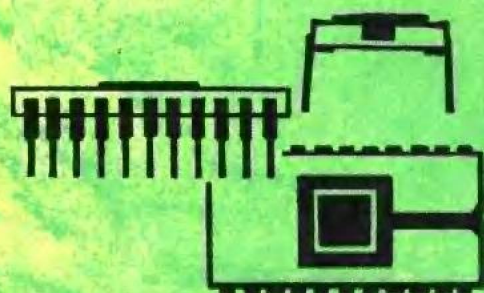


硅器件技术新进展

GUI QI JIAN JI SHU XIN JIN ZHAN

《硅器件技术新进展》编译组编



.1-11

科学技术文献出版社

前 言

本书选译自国际会议论文集《半导体硅——1977年》(Semiconductor Silicon 1977)。该论文集收集了在美国召开的第三届《硅材料学和工艺学国际讨论会》的90篇论文。

原论文集内容比较丰富,从硅材料的制备一直到硅器件的制造、检测,共收集了九十篇论文。但限于篇幅,我们只能收集其中适合我国实情的文章二十三篇,翻译出来供大家参考。

本译文集的内容主要分为两大部分:材料的制备、诊断和器件制造科学。前一部分主要介绍了晶体生长现象和晶片的制备、硅和介质薄膜的淀积和生长以及各种缺陷的诊断、控制和利用。后一部介绍了热氧化和扩散,离子注入,等离子腐蚀以及金属化。这些问题也是国内半导体行业比较关心的问题。特别是有关缺陷的检测、诊断和控制方面的文章,占了本书相当一部分篇幅,它对我们有一定的参考价值。

本书的读者对象是从事硅材料和器件制造的工程技术人员和高等学校有关专业的教师和学生。

编 者

1980.10.1

目 录

硅片加工工艺学:切片,腐蚀,抛光·····	1
硅鉴定技术的趋向·····	10
扫描超声显微镜·····	14
硅工艺中红外光测弹性测量的应用·····	18
硅中的氧·····	22
论硅器件中原始的长入缺陷与加工过程中引入的缺陷及层错的消除·····	32
不产生晶体缺陷的高浓度扩散·····	40
浓磷扩散硅片的反常弯曲分析·····	50
用双层源改进硅的高浓度砷扩散·····	56
使用高压电子显微镜(HVEM)研究硅器件晶格缺陷的优点·····	61
硅片上由多晶硅薄膜引起的周期性应力场影响下的位错结构·····	67
CVD 硅外延膜中堆垛层错核化和生长机理 ·····	73
双极型晶体管中发射区“管道”的由来和发展·····	81
硅微电子学中的物理限制·····	88
用稳态和瞬态的结电容和电流的方法探测半导体中的缺陷和杂质中心·····	93
集成电路工序的工程模型及其应用 ·····	106
新时代的集成电路工厂——概貌·····	113
大规模集成电路制造中场效应晶体管器件参数的模拟方法·····	121
在双极型集成电路的设计和工序控制中注入和扩散模型方法的最新进展·····	128
高频晶体管和集成电路的新工艺方法·····	139
用离子注入氧化隔离方法制成的肖特基 TTL 的特性 ·····	147
在等离子体腐蚀中用光发射谱进行终点探测·····	153
采用微波激发的长寿命活性物质的一种干法腐蚀工艺·····	161

硅片加工工艺学:切片,腐蚀,抛光

Anthony C. Bonora

过去的十年,半导体硅领域中所做的大量工作一直是致力于对硅材料性质的科学了解;目前,正努力把批量生产工艺应用于硅的制造。从硅锭到抛光的硅加工技术,在过去三年中取得了稳步的进展,制造成本的连续下降而硅片质量不断得到改进这一情况就证实了这种进展。本文主要介绍这方面的进展,这些进展使三年前的制造技术发生了重大的变化。

大多数硅制造厂家的硅片生产在基本的操作方面是十分类似的,但是每家公司各自都有自己典型的专有的关键工艺与设备,这些工艺与设备可使得他们的产品的质量和成本具有各自的特点。在材料加工的传统领域方面,竞争导致了一系列的新发展,这些新发展包括:

(1) 硅锭的研磨——皮带和外圆研磨机械正被采用高速金刚石杯形轮的机械所代替。

(2) 切片——目前正在探索扩大内圆金刚刀切片方法的能力。把刀片寿命和切削速度提高许多倍是可能的,并且,这方面的研制工作已取得了有希望的结果^[1]。

(3) 硅片腐蚀——技术人员发现腐蚀剂的状况对片子的平整度起着关键性的作用。为了改进硅片的质量和生产率,已经制造并发展了采用匣式操作的自动腐蚀机。

(4) 硅片分选——片子厚度和电阻率的人工估测已被微处理机控制的采用一匣一匣操作方法的分类机器所代替。

(5) 抛光——晶片抛光时不再用蜡固定,各个公司各自采取不同的固定方法。Siltec公司采用软接合技术的系统,目前正处于产品研制阶段,操作特性良好。在投影光刻应用中,对硅片平整度的要求已经制订了一项重要的新的质量标准:非线性厚度变化(NTV)。

(6) 抛光薄片的检查和包装——目前的包装工业正处于老式的扁平塑料盘包装和新式的匣型包装的转变阶段。新式包装给用户提供了好几个好处,但这需要不同的内部操作程序,并且,如要使用得好,研制新的检查设备是必不可少的。

硅锭的研磨

晶体生长操作之后,为了确定电阻率和结构质量,把所得到的硅锭“修剪”成适当长度的数段作为估值操作之用。随后把硅锭研磨成所需的直径。多年使用的研磨方法有如下三种:

(1) 使用皮带型无中心磨床——大约 10 英寸宽和 10 英尺长的一根粗磨皮带绷直在两个滚筒之间,其中的一个为从动滚筒。要研磨的硅锭被支撑在其中一个皮带滚筒和一个“调节”轮之间的工作架上,这个“调节”轮使硅锭与粗磨皮带适当接触,它还控制硅锭绕它自己轴的转速。使用这种类型的机器需要相当熟练的操作人员,以达到所希望的精度而不使硅锭破碎。

(2) 使用轮型无中心磨床——一个宽的磨料轮代替了皮带轮,它采用一种“压碎”型研磨

方法。所使用的轮子材料包括碳化硅、金刚石和钢玉粉。但是操作者的熟练程度还是很重要的，因为轮子很硬不易变形，当硅锭断面稍带三角形或正方形时，硅锭便更易损伤。

(3) 使用轮型中心磨床——将硅锭固定于中心并和一个窄的(1至2英寸)研磨轮不断接触。硅锭沿轴向通过轮子并在每次通过时被轮子轻轻切削一次。这方法可使加工面光滑并且无震动，但移动速度很有限，轮子寿命也短，除非使用昂贵的金属粘结金刚石轮。

