

变形电子束曝光机成形偏转器 的设计和性能*

康念坎 江钧基 吴伟
(中国科学院电子学研究所,北京)

黄兰友 吴明均
(中国科学院科学仪器厂,北京)

摘要 在变形电子束曝光机中,为使曝光均匀必须保证靶上束斑电流密度和边缘分辨率不随束斑形状和尺寸的变化而改变。实现这一目标的关键是正确设计成形偏转器。本文讨论采用高灵敏度平行板偏转器实现成形偏转时,为达到上述目标应进行的线性补偿和旋转补偿的设计计算方法。给出了用实验方法改变电子源象与偏转板几何中心的轴向距离所测得的线性补偿因子和旋转补偿因子的值。实验结果与计算值符合较好。

关键词 电子束曝光机;电子光学;偏转器

一、引言

采用电子束曝光制造普通光刻方法达不到的微米和亚微米级线条集成电路图形的技术,十多年来取得了很大的进展。七十年代后期已研制出先进的变形电子束曝光机^[1-3]。其靶面上电子束斑的形状和尺寸可以根据被刻画图形的形状和尺寸而改变。因此曝光速度比束斑尺寸固定不变的圆形束曝光机要快得多。它已成为大规模集成电路生产线上的实用设备。现在,变形束曝光技术仍在不断的改进^[4-10]。

在变形束曝光机中,为改变束斑的形状和尺寸,通常是在光路中设置两个间隔一定距离的成形光栏(一般多为方形),并在两光栏之间设置一组成形偏转器(为实现高速偏转,一般均采用静电偏转板)。通过改变成形偏转电压的大小,使第一光栏的象在第二光栏上移动,两光栏重迭部份的合成象经过后续缩小透镜缩小后由投影透镜聚焦至靶面上,即得到形状和大小可变的矩形束斑。这样,与普通高斯圆束机中只以电子源成象的情形不同,在变形束光路中同时存在两个不同而又相互关联的象:一个是两成形光栏在靶上的合成象,即形状和尺寸可变的工作束斑;另一个是电子源的象,它控制靶上束斑的照明和分辨率。在设计透镜系统时必须使这两个象分离,并尽可能做到能独立地调节两者的成象条件。同时,当第一光栏象被偏转时,在偏转器以后的电子源象不能有任何移动,才能保证靶上束斑的电流密度和边缘分辨率不变。要使源象位置不受偏转器的影响,只有源象和

* 1988年12月28日收到,1989年10月31日修改定稿。

偏转器的偏转中心重合时才能达到。但在光路中，第一成形光栏成象于第二成形光栏上，和电子源的成象是由同一透镜实现的，而且透镜的激励是以满足前一成象条件为主，因此一般不易做到源象恰好落在偏转器几何偏转中心上，需要通过电调节偏转板长度的方法，使源象位置成为偏转板的电偏转中心。文献[11]采用四极静电偏转板作为变形偏转器，可以使 X 、 Y 两方向的偏转中心同时靠近电子源象的位置，比较容易改变偏转板电偏转中心使之与源象位置重合。缺点是极板之间距离较大，因而偏转灵敏度较低，导致偏转放大器制作困难。为降低偏转电压，本文用两对串接的二极平行偏转板作为 X 、 Y 方向的偏转器，这样至少有一对极板的几何中心远离源象的位置。因而在对第一成形光栏进行偏转的同时，源象也将产生较大的偏移，需要采取补偿措施来消除源象的移动。另一方面，由于主成形偏转板和补偿用的成形偏转板一般都处在成形透镜的两侧，当成形透镜的转角和两组偏转板的相对机械转角不相同，只靠一个方向(X 或 Y)的补偿板还不足以消除源象的移动，这时还需要进行旋转补偿。本文将讨论对变形偏转板进行补偿的设计计算方法，并给出实验测量结果和计算值的比较。

