

中国科学院电工研究所

论文报告集

10

1139/116.10 TN-5/18.10

目 录

DY-3 电子束曝光机电学光学设计和初步调试.....	(1)
电子束投影曝光系统中聚焦磁场不均匀性引起畸变的理论分析.....	(13)
半导体背散射电子检测器实验研究.....	(27)
内径 60cm 充蜡分层超导螺管的实验研究.....	(36)
超导磁体交流损耗的测量.....	(42)
铁屏超导螺管的实验研究.....	(48)
SD0.2/50 型低真空电子束焊机真空室的研制	(59)
焊接用电子枪在不同参数要求下的适应性问题研究.....	(66)
晶片离子注入后的扫描散焦电子束退火研究.....	(73)
二氧化硅的离子束曝光特性.....	(81)
速率乘法的舍入处理及其多次运算的积累误差计算.....	(86)
PDH 绘图仪的控制器.....	(100)
超导材料临界电流微处理机测量系统.....	(114)
逆变器馈电实心转子永磁同步电动机的研究.....	(121)
通用型步进电机斩波驱动电路.....	(133)
燃油磁流体发电燃烧室二氧化锆内衬材料的试验研究及结果.....	(144)
5KW 太阳能热力水泵试验系统初步计算分析.....	(151)

DY-3 电子束曝光机电学光学设计和初步调试

何福民 孙荣富 寿 宁 林春岚
周力为 杨中山 方光荣 那兆凤*

摘 要

本文介绍了 DY-3 扫描电子束曝光机的电子光学设计要点, 给出了具体的设计参数。讨论了电子枪和电子光学系统调整中的问题及初步调试结果。

一、电子光学系统总体指标选择

DY-3 电子束曝光机主要用于大规模及超大规模集成电路制版和直接曝光。总体对电子光学部分提出的指标是要能曝光出线条和间距 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 的图形, 据此电子光学系统指标选择如下:

1. 电子束斑点尺寸选择

在高斯圆形束中电子束斑点的电流密度为高斯正态分布 (见图 1)。电子束直径 d_H 定义为最大束流密度值之半所对应的直径。在半径 R 内所含总电子电流为

$$I = \int_0^R J(r) 2\pi r dr = I_B (1 - e^{-\frac{R^2}{1.44 r_H^2}}) \quad (1)$$

其中 I_B ——电子束斑中的总电子电流; r ——任意点到电子束轴线的距离; $J(r)$ ——任意点 r 处的电子电流密度; r_H ——定义的电子束斑半径 ($= d_H/2$)。

由 (1) 式可知, 在定义的电子束直径内, 所含电流仅为电子束斑点总电流 I_B 的 50%。

考虑到象差及电子在抗蚀剂中的背散射, 用一个束点扫描是无法得到好的线条的。分析和经验证明^[1], 欲在抗蚀剂上得到好的电流密度分布剖面, 必须采用比要求线宽小 $1/4 \sim 1/5$ 的束点并行曝光 $4 \sim 5$ 次。图 2 是 4 个束点并行曝光时的电流密度分布, 据此可知要求的最小束斑尺寸应为 $0.25 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 。

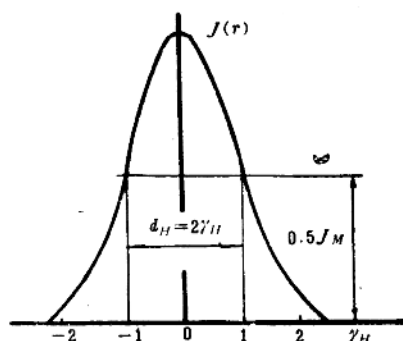


图 1 束斑内的电流密度分布
(图中 r_H 应为 r_H)

* 参加部分工作的还有史启泰、龚金水、左云芝、武丰煜、于百炼、吴桂君、谢迎娟。

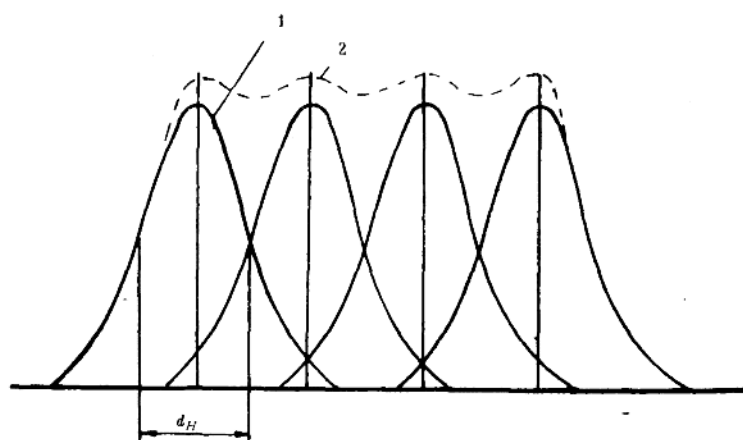


图 2 四个电子束斑并行曝光时的电流密度分布

2. 加速电压的选择

加速电压主要决定于两个因素。其一是要在抗蚀剂上获得较好的曝光剖面，其二是要获得较高的偏转灵敏度。

当电子束打到抗蚀剂上时，除了入射电子会在抗蚀剂内产生曝光效果外，入射电子在抗蚀剂层内的散射以及在基片上的反射同样会产生曝光效果。当电子束能量较低时电子的穿透深度较差，散射和反射电子在穿透深度处造成较强的曝光效果。随着电子束能量的增加，穿透深度增加，散射和反射电子的影响也深入基片。图 3 表示电子束在抗蚀剂中能量吸收的剖面。分析和试验表明，当加速电压 20KV 时即可得到较好的剖面分布，加速电压进一步提高，收效甚微^[2]。