除了上述三种研磨方式之外，最近又发展了一种新的硅锭外圆研磨法。它的机械结构采用高转数的小直径金刚砂杯状轮，这个轮子的转轴和硅锭轴成 90° 交角。与其它方法的研磨轮和硅锭之间成点接触或线接触方法相比，这种研磨机磨轮和硅锭的接触面比较大。因此，它能够以非常高的速率研磨而工件损伤量最小，而且尺寸控制良好；一次可以把硅锭直径磨掉1英寸。这种机械使用的磨料轮的成本是前面叙述过的其它三种磨床所用研磨设备成本的一小部分，并且只需要比较少的技术和经验就可操作机器(见图1)。

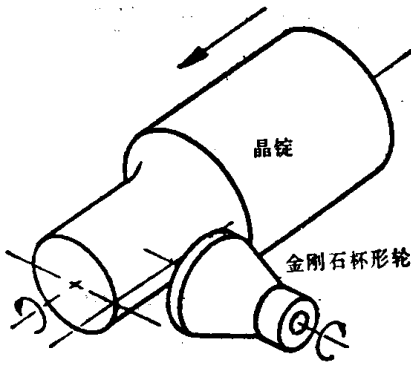


图1 金刚石杯形轮研磨加工的结构

研磨操作之后，对晶体进行腐蚀以去除加工损伤；一般在直径方向上可以腐蚀掉10~40密耳厚的一层。

切 片

内圆金刚刀切片的基本方法在工业界仍处于优势地位。最近几年主要在机械的结构、刀片制造和切割技术几方面进行了改进。

1. 目前的机器加工技术

切片设备的提供者和使用者正致力于改进下列几点：

(1) 刀片头和硅锭之间行程的精确度——目前可提供的设备包括相对于刀片在枢轴上转动的硅锭托架，相对于硅锭在枢轴上转动的刀片头，以及相对于刀片头滑行在精确导轨上的硅锭托架。它要求行程精度量级是 $0.00005''$ /英寸；这在大多数新的机器上是能实现的，但在连续操作的生产环境中要保持这个精度是困难的。行程如不精确会产生弯曲的和倾斜的硅片、锯痕并减短刀片的寿命。在刀刃和硅锭之间的无规则的相对振动对于硅片表面质量也是至关重要的，它是地板振动、动力不平衡、转轴粗糙以及进刀速度有起伏的结果。这些因素对机器的影响(振动)能够借助于机器部件的刚性和阻尼特性的适当结合而减少到最小。这些振动的严重性可从下列事实看出，在切削面的一个振幅为 $1/10$ 密耳、频率为50周/秒振动的相对运动将使瞬时切削速度产生一个 $\pm 50\%$ 的变化(假定额定进给率是每分钟2英寸)。

(2) 刀片的扣紧——在过去的几年里，切割机械几乎全部从机械扣紧的头子换成了液压张力的设计。这些头子不需要操作者很多的时间和安装刀片的熟练技巧。但它也不是没有缺点的。它的不足之处是精密确定刀片中心的能力比较差，以及在所施加的液压和所造成的刀片膨胀/张力之间的关系没有规律。切片时径向跳动的影响是极为重要的，如径向跳动1密耳，除对瞬时进料速度会造成很大变化以外还给机械结构引入振动力。为了克服这些困难，目前有回复到机械扣紧头子的趋势，但可能要以牺牲硅片表面光洁度和方便的操作控制为代价。

(3) 生产过程——新刀片要求细心地安装和校准中心，随后进行打磨，通常包括使用金刚

砂或者氧化铝“整形棒”以提供新开口的金刚石切片刀刃。操作者常常用比较低的切片进刀速度开始操作,并在最初的 400 片期间把切片速度增加到每分钟 1.3~2.5 英寸。如要充分地保证产品没有弯曲、锥形、加工损伤以及“锯纹”,看来需要对切片进行连续监控。熟练的操作者将会根据需要调整进刀速度、冷却剂流量以及修整刀片,以维持最佳的切片条件。

(4) 刀片的制造——典型的金刚石内圆刀片由 4~6 密耳厚的不锈钢芯构成,用金刚石-镍的基体材料镀在钢芯的内圆上。这种基材是刀片的心脏;它决定切片速度、表面光洁度和刀片寿命。基材的主要特性包括金刚石的大小和形状,镍的硬度和电镀技术,以及在镀层和芯子之间的相对尺寸。在刀片的整个使用期间,刀片内圆的每一个圆周单元将切割好几百英里长的硅,在这个过程中,金刚石将被磨损和损失掉。当使用大粒的金刚砂(50~80 微米)和硬的镀镍层时,能得到较长的刀片寿命,但表面光洁度特性将会多少有些降低。刀片制造工艺中非常重要的因素包括基材的截面形状,已找到一些能提供较好功能的截面,这有点类似于普通机械工具工艺中的余隙角。

2. 其他切片方法

目前已试验了一些其他的硅片切割技术,其中有些技术已小规模地用于生产^[1~2]。这些方法包括:

- (a) 带有磨料砂浆的单金属丝;
- (b) 涂有金刚石的单金属丝;
- (c) 金属丝和刀片的火花放电;
- (d) 在一种反应介质中使用电流的电化学方法;
- (e) 超高压(每平方英寸 100,000 磅)水喷射;
- (f) 具有金刚石涂敷刀片的带状锯;
- (g) 脉冲激光放电;
- (h) 往复式单刀片和多刀片。

这些方法在大量生产中还无望同内圆技术挑战。这些技术的典型缺点是会留下过分的斜度、加工损伤不能预测,以及机器的生产效能不高。

3. 未来的发展

在七十年代初,曾推测过内圆切片技术不能用于切割直径 3 英寸以上的晶体;现在已经证明这是不对的,因为 4 英寸直径的晶体经常用各种锯条来切割。事实上,目前市场上有几种锯子能切割达 6 英寸直径的晶锭。在大直径的切片中,目前没有迹象显示出可能会遇到任何严重的障碍。如果在将来内圆切割仍将继续占优势,则可能在以下几个方面有所改进。

(1) 薄切口切片——目前刀片造成的切口损失在 10~13 密耳之间,这等于报废了 30% 以上的硅晶体。如果能用 6~10 密耳刀片来进行切片,是非常有利的。这样一种具有薄芯子和减小金刚石间隙的刀片,也许能够通过张力控制、机器精度和刀片结构方面的改进来实现。

