

第三章 半导体晶体的切割及磨削加工



单晶硅片加工过程模拟

第一节 半导体传统切割方法

一、硅单晶棒的截断

对硅单晶棒首先需要采用外圆切割 (OD Saw)、内圆切割 (ID Saw) 或带锯切割 (Band Saw) 进行两头截断, 其目的主要是:

- 切除硅单晶棒的头 (硅单晶的籽晶和放肩部分)、尾及直径小于规格要求的部分;
- 将硅单晶棒切割成切片机便于处理长度的晶棒段;
- 对硅单晶棒切取样片, 以检测其电阻率、氧/碳含量、晶体缺陷等质量参数。

晶体截断加工时, 切割断面应平整并与单晶棒轴线垂直。由于硅晶体硬 (莫氏硬度7) 而脆, 对其进行加工多采用金刚石刀具。晶体截断的关键问题是如何减少材料损失。硅晶体截断加工的主要方式有以下几种:

(1) 外圆切割

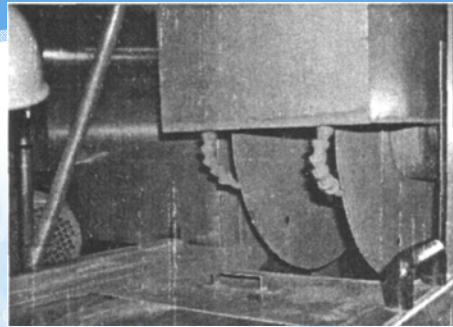
外圆切割采用外圆金刚石刀片对硅晶体进行切割。由于刀片本身强度的限制, 其直径不能做得太大 (一般不大于500mm), 刀片厚度较大 ( $\geq 2\text{mm}$ ), 硅晶体刀口损失大 ( $> 3\text{mm}$ ), 该方法不适宜大直径硅晶体截断加工。但由于设备简单、价格低, 目前产量不大的硅单晶厂仍在使用。

外圆切割机

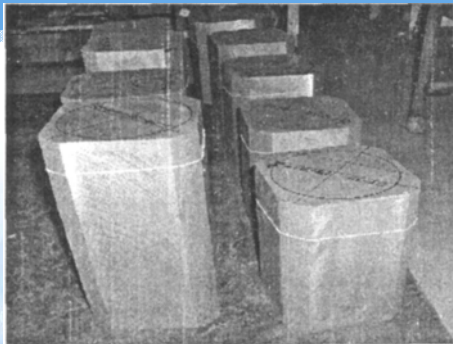
外圆锯切是最早开发的锯切硅晶片的工艺。这种方法与砂轮外圆磨削相似，把薄的金刚石锯片夹持在高速旋转的主轴上，用外径上的金刚石磨粒锯切工件。

目前外圆切片还用单晶硅棒切方方面（俗称开方），通常用两片金刚石外圆切割片同时装在单晶硅切方装置上，将单晶硅圆棒加工成硅方棒。加工后的单晶硅棒成对称矩形。

对专用于单晶硅棒切方用金刚石外圆切割片的要求是其刃口越薄越好。金刚石外圆切割锯片在单晶硅棒切方装置上是两片同时使用，将硅棒切成对称矩形。



单晶硅棒开方设备



单晶硅方棒

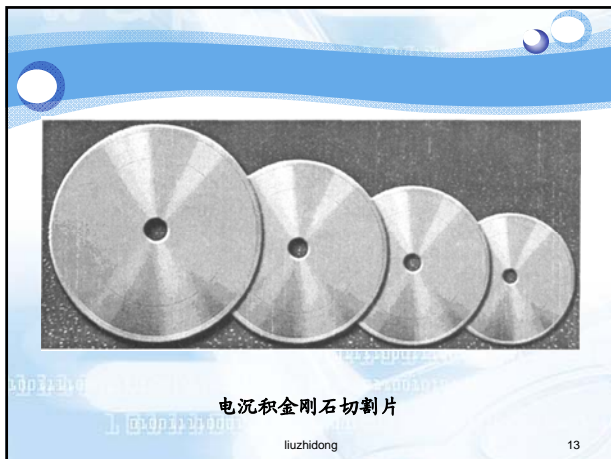
由于单晶硅切割面要求平整，表面要求无滑道、无区域沾污、无崩边、无裂缝、无凹坑等，故成对的切割片必须具有相同的机械物理性能。因此，基体材质、金刚石选用与处理以及生产工艺都须有严格的特殊的要求。在单晶硅棒切方过程中，对切割片的效率和使用寿命也有一定的要求。

## 金刚石外圆切割片的制造工艺

单晶硅具有金刚石晶格，晶体脆而硬，很难用常规工具完成加工。金刚石外圆切割片在切割单晶硅时，线速度高达30m/s，锯齿在切割过程中反复承受脉冲式工作载荷，因此要求胎体要具有高的硬度和耐磨性，使之在切割过程中与金刚石的磨损相适应。

因此选用低温电沉积法制造金刚石外圆切割锯片。其优点是：

- 工艺温度低，避免了对金刚石的热损伤；
- 沉积金属镍层本身有较高的硬度（HRC $\approx$ 40），加之组织致密，对金刚石具有良好的浸润性，金刚石不易脱落；
- 可生产很薄且金刚石浓度很高的切割片；
- 设备简单、操作方便，制造成本低。



### 金刚石外圆切割片基体的尺寸

用于切割单晶硅切方的外圆切割片，其半径必须大于单晶硅棒的直径。直径一般约为100-300mm的单晶硅锭，为满足切割要求，切割片的直径在 $\phi 300-700\text{mm}$ ，锯片刀口的厚度从1.8mm-3.4mm之间。

随着外圆锯切技术的发展与工件直径的增大，外圆锯片的直径也不断增大，因此锯片的刚性降低，刃口摆动量难以控制。为了增加锯片的刚度，刀体厚度增加，导致锯痕变宽、材料损耗增大，锯切质量变差，难以锯切出薄片。因此，外圆锯切方法已很少使用，主要用来加工端面 and 晶向偏转大、长晶体的定向加工。对于大尺寸材料，主要用于整形加工。

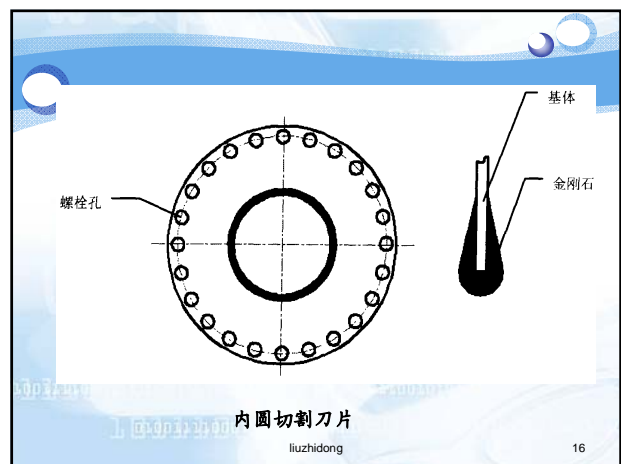
liuzhidong 14

### (2).内圆切割。

内圆切割采用内圆金刚石刀片对硅晶体进行切割，设备与内圆切片机类似。采用该方法时，硅晶体刀口损失小（一般小于0.4mm），除进行正常截断加工之外，还可以切取较薄的测试样品（0.6-1.0mm）。目前，8in内圆截断机已有商品供应市场，虽然价格较贵，但对大型硅单晶厂是适用的。

