



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

# 集成电路工艺技术

## Integrated Circuit Technology

康博南

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY

**第一章 半导体衬底**

**第二章 氧化**

**第三章 扩散**

**第四章 离子注入**

**第五章 光刻**

**第六章 刻蚀**

**第七章 化学气相沉积**

**第八章 化学机械化平坦**

**第九章 金属化工艺**

**第十章 CMOS工艺流程**



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

教材:

1、《半导体制造技术》，作者 Michael Quirk，电子工业出版社。

参考

2、《微电子制造科学原理与工程技术》，作者 Stephen A. Campbell，电子工业出版社。

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

# 第一章 半导体衬底

晶体生长、晶圆片制造及硅晶圆片的基本特性

**Crystal Growth, Wafer Fabrication and Basic  
Properties of Silicon Wafers**

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

# 课程内容

JILIN UNIVERSITY

- 1、集成电路发展历程回顾
- 2、描述天然硅原料如何加工提炼成半导体级硅 (semiconductor-grade silicon, SGS)。
- 3、解释晶体结构与单晶硅的生长技术。
- 4、讨论硅晶体的主要缺陷。
- 5、简单叙述由硅晶锭加工成为硅晶圆的基本步骤。
- 6、说明并讨论晶圆供应商所需进行的7项品质测量项目。
- 7、外延层及其重要性。

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

# 集成电路发展历程回顾

JILIN UNIVERSITY

- 1、1906年 第一只三极管“Audion”
- 2、1925年 场效应晶体管的提出
- 3、1948年 点接触晶体管
- 4、1950年 面接触晶体管
- 5、1958年 第一块集成电路
- 6、1960年 MOS场效应晶体管

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

## ENIAC – 第一个电子计算机 (1946)



Replacing a bad tube meant checking among ENIAC's 19,000 possibilities.

18000个电子管，占地150m<sup>2</sup>，重30吨，计算速度每秒5000次，存储容量千位。



吉林大学

JILIN UNIVERSITY



第一台计算机中  
使用的晶体管。

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY

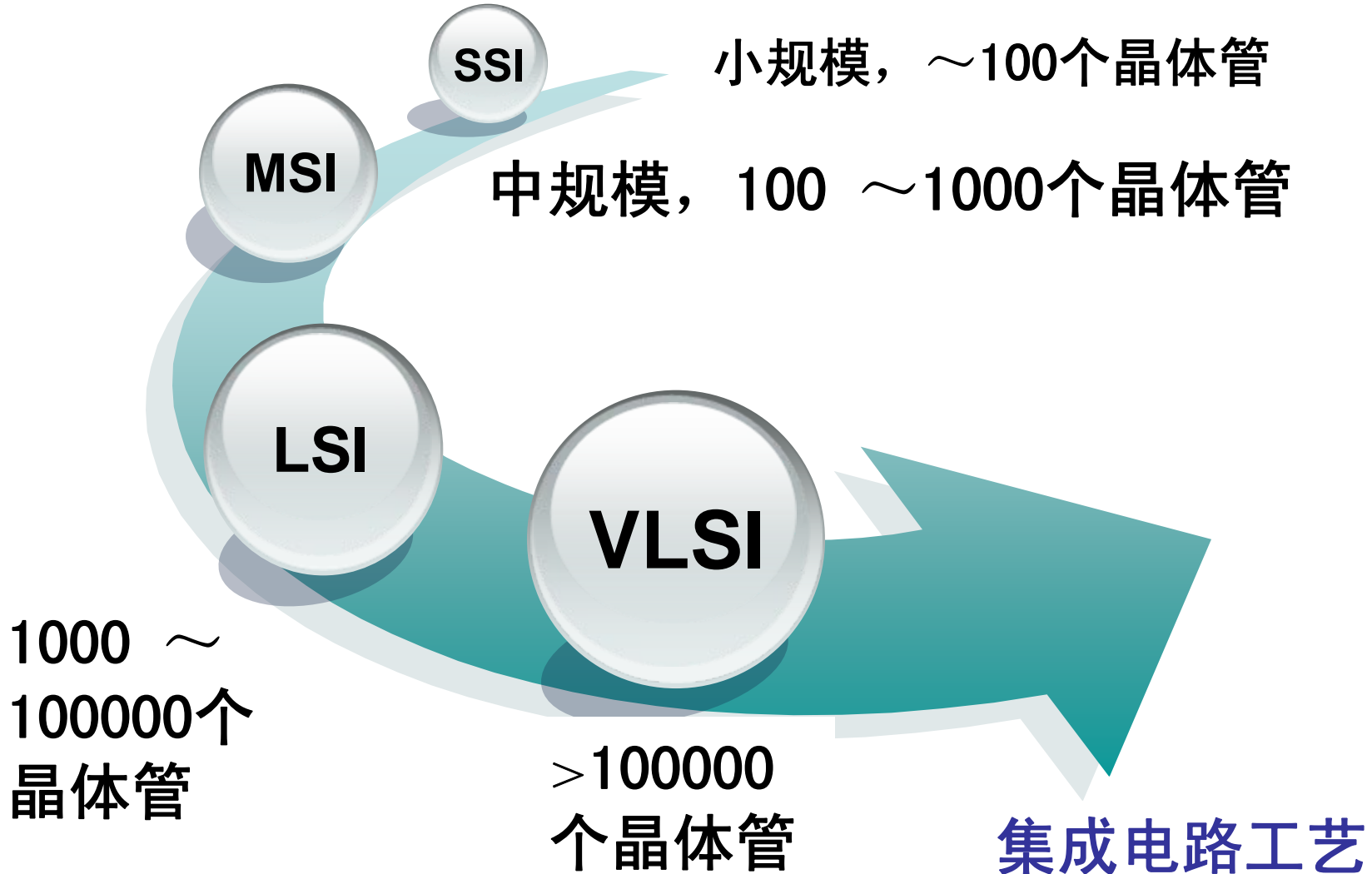




吉林大学

# 集成电路的划分

JILIN UNIVERSITY



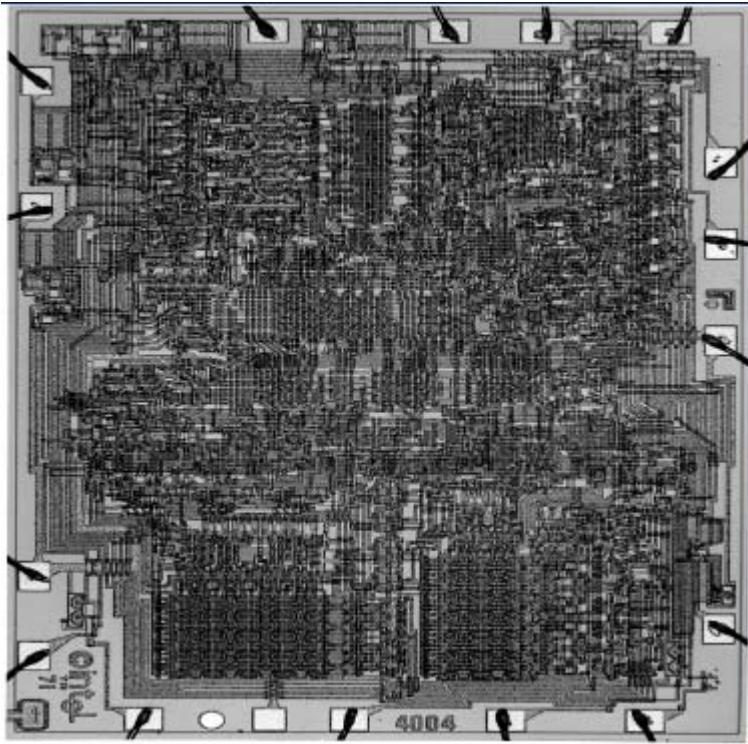
INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

# 1959年开始了集成电路时代



1971年Intel公司推出的微处理器芯片上只有2300个晶体管;

1982年Intel 80286微处理器上有13万4千个晶体管;

1 MHz, 5V

5k Components

集成电路工艺

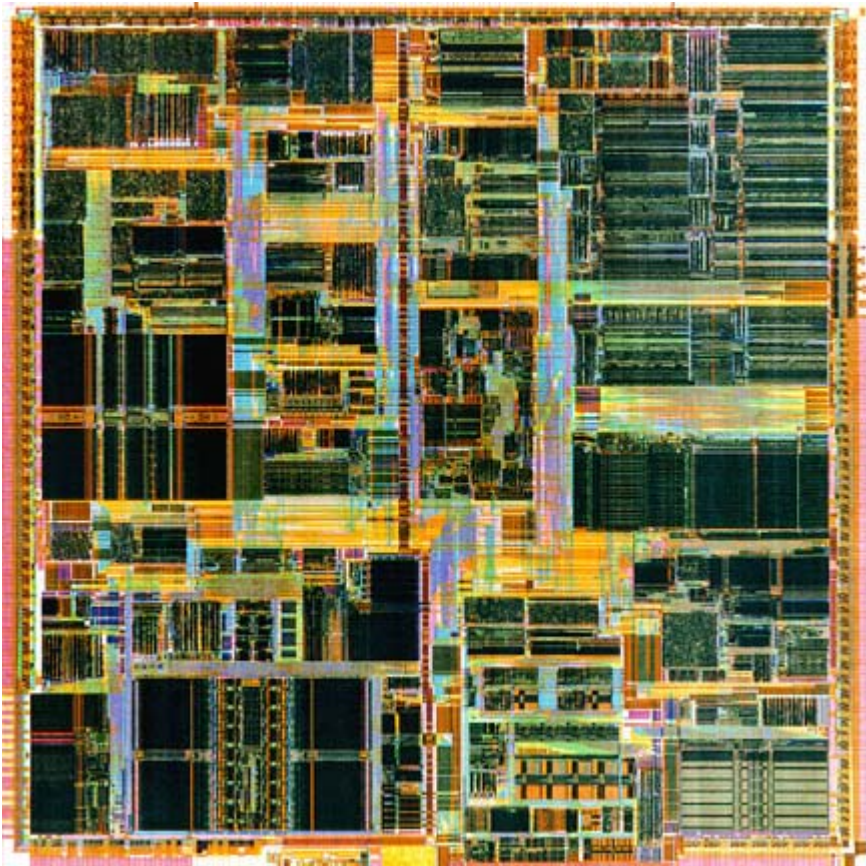
INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

