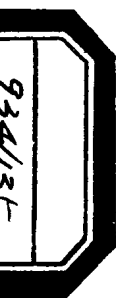


934/135
21833

国外半导体电子束曝光 离子注入技术动向

(内部资料 * 仅供参考)



上海科学技术情报研究所

一九七二年七月

21833

国 外

半导体电子束曝光离子注入技术动向

*

上海科学技术情报研究所编写出版

新华书店上海发行所发行

上海商务印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 2.25 字数: 55,000

1972年7月出版

代号: 1634068 定价: 0.25 元

(只限国内发行)

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

外国有的，我们要有，外国没有的，我们也要有。

洋为中用。

对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

BA/30/51
3-1-1

电子束曝光技术动向

国外电子束技术的工业应用已有二十多年的历史,到1960年左右,开始研究应用于半导体工业。最初是采用电子束技术进行半导体材料的切割、材料的蒸发、材料特性的观察。随着半导体器件朝着三高二低(高频、高功率、高密度、低噪声、低功耗)方向发展,在国外,电子束技术也开始应用于半导体器件和微电子学领域,利用聚焦的电子束对集成电路和半导体器件进行检测和焊接,而近年来国外则集中致力于研究电子束曝光技术。

国外重视半导体领域中电子束曝光技术的发展,主要因为有下列因素:首先,高性能半导体器件的发展,其光刻、制版图形日益复杂,密度越来越高,图形线条越来越细,采用一般光学方法进行制版和光刻已无法满足要求。众所周知,光学方法进行曝光,其曝光的光波波长约为0.4微米左右,因此,即使透镜系统完美无暇,感光材料的分辨率也极其高,但所获得的分辨率也决不会超过0.4微米。事实上目前国外采用光学法的光刻、制版水平还未超过1微米。这是由于光刻、制版图形线条接近光波波长时,光会产生衍射,从而使图形模糊不清。

其次,随着大规模集成电路的进一步发展,电路的选择布线(大规模集成电路互连的一种方法)也是很重要的一环。因为经过各道加工工序后的大规模集成电路片上的每个电路单元,不可能都是合格的,在制作电路时只是有选择地根据电路要求把合格单元互连起来。但是每个电路片上合格单元的位置又不可能完全相同,因此采用普通的互连掩模版光刻布线的话,对每块电路片都需要单独制作互连掩模版,这是极为少慢差费的。

为了解决上述问题,近年来国外对电子束曝光技术在半导体领域中的应用——电子束制版、电子束光刻和电子束选择布线(因制版、光刻、布线都是通过电子束曝光来完成,故统称为电子束曝光)尤为注意,因为电子束曝光技术和以往的光学光刻、制版方法相比,有下列优点:

(1) 曝光图形的分辨率高,即曝光线条细。这是因为电子束的波长比光波波长短,可不考虑衍射问题,因此半导体领域采用电子束曝光技术,就可获得高精度、极细线条的掩模版子。目前国外电子束束斑已能聚焦到0.0005微米($5\text{ \AA}$),通常可应用的电子束束斑为0.01微米。电子束曝光分辨率(最小线宽)最高水平已达0.05微米,而一般光学法曝光的图形分辨率在1微米左右。

(2) 曝光图形精度优良。电子束的焦深很深(约40微米),因此不受工作样品表面光洁度影响,精度达到1微米是很容易的。

(3) 电子束光刻时不需要用掩模版,因此光刻图形时相当灵活,可省去目前晶体管、集成电路制造中“拖后腿”的工艺——掩模制造工艺。

(4) 曝光图形的改变和修整容易,适合研制高性能、图形复杂的器件。

(5) 可同电子计算机配合使用,自动设计图形和对大规模集成电路进行选择布线,这是一般光学方法无法达到的。

电子束曝光技术虽有许多优点,但也受到一定的物理现象(诸如透镜象差、横向热速度等)的限制,影响最高分辨率的获得。同时电子束曝光的装备庞大、成本高、操作繁复,以及电致抗蚀剂的灵敏度、分辨率和装置电源的不稳定性都会影响电子束曝光水平的进一步提高。因此,近年来国外电子束曝光技术虽取得一定进展,有些厂商制造的电子束曝光装置已进入了市场,采用电子束曝光装置也试制了一批高性能的半导体器件,但从总的来说,目前国外电子束曝光技术还停留在试验研究阶段,电子束曝光装置还没得到广泛实用。而要使电子束曝光装置进一步实用,应用于生产,看来从技术上尚需解决以下一些问题:

(1) 进一步提高电子束曝光的分辨率。国外实验室中电子束曝光的分辨率虽已达 0.05 微米,但通常能达到的水平仅 1 微米左右,所以目前与光学法相比,还显不出更大的优越性。要使电子束曝光用于生产,还需进一步提高分辨率。电子束曝光的分辨率受到透镜象差、横向热速度、电子在电致抗蚀剂中的散射、偏转电压的影响,这些问题在本文的末节将作叙述。除此之外,电子束曝光的分辨率在一定程度上还取决于电致抗蚀剂的灵敏度和分辨率。据报道,电子束的束斑经磁透镜聚焦后可小到 0.01 微米,然而电致抗蚀剂的灵敏度限制了曝光图形的最小线宽。目前国外一般抗蚀剂的灵敏度为 $10^{-6} \sim 2 \times 10^{-5}$ 库伦/厘米²,如果要获得良好的分辨率,灵敏度还需提高 2 个数量级,因此对电子束敏感的电致抗蚀剂的研究,乃是提高电子束曝光图形分辨率的有效措施之一。

(2) 缩小体积、减轻重量、降低成本、提高仪器稳定度,这是解决电子束曝光技术在生产上实用的关键。

(3) 提高对准精度。除目前的电子定位、光栅定位、激光定位等方法外,提高对准精度问题还尚待进一步研究解决。

(4) 解决电子束对大规模集成电路的探测。电子束和电子计算机的密切配合,可以自动控制大规模集成电路的布线图形。大规模集成电路的选择布线,需要测量晶片上各单元的电特性,若用一般机械电气测量方法,则需耗费比较长的时间并有益于集成度的提高。为了改善这一点,要求采用电子束探测,即根据晶片上进行电子束扫描所产生的二次电子、反射电子和光伏特效应来探测电路元件特性,并自动进行选择布线。

