



电子束曝光技术

王顺祺 黎辉活

近十几年以来,国内外广泛地进行了电子束技术在工业中的应用研究。其中,一部分已经成功地用于实际生产中,例如:电子束蒸发、电子束焊接以及利用扫描电子显微镜观察材料及器件特性等。

随着科学技术的发展,国内外对于电子束技术在微电子器件制造中的应用也相当重视。一些技术比较先进的国家大都已开展了电子束曝光技术的研究试制工作,并已取得成果。下面我们就讨论电子束曝光技术中的一些问题。

所谓电子束曝光就是利用电子加速系统将电子加速,并通过电磁透镜将其聚焦成细束,然后利用电磁场控制该束在工件上扫描以制出所需要的图案。这里我们所指电子束曝光包括在微型器件制造中的电子束制版和电子束光刻等。

一、电子束曝光的特点

随着科学技术的发展,对于电子器件提出了更高的要求。对于半导体器件来说,一个重要指标是器件的特征频率和开关速度。例如:上千万次的电子计算机所需的集成电路,其开关时间应该在1毫微秒左右。而为了实现这一指标,其图案的最小尺寸就应做到1—2微米。又如:特征频率为3—5千兆赫的高频晶体管,其发射区的宽度也将减少至1—2微米以下。另外一些特殊器件,如1千兆赫的声表面波换能器的线条最小宽度也需要在1微米左右。而且随着科学技术的进一步发展,这个最小尺寸也将进一步减小。

上述这样精细的图案,靠原有的光学曝光工艺是比较难于实现的。这不单单是由于光学仪器和设备水平达不到要求,而且也受到一些物理因素的限制。由于光学曝光的光源波长一般为0.4微米左右,光的衍射现象会导致所制出的微细图案边缘模糊,以致不能满足工艺上的要求。

采用电子束曝光技术可以克服上述困难。众所周知,电子束的波长 $\lambda = \sqrt{\frac{150}{\nu}}(\text{\AA})$,对于加速电压为30千伏的电子枪而言,其相应波长只有0.07 \AA ,只相当于可见光波长的十万分之一。所以对于亚微米级尺寸的图案而言,实际上不会存在衍射问题。因此可以得到分辨率较高的图案。这是电子束曝光的第一个特

点。

第二,由于微电子束能够用电场或磁场使其偏转,因而可以采用电子计算机或数字控制系统使束能自动地一次描绘出所需的图案,可以省去原光学制版工艺中的一整套工序和设备,实现制版、光刻的自动化。这一点对于新型器件的试制,更有特殊的意义。试制中的每次图案修改,只需要改变一下穿孔纸带的数据即可实现,无需再重新绘制大图,因而可大大地缩短新产品的研制周期。

第三,电子束的焦深较深,根据不同的光路设计,可以使焦深达到数十微米至百微米。这样可以避免由于掩模版或硅片表面不平对图案造成的影响。

第四,微细电子束本身又具有微电子探针的特点,与电子计算机配合,可以实现曝光过程中的自动定位;进一步研究也可以实现自动选择布线,为半导体器件生产自动化提供了方便条件。

当然,世界上的事物无不具有两重性,电子束曝光技术也存在一些缺点。例如:设备复杂;对使用和维修人员的要求比较高;并且成本高;效率低。这些缺点也就限制了它的应用范围。

另外,由于目前这项技术仍然处在研制阶段,设备本身的一些问题以及与其配套的一些技术问题,还没有完全解决,也影响了其特长的发挥。正象其他新生事物一样,电子束曝光这项新技术,随着科学技术和工业的发展,会逐步加以完善和改进,而其特点也将进一步得到发挥。

二、电子束曝光机的构成和曝光过程

按照产生图案的方式,目前的电子束曝光机可分为两种:1.利用微细电子束在电子计算机控制下,顺序依次完成图案曝光的无掩膜曝光机;2.利用光电阴极掩膜的电子束投影成象系统。由于第一种曝光机能够自动地产生图案并且分辨率和精度都比较高,所以国内外研究单位大都正在研究这种曝光机。我们也将主要讨论这种曝光机(本文中凡未加注明的都指的是这一种电子束曝光机)。

电子束曝光机包括以下几部分:(见图1)