# Intel Pentium (III) Microprocessor

JILIN UNIVERSITY



**1994**

**100 MHz, 3.3V**

**3M Components**

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY

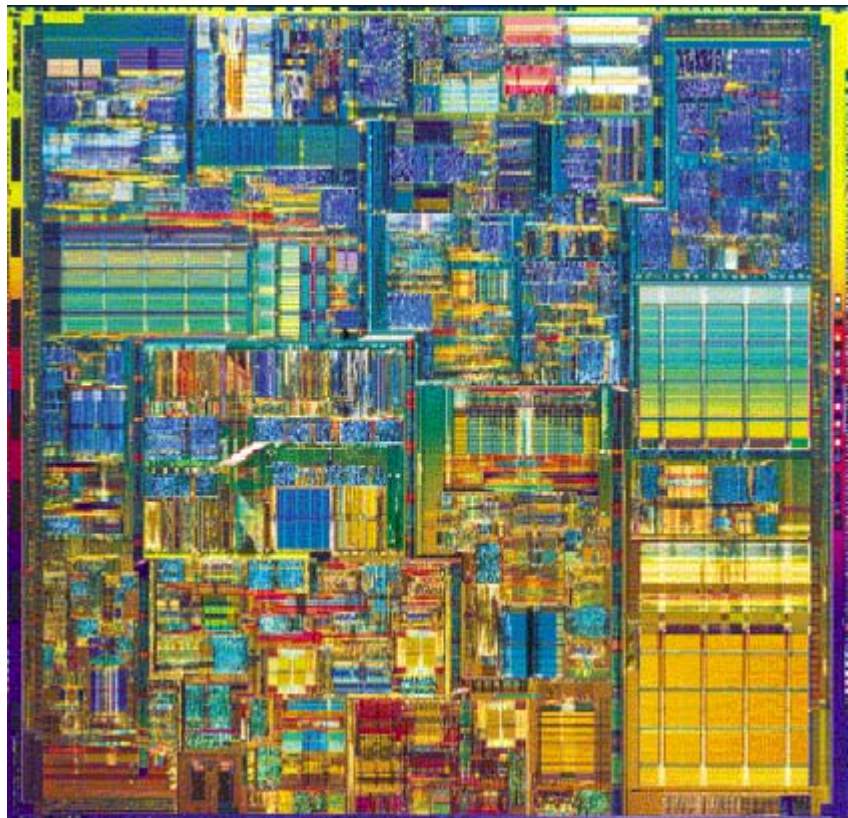




吉林大学

# Intel Pentium (IV) Microprocessor

JILIN UNIVERSITY



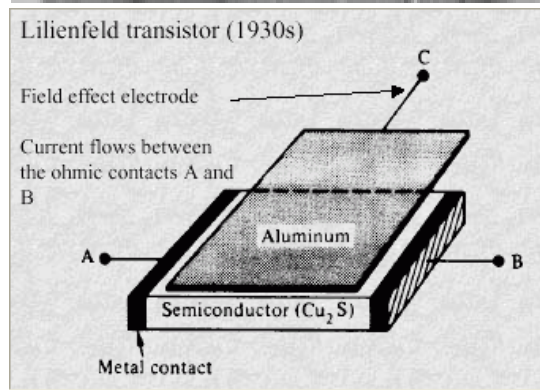
**1999**  
**1.2 GHz, 1.8V**  
**42M Components**

集成电路工艺

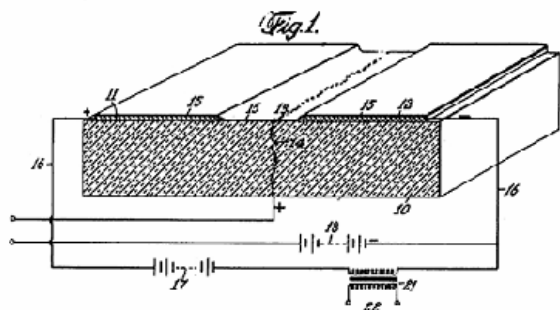
INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY

# Lilienfeld FET Transistor (1930)

Julius Edgar Lilienfeld，利林费尔德 (1882-1963)：德国人，曾在莱比锡大学任教，后由于德国日益增长的迫害犹太人的形式而移居美国，是公司的电容工程师。他于1925年第一个提出了场效应晶体管的概念并于1930年获得专利。1935年，德国物理学家海尔 (Oskar Heil) 描述了一种类似于结型场效应晶体管的结构 (O. Heil, British Patent 439, 457, 1935)。然而，由于材料的困难实际制备晶体管在1960年以前是不可能的。Shockley最初的场效应晶体管的专利申请被完全驳回；Bardeen，巴丁 (美国物理学家，1956, 1972两度获诺贝尔物理学奖) 的点接触晶体管的专利也因为有Lilienfeld的专利在前，而有超过半数的人认为不能通过。



Jan. 28, 1930. J. E. LILIENFELD 1,745,175  
METHOD AND APPARATUS FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENTS  
Filed Oct. 8, 1926

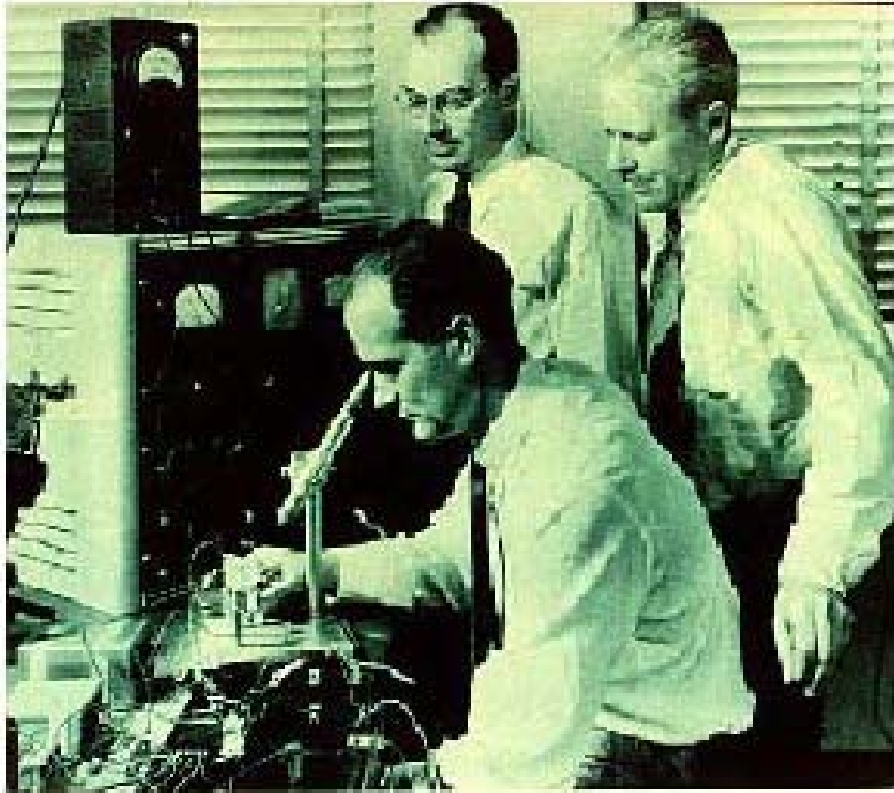




吉林大学

# 第一个晶体管

JILIN UNIVERSITY

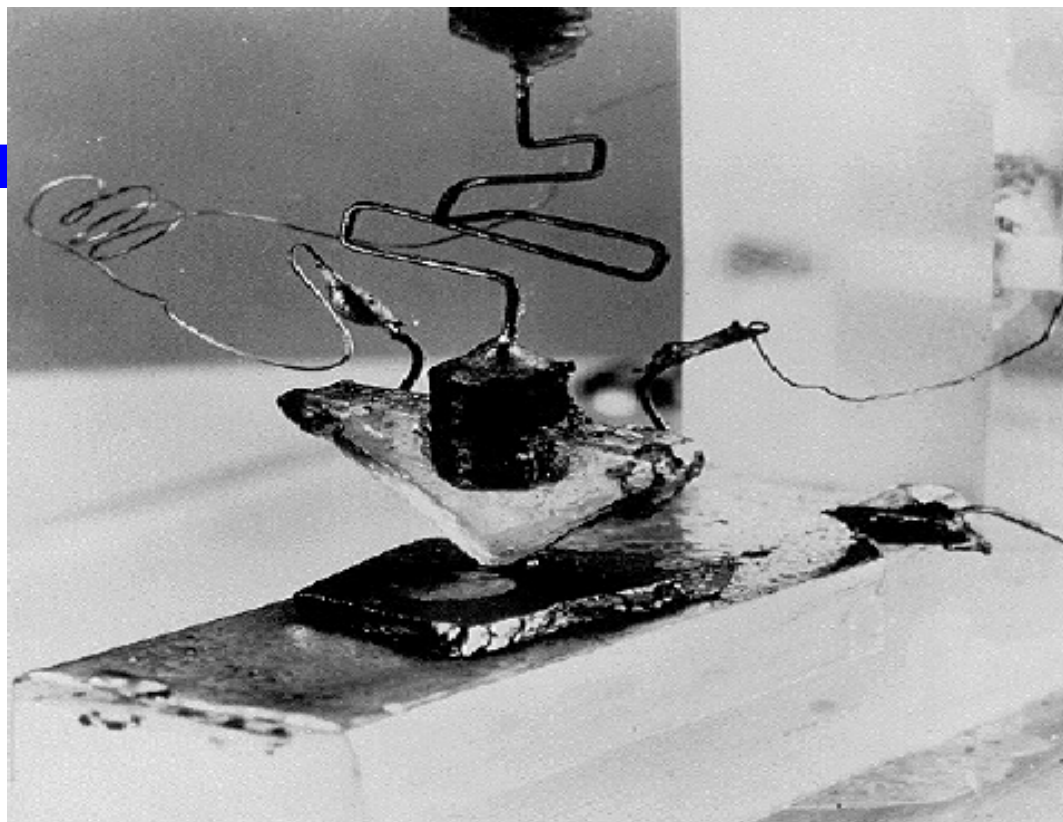


**John Bardeen and Walter Brattain(沃尔特 布拉顿) at Bell Laboratories constructed the first solid-state transistor. This PNP point-contact germanium transistor operated with a power gain of 18 on Dec. 23, 1947. With their manager, William Shockley, they won the Nobel Prize in 1956.**