下面就国外电子束曝光技术的发展动向作一介绍。

一、电子束曝光技术的发展概况

电子束技术应用于半导体器件和微电子学领域,在近十年中大致经历了以下几个阶段:在六十年代初刚开始应用研究时,是利用扫描电子显微镜配上飞点扫描图形发生器形成电子束柱,电子束柱通过掩模进行所谓“面曝光”,一下子形成图形。这种方法的缺点是在一个图形形成后再形成第二个图形时,两个图形对准困难,对器件的微小型化问题不能解决,所以搞了几年后,国外基本上放弃了这种方法。接着国外就比较致力于研究一种所谓“线曝光”方法,也就是利用扫描电子显微镜的单束电子束依次连续动作,扫描出整个图形,同时配有电子计算机,初步解决了图形的自动对准问题,分辨率和对准精度都有了一定提高,但扫描时间较长,扫描的面积有限,需要采用分步重复程序。目前国外重点研究和初步付之应用的就是这种“线曝光”类型的电子束曝光装置。美国、日本、英国、法国等国都先后研制成功了这类曝光装置,并已开始试用。近年来,国外对“线曝光”技术作了很大努力,在提高分

分辨率、提高对准精度等方面都取得一定的进展,但至今为止,“线曝光”方法还有一个很大的不足之处,即图形的形成是通过“线曝光”一步步形成的,因此图形制作非常化费时间,特别是制作大规模集成电路更费时间,这种因素也就降低了电子束曝光机的实用价值。虽然国外也有搞多束“线曝光”系统,但在分辨率、定位精度等问题上都尚未解决。最近国外除继续研究“线曝光”方法外,又开始对“面曝光”方法进行探索研究,当然这种“面曝光”方法同1960年开始搞的“面曝光”不同,目前搞的是一种“电子束成像投影装置”,这种方法综合了各种曝光方法的优点,其精度高、曝光时间短,是一种较有前途的曝光方法。美国西屋电气公司和休格工业公司(包括其子公司——辐射能量系统公司)对这种曝光方法尤为注重。

由上述可知,目前国外的电子束曝光,基本上还是“线曝光”与“面曝光”两种。

二、几种电子束曝光方法

如前所述,最简单的“面曝光”方法是将电子束聚焦成束柱,束柱通过掩模照射到硅片,在硅片上曝光所需要的图形。这种方法的一个严重缺点是所聚焦的束柱其各点的电流密度几乎总是不均匀的,因此如果要求在硅片靶上有较均匀的电流密度,则只有在束柱中心的一小部分能够利用,这样对电子束电流来讲是极为浪费的,再加上图形和图形之间的对准、掩模的设置等问题遇到困难,掩模本身限制了图形的类型,同时对器件的微小型化问题尚不能得到解决,所以近年来国外已不采用这种方法。

另一种“面曝光”方法即是最近出现的电子束成像投影曝光方法,其装置结构如图1所示。这种装置的关键是其阴极面的制取,它的制取方法是:先将金、铬、钛、二氧化钛等(常用的是钛)均匀地粘附在玻璃表面上,作为紫外光的吸收膜。然后用电子束“线曝光”或其它光刻方法在吸收膜上蚀刻出所需要的图形,经过腐蚀、显影后再在上面附上一层厚度为40~100埃的钼层。当在钛膜上蚀

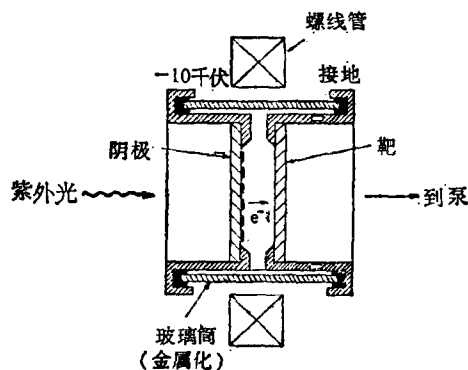


图1 电子束面曝光装置示意图

刻所要设计的图形后,钛膜被氧化成二氧化钛,二氧化钛是坚固的,在化学上是稳定的,同时对紫外射线有高度吸收能力,因此这层膜俗称为吸收膜,而吸收膜上再附一层钼层便制成了光电阴极面。如图所示,将阴极面和预先涂好光刻胶的硅片平行地放在真空中,硅片接正极,二者间加上每厘米10千伏电压,在紫外光照射下,在吸收膜未蚀刻掉的阴极面上,钼层受紫外光激发,发射电子,形成电子束。电子束在电磁场的作用下,以1:1的比例在阳极——涂好电致抗蚀剂的硅片上成像,这样在硅片上就形成预期要求的图形。这种方法除具有精度高、曝光时间短、成本低等优点外,还有一个很大的优点是因为采用投影方法,所以阴极无损伤;在钼层发射电子能力下跌时,可用金属击射的方法再蒸发一层新的钼层,因此阴极面寿命长。此外,近几年国外正在研究电子束在二氧化硅层中电子碰撞感应导电而实现自动对准,同时还试制能容纳几十个不同光电阴极“面曝光”装置。因此,这种“面曝光”装置已成为电子束曝光技术的新动向。对于制取较复杂图形,电子束成像投影“面曝光”法和普通光学曝光法的比较见下表:

“面曝光”法和普通光学曝光法的比较

	电子束成像投影装置	光 学 曝 光 装 置
分 辨 率	0.5 微米	1~2 微米
对准和曝光时间/每片硅片	15 秒	2 分钟
每年完成曝光次数/台	1 百万次	12 万 5 千次
掩 模 寿 命	无 限 长	曝光 20 次
成 本 比 例	1	5.5

除了面曝光方法外，目前国外大多数是采用电子束顺序扫描曝光方法，即“线曝光”方法。它由电磁场把电子束聚焦成很细的束斑，在涂有电致抗蚀剂的硅片上进行扫描曝光，这种曝光方法大多数由数字信号来控制运动的聚焦电子束，使在选定的地点曝光出所需的图