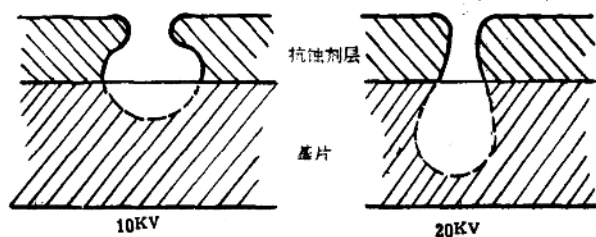


图 3 电子束在涂有抗蚀剂的基片中的能量吸收剖面

偏转灵敏度随着加速电压的提高而降低。偏转灵敏度 D 和加速电压 V 的关系为

$$D \propto 1/\sqrt{V} \quad (2)$$

加速电压为 20KV 时的偏转灵敏度比 30KV 时要高出 1.22 倍。考虑到以上两个方面，本设计选取加速电压为 20KV，既能获得较好的曝光剖面、又有较好的偏转灵敏度。

3. 扫描场尺寸选择

扫描场尺寸主要决定于偏转象差。本设计在要求分辨率较高时用 $2 \times 2 \text{ mm}^2$, 要求分辨率较低时选用 $4 \times 4 \text{ mm}^2$ 。

据此确定电子光学系统指标为: 加速电压 20KV; 束点尺寸 $0.2-1 \mu\text{m}$; 扫描场范围 $2 \times 2 \text{ mm}^2-4 \times 4 \text{ mm}^2$ 。

二、光路设计及电子光学系统设计计算

本设计采用钨丝三极电子枪, 机械粗调, 电磁对中细调, 静电通断光闸, 三级磁透镜, 八极电磁消象散器, 物镜后磁偏转。

1. 主光路设计计算

根据光路总体要求, 先决定总体尺寸, 进行粗算, 视机械结构允许情况进行调整后重新计算, 直到满足设计要求为止。为使束点尺寸调节方便, 本设计采用三级磁透镜。这样在改变束斑尺寸时维持第二聚光镜激励不变, 调节第一聚光镜的激励, 物镜仅需稍做微调, 实际上甚至不做调节也可得到很好的聚焦。同时由于整个缩小倍率由两级聚光镜来承担, 每级聚光镜缩小倍率都不大, 因而允许有较大的极靴孔径, 也为加工带来了方便。图 4 为光路示意图及总体安排。

设 M_1 ——第一聚光镜缩小倍率; M_2 ——第二聚光镜缩小倍率; M_3 ——物镜缩小倍率; M_{12} ——二级聚光镜总缩小倍率, 由弱透镜成像公式

$$\left. \begin{aligned} 1/f_1 &= 1/u_1 + 1/v_1 \\ 1/f_2 &= 1/u_2 + 1/v_2 \\ 1/f_3 &= 1/u_3 + 1/v_3 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 f_1, f_2, f_3 分别表示第一聚光镜和物镜的焦距。

因为 $M_{12} = u_1/v_1 \cdot u_2/v_2$, $L_2 = v_1 + u_2$

$$\therefore v_1 = u_1 L_1 / (u_1 + v_2 M_{12}) \quad (4)$$

$$u_2 = M_{12} v_2 L_2 / (u_1 + M_{12} v_2) \quad (5)$$

联合解得

$$f_1 = u_1 L_2 / (L_2 + u_1 + v_2 M_{12}) \quad (6)$$

$$f_2 = M_{12} v_2 L_2 / (u_1 + M_{12} v_2 + M_{12} L_2) \quad (7)$$

$$\text{或 } M_{12} = [(u_1 L_2 / f_1 - L_2 - u_1) (L_2 - f_2) - f_2 u_1] / f_2 L_2 \quad (8)$$

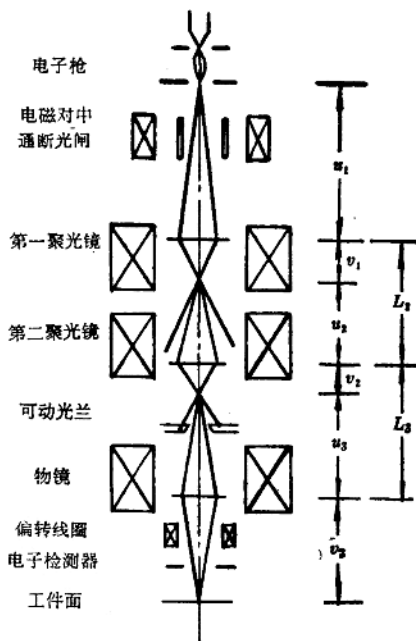


图 4 光路原理示意图

$$v_2 = \frac{(u_1 L_2 / f_1 - L_2 - u_1) f_2 L_2}{(u_1 L_2 / f_1 - L_2 - u_1)(L_2 - f_2) - f_2 u_1} \quad (9)$$

从式(6), (7), (8), (9)中可以看出,其中有四个变量 M_{12} , v_2 , f_1 , f_2 。知道其中两个就可以确定出另外两个变量,我们以 M_{12} 和 v_2 为参变量,但实际上为使束斑尺寸调节时第二聚光镜的象点保持不变,以便安装通断光闸,从光路和结构上综合考虑,决定选 $v_2 = 10\text{mm}$,于是只有一个参变量 M_{12} 即可决定其他两个量 f_1 和 f_2 。

M_{12} 的选取和总的缩小倍率 M_{123} 有关,因为已知 $v_2 = 10\text{mm}$,这时物镜的缩小倍率即已确定,即

$$M_3 = u_3 / v_3 = (L_2 - v_2) / v_3 = 1.5$$

于是

$$M_{12} = M_{123} / M_3$$

因为电子枪发出的电子束交叉斑直径为 $40\mu\text{m}$,所以到达工件上的高斯束斑直径即为

$$d_0 = 40 / M_{123} \mu\text{m}$$

为加工方便我们选择聚光镜有相同的几何参数,即极靴孔径 $D_1 = D_2 = 15\text{mm}$,极靴间隙 $S = 7.5\text{mm}$ 。图5为聚光镜焦距随激励电流变化的曲线。图6为总缩小倍率变化时第一、第二聚光镜焦距 f_1 , f_2 和高斯束点直径 d_0 的关系曲线。