二、成形偏转器的设计

图1为可变矩形电子束曝光机中成形偏转光路的基本构成示意图。 A_1 和 A_2 分别为

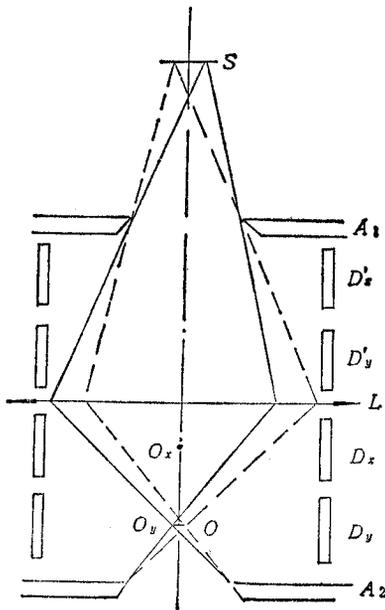


图1 成形偏转光路的基本构成示意图(本图和图5中 D_y 、 D'_y 实际上分别与 D_x 、 D'_x 相互垂直)

两个成形光栏， A_1 经成形透镜 L 成象于 A_2 平面上。为使两方光栏尺寸相同以方便制造，通常把 L 的位置和激励设计成对 A_1 的放大率为1。 S 是电子源(交叉斑或其中间象)，它将 A_1 均匀照明，并经 L 成象于光轴上的 O 点。为了改变矩形束斑的尺寸，在 A_1 和 A_2 之间设置成形偏转器，使 A_1 在 A_2 上的象随着偏转场的变化而移动。

图中 D_x 和 D_y 分别为 X 方向和 Y 方向的主成形偏转板(简称主板)，其几何中心分别为 O_x 和 O_y ，它们一般都不和电子源象 O 的位置相重合。当偏转板加上电压时，源象将产生横向位移，靶面上束斑电流密度和边缘分辨率也将随着改变，这是不希望的。要让源象不受偏转场的影响，必须将各偏转板的实际偏转中心都移到源象位置上。这可以通过电调节主板有效长度的途径来实现。方法是另外附加一组偏转板(称为补偿偏转板，简称补偿板)。为了补偿调节方便，可把补偿板和主板放在成形透镜的同一侧。为了获得较高的

偏转灵敏度，偏转板要有一定长度，它与成形光栏 A_2 的距离也要足够大，所以主板将基本上占据从 L 至 A_2 之间的空间。这样，补偿板只能放在 A_1 至 L 之间，如图中的 D'_x 和 D'_y 。因为磁透镜 L 存在一定转角，在安装时应将主板 D_x 和 D_y 相对于补偿板 D'_x 和 D'_y 沿 L 的

转角方向机械旋转同一个角度，才能使补偿板引起的偏转方向与主板的偏转方向一致。但实际上透镜的电转角和偏转板的机械转角会存在差异，仅用一个方向（如 X 方向）的补偿不可能将已被主板偏离光轴的源象推回到轴上，还需在与之垂直方向（即 Y 方向）的补偿板上加一定的偏转电压进行补偿，才能达到源象位置不动的目的。这种补偿称为旋转补偿。而同一偏转方向上的补偿（即 D'_x 对 D_x 的补偿和 D'_y 对 D_y 的补偿）称为线性补偿。

下面计算成形偏转板所需的偏转角。根据光路元件的不同配置方式，主板可放在 L 之下（如图 1），也可放在 L 之上，主要取决于电子源象的轴向位置。为了使源象尽可能少受主板偏转的影响，主板应尽量靠近源象；为了提高偏转灵敏度，补偿板应远离源象的位置。另一方面，成形光栏的位置应尽可能远离主板而靠近补偿板，才能使主板偏转灵敏度高。根据上述原则，成形偏转板的配置有两种情形（图 2）。当成形透镜成电子源的缩小象时，常把主板置于 L 之下，补偿板置于 L 之上，如图 2(a)。图 2(b) 的情形则相反，这时成形透镜成电子源的放大象。图中只画出一个方向的偏转板为例，另一方向可同样处理。

