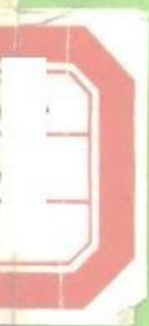


# 电子束扫描曝光技术

吴克华著



宇航出版社



# 电子束扫描曝光技术

吴克华 著

宇航出版社

1A



## 内 容 简 介

本书从制作微电子器件出发,对电子束扫描曝光技术的基本内容及其应用,作了比较全面的介绍。其内容取材于国外有关书刊资料,目的是向使用电子束曝光机制作微电子器件的工程技术人员提供系统的基础知识。

全书共分六章,第一章介绍电子束曝光技术的特点与应用范围。随后,以四章篇幅介绍:电子束的特性与选用,电子抗蚀剂掩模图形的制作技术,亚微米图形制作中的邻近效应及其减小与校正技术,以及制作光刻掩模版与基片直接曝光中的套准技术。第六章简单介绍几种代表性的电子束曝光机的使用技术性能。

## 电子束扫描曝光技术

吴克华 著

宇航出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
各地新华书店经售  
北京科技印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 13 9/16 字数: 305 千字  
1985年6月第一版第一次印刷 印数: 1-4,000册  
定价: 3.35元

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
一、电子束扫描曝光的含义.....	1
二、电子束曝光的优越性.....	3
三、曝光机类型与组成.....	6
四、曝光机的发展与应用.....	11
参考资料.....	15
<b>第二章 电子束的形成与偏转</b> .....	17
<b>第一节 电子枪</b> .....	17
一、发射极.....	18
二、电子束的形成.....	25
三、电子束的交叉截面.....	27
四、交叉截面的电流密度.....	28
五、亮度.....	32
六、三级电子枪的交叉截面半径.....	33
<b>第二节 磁透镜</b> .....	36
一、磁透镜.....	36
二、象差.....	42
三、色差.....	49
四、机械误差和其它破坏轴对称因素.....	52
<b>第三节 电子束的偏转</b> .....	56
一、磁偏转.....	57
二、偏转畸变与象差.....	59
三、静电偏转.....	61

第四节 偏转系统与扫描	64
一、矢量扫描法	66
二、光栅扫描法	70
第五节 电子光柱体的类型	72
一、高斯圆束电子光柱体	73
二、固定成形束电子光柱体	74
三、可变成形束电子光柱体	76
四、字符成形束电子光柱体	79
参考资料	81
<b>第三章 电子抗蚀剂掩模与图形转印</b>	<b>83</b>
第一节 电子抗蚀剂的性能	83
一、灵敏度	86
二、反差	91
三、分辨率	93
第二节 抗蚀剂图形制作工艺	95
一、涂胶	95
二、前烘	95
三、曝光	96
四、熟化	96
五、显影	97
六、后烘	103
七、等离子体去渣	104
第三节 抗蚀剂的掩模作用	104
一、加厚工艺用的抗蚀剂掩模	105
二、减薄工艺用的抗蚀剂掩模	108
三、亚微米图形掩模	115
第四节 电子抗蚀剂材料	123
一、负电子抗蚀剂	124

二、正电子抗蚀剂	14 <sup>1</sup>
参考资料	153
<b>第四章 电子散射与邻近效应</b>	<b>155</b>
第一节 电子与抗蚀剂的相互作用	155
一、质点弹性碰撞	155
二、散射截面	157
三、弹性散射截面的计算	159
四、电子的能量丢失与电子射程	162
第二节 薄胶层的吸收能量密度	166
一、散射效应	166
二、吸收能量密度	171
三、前向电子(前散射)的作用	173
四、胶中背散射电子的作用	176
五、衬底背散射电子的作用	178
第三节 近似分析函数	182
一、蒙特卡罗模拟	182
二、近似分析函数	184
三、近似分析函数的参数	189
第四节 胶层等能量密度剖面轮廓	192
一、剖面轮廓	192
二、分辨率	195
三、图形线宽	197
第五节 邻近效应	202
一、邻近函数	202
二、邻近函数的参数	204
三、减小邻近效应的方法	205
第六节 自一致邻近校正技术	207
一、邻近相互作用的计算	210