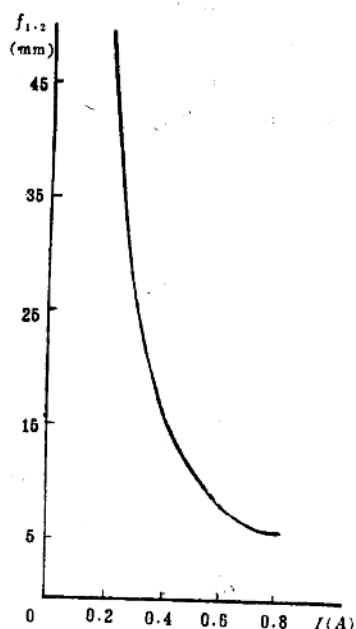


图5 聚光镜激励电流和焦距的关系

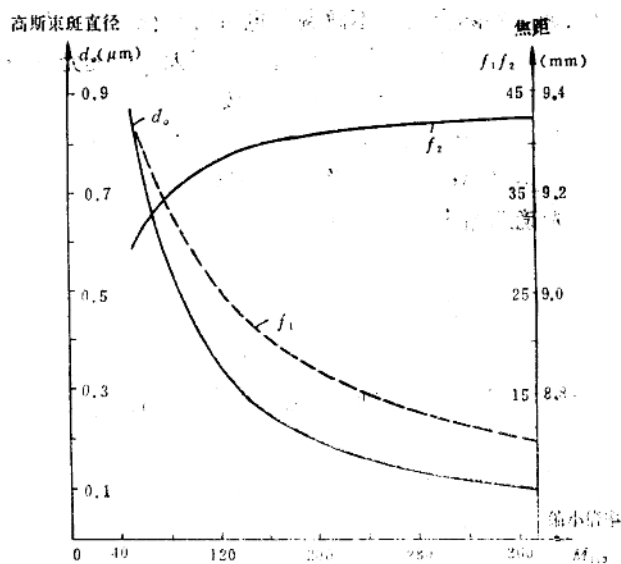


图6 总缩小倍率和第一、第二聚光镜焦距、高斯束斑直径的关系

物镜选用不对称结构,根据弱透镜成像公式物镜焦距

$$f_3 = u_3 v_3 / (u_3 + v_3) = 60\text{mm}$$

选物镜上极靴孔径 $D_{31} = 50\text{mm}$,下极靴孔径 $D_{32} = 20\text{mm}$ 。平均极靴孔径

$$D = (D_{s1} + D_{s2})/2 = 35\text{mm}$$

极靴之间距离

$$S = 10.5\text{mm}$$

$$S/D = 0.3$$

物镜焦距公式为^[4]

$$f = [30\sqrt{1.1 + (S/D)^2} V/(NI)^2 + 0.22\sqrt{0.56 + (S/D)^2}]D$$

其中 V ——加速电压(V)； NI ——透镜的激励安匝数(安匝)。将上述参数代入可得

$$V/(NI)^2 = 0.047 \quad NI = 658.9$$

考虑到物镜电流源在 0.8A 左右具有较高的稳定性,故取物镜激励匝数 $N = 790$ 匝,此时物镜电源

$$I_s = 0.834 \text{ A}$$

2. 轴上象差^[4]

在电子束曝光机中,第一,第二聚光镜均处于较大的缩小倍率之下,其象差可以忽略,只要考虑物镜象差即可,因为所需束斑尺寸较大,衍射象差可以忽略不计,象散可用消象散器消除,只需做一计算,以便提出物镜极靴内孔的加工要求,主要象差只有球差和色差。

象点在焦点附近时的球差系数为

$$C_{s_0} = [2/0.7 + (S/D)^2 \cdot (f/D^3) + 0.3/0.53 + (S/D)^2 \times (f/D)^2 + (0.1 + 0.23S/D)f/D]D = 506.3\text{mm}$$

当象点不在焦点附近时球差系数必须做如下修正

$$C_s = (V_s/f_s)^4 \times C_{s_0} = 3906\text{mm}$$

象点在焦点附近时的色差系数为

$$C_{c_0} = (30\sqrt{1.1 + (S/D)^2} V/(NI)^2 + [0.72 + 0.2S/D + 0.35 \times (S/D)^2] \times 10^{-3} (NI)^2/V)D = 54.43\text{mm}$$

象点不在焦点附近时修正后的色差系数为

$$C_c = (v_s/f_s)^2 C_{c_0} = 151.2\text{mm}$$

象点在焦点附近的象散焦距差为

$$Z_{a_0} = [(100 + 290S/D)V/(NI)^2 + 0.6S/D]\delta = 9.156\delta$$

其中 δ 为极靴孔的椭圆度 ($= R_{max} - R_{min}$)

修正后

$$Z_a = (v_s/f_s)^2 \delta = 25.4\delta$$

取上、下极靴孔的椭圆度为 $5 \mu\text{m}$, 于是 $\delta = 2.5 \mu\text{m}$

$$Z_a = 63.5$$

即使取孔径角为 10 毫弧度,这时由象散产生的弥散圆直径仅为

$$d_a = 2Z_a \alpha = 12.7 \mu\text{m}$$

这样的象散是完全可以消除的

3. 偏转象差^[6]