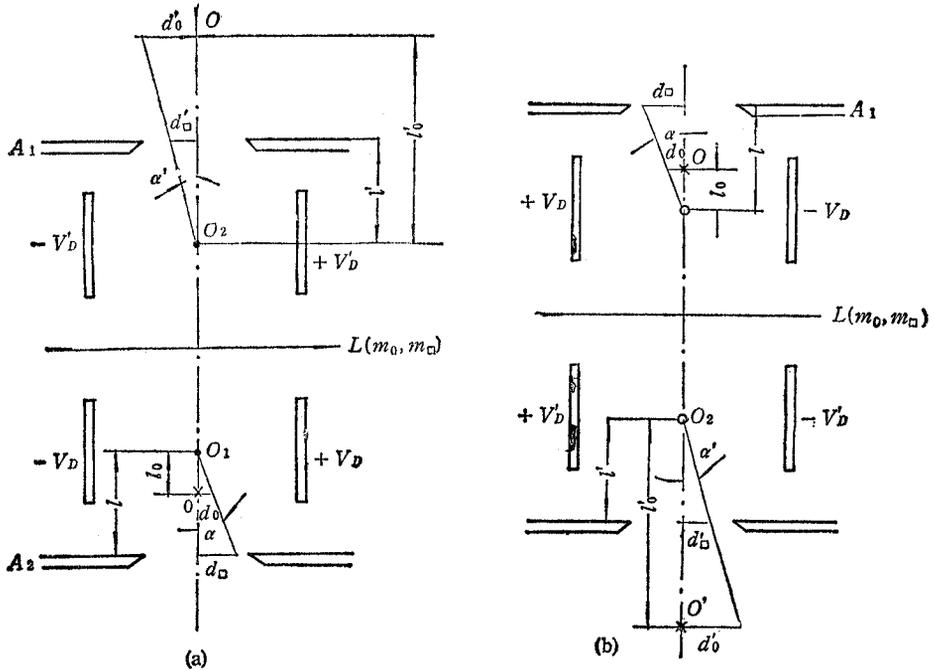


图 2 成形偏转线性补偿的计算示意图
(a) 主板置于 L 下方的情形，(b) 主板置于 L 上方的情形。

先看图 2(a) 的情形。设 L 对电子源 O' 的放大率为 m_o ，对 A_1 的放大率为 m_\square ，主板几何中心 O_1 与源象 O 和 A_2 平面的距离分别为 l_o 和 l （规定 O 在 O_1 下方时， l_o 取正值，反之取负值），补偿板中心 O_2 与电子源 O' 和 A_1 的距离分别为 l'_o 和 l' 。假定要求 A_1 在 A_2 面上的偏转量为 d_\square ，则主板的偏转角应为

$$\text{tg } \alpha \approx \alpha = d_\square / l \tag{1}$$

与此同时，电子源 O 所受到的横向偏移量为

$$d_o = l_o \alpha = d_\square l_o / l \tag{2}$$

这相当于在 O 处电子源在相反方向有一个虚偏移量 d_o/m_o 。为消除此偏移，补偿板应给出一个偏转角

$$\alpha' = d_o/(m_o l'_o) \quad (3)$$

显然,在 A_1 处的偏转量将相应地减少一个量

$$d'_o = \alpha' l' = d_o l'/(m_o l'_o) \quad (4)$$

为了在补偿偏转后,在 A 面上仍然获得预计的偏转量 d_o , 主板的偏转角应加大至

$$\alpha = \frac{d_o + m_o d'_o}{l} = \frac{d_o}{l} \left(1 + \frac{m_o l'_o l'}{m_o l'_o} \right) \quad (5)$$

与此相应的补偿板偏转角为

$$\alpha' = \alpha l_o/(m_o l'_o) \quad (6)$$

α' 和 α 之比称为线性补偿因子:

$$\eta = \alpha'/\alpha = l_o/(m_o l'_o) \quad (7)$$

当偏转板的结构参数(板的间距和长度)选定后,可由(5)–(7)式计算所需偏转电压 V_D 、 V'_D 和 η 的值。由于 η 只与成形透镜两侧电子源象的相对位置和成形透镜对电子源的放大率有关,而与主板偏转角的绝对值无关,所以 η 可对任意主板电压调定。可以在补偿板和主板之间建立一个只决定于 η 的电压比例关系,当主板上的电压改变时,补偿板电压自动按比例变化,不需重调。在(5)式中令 d_o 等于成形方光栏的边长,即可求出主板所需最大偏转电压值,作为设计偏转放大器的依据。

