

# DJ-2 型可变矩形电子束曝光机 电子光学设计

康 念 坎

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

**摘要** 本文讨论可变矩形电子束曝光机的电子光学设计, 着重分析光路构成和变形偏转补偿等问题。DJ-2 型机使用最少的透镜数实现变形束曝光机的功能要求。为实现高速变形偏转, 采用高灵敏度串接式平板静电偏转器, 通过精确的线性补偿和旋转补偿, 使靶上束斑电流密度和分辨率以及原点位置不受束斑尺寸改变的影响。实验结果表明, 用发夹型钨丝阴极时的束流密度大于  $0.4 \text{ A/cm}^2$ ;  $2 \times 2 \text{ mm}$  扫描场内边缘分辨率优于  $0.2 \mu\text{m}$ 。

**关键词** 电子光学; 电子束曝光机; 可变矩形束

## 一、引 言

随着大规模集成电路密度日益增长的需求, 作为其主要制造手段的电子束曝光技术也在不断的发展和完善。其中一个重大的突破是采用可变矩形电子束代替传统的高斯圆形束<sup>[1-3]</sup>, 从而大大提高了曝光速度, 使得电子束曝光机成为微电子工业生产线上的实用装备。

可变矩形电子束曝光机的光路结构比高斯圆束机要复杂得多, 因为它同时存在着两个不同而又相互关联的电子象: 电子源的象(源象)和成形光栏的象(物象)。光路设计上必须将这两个象有效地分离, 并尽可能做到独立地调节各自的成象条件。为使不同束斑尺寸曝出的线条同样清晰, 必须保证改变束斑尺寸时靶上束斑电流密度和边缘分辨率以及束斑原点位置不变。这就要求对变形光路进行精确的设计计算。同时, 为了获得均匀的曝光线条, 靶面上束斑内的电流密度必须尽可能均匀。因而要求照明系统对成形光栏实现均匀的照射。本文结合我们研制的 DJ-2 型可变矩形电子束曝光机电子光学镜筒, 对电子光学设计中的一些主要问题进行分析讨论, 并给出实验测量结果。

## 二、镜筒电子光学设计计算

### 1. 光路构成及其电子光学特性计算

DJ-2 型可变矩形电子束曝光机的电子光学指标如表 1 所列。相应的镜筒光路如图

1 所示。由发夹型钨丝阴极三极枪(G)发射的电子束将方光栏  $A_1$  均匀照明,成形透镜  $L_1$  将  $A_1$  以 1:1 成象于第二方光栏  $A_2$  平面上。改变加在位于  $A_1$  和  $A_2$  之间的变形偏转板 ( $D_x$  和  $D_y$ ) 上的电位,可使  $A_1$  的象在  $A_2$  上移动,以获得所需尺寸的束斑,如图中

表 1 DJ-2 电子光学指标要求

束流密度	0.4A/cm <sup>2</sup>
束斑尺寸	1—12.5 $\mu$ m 矩形,步距 0.05 $\mu$ m
边缘分辨率	0.2 $\mu$ m
扫描场尺寸	2 × 2m <sup>2</sup>

右侧涂黑了的那部分矩形面积。位于  $L_1$  上面的辅助变形偏转板  $D'_x$  和  $D'_y$  用于使电子源象 ( $S_1$ ) 不因变形偏转而产生离轴移动,以保持靶面上束斑电流密度和分辨率以及束斑原点位置不变。由  $A_1$  和  $A_2$  合成的束斑经缩小镜  $L_3$  以约 1/10 的倍率缩小后由物镜  $L_4$  聚焦成象于靶面  $T$  上,为拦截电子束中束角较大、束流密度不均匀的边缘电子,在  $L_4$  中心设置了一个直径稍大于电子源象  $S_3$  的圆光栏  $A_0$ 。束斑在靶面上的位置由透镜后偏转系统  $D_0$  控制。

由于所要求的偏转场尺寸较小,我们采用了结构简单的平板静电偏转系统,其优点是要求高精度的主场偏转(2mm)和要求高速度的子场偏转(100 $\mu$ m)可以共用一个偏转器,而不需要像通常那样分别采用电磁偏转和静电偏转来完成。当然,采用透镜后偏转增大了工作距离,物镜象差相应比较大,因而只能用较小的束角。这就限制了所能达到的靶上束流密度。镜筒光路中的其它重要元部件包括电子枪合轴线圈  $AC_1$  和  $AC_2$ ; 按照曝光图形控制束通断的束闸  $B$ ; 检测束流的法拉第杯  $F$ ; 合轴扫描线圈  $SC$ ; 微调矩形束斑方位使之与工件台移动方向一致的旋转透镜  $RL$ ; 以及物镜消象散器  $ST$  等。