本设计采用物镜后磁偏转系统, 偏转线圈采用鞍型线圈, 如图 7 所示。电子束沿 z

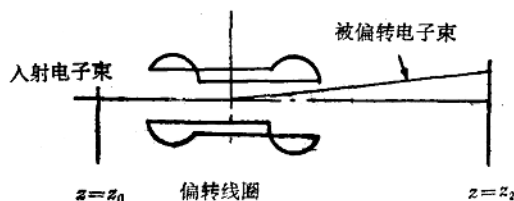


图 7 鞍型偏转线圈

轴在 $z = z_0$ 处进入偏转场, 在没有偏转时, 电子束聚焦于轴上 $z = z_2$ 点, 坐标原点选在偏转系统中心, 偏转场任意点的磁场均可由毕奥-沙伐定理计算。

电子在磁场中的运动可写成如下变分形式

$$\delta \int_{p_0}^p n ds = 0$$

其中 n 是电子光学折射率, ds 是 p_0, p_1 两点之间的线元, 解此变分可得如下两个方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dz} (x' / \sqrt{1 + x'^2 + y'^2}) &= -\eta y' H_z + \eta H_y \\ \frac{d}{dz} (y' / \sqrt{1 + x'^2 + y'^2}) &= \eta x' H_z - \eta H_x \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 $\eta = \sqrt{e/mV}$; e ——电子电荷; m ——电子静止质量; V ——加速电压。用逐次逼近法解此方程组, 做为一级近似, 高斯偏转为

$$\left. \begin{aligned} x(z) &= (z - z_2) x'_s + \eta \int_{z_0}^z d\xi \int_{z_0}^{\xi} H_{y_0}(z) dz \\ y(z) &= (z - z_2) y'_s - \eta \int_{z_0}^z d\xi \int_{z_0}^{\xi} H_{x_0}(z) dz \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中 H_{x_0}, H_{y_0} 为偏转场的轴上场量。做为二级近似可得到三级象差为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= A_{\Pi 1} X_2^3 + (A_{\Pi 2} + A_{I 3}) k^2 X_2^3 + (B_{\Pi 2} + B_{I 2} k^2) \times \\ &\quad x'_s X_2^2 + (B_{\Pi 3} + B_{I 3}) k y'_s X_2^2 + C_{\Pi 1} x'^2_s X_2 + \\ &\quad C_{\Pi 2} y'^2_s X_2 + 2C_{I 2} k x'_s y'_s X_2 \\ \Delta y &= A_{\Pi 1} k^3 X_2^3 + (A_{I 2} + A_{\Pi 3}) k X_2^3 + (B_{\Pi 2} k^2 + B_{\Pi 2}) y'_s X_2^2 + \\ &\quad (B_{I 3} + B_{\Pi 3}) k x'_s X_2^2 + C_{\Pi 1} k y'^2_s X_2 + C_{I 2} k x'^2_s X_2 + \\ &\quad 2C_{\Pi 2} x'_s y'_s X_2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中 $X_2 = X(z_2)$, $k = Y_2/X_2$ (Y_2 为象平面上 y 方向的偏转量); $A_{I 1}, \dots, A_{I 3}, A_{\Pi 1}, \dots, A_{\Pi 3}, B_{I 1}, \dots, B_{I 3}, B_{\Pi 1}, \dots, B_{\Pi 3}, C_{I 1}, C_{I 2}, C_{\Pi 1}, C_{\Pi 2}$ 为三级偏转象差系数, 是场结构的一个复杂的积分。

当选择 x, y 方面的偏转线圈具有相同结构, 且只计偏转场角上的象差时, (12)

式可化为简单的形式, 即偏转象差

$$d = A_1 R^3 + A_2 R^3 + A_3 R^2 \alpha + A_4 R \alpha^2 + A_5 R \alpha^2 \quad (13)$$

其中 $A_1, A_2 \dots A_5$ 为三级象差系数; $R = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2}$; α ——孔径半角。

根据毕奥-沙伐定理求解空间各点的磁场, 用数值方法求积, 即可求出象差系数如下^[6]

$A_1 = 0.00362 \text{cm}^{-2}$ (各向同性畸变系数); $A_2 = 0.000475 \text{cm}^{-2}$ (各向异性畸变系数); $A_3 = 0.002064 \text{cm}^{-1}$ (场曲象散系数); $A_4 = 3.39$ (各向同性彗差系数); $A_5 = 2.26$ (各向异性彗差系数)。