吉林大学

JILIN UNIVERSITY



这个有世以来的第一个晶体管是将一片金箔带用刀划开一条约为50微米间隔的小缝，用一块三角形的石英晶体将其压到n型半导体锗材料上作为发射极和集电极，形成点接触PNP晶体管。当一个接触正偏另一个反偏时，可以观测到把输入信号放大的晶体管效应。



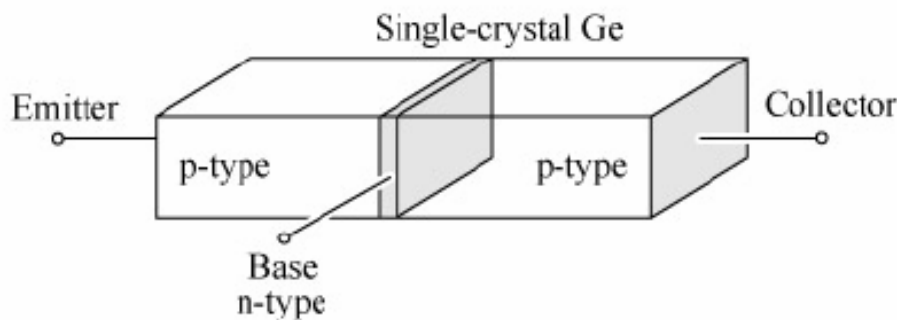
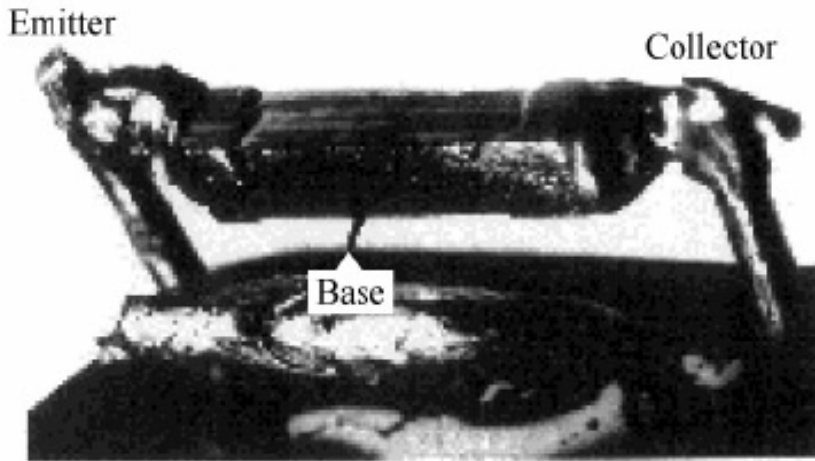


吉林大学

JILIN UNIVERSITY

## The First Junction Transistor

First transistor with diffused pn junctions by *William Shockley*  
Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey (1949)



肖克莱在点接触晶体管发明后，提出了可以利用两个p型层中间夹一n型层作为半导体放大结构的构想。并与M.Sparks和G. K.Teal一起发明了单晶锗NPN结型晶体管。

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



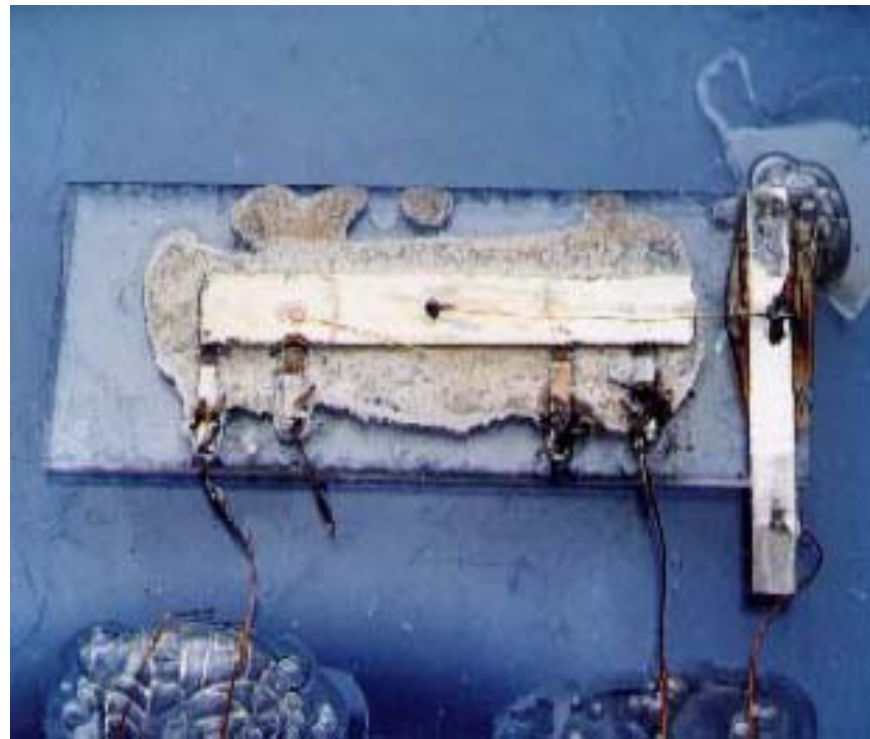


吉林大学

JILIN UNIVERSITY

# 集成电路的诞生

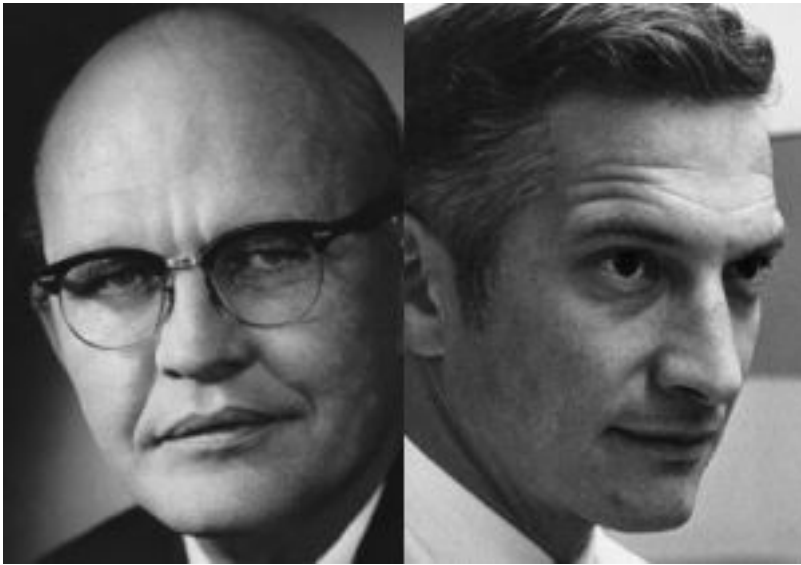
1958 年，德州仪器公司（TI）的杰克·基尔比（Jack Kilby），研制出了世界上第一块集成电路。该电路是在锗衬底上制作的相移振荡器和触发器，共有12个器件。器件之间是介质隔离，器件间互连线采用的是引线焊接方法。





# 吉林大学两个集成电路的独立发明人

JILIN UNIVERSITY



杰克·基尔比和罗伯特·诺伊斯



罗伯特·诺伊斯（Robert Noyce）



# 人类智力的一次飞跃

瑞典皇家科学院将2000年诺贝尔物理奖授予俄罗斯圣彼得堡约飞物理技术研究所的阿尔弗洛夫博士，美国加州大学圣巴巴拉分校的克罗默教授和美国TI公司的基尔比教授，他们是因为高速晶体管，激光二极管和集成电路而荣获此项奖励的。其中，阿尔弗洛夫和克罗默将分享奖金的1/2，而基尔比教授则独得奖金的另一半。





吉林大学

# 半导体级硅

JILIN UNIVERSITY

## 制备半导体级硅 (SGS) 的过程

步骤	过程描述	反应方程式
1	用碳加热硅石来制备冶金级硅 (MGS)。	$\text{SiC (s)} + \text{SiO}_2 \text{ (s)} \rightarrow \text{Si (l)} + \text{SiO (g)} + \text{CO (g)}$
2	通过化学反应将冶金级硅提纯以生成三氯硅烷气体。	$\text{Si (s)} + 3\text{HCl (g)} \rightarrow \text{SiHCl}_3 \text{ (g)} + \text{H}_2 \text{ (g)} + \text{热}$
3	利用西门子方法，通过三氯硅烷和氢气反应来生产半导体级硅 (SGS)。	$2\text{SiHCl}_3 \text{ (g)} + 2\text{H}_2 \text{ (g)} \rightarrow 2\text{Si (s)} + 6\text{HCl (g)}$