- (1) 电子光学系统;
- (2) 电源及控制系统;

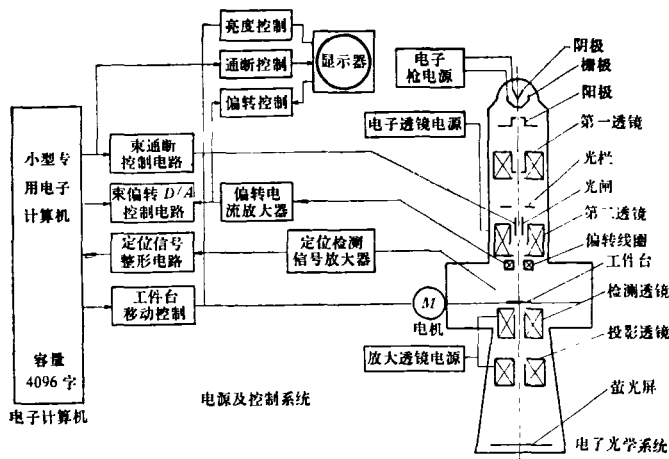


图1 电子束曝光机系统图

(3) 电子计算机。

1. 电子光学系统

高速电子从电子枪发出，通过两级电磁透镜聚焦至工件上时，应在1微米以下。电子枪用的加速电压一般为20千伏至30千伏。为使细束能在工件上按要求扫描出所需的图案，在末级电磁透镜附近分别装有控制束通断的光阑和X、Y两个方向的偏转线圈。通过偏转磁场的作用，可以使电子束在工件上按要求沿着x轴或y轴扫描。为了覆盖较大的曝光面积，往往采用多步重复的曝光方法。即在每曝光一个单元后，使工件台移动至下一个单元，重复曝光。所以固定工件的台面应该能够作x方向、y方向的精密位移与转动。

为了便于观察微电子束斑的尺寸及形状，在工件台面下，设有能放大几千倍的电子显微镜系统，经放大后的束斑投射到下部的荧光屏上。

此外，电子光学系统中还有光阑，消象散器以及合轴装置等都是为了调节电子束斑用的。整个电子光学系统要安装在一个密闭的真空室内，室内保持 10^{-4} — 10^{-7} 托的真空度。

2. 电源及控制系统

由于电子枪的加速电压和电磁透镜的电流直接关系到电子束斑点的质量，所以要求这些电源要有相当高的稳定度。束斑的尺寸越小，对电源稳定度的要求就越高。一般当束斑为1微米时，所需的稳定度在 10^{-4} 左右，所以应该采用高稳定度的电源电路。

控制系统包括：

(1) 束通断控制：按电子计算机发出的信号打开或关闭电子束。一般采用两种办法：(一)在电子枪栅极上加负脉冲来切断束流；(二)利用静电场(或磁场)使束偏离工作区域。后一种便于得到较高的图案精

度。

(2) 偏转控制系统：电子计算机给出的偏转信号，通过数模转换器和偏转电流放大器加至电子光学系统的偏转线圈上。由于偏转系统直接影响着图案精度，所以对于偏转放大器的精度、直线性、通频滞、漂移等要求均比较高。

(3) 工件台移动控制系统，电子计算机通过该系统及步进电机控制工件台的x、y方向的位移以及转动，以使工件能实现自动送入，退出以及按程序要求自动移位。

(4) 定位系统：利用能接收反射电子或二次电子的探头及电信号的放大整形电路，将工件实际位置的信号送至电子计算机，以修正图案的起始位置。

(5) 监示系统：通过显象管可检查电子计算机存储的图案；也可通过定位系统的信号观察工件表面状况及标记位置。

3. 电子计算机

电子束曝光机的整个工作过程是通过电子计算机实现自动控制的。所需曝光的图案应事先编好程序，然后通过光电输入机送到计算机的存储器中。一般，曝光一个矩形图案需要四个数据(如图2所示)。所以