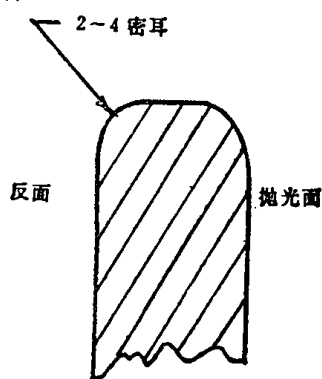
(2) 高进刀切片——当前工业上 3 英寸硅锭的平均切割速度为每分钟 1.2~1.5 英寸,但这并不是上限。人们经过广泛的研究证明,在对现有的技术作适当的改进之后,完全可以实现每分钟 3~5 英寸的切片速度。甚至 4 英寸直径的材料也能以每分钟 2 英寸以上的速度进行切割。对要求降低生产成本的太阳能电池材料来说,高进刀切片可能是特别重要的。

(3) 低 NTV 切片——在某些应用(光刻)中,非线性厚度变化(NTV)不超过 1/10 密耳的切片是非常有益的。目前一般要用两面研磨的方法来使产品达到所需的平整度。但是,研磨

会造成材料的进一步损失和成品率的进一步下降以及其它的消耗。人们努力研制的一下子就达到所需硅片平整度的切割技术,已有了可喜的结果;在最佳条件下,能够得到小于 0.00005 英寸 NTV 的片子。

边缘整圆

这是一种比较新的晶片制造工艺,在硅片四周进行外形研磨,以消除碎屑和易于剥落的锐利边缘。在晶片制造期间或随后的加工期间一般会产生碎屑,它们能引起许多问题,如妨碍光刻版的压紧和引起光刻胶的沾污。碎屑位置也和边缘位错有关,这些位错是在热加工期间发生和传播的^[3]。边缘整圆的另一个优点是可以减少边缘堆积,堆积常常在涂胶旋转操作时发生。目前边缘整圆广泛采用下列两种技术:其一是使用了一个有一定形状的、高速的金刚石金属粘合轮来磨硅片边缘直到它的外形与轮子相吻合为止;其二是使用一个弹性的圆盘,圆盘面上有金刚石磨料;这个圆盘把硅片边缘“砂”到所希望的形状。其他的边缘整圆方法还有磨料



喷射和化学腐蚀。所有这些技术既有优点也有缺点,因此还没有出现专门的机器/工艺过程,还没有成为一种工业标准。其中的问题是由于一次和二次平面的整圆降低了定位精度,有可能产生加工损伤,在上边缘和下边缘之间产生了不希望有的不对称性,另外人工和材料的消耗也十分高。用金刚石轮整圆每片硅片的成本高于切片时每片硅片所用的刀片的成本。边缘整圆通常是在晶片腐蚀前进行的,以便除去任何加工损伤,但目前有些情况表明,人们的兴趣转向采用抛光技术来整圆,因为这

会引起损伤,因此边缘整圆可在晶片加工的任何一步进行。不管用哪种技术,边缘整圆的好处是得到普遍承认的,但现在还没有立即和全部进行边缘整圆的要求(见图 2)。

腐 蚀

硅片进行化学腐蚀是为了去除表面的加工损伤和切片操作时产生的应力,以及为了使加工完毕的晶片有一个比较致密和清洁的背面^[4]。传统的化学腐蚀包括各种氢氟酸和硝酸的组合,此外还有腐蚀速率稳定剂和腐蚀反应调节剂,如醋酸、碘、溴之类。其它的腐蚀液包括铬酸或者氢氧化钠,但这些不是主要的腐蚀液。一般情况下,在 1 和 10 分钟之间的一次腐蚀周期内,可腐蚀晶片 0.5~1 密耳。腐蚀速率的变化范围很宽;70% 浓度的硝酸和 49% 浓度的氢氟酸加热混合液每秒钟能腐蚀 1 密耳以上。但这种混合液难于进行控制,而且也不能得到半反射性的表面光洁度。目前一般使用的腐蚀技术有:

(1) “篮子”腐蚀——把晶片(一般为 50~100 片)装入一塑料篮子中,随后浸入盛有几加仑腐蚀剂的一容器中。转动容器使溶液作涡旋运动,时间到后将晶片取出或用水冲洗来终止腐蚀反应。这种方法需要的设备少,但产生毁损和碎屑的比率高,晶片偶尔还会互相掩盖。

(2) “桶”腐蚀——将晶片逐片插入一塑料装配盒中,随后把盒子浸入腐蚀液中并加以转动。

(3) “转动棒”腐蚀——使用两根或更多根带有晶片安置槽的平行转动棒，以便为晶片提供固定的位置和运动。

(4) “盒”腐蚀——晶片装入一塑料匣中，然后自动进行腐蚀/冲洗过程。

“篮子”腐蚀曾是一种令人满意的技术，但现正被其它的技术所取代，以满足新的要求。

关于腐蚀工艺/设备的一些新的要求为：

(1) 酸的保存——酸是硅片制造中的主要成本，而为了处理只经过部分反应的酸，又要支付中和和控制硝酸盐和氯化物的费用。在一个设计合理的腐蚀系统中，酸的使用期能大大延长。

(2) 晶片光洁度的均匀性——为了获得一致的腐蚀速率和均匀的光洁度，必须控制酸的温度、浓度。酸溶液必须不断搅动。

(3) 操作者的安全——尽管普遍采用了严格的预防措施，用手工进行腐蚀操作还是非常危险的。腐蚀工艺的自动顺序控制可防止大多数偶然的操作事故。

(4) 晶片平整度的控制——如果晶片原来是平整的，就希望腐蚀过程也能产生一均匀平整而光洁的产品。腐蚀中会产生相当大的“边缘变薄”现象。如每秒钟腐蚀 2 密耳，边缘变薄会从晶片外围四周一直延伸到内部 $1/8 \sim 1/4$ 英寸处，而在边缘地方还会有 1~2 密耳的附加损失。如严格控制酸的搅动和其它腐蚀条件，边缘变薄现象是能够防止的。

(5) NO_x 烟雾的控制——要有效地清除放出的 NO_x ，腐蚀烟雾应尽可能浓缩，勿使空气掺入。在腐蚀过程中能严格密闭的系统肯定是受欢迎的。

其他腐蚀方法

用机械方法除去加工损伤层可能有一些成本和(或)精度方面的优点。困难的是，当加上机械应力时，加工损伤可能反而会扩展到表面以下。等离子体腐蚀和汽相腐蚀加工是有可能实现的，但它们的成本都较高而且生产能力较低。曾有人试验过化学腐蚀反应和类似于研磨的机械加工相结合的腐蚀方法，但至今没有什么结果。这种系统的研制受材料的限制很大，因为所用材料要经得住酸的强腐蚀。