目前，中、小尺寸晶片切割主要采用内圆切割方法。这种方法是在刀片内径电镀金刚石磨料作为切削刃。

liuzhidong 15

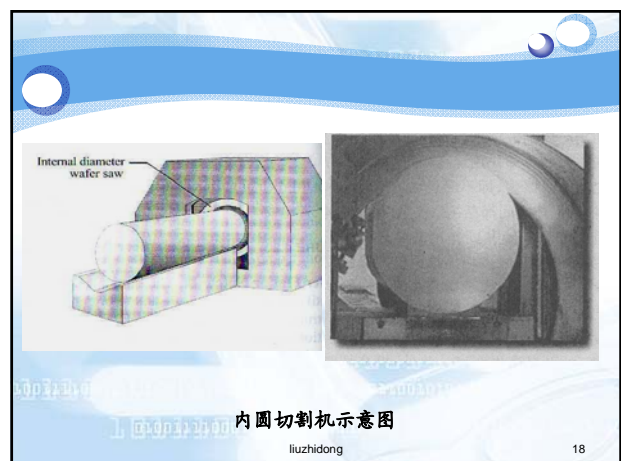


### 内圆切割机床

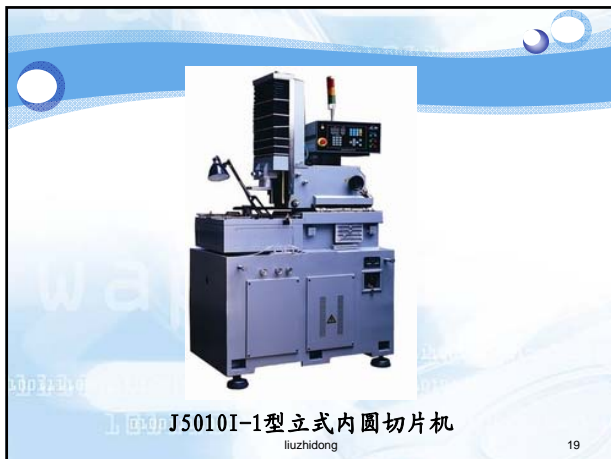
内圆切割机床按照主轴的方向可以分为立式和卧式两种结构。卧式切片机便于取片，但是大质量的主轴为悬臂结构，在高速旋转的情况下，由于偏心容易产生振动，而立式机床则避免了这个缺点。

晶体典型的特征是各向异性，切割方向对晶片的性质有着很大的影响，因此加工机床带有晶向调节机构。晶向调节机构有二维和四维之分。二维调节机构适于加工无晶向脆硬材料。四维调节机构可以使工作台垂直转动(范围 $\pm 20^\circ$ )，水平转动( $\pm 10^\circ$ )，实现晶体的精密定向切割。

liuzhidong 17







### 内圆切割刀片的结构

内圆切割刀片是一个圆环，由刀片基体和内圆磨料工作部分组成。刀片基体通常为不锈钢，厚度通常为0.1~0.15mm。随着加工晶体直径的增大，基体厚度也增加。

刀片在靠近外圆处，有用来与主轴连接的螺栓孔。内圆用复合电镀的方法镀一层金刚石粉，形成一定厚度的金刚石刃口。镀层时，镀液中杂质含量对刀片的工作寿命有着显著的影响。镀液中 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{6+}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 等离子的浓度增加，复合镀层的结合力急剧下降，刀片寿命急剧下降，甚至使切出的晶片成为废品。

liuzhidong

20

内圆切割时，切割刀片由主轴带动高速旋转，同时相对工件径向进给。内圆切割技术的优点在于：

- 切片精度高，直径为300mm晶片的厚度差仅为0.01mm；
- 切片成本低，同规格级的内圆切片机价格是线切割机价格的1/3~1/4；
- 每片都可以进行晶向调整和切片厚度调整；
- 小批量多规格加工时，具有灵活的可调性。

liuzhidong

21

其缺点是：

- 晶片表面损伤层较大；
- 刀口宽，材料损失大；
- 生产率低，每次只切割一片；
- 不适合加工大直径硅晶片。

liuzhidong

22

### (3).金刚砂线切割。

金刚砂线切割是采用嵌有金刚石粉的高强度钢线对硅晶体进行切割。由于所用钢线直径细(约0.2mm)，硅晶体刀口损失较小(约0.21mm)，可切割任意直径单晶(1~8in)，可对晶体进行截断加工，也可切取薄样品(0.3~0.5mm)。有单线和多线(三线或四线)金刚砂线硅段切割机。多线金刚砂线硅段切割机，可任意调节切割线之间的距离，同时完成硅晶体截断和取样的加工。该设备在被切割晶体下面装有个“V”形托架，采用了摇摆式切割方式，切割表面非常平滑。该方法很有发展前途。

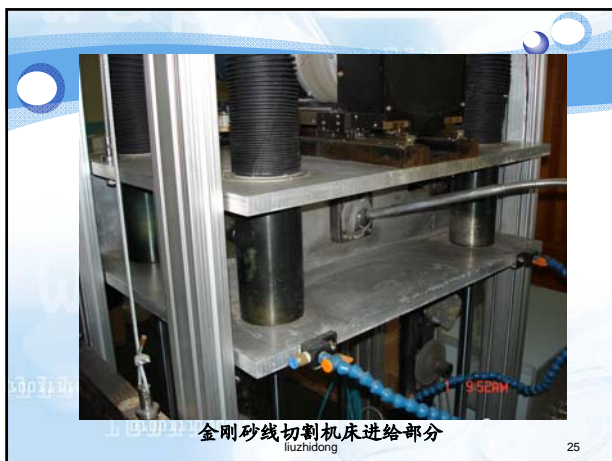
liuzhidong

23

金刚砂线切割机床运丝部分

liuzhidong

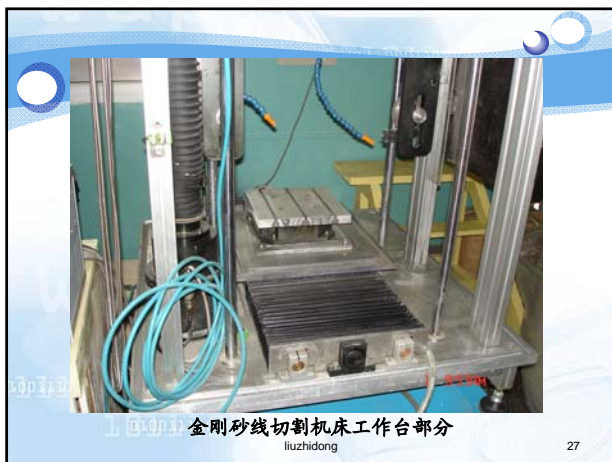
24



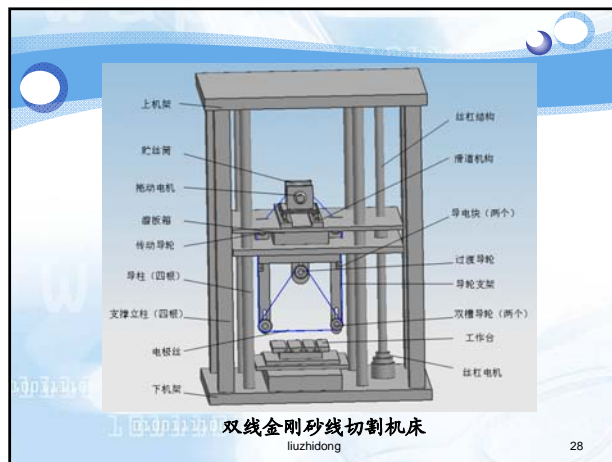
25



26



27



28

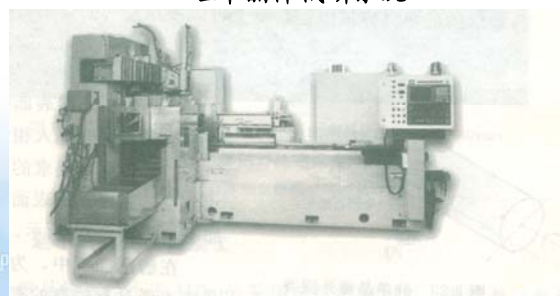
#### (4).带锯切割。

带锯切割是采用刃口嵌有金刚石粉的薄钢带对硅晶体进行切割。其刀片厚度较小(0.7mm),硅晶体刀口损失小(0.8mm),可切割任意直径硅单晶。设备简单可靠,价格低。