以上计算是在假定经成形透镜旋转后,补偿板的偏转方向与主板偏转方向完全一致

的条件下才正确。如果两个偏转方向所成角度较大,则还需进行旋转补偿。图3为通过

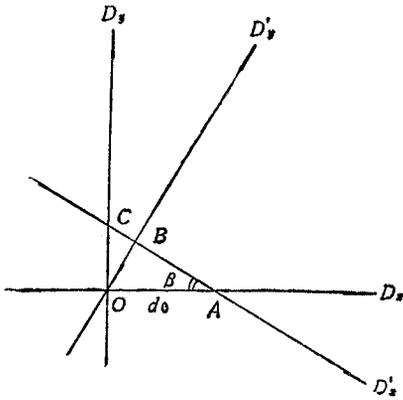


图3 通过源象垂直于光轴截面上的偏转方向示意图

源象垂直于光轴截面上的偏转方向示意图。 O 表示光轴, D_x 和 D_y 为主板两个相互垂直的偏转方向, D'_x 和 D'_y 为补偿板经 L 旋转后在该截面上的偏转方向,二者相差一个 β 角。设变形时电子源象 O 受主板偏转沿 D_x 方向移至 A 点, OA 的长度为 d_o 。为了使源象重新回到光轴上,借助 X 补偿板 D'_x 将 A 点偏至 B 点,同时在 D'_y 上加偏转信号将 B 点推回 O 点。当 β 角比较大时,(2)式中的 d_o 可用 $d_o \cos \beta$ 代替。通常在设计时预先计算出成形透镜的转角,并将主板和补偿板相对旋转一个与之相近的角度,使得 β 的值很小。实际上, β 的值可从旋转补偿的调试求出。从图3可知, X 补偿板的偏转角为

$$\alpha'_x = d_o \cos \beta / (m_o l'_{ox}) \quad (8)$$

式中, l'_{ox} 为 X 补偿板几何中心与电子源象 O' 的距离(相当于(3)式的 l'_o)。 Y 补偿板的偏转角为

$$\alpha'_y = d_o \sin \beta / (m_o l'_{oy}) \quad (9)$$

式中, l'_{oy} 为 Y 补偿板几何中心与源象 O' 的距离。

α'_y 与 α'_x 之比称为旋转补偿因子:

$$\eta_r = \alpha'_y / \alpha'_x = \operatorname{tg} \beta (l'_{ox} / l'_{oy}) \quad (10)$$

当偏转板结构参数选定后, η_r 是一个常数. 由于偏转角与偏转电压成正比, 可从实验中测出单独一个方向(例如 X 方向)已补偿(即电子源象 O 的位置不发生移动)时两对补偿板上的电压值, 由(10)式求出 β 值. 同样, 也可由 Y 方向单独补偿的条件求出 β 角. 两次得到的 β 值应该是相同的. 如果 β 值较大, 可重新调整偏转板的机械转角, 以减小旋转补偿的范围.

对于图 2(b) 的情形, 可作类似的计算. 但这时若 O 位于 O_1 之上, l_o 取正值, 反之 l_o 取负值, 可得到与(5)–(7)式对应的关系式,

$$\alpha = d_{\square} \left(1 + \frac{m_o l_o l'}{m_{\square} l'_{o'}} \right) / l \quad (11)$$

$$\alpha' = \frac{\alpha m_o l_o}{l'_{o'}} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{m_o l_o}{l'_{o'}} \quad (13)$$

下面一个例子可以说明补偿板对主板所起的作用. 在图 2(a) 中, 设 $l = 36\text{mm}$, $l' = 41.75\text{mm}$, $l'_o = 171.75\text{mm}$, $d_{\square} = 0.18\text{mm}$. 由(5)–(6)式计算出的 α 和 α' 随 l_o 的变化关系示于图 4. 由图可见, 当 l_o 为正值, 为保持源象在光轴上不动而加在补偿板上的电压极性和主板上的偏转电压极性相同(α' 为正值). 这时补偿偏转将部分抵消主板所产生的成形光栏偏转量, 因此主板偏转角 α 要比 $l_o = 0$ (无需补偿)时的值增加, 即补偿板的作用是抵消主板的偏转. 反之, 当 l_o 为负值, 加在补偿板上的电压极性与主板上的电压极性相反(α' 为负值), 这将增加成形光栏的偏转量. 因而主板偏转角 α 比 $l_o = 0$ 时的值减小, 即补偿板的作用是增加主板的偏转. 在设计主板位置时, 应尽可能把主板几何中心 O_1 置于源象 O 之下, 以降低对偏转电压值的要求. 同样, 对于图 2(b) 的情形, 应尽可能把主板中心 O_1 置于源象 O 之上.