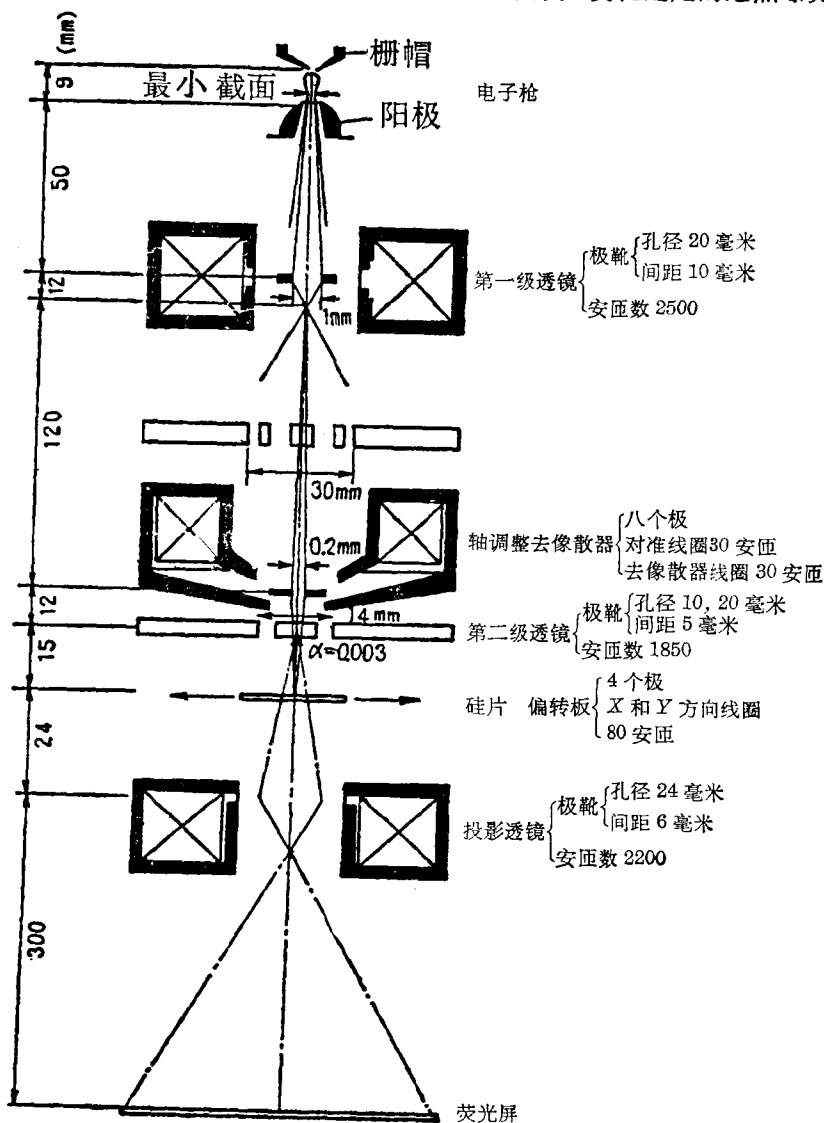


图 2 电子束系统结构示意图

形,而每个图形单元由束顺序地一行一行地曝光,以此来曝光出图样单元。电子束系统结构示意图如图 2 所示。制作通常集成电路所用的硅片直径约为 2.5 厘米左右,如果它的全部面积都用很细的束点来曝光,则偏转系数和偏转歪斜就成了问题,因此目前都是将硅片分成许多小片,每个小片(2×2 毫米)依次进行曝光。如图 3 所示,将图形分割成许多矩形,把它们左上角的坐标位置以及矩形二边的长度 X_1 、 Y_1 、 X_2 、 Y_2 和矩形号码四个数据信号通过纸带送入电子计算机,然后电子计算机以确定的原点(X_0 、 Y_0)作为基准,控制电子束装置进行矩形“涂蚀”,二个扫描系平面是完全相同的,但为了保证矩形边缘精度和缩短曝光时间,应向长方向进行扫描。小片移动靠样品台移动而进行,这种移动通过脉冲马达带动样品台面进行。这样,曝光所需要的时间等于符号检出、扫描、样品台移动所需时间的总和,但主要决定于扫描时间。电致抗蚀剂的灵敏度仅根据电荷量决定,并一般在 10^{-5} 库仑/厘米² 时发生聚合。在日本 JEBX-2A 型电子束曝光机中,硅片上的电子束流约为 10^{-8} 安培,因此对于 2×2 毫米面积的小片“涂蚀”约需 40 秒钟。按这样速度计算,在一片直径为 2.5 厘米的硅片上约有 100 个小片,其曝光时间估计需要 4000 秒钟左右,约为 60~70 分钟,而一般实际情况,小片不需要全部曝光,所以实际曝光时间还可缩短。一般来说,采用这种“线曝光”方法的图形产生和控制都是靠电子计算机来进行,电子束位置的确定、符号扫描、符号点的计算、样品台的移动、数据存储、射束的开关和图形放大率的变化等都分别编成程序送入控制计算机,实现自动控制。在日本 JEBX-2A 型电子束曝光机中,数据记录方法是将 2×2 毫米面积分成 4096×4096 个点,图形数据是用 10 进位,根据图面读出数进行纸带穿孔,计算机内部由 10 进位改为二进制。一般配用的电子计算机的存储容量是 4096 个字,而一个程序约需 1000 个字,其余 3000 个字就可用于数据存储,可将约 750 个矩形同时进行存储。而即使是相当复杂的图形,2×2 毫米小片的矩形数也不会超过 200 个。

