

微细加工技术发展研究

Research on Microfabrication Technology

谢常青 陈梦真

(中国科学院微电子中心, 北京 100010)

微细加工技术是集成电路(IC)工业的基础,是半导体器件研究的必要手段。其中的 IC 以动态随机存储器(DRAM)为代表,具有肉眼无法看见的记忆功能结构,而半导体器件以小尺寸器件为主。为了制备大规模集成电路(VLSI)、超大规模集成电路(ULSI)和量子器件,微细加工技术正由微米、亚微米、亚半微米一直向纳米级和量子化方向发展。除了 IC 技术外,液晶显示器(LCD)技术、微机械技术和光电子技术的发展同样离不开微细加工技术水平的提高。人们越来越感到以微细加工技术为支柱的微电子技术正在成为一个国家综合国力的重要体现,成为国际竞争的焦点。因此许多发达国家目前都加大了在微细加工技术研究方面的投资强度,以期取得微细加工技术领域的领先地位。

微细加工技术包括曝光技术(即光刻技术)、刻蚀技术、浅结掺杂技术、超薄膜形成技术等。其中的曝光技术是微细加工技术的核心。

一、国外微细加工技术在 IC 方面的成就

国外微细加工技术在 IC 工业方面取得了很大的成就。表 1 是 DRAM 发展所要求达到的光刻技术水平和近年来 DRAM 的发展趋势。需要特别提到的是,1991 年,日本日立公司研制成功 64M DRAM,其加工线宽为 0.3 微米,芯片面积为 9.74×20.28 平方毫米,集成度为 1.21×10^8 个元器件;1992 年,日本富士通公司推出 256M DRAM,加工线宽为 0.2 微米,芯片面积为 16×25 平方毫米,集成度为 5.6×10^8 个元器件。由表 1 不难看出,国外在微细加工技术研究方面取得的进展是很快,以致于每隔几年就能推出一代产品。以下是生产 256M DRAM 所需达到的微细加工技术水平:光刻 0.25 微米(套刻精度 ± 0.08 微米,线宽控制 0.04 微米),无机且能真空处理的全干刻蚀剂技术,0.1 微米以下浅结技术,低温工艺和平面化,全干法加工、刻蚀、清洗、

CVD 铝和铜金属化,全自动化。

表 1 DRAM 发展对光刻技术的要求及国外 DRAM 的发展情况

DRAM 规模	景深(微米)	最小线宽(微米)	生产年代
64k	7.0	3.0	1978
256k	6.0	2.0	1980
1M	4.0	1.2	1984
4M	3.0	0.8	1986
16M	2.5	0.5	1988
64M	2.0	0.35	1991
256M	1.5	0.25	
1G	1.5	0.18	

二、国外微细加工技术在半导体器件研究方面的成就

国外微细加工技术在半导体器件研究方面也取得了很大的成就。1993 年,日本东芝公司的研究开发中心研制成功门长度仅为 0.04 微米的 n 沟道 MOSFET,并且可在室温下工作。德仪(TI)公司在 1993 年也研制成功晶体管特征尺寸为 0.02 微米的集成电路,在该特征尺寸下,电子已经停止了粒子活动,开始转化为类似波的活动。目前国外研制的 HEMT 器件的最小栅长仅为 25 纳米。另外,国外也利用高水平的微细加工技术制作出了与电子相干长度相当的纳米结构(包括量子线、量子点阵、量子点接触等),并对其物理过程进行了广泛的研究,提出了电子波器件的可能性。美国《物理评论》杂志指出,以量子效应为基础的电子波器件有可能成为 ULSI 技术的基础,并将导致未来电子学发展的一场新革命。

国外在 IC 工业和半导体器件研究方面所取得的成就无一不得益于微细加工技术的发展。可以

说,国外的微细加工技术正在朝着物理加工极限发展。

三、光刻技术的发展

光刻技术是微细加工技术的核心。考核光刻技术的质量指标主要有分辨率、焦深、生产效率等。对于未来可能应用于IC工业的光刻技术,目前争论较多的是光学光刻和X射线光刻。

根据瑞利公式,投影光学系统的分辨率 $R=k_1\lambda/Na$,其中 λ 为曝光波长, Na 为镜头的数值孔径, k_1 为条件系数。不难看出,提高光刻分辨率的途径有三:一是增大 Na ,二是缩小 λ ,三是提高 k_1 。80年代中期,人们曾把增大 Na 作为提高分辨率的主要途径,但为了满足芯片面积日益增大的要求和提高生产效率,必须在增大 Na 的同时又加大视场面积和降低畸变,这就使光学设计越来越难。于是人们开始转向缩小曝光的波长,但是根据焦深公式: $DOF=k_2\lambda/Na^2$,增大 Na 和缩小 λ 又不可避免地导致焦深的急剧减小。这似乎表明,光学光刻快要走到了尽头。