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

用来做芯片高纯硅称为半导体级硅（semiconductor-grade silicon），或SGS。

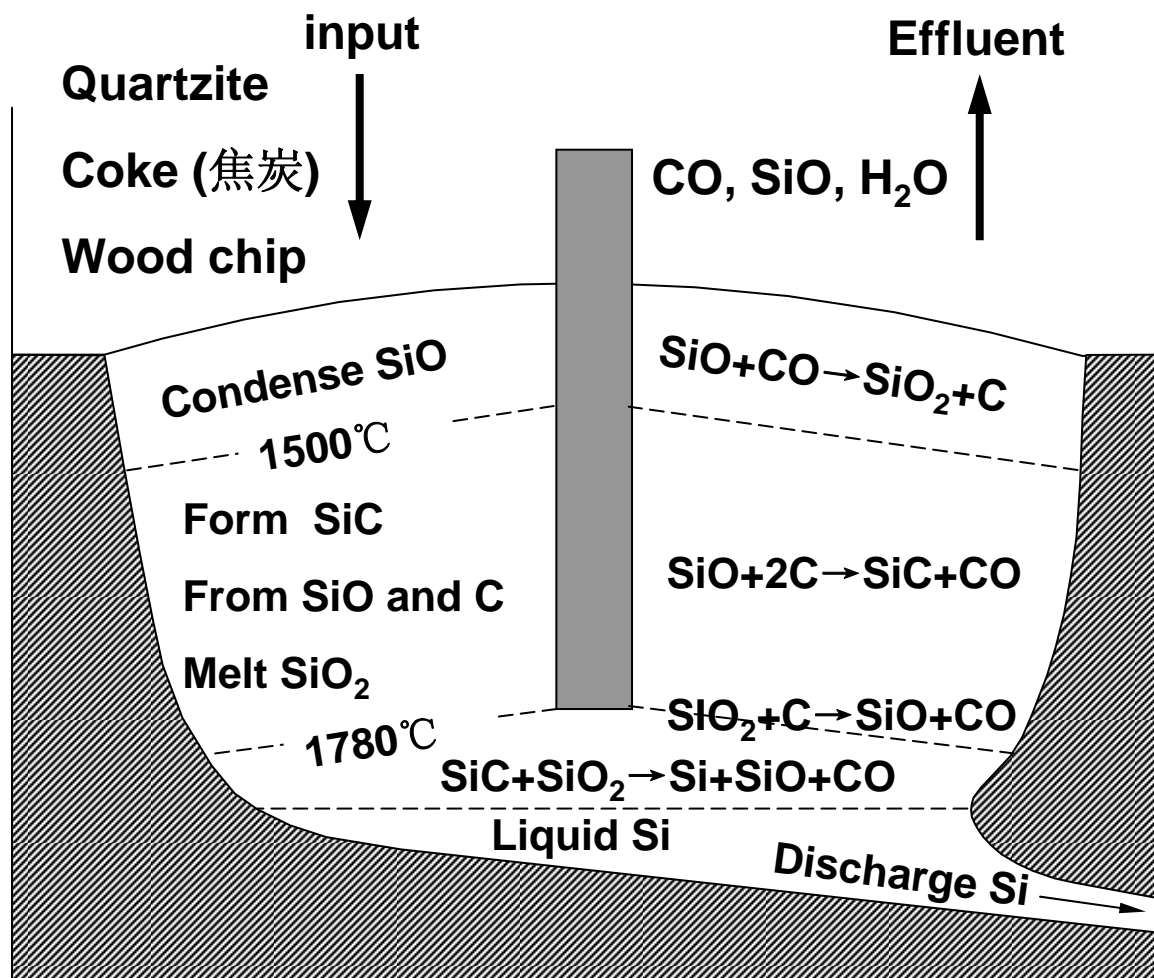
- 得到SGS的第一步是在还原气体环境中，通过加热含碳的硅石（ $\text{SiO}_2$ ），一种纯沙，来生产冶金级硅。
- 在反应式右边所得到的冶金级硅的纯度有98%。由于冶金级硅的沾污程度相当高，所以它对半导体制造没有任何用处。通常将冶金级硅压碎并通过化学反应生成含硅的三氯硅烷气体。
- 含硅的三氯硅烷气体经过再一次化学过程并用氢气还原制备出纯度为99.9999999%的半导体级硅。
- 这种生产纯SGS的工艺称为西门子工艺。三氯硅烷和氢气被注入到西门子反应器中，然后在加热的超纯硅棒上进行化学反应。几天后工艺过程结束，将淀积的SGS棒切成用于硅晶体生长的小片。



吉林大学

# 埋弧电炉生产冶金级硅

JILIN UNIVERSITY

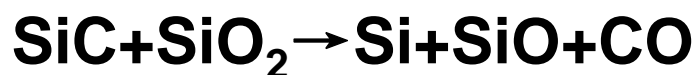


MGS一般杂质种类与浓度

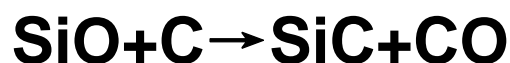
元素	浓度 (ppma)
Al	1200~1400
Fe	1600~3000
B	37~45
P	27~30
Ca	~590
Cr	50~140
Cu	24~90
Mn	70~80
Mo	<10
Ni	40~80
Ti	150~200
Zr	~30



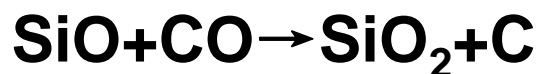
①靠近炉子底部，在电极的电弧区，此处的温度超过**2000℃**，按下式产生硅：



②在此部位的上方，温度稍低一些，达**1700~1500℃**，上升的副产品气体发生反应形成中间产物碳化硅，如下式：



③靠近顶部，这里的温度低于**1500℃**，根据热力学，预计逆向反应占主导地位：



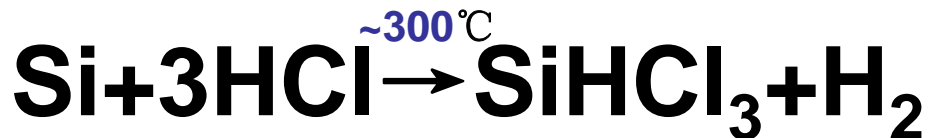
炉料是从炉顶加入炉内的，而液态硅从炉底周期性的放出，铸成锭条。如果铸锭是定向的，符合被称为正常凝固的条件，其杂质再分布可利用来进行一定提纯： $C_s = k_{\text{eff}} C_0 (1-g)^{k_{\text{eff}}-1}$ ，为了使电弧炉反应进行得顺利，要保持炉料的多孔性，使得**SiO**和**CO**能有均匀的气流，并能使**CO**，**SiO**和**H<sub>2</sub>O**能散出到炉顶，为此，加入一些木块在炉料中，而硅石的状态必须是在炉上部加热时不易碎化，否则会过早熔融，结壳，导致炉内气压过高有爆炸的危险。