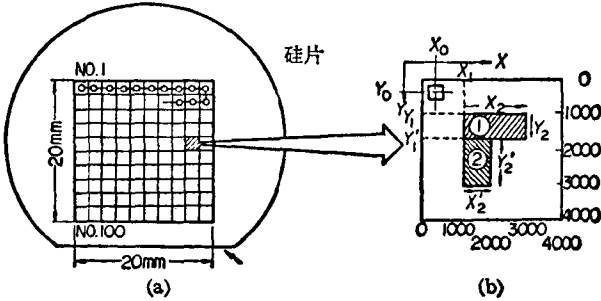


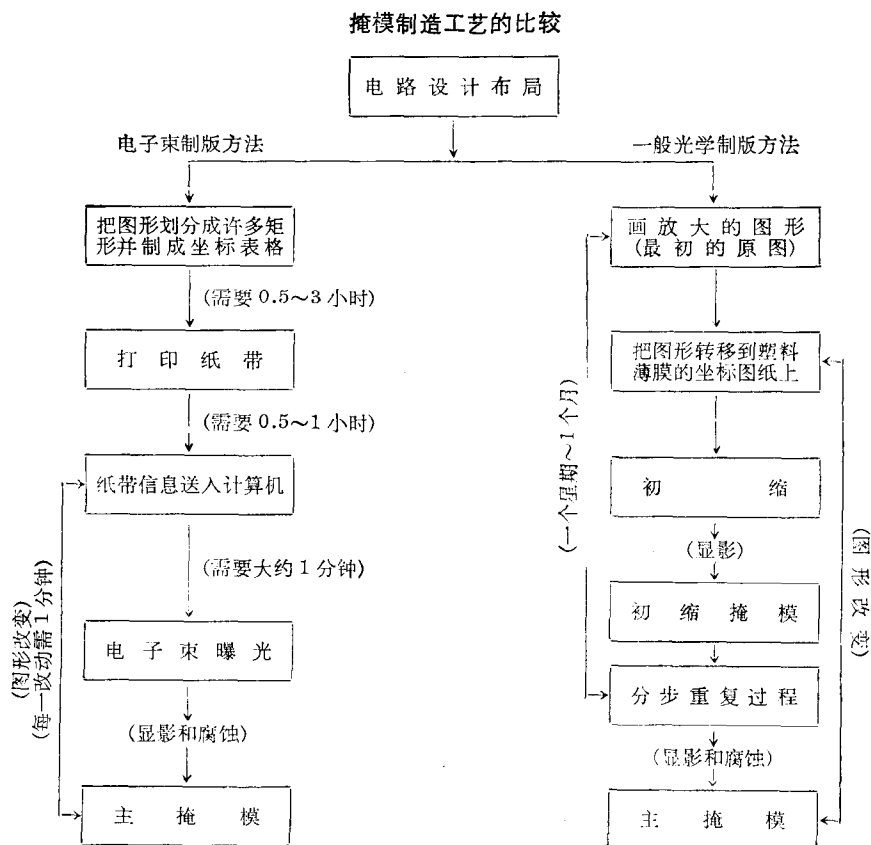
图 3 曝光顺序和方法

这种线曝光方法是目前国外电子束曝光方法中最为流行的方法,对于这种方法国外正朝提高图形分辨本领和对准精度方向努力。通过对聚焦透镜、电致抗蚀剂的进一步研究,正在提高曝光图形的分辨本领。同时国外还在探索新的定位方法,以期提高曝光图形的对准精度。

三、电子束曝光的应用概况

电子束曝光技术在半导体领域中的应用主要是用来制版、光刻和布线。采用电子束制版不仅提高版子精度,而且不需要原图的制备和初缩等照相工艺,缩短制版周期。此外,

其图形的改变与修正也极为方便。下表是采用电子束制版和采用一般光学制版方法工艺的比较:



由上表可见,采用电子束制版有其优越性,国外作了不少尝试,但由于仅完成了制版工艺,制版后的复版和光刻若仍用一般光学方法进行,则光衍射等限制精度提高的因素仍存在,因此即使版子的精度再高,最后仍得不到复杂图形的细线条,所以目前国外更多的厂商是致力于研究电子束光刻。

采用电子束光刻,不再需要掩模,目前国外采用普通的光致抗蚀剂经电子束曝光后,最小的线宽可达到 $0.5\sim0.7$ 微米,若借助于减小光致抗蚀剂薄膜的厚度以避免薄膜内电子的散射,则最小线宽可减小到 0.5 微米以下。美国IBM(国际商业机器)公司采用一种PMM抗蚀剂,使图形的分辨率可达到 0.1 微米。随着供电子束曝光用的专门抗蚀剂的发展,完全有可能获得 0.1 微米以下的曝光线宽。

电子束曝光的图形直线性也是很好的,日本电子光学实验室有限公司作过试验,对 $2,000$ 微米长的直线进行曝光,所观察到的弯曲度小于 2 微米,同时这线长误差还可采用调整图形数据加以补偿,可在 1 毫米长线上误差控制在 ± 0.5 微米之内。

近年来国外电子束曝光技术的应用情况如下:

1. 美国处于领先地位

美国各厂商对电子束曝光技术在半导体领域中的应用颇为重视。据不完全统计,美国

德克萨斯仪器公司、国际商业机器公司、西屋电气公司、休斯研究实验室、休格工业公司、辐射能量系统公司等半导体厂家都已用电子束曝光方法试制成高性能的半导体器件。

美国国际商业机器公司已用电子束曝光方法制成 3.5 千兆赫的微波器件。同时用电子束曝光方法开出器件所有的扩散窗孔和蒸金属图形，并制成 1 微米条宽的发射极和基极接触窗的平面双极晶体管。据最近报导，该公司又用电子束曝光装置曝光出线宽达 0.5 微米的孔，然后用离子注入法制成 20 千兆赫的硅晶体管。

休斯研究实验室使用电子计算机配合扫描电子显微镜直接曝光涂有正性电致抗蚀剂的衬底，制作出 2.5 千兆赫的表面声波换能器，而若采用一般光学照相制版技术，频率只能做到 0.8~1.0 千兆赫。休斯研究实验室还用扫描电子束曝光开窗孔，用离子注入法注入，制取了结型场效应晶体管微波开关。其线宽为 1.3 微米，边缘分辨率为 0.1~0.2 微米，在 0.4×0.4 毫米的片子上，制取了 1180 根梳条，曝光时间为 118 秒钟。

美国各厂商除研究应用电子束“线曝光”外，近年来对电子束投影“面曝光”技术应用也打开了局面。西屋电气公司实验室是研究这类电子束曝光系统最早的厂家，1969 年该实验室研制成功第一台电子束成像投影系统，它是采用扫描电子显微镜先制作出电子成像投影系统的光电阴极图形，然后在电子成像投影系统中将光电阴极上的图形以 1:1 的比例打到涂有电致抗蚀剂的硅片上，再经过显影和腐蚀，这样在很短时间内就能做出亚微米级图形的硅片。该公司将电子束制版技术和电子束成像投影相结合，为美帝空军研制了 1024 位 MOS 随机存取存储器阵列，器件的条宽为 2 微米，这样的条宽要求射束的对准精度为 0.1~0.2 微米。

美国休格工业公司最近也研制成功了新型电子束成像投影曝光装置。该电子束成像投影曝光装置配有电子计算机，其分辨率达 0.5 微米、对准精度也达 0.5 微米，而且阴极装置耐用、无磨损现象。这种曝光装置可容纳 80 片直径达 3 吋的片子，片子的曝光时间只需 15 秒钟。

美国休格工业公司的子公司辐射能量系统公司于 1971 年也试制了二台电子束成像投影装置，目前该公司正在为美国空军研制生产一种用于大规模集成电路的电子计算机控制的电子束成像投影系统，指标是在 2 吋见方的原版（即光电阴极）上射束的“描绘”偏移为 $1/4$ 平方吋，条宽为 1 微米，该公司声称，它已具备成批生产能力，其定名为 EPS-1000 型电子束成像投影系统的成本为 15 万美元，可在 15 秒钟内加工一片硅片，同时该公司还能生产另一种型号的电子束成像投影系统，成本为 8 万 6 千美元，这台装置能在 3~4 分钟内，加工一片 2 吋硅片。