然而,马克·赖文森于1982年提出了移相曝光技术,也就是通过改变辐射光相位的方法使曝光图形的分辨率和焦深得以提高。它包括移相掩模曝光技术、片子移相曝光技术、改进照明光源的移相照明技术等。光学光刻有了一种“柳暗花明又一村”的感觉。目前IC工业生产中的16M DRAM采用的是i线($\lambda=365$ 纳米)紫外曝光,IBM和日立公司目前正在考虑采用i线结合移相曝光技术或者激光曝光技术($\lambda=248$ 纳米)来生产64M DRAM,1992年日立公司推出的256M DRAM所采用的光刻技术也是光学曝光技术。最近,日本科学家宣称,采用移相曝光技术可以使加工线宽达到0.15微米。但是必须看到,所谓的移相曝光技术其实已经超出了普通光学曝光的范畴,其掩模的制作难度很大,制作成本也很高。而且,要生产1G DRAM(特征尺寸0.18微米)及1G以后的DRAM时,光学光刻很难有所作为。这时,人们认为X射线光刻会显示出其巨大的优越性。

X射线光刻最初是IBM公司的史密斯(H. I. Smith)于1972年提出的,后来许多国家都投入巨资进行研究。毫无疑问,同步辐射X线光源是最好的X射线光源,它具有光强强度高(达到100mW/cm²以上,比普通的X光管高两个量级)、准直性好、光强均匀等优点,所以目前研究最多的是同步辐射X线光刻。同步辐射X线光刻具有分辨率高(最近法国微结构国家实验室CNRS已用同步辐射X线光刻技术曝出线宽为50纳米,间隔为100纳米的周期性重复图形)、工艺宽容度大、生产效率高、

单片芯片的生产成本低(相对于光学光刻)等优点。它包括同步辐射X线光源、掩模、光刻胶、对准装置四大部分。其中的掩模制作是同步辐射X线光刻的关键,目前各国都普遍采用电子束光刻的办法制作母掩模的图形,然后用X线曝光的方法拷贝母掩模,可以大大地降低掩模的制作成本。

X射线光刻自从问世以来进展一直比较缓慢(相对于光学光刻而言),但是1988年以后国外关于这方面的报道陡然增多,表明X射线光刻技术已取得较大的突破。以下是近几年来国外采用X射线光刻技术在储存器研制方面取得的进展:1990年,1M DRAM(特征尺寸1微米)和64K SRAM研制成功;1992年5月,256K SRAM(特征尺寸0.5微米)研制成功;1992年9月,512K SRAM(特征尺寸0.35微米)研制成功;1993年2月,512K SRAM(特征尺寸0.25微米)研制成功。另外,同步辐射X射线光刻应用于微机械制造(即LIGA技术)、量子线的制作等方面的研究工作近年来也取得了较大的进展。

同步辐射X射线光刻应用于IC工业的最大障碍是同步辐射装置的成本很高和掩模制作技术的困难。同步辐射X射线光刻研究人员目前正在建造小型专用光刻储存环和争取掩模制作技术的突破。但是,关于同步辐射X线光刻技术是否能最终应用于IC工业生产的问题,迄今仍争论不休。不过,目前普遍认为,2000年以前IC工业生产采用的光刻技术仍然是光学光刻技术,只有当DRAM发展到1G以上时,X射线光刻技术才会逐步显示出其生命力。但是,毫无疑问,放弃对X射线光刻技术的研究是一种短浅、愚蠢的行为(X射线光刻中的许多技术,如掩模检测与修复技术、对准技术、高质量的电子束技术等,均可直接应用于光学光刻)。正因为如此,国外许多大公司和研究单位,如美国的IBM公司、摩托罗拉公司、贝尔实验室、电报电话公司,日本的NTT,Photon factory,法国的CNRS等都正在进行这方面的研究工作,以期能在将来的光刻技术中取得领先地位。可以预言,X射线光刻技术和光学光刻技术的竞争不仅是技术上的竞争,也是经济力量上的竞争。

四、我国的微细加工技术水平

我国自从1985年研制出第一块IC芯片以来,微细加工技术取得了较大的进步。在DRAM研制方面,1986年研制成功64K DRAM,1990年研制出1M汉字ROM,其加工线宽为1.5微米,集成度为 1.06×10^8 个元器件。1986年我国开始批量生产5微米技术产品,1994年开始批量生产3微米技术产

(下转第14页)

站,可以为“分流工程”所用,这就减少了工程量,也提供了便利于工程的能源。再次,该工程有一次投入的特点,不象“护岸工程”那样重复进行,变成长期的财政包袱。最后,该工程除国家投资外,完全可以采取多渠道、多元化的筹资方式,待工程完工发挥经济效益后再作补偿,这也是一种解决经费的出路。

3. 技术上可行

该工程的实施,从技术上看,难点有二:第一是分流点的选择。本文提及的刘家峡水库作为分流点,仅仅是个很初步的判断。如果此分流点不可行,在刘家峡至青铜峡之间的地段也是可以找到合理的分流点的;第二是,下分流先要通过山区,地貌条件极其复杂,工程难度较大。但它在目前的工程技术能力条件下也是可以克服的。一方面,中国水利工程源远流长,古有都江堰水利工程技术,今有“南水北调”东线工程技术。这些技术完全可以为“分流工程”所利用。另一方面,国外有高扬程、大流量的抽水机和长距离、大流量的输水技术,“分流工程”也可以借鉴。