二、校正计算与图形分区 .....	212
三、图形数据分割 .....	218
四、程序包 SPECTRE .....	225
第七节 邻近校正中的几种技术 .....	226
一、尺寸调整与束点校正 .....	227
二、快速图形分割技术 .....	229
三、光栅扫描的邻近校正 .....	234
四、声表面波器件图形的邻近校正 .....	238
参考资料 .....	246
<b>第五章 掩模版与基片直接曝光</b> .....	249
第一节 曝光参数的选用 .....	249
一、数字分辨率 .....	249
二、电子抗蚀剂 .....	252
三、束流 .....	253
第二节 位置精变 .....	255
一、激光干涉仪精密定位 .....	256
二、基片直接曝光的套准问题 .....	258
三、翘曲基片的校正 .....	260
第三节 套准标志及其信号处理 .....	264
一、套准标志 .....	264
二、标志信号的产生 .....	268
三、探测装置 .....	273
四、信噪比 .....	283
五、标志信号处理 .....	285
第四节 自动套准系统 .....	291
一、标志探测 .....	294
二、模拟信号处理 .....	297
三、数字数据处理 .....	299

第五节	曝光工作时间估计	304
一、	芯片实际书写时间 $T_e$	304
二、	辅助时间 $T_o$	306
三、	8K FET 存储器芯片书写扫描时间	309
第六节	电子束曝光在微型器件制造中的应用	312
一、	磁泡	313
二、	约瑟夫逊超导器件	317
三、	集成光路	319
四、	声表面波器件	324
	参考资料	325
<b>第六章</b>	<b>电子束扫描曝光机简介</b>	<b>328</b>
第一节	VS-1 矢量扫描圆束机	328
一、	概述	328
二、	电子光柱体	332
三、	机械工件台系统	338
四、	VS-1 机的自动控制	340
五、	软件	353
第二节	LEBES 矢量曝光机	355
一、	电子光柱体	355
二、	机械系统	357
三、	电子部件	358
四、	计算机系统与软件	359
第三节	EBMF 6 型微细加工机	369
一、	概述	369
二、	电子光柱体	372
三、	机械系统	374
四、	图形发生器及信号处理	376
五、	计算机系统与软件	381



第四节	MEBES 型光栅扫描机	385
一、	电子光柱体	386
二、	机械系统	388
三、	电子部件	392
四、	计算机系统与软件	396
第五节	EL-1 型固定成形束机	403
一、	电子光柱体	404
二、	EL-1 的动态校正	407
三、	自动套准系统	411
四、	EL-1 机的改进	413
第六节	EB55 可变成形束机	419
一、	概述	419
二、	电子光柱体	420
	参考资料	424

# 第一章 绪 论

## 一、电子束扫描曝光的含义

电子束扫描曝光已有一、二十年的历史,它是一种制造微型器件的基本工艺技术,跟普通光学曝光一样,都是在有机聚合物(抗蚀剂)薄膜上制作掩模图形。这种有机聚合物一般为液体状态,用旋转涂布(甩胶)的方法,在基片上形成均匀的薄层,经焙烘后成为固体薄膜。由于它对电子束敏感,受电子束辐照后,物理和化学性能发生变化,在一定的显影剂中变成良溶(正性电子抗蚀剂)或非良溶(负性电子抗蚀剂)。因此,在基片上的薄膜,有的溶掉,有的不溶而保留下来,形成精细的掩模图形,如图 1-1 所示。有了这层图形,就可以对基片有选择性的加工,制造出微型电子器件。许多微型器件都需要选择性加工,即在基片上的某些区域改变基片材料的性能,如扩散掺杂,离子注入;或者将基片的某些区域减薄,如化学腐蚀,离子刻蚀(干法腐蚀);或者对基片的某些区域用另外的材料来加厚,如蒸镀或溅射淀积金属层。电子束扫描曝光技术,就是利用电子束的扫描将有机聚合物加工成精细掩模图形的工艺技术。

这种掩模图形一方面要具有高分辨率,另一方面要具有良好的抗蚀性,保护基片的非加工区。所以,一般把对电子束敏感的具有良好耐腐蚀性的有机聚合物称之为“电子抗蚀剂”。跟光抗蚀剂简称为光刻胶或曝光胶一样,也简称为“电