这种“面曝光”装置除了具有曝光线条分辨率高、对准精度高和曝光时间短等优点外，还大大降低了制取复杂图形的成本，据国外统计，由于采用这种方法的曝光时间短、阴极无须更换、寿命无限长、劳动效率高，则按照四年内偿还成本费用算，用此类电子束“面曝光”装置曝光一片硅片的成本是通常光学照相方法曝光成本的五分之一左右，因此美国厂商声称，这类曝光装置是较有发展前途的一种新型电子束曝光装置。

2. 日本较为重视

日本对电子束曝光技术的研制较美国要晚，但较为重视。正当美国西屋电气公司等厂商研究利用扫描电子显微镜进行电子束曝光的同时，日本电气试验所和日本电子光学公司也报导了他们已经研制成功制作集成电路图形的 JEBX-2A 型和 JEBX-2B 型电子束曝光机，把扫描电子显微镜同电子计算机结合起来使用，采用莫尔条纹光栅定位方法解决了自动

图形对准等问题,并报导初步付之实用。这类曝光机的曝光线宽最高已达 $0.5\sim 0.7$ 微米,对准精度在 ± 0.5 微米左右。

据日本电气试验所报导,它利用电子束曝光机在 2×2 毫米范围内已获得 0.7 微米曝光线宽,另外该机还用对 MOS 电路进行选择布线,布线的线宽为 20 微米,最小线间隔为 3 微米。

日本电子光学公司试制的电子束曝光机最小线宽也达到 1 微米以下,对准精度为 ± 1 微米。他们应用这台装置,制取 MOS 型晶体管,在硅片上直接曝光,线宽达 1 微米,用这台机器先后二次曝光图形的重迭误差为 ± 0.5 微米。

日本日立电气公司试制成功单场电子束曝光机,在 2.5×2.5 厘米面积范围内,制取分辨率为 2 微米的图形。

日本除了对电子束曝光机的研制外,对电子束曝光的前途有不少议论,主要有:(1)进一步提高电子束的分辨率(即线宽);(2)采用激光定位、光栅定位等其他定位方法,提高对准精度;(3)用精密控制的离子束注入来代替电子束曝光,即通过掺入半导体的杂质离子化聚焦成束,注入要掺入的地方,这样为使集成电路制造实现自动化创造了条件。当然这些议论还有待实现。

3. 英国起步较早

采用电子束曝光,英国是起步较早的国家,早在 1965 年英国剑桥大学工程实验室已发表过多篇论文,报导他们在电子束曝光技术方面的进展。

据报导英国剑桥大学于 1965 年用电子束曝光装置曝光,试制成功 1 千兆赫的表面声波换能器。同时他们还用这台装置进行电子束曝光开窗,然后用离子注入掺杂,试制成高电导场效应晶体管。到 1967 年剑桥大学又用电子束曝光方法制取梳状条宽为 0.1 微米的表面声波换能器。但关于英国电子束曝光技术近年来的进展,尚未看到报导。

4. 法国急起直追

近年来法国在电子束曝光技术方面进展也很快,在 1970 年召开的第四届“电子束、离子束科学和工艺”国际会议上,法国汤姆逊-CSF 厂发表了该厂用电子束曝光方法,高精度地制取 4 密耳平方的四门互联图形,平均线宽达 0.3 微米。在会议上该厂还介绍了他们的电子束曝光装置靠激光干涉仪和高精度步进马达配合,获得了在 2×2 吋面积范围内维持 0.1 微米的误差,这是目前国外报导的最高对准精度水平。

四、几点情况

1. 电子束曝光的分辨率水平

电子束曝光的图形分辨率同扫描图形的面积有关,同时,图形分辨率的提高也受一定物理因素的限制。近年来国外已达到的水平,如美国国际商业机器公司已在 0.25×0.25 毫米的图形面积内,其分辨率达到 0.1 微米;莫莱斯达托公司采用投影方法在 0.5×0.5 毫米的图形面积内,分辨率达 0.05 微米;美国西屋电气公司已制成在 1×1 毫米图形面积内,分辨率达到 0.5 微米的电子束曝光装置,再经过分步重复后在 2.5×2.5 厘米图形面积内获得了 1 微米的分辨率。图4表示目前国外电子束曝光技术的分辨率水平。同时,图中也表示出几种曝光方法的图形面积与分辨率的关系曲线。其中粗的实线表示由于光的衍射和透镜象差

而形成的光刻法的面积/分辨率的极限曲线。由于实际工艺过程中的误差(如套准、腐蚀、钻蚀、光掩模的衍射等因素),所以实际的光学方法极限由图中的粗的虚线给出。图4中一些有圈的圆点表示在国外实验室里用电子束方法制作器件样品所获得的面积/分辨率关系。标记⊗表示由扫描电子束形成的基本图形,随后此图形再经过分步重复工艺得到较大的总图形,只是稍微降低了一些分辨率。从图4也可以看出,电子束曝光图形所具有的分辨率同一般光刻法相比,要高一个数量级。同时应该指出的是,这里圆圈所示的典型器件,其分辨率还未达到电子束工艺的最终极限。图中的竖线表示“珂洛酞”膜和“Contaminant”膜的分辨率极限,而图中的线数表示图形的尺度同线宽的比例数,仅作参考用。这个数目在连续数字扫描技术中是受到数-模转换器的分辨率所限制的,采用高质量的转换器,10,000条线应当是可能得到的。左上角中的小图同大图的横坐标相同,表示二种扫描电子显微镜中所能聚焦到一个给定束斑的电子束电流,显然,要获得较高的分辨率,在电子束加工制造时,电子束要采用较小的电流。看来,随着电子束曝光技术的发展,在图中的点会向上移动(获得较大的面积)和向左移动(获得较高的分辨率)。

