际 BOL 系统的设计方面,我们只作了初步尝试,如果再经过进一步对静电复合物镜和复数偏转轨迹的复合物镜系统进行研究,有可能得到更简单和性能更好的系统。

参 考 文 献

- [1] H. Ohiwa, et al., *Electronics and Communications in Japan*, 54-B(1971)12, 44.
- [2] H. C. Pfeiffer, G. O. Langner, *J. Vac. Sci. Technol.*, 19(1981)4, 1058.
- [3] Chen Zhongwei, et al., *Optik*, 64(1983)4, 341.
- [4] M. A. Sturans, H. C. Pfeiffer, *Proc. Microcircuit Engineering*, 1984, Academic Press, London, P. 107.
- [5] Qiao Yizheng, et al., *The Principle of Pendulum Combined Focusing and Deflection System*, International Symposium on Electron Optics, Beijing, China, (1986), p. 207.
- [6] H. C. Chu, E. Munro, *Optik*, 61(1982)2, 121.

RESEARCH AND DESIGN ON THE COMBINED OBJECTIVE LENSES FOR ELECTRON BEAM LITHOGRAPHY SYSTEMS

Xia Shanhong Zhu Xieqing

(*Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing*)

Abstract Based on the synthetic study of the previous magnetic combined objective lenses, such as MOL (moving objective lens), VAL (variable axis lens), SOL (swinging objective lens) etc., the general theory of combined objective lenses is approached, and a set of general formulas is presented. A new combined objective lens called "Bent Objective Len" (BOL) is proposed for improving the optical properties in electron beam systems. Using the analytical functions of the magnetic lens field and electron ray, the aberration analysis of the BOL system is performed, and a practical BOL system is also designed. The numerically computational results indicate that this system offers extremely small coma and transverse chromatic aberrations. At the corner of a $5 \times 5\text{mm}^2$ deflection field with a 5mrad aperture angle and 0.0001 beam voltage ripple, the beam blur caused by coma is $0.005 \mu\text{m}$ and the transverse chromatic aberration is $0.001 \mu\text{m}$.

Key words Electron optics; Combined objective lens; Electron beam lithography system; Aberration