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

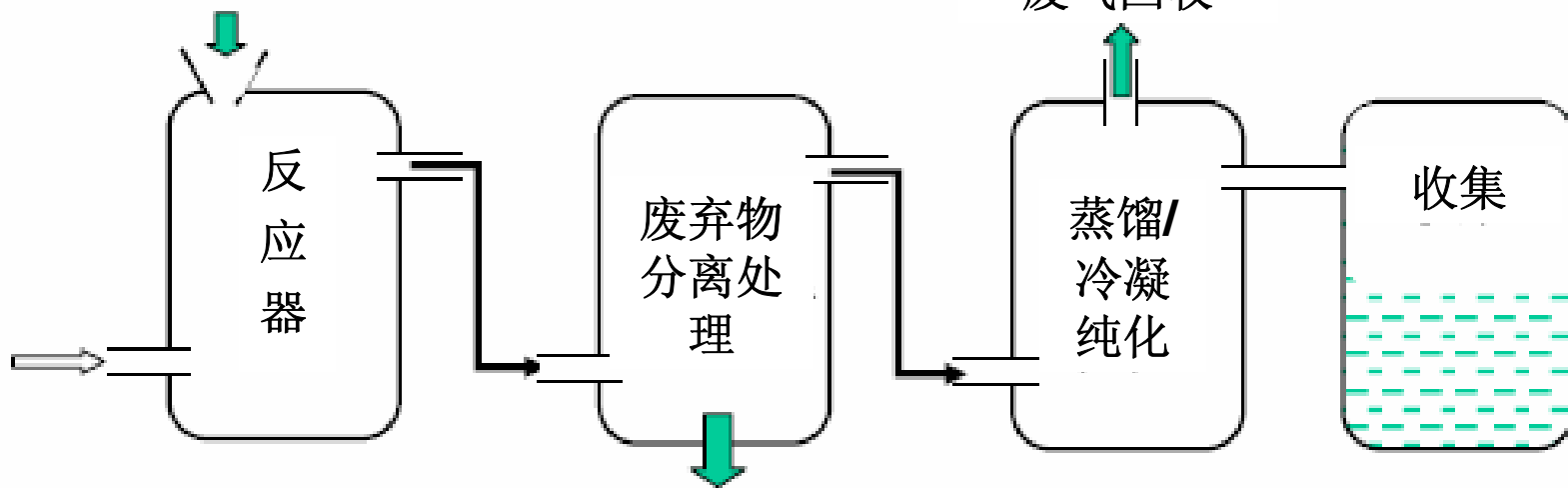
# 盐酸萃取纯化



三氯硅烷, TCS

Powderized MGS

Dry HCl



金属氯化废弃物

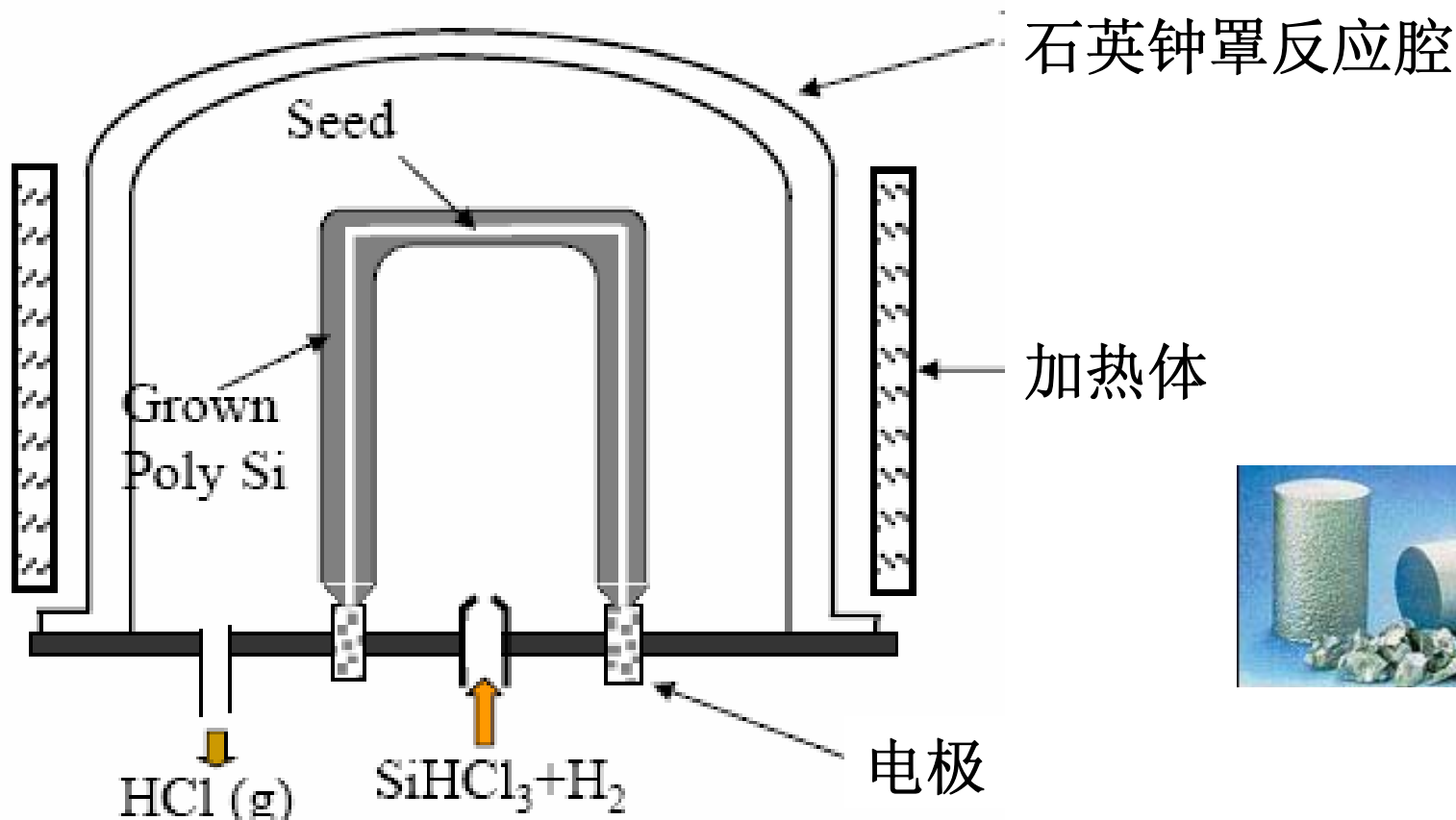
三氯硅烷, TCS

纯度高于99.9999999%



含硅的三氯硅烷气体经过再一次化学过程并用氢气还原制备出纯度为99.9999999%的半导体级硅。

900℃~1100℃





吉林大学

JILIN UNIVERSITY

为什么生产集成电路必须使用单晶硅？

这是因为器件的许多电学和机械性质都与它的原子级结构有关。这就要求原子具有重复性结构，从而使芯片与芯片之间的性能具有重复性。

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

## Why Silicon?

- Abundant, cheap
- Silicon dioxide is very stable, strong dielectric, and it is easy to grow in thermal process.
- Large band gap, wide operation temperature range.

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY

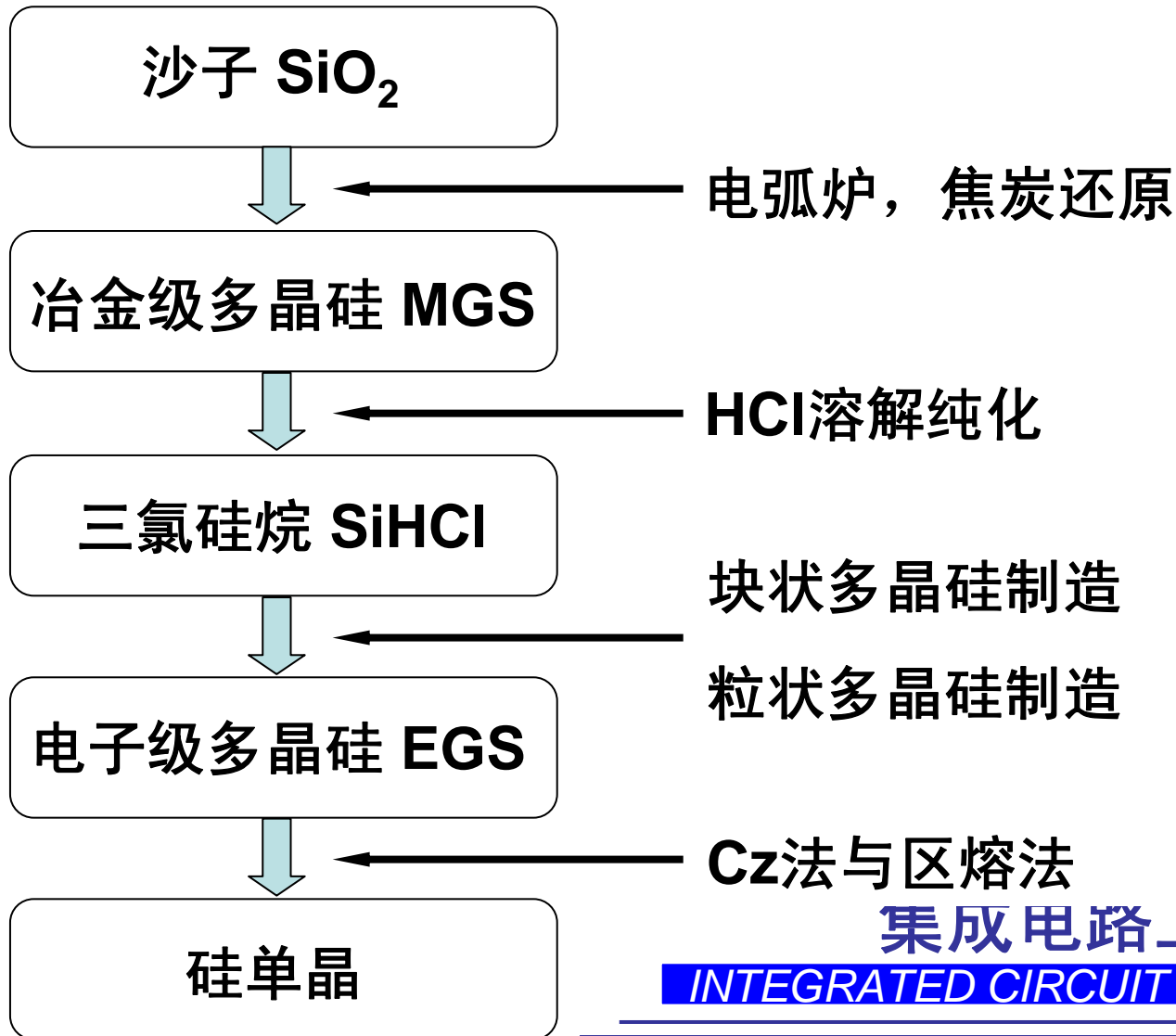
Name	Silicon
Symbal	Si
Atomic number	14
Atomic weight	28.0855
Discoverer	Jöns Jacob Berzelius
Discovered at	Sweden
Discovery date	1824
Origin of name	From the Latin word "silicis" meaning "flint"
Bond length in single crystal Si	2.352 Å
Density of solid	2.33 g/cm <sup>3</sup>
Molar volume	12.06 cm <sup>3</sup>
Velocity of sound	2200 m/sec
Electrical resistivity	100,000 μΩ·cm
Reflectivity	28%
Melting point	1414 °C
Boiling point	2900 °C



吉林大学

# 硅单晶制造流程

JILIN UNIVERSITY



集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

# 单晶硅生长

JILIN UNIVERSITY

- CZ 方法
  - CZ 晶体拉升器
  - 掺杂
  - 杂质控制
- 区熔法
- 发展大直径晶锭的理由

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

公共邮箱:

[ictechnology2014@163.com](mailto:ictechnology2014@163.com)

密码: **ictechnology**

康博南:

[kangbn@jlu.edu.cn](mailto:kangbn@jlu.edu.cn)

**13756553011**

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

# CZ法定义

**Czochralski(CZ)一查克洛斯基法生长单晶硅，把熔化了的半导体级硅液体变为有正确晶向并且被掺杂成n型或p型的固体硅锭。85%以上的单晶硅是采用CZ法生长出来的。**

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY





吉林大学

JILIN UNIVERSITY

## CZ法特点:

- 低功率IC的主要原料。
- 占有~80%的市场。
- 制备成本较低。
- 硅片含氧量高。

集成电路工艺

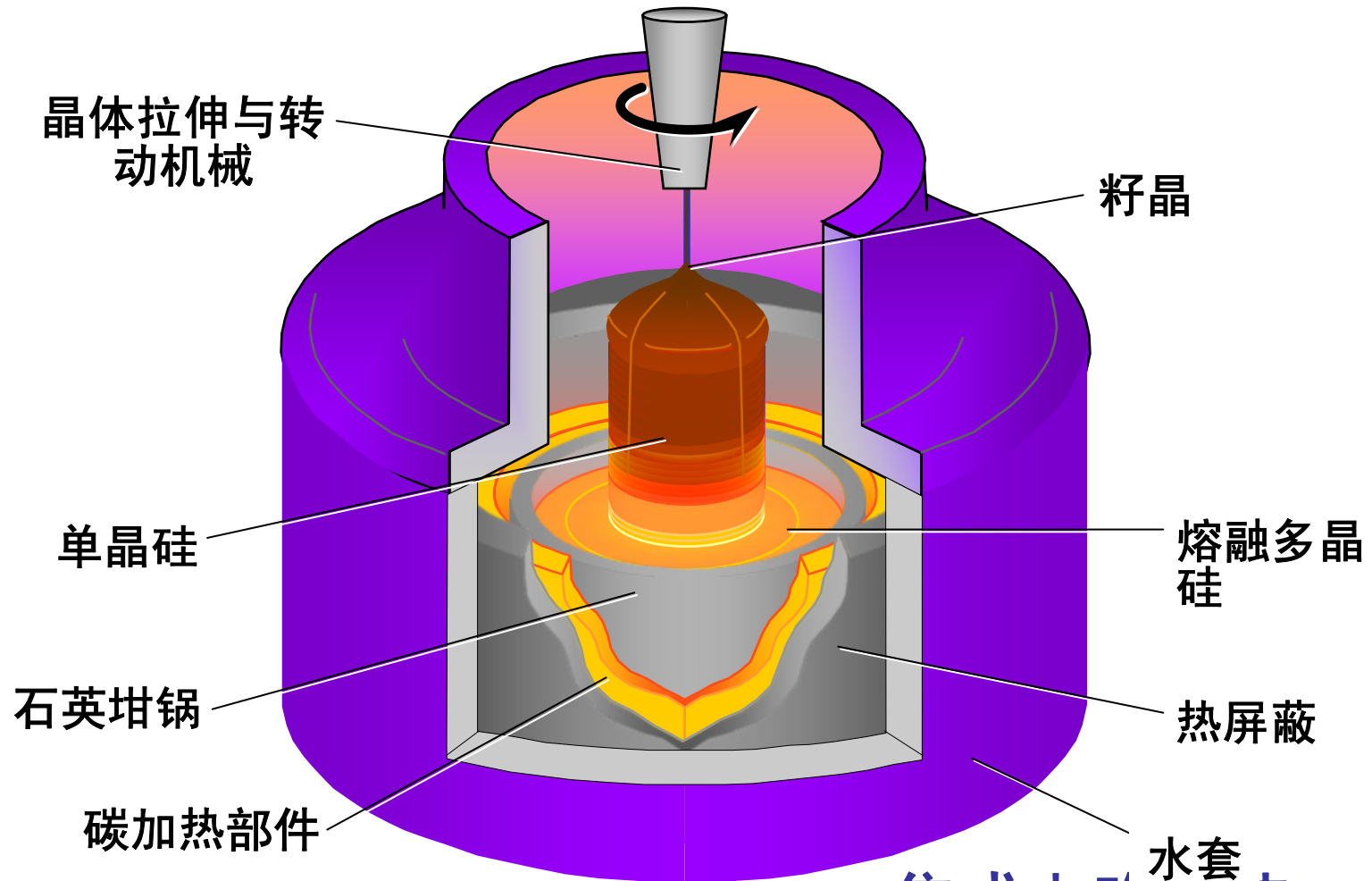
INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