将来的发展

由于对边缘缺陷和晶片平整度的质量标准更为严格，要求更好地对腐蚀过程进行控制。自动盒式腐蚀系统的初步生产试验表明，它基本上能达到对晶片平整度和均匀性的要求；如酸腐蚀条件选择得当，晶片的边缘变薄现象可小于 0.1 密耳。这种系统对酸的温度和环流速度进行闭环控制。它装有可迅速停止反应和安全地将硅片移到装片/卸片位置的晶片处理机构。这一工艺要进一步发展的地方有酸的回收和表层下的加工损伤与腐蚀去除之间关系的研究。

硅片分选

切片后通常要检查硅片的电阻率和厚度，厚度测量的目的有二：一是保证硅片适合顾客的要求；二是为了在抛光之前把晶片按厚度分类(± 0.1 密耳)。电阻率测量通常是为了保证产品质量，因为批量生产时电阻率测量困难，大多数制造者在切片之前将硅晶锭分成适当的范围。这是因为用 Czochralski 法生长的晶锭有一轴向电阻率梯度。一般来讲 N 型硅锭(磷掺杂剂)顶端的电阻率为 8 欧姆-厘米而尾端为 3 欧姆-厘米。因此对顾客所要求的 5~7 欧姆-厘米和 3~5 欧姆-厘米两种不同的规格需要进行分段切割。过去，大多数公司根据估计将晶体分成这

两种规格。由于硅锭中和晶片中测得的电阻率有 5% 的差别，分段切割时再留出余量以保证从硅锭段上切下的所有晶片都符合所希望的范围。虽然这种分段方法要消耗相当数量的有价值的硅锭，但是，要避免这个就只得在切片之后进行手工测量，舍此之外别无它法。

为了克服电阻率和厚度的手工测量/分类的问题，Siltec 公司研制了一种微处理机控制的自动晶片分类机。这种机器在只用作厚度分类时每小时能分选晶片 3,000 片以上，如用于电阻率和厚度两者的测量，每小时可测量 1,500 片。这种机器的分选范围即使不熟练的操作人员也可以很容易地调节。电阻率和厚度可以有 14 种不同的分类。机器结构包括 32 个匣式装片/卸片匣，其中 4 个用作晶片发送器，28 个用作晶片接收器。将晶片从发送片匣上卸到一直线传送皮带上，通过一非接触的厚度监控仪工作台和一个电阻率测量工作台。晶片的有关数据被传送到中央处理单元(CPU)，由适当的接收片匣选择接收。测试过的晶片随着皮带继续往前，当晶片到达符合的接收匣子位置时，它们就被卸下。经过分类的晶片，其信息贮存于 CPU 中。分类结束时，分选机内的打字机打出分类结果。打出的纸带上记有十四类晶片的数目及其百分比。

这种分选机的速度和精度完全修改了前面叙述过的浪费硅锭很多分段技术。现在，硅锭能进行无损的长段切片，随后按用户要求用分选机对晶片进行分组。要使用好分选机还需要在生产控制、成品监控以及材料处理等方面进行一系列有关的改变，但在提高生产能力和较好地利用材料方面，结果是令人满意的。

将来的发展

第一批分选机 Siltec 公司早在 1976 年就投入了使用。这种高度自动的设备有许多相当重要的优点，目前的某些发展计划，准备进一步提高分选机的能力：

(1) 非接触式电阻率测试——这种测试方法的原理首先由 Western 电气公司提出，最近已有两家公司 (ADE 和 Lehighton) 制成了测试设备。电阻率的非接触测量将使分选机的生产效率提高一倍，它测试结果的一致性高于普通四探针测试法。几年前推广的非接触式厚度测试的设备迅速引起了半导体行业的工业改造，预期电阻率测量也会引起类似的反应。

(2) 激光标记数据——使用低功率脉冲激光器在晶片背面进行字母数字进行标记的研究工作已进行一段时间了。在和分选机相结合使用时，能够容易地在晶片背面刻上正确的电阻率和其它所希望的数据标记，不到 1 秒钟可以刻 10 个数字。

(3) 缩小电阻率容差范围——分选机能为用户提供电阻率严格控制的晶片。目前大多数用户要求电阻率公差在 $\pm 10 \sim \pm 30\%$ 的范围内；这种公差范围的晶片能够“分类”成更狭的公差范围，例如 $\pm 2 \sim \pm 5\%$ 。有的场合这样更为有利。

(4) 多用途晶片检查台——除厚度和电阻率分类之外，分选机中的晶片处理系统还可以适用于其它目的。目前有一种六个匣子的机器正在进行评估，这种机器可在抛光和清洗之后对晶片进行最后检查。其优点是速度快和无处理损伤。另外，估计它还可以在保证质量和进厂验收检查方面得到应用。抛光晶片正反两面的清洁度要求非常高，在抛光操作之后，应尽可能避免直接接触晶片。

抛 光

过去的抛光操作是将要抛光的晶片用蜡、树脂或者别的类似材料固定在一块硬的金属衬

板(后面称作载板)上而实现的。晶片固定好后,将载板放在抛光机上,此时一电动压板带动抛光材料对晶片表面进行抛光。

工艺上经常用胶状的二氧化硅化学浆补充机械作用,这叫做“化学-机械”抛光。一般采用两步工艺操作法;在坯料抛光阶段先抛去 0.5~2 密耳的硅,随后在光洁度抛光阶段再抛去少量的硅。

在理想情况下,这种抛光工艺能使晶片的一面有较高的光洁度,而且无划痕和加工损伤。随后把晶片从蜡膜上取下来,用溶剂或别的清洗剂把残存的蜡从晶片上剥离下来。蜡粘工艺中微小的变化对抛光晶片产品的抛光质量和生产上是否便利有相当大的影响,为此作了很大的努力来改进过去的蜡粘系统。目前大多数蜡粘操作中采用的是一种用挥发性溶剂制备的液态蜡。把定量的蜡放到一转动着的载板上,通过旋转形成一均匀的薄膜。随后加热载板使溶剂挥发,留下的是粘性的树脂薄膜,厚度约为 0.5~1 密耳。随后将晶片放在蜡膜上并压紧,以保证与蜡均匀粘附而不致发生变形。接着载板进行冷却,并用汽相脱脂剂除去多余的蜡。

过去已有不少公司在生产中证明了这个基本工艺是行得通的,但是对抛光晶片产品质量的新要求,已超过了蜡粘片操作方法的基本能力。新要求包括:

(1) 晶片平整度——目前,在某些应用中^[5~6]要求晶片平整度保持在 0.2 密耳以内。这种平整度特性称作 NTV(非线性厚度变化),如图 3 所示,而要用蜡粘片方法来达到 0.2 密耳水平是很困难的。这是因为晶片比较容易变形,因此蜡膜中任何不均匀性将直接反应到抛光表面上来。比如蜡中的气泡、空洞、颗粒物质、载板上的突起或凹坑,以及由于粘片压紧技术和晶片表面不平整引起的蜡膜厚度的无规则变化等都能引起非均匀性。目前蜡粘片工艺仅能保持 NTV 在 0.4~0.7 密耳的水平。

(2) 凹坑——无“凹坑”是现在许多订货单上所要求的项目。凹坑是晶片表面的小直径(小于 1/4 英寸)凹陷,主要由蜡膜中的灰尘质点和载板内的表面缺陷所引起。蜡粘片工艺常常因凹坑缺陷而损失掉百分之几的材料。

(3) 波纹——波纹是抛光表面比较长期的变化。这种变化可以通过观察直的网格的反射检测出来。波纹是由晶片背面的突出区域、蜡膜的厚度不均匀、抛光期间蜡膜上晶片的滑动和抛光期间晶片内的非均匀应力区等因素引起的。

(4) 晶片清洁度——晶片的正反两面应严格除去任何种类的别种材料。蜡粘片操作和接着进行的清洗用的溶剂使得晶片表面的清洁非常困难。

由于这些原因,人们普遍地意识到了无蜡粘片方法的优点,为实现无蜡抛光设计了许多系统。这里先简单地介绍一下:

(1) 模板固位——这种模板一般用“迈勒(Myler)”(一种聚酯的商品名——译注)或类似材料制成。模板冲制成一种环绕晶片四周的支持架。晶片本身可以直接贴在载板材料上,或者贴在适当的物质上。晶片处理期间,利用水膜的表面张力或利用真空来防止晶片跌落。

(2) 真空固位——这一方法是在晶片和载板之间抽掉空气,使晶片和载板产生摩擦而固定住晶片。这可由钻孔模板来实现,也可用多孔材料制成的载板来实现。

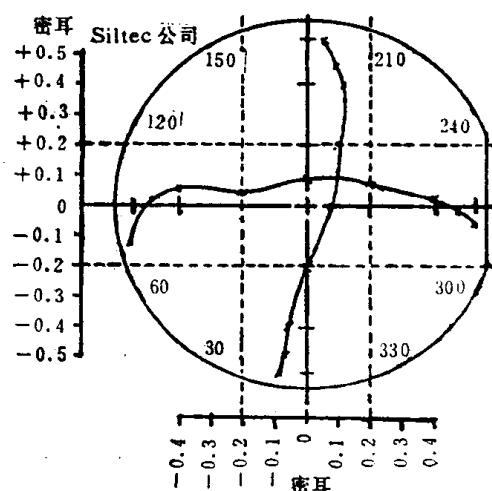


图 3 一抛光硅片的非线性厚度变化情况

(3) 摩擦固位——有些材料如具有高摩擦系数的硅橡胶,常被用来有效地阻止晶片的水平滑动。把这种材料覆盖在载板上,就能在抛光期间不使用别的方法而固定住晶片。

这三种无蜡粘片技术都已经或者正在被用于硅片抛光,但是还没有完全取代蜡粘片方法的迹象。问题是这方法存在有局部抛光和(或)晶片背面污染、晶片的两面都易出现非平面区域、生产率低以及晶片装卸麻烦。新近出现的单片抛光机有可能替代蜡粘片方法。单片抛光机采用一个旋转轴,轴上面有固定一片晶片的装置。这种工件固定轴通常是旋转的,它使晶片与有动力推动的衬垫或支撑板保持接触。晶片上加有较大的单位压力,每片晶片的加工周期的典型值是2~5分钟。这种方法的主要优点是它的加工比普通的多片粘片法均匀。在普通的多片粘片方法中,载板上的所有晶片的厚度必须近似相同,否则就会出现加工不均匀。在单片抛光中,能精确地预测除去多少材料而且与晶片开始时的厚度无关。单片抛光方法的缺点是机器的操作问题和生产效率较低,但这些缺点可以用有匣式装片的新机器弥补一部分。目前可得到的单片机器具有每小时10~20片晶片的产量。在有些场合,单片抛光机改装成能同时抛光三片晶片,这样虽提高了生产效率,但是失去了单片抛光的某些基本优点。

目前Siltec公司正在研究与标准工艺稍有不同的批量抛光方法。Siltec公司采用的是柔性固定法,它是以硅和某些弹性材料之间的双面粘合塑料薄膜为基础的。

这种双面粘合有无蜡固定、抛光和卸片系统的关键因素。它利用了有特殊固定装置的多片固定技术。有粘性表面的塑料薄膜先粘到一弹性衬底上,这衬底又粘结于刚性固定装置上。弹性衬底允许塑料薄膜与每片晶片的背面完全吻合,并容易吸收任何可能出现的不平整或小颗粒。弹性层(衬底)的压缩模数可以使不同厚度的晶片并排地固定而材料除去量接近相等。在实际生产中,柔性固定系统送出的是平整的晶片产品,这种产品完全消除了凹坑和波纹,而同时仍然保留着多片固定方法的生产效率方面的优点。在开头几个月的生产中,由柔性固定系统抛光的一百多万片晶片全都取得了优良的结果。

将来的发展

抛光是一种费钱的加工,而且它加工的产品是已经花费大量劳动的产品,对成品率和生产效率的考查趋向于更为严格,抛光方面的工艺改变过去一直有很大的影响。由于这些原因,抛光方面的技术工艺工作受到了强有力的支持,目前比较活跃的有以下几个方面:

(1) 规模经过扩充的常规抛光机——目前某些厂商在36到48英寸直径的工件台板上,采用了12~18英寸直径的载板。这样的机器每批可处理高达76片的3英寸晶片。这种机器装有25马力以上的驱动马达。

(2) 单机磨片和光洁加工——借助于适当材料的双同心衬垫和一个适当的机器结构,一台抛光机能执行全部抛光功能,这样材料的加工流程成了一个整体,提供了一定的经济性。

(3) 皮带型抛光法——机器结构类似于砂带磨光机,它提供了采用自动化的可能性。机器已研制成功,但还不会立刻在生产中使用。

(4) 高压抛光——目前大多数的抛光工艺操作使用每平方英寸2~10磅的接触压力。在每平方英寸20~100磅的压力下,能得到较快的磨片速率,但是普通衬垫的损耗随着磨片速率的提高而递增。但是,随着衬垫材料和固定方法的改进,较高压力的抛光方法可能会有某些应用。