图 1 所示光路的一个特点是,在满足可变矩形电子束曝光机功能要求的前提下,所使用的透镜数最少,因而镜筒长度较短。这不但有利于合轴调整,而且减轻了由于电子束空间电荷效应所引起的分辨率下降(见后面(1)式)。有些变形束曝光机光路设计采用了一个(如 JBX-6A<sup>[4]</sup>和 EB55<sup>[5]</sup>)甚至两个(如 VL-R<sub>2</sub><sup>[6]</sup>)聚光镜来调节对成形光栏(物)的照明。这样增加了镜筒长度,使结构复杂化。在变形束曝光机中,靶面上能获得的均匀束斑电流密度的大小取决于电子源的亮度和发射度(交叉斑直径与发散角之积),如下面(6)式所示。按照电子光学亮度不变性原理和 Lagrange-Helmholz 定理,这两个量并不会因为采用聚光镜而增大。可变矩形束的这个特点与设计高斯圆束时主要追求高的轴上峰值电流密度是不同的。至于由电子枪装架尺寸的零散性所造成的方光栏照射电流的起伏,可以通过调节电子枪的栅偏压等方法予以补偿,不一定要用聚光镜来调整。从电子束照明的角度来说,靶面上能够达到的均匀电流密度受限于所用电子源的特性。在目前电子束仪器装置中最常使用的发夹型钨丝阴极和 LaB 阴极中,普通 LaB<sub>6</sub> 点状阴极虽有较高

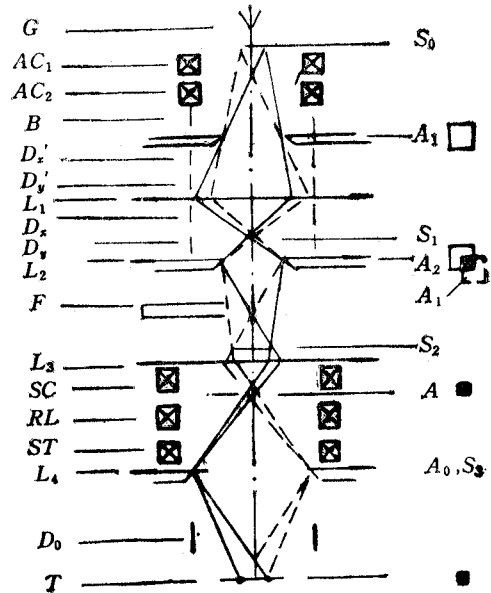


图 1 DJ-2 电子光学镜筒光路示意图

的亮度,但其交叉斑直径和发散角都比钨丝阴极小得多,很难对大面积的成形光栏实现均匀照射,而较适用于变形束曝光机的平台形  $\text{LaB}_6$  阴极的制造工艺又比较复杂。因此,我们选用了直径较粗的钨丝阴极。其亮度虽然较低,但发射度较大,对方光栏的照明均匀度可达到 99%。

图 1 所示光路的另一个特点是,第二方光栏  $A_2$  的位置和第二成形透镜  $L_2$  的主平面重合。这样,当调整  $L_2$  的激励使电子源的中间象  $S_1$  再次成象于缩小透镜  $L_3$  的人射光瞳处,以获得有效而均匀的照明时,不会影响两方光栏合成的矩形束斑的成象。因而这种配置有利于有效地实现源象和物象的分离,使系统达到最佳的工作状态。

对图 1 的光路结构进行了详尽的电子光学特性计算<sup>[7]</sup>,所得到的一级光学特性列于表 2,三级几何象差和一级色差数据列于表 3。表 2 还给出了一级光学特性的实验值和与计算值的相对误差。图 2 为计算得到的偏转场角落处的束斑状态。可以看到,图 1 的光路结构满足表 1 中的分辨率要求。

表 2 一级光学特性计算值与实验值比较

特性参量		计算值	实验值	误差(%)
总放大率		-0.0943	0.10	6.04
透镜激励 (AT)	成形透镜	576.7620	563	2.26
	聚光镜	785.000	768	2.17
	缩小镜	737.9273	736	0.26
	物镜	617.4350	641	3.82
主偏板电压 (V)	X 偏转 1mm	39.2490	39.57	0.82
	Y 偏转 1mm	40.3834	38.69	4.19
偏转场边缘处		X	0.4658	
束着靶斜率(°)		Y	0.5589	