# CZ拉单晶炉

JILIN UNIVERSITY



集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

# 用CZ方法生长的硅锭

JILIN UNIVERSITY



Photograph courtesy of Kayex Corp., 300 mm Si ingot

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

## CZ法主要工艺工程:

**籽晶熔接:** 加大加热功率, 使多晶硅完全熔化, 并挥发一定时间后, 将籽晶下降与液面接近, 使籽晶预热几分钟, 俗称“烤晶”, 以除去表面挥发性杂质同时可减少热冲击。

**引晶和缩颈:** 当温度稳定时, 可将籽晶与熔体接触。此时要控制好温度, 当籽晶与熔体液面接触, 浸润良好时, 可开始缓慢提拉, 随着籽晶上升硅在籽晶头部结晶, 这一步骤叫“引晶”, 又称“下种”。“缩颈”是指在引晶后略为降低温度, 提高拉速, 拉一段直径比籽晶细的部分。其目的是排除接触不良引起的多晶和尽量消除籽晶内原有位错的延伸。颈一般要长于**20mm**。

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

**放肩：**缩颈工艺完成后，略降低温度，让晶体逐渐长大到所需的直径为止。这称为“放肩”。在放肩时可判别晶体是否是单晶，否则要将其熔掉重新引晶。单晶体外形上的特征一棱的出现可帮助我们判别， $\langle 111 \rangle$ 方向应有对称三条棱， $\langle 100 \rangle$ 方向有对称的四条棱。

**等径生长：**当晶体直径到达所需尺寸后，提高拉速，使晶体直径不再增大，称为收肩。收肩后保持晶体直径不变，就是等径生长。此时要严格控制温度和拉速不变。

**收尾：**随着晶体生长结束，采用稍升温，降拉速，使晶体直径逐渐变小，此过程称为收尾。

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY

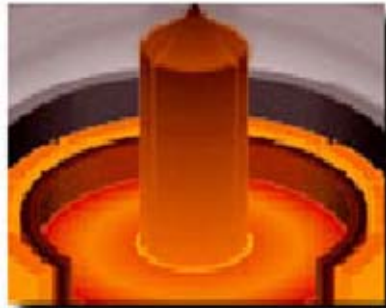
# Czochralski (CZ) Crystal Growth



1. Polysilicon charge in silica crucible.



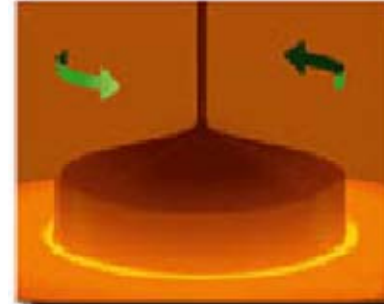
3. Shoulder growth, after neck is complete.



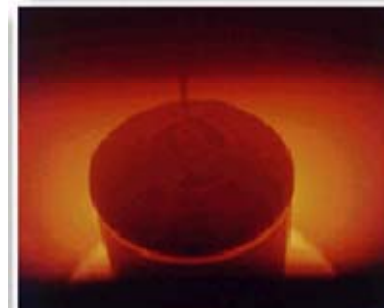
5. Body growth.



2. Start of neck.  
Seed is dipped to  $> 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  melt.



4. Start of body, after completion of shoulder.



5. Conical tail growth after completion of body.

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY





吉林大学

# CZ拉单晶炉

JILIN UNIVERSITY



影响直拉法的两个主要参数是拉伸速率和晶体旋转速率。

Photograph courtesy of Kayex Corp., 300 mm Si crystal puller



吉林大学

# 硅掺杂浓度术语

JILIN UNIVERSITY

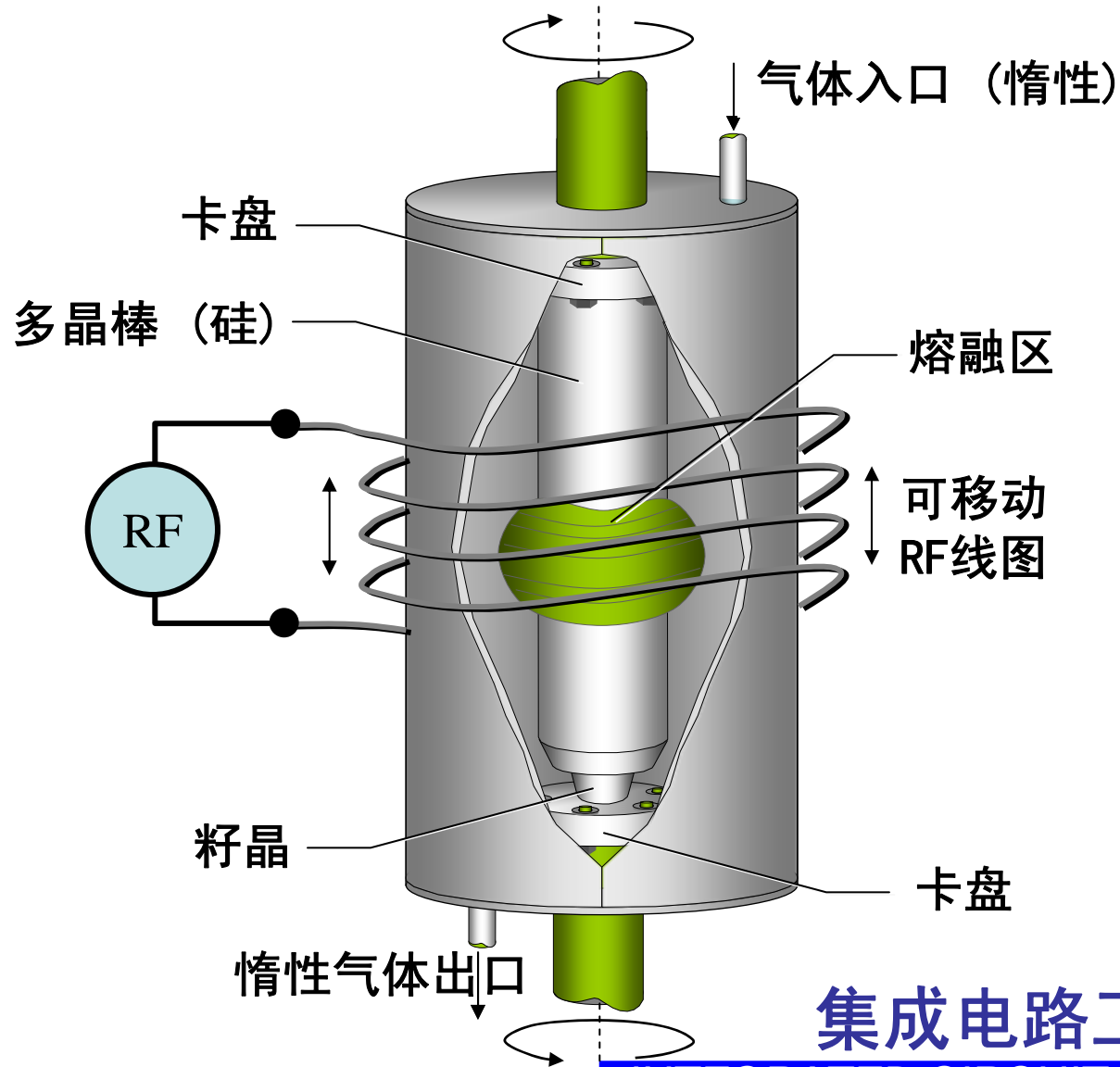
浓度(原子数/cm <sup>3</sup> )					
杂质	材料 类型	$< 10^{14}$ (极轻掺杂)	$10^{14}$ to $10^{16}$ (轻掺杂)	$10^{16}$ to $10^{19}$ (中掺杂)	$>10^{19}$ (重掺杂)
五价	n	n <sup>-</sup>	n <sup>-</sup>	n	n <sup>+</sup>
三价	p	p <sup>-</sup>	p <sup>-</sup>	p	p <sup>+</sup>