四、“分流工程”建成后带来的效益

1. 因为上分流变成一条内陆河后,在河口镇处即消失,其余黄河水由下分流承担,所以黄河就避开了水土流失极为严重的“黄河北干流”(是位于内蒙古托克托县的河口镇至陕西省韩城市的禹门口之间的连续峡谷河段。它流经水土流失极为严重的黄土丘陵沟壑区,是黄河泥沙特别是对下游河道淤积影响较大的粗沙的主要来源)。黄河水就不再冲刷泥沙下泄,下游基本上无泥沙淤积。这样,黄河的泥沙问题即可根治,黄河即可实现长治久安,中华民族的千年忧患即可消除。而且,由于下分流流经水土保持良好的关中地区,河水清澈,因而有可能实现黄河水变清的千年梦想。

2. “分流工程”的建成初步估计为10~15年(主要看论证和实施的进展)。上面已论述,黄河在未来15年内不

会发生大的危害,故利用这个历史安全期实施“分流工程”可以及时治理黄河。这是其它措施不能比拟的。采取生物措施,使植被覆盖率达到50%,至少需要几十年;康晓光先生的“坝系农业”预计要50年,这实际上是治黄事业难以等待的、难以确保安全的时间表。因此,“分流工程”具有时间效益。

3. 未建“分流工程”之前,为把大量泥沙输送入海,每年必须消耗约220~240亿立方米的水量。而一旦“分流工程”建成,由于泥沙问题解决,就可以腾出输沙用水用于灌溉,从而解决黄河流域的缺水问题。此外,该工程还具有发电、运输、维护生态、旅游、水产、养殖等综合功能。因此,该工程的建成,可以使黄河重焕青春,成为一条走向持续发展的大河流域,再次造福中华民族。

4. “分流工程”建成后,不仅为黄河流域的市场建设提供有利条件,而且也加快了黄河自身走向市场的步伐。这是因为黄河水大多为工程控制,水库构成水资源的供给方,而华北平原、黄河上游普遍缺水,构成水资源的需求方。这样,黄河流域的水市场即可形成,并且可望产生良好的经济效益,用以补偿建设资金和建立“保护分流工程基金”。

根据以上分析,是否可以说“分流工程”可能是根治黄河的一种战略选择。当然“分流治黄”也有其局限性,主要是:虽然“分流工程”控制了上分流的水量,基本上制约了黄河水对“黄河北干流”泥沙的推动力,但对中游天然径流对泥沙的推动无能为力。据统计,中游主要产沙地区天然径流达100亿立方米,而且集中在伏秋暴雨季节,它很可能冲刷泥沙下泄,从而威胁下游。因此,全面治理黄河,除“分流工程”外,还必须辅之以“兴修水利、植树造林、退耕还牧、建造坝系、迁移人口”等措施,强化水土保持。十分清楚,“分流工程”并不排斥已发挥效益的各项治黄措施,只不过届时它将发挥主要作用,与其它设施、措施相辅相存,共同对黄河的综合治理发挥作用。

(责任编辑 蔡德诚)

(上接第37页)

品。“八五”科技攻关项目安排了0.8微米技术,“攀登”计划安排了0.5微米基础技术研究。预计这些安排将会使我国在未来的IC工业竞争中取得一些主动权。但是必须清楚地看到,我国的微细加工水平与国外确实存在着较大的差距。

在同步辐射X线光刻研究方面,我国已建立了BSRF和NSRL两个同步辐射X射线光刻站。1990年6月,成功地进行了首次同步辐射X射线光刻实验。1993年11月,同步辐射深光刻技术(即LIGA技术)取得了较大进展。

五、结束语

鉴于微细加工技术是IC工业发展的关键,微细加工技术的突破将会带来一场新的技术革命。我们认为:

1. 必须提高对微细加工技术研究重要性的认识,制订好提高我国微细加工技术水平的战略规划,对有全局作用的微细加工关键技术要有重点突破。

2. 加快提高我国微细加工设备的研制水平。一代设备推出一代技术,一代技术推出一代产品,微细加工设备已成为制约微细加工技术发展水平的重要因素。因此,研制出高精度、高度自动化的微细加工设备已成为摆在我们面前的紧要任务。

3. 加强基础技术研究。几十年来我们在半导体器件研制和IC工业发展中一直处于较为被动的局面,一个主要的原因就是对于带有基础性的、全局性的基础技术研究缺乏足够的重视。对于电子束光刻技术、同步辐射X线光刻技术、反应离子刻蚀技术、电子束掺杂技术以及小尺寸器件的制作技术等都不重视。

4. 统盘全局,克服现在在微细加工技术研究方面技术力量比较分散的缺点,象抓系统工程那样抓微细加工技术研究,利用各研究单位的技术优势,联合攻关。

5. 加快微细加工技术人才的培养。技术竞争的结果最终必然是人才的竞争,因此必须注重对微细加工技术研究人才的培养。(责任编辑 孙立明)