liuzhidong

29

#### 日本东京精机公司BSM-700HL直径300mm 硅单晶棒截断系统



liuzhidong

30

## 二、硅切片加工

切片是把圆柱形的硅单晶锭切割成厚度一定的硅片的过程。

硅切片的主要参数有硅片晶向、硅片厚度、总厚度偏差、弯曲度、翘曲度等。这些参数的精度对后道工序的加工（如硅片研磨、硅片腐蚀和硅片抛光等）起着直接决定的作用。

由于金刚石在硬度、抗压强度、导热率、摩擦系数等方面均比较合适，故一般以此粉末加上合适的切削液润滑作摩擦剂，使用切片机将硅单晶棒切成一定厚度的薄片（即硅片）。

硅片切割目前大多采用内圆切割和多线切割这两种方法，此外还有近期出现的固结磨料线锯切割方法。

liuzhidong

31

## 1. 内圆切割

采用内圆嵌有金刚石粉的内圆刀片，对硅单晶锭进行切割，每次切割一片。与外圆切割相比，内圆切割在效率和节约硅材料方面有长足的进步，但内圆刀片刃口颗粒的锋利程度，刀片的张力等因素对硅切片的参数（特别是弯曲度）和表面质量影响很大。随着硅片直径不断增大，为了解决这个问题，高水平的内圆切割机增加了电脑控制的自动修刀系统和刀片导向系统，提高了切片精度。

liuzhidong

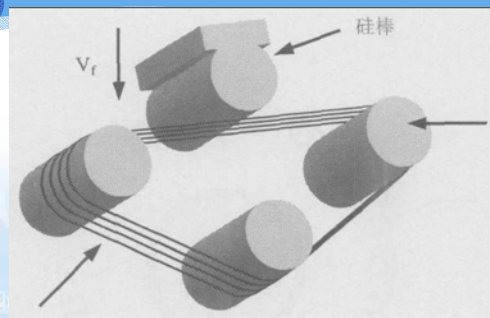
32

## 2. 多线切割

用高强度的钢线（直径 $\phi 0.15-0.20\text{mm}$ ）被导轮排成的钢线面，钢线面中钢线间距即为待切硅片厚度，钢线面与硅单晶锭作相对运动，同时钢线做前后往复运动并作为载体携带着高硬度磨砂（例如莫氏硬度为9的碳化硅），磨砂对硅单晶进行研磨，从而完成切片加工。由于切口窄（约 $0.22\text{mm}$ ），大大降低了硅材料的损耗。目前具有两层钢线面，能同时对两层单晶锭进行切割的所谓双台面多线切割机已投入市场，大大提高了生产效率。大直径硅单晶（ $200\text{mm}$ 以上）的切片加工，普遍采用多线切割。

liuzhidong

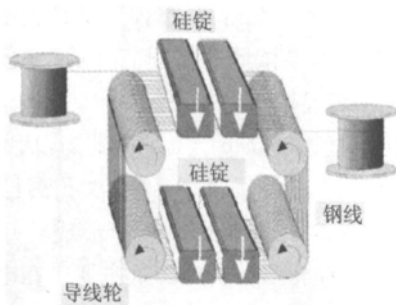
33



单层硅锭多线切割原理图

liuzhidong

34



双层硅锭多线切割原理图

liuzhidong

35

## 游离磨料切割原理

游离磨料多线切割技术始于上世纪九十年代初期，与传统的金刚石内圆切割技术相比，具有切割效率高、切口材料损耗小、表面损伤程度浅、切割噪声小等优点，能满足晶圆大直径化发展的加工需求。

近年来，国内外研究者越来越重视游离磨料线切割技术的研究，在游离磨料线切割过程材料去除机理、切割线振动、切割温度等方面展开了研究。

应用于晶体材料的游离磨料多线切割技术不同于普通的线切割技术，其加工原理属研磨加工范畴。游离磨料多线切割方法的基本工作原理如图所示。

liuzhidong

36

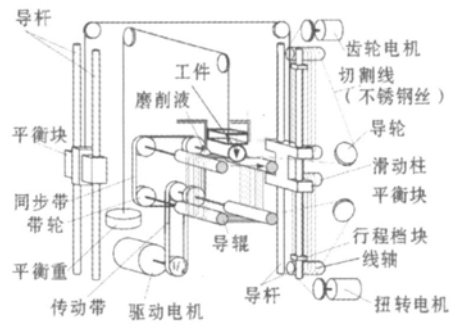


### 游离磨料多线切割与金刚石内圆切割性能之比较

性能参数	游离磨料多线切割	金刚石内圆切割
切割方法	研磨	磨削
切割表面特征	线痕	破碎、开裂
损伤深度( $\mu\text{m}$ )	10~ 15	20~ 30
生产效率( $\text{in}^2/\text{h}$ )	300~ 2000	200~ 400
单程硅片切割数(片)	3200(与同时参加工作的切割数量有关)	1
切缝损失( $\mu\text{m}$ )	200~ 300	300~ 500
硅片的最小厚度( $\mu\text{m}$ )	低至 200	300
最大切割直径( $\text{mm}$ )	300	达 200

liuzhidong

37



游离磨料多线切割机走丝系统原理图

liuzhidong

38

将直径约 $150\sim 170\mu\text{m}$ 的不锈钢丝(切割丝)分别缠绕在两个不同的线轴上,其间经过一系列的导轮和检测装置,最终缠绕在三个或四个加工辊上形成均匀平行线网,并相对于固定在工作台上的单晶硅工件做往复运动。

悬浮于磨削液中的磨粒在高速运动的金属切割线的带动下进入加工区域,在切割线和工件加工表面间的液体薄膜中滚动,在切割线的压力作用下压入工件使工件表面产生破碎和裂纹,继而结合磨粒的滚动将碎片剥离工件,实现材料的去除。在该过程中,切割线并不进行切削加工,而是主要起着将磨削液高速带入切割区并对磨料施加载荷的作用。

liuzhidong

39

### 游离磨料线切割技术的材料去除机理

应用于晶体材料的游离磨料线切割技术属于研磨加工研究范畴。切割液中游离状态的磨料和切割液都会对材料去除起作用。关于游离磨料线切割硅片的材料去除机理,研究者提出两种类型:游离磨料的滚动-压痕加工模型,弹性-流体力学模型。

liuzhidong

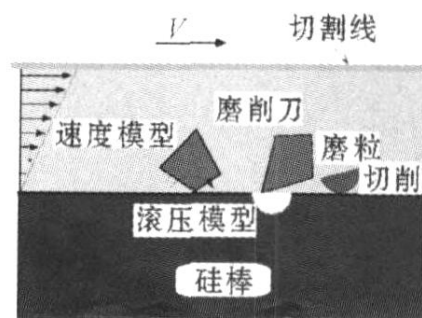
40

#### a. 游离磨料的滚动-压痕加工模型

游离磨料线切割晶片的加工过程实际上是存在于工件和切割线之间的切割液中的磨粒由运动着的切割线带动进入切割区,对工件加工表面进行滚动-压痕作用或者刮擦-压痕作用来实现材料的去除。