(5) 反应性介质抛光——目前抛光溶液的pH值在9~11之间。所使用的试剂是氢氧化钠或氢氧化铝。也对较高或较低pH值的酸性介质进行了试验,但表面光洁度不好,去除速率

也难以预测。也有人用胺提供所需 pH 值感兴趣。

抛光片的清洗

抛光加工后,一般对硅片进行一系列化学浸泡和漂洗,以去除抛光浆料以及蜡的残渣^[7]。随后片子进行最后的清洗,目前常用自动清洗机进行操作,但有几家公司仍然使用手工进行晶片洗涤和漂洗。某种型式的机器擦洗对生产无微粒和无污点且前后一致的晶片来讲是不可避免的。擦片机采用了匣-匣的晶片处理技术和自动擦片——漂洗——旋转干燥过程。去离子水是非常普遍使用的一种漂洗剂,但也有用专门的化学药品的。目前普遍采用逆渗透方法对水进行预处理,但它不是提供超纯水的万灵丹。现代的逆渗透水装置变得更加复杂了,一般包括脱气、紫外线处理、几级专门的去离子处理以及精致的超级过滤装置。即使用了这种高级的系统,水的质量仍然是晶片制造者和使用者双方都经常关心的事。

抛光薄片的检查和包装

目前抛光薄片的包装处在以前使用的平的塑料盘包装和去年几家制造厂所介绍的新的匣式包装的转变过程之中。匣式包装的优点是有较高的晶片贮存密度,它改进了对晶片碎裂的防护,容易倒转输运,相对于晶片表面来说,塑料表面的面积也降低了,提高了清洁度。不足之处是采用新包装后,以前使用的检查技术用不上了,非用自动检查设备不可。目前正在生产中试验的装置使用了晶片传输系统和自动匣式晶片处理,以允许检查者进行检查和对晶片分类。

参 考 文 献

- [1] S. C. Holden, Slicing of Silicon Into Sheet Material, Third Quarterly Report, JPL Contract No. 954374 for ERDA (1976).
- [2] R. E. Lorenzini, "Improving I. D. Slicing Techniques"(1975), JPL proposal in response to RFP EZ-6-4480-68.
- [3] R. G. Rhodes, Imperfections and Active Centres in Semiconductors, pp. 311-353, (1964).
- [4] B. A. Irving, The Electrochemistry of Semiconductors, edited by P.J. Holmes, Academic Press, pp. 2, 262-367 (1962).
- [5] G. Wardly, Electrode Flatness Requirements for Cathode Projection Microfabrication Systems, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-22, No. 7, July 1975.
- [6] E. Gordon, D. Herriot, Pathways in Device Lithography, IEEE Transactions on Electron Devices, pp. 372-375, Vol. ED-22, No. 7, July 1975.
- [7] D. Tolliver, LSI Wafer Cleaning Techniques, Motorola Inc., Semiconductor Products Division.

王儒全 译 钱伯琴 校

硅鉴定技术的趋向

W. M. Bullis F. G. Vieweg-Gutberlet

无论是对硅材料性质的了解,还是对硅器件的设计和生来说,计量技术都是一个关键性的因素。半导体电子学领域已成为许多计量工作的最前沿,并且随着材料、加工及器件的改进,还发展了许多先进的测量技术。这篇文章简要介绍了各种用以鉴定硅的电学与物理分析技术的新发展。

在了解硅材料的特性和进行硅器件的设计与生时,计量技术是关键性的因素。硅器件的特性常常受微量(通常在百万分之一,有的在十亿分之一级)的痕量杂质与缺陷的影响。除非采用极尖端的测量技术,这么低的浓度已超出所有测量技术的测试灵敏度。随着器件向更高的集成度推进,单个电路元件的尺寸正降低到光学显微技术的可测极限以下,而亚微米级的内部缺陷或外部颗粒性沾污的存在,都会给电路功能以有害影响。

这些发展对测量手段的灵敏度极限、采样体积和空间分辨率都提出了严格的要求。对企业来说,这就要求在发展新的加工技术与器件概念的同时也要发展新的测量技术。而且,要紧的是,使用这些测量技术应当在价格上(这也许是更重要的)和时间上都是经济的,并且这些技术应能检测(对器件功能来说是重要的)杂质、缺陷及其它性质。最后,必须注意的是现有的大多数测量技术的测量结果都不是直接的,而是推断性的,就是说人们测得的是外加刺激与测量对象之间相互作用的表现。这就需要有据以作出解释的好模型,同时也告诉人们应当将几种不同方法得到的结果进行比较以保证确实测到了所要测的性质。

人们很早就用电子技术来检测杂质含量,这是由于电子检测技术有极高的灵敏度,另外,在检测对器件功能有决定性影响的杂质方面,电子检测技术具有很好的选择能力。工业上常用四探针法测量电阻率和薄层电阻。这一方法已发展得很完善^[1],如果被测材料不是极薄的薄膜(小于 $2\mu\text{m}$)以及电阻率极高(大于 $500\Omega\cdot\text{cm}$)的薄层电阻,它的测量精度已能达到主要是由被测材料的均匀性决定的程度。

以前人们一般用硼或磷等浅杂质密度来解释电阻率。近年对硼植入硅的测量^[2]表明,应对非补偿的硅电阻率和浅杂质密度之间的关系(Irvin 曲线)加以修正^[3]。与此相应,应美国材料试验学会电子学 F-1 委员会 (ASTM Committee F-1 on Electronics)的要求,由国家标准局(National Bureau of Standards)承担的一项计划,正采用专门设计的平面型试验结构来直接测量电阻率和自由载流子密度。对浅杂质密度在 $10^{13}\sim 3\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 范围内掺磷和硼的硅已取得重要的进展。但在对其它受主杂质与更高密度的施主及受主杂质的修正完成之前仍然有相当多的工作要做。然而,新的数据表明,对掺磷的硅,在涉及硅的中子蜕变掺杂的情形时,电子有更高的迁移率。

另一项确定电阻率的技术——扩展电阻, 同样受到很多注意。由于它有优良的(微米级)空间分辨率, 所以无论在确定电阻率、浅杂质密度的横向分布还是在确定杂质深度分布方面都很有潜力。自从 1974 年在扩展电阻讨论会 (Spreading Resistance Symposium) 上作了关于这一技术的相当广泛的评论^[4] 以来, 研究工作已在两个方面取得了进展。其一是表面条件对扩展电阻测量的影响问题。另一方面是深度分布所需的多层校正的快速推算法的发展; 虽然这一方面近年已有许多出版物作了介绍, 但要发展出完全满意的推算方法, 仍需进一步做许多工作。