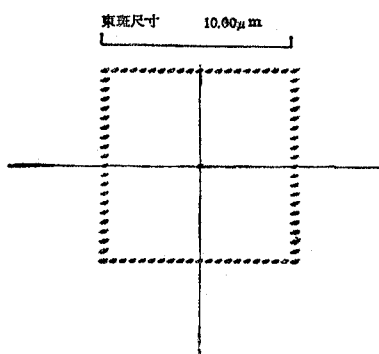


图 2 靶面上偏转场角落(±1mm)处的束斑状态

除了象差对束斑分辨率的影响外,在变形束曝光机中还有其它一些因素对最终的分辨率起作用。首先,与高斯圆束机相比,变形束机的束流强度要大得多,一般要高 3~4 个数量级(通常前者为纳安量级,后者达微安量级)。因此变形束机中的空间电荷效应(Boersch 效应)要严重得多。尤其当束斑尺寸大时,其作用更不可忽视。按照 Crewe 的分析<sup>[8]</sup>,空间电荷所造成的束斑边缘模糊度  $\delta_{sc}$  ( $\mu\text{m}$ ) 正比于电流强度  $I$  (A) 和物象之间的距离  $l$  (cm),反比于电子束半角  $\alpha$  (rad) 和束电压  $V$  (V) 的 3/2 次幂。即

$$\delta_{sc} = \sum_i \frac{l_i I}{\alpha_i V^{3/2}} \times 10^8 \quad (1)$$

在图 1 所示的光路中,  $l_i$  包括 3 部分,即  $A_1$  至  $A_2$  的距离  $l_1$ ,  $A_2$  至  $A$  的距离  $l_2$ , 以及  $A$  至

表3 三级几何象差和一级色差计算值(单位:  $\mu\text{m}$ )

象差种类 \ 来源	轴 上	偏 转	成 形 束 斑	混 合	合 计
球 差	0.074				0.074
各向同性彗差		0.004	0.000		0.004
各向异性彗差		-0.004	0.000		0.004
场 曲		0.058	0.001	0.000	0.058
各向同性象散		0.034	0.001	0.000	0.034
各向异性象散		0.045	0.000	0.000	0.045
各向同性畸变		0.056	0.002	0.001	0.057
各向异性畸变		0.087	0.000	0.001	0.088
轴上色差	-0.059				0.059
横向色差		-0.141	0.002		0.141
总象差	0.094	0.163	0.003	0.000	0.188

电子束参量如下: 电压 20kV, 束半角 1.85mrad, 偏转场  $2 \times 2\text{mm}^2$ , 成形束斑尺寸  $10 \times 10\mu\text{m}^2$ , 束电压波动量 2V.

T 的距离  $l_3$ . 设对成形透镜、缩小镜和物镜的束半角和放大率分别为  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  和  $M_1, M_2, M_3$ , 则

$$\delta_{ic} = [(l_1/\alpha_1)^2 + (l_2/\alpha_2)^2 + (l_3/\alpha_3)^2]^{1/2} (I/V^{3/2}) \times 10^8 \quad (2)$$

因为  $\alpha_2 = \alpha_3/M_3$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2/M_2 = \alpha_3/(M_2M_3)$ , 故

$$\delta_{ic} = [(M_2M_3l_1)^2 + (M_3l_2)^2 + l_3^2]^{1/2} [I/(\alpha_3V^{3/2})] \times 10^8 \quad (3)$$

在选定的光路结构参数 ( $M, \alpha, l$ ) 下, 为使  $\delta_{ic}$  小于分辨率的要求, 必须限制  $I$  的值, 即束流密度与束斑面积之积应小于一定值.

其次, 如前所述, 对方光栏均匀照明的要求受到电子枪发射度的限制. 根据 Lagrange-Helmholz 定理,

$$d_g \alpha_g = d_i \alpha_i \quad (4)$$

式中  $d_g$  和  $\alpha_g$  分别为电子枪交叉斑直径和束发散半角,  $d_i$  和  $\alpha_i$  分别为靶面上束斑直径和束半角. 为使束斑电流密度均匀性在 90% 以上, 要求电子枪的发射度  $E$  为<sup>[6]</sup>

$$E = d_g \alpha_g > \sqrt{2} b \alpha_i \quad (5)$$

式中  $b$  为要求的束斑最大尺寸. 因此受电子枪限制的束斑电流密度为

$$J_g = \beta \pi \alpha_i^2 \leq (1/2) \pi \beta (d_g \alpha_g / b)^2 \quad (6)$$

式中  $\beta$  为电子枪的亮度.