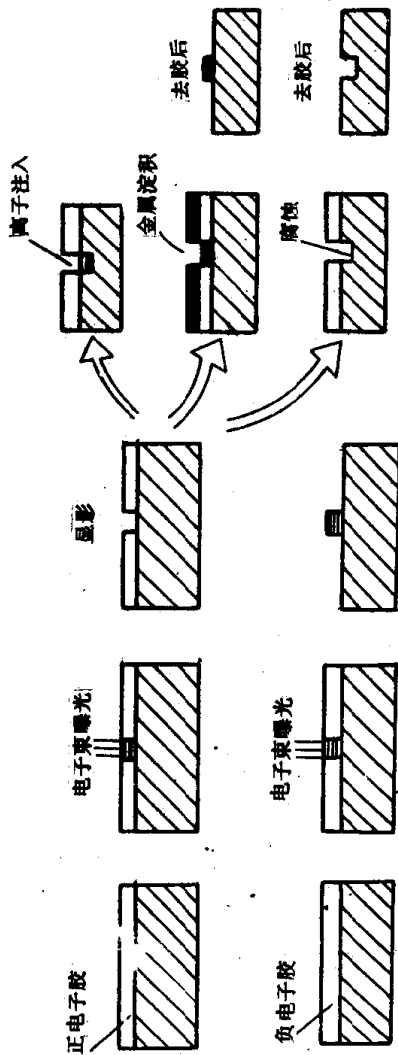


图 1-1 电子胶图形形成和后道工序说明

子胶”，或更简单的称之为“胶”。由这种电子胶制成的掩模图形就称之为“电子胶图形”，或“胶图形”。电子束曝光实质上是电子束辐照，是高能电子与胶的相互作用。“电子束曝光”是从光学曝光一词转化过来的，把辐照视为曝光。出于同样理由，也可以称之为“电子束光刻”。

由于微型电子器件的图形复杂而精细，且基片面积大（直径可达五英寸以上），这就要求电子束精细聚焦，并能自由移动（扫描），精确的到达规定的位置上，这就是扫描曝光。目前，电子束扫描是靠偏转实现的，偏转范围称为扫描场，最大只有几毫米。偏转过大，电子束就会畸变，位置误差也大，故大面积曝光必须精密移动工件台。把工件（基片）的曝光区置于电子束扫描场的下方，在电子计算机控制下，电子束的偏转和工作台的移动相互协同配合，实现大面积精密图形曝光。本书只讨论扫描曝光，不讨论投影曝光。

## 二、电子束曝光的优越性

**1. 电子束曝光的分辨率高** 普通光学曝光的分辨率受光波衍射效应的限制，难以制作  $1\mu\text{m}$  以下的线条图形。电子束曝光的分辨率至少要比普通光学曝光高一个数量级。

微型电子器件发展迅速，要求制作亚微米的图形。例如，1976年耗尽型  $n$ -MOS 的沟道长度为  $6\mu\text{m}$ ，1977年 H-MOS 的沟道长度为  $3.5\mu\text{m}$ ，而1980年的 MOS 器件为  $2\mu\text{m}$  的水平。为了提高器件性能，增大集成度，降低功耗，图形线条就越来越细，分辨率要求就越高。如日本富士通 MB8164 系列  $64\text{k} \times 1$  位的  $n$ -MOS RAM，芯片面积为  $21.6\text{mm}^2$ ，最小线宽为  $2-3\mu\text{m}$ ；而日本电子的256kRAM的芯片面积为  $5.83 \times 5.90\text{mm}^2$ ，最小线宽为  $1\mu\text{m}$ 。高分辨率的优越性从休斯公

司在 1980 年研制 CCD 存贮器的工作中也可以得到证实。该器件在制作过程中,凡图形线条  $\geq 2\mu\text{m}$  的就用普通光学曝光,而分辨率高的则用电子束曝光,这是一种混合曝光法。其所采用电子束曝光的各图形层如表 I-1 所列。为了解决高分辨率图形问题,这种混合曝光法,早在 1978 年,亨德森(Henderson)等人在制作 4k CCD 存贮器芯片时就采用过。另外,在制作微波双极型晶体管时也有人采用这种混合曝光法。仅从这些实例中,就足以说明电子束曝光具有高分辨率的优越性。而这种优越性更是特种器件所迫切期望的,如单片微波电路、集成光路、声表面波器件、磁泡存贮器、约瑟夫逊器件等。

各图形层曝光要求、

表 I-1

图 形 层	最小图形特征尺寸 ( $\mu\text{m}$ )	最小图形间距 ( $\mu\text{m}$ )	最 小 过 蚀 量 ( $\mu\text{m}$ )	最 大 过 蚀 量 ( $\mu\text{m}$ )
铝	1.0	1.6	0	-0.1
多 晶 硅	2.0	0.8	0.2	0.4
沟 阻	0.6	2.0	0	0.2*
接 触 孔	0.8	1.6	0.1	0.3
源/漏的离子注入	0.6	2.6	0.2	0.5

概括地说,电子束曝光的高分辨率至少有两点好处:1. 提高器件性能。如频率、功耗、功能密度等,从而提高可靠性。2. 为特种器件提供了技术基础,使之能制造出用普通光学曝光所不能制造的器件来。