liuzhidong

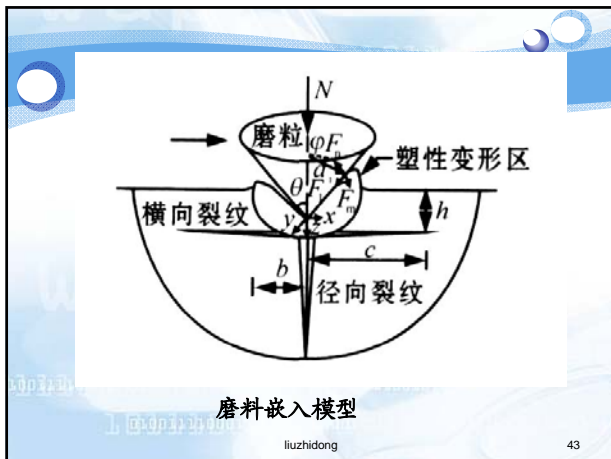
41



游离磨料的滚动-压痕加工模型

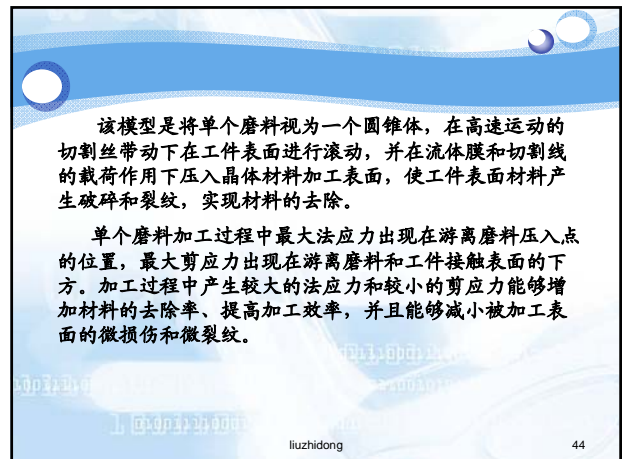
liuzhidong

42



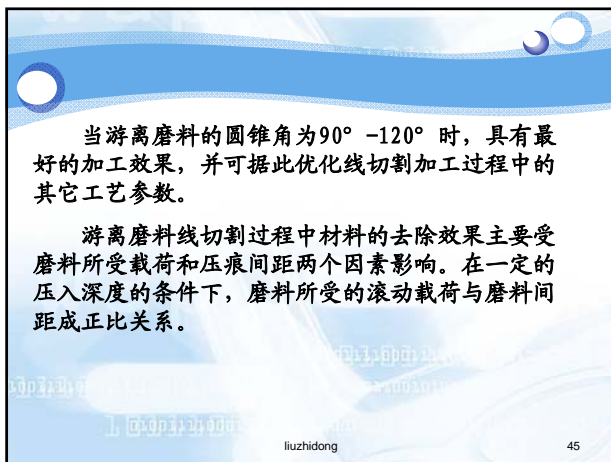
liuzhidong

43



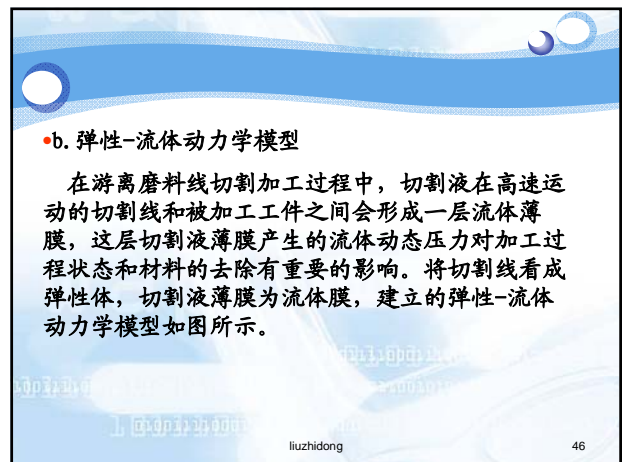
liuzhidong

44



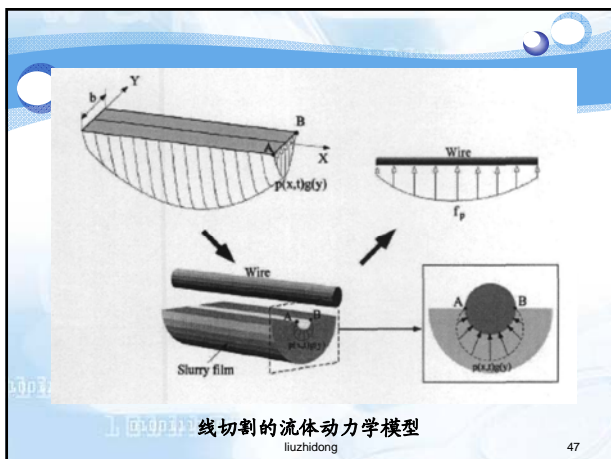
liuzhidong

45



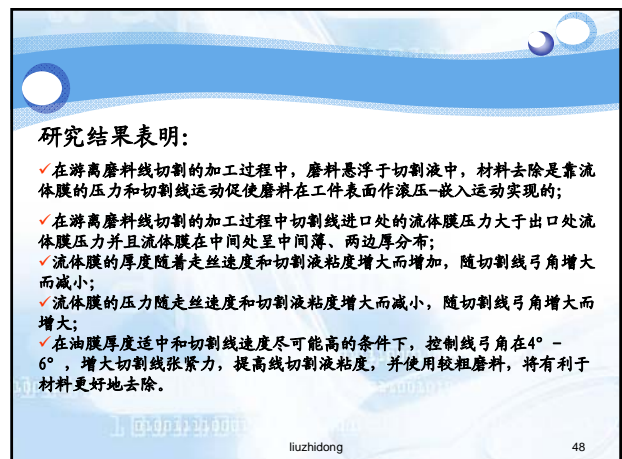
liuzhidong

46



liuzhidong

47



liuzhidong

48



### 游离磨料多线切割工艺存在的主要问题

- ✓ 为保持良好的切割能力，必须设法保持磨粒的锐利性和在磨浆中合适的浓度，磨浆消耗大，磨料成本高，并且磨浆的开发、回收、分离和净化成本高，且污染环境；
- ✓ 切割大尺寸工件时，磨粒难以进入到长而深的切缝，锯切效率降低，并且由于锯切时浆液分布不均匀，导致切片厚度不均匀；
- ✓ 锯切时磨粒对锯丝磨损严重，一旦断丝，维护工作麻烦，成本高；
- ✓ 不适合加工硬度更高的如SiC单晶体、陶瓷等材料

liuzhidong

49

### 3、固结磨料线锯切割方法

固结磨料线锯切片技术是将高硬度、高耐磨性的磨料牢固地固结在钢丝基体上而制成固结磨料锯丝，从而使用该锯丝对工件进行切割的技术。

固结磨料线锯切片工艺能够解决游离磨料线锯切片工艺产生的问题。

20世纪80年代，出现了可用于硅片切割的金刚石多线锯。MB Smith等人利用电镀金刚石线锯对方形多晶硅棒进行了切片试验，认为在进给力较小时，表面损伤层深度可小于 $5\mu\text{m}$ ，而且材料的去除率及表面损伤层深度与金刚石粒度密切相关。

liuzhidong

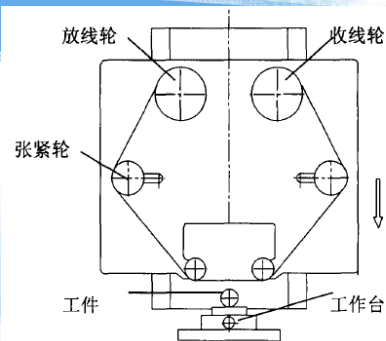
50

### • 往复式线锯床

下图是MB Smith等人研制的往复式固结磨料线锯加工设备。多根金刚石锯丝被固定在工作台框架上，编成丝网，工作台架可以往复运转，可以同时切下多片晶片。有人曾用此设备切割直径2英寸的蓝宝石，发现切片的弯曲度和总厚度偏差小于 $30\mu\text{m}$ ，表面粗糙度 $R_a$ 小于 $1\mu\text{m}$ ，并且切割效率是游离磨料线锯的3倍，而成本却是游离磨料线锯的1/3。