最后, 高速变形偏转的要求对变形偏转放大器数模转换的最大输出和位数提出了限制, 因而限制了在一定的变形分辨率(步距)下的最大束斑尺寸. 按表 1 对变形分辨率的要求为  $0.05\mu\text{m}$ . 当采用 8 位高速数模时, 允许的最大束斑尺寸为:  $0.05 \times 2^8 = 12.8\mu\text{m}$ .

除此以外, 还有一些难以定量估算的限制束流密度和边缘分辨率的因素, 诸如镜筒内充、放电, 外界电磁干扰和机械振动, 以及抗蚀剂发热的影响等等. 我们把以上 4 种可定

量计算的限制因素绘成图线,即可确定镜筒的工作区,如图 3 所示。

### 2. 成形偏转器的设计<sup>[9]</sup>

变形束曝光机电子光学设计的一个关键问题,是要保证靶面上束斑电流密度和边缘分辨率以及束斑原点位置不因束斑尺寸的改变而变化。以往一些变形束光路设计在这方面存在这样或那样的问题。如 EB55 机<sup>[5]</sup>和 HL600 机<sup>[10]</sup>没有采取成形偏转补偿的措施,变形光路只是近似满足第一成形光栏在第二成形光栏平面上成象的条件。对由于成形透镜磁场渗漏到成形偏转器而引起的源象在垂直于静电偏转方向的位移,该两机型采用把成形系统相对于两成形透镜中心几何对称设置并使两成形透镜激励反相的方法将这个位移量减至最小。这给光路设计带来不必要的限制,而且实际上很难做到完全消除源象的位移。因此必然会影响到靶面上束斑的照明和分辨率。在 JBX-6A 机<sup>[4]</sup>中,虽然有成形偏转补偿的措施,但不够完善,有时出现因补偿不良而产生束斑原点位置变动的情形。另有一些变形束曝光机采用四极或八极变形偏转器<sup>[1,11]</sup>,虽然较有利于实现成形偏转补偿,但由于极间距离增大而降低了偏转灵敏度,造成偏转放大器制作上的困难。

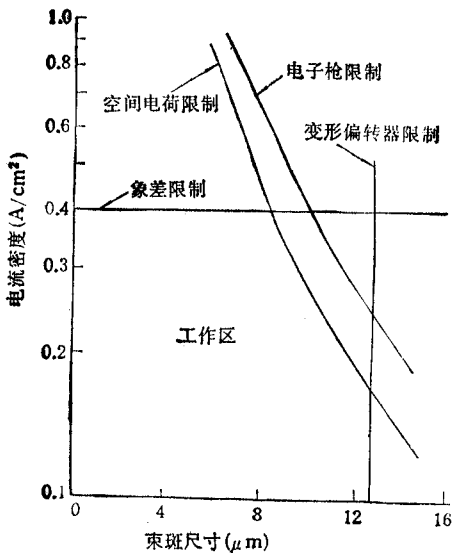


图 3 由限制束流密度和束斑尺寸的几种因素确定的镜筒工作区(图中粗实线所框定的区域)

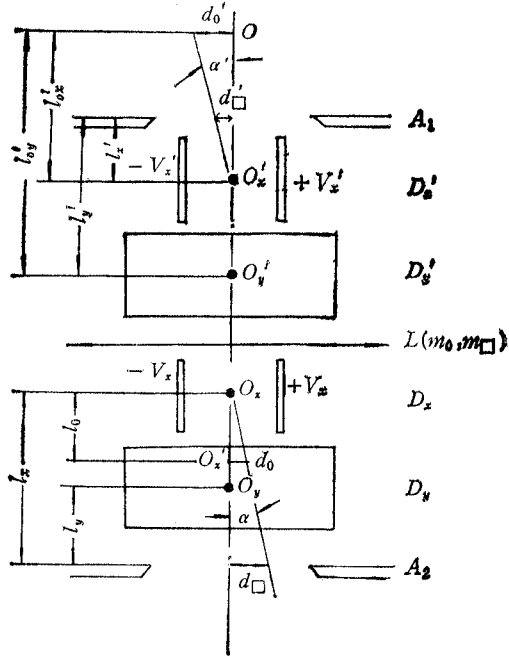


图 4 成形偏转光路原理示意图  
(图下面的  $O_x'$  应为  $O'$ )