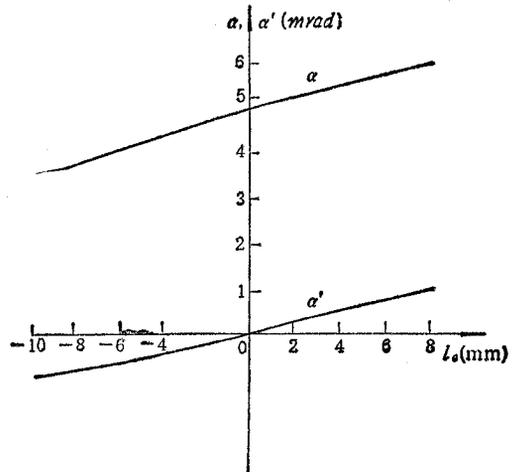


图 4 主板与补偿板偏转角 α 和 α' 随 l_o 的变化关系

上述分析计算没有考虑偏转象差的问题. 因为成形光栏的偏转量一般很小, 无论在主板或是补偿板的偏转角都不大(一般在毫弧度量级以下), 因此偏转象差的值很小. 按文献[12]计算图 4 中偏转器的偏转畸变、场曲和象散, 以及彗差的值均小于 10^{-6}mm , 所以在设计成形偏转板时, 从一级偏转成象关系计算确定其结构参数就可以了.

三、实 验

1. 实验装置

在一台可变矩形电子束曝光机镜筒实验装置上对变形偏转补偿进行了实验观察和测量。装置的光路示意图如图 5 所示，镜筒本体由四个磁透镜 L_1-L_4 组成。由电子源 S_0 照明的第一成形光栏 A_1 经成形透镜 L_1 成象于第二成形光栏 A_2 面上，同时 L_1 也将 S_0 成象于 S_1 。分立在 L_1 两侧的主板 D_x 和 D_y 及补偿板 D'_x 和 D'_y 用来使 A_1 的象在 A_2 面上偏转移动，以合成所需形状和大小的矩形束斑。聚光透镜 L_2 的作用是将电子源的中间象 S_1 再次成象于后续缩小透镜 L_3 的入射光瞳处，以获得有效而均匀的照明。把 A_2 安置在 L_2 的主平面上，这样 L_2 激励改变时不影响两个成形光栏合成的矩形束斑象，这种光路配置有利于有效地实行源象和成形光栏象的分离。经 L_3 缩小了的合成矩形束斑 A 最后由投影透镜 L_4 聚焦到靶面 T 上，束斑在靶上的位置可通过透镜后偏转器 D_0 来改变。为了拦截电子束中束角较大的那部分边缘电子，只让束中心电流密度较均匀的部分对靶面照明，在 L_4 中心处放一个圆光栏 A_0 ，它的直径稍大于电子源象 S_3 。