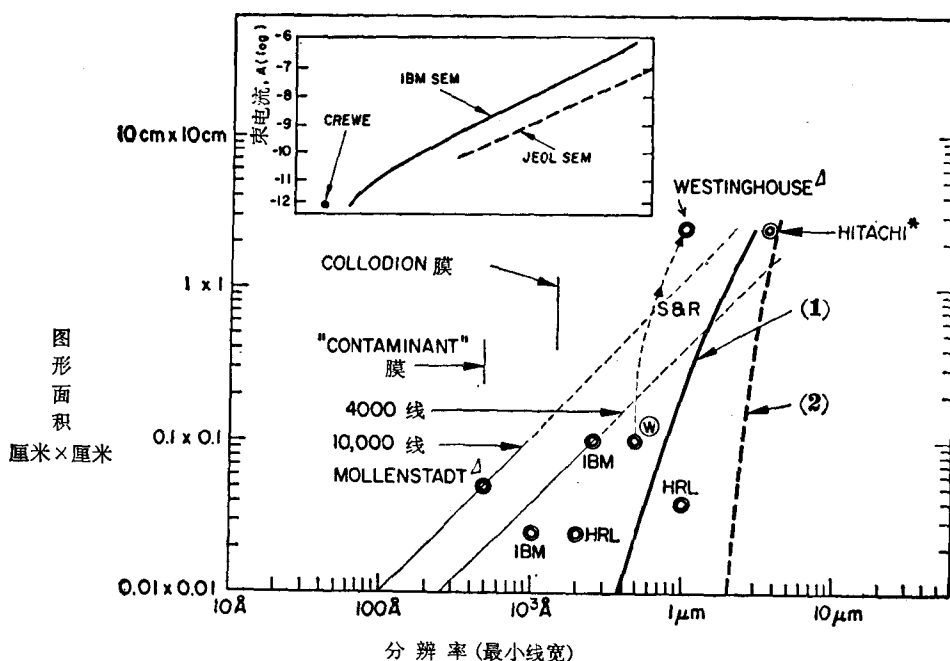


图4 电子束曝光的图形面积与分辨率的关系,并与光刻法的极限相对比。

左上角图绘出了三种电子束系统的电子束电流与束斑直径的关系(横坐标相同)

(1)-光学透镜极限 (2)-光刻法的实际极限 *-单场 Δ-投影法 S&R-分步重复法 HRL-美国休斯研究实验室 IBM-美国国际商业机器公司 Westinghouse-美国西屋电气公司 Hitachi-日本日立公司 Mollenstadt-莫莱斯达托公司 Collodion 膜-珂洛酞膜

2. 电子束曝光的扫描时间

电子束曝光技术的发展除了具有较高分辨率外,还具有加工成本低的优点,而加工的经济性部分取决于对所需图形的扫描曝光时间。这个时间必须足够短,使高分辨率的复杂图形能以所需的边缘分辨率(≤ 0.1 微米)和在合理的时间(几分钟内)完成。同时,可以看到,一般复杂图形的曝光时间对成本而言,一般说来已是足够短的,所以加工成本并不是限

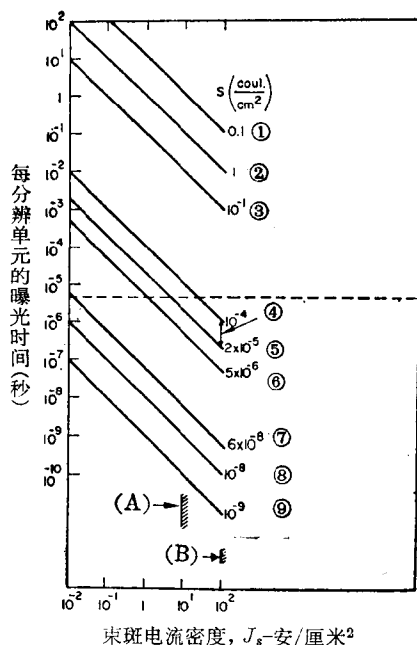


图5 几种不同束加工时曝光时间与束斑电流密度的关系曲线

$S \left(\frac{\text{coul.}}{\text{cm}^2} \right)$ —灵敏度 $\left(\frac{\text{库仑}}{\text{厘米}^2} \right)$ ① 有机“Contaminant”膜 ② 直接离子淀积 ③ 0.2 微米 SiO_2 的离子束加工 ④ 正性抗蚀剂 (PMM) ⑤ 离子注入 MOS 场效应晶体管 ⑥ 负性抗蚀剂 KTFR, KMER, KPR, KOR ⑦ 日本日立公司抗蚀剂 ⑧ 卤化银膜 ⑨ 核子 (A) 达到的离子束极限 (B) 达到的电子束极限

制扫描时间的决定性因素，而长时间的电源稳定性却会使图形的扫描时间受到一定的限。制图5表示几种粒子束的每分辨单元的曝光时间和束斑电流密度之间的关系曲线。由此可见，粒子束加工的灵敏度变化范围很广，粒子束曝光的扫描时间同电流密度成反比。因此人们在设计电子束系统时总是尽量提高束斑电流密度，并使系统能控制得产生可能达到的最小的束斑。然而，这样做也达不到提高扫描速度的目的，因为应用小于所需分辨率的束斑直径来工作时，相应要增加曝光一定面积的点数，从而也就增加行扫描和步进时间。事实上扫描时间很大程度上取决于寻点和定点时间，这二个时间的总和，国外一般达到每点4微秒。因此按照目前的工艺水平，进一步提高扫描速度主要是：① 提高束斑电流密度：通过进一步改善电磁透镜（即减小象差）和增加发射电流密度来达到，但在这一方面国外作了多年的探索，进展不大；② 提高抗蚀剂材料的灵敏度，这方面国外作了不少努力，取得了一定进展。

3. 位置对准

同光学方法一样，要在较大面积范围内采用电子束曝光图形获得较好的分辨率，还必须解决所形成图形的位置正确对准问题。由于一般机械移动会引起样品台的误差以及制造集成电路过程中产生标记变形等原因，因此必须在每片移动时进行位置对准。一般是利用反射电子、二次电子和 $P-N$ 结的电

动势效应等作为从样品表面取出的检测信号。但由于样品表面涂有抗蚀剂，二次电子信号会变弱；用电动势效应则需要一个取出引线；因此一般认为采用反射电子作为检测信号最为适宜。这种方法有二个特点：① 可以在不破坏硅片表面情况下，直接从硅片上取得信息；② 因为检测介质本身就是电子束，所得位置信号的精度较好。国外目前采用反射电子法其位置的对准精度在80~90%情况下是 ± 1 微米，其余10~20%情况其误差为 $\pm 1 \sim 2$ 微米。据日本厂商报导，他们想通过改善偏转放大器的输出变动，使对准精度提高到 ± 0.5 微米。关于位置对准问题，除了上述方法之外，目前国外大力研究的是激光定位和光栅莫尔条纹定位等方法，这些方法可使定位精度提高。据报导，美国贝尔实验室采用激光定位精度已达0.125微米，法国汤姆逊-CSF厂采用激光干涉仪和高性能步进方法使定位误差达到0.1微米。

4. 对限制电子束分辨率因素的讨论

电子束曝光作为半导体器件制造工具的主要优点之一在于能达到较高的分辨率，从而使器件提高频率和提高封装密度。但是分辨率依赖于电子束所能聚焦的束斑直径，而电子束扫描曝光的速率依赖于电子束的电流密度。这里存在着几个限制电子束所能达到的束斑大小和电流的物理效应，这些效应包括透镜象差和横向热运动速度。此外还有其他效应