电阻率测量的缺点是不能具体鉴别存在的杂质原子。低温霍尔效应的测量可以提供某种鉴定信息, 不过由于这些测量比较复杂, 解释也比较困难, 在工业上的应用尚不太普遍。但是, 由于在生产非本征红外探测器时需要确定高电阻率硅中补偿杂质的数量, 所以又重新引起了人们对这一技术的兴趣。

Spence 在八年前曾经预言^[6], 总有一天可以象浅杂质一样, 对起产生或复合中心作用的杂质进行常规鉴定。现在, 他的预言有了初步的实现。过去有一段时间, 对载流子寿命和扩散长度的测量是检查深杂质和缺陷存在的唯一方法。最近又有人对这方法产生了兴趣。然而, 就象电阻率的测定一样, 这些测量方法也不能鉴别具体的杂质。从这种需要出发, 或许更重要的是不断地发展各种电流与电容谱技术, 这些技术除了可以确定缺陷的存在及密度而外, 还可具体地识别缺陷, 其中包括瞬态电容谱^[6] 和热激、光激电流及电容的测量^[7, 8]。除最简单的复合中心外, 通常要综合应用这些技术才能作出详细的鉴定。

近年来已确定热激电流的响应比原先预期的来得简单, 因为这只要知道在峰值响应温度时的加热速率即可, 而不必在全部温度范围都保持恒定的加热速率。由于能对 MOS 电容结构作热激电流的测量, 这样就具备了把这一技术既应用于初始材料又应用于部分或全部加工过的器件的可能性; 为了避免材料鉴定上的失真, 正在研究使用低温氧化物做电容的方法。

电容技术也广泛地用来鉴定氧化膜及氧化物-硅界面。既可用瞬态电容技术, 也可用热激电流测量来探测界面态的存在。在极高电压下测量电容的新方法^[9], 使人们可以用容-压测量来研究硅和诸如钝化层或蓝宝石衬底之类的厚绝缘层之间的界面。

检查晶体缺陷的传统方法主要是 X 射线或腐蚀技术, 有时也应用红外显微技术, 这些技术现在仍然重要, 并且有了新的发展, 它可使人们在加工过程控制中或在用以研究高温缺陷生长机理的在原位实验中能更加容易地使用 X 射线技术。可以用红外透射来观察晶体缺陷及不完整性周围的应力场。但是, 当涉及微观缺陷对器件性质的影响和涉及晶体缺陷与诸如碳、氧等深杂质的相互作用的时候, 又使人们增加了以高空间分辨率考察晶体缺陷的兴趣; 这一课题是新近工作^[10] 的研究对象。高压透射电子显微技术和扫描电子显微技术都已有效地用于研究缺陷和硅片及硅器件的电学特性之间的关系。

人们一般只注意军用及空间应用的器件和材料的辐射缺陷。但是, 在某些加工工序中也能产生值得注意的损伤。在离子植入时发生的位移损伤^[11], 既影响扩散^[12] 和腐蚀速率也影响少数载流子寿命。有几个组织正在寻求改进的技术以确定损伤的位置和数量以及各种退火技术的有效性。在电子束蒸发^[13] 淀积金属膜过程中或在 X 射线或电子束刻蚀片子过程中产生的电离辐射, 能在器件的绝缘层区域形成电荷俘获而对某几种器件的功能产生有害影响。用来确定这种损伤程度和各种退火程序的技术尚未得到很好的发展。近来人们又对硅中子蜕变掺杂技术发生了兴趣。

某些物理分析技术,如二次离子质谱(SIMS)和俄歇电子谱(AES)技术,能用来鉴别和计量在半导体、绝缘物和加工材料中的杂质。近年来这些技术已成为许多讨论会^[14,16]和评论^[16,17]的主题。

由于缺乏适当的参考标准,用在痕量分析、深度分布和界面分析上的各种物理分析技术的定量化已被耽误了。看来对接近痕量级的深度分布进行分析的最大希望是SIMS技术;正在为硅中和二氧化硅中的某些有用的杂质研制定标方法。然而,在这一技术能提供可靠而有重复性的结果之前,还要做很多努力才行;即使是相对数据也受到仪器参数和实验条件的影响。

界面处组分的过渡可以用AES结合离子溅射或结合高能氦离子的卢瑟福背散射来研究。除非杂质浓度极高,一般来说,这些技术用来做杂质的痕量分析或深度分布是不够灵敏的。离子溅射结合AES时所碰到的各种问题近来已有评述^[18]。由X射线光电子谱得到的化学移动数据(也可由AES得到,但不如X射线法)常用来获得接近界面处各种组元的详细化学过程的信息。然而,还未见到用这类技术得到的关于硅-二氧化硅间界面分布细节的有关报道。

对硅及有关材料的痕量分析来说,中子活化分析是一种很成熟的技术^[19]。尽管计数统计方面的误差可减至百分之几或更低,这些测量的逐日重复性仍远低于用作其它物理分析技术的定标标准的要求。中子活化分析不能用来检测硼;近年来,核示踪技术^[20]已用来测量硅中痕量的硼。在更完善的发展之后,这些技术能用来改进以物理方法作硅鉴定的参考标准。

红外干涉测量已用作外延层厚度的常规测定^[21]方法。此外,光学和红外散射测量都能用来鉴定半导体和绝缘衬底表面的缺陷和沾污的数量。

半导体小片、晶片和切片等的显微镜检查是应用最广的工艺监控手段,但至今还既无关于被检样品照明的标准化方法,也无标准的检查次序。扫描声学显微技术在观察晶体缺陷和线度低至几微米的因加工产生的瑕疵方面,可以成为传统的光学及扫描电子显微技术的有益补充。

器件的高集成密度趋向在两个方面对尺度计量技术提出了新的要求。首先是光刻掩模版或片子表面上的图案的测量。一方面,线间距可测得极精确,但另一方面,在用不同类型的仪器,如准丝或象剪目镜测得的线宽在数值上存在差异。近来关于发展 $0.5\sim 10\mu\text{m}$ 范围线宽测量能力的研究^[22]揭示出显微镜测量理论的缺点,并已提供了了解上述差异的基础。另外还关系到表面平整度的问题。虽然应用现代化的接近式与投影式对准和曝光系统减少了片子表面不平整性及突起对掩模损伤的危险,但是用这种系统得到的象却受到片子表面畸变的影响。逐点确定表面平整度的技术是不完全的;快速鉴定全部表面性质的技术正在实现,不过仍然存在如何以少数参量描述这一鉴定的问题。