**2. 电子束曝光制造掩模版的能力强** 即使不在亚微米范围,而在常规  $2-5\mu\text{m}$  线宽设计规则的范围,用电子束制造光学掩模版也有其优越性。若按普通光学制版程序:刻红膜、第一次缩小照像,制中间版,再分步重复照像,制掩模版。两次

缩小制成的掩模版，其缺陷比电子束曝光直接一次制版的缺陷多。此外，从设计到制成掩模的周期长，甚至达两、三月，而电子束制版只需两、三天。电子束曝光使用计算机控制，以软件确定图形，工作灵活方便。

现在，电子束扫描曝光已达到实用的水平。例如，日本的 EB 55 型机，是在 1981 年改进成功的可变成型束曝光机，如采用灵敏度为  $20\mu\text{C}/\text{cm}^2$  的电子胶，对最小特征尺寸为  $0.5\mu\text{m}$  的图形曝光，每小时可直接曝光 4 英寸基片一片，最大套准误差为  $\pm 0.1\mu\text{m}$  ( $3\sigma$ )。又如 IBM 的可变成型束 EL-3 型机，对  $1\mu\text{m}$  设计规则的图形，采用  $10\mu\text{C}/\text{cm}^2$  灵敏度的电子胶，每小时可以直接曝光 3 英寸基片 10—20 片，套准精度为  $0.4\mu\text{m}$  (平均  $3\sigma$ )；若为  $2\mu\text{m}$  设计规则的图形，每小时可直接曝光基片 20—45 片，套准精度为  $0.7\mu\text{m}$  (平均  $3\sigma$ )。这不仅省去了制版工序，降低了器件的缺陷，而且大大提高了生产率，降低了成本。无论是在技术上、经济上，还是在研制周期上，都带来一定的效益。当前，虽然还没有长期的生产实践数据，但仅就这些看，就足以说明电子束曝光的优越性，且有一定的潜在能力，值得继续开发。当前，世界上已有几十种电子束曝光机，水平与性能差别很大。有的是商品，有的则是自制自用。一般来说，商品的性能指标比自用机差，甚至低很多。

为了突破光学曝光的限制，制造先进的新型微电子器件，世界各国都投入了相当大的力量研制电子束扫描曝光机，近一、二十年来，电子束扫描曝光机已取得很大的进展。最初由扫描电镜发展为圆束机，继而发展为固定成形束机，紧接着发展为可变成形束机。目前，机器类型很多，这里只就电子束扫描曝光机的分类作一简短介绍。

### 三、曝光机类型与组成

电子束扫描曝光机有两种分类的方法,一种是按电子束的横截面形状分类,即按入射在工件表面上的束斑形状来分:有圆形高斯束机和成形束机两种。高斯束是指束斑的电流分布为高斯分布。非高斯分布的圆形束,则列入成形束类。当前的成形束机,束斑尺寸一般都在  $1\mu\text{m}$  以上,只有 EB 55 型机的束斑尺寸小于  $1\mu\text{m}$ ,为  $0.5$  到  $5.1\mu\text{m}$  的方形。圆形束的束斑直径一般在  $0.1$  到  $1\mu\text{m}$ 。如侧重分辨率,供实验室研究与开发用,以圆束机为好。如着重生产率,以成形束机为好。另一种是按电子束偏转和书写方式分类,即按电子束扫描方式来分:有矢量扫描和光栅扫描两种。矢量扫描是指电子束对某一图形扫描曝光完毕之后,沿矢量方向跳到另一图形再扫描曝光。光栅扫描是指电子束在设定的范围内不停的作光栅式偏转扫描,图形曝光区由束闸和工件台控制。由于在电子光学、真空技术、激光精密定位、电子胶和邻近校正、图形数据处理、以及计算机控制等方面取得很大的进展,故出现了很多种类的电子束曝光机,遗憾的是价格太贵,每台约百万美元以上。表 1-2 是当前的几种电子束曝光机分类情况。

制作亚微米图形的电子束曝光机,电子束必须聚焦成尺寸为  $0.01\text{--}0.5\mu\text{m}$ 。另外,为了缩短对电子胶的曝光时间,电子束束斑的电流密度一般应具有  $10\text{--}100\text{A}/\text{cm}^2$  的数量级,电流密度大,束斑在电子胶上驻留的时间可以缩短。电子源如采用热电子发射阴极,其直径大约在  $10\text{--}100\mu\text{m}$  的数量级,电流密度每平方厘米只有几安培。所以,要用电磁透镜系统进行缩小,其缩小倍率高达  $10^4$ 。经过缩小及精细聚焦的电子束,再由电子偏转系统引导,在图形发生器的信号控制下,快速而