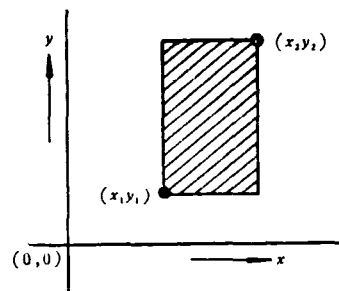


图2 曝光图案表示法

作曝光用的电子计算机的存储器容量不要求很大，一般为4096字。

为了能对定位检测信号作数据处理，电子计算机应包括加、减、乘、除等算术指令。为实现各

种逻辑功能也需要设置若干条必要的逻辑指令。此外为了控制电子束还需专门设置若干专用指令。例如：控制电子束通断的指令、扫描指令、接受定位标记信号的指令以及每单元图案曝光完毕后的工件位移指令等。

下面简单介绍一下电子束曝光机的曝光过程。

假定我们需要曝光一个如图3所示的图案。这个图案可分成两次曝光，第一次先做①，电子束在电子计算机的控制下，在a点开启，然后沿着x方向逐点右移至b点，再沿y方向增一步，再沿x方向逐点左移，这样往复一直到d点时切断电子束，图案①即全部曝光；然后跳至e点开束，从e至f逐点扫描，至将②全部曝光后，即完成了该单元的曝光。这样的曝光过程是事先通过程序编制规定的。前面已经谈过，由于一般一

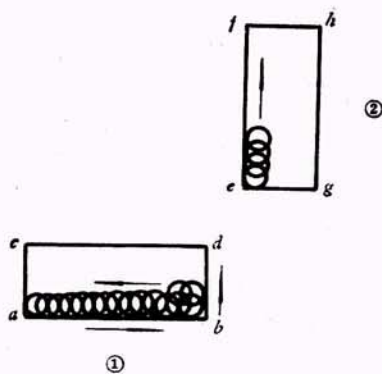


图3 图案曝光示意图

个工件的面积比电子束曝光机的单元覆盖面积大得多,所以往往用多步重复的方法在一个工件上重复作满图案。这就要靠工件台移位的办法完成了,工件台移位的方式如图4所示。

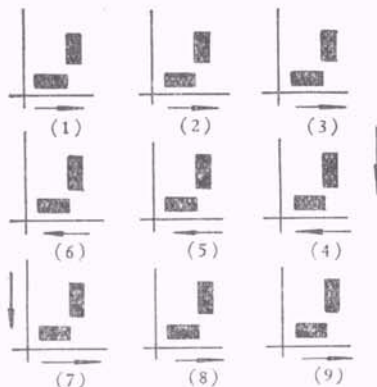


图4 多步重复曝光示意图

三、分辨率与曝光面积

前面已经谈过,电子束具有极短的波长,那么是不是电子束曝光的图案分辨率也能达到这样的水平呢?不是的。用电子束曝光的图案分辨率极限,受到很多条件的限制。首先是电子束的最小斑点。

电子束的最小斑点受以下一些物理因素的限制:(1)带电粒子的横向热速度,由于电子从炽热的阴极上发出时的无规则的横向速度分量,影响着在聚焦后的最小斑点。理论与实践均已证明,由这个横向热速度所造成的束点直径与束电流有关,电流越大,其束点直径的极限值也相应增加。(2)电磁透镜的球差,由于透镜磁场的分布,使电子束的横截面上的各部分,不能聚焦于同一点,而形成模糊圆。(3)色差,由于加速电压不稳定,电磁透镜电流不稳定等原因,也会使电子束散焦。当然,这些因素通过合理地进行电子光学系统的设计,可以使之减小。例如:国外报导已经有

人得到了 5 \AA 的最小束斑。但由于束电流及其他条件的限制,作为能在实际曝光中应用的电子束斑一般为 $400\text{--}500\text{ \AA}$ 以上。目前国外利用电子束曝光得到的最细线宽为 $450\text{ \AA}\text{--}500\text{ \AA}$ 。

有了一个很小的束斑,不等于就能曝出一个同样线宽的图案。因为电子束曝光是通过抗蚀剂实现的。抗蚀剂必须有足够的分辨率和足够的抗蚀性,以求尽量减少抗蚀剂涂层的厚度。由于电子撞击到抗蚀层中以后会产生散射,所以实际曝光宽度,总要比电子束径大。实验证明:抗蚀剂涂层越厚其差别也就越大。国外报导有人用 500 \AA 的电子束在 2000 \AA 厚的抗蚀层上曝光,实际得到的线宽在 2000 \AA 以上,大约为束径的四倍。