在分析现有变形光路设计的基础上, DJ-2 机采用了高灵敏度平行板串接式静电成形偏转器,图 4 为其示意图。为使束斑尺寸改变时源象位置不受影响,除主成形偏转板(简称主板) $D_x$  和  $D_y$  外,在成形透镜  $L$  的上方设置了补偿偏转板(简称补偿板) $D_x'$  和  $D_y'$ 。设要求  $A_1$  在  $A_2$  面上的偏转量为  $d_□$ ,则主板的偏转角应为<sup>[9]</sup>

$$\alpha = \frac{d_□}{l_x} \left( 1 + \frac{m_□ l_0 l'_x}{m_0 l_x l'_0} \right) \quad (7)$$

式中  $m_0$  和  $m_□$  分别为  $L$  对电子源和方光栏(物)的放大率。与此相应的补偿板偏转角为

$$\alpha' = \alpha l_o / (m_o l'_{ox}) \quad (8)$$

$\alpha'$ 与 $\alpha$ 之比为线性补偿因子 $\eta$ ,

$$\eta = \alpha' / \alpha = l_o / (m_o l'_{ox}) \quad (9)$$

以上关系只有当由补偿板引起的偏转方向完全与主板偏转方向一致的条件才成立。由于两组偏转板分别跨接在成形透镜两侧,当透镜的电转角与两组偏转板的相对机械转角不相等时,或者由于X主板和Y主板不相互垂直,以及因透镜磁场渗漏到偏转区而引起横向偏转时,则尚需进行旋转补偿才能使源象保持在轴上不动。图5为通过源象垂直于光轴截面上的偏转方向示意图。 $O$ 为光轴, $D_x$ 和 $D_y$ 为主板相互垂直的两个偏转方向, $D'_x$ 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 $\beta$ 角。设变形时源象 $O$ 受主板偏转沿 $D_x$ 方向移至 $A$ 点, $OA$ 的长度为 $d_o$ 。又由于Y主板与X主板不垂直或因磁场渗漏到该截面上而在Y方向引起一个附加的偏移量 $AB$ ,则最终的合成偏移量为 $OB$ 。它与 $D_x$ 方向的夹角 $\gamma$ 等于Y主板与X主板垂直度之差,加上由渗漏磁场引起的Y方向横向位移后的合成位移与 $D_x$ 所成之角,不难求出X补偿板的偏转角为

$$\alpha'_x = d_o / \cos \gamma \cdot \cos(\beta + \gamma) / (m_o l'_{ox}) \quad (10)$$

相应的Y补偿板偏转角为

$$\alpha'_y = d_o / \cos \gamma \cdot \sin(\beta + \gamma) / (m_o l'_{oy}) \quad (11)$$

$\alpha'_y$ 与 $\alpha'_x$ 之比为旋转补偿因子 $\eta_r$ ,

$$\eta_r = \alpha'_y / \alpha'_x = l'_{ox} / [l'_{oy} \operatorname{tg}(\beta + \gamma)] \quad (12)$$

上面的旋转补偿是通过补偿板来完成的,即先沿 $D'_x$ 方向将 $B$ 偏至 $C$ ,再沿 $D'_y$ 方向将 $C$ 推回到 $O$ 点。从原则上也可以借助主板本身,将旋转补偿信号加到Y主板上,即先将 $B$ 沿 $D'_x$ 偏至 $E$ ,再由加在Y主板上的电压使 $E$ 回到 $O$ 。但由于 $OC \leq OE$ ,即由Y主板施行的偏转量通常要比Y补偿板的偏转量大,而且从图4很容易看出,主板对源象的偏转灵敏度通常远低于补偿板(因图中 $OO'_y \gg O'O_y$ )。因而后一种补偿方式是不足取的。当源象 $O'$ 非常接近于Y主板的几何中心 $O$ ,时(极限情况两者相重合),甚至根本无法进行旋转补偿。这就是在某些采用这种旋转补偿方式的变形束曝光机中,往往无法使靶面上束斑原点位置固定不动的原因。