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



# 区熔法晶体生长



集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



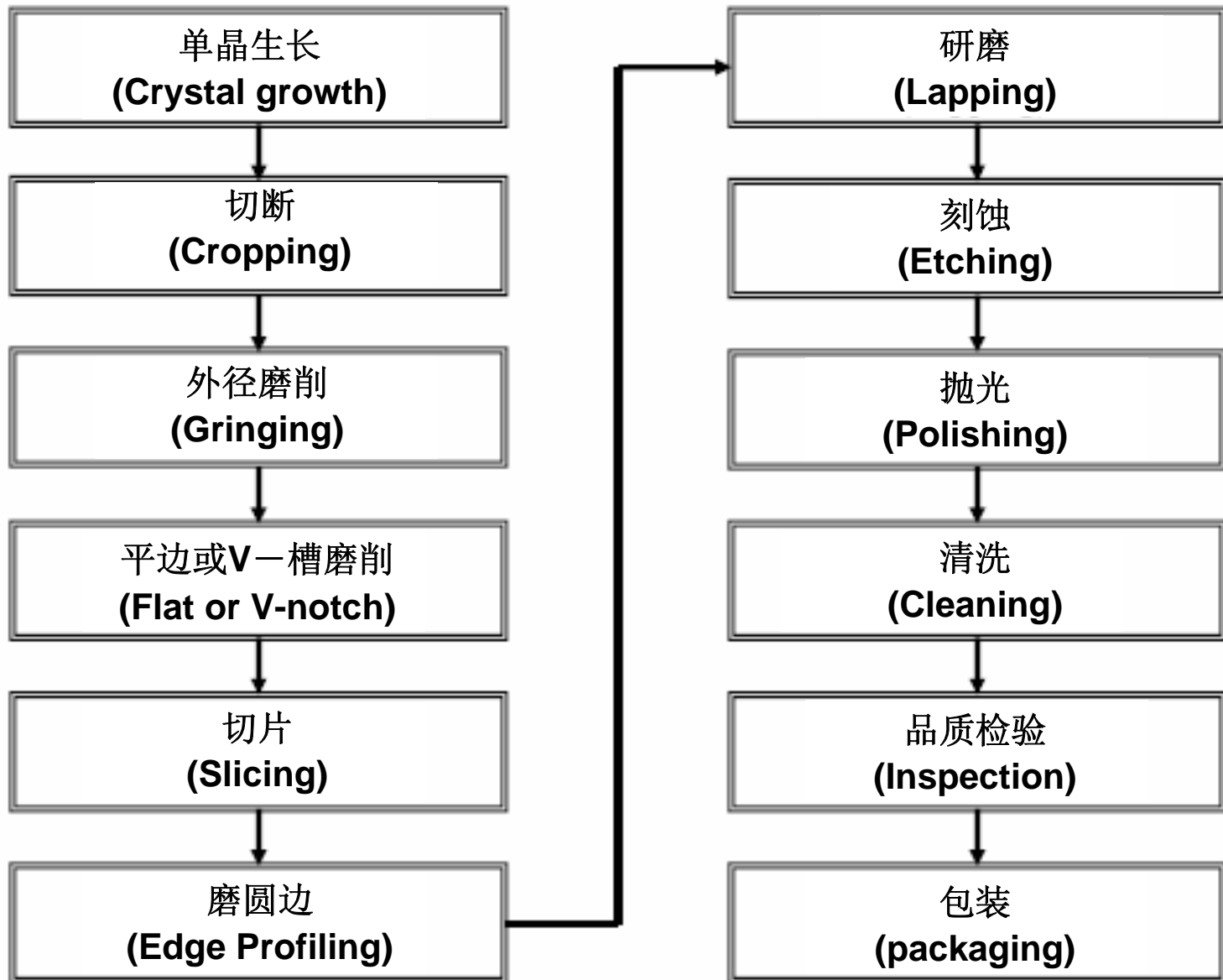
吉林大学

JILIN UNIVERSITY

## 区熔法（Floating Zone method）特点：

- 硅片含氧量低、纯度高。
- 主要用于高功率IC。
- 制备成本比CZ法高。
- 难生长大直径硅晶棒。
- 低阻值硅晶棒、掺杂均匀度较差。

# 硅片制造流程





### Cropping一切断

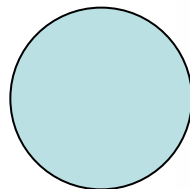
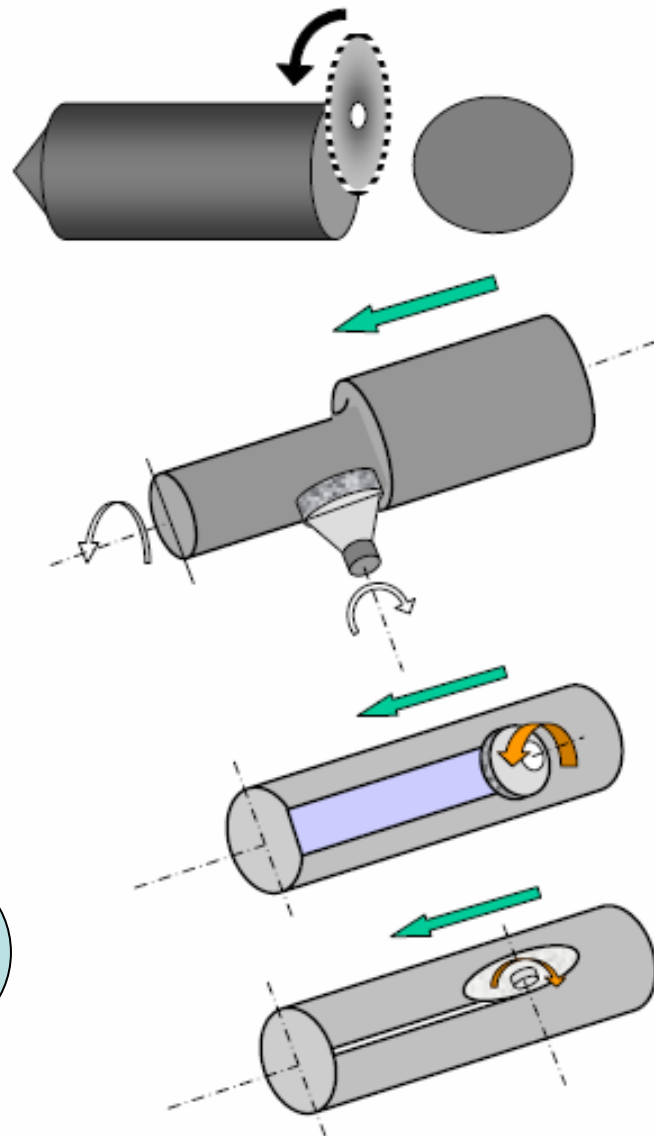
目的：取样测量电阻值及确定结晶方向，并切割出符合阻值规格的长度范围。

### Grinding—外径磨削

目的：磨削至客户所需的硅片尺寸大小。

### Flat or V-notch—平边或V—槽磨削

目的：定位硅片 $\langle 110 \rangle$ 结晶方向（平边或V型槽）



Wafer Dia.	Flat width
4"	32.5 $\pm$ 2.5 mm
5"	42.5 $\pm$ 2.5 mm
6"	47.5 $\pm$ 2.5 mm
8"	56.0 $\pm$ 1.0 mm