4. 总象差和电子束孔径角

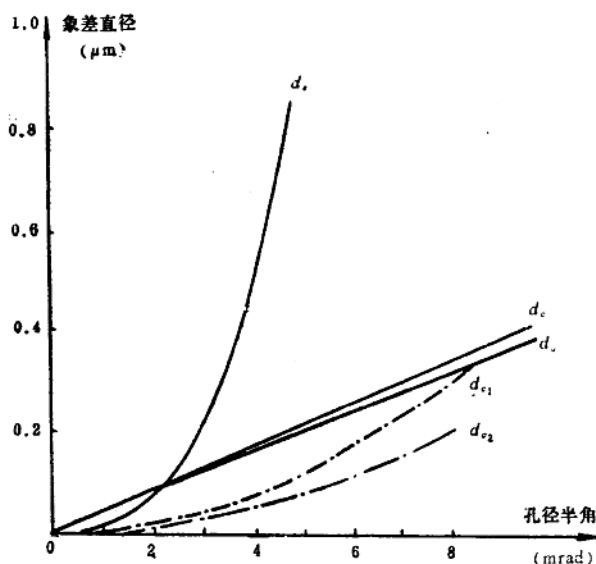


图 8 扫描场为 $2 \times 2 \text{mm}$ 时各种象差值随孔径半角的变化

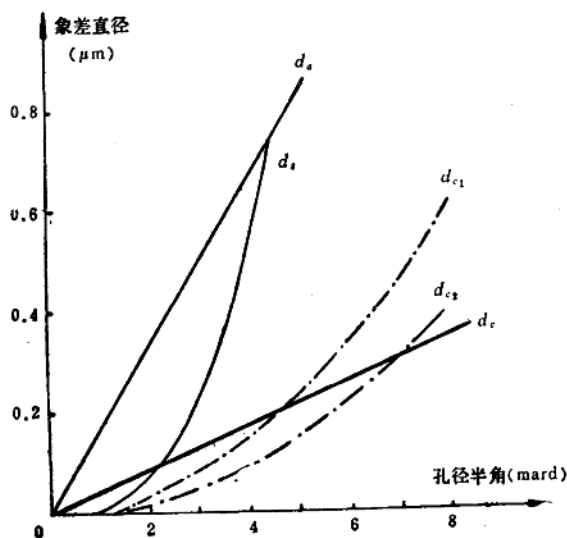


图 9 扫描场为 $4 \times 4 \text{mm}$ 时各种象差随孔径半角的变化

畸变：当扫描场为 $2 \times 2 \text{ mm}$ 和 $4 \times 4 \text{ mm}$ 时的畸变量为

扫描场尺寸 $2 \times 2 \text{ mm}$, $4 \times 4 \text{ mm}$; 各向同性畸变 $0.102 \mu\text{m}$, $0.82 \mu\text{m}$; 各向异性畸变 $0.013 \mu\text{m}$, $0.107 \mu\text{m}$ 。

当扫描场为 $2 \times 2 \text{ mm}$ 和 $4 \times 4 \text{ mm}$ 时象差的数值随孔径角的变化表示在图 8 和图 9 中。

5. 电子枪合轴调整及电磁对中设计

电子束的合轴问题是电子光学系统中的一个重要问题。迄今为止国内的电子束曝光机中均采用二级磁透镜，电子枪的合轴采用机械移动阳极的方法调整。此法无法调整电子束的倾斜，聚光镜后的象点不在轴上，物镜和偏转系统将会产生附加的象差。

本设计采用固定阳极位置，机械粗调电子枪栅极组件对阳极的位置，然后采用电磁偏转精细调整电子枪的平移和倾斜。

平移调整原理如图 10 所示，使电子束相继通过二个磁偏转器，第一偏转器使电子束向轴偏转 α_1 角，第二偏转使电子束向相反方向偏转 α_2 角，只要 $\alpha_1 = \alpha_2$ ，即能使电子束沿轴线方向前进，设经机械调整后的最大偏移量 $\delta = 0.2 \text{ mm}$ 实现平移所需要的

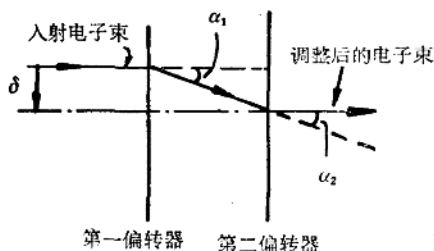


图 10 平移调整原理图

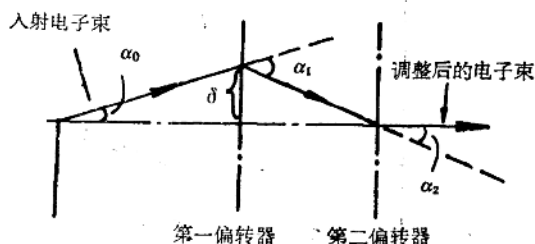


图 11 倾斜调整原理图

偏转角为 $\alpha_1 = 8 \text{ mrad}$ 相应的两个偏转器的安匝数均为 3.4 安匝。

倾斜调整原理如图 11 所示。设

$$\alpha_0 = 9.4 \text{ mrad}, \alpha_2 = 24 \text{ mrad}$$

只要满足 $\alpha_1 = \alpha_0 + \alpha_2 = 33.4 \text{ mrad}$ ，电子束即能调整到轴上。这时相应的第一偏转器和第二偏转器的激励分别为 14.25 和 10.24 安匝。

平移调整线圈和倾斜调整线圈均绕在同一磁芯上，分别进行调节。

实践证明，这种合轴办法能得到很好的调整。

6. 通断光闸设计

光闸的设置有两个位置可以考虑

(1) 将光闸放在阳极之下，如图 12(a) 所示。这时光闸的灵敏度

$$d = lL/2Vb = 0.041 \text{ mm/v}$$

当光闸电压为 200v 时，完全可以切断电子束。

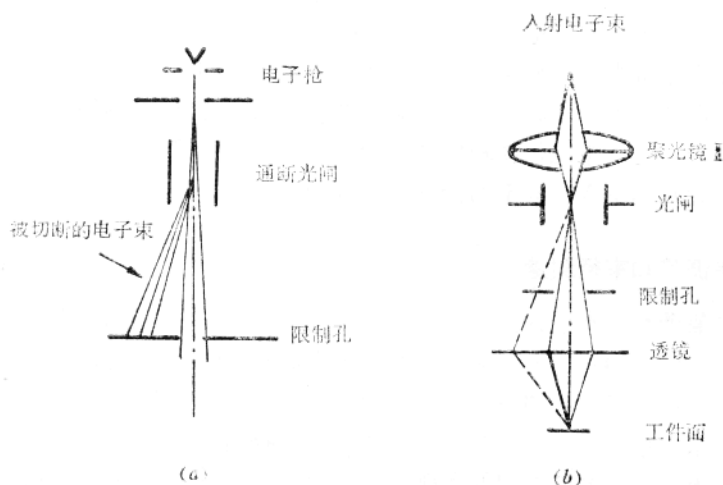


图 12 光 闸 设 置 1

其缺点是在切断电子束时，会引起象点的飘移，光闸极板充电也会使电子束终斑飘移。同时要求的切断电压也高。

(2) 将光闸装在第二聚光镜的象点平面上，如图 12(b)所示，此时光闸加上电压时只会引起终斑上电流的变化，而不会使终斑飘移。光闸充电也会使终斑飘移，只要选取光闸 A_2 足够小。也可减小偏转板之间的距离，以降低通断电压，有利于提高光闸电路的响应速度。计算表明，此时只要 40 伏的电压即足以切断电子束。