对成形偏转补偿进行的实验观测<sup>[9]</sup>表明,DJ-2机中所用的成形偏转补偿方法完全实现了对变形光路的设计要求,束斑电流密度和边缘分辨率以及束斑原点位置不因束斑尺寸的改变而变化。

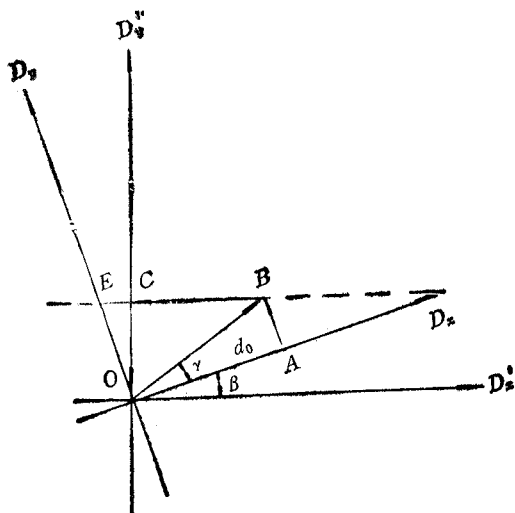


图5 通过源象垂直于光轴截面上的偏转方向示意图

### 三、实验调试和结果

#### 1. 束斑检测方法

由于变形束镜筒光路复杂,而且束斑的形状是“各向异性”,因而对束斑特性的实验检测也需采用适合其特点的方法。在实验调试的初始阶段,为全面摸索整个光路的问题,通过主镜筒下面的电磁放大观测系统,直接观察镜筒沿轴各截面上的束斑状况。根据观察到的电子束充放电和受外界干扰的图象,可以分析判断产生污染和干扰的部位。同时也能观察透镜和偏转器等对光轴的偏离、对电子光学合轴的影响。直接观察的方法是对镜筒进行实验研究和检测的一种较有效的手段。它能比较快地实现镜筒各部件功能的正常化,并进而对电子束的一些主要参量作半定量的测量。在此基础上将镜筒落在精密激光工件台上,用十字线扫描法<sup>[4]</sup>测量快速变化中的电子束参数,如矩形束斑尺寸,束斑方位,束流密度分布,边缘分辨率,偏转场的尺寸和方向误差以及场畸变等,并根据测量数据进

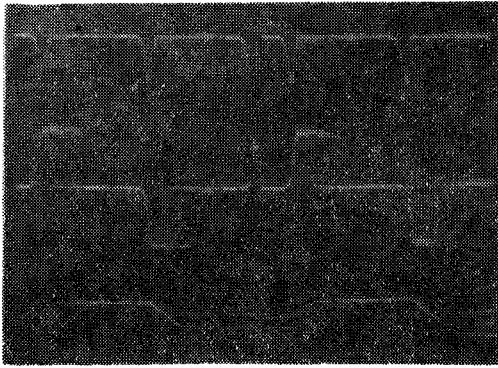


图6 用十字线扫描法测出的束流(上)及其一次(中)和二次微分(下)信号 左为X方向,右为Y方向,束斑尺寸分别为  $12.5 \times 12.5$ ,  $8 \times 8$  和  $4 \times 4 \mu\text{m}^2$

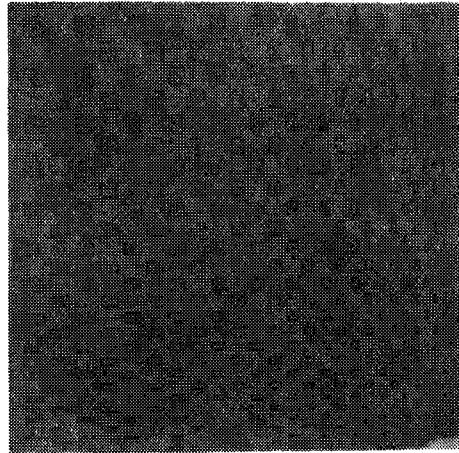


图7 不同束斑尺寸的曝光图形  
左上角的最小束斑为  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ ,沿横向和纵向的尺寸增量均为  $1 \mu\text{m}$