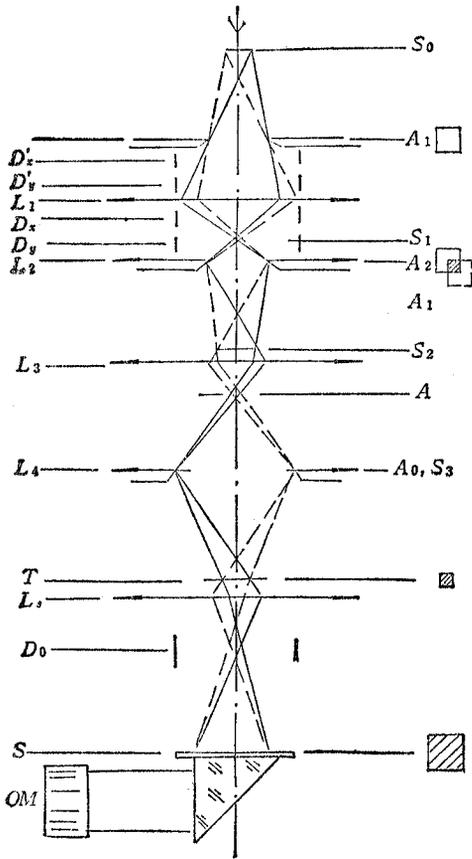


图 5 成形偏转补偿实验观测装置光路示意图

为了观测束斑的形状和尺寸，在镜筒下装一个三级磁透镜组成的磁放大系统 L_s ，放大率为 25—300，再用一个 80 倍的双目光学望远镜 OM，就可直接观测靶面 T 上亚微米级的束斑。调节 L_s 的激励，可以在屏面 S 上观察镜筒任一横截面上的情况。光路中还包括电磁对中器、消象散器和其它一些光栏等，为了突出主要部件，这些部件在图中略去未画。

2. 实验方法

图 5 中电子源象 S_1 的轴向位置决定于 L_1 的光学本领，调节 L_1 的激励，就可以改变 S_1 与主板 D_x 和 D_y 几何中心的距离(即图 2 中的 l_0)。为使 S_1 的轴向位置改变后，电子源象仍能在 L_2 的入射光瞳处，要同时调整 L_2 的激励。当 L_1 激励减小时，源象 S_1 下移，要保持 S_2 的位置不变，就要调大 L_2 的激励，反之，进行相反的调节。显然，在 L_1 的激励改变时， A_1 的放大率也要改变。

调节 L_s 的激励，使圆光栏 A_0 截面成象于屏面 S 上，就可从 OM 中观察不同 l_0 下进

行成形偏转时电子源象 S_3 的移动情况。对每一个 l_0 值,按上节方法进行线性补偿和旋转补偿,直到从屏上看到的源象不产生位移,测量这时各偏转板上电压值,就可求出线性补偿因子和旋转补偿因子。

3. 实验结果和讨论

图 6 是在图 2(a) 的情况下, X、Y 两方向线性补偿因子 η_x 和 η_y 随 l_0 的变化。图中标有“ Δ ”的点为实测点,实线是按(7)式计算的值。从图可看出,实验结果和计算值吻合是较好的。在实测范围内,电子源象始终落在 X 主板几何中心的下方(即 l_0 为正),所以 X 补偿板上的电压恒与主板电压同相,即 η_x 恒为正值。随着成形透镜激励的改变,电子源象可能落在 Y 主板几何中心的下方(l_0 为正)或上方(l_0 为负),相应地要求 Y 补偿板上的电压与主板同相或反相。对于前一种情况, η_y 为正值,对后一种情况, η_y 为负值。

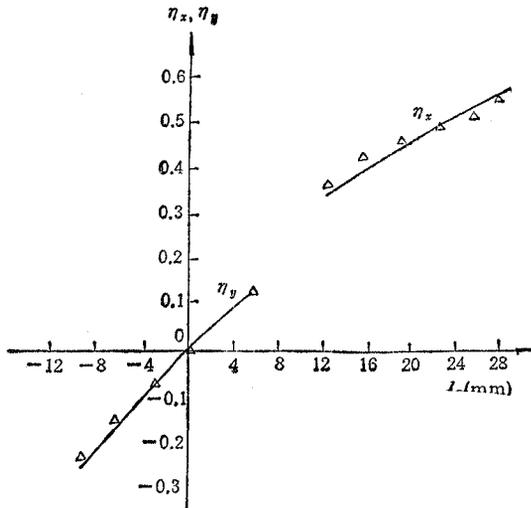


图 6 η_x 和 η_y 随源象至主板几何中心距离 l_0 的变化关系 ($l_x = 36\text{mm}$, $l_y = 58\text{mm}$, $l'_x = 28.75\text{mm}$, $l'_y = 41.75\text{mm}$, $l'_{0x} = 157.75\text{mm}$, $l'_{0y} = 171.75\text{mm}$)