在实际应用中,图案的分辨率往往是与曝光面积联在一起的。这在高频大功率半导体器件图案中就比较突出,这种图案最细线的宽度很窄,而每个器件的面积又比较大。这也是一般光学曝光技术上比较难于解决的问题。

电子束曝光的单元曝光面积,也受到一些物理因素的限制,其中最主要的是偏转象差。由于被偏转离轴后的电子束,在偏转场的作用下会引起束斑的各种畸变,例如:象散、彗形象差等,结果会使图幅边缘部分图案的分辨率降低。通过合理地设计偏转线圈的几何形状,可以减小边缘磁场对束斑的影响。另外,也可以采用动态校正的办法加以补偿(即当束偏离轴线以后,通过自动改变透镜电流和消象散器电流的方法,使其重新在工件平面上聚焦)。国外有人采用了动态校正,结果使 0.05 微米 (即 500 \AA)的束斑在偏转 1 毫米 左右时,仍未超过 0.1 微米 。这就做到了大约相当于 10000 条线的分辨率。这是一般光学仪器无法比拟的。当然,动态校正装置是比较复杂的,一般如果电子光学系统和偏转系统设计的合理,不用动态校正也能够得到 $1000\text{--}2000$ 条线以上的分辨率。

四、图案精度

我们这里所指的图案精度是指实际曝光图案与理想图案的差别。例如我们需要曝光一个矩形图案(图5a),如果图案精度很差,则实际得到的图案可能变成图5b所示的样子。

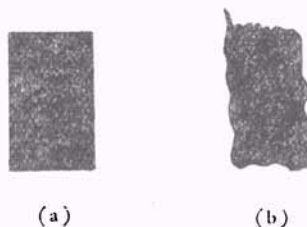


图5 图案精度示意

什么原因会影响图案精度呢?归结起来主要有如下几种:

1. 抗蚀剂的分辨率;
2. 偏转系统的直线性;

3. 外界电磁场的干扰;
4. 扫描速度;
5. 束通断特性.

在这里我们不准备详细讨论每种原因是如何对图案精度产生作用的. 我们只简单地叙述一下它们对图案精度造成的最终影响.

抗蚀剂的分辨率不够会使图案边缘变成锯齿形或边缘模糊; 偏转系统的直线性不高会使图案的尺寸精度降低; 外界电磁场的干扰会造成线条的弯曲或粗细不匀; 当偏转磁场通过铁磁材料闭合而扫描速度又过高时, 会导致图案沿扫描方向的缩短; 当采用在电子枪栅极加负脉冲的方法关闭电子束时, 可能引起开束时的“离位”或“裂口”. 这些均会影响图案的质量, 所以一定要在设计中采取措施. 实践证明, 通过正确的设计, 以上问题可以基本上得到解决, 而制出精度较好的微米级图案.

五、曝光过程中的定位

电子束曝光中的一个很重要的问题是“套准”, 就是说如何将要做的图案与工件上原有的图案准确地重合起来, 这也就是通常所说的“定位”.

目前在半导体器件生产中, 一般是靠人工通过显微镜观察与手动调节来定位的. 这种方法不但定位精度低, 而且劳动强度大.

在电子束曝光中, 可以实现自动定位. 一般常用的有两种办法:

1. 依靠工件台准确地移动来保证每个单元之间的尺寸精度. 这种方法一般只适于制版, 而不适于在硅片上曝光. 这种定位方法包括光栅法、光电显微镜法以及激光干涉法等. 国内外有些研究单位采用这些方法, 已经得到了 0.5 微米、甚至 0.1 微米的定位精度. 但是用这种定位方法时, 其精度容易受外界环境条件变化的影响. 例如: 温度的变化, 机械震动等.

2. 用电子束作为微探针在工件上扫描寻找标记的方法. 通过电子计算机对工件实际位置作数据处理和修正而实现自动定位.

这种方法在国内很多单位都已采用, 在国外也有大量的报导. 所采用的接收探头有太阳能电池、P-N 结、闪烁晶体与光电倍增管等, 而且很多都已收到较好的结果, 其定位精度一般均在 ± 0.5 微米之内, 有的也已达 0.1 微米左右. 因已有很多文章专门介绍各种定位方法, 本文不再作详细介绍了.