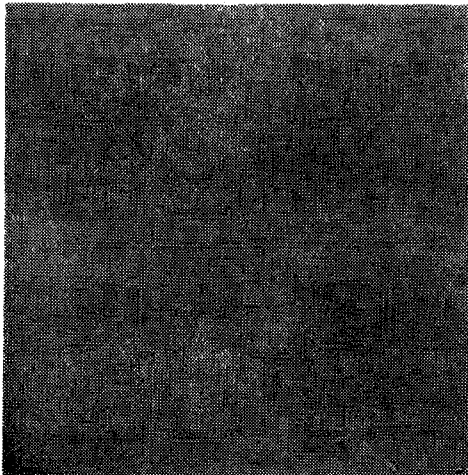


图8 一种 IC 引线版曝光图形

行调整和校正,直至满足曝光图形精度的要求,这种检测方法可以在曝光过程中对束斑参数作快速校验,缩短辅助时间。

#### 2. 实验结果

图6是用十字线扫描法测出的束流及其一次和二次微分信号波形。可见在不同束斑尺寸下的电流密度值相同,且分布均匀。最大束流密度达到  $0.4 \text{A}/\text{cm}^2$ 以上,束斑边缘分辨率达到  $0.2 \mu\text{m}$ 的要求。图7是不同尺寸束斑的曝光图形。矩形束斑两边可在  $1 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 范围内独立变化,各种尺寸下的曝光图形均匀。图8是一种 IC 引线版的曝光图形。

## 四、结 论

DJ-2 型可变矩形电子束曝光机的电子光学设计,使用最少的透镜数实现了机器的功能要求,其光路结构比较合理。为保证束斑尺寸变化时不影响束流密度和边缘分辨率并维持束斑原点位置不变,在高灵敏度串接平行板静电成形偏转器设计中,引入了精确的线性补偿和旋转补偿,完满地解决了由于束斑变形所带来的一系列问题。实验测试结果表明,矩形束斑每边的尺寸可在  $1\sim 12.5\mu\text{m}$  之间以  $0.05\mu\text{m}$  的步距独立变化,束流密度大于  $0.4\text{A}/\text{cm}^2$ 。在  $2\times 2\text{mm}$  扫描场内的边缘分辨率优于  $0.2\mu\text{m}$ 。

本文工作是“七五”国家重点科技攻关项目“可变矩形电子束曝光机”的一部分。参加工作的还有黄兰友、江钧基、朱协卿、吴明均、吴伟、童良发等同志。在整机联调阶段还得到顾文琪、王理明、方光荣等同志的协助。特此一并致谢。

## 参 考 文 献

- [1] H. C. Pfeiffer, *J. Vac. Sci. Technol.*, **15**(1978)3, 887—890.
- [2] J. Trotel, *J. Vac. Sci. Technol.*, **15**(1978)3, 872—873.
- [3] E. Goto et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, **15**(1978)3, 883—886.
- [4] G. Cogswell et al., Electron lithography system with variable-shaped electron beam, Proc. 8th International Conference on Electron and Ion Beam Science and Technology, Seattle, USA, (1978), pp. 117—133.
- [5] N. Saitou et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, **18**(1981)4, 1087—1093.
- [6] M. Nakaşuji et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, **19**(1982)3, 872—878.
- [7] H. C. Chu (朱协卿) et al., *Optik*, **61**(1982)2, 121—145.
- [8] A. V. Crewe, *Optik*, **52**(1978)4, 337—346.
- [9] 康念坎等,电子科学学刊,**12**(1990)2,161—168.
- [10] N. Saitou et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, **B3**(1985)1, 98—101.
- [11] R. D. Moore et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, **18**(1981)4, 950—952.

## ELECTRON OPTICAL COLUMN FOR VARIABLE RECTANGULAR-SHAPED BEAM LITHOGRAPHY SYSTEM DJ-2

Kang Niankan

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080)

**Abstract** The electron optical column for variable rectangular-shaped beam lithography system DJ-2 is described, with emphasis on the analysis of optical configuration and shaping deflection compensation. In this column the variable spot shaping is performed with a minimum number of lenses by a more reasonable optical scheme. A high-sensitivity electrostatic shaping deflector with serial parallel-plates is employed for high-speed spot shaping. With the accurate linear and rotational approaches, the spot current density, the edge resolution and the position of spot origin remain unchanged when the spot size varies. Experiments show that the spot current density of over  $0.4\text{A}/\text{cm}^2$  is obtained with a tungsten hairpin cathode, and the edge resolution is better than  $0.2\mu\text{m}$  within  $2\times 2\text{mm}$  field size.

**Key words** Electron Optics; Electron beam lithography; Variable rectangular-shaped beam