限制着所能制成的图形大小(如偏转失真),并限制图形的最小分辨率(在抗蚀剂中的电子散射)。

众所周知,射到抗蚀剂材料上的电子束,会被抗蚀剂原子以较大的角度散射。这些散射电子将使抗蚀剂曝光部分大致呈球形,其直径大于束的直径。这个效应如图6所示。图6是一层厚抗蚀剂经直径500埃的电子束垂直扫描过的截面层的扫描电子显微镜显微照相图。由图可见,500埃的电子束在表面上产生了一个约2,000埃宽的颈和一个直径约为4,500埃(即九倍于束直径)的圆柱。这说明电子束散射确实会对分辨率造成严重限制。由于被曝光的孔的半径 R ,近似地依照 $V^{1.75}$ 随着电压变化,所以看来较低的电压将给出较好的分辨率。但是,电压低又会使电子束直径增大,影响分辨率,因此这几者之间需要有所折衷。

束斑的电流密度(J_s)当然是与束的总电流以及靶上的束斑直径有关。未被偏转的束斑直径是受到三个主要效应所限制,这就是聚焦透镜的球面象差和色象差以及粒子的横向热运动速度。这三个效应的每一个都可认为会影响束直径的极小值,通常被称为“最小模糊斑”(disc of least confusion)。图7和图8表示上述两种象差效应的典型电子轨迹。简单地

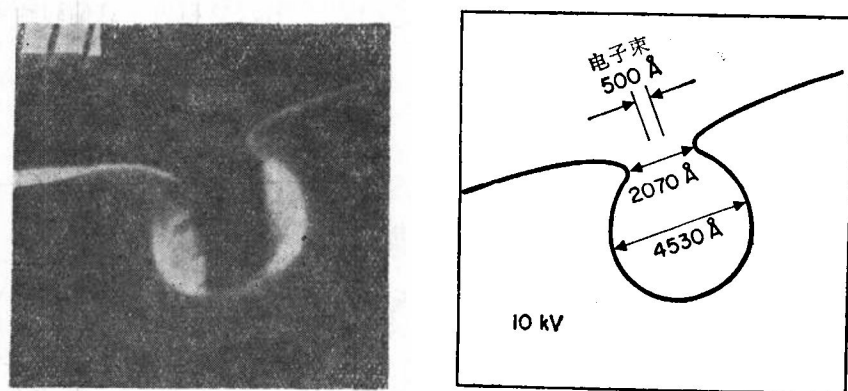


图6 电子束在抗蚀剂材料中的散射图

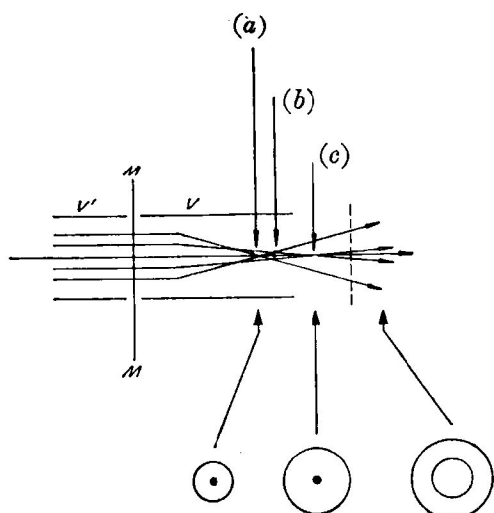


图7 电子束受透镜球面象差的影响

(a)一边缘束的焦点 (b)一最小模糊斑(最小直径)
(c)一实际的束焦点

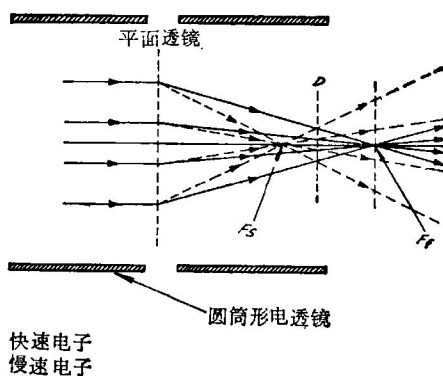


图8 电子束受透镜色象差的影响

说,引起球面象差,是由于透镜的聚焦场几乎总是束的外围强于束的中心轴,因而在不同半径上进入透镜的电子被聚焦在轴上不同的点。色象差是指透镜对粒子能量的灵敏度,由于电子能量总是有些扩展(由于发射的热运动速度,电源波动等原因),这个效应也将使电子束散焦。

用以使电子束偏转的电场或磁场会使原先为圆形截面的束失真为非圆形的束;另外,虽然被加在偏转系统上的是一个线性偏转电压,而在靶上出现的图样可能会有失真。这些效应如图 9 所示,被偏转的束斑可失真成相当奇怪的形状。图中所示为典型的彗形象差,这是离轴偏转场的一种典型缺点。即使朝一个方向偏转的电子束,也将由于象散而成为一个非圆形的束斑。当电子被偏转到不同的角度时,它们会在距电子枪不同距离处聚焦,如图 9 所示。因此,在屏上所看到的束斑大小将随偏转角而变化。如果所加的偏转电压是想在屏上形成一个长方形的图形,那末如在图 9 中所示,这图形一般会出现失真。图 10 所示为国外扫描电子显微镜中经过失真校正和未校正的电子束的实验数据。虚线是从简单的磁偏转失真理论计算的。由图可见,若经过校正,束斑直径增加一倍(一个极端情况)时,可以进行扫描的距离几乎距中心每一边 1 毫米。对于 0.5 微米的束斑来说,这相当于总偏转约 4,000 个束斑直径。