六、曝光速度

使用电子束设备的单位所关心的问题之一是电子束曝光的速度, 即用电子束曝光机制一块版或者曝光

一块硅片需要多少时间. 的确, 这是实际应用中的一个重要问题. 这将在很大程度上影响这项技术的应用范围. 下面我们就来分析一下决定曝光速度的几个主要因素. 整个曝光时间包括:

- (1) 工件台位移时间;
- (2) 标记定位时间;
- (3) 图案曝光时间.

实际上, 前两个因素与第三个相比, 是次要的. 因此我们主要研究第三个因素.

图案曝光时间分别受两个独立的条件限制: (1) 若使抗蚀剂化合物的聚合键破坏(即曝光)需要一定量的电荷轰击; (2) 每偏转一个阶梯需要一定的时间. 前者决定于所采用的抗蚀剂的灵敏度和电子束机的阴极发射电流密度; 后者决定于偏转放大器的频带及整个偏转系统的时间常数. 这两个条件彼此独立地决定曝光速度. 前者表示曝光需要多少时间, 后者表示实际能够达到的速度. 作为有代表性的例子, 我们假定: 束偏转一个阶梯(设定长度为 0.5 微米)的最短时间为 10 微秒. 所用的抗蚀剂的灵敏度为 1×10^{-7} 库仑/厘米², 束电流密度为 0.2A/厘米², 此时由两个条件所决定的每平方米面积所需要的曝光时间均为 4000 秒左右. 假定曝光图案面积与工件总面积之比为 1:10 (这接近于一般集成电路图案的实际情况) 则每平方米的曝光时间为 400 秒. 照这样估计, 曝光一块 30 × 30 平方毫米的工件, 大约需要 1—2 小时以上.

这样的速度, 对于制版应该是允许的, 但是如果进行硅片的直接光刻, 这样的速度, 显然是不适用的. 所以为了满足光刻的需要应该设法在此基础上, 再将曝光速度提高 1—2 个数量级. 虽然最近国外已经在提高抗蚀剂的灵敏度方面下了很大功夫, 制出了一种叫做卤化银胶的高灵敏度抗蚀剂(灵敏度为 10^{-8} 库仑/平方厘米), 但是要实现高速度的扫描(例如使每阶梯的扫描时间小于 1 微秒), 在偏转系统的设计上仍然需要进行大量的工作.

为了解决电子束曝光的效率问题, 国外已经研制了一种称为面曝光的“电子束投影成像系统”, 即利用腐蚀有图案的、涂有钼层的玻璃版作为掩膜, 这种掩膜版在紫外光的照射下, 有图案的部分可以发射出电子, 通过磁场聚焦及电场加速, 射到需曝光的硅片上(如图 6), 这样就可将掩膜上的图案照原样投影到硅片上去.

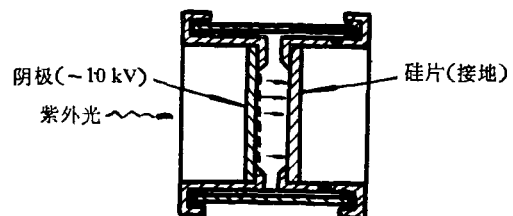


图 6 电子束投影成像系统原理

由于这种曝光方法也利用了电子束技术,所以同样具有分辨率高的特点。这种曝光机较上面所谈的曝光机,效率可大大提高。

据国外报导,已制出的投影曝光机能在15秒内完成一大片硅片的曝光,其套准精度和分辨率均可达到0.5微米。这种曝光设备,同样也需要专用计算机控制,因而设备成本仍然是比较高的。

七、国外电子束曝光技术的应用效果

目前,电子束曝光技术在国外也仍处在实验阶段,虽然也做出了一些新性能的器件,但总的来说,工作还只是刚刚开始。

这项技术的应用,报导较多的是在声表面波换能器和微波晶体管的制造方面。

声表面波技术是近年来引人注目的新技术之一。声表面波换能器用光学照相制版技术一般只能做出中心频率为400—800兆赫。为了克服这个极限,使用了电子束光刻技术,先后已能作出1.1千兆赫、1.7千兆赫、2.5千兆赫(两个叉指换能器相距5080微米,指对12,指宽0.3微米,指条间距0.4微米)、3.5千兆赫(指宽0.15微米,指条间距0.3微米)的声表面波换能器。目前,并已能做出4.1千兆赫的声表面波换能器,指宽为0.1微米,边缘分辨率为 ± 0.02 微米。这是目前最高水平。