三、电子光学系统调整中的几个问题

1. 电子束剖面显示

调整时，电子枪性能调整是重要的一环，当电子枪处于空间电荷饱和和发射时，电子束内电流密度按高斯分布，但当电子枪处于不饱和状态时，束内电流密度呈多峰或空心状态（见图 13a, b）。在合轴状态不好时，调整电子枪往往会使多峰中的一个峰通过

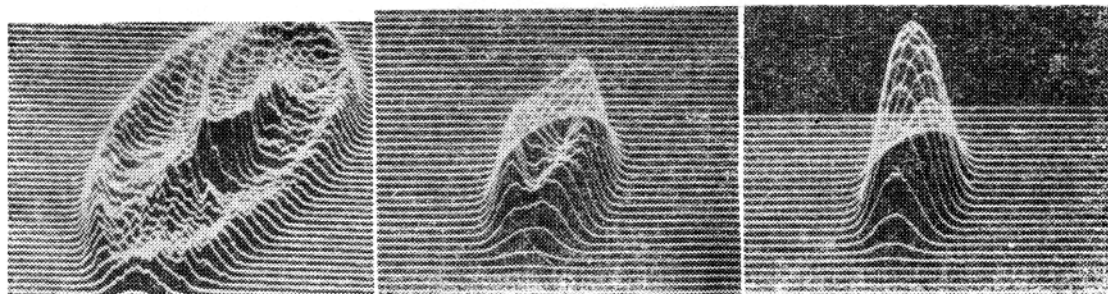


图 13 电子束剖面显示照片

(a) 多峰分布; (b) 空心分布; (c) 准高斯分布

光轴, 这时束流较小且不够稳定。为此我们研制了一种电子束剖面显示技术^[7]。在电子枪调整时首先根据荧光屏上显示的电流密度分布(如图 13), 将电子枪调到如图 13(c)所示的高斯状电流密度分布状态, 然后调整电子枪机械合轴和电磁对中。实践证明, 经过这些调整之后, 电子束能保持较好的合轴状态。当调整第一聚光镜改变束点直径时, 工件上象点位置基本不变, 甚至物镜也无需再加调节。

2. 聚焦调整和束径测量

(1)、聚焦调整 本设计去掉了工件面下的二级电子显微镜, 调焦根据扫描电子显微镜原理进行(见图 14), 当电子束在栅网作 x 方向扫描时, 检测栅网上的背散射电子^[8], 经放大后在示波屏上显示有图 14(b)所示的曲线。其前沿为电子束斑点中电流在 x 方向的积分, 显然束点越细, 前沿上升时间越快, 调整物镜电流使曲线前后沿最窄, 然后使电子束在栅网上做 x 、 y 二方向的光栅扫描, 观察两个方向的栅网尺寸, 调整消象散器使两个方向的栅网尺寸相等, 细节清楚, 即完成聚焦调整。

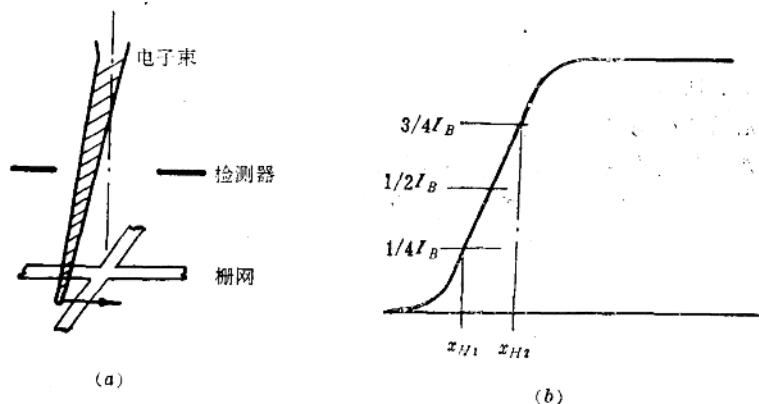


图 14 聚焦调整方式及信号

(2) 电子束直径测量 在电子束内各点的电流密度分布为

$$J(r) = C_1 e^{-r^2/C_2} \quad (14)$$

其中 r 是任意点到电子束中心的距离, C_1 , C_2 为常数, 电子束中的总电流为

$$I_B = \int_0^\infty J(r) 2\pi r dr \quad (15)$$

$$C_1 = I_B / \pi C_2 \quad (16)$$

设电流密度为其最大值之半时对应的 r 值为 r_H , 于是: $J(r_H) = 0.5 C_1$ $C_2 = 1.44 r_H^2$

$$J(r) = (I_B / 1.44 \pi r_H^2) e^{-r^2 / 1.44 r_H^2} \quad (17)$$

当电子束沿栅网扫过时, 检测器所接收到的电子信号

$$I(x) = k [I_B / 2 + 2 \int_{x=0}^x \int_{y=0}^\infty J(r) dx dy] = k [I_B / 2 + (I_B / 2) \operatorname{erf}(x / 1.2 r_H)] \quad (18)$$

其中 k —— 与检测器接收效率有关的一个常数。若令 $x_{H1} = \frac{1}{4} I_B$, $x_{H2} = \frac{3}{4} I_B$ (见图 14b), 则不难求出

$$\operatorname{erf}(x_H/1.1r_H) = 1/2 \tag{19}$$

$$r_H = 1.74x_H \tag{20}$$

据此可以求出电子束直径为

$$d_H = 1.74(2x_H) \tag{21}$$

从曲线中量出 x_H 的值, 即可确定电子束的直径。此时用微电流计测得相应的电子束流, 实测结果如下:

$d_H \quad \mu\text{m}$	0.17	0.21	0.26	0.32
$I_B \quad \text{nA}$	0.025	0.075	0.12	0.23

3. 实验结果及存在问题

图 15 为试作的 1K 位大规模集成电路随机存储器的图形照片。

实验发现电子束电流偏低, 这是由于物镜工作距离较长, 因而有较大的轴上象差, 今后应进一步缩小工作距离, 以增加电子束电流。同时应当加强磁屏蔽, 以减小外界电磁场, 特别是低频磁场的影响。

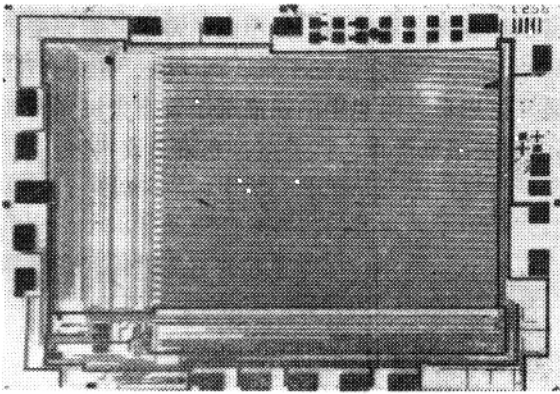


图 15 试作的 1K 随机存储器版的照片

实验还发现电子束电流的稳定性和真空状况关系很大。真空不好, 有时会使阴极表面有油烧黑的痕迹, 影响电子发射。同时油蒸汽受电子轰击在镜筒或光兰上形成半绝缘的碳氢化合物, 造成静电积累, 都会影响电子束的稳定性。而真空的频繁破坏, 则会增加污染。真空系统的操作不当也会使油污染变得严重。经验证明, 保持真空不经常破坏和正当操作, 可使束流稳定性保持在 5 % 之内。在用临时工件台调试中发现油的污染相当严重, 工作室中放置的物件数天内即会发现油迹, 说明真空条件的改善, 特别是采用无油真空系统, 很有必要。

参 考 文 献

- [1] Hatzakis, M., Ting C. H., Vishwanatthan, N., Fundamental Aspects of Electron Beam Exposure of Polymeric Resist Systems, Proc. 6th Int. Conf. Electron and Ion Beam Sci. and Technol. 1974, pp 542-579.
- [2] Herzog, R. F., Everhart, T. E., Electron Energy Dissipation in Solid, 5th Electron and Ion Beam Science and Technology, 1972, p. 26; Hawryluk, R. J., Smith, H. I., Electron Beam Exposure Profiles in Thin Polymer Films, 同上p51.
- [3] 何福民, DY-3 扫描电子束曝光机电学光学系统设计, 中国科学院电工研究所内部报告, 1980 年 10 月。
- [4] 黄兰友, 电磁电子透镜光学参量的计算公式, 《物理学报》, 1977, 第 26 卷, 第 3 期, 250 页。
- [5] Haantjes, J., Lubben, G. J., Errors of Magnetic Deflection I, Philips Res. Repts 12, 1957, pp 46—68.
- [6] 何福民, 透镜后磁偏转系统的电子计算机设计, 中国科学院电工研究所内部报告, 1980 年 9 月。
- [7] 何福民, 孙荣富, 林春岚, 周力为, 杨中山, 寿宁, 方光荣, 那兆凤, 电子束剖面显示技术, 1982 年第二届全国电子束、离子束、光束会议报告。
- [8] 武丰煜, 向钟慧, 史启泰, 谢迎娟, 扫描电子束曝光机用背散射电子检测器的研制, 1982 年第二届全国电子束、离子束、光束会议报告。

[交稿日期 1983.8.]

电子束投影曝光系统中聚焦磁场 不均匀性引起畸变的理论分析

张 祥 龄

摘 要

本文根据复合电磁场中电子运动的微分方程,推导出因聚焦磁场不均匀而引起畸变的一般公式,分析了畸变的性质,确立了由线圈尺寸直接计算畸变量的方法,并和均匀性的计算作了比较。指出了降低和消除畸变的途径和这些公式在电子束投影曝光技术中的应用,为聚焦磁场的设计、制造和运行提供了分析依据。

为了保证电子束投影曝光系统的畸变量不超过对准精度,以便和整机的分辨率和曝光面积等主要指标互相配合充分发挥电子束曝光的优越性,就有必要对磁场和电场的均匀性提出恰当的、有理论依据的技术要求,使主机的磁场和电场设计既经济又合理。特别是聚焦磁场的设计和制造是整机结构的主体,必须首先加以讨论。

在研究电子束投影曝光的初期文章中^[1],曾经认为忽略磁场的高阶导数,采用一个简单的螺旋管线圈即能满足畸变的要求。事后的研究工作逐步证明磁场的均匀性乃是电子束投影曝光技术中的一个重要问题,必须予以高度重视^[2-5]。但是,迄今为止尚没有根据畸变要求指导磁场设计方面的论文。

本文的目的就是将复合电磁场中聚焦磁场的均匀性和畸变的关系作一理论分析,为电子束投影曝光中电子光学参数的合理选择和聚焦磁场的设计提供分析和计算的依据;同时,据此对现有实验设备作了实际验算。