liuzhidong

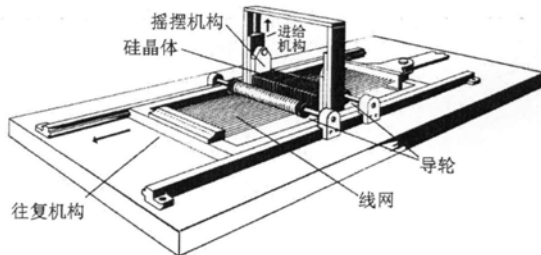
51



固结磨料线锯床原理

liuzhidong

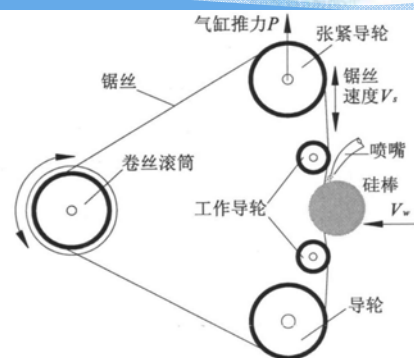
52



往复式固结磨料线锯加工设备

liuzhidong

53



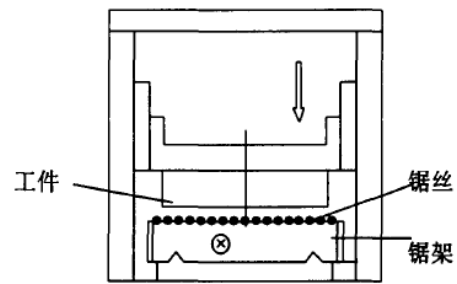
往复式金刚石线锯床示意图

liuzhidong

54

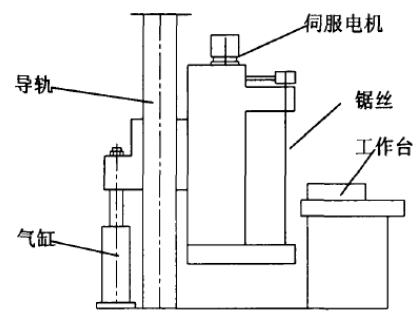
往复式金刚石线锯床的切割原理为：硅棒垂直于锯丝进给，锯丝由可正反方向旋转的卷线滚筒带动，当滚筒作顺时针或逆时针转动使走丝达到最大长度时，滚筒在控制系统的作用下实现逆向运转，从而使锯丝往复运转实现切割。

锯丝由一对张紧导轮与一对工作导轮支撑，采用气动装置来调节锯丝的张紧力。采用微型潜水循环泵通过喷嘴浇注，向锯丝切割区供给冷却液。



金刚石线锯切割

对往复运动的金刚石线锯，线锯丝上仅有接触工件的半圆参与切割，线锯丝磨损不均匀，降低线锯丝使用寿命。有人研制了往复自旋式电镀金刚石丝锯数控切割机。其主要特点是在线锯丝直线往复运动的同时，步进电机带动线锯丝不断进行小角度转动，这可使金刚石线锯丝的各处都能均匀地参与切削，减小单向磨损，提高锯丝使用寿命。



往复自旋金刚石丝锯数控切割机



金刚石线切割机床

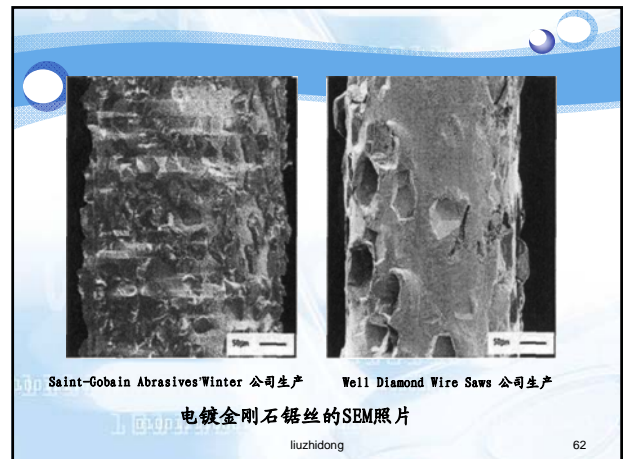
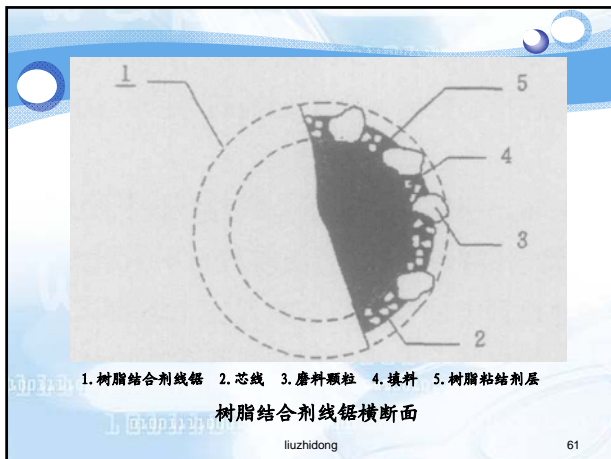
## 固结金刚石方法

固结磨料锯丝是将高硬度、高耐磨性的超硬磨料牢固地固结在钢丝基体上而制成的一种切割工具。目前常用的超硬磨料为金刚石。制作固结磨料锯丝的常用方法有：电镀法、树脂刷涂法和钎焊法等。

钎焊方法是在金刚石、钎料和基体三者之间发生化学冶金结合。曾有专利选用尺寸 $50\mu\text{m}$ 的磨粒、直径 $150\sim 250\mu\text{m}$ 的金属丝，使用硬钎焊方法制作了固结磨料锯丝。但由于钎焊温度较高，会严重影响钢丝的强度和韧性。目前钎焊法制造锯丝与应用少见报道。

树脂结合剂金刚石锯丝的制作原理是：直接将含有金刚石磨料的树脂刷涂在金属丝表面，经过加热固化或光固化干燥后成形，但制作的锯丝耐热性和耐磨性较差。

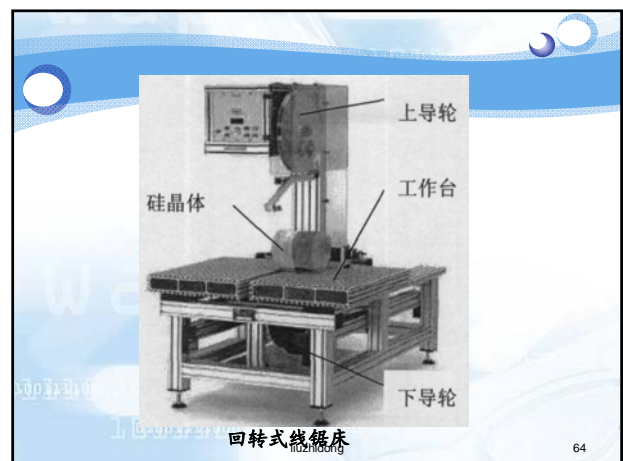
复合电镀法是在锯丝基体上沉积一层金属，靠沉积的金属固结金刚石磨粒。采用这种方法制作的固结磨料锯丝称为电镀金刚石锯丝。电镀金刚石锯丝具有耐热性和耐磨性好的特点。



将固结金刚石锯丝接成环形，通过导轮实现循环切割，称为环形固结金刚石线锯加工技术。环形锯丝是整个长度都参加切割，锯丝使用率高，锯切过程中无惯性力，走丝速度可达20m/s。

但由于环形锯丝有效工作长度短，锯丝磨损较快，锯丝截面较小，接头连接困难等原因，使得环形线锯切割技术多局限于试验室使用阶段，真正在生产实际上应用较少。

liuzhidong 63



#### 4、硅片切割的主要技术指标

❖ 对IC用大直径硅抛光片主要的技术参数要求是：

直径Φ	300.0mm
直径公差	± 0.2mm
厚度	775.0μm
厚度公差	± 25μm
翘曲度Warp	<10μm
总厚度偏差TTV	<0.1μm
局部平整度（线宽100nm）	≤ 101nm
边缘扣除距离	2mm

liuzhidong 65

#### 硅切片表面质量主要参数及含义：

确定硅切片表面质量的主要参数有晶向偏离度、硅片的总厚度偏差TTV、翘曲度Warp、弯曲度Bow。

a. 晶向偏离度 由于硅单晶一般是按（100）或（111）晶向生长的，单晶棒在切片加工前必须先使用X射线衍射的方法来确定单晶棒在切片机上的正确位置。

b. 硅片的总厚度偏差TTV (Total Thickness Variation) 是指硅片的最大与最小厚度之差值。

liuzhidong 66



## 硅切片表面质量主要参数及含义:

c. 硅片的弯曲度Bow是指硅片表面凹凸变形大小的数值。

降低弯曲度在对使用内圆切割机时是一个难于解决的问题,但在用线切割机时,由于硅片两侧受力比较均匀,故其弯曲度几乎为零。

d. 硅片的翘曲度Warp是指硅片的参考平面与硅片的中心平面的最大与最小距离的差值。

一般采用线切割机加工直径200mm硅片的翘曲度可控制在小于20 $\mu$ m。

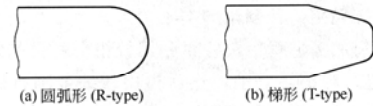
liuzhidong

67

## 第二节 硅片倒角及磨削抛光技术

### 一、硅片倒角:

经切割后的硅切片边缘表面有棱角、毛刺、崩边甚至有裂缝或其他缺陷,边缘表面比较粗糙,为了增加硅切片边缘表面机械强度、减少颗粒沾污,需将其边缘表面磨削呈圆弧形,加工后边缘表面一般呈圆弧形(R-type)或梯形(T-type)