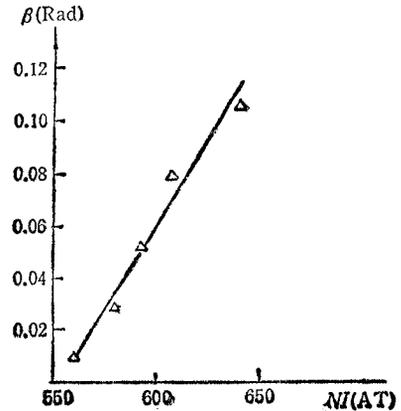


图 7 补偿板经成形透镜旋转后的偏转方向和主板偏转方向的夹角 β 与成形透镜匝数 NI 的关系。(Δ 为实验测量值,实线为理论计算值)

图 7 为旋转补偿的实验结果与计算值的比较。实验时仅在 X 主板上加偏转电压, Y 主板偏转信号为零。调节补偿板 X' 和 Y' 上的电压,使得在圆光栏 A_0 面上的源象 S_3 不因主板加上偏转电压而移动(参看图 5)。测出这时极板上的电压值,用(10)式求出 β ,如图 7 中标有“ Δ ”的点。因为成形透镜 L_1 的电转角与匝数成正比,所以理论值为一直线(图中实线)。

作为对成形偏转补偿优劣程度的一个综合检测手段,分别测量了未加变形偏转时的束斑电流密度值,以及加上变形偏转后得到的不同束斑尺寸下的电流密度值。结果表明,不同束斑尺寸下的束流密度相差在 5% 以内,说明成形偏转补偿良好。此外,若把磁放大观测系统 L_s 和光学望远镜 OM 都用高放大倍数(总放大率达 6000 倍),观察屏上矩形束斑的边缘清晰度。结果证明,在补偿良好的状态下,不同束斑尺寸的边缘分辨率维持不变。

四、结 论

采用高偏转灵敏度的二平行板串接组成的静电成形偏转器,经过仔细的线性补偿和旋转补偿后,可以做到当靶面上矩形束斑形状和尺寸改变时,束斑电流密度和边缘分辨率维持不变。从而满足了变形电子束曝光机实现高速而又均匀曝光的要求。在变形束曝光机实验镜筒上对成形偏转补偿进行的实验观测表明,本文对成形偏转补偿的设计计算方法精确可行的。

参 考 文 献

- [1] G. Cogswell et al., Proc. 8th International Conference on Electron and Ion Beam Science and Technology, 1978, pp. 117—133.
- [2] M. Fujinami et al., *J. Vac. Sci. Technology*, 19(1981), 941—945.
- [3] R. D. Moore, et al., *J. Vac. Sci. Technology*, 19(1981), 950—952.
- [4] S. Moriya, et al., *J. Vac. Sci. Technology*, B1(1983), 990—994.
- [5] K. Nakamura, et al., *J. Vac. Sci. Technology*, B3(1985), 94—97.
- [6] H. K. King, et al., *J. Vac. Sci. Technology*, B3(1985), 98—101.
- [7] E. de Chambost, et al., *J. Vac. Sci. Technology*, B4(1986), 78—82.
- [8] M. Fujinami, et al., *J. Vac. Sci. Technology*, B5(1987), 61—65.
- [9] R. Yoshikawa, et al., *J. Vac. Sci. Technology*, B5(1987), 70—73.
- [10] S. Tamamushi, et al., *J. Vac. Sci. Technology*, B6(1988), 209—212.
- [11] H. C. Pfeiffer, *J. Vac. Sci. Technology*, 15(1978), 887—890.
- [12] 江钧基,电子科学学刊,8(1986),359—366.

DESIGN AND PERFORMANCE OF SHAPING DEFLECTORS FOR VARIABLE SHAPED ELECTRON BEAM LITHOGRAPHY

Kang Niankan Jiang Junji Wu Wei
(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing)

Huang Lanyou Wu Mingjun
(Scientific Instruments Factory, Academia Sinica, Beijing)

Abstract In order to obtain uniform exposure in variable shaped electron beam lithography, the beam current density and edge resolution on the target must not change for different spot shapes and sizes. The key to the goal is the appropriate design of shaping deflectors. A linear and rotation compensation approach is presented. Values of linear and rotation compensation factors versus the distances between electron source image and centers of deflectors are measured on an experimental electron beam column with variable spot shaping. The experimental results are in good agreement with the calculated ones.

Key words Electron beam lithography; Electron optics; Shaping deflector