这就使我们面临一个问题,也是我们最后要考虑的一个课题。用有限次测量以鉴定复杂的分布的问题正变得越来越重要。表面分布的性质仅是这类分布的一种。无论是鉴定点缺陷与加工产生的缺陷的随机分布,还是鉴定如浅杂质密度这类随晶体不同而变化的参数的连续分布,人们的兴趣都在不断增加。除对越来越高的空间分辨率的明显要求以外,这一问题还有另外两个方面,即采样(具体测量的地点的选择)与测量结果的表述。如果切合实际的规范和加工控制方法发展得可包括随机或近乎随机分布的变量的话,上述两个方面就应受到密切的注意。

参 考 文 献

- [1] ASTM Standard Method F 84; see also Bullis, W. M., Standard Measurements of the Resistivity of Silicon by the Four-Probe Method, NBSIR 74-496(August 1974).
- [2] Wagner, S., *J. Electrochem. Soc.*, 119, 1570-1576(1972).
- [3] Irvin, J. C., *Bell System Tech. J.* 41, 387-410(1962).
- [4] Ehrstein, J. R., Ed., *Semiconductor Measurement Technology: Spreading Resistance Symposium*. NBS Spec. Publ. 400-10(December 1974).
- [5] Spence, E., *Semiconductor Silicon/1969*, R. R. Haberecht and E. L. Kern, Eds., P. 16 (The Electrochemical Society, Princeton, N. J., 1969).
- [6] Lang, D. V., *J. Appl. Phys.*, 45, 3014-3022; 3023-3032(1974).
- [7] Buehler, M. G., *Semiconductor Measurement Technology: Defects in PN Junctions and MOS Capacitors Observed Using Thermally Stimulated Current and Capacitance Measurements-Videotape Script*, NBS Spec. Publ. 400-26(April 1976).
- [8] Pierret, R. F., and Sah, C. T., *Solid-State Electronics*, 13, 269-288; 289-302(1970).
- [9] Goodman, A. M., *Semiconductor Measurement Technology: Safe Operation of Capacitance Meters Using High Applied-Bias Voltage*, NBS Spec. Publ. 400-34 (December 1976).
- [10] Anon., *Solid-State Technology*, 19 (8), 49-51(August 1976).
- [11] Mayer, J. W., Eriksson, L., and Davies, J. A., *Ion Implantation in Semiconductors*, pp. 65-124 (Academic Press, New York, 1970).
- [12] *ibid*, pp. 57-64.
- [13] Mayo, S. Galloway, K. F., and Leedy, T. F., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-23, 1875-1880(1976).
- [14] Lieberman, A. G., Ed., *Semiconductor Measurement Technology: ARPA/NBS Workshop IV, Surface Analysis for Silicon Devices*, NBS Spec. Publ. 400-23(March 1976).
- [15] Heinrich, K. F. J., and Newbury, D. E., Eds., *Secondary Ion Mass Spectrometry*, NBS Spec. Publ. 427 (October 1975).
- [16] Kane, P. F., and Larrabee, G. R., Eds., *Characterization of Solid Surfaces* (Plenum Press, New York, 1974).
- [17] Coburn, J. W., and Kay, E., *Crit. Rev. in Solid State Sciences*, 4, 561-590 (1974).
- [18] Coburn, J. W., *J. Vac. Sci. Technol.*, 13, 1037-1044(1976).
- [19] Larrabee, G. B., and Carlson, H. G., *Silicon Device Processing*, C. P. Marsden, Ed., NBS Spec. Publ. 337 (November 1970) pp. 375-384.
- [20] Carpenter, B. S., Determination of Trace Concentration of Boron and Uranium in Glass by the Nuclear Track Technique, *Anal. Chem.*, 44, 600-602(1972).
- [21] ASTM Standard Method F 95.
- [22] Swyt, D. A., *Solid-State Technology*, 19(4), 55-61(April 1976).

蒋 平 译

扫描超声显微镜

C. F. Quate

超声显微镜是观察细微目标的新仪器，其分辨率可与光学显微镜相比。本仪器中使用 1GHz 的声学辐射，在水中的波长为 $1.5\mu\text{m}$ ，相应的分辨率约 $0.5\mu\text{m}$ 。我们用此仪器对硅片和硅电路的特征作显微成像观察，能清晰地看到特性和结构上的缺陷，清晰度接近光学显微照片。

导 言

虽然三十年以前就有人建议将声学辐射用于显微技术，但只是在不久之前科技水平才发展到能产生波长可与光波波长相比的超声波。由于微波声学取得的进展，现已可在液体中使用频率超过 1000MHz 的声学频率。这样，就有了在水中为 $1.5\mu\text{m}$ ，在液氮中为 $0.2\mu\text{m}$ 的波长。原则上讲，应当可以设计出分辨本领为此波长的若干分之一的仪器。就是说在水中应可低于 $1\mu\text{m}$ ，而在低温液体中应可达亚微米级。

现在我们已实现此仪器的扫描工作方式，可用来观察表面和表面以下的某些特点。下节我们要描述本仪器的原理和特色，我们认为，扫描超声显微镜的发展虽然还只处于早期阶段，但它已经可以对用其它显微技术所搜集的信息作出改进。

仪器的结构

扫描超声显微镜通过聚焦波束对物体作机械扫描。分辨率由焦点处波束的直径决定。在 1000MHz 时，波束直径小于 $1\mu\text{m}$ 。重要的部件示于图 1，仪器的总体如图 2 所示。本显微镜的关键元件是两根蓝宝石短棒，用作输入和输出晶体（见图 1）。它们用来将超声束引进装物体的液体室和收集由物体散射出的超声能量。每根蓝宝石棒的最外端都贴有氧化锌压电薄膜。压

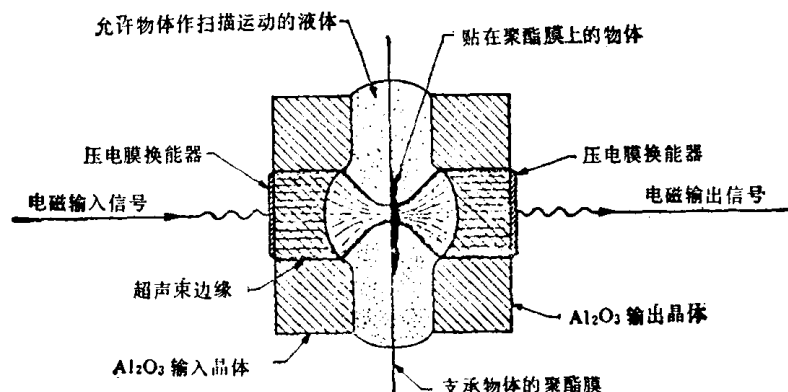


图 1 扫描超声显微镜透镜系统示意图