硅片典型的边缘形状

liuzhidong

68

待边缘表面磨削(倒角加工)的硅片被固定在一个可以旋转的支架上,在其边缘方向有一个高速旋转(转速一般达5000~6000r/min,也有高达15万转/min)的金刚石倒角磨轮,两者间作相对的旋转运动,同时加入相宜的磨削液,加工达到要求的直径尺寸公差和边缘轮廓形状,完成硅片的边缘表面磨削加工。

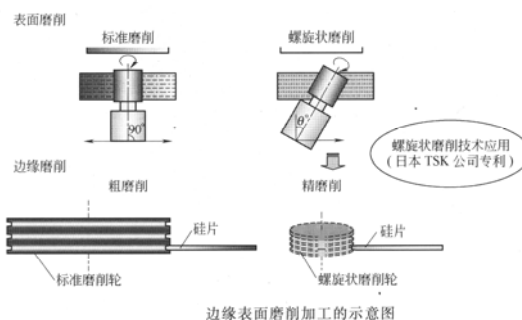
liuzhidong

69

倒角加工中为了使硅片具有较高的直径尺寸公差,同时边缘表面又具有较小的粗糙度Ra和不留有较深的表面损伤,故如何选择金刚石倒角磨轮、采用何种倒角磨削工艺是至关重要的。在对大直径硅片的倒角磨削加工过程中,往往先用较粗金刚石倒角磨轮(粒度常用800#)进行粗倒角磨削,然后再用较细金刚石倒角磨轮(粒度常用3000#)进行精倒角磨削。

liuzhidong

70



liuzhidong

71

## 二、硅片双面表面磨削及研磨

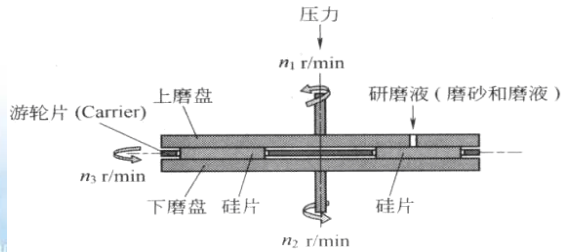
硅片研磨的目的是为了去除切片加工工序中,硅切片表面因切割产生的、深度约20~50 $\mu$ m的表面损伤层,并使硅片具有一定的几何尺寸精度。

目前对直径小于200mm的硅片常采用双面研磨技术对硅片进行双面研磨加工,在使用双面研磨系统对硅片进行双面研磨加工时,利用游轮片将硅片置于双面研磨机中的上下磨盘(磨板)之间,加入相宜的液体研磨料,使硅片随着磨盘作相对的行星运动,并对硅片分段加压进行双面研磨加工。

liuzhidong

72

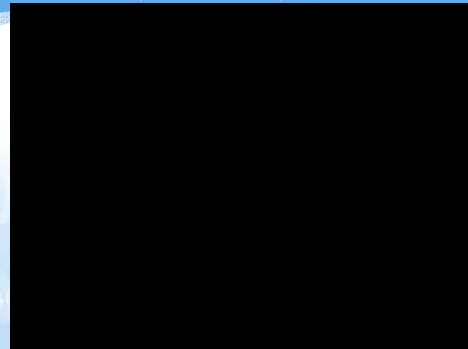
## 硅片双面研磨



liuzhidong

73

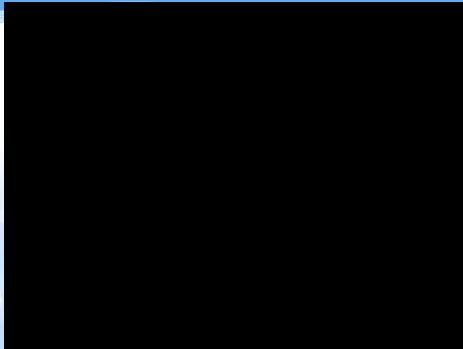
## 单晶硅片生产模拟



liuzhidong

74

## 单晶硅片生产

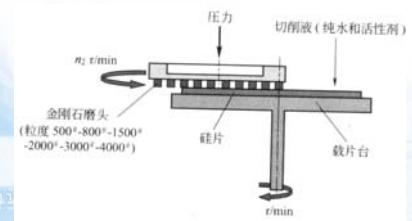


liuzhidong

75

## 硅片表面磨削

表面磨削实质上是采用金刚石磨头直接对硅片表面进行磨削加工，表面磨削技术具有加工效率高、加工后表面平整度好、成本低、产生的表面损伤小等优点，故在直径300mm抛光片制备工艺中，现已广泛采用表面磨削技术来替代传统的双面研磨工艺。



## 表面磨削



liuzhidong

77

## 硅片表面磨削

表面单面磨削加工后，尽管硅片表面能获得较高的加工精度，但表面却会留下明显的“磨削印痕”因此对直径300mm硅片的表面先经过这种单面的磨削加工后，再对硅片表面再进行“弱性”的双面研磨加工工艺，但此时所用的双面研磨工艺与传统双面研磨工艺有所不同，其所加的正向压力比较小，所用的磨砂也会更细小，研磨量也会更少（研磨量约为10-12μm/双面，以此来清除硅片表面上的这种磨削印痕。

为了清除硅片表面的这种“磨削印痕”，提高加工精度，提高加工效率，近几年来，国外已有公司正在开发硅片的另一种加工形式，即硅片的双面磨削加工技术，并且已经逐步产业化，双面磨削加工可以获得较高的磨削速率。

liuzhidong

78

## 硅片的化学腐蚀

硅晶片经过切片、研磨等机械加工后，其表面因机械加工产生的应力而形成有一定深度的机械应力损伤层，而且硅片表面有金属离子等杂质污染。通常采用化学腐蚀工艺来消除这些影响，化学腐蚀的厚度去除总量一般约30-50 μm。常采用的化学腐蚀有酸腐蚀或碱腐蚀，其目的在于在一定浓度和一定温度下的酸或碱溶液与硅晶片发生化学反应，从而达到在硅晶片表面形成均匀化学薄膜。

liuzhidong

79

## 酸腐蚀

- ❖ 酸腐蚀是各向同性的化学腐蚀工艺，硅晶片的各个结晶方向会受到均匀的化学腐蚀
- ❖ 优点：腐蚀速率较快，硅片表面比较光亮，表面不易吸附杂质
- ❖ 缺点：表面平坦度差，控制不好表面易呈枕形（两边薄中间厚形状），所用化学试剂纯度要求比较高，费用较贵，成本比碱腐蚀高。
- ❖ 常用的酸腐蚀液构成：
- ❖ 不同比例的硝酸（HNO<sub>3</sub>）、氢氟酸（HF）和一缓冲剂（醋酸CH<sub>3</sub>COOH或磷酸H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>）