一、聚焦磁场引起畸变的一般公式

在电子束投影曝光系统中聚焦磁场一般具有轴对称的形式,因此从理论上分析磁场的均匀性和由此而产生的畸变也应该是轴对称的。

磁场的空间分布满足拉普拉斯方程,并可用圆柱座标方式以谢尔赤级数表达出来^[6]:

$$B_z(z, r) = B_z(z, 0) - \frac{1}{4} B_z''(z, 0) r^2 + \frac{1}{64} B_z^{(4)}(z, 0) r^4 - \frac{1}{2304} B_z^{(6)}(z, 0) r^6 \quad (1)$$

$$B_r(z, r) = -\frac{1}{2} B_z'(z, 0) r + \frac{1}{16} B_z'''(z, 0) r^3 - \frac{1}{384} B_z^{(5)}(z, 0) r^5 \quad (2)$$

式中 $B_z(z, r)$, $B_r(z, r)$ ——磁感应强度的轴向和径向分量; $B_z(z, 0)$ ——轴上的磁感应强度; $B_z'(z, 0), B_z''(z, 0), \dots, B_z^{(n)}(z, 0)$ ——轴上磁感应强度的一阶, 二阶, ..., n 阶导数。

因为磁场对通过原点的中心平面也是对称的 所以 $B_z(z, r)$ 必是一个 z 的偶函数, 于是 $B_z(z, 0)$ 应具有下列形式:

$$B_z(z, 0) = \alpha_0 + \alpha_2 z^2 + \alpha_4 z^4 + \alpha_6 z^6 + \dots \quad (3)$$

将(3)式多次求导, 并将

$z = 0$ 时

$$\begin{aligned} B_z(z, 0) &= B_z(0, 0) \\ B_z''(z, 0) &= B_z''(0, 0) \\ &\dots\dots\dots \\ B_z^{(n)}(z, 0) &= B_z^{(n)}(0, 0) \end{aligned} \quad (4)$$

等条件代入其中, 就可以得到

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= B_z(0, 0) = B_0 \\ \alpha_2 &= \frac{1}{2} B_z''(0, 0) = \frac{1}{2} B'' \\ \alpha_4 &= \frac{1}{24} B_z^{(4)}(0, 0) = \frac{1}{24} B^{(4)} \\ \alpha_6 &= \frac{1}{720} B_z^{(6)}(0, 0) = \frac{1}{720} B^{(6)} \end{aligned} \quad (5)$$

于是将(5)代入(3)式可得

$$B_z(z, 0) = B_0 + \frac{1}{2} B'' z^2 + \frac{1}{24} B^{(4)} z^4 + \frac{1}{720} B^{(6)} z^6 + \dots \quad (6)$$

将(6)式多次求导后, 连同(6)式一起代入(1)(2)式中即得

$$\begin{aligned} B_z(z, r) &= B_0 + \frac{B''}{2} z^2 - \frac{B''}{4} r^2 + \frac{B^{(4)}}{24} z^4 - \frac{B^{(4)}}{8} z^2 r^2 + \frac{B^{(4)}}{64} r^4 \\ &\quad + \frac{B^{(6)}}{720} z^6 - \frac{B^{(6)}}{96} z^4 r^2 + \frac{B^{(6)}}{128} z^2 r^4 - \frac{B^{(6)}}{2304} r^6 + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} B_r(z, r) &= -\frac{B''}{2} z r - \frac{B^{(4)}}{12} z^3 r + \frac{B^{(4)}}{16} z r^3 - \frac{B^{(6)}}{240} z^5 r \\ &\quad + \frac{B^{(6)}}{96} z^3 r^3 - \frac{B^{(6)}}{384} z r^5 + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

这样, 空间的磁场分布就可以用原点上的磁感应强度的各阶导数以圆柱座标的形式表达出来。

在直角座标系统中, 复合电磁场聚焦成象时, 电子运动的微分方程组是^[7]

$$\begin{cases} dx = \frac{B_x}{B_z}(1 - \cos \omega t) dz \\ dy = -\frac{B_x}{B_z} \sin \omega t dz \end{cases} \quad (10)$$

如果化成圆柱坐标则

$$\begin{cases} dx = dr \\ dy r d\theta \end{cases} \quad (11)$$

且 $B_x = B_r$,

而电子束在复合电磁场聚焦成像时, 电子受电场加速从阴极到阳极完成一次螺旋圆周运动, 因此

$$\omega t = 2\pi \sqrt{\frac{p-z}{L}} \quad (12)$$

式中 p ——阴极表面到磁场中心对称平面的距离; L ——阴极表面到阳极表面间的距离 (见图 1)。

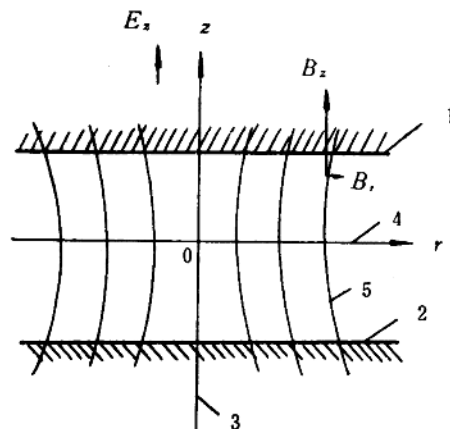


图 1 电极组件在磁场中的相对位置示意图

- 1、阴极表面位置; 2、阳极表面位置;
- 3、磁场对称轴; 4、磁场中心对称面;
- 5、磁力线

令电极位置系数为 ξ

$$\xi = p/L \quad (13)$$

于是

$$\omega t = 2\pi \sqrt{\xi - \frac{z}{L}} \quad (14)$$

将 (11) (14) 两式代入 (9) (10) 中, 就可以得到复合电磁场中电子运动微分方程组的圆柱坐标表达式

$$\begin{cases} dr = \frac{B_r}{B_z} (1 - \cos 2\pi \sqrt{\xi - \frac{z}{L}}) dz \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} r d\theta = -\frac{B_r}{B_z} \sin 2\pi \sqrt{\xi - \frac{z}{L}} dz \end{cases} \quad (16)$$