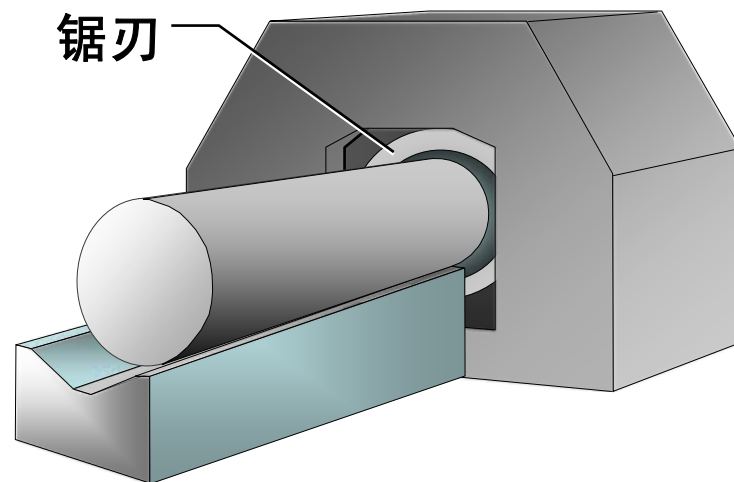


吉林大学

JILIN UNIVERSITY

## Slicing一切片

目的：硅单晶棒切片



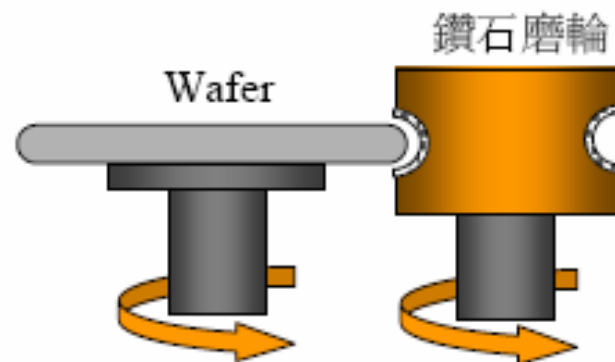
## Edge profiling一磨圆边

目的：将硅片边缘锐角或微缺陷去除，以减少制造过程中产生微粒、防止晶片边缘破裂及晶格缺陷产生，增加外延层及光刻胶层的平坦度。

R-type



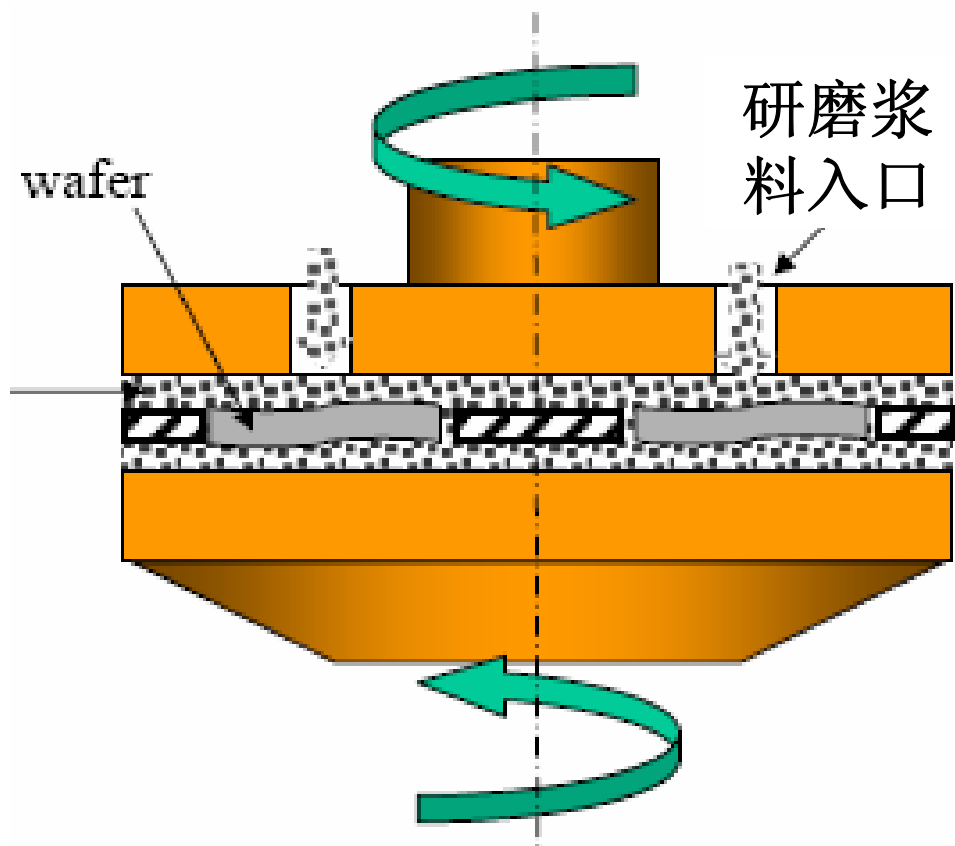
T-type





## Lapping—研磨

目的：通过研磨能除去切片和轮磨所造的锯痕及表面损伤层，有效改善单晶硅片的曲度、平坦度与平行度，达到一个抛光过程可以处理的规格。



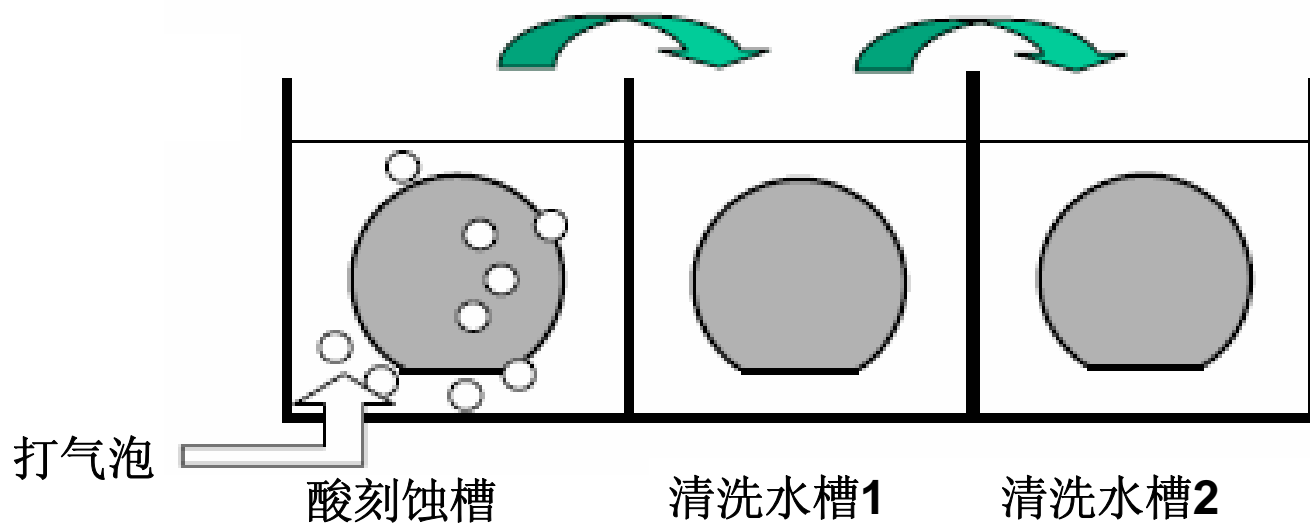
集成电路工艺



吉林大学

## Etching—刻蚀

目的：经切片及研磨等机械加工后，晶片表面受加工应力而形成的损伤层，通常采用化学腐蚀去除。





吉林大学

JILIN UNIVERSITY

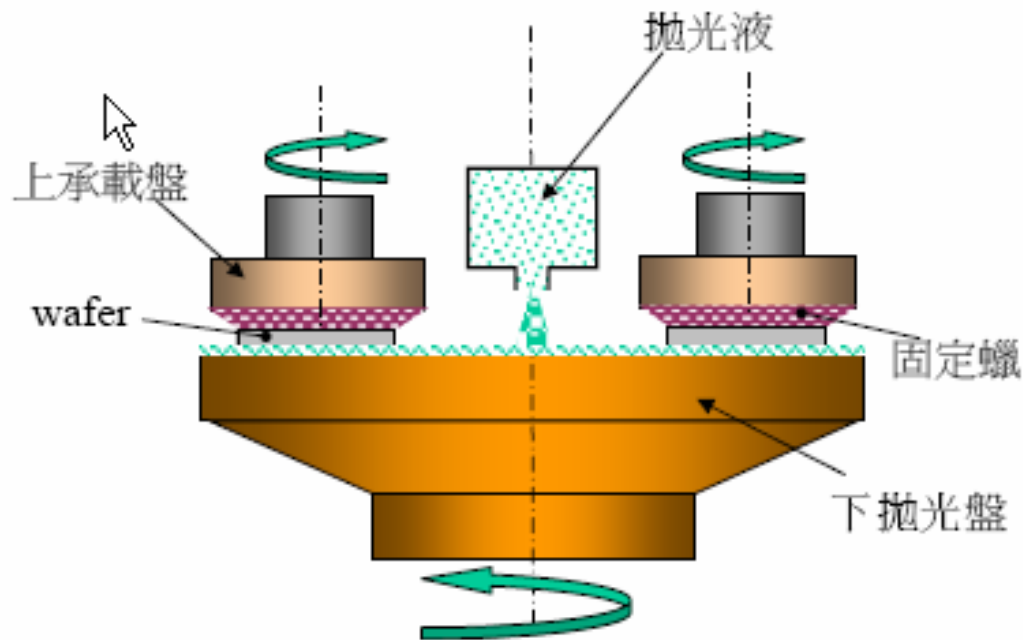
## Polishing—抛光

目的：单晶硅片表面需要改善微缺陷，从而获得高平坦度晶片的抛光。

粗抛：主要作用去除损伤层，一般去除量约在**10—20 $\mu\text{m}$** ；

精抛：主要作用改善晶片表面的微粗糙程度，一般去除量**1 $\mu\text{m}$** 以下

主要原料：抛光液由具有 **$\text{SiO}_2$** 的微细悬硅酸胶及 **$\text{NaOH}$** （或 **$\text{KOH}$** 或 **$\text{NH}_4\text{OH}$** ）组成，分为粗抛浆和精抛浆。



集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



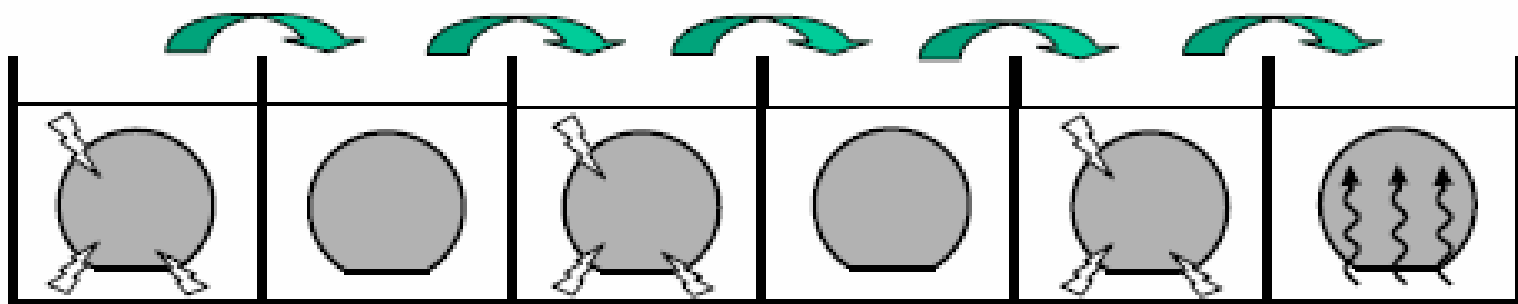


## Cleaning—清洗

目的：去除硅片表面的污染物，微粒、金属离子、有机物、原生氧化层等。

SC1:  $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$  (1:1:5 ~ 1:2:7)

SC2:  $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$  (1:1:6 ~ 1:2:8)



SC1+超音波  
70°C 5 min.

D.I. Water  
QDR清洗

SC2+超音波  
70°C 5 min.

D.I. Water  
QDR清洗

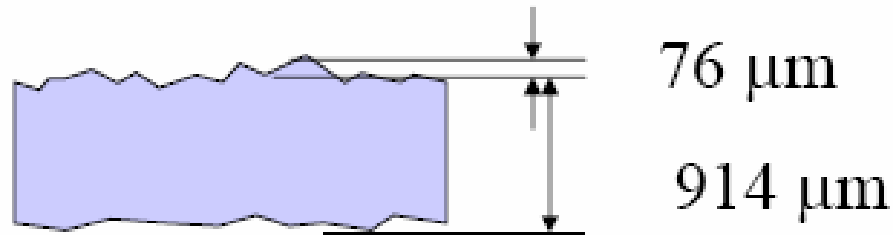
D.I. Water  
超音波清洗

烘乾, Spin dry  
IPA dry  
Marangoni dry

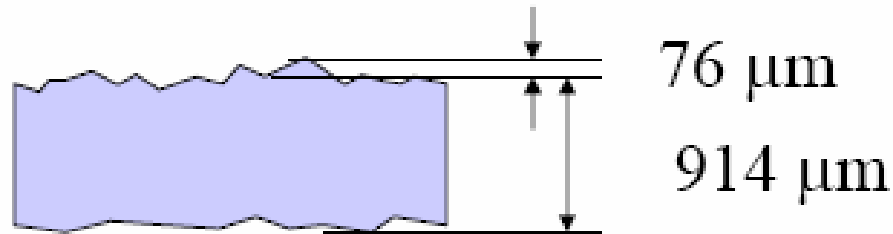