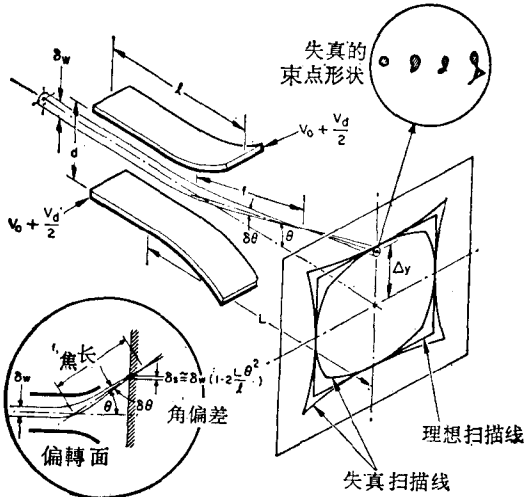


图 9 由于电子束偏转引起的束斑和图形失真的几种形式。左下角图表示偏转系统焦距随偏转角变化的情况

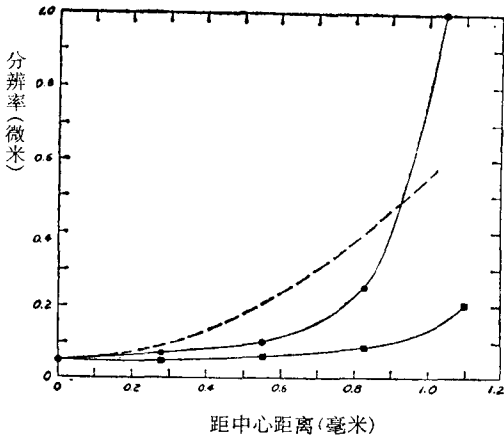


图 10 扫描电子显微镜经偏转失真校正及未校正时所测得的束斑尺寸与偏转距离的关系
偏转散焦: ● 未校正 ■ 经校正 --- 计算值

除了使电子束聚焦或偏转的电场或磁场会引起电子束失真效应之外,电子束本身包含着两个其他形式的失真因素。其中之一是由束电荷引起的束发散。电子是按照熟知的平方反比定律互相排斥。因此,由于在某些半径下空间电荷的发散力会使电子离轴散开,所以一束原先已会聚的电子束将达到最小的半径(不为零)。但如果束的电流值过低和束电压过高,则这种空间电荷发散效应通常不会成为确定束斑尺寸的一个限制因素。电子束本身包含的第二个失真因素是电子束中带电粒子从热表面上发射出来所具有的横向无规速度分量。电子从处于温度 T_e 的固体表面发射时,一般具有麦克斯韦速度分布 $f(v_r) = k \exp(-mv_r^2/2kT_e)$ 。在通过后来的加速和聚焦系统时,这个横向速度分布转变成聚焦束斑

的电流密度高斯分布。如果聚焦束斑的会聚角由 θ 表示, 那末可以证明, 束斑的可能获得的最大电流密度 J_m 与发射出来的电流密度 J_0 之间关系, 由下面表示电流密度的兰米尔 (Langmuir) 极限的方程给出:

$$J_m \approx J_0 \frac{11600 V_0 \theta^2}{T_0} = \frac{4}{\pi} \frac{I_b}{d_g^2},$$

其中 d_g 是“高斯”束斑直径, 即受横向热运动速度效应所限制的束斑直径。

上述三个效应引起的束直径与透镜参数的关系方程式是:

$$d_s = \frac{1}{2} C_s \theta^3 \quad (\text{球面象差})$$

$$d_c = C_c \frac{\Delta V}{V} \theta \quad (\text{色象差})$$

$$d_d = \frac{15}{\sqrt{V}} \theta \quad (\text{衍射})$$

$$d_g = \frac{1}{\theta} \sqrt{\frac{I_b}{\frac{\pi}{4} F J_0 \left(\frac{11600}{T_0} \right) V_0}}$$

其中 C_s 和 C_c 分别为球象差和色象差系数, θ 是电子束射到靶上的会聚角的一半, I_b 和 V_0 分别为靶上的电子束电流和电压, 而 J_0 和 T_0 为电子从源射出的电流密度和等效温度。 d_d 是由孔径衍射所限制的最小束斑直径。 F 是一个系数, 它由高斯密度分布来定义的束直径所确定。如果 80% 电流被包括在直径 d_g 的圆周内, 则 $F=0.62$ 。

由于在这些方程式中 θ 是独立参数, 所以描绘出束直径对 θ 的关系图是有用处的, 如图 11 所示。可以看出, 影响束斑尺寸的主要效应是横向热运动速度 (即 d_g , 与束电流有关) 和球面象差 (d_s)。色象差 (d_c) 和衍射 (d_d) 相对来说是不重要的。此曲线图在 10^{-11} 安培的电流时预示束斑尺寸为 200 埃。

上述数据表明, 可供制造器件用的电子束直径可以被聚焦到小至约 200 埃, 并在可允许失真的情况下, 在 0.2×0.2 厘米的面积上进行程序扫描。在抗蚀剂上的线宽可达 0.1 微米或更小。

电子束

$C_s = 2 \text{ cm}$

$C_c = 1.6 \text{ cm}$

$J_0 = 5 \text{ a/cm}^2$

$\frac{\Delta V}{V} = 10^{-4}$

$V = 10 \text{ kV}$

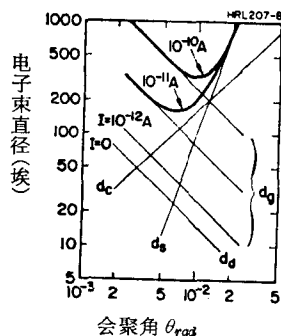


图 11 计算的束斑直径和会聚角的关系

参 考 资 料

- [1] Electron and Ion Beam Science and Technology Fourth International Conference 1970.
- [2] IEEE Spectrum Jan. 1971, p. 23.
- [3] Solid State Technology June 1970.
- [4] Electronics Feb. 1971, p. 22~23.
- [5] Electronic Packaging and Production Jan. 1971, Vol. 11, No. 1.
- [6] Electronic Packaging and Production March 1971, Vol. 11, No. 3, p. 80.
- [7] IEEE Transaction on Electron Devices Vol. ED-17, No. 6, 1970.
- [8] IEEE Transaction on Electron Devices Vol. ED-17, June 1970.
- [9] Microelectronics Reliability Vol. 4, 103, 1965.
- [10] Journal Science Instrument Vol. 44, p. 231, 1967.
- [11] Optik Vol. 25, p. 471, 1967.
- [12] (日)電気試験所集報 1969, Vol. 33, No. 6, p. 611~622.

- [13] (日)機械設計 1970, 2 月, p. 31~36.
- [14] Microelectronics and Reliability Vol. 8, No. 2, May 1969, p. 101~111.
- [15] 科学技术参考资料 国外电子技术(3) 1970 年第 7 期.
- [16] 国外电子动态 1972 年第 1 期.
- [17] 半导体情报 1971 年第 4 期.
- [18] 国外半导体器件光刻制版动向 1971 年 9 月.
- [19] 日、美电子工业 1970 年 11 月.
- [20] Electronics June 21, 1971, p. 83.
- [21] Electronic Packaging and Production Feb. 1971, p. 62.
- [22] 国外科技动态 半导体技术(1) 增刊(6) 1969, 11, p. 16.
- [23] 半导体情报 1970 年第 3 期 p. 47~55.