据国外报导,利用高分辨率的扫描电子显微镜开窗孔和用离子束注入法,制成了线宽为1微米,中心间距为3微米的叉指形窗口的结型场效应微波开关晶体管(JFET)。沟道电导增加了两倍,电容仅增加10%。据称,如选用最佳的制造工艺,有可能使沟道电导增加到原来的四、五倍。这就有可能制造出截止频率近100千兆赫的微波开关晶体管。并已能做出耗散功率 $P < 1$ 毫瓦, $t_{pd} < 200$ 微微秒的结型场效应“非与”开关集成电路。目前最高水平已能作出栅极金属条宽为0.7微米的场效应晶体管。

据国外报导,利用电子束曝光法开出器件所有扩散窗孔和蒸发金属图形,制成了1微米条宽的发射极和基极接触窗的平面双极晶体管。其交直流特性比利用传统的光刻法制造出来的双极晶体管还要好。传统的刻蚀技术不可能在半微米至1微米厚的金属层上制造出1微米宽的金属线条。对于电荷耦合器件,目前水平已能做出条宽为0.8微米,中心间距为0.3微米,边缘分辨率为0.02微米的金属化图形。

据国外报导,利用电子束制版和电子束投影成像曝光机相结合,已制成了1024位MOS随机存取存储

器,数模转换器,大移位寄存器、四端双输入DZ1L“非与”门电路。

几年来,美国和日本等资本主义国家投入了大量的人力和物力从事这方面的研制工作。近年来,国外电子束曝光技术虽然取得了一定的进展,个别厂商制造出的电子束曝光机已进入了市场,采用电子束曝光技术也试制成功了一批高性能的半导体器件和微电子学器件,但总的来说,目前国外电子束曝光技术还停留在研究实验阶段,电子束曝光技术还没得到广泛应用。

由于用传统的光刻技术很难获得1微米以下的分辨率。因此,今后在微电子学器件和电路性能方面的改进,采用新的电子束和离子束技术能够得到较明显的效果。使用这种方法能制造出工作频率高达10千兆赫以上的低噪声高频晶体管和元件密度高一个数量级、耗散功率降低一两个数量级的大规模集成电路。为半导体器件和电路向高性能、高效率和高可靠性发展提出了新的前景。

八、关于电子束曝光技术的应用问题

1. 综上所述,电子束曝光技术与普通的光学曝光技术相比,具有一些独特的优点,在一定的范围内采用这项新技术是有重要意义的。

但是由于电子束曝光设备比较复杂,成本较高,对于操作维护人员技术水平的要求也比较高,这些在实际工作中会带来一些困难。所以在大量的普通电子器件的制造中,如果图案的分辨率是一般光学曝光设备所能胜任的话,就不一定需要改用电子束曝光。

另外,由于电子束曝光设备可以实现一次制版,而且便于作图案更改,所以在新产品的研究试制中采用它可以大大地缩短产品的研制周期,在一些新产品试制任务重的工厂和科研单位,这一点是很重要的。

电子束曝光机与电子束投影成像设备配合使用,在高精度图案曝光中是较有前途的工艺。用前者制造掩膜版,用后者在硅片上光刻,这样既可以保证曝光的精度,又能提高工作速度。总之,对于电子束曝光技术的推广,应注意发挥其所长,因地制宜。

2. 电子束曝光技术的应用,是一项综合性的新技术,要真正制造出微细图案并在高性能的微型器件制造中收到实效,除了进行电子束曝光设备本身的研制工作以外,还要相应地不断提高和改进与之配套的新技术和新材料。例如:高分辨率的抗蚀剂、细线条图案的化学腐蚀技术、离子注入技术等等。这样才能发挥出电子束技术的特长,提高电子器件的水平,使这项新技术更好地为我国的社会主义建设服务。