电子束曝光机分类特点

表 1-2

束形	圆形高斯束			成形束	
扫描系统	矢量		光栅	尺寸固定	尺寸可变
	数字	模拟		矢量/光栅	
特点	精度高	速度高	偏转系统简单	速度高	
存在问题	需高速 D/A	模拟电路的稳定性	加工速度	邻近效应校正	
	偏转系统复杂			最小特征尺寸是固定的	镜筒与控制系统复杂
机型举例	VS-1 (IBM) LEBES (ETEC) EBMF6 (Cambridge)	EB-52 (日ECL)	MEBES (ETEC) EBM-105H (日东芝)	EBM-II (T1) EBPG (法 Thomson) EL-1 (IBM)	JBX-6A (日电子) EB55(日) EL-3 (IBM)

准确的在基片的电子胶上扫描曝光，显影后得到高分辨率的合乎要求的胶图形。

制作胶图形的电子束扫描曝光机庞大而复杂，类型不同，结构也不一样。图 1-2 是电子束曝光机的方框图。现将其主要组成部分简述如下。

**1. 电子光柱体（镜筒）** 首先是电子枪，它除了产生电子之外，还要将电子汇聚成电子束。电子束与光柱体的光轴不一致时，需要合轴调整使之一致，有机械合轴和电磁合轴。合轴后的电子束并不能完全满足曝光工作要求，需要经过光阑，截取电子束的中心部分，滤去杂散的远轴部分，或使束成为一定的形状（成形光阑）。光阑在镜筒中不只一个，根据需要来设置，为了防止污染，有时使用加热光阑。透镜系统主要是将电子束聚焦成象，使最后到达工件上的束斑满足尺寸要求。透镜系统一般由三个以上的透镜组成，大多数是电磁透镜，静电



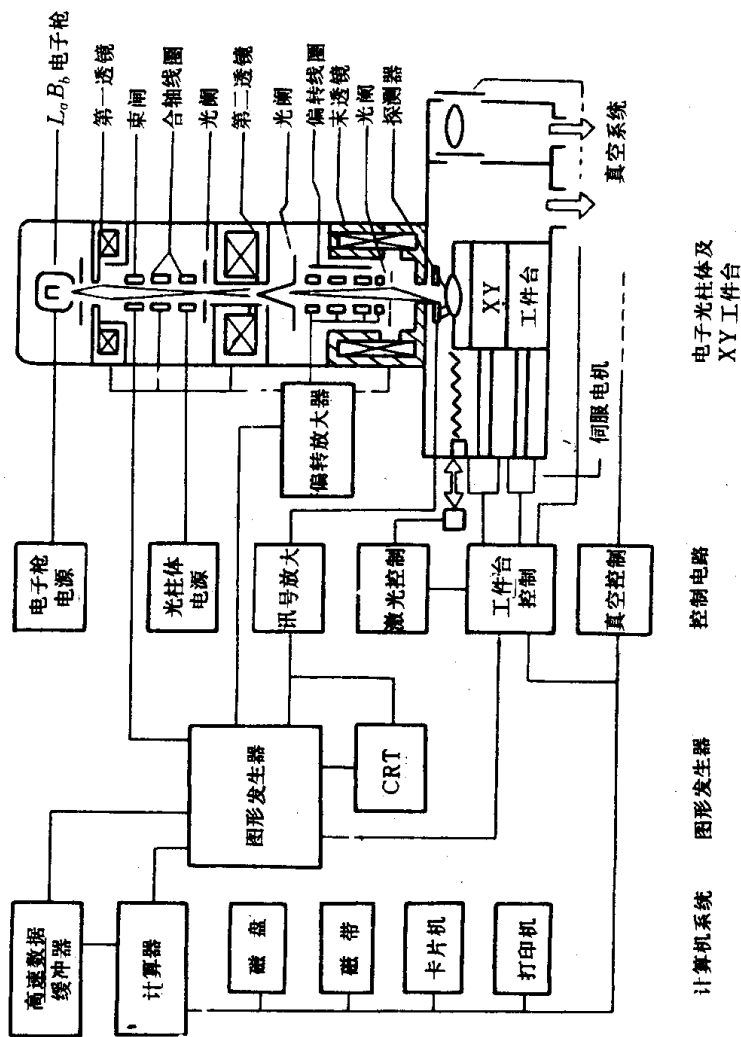


图 1-2 电子束曝光机方框图