liuzhidong

80

## 腐蚀速率

- ❖ 当酸腐蚀液中含有较高浓度的氢氟酸时，硅片的腐蚀速率由硝酸的浓度决定。
- ❖ 当酸腐蚀液中含有较高浓度的硝酸时，其腐蚀速率由氧化物的溶解速率决定

liuzhidong

81

## 碱腐蚀

- ❖ 碱腐蚀是一种各向异性的化学腐蚀工艺，其腐蚀速率与硅晶片的结晶方向有关。
- ❖ 优点：腐蚀速率慢，可保证硅片表面平坦
- ❖ 缺点：表面比较粗糙，易吸附杂质
- ❖ 碱腐蚀常用的化学试剂是KOH和NaOH
- ❖  $\text{Si} + 2\text{KOH} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{K}_2\text{SiO}_3 + 2\text{H}_2$
- ❖ 常用KOH饱和溶液，其浓度在30%-45%之间，腐蚀反应温度约在80-100℃之间。
- ❖ 碱腐蚀速率随KOH浓度的增加而增大，但到一个最大值后会随KOH浓度进一步的增加而递减，为此KOH的浓度常选用40%-45%。
- ❖ 碱腐蚀速率与晶片表面的机械损伤程度有关，一旦损伤层完全去除后，腐蚀速率会变得缓慢

liuzhidong

82

- ❖ 碱腐蚀速率随KOH浓度的增加而增大，但到一个最大值后会随KOH浓度进一步的增加而递减，为此KOH的浓度常选用40%-45%。
- ❖ 碱腐蚀速率与晶片表面的机械损伤程度有关，一旦损伤层完全去除后，腐蚀速率会变得缓慢

liuzhidong

83

## 硅片酸碱腐蚀工艺对比

项 目	酸 腐 蚀 工 艺	碱 腐 蚀 工 艺
腐蚀特性	各向同性	各向异性
腐蚀反应的热量	吸热	吸热
表面平坦度 (STIR, TIR, TTV)	需要依靠晶片旋转、特制的夹具、通气体充分搅拌腐蚀液等特殊机构及工艺手段来改善其表面平坦度	不需要特殊机构便可达到一定的表面平坦度，平坦度较好
腐蚀后表面粗糙度 (R <sub>a</sub> )	比碱腐蚀工艺小，与晶片原有的损伤程度有关	比酸腐蚀工艺大，与晶片原有的损伤程度有关
硅片表面残留的微粒	原先就已存在于晶片表面上的微粒就难去掉，较低的表面粗糙度不容易吸附微粒	原先就已存在于晶片表面上的微粒容易去掉，较差的表面粗糙度容易吸附微粒
金属污染程度 (Cu, Ni)	腐蚀液的纯度比较高，腐蚀温度较低，金属扩散程度小	腐蚀液的纯度比较低，腐蚀温度高，金属扩散程度大，(111)晶向比(100)晶向严重
表面腐蚀斑点残留印痕	晶片从腐蚀液转移到水中时间必须小于0.6s，才能有效防止斑痕的产生，较低电阻率的晶片比较容易产生斑痕	晶片从腐蚀液转移到水中时间必须小于2s，才能有效防止斑痕的产生，与晶片电阻率无关
腐蚀槽的使用寿命	比较短	比较长
加工成本	所用化学试剂费用较贵，所用化学试剂比碱腐蚀用化学试剂费用约贵2倍左右	所用化学试剂费用较便宜
环境保护处理	环保处理相对比较复杂	环保处理相对比较容易

liuzhidong

84



### 第三节 硅片的表面抛光

#### 一、硅片表面抛光 (Polishing) 目的:

去除其表面由前工序 (切片、研磨等) 所残留下的微缺陷及表面的应力损伤层和去除表面的各种金属离子等杂质污染, 以求获得硅片表面局部平整、表面粗糙度极低的洁净、光亮“镜面”, 满足制备各种微电子器件对硅片的技术要求。

硅片的表面抛光是硅片加工中的关键工序, 其加工精度直接影响IC芯片的性能、合格率等技术指标。

一般直径小于200mm的硅片的表面抛光常采用有蜡或无蜡贴片的单面抛光技术

线宽小于0.18  $\mu\text{m}$ , 直径300mm的IC硅片表面粗、细抛光采用双面抛光技术, 精抛光和最终抛光仍采用单面无蜡抛光技术。

liuzhidong

85

为了确保硅片表面的抛光加工精度, 根据工艺要求可对硅片进行两步 (粗抛光、精抛光) 或三步 (粗抛光、细抛光、精抛光) 或四步 (粗抛光、细抛光、精抛光、最终抛光) 碱性胶体二氧化硅抛光液的化学机械抛光 (Chemical Mechanical Polishing, 即通常所说的CMP技术) 的单面或双面多段加压抛光工艺。

liuzhidong

86

### 二、抛光一般流程

#### ❖ 粗抛光

去除硅片表面由前加工工序残留下的表面机械损伤应力层, 使其达到要求的几何尺寸加工精度, 一般粗抛光加工量大于15  $\mu\text{m}$ 。

#### ❖ 细抛光

确保硅片表面有极低的局部平整度及表面粗糙度, 一般抛光加工量大于5  $\mu\text{m}$ 。

#### ❖ “去雾”精抛光

确保硅片表面有极高的表面纳米形貌特性, 一般抛光加工量小于1  $\mu\text{m}$ 。

#### ❖ 最终抛光

为了满足线宽小于0.13  $\mu\text{m}$  IC用直径300mm的硅片的加工工艺要求, 在硅片进行细抛光后可分别进行为确保其表面有极高的表面纳米形貌特性的“去雾”精抛光后, 可再进行一次“去雾”的最终抛光。

liuzhidong

87

### 硅片粗抛和精抛对比

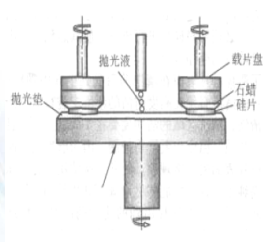
项目	粗抛	精抛
磨除厚度/ $\mu\text{m}$	10 ~ 20	< 1
磨除率/ $\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	1 ~ 2	0.1 ~ 0.2
研磨浆料	二氧化硅、KOH(或 $\text{NH}_4\text{OH}$ )、水 pH = 10.5 ~ 12	同左, 但浓度较稀
研磨垫修整	二氧化硅、碳化硅	尼龙刷

liuzhidong

88

### 三、硅片的抛光原理

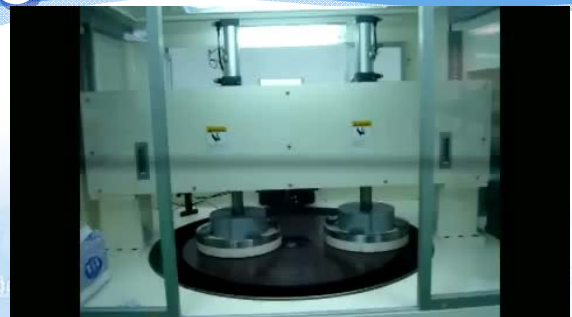
❖ 硅片抛光是在抛光机中进行的, 硅片通过石蜡黏着或真空吸附的方式固定在载片盘上, 抛光时将硅片加压在一旋转中的抛光垫上, 同时加入适当的抛光液, 通过硅片与抛光液的摩擦来获得镜面抛光效果。



liuzhidong

89

### 表面抛光



liuzhidong

90

## 硅片的碱性胶体二氧化硅化学机械抛光原理

❖ 硅片抛光是一种化学、机械过程

特点:

❖ 碱性二氧化硅胶体化学机械抛光综合了化学抛光无损伤和机械抛光易获平整、光亮表面的特点。在抛光过程中，化学腐蚀和机械摩擦两种作用就这样交替、循环地进行。

liuzhidong

91

liuzhidong

92

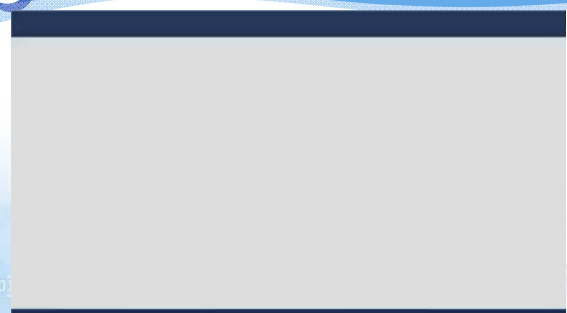
## 硅片的化学机械抛光



liuzhidong

93

## 精密的化学机械抛光



liuzhidong

94

## 抛光过程

- ❖ 在抛光加工中，硅片表面与抛光液中碱的化学腐蚀反应生成可溶性的硅酸盐，通过细而柔软、带有负电荷的 $\text{SiO}_2$ 胶粒（粒度常为50-70nm）的吸附作用、同时与抛光布（衬垫）间的机械摩擦作用及时除去其反应物。
- ❖ 在抛光过程中，使其连续地对硅片表面进行化学、机械抛光，同时靠 $\text{SiO}_2$ 的吸附和碱性化学清洗作用，达到去除硅片表面损伤层及杂质沾污的抛光目的

liuzhidong

95

## 抛光布 (Polishing Pad)

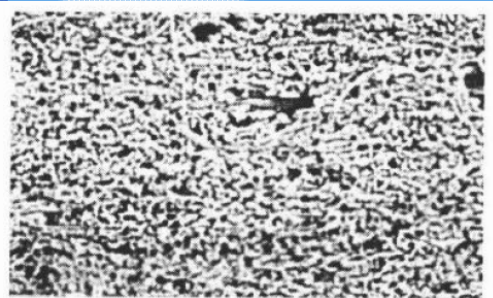
常用的几种抛光布垫:

- ❖ A、无纺布抛光布垫 (Impregnated Pad)
- ❖ B、绒毛结构抛光布垫 (Poromeric Pad)
- ❖ C、聚氨酯发泡固化的抛光布垫 (Polymeric Pad)

liuzhidong

96

### 无纺布抛光布垫

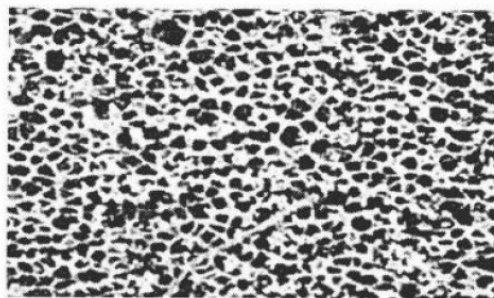


(a) 表面组织结构

liuzhidong

97

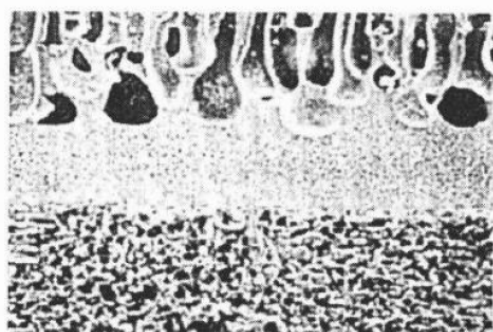
### 绒毛结构抛光布垫



(b) 表面组织结构

liuzhidong

98

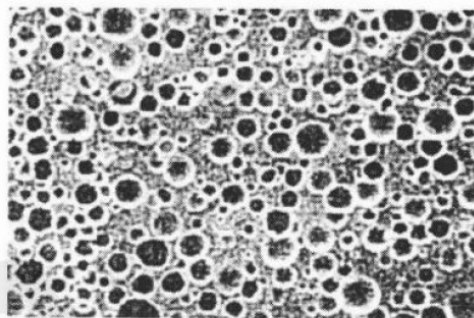


(c) 横断面组织结构

liuzhidong

99

### 聚氨酯发泡固化的抛光布垫



(d) 表面结构图

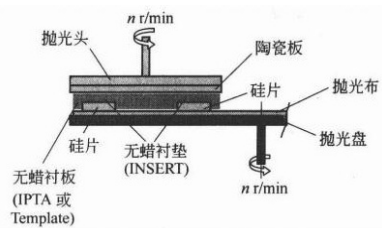
100

## 四、硅片单面、双面抛光技术

### 单面抛光技术:

对200mm及以前的硅片来说,一般只进行单面抛光,包括无蜡贴片单面抛光和有蜡贴片单面抛光。

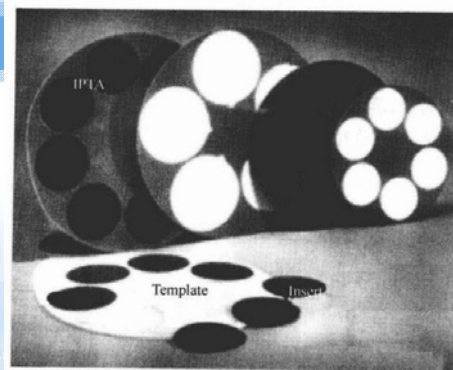
无蜡贴片单面抛光是依靠真空或其他方法将硅片紧紧地与载体板、盘(陶瓷板)结合在一起进行抛光加工



直径小于 125mm 无蜡贴片单面抛光

liuzhidong

101



美国 Rodel 公司的无蜡衬板

liuzhidong

102



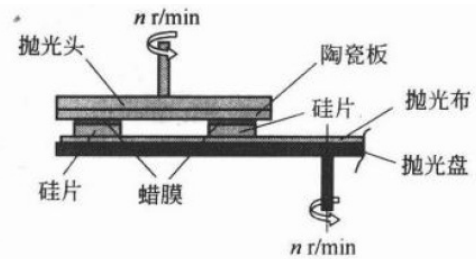
- ❖ 采用无蜡贴片单面抛光技术的优点：能避免蜡的有机物沾污，从而使抛光硅片的化学清洗变得比较简单。
- ❖ 缺点：无蜡贴片单面抛光最大的问题是无法得到极低的总厚度偏差TTV、局部平整度STIR（SFQR）等。
- ❖ 通过工艺调整，无蜡贴片单面抛光的加工精度可达到：

TTV	2-3 $\mu\text{m}$ （总厚度偏差）
STIR（SFQR）	4-2 $\mu\text{m}$ （局部平整度）

liuzhidong

103

## 有蜡贴片单面抛光



直径 150~200mm 有蜡贴片单面抛光

liuzhidong

104

- ❖ 有蜡贴片单面抛光技术中，硅片是依靠蜡膜作为介质将硅片紧紧地与载体板、盘（陶瓷板）粘贴在一起进行抛光加工。
- ❖ 有蜡贴片抛光虽能提高加工精度，但其涂蜡工艺（常采用涂刷、离心、喷雾等）比较复杂，所使用的蜡的形式较多，有固体、液体、水溶性等各种形态的蜡，其抛光加工精度直接与所使用蜡的种类（材料的成分、内含杂质、物理特性等）及蜡膜厚度及其均匀程度、硅片涂蜡的工艺环境的洁净程度等诸多因素有关。
- ❖ 故有蜡贴片单面抛光中，硅片涂蜡的工艺均应在洁净室内进行（至少不低于100级），要求蜡膜的厚度合适（约1.5  $\mu\text{m}$ ）、均匀。
- ❖ 通过工艺调整，有蜡贴片单面抛光的加工精度可达：

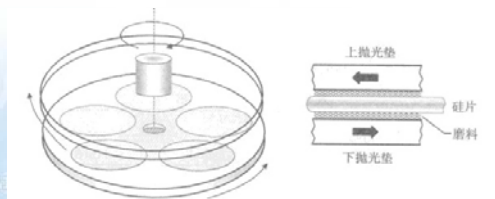
TTV	< 1.2 $\mu\text{m}$
STIR（SFQR）	< 0.5 $\mu\text{m}$

liuzhidong

105

## 双面抛光技术

- ❖ 对300mm硅片来说，用CMP进行双面抛光（DSP）是最后一步主要的制备步骤。



双面硅片抛光

liuzhidong

106

- ❖ 硅片在抛光盘之间行星式的运动轨迹在改善表面粗糙度的同时也使硅片表面平坦且两面平行。由于这是硅片制备的最后一步，沿着硅片大直径的平整度能够容易得到保证。背面抛光也使在把硅片提交给硅片制造厂之前能让厂商了解其洁净度。最后硅片的两面都会像镜子一样。

liuzhidong

107

## 第五节 硅片的激光刻码

为了使硅片的供、需双方便于交流和对硅片进行有效跟踪，需对硅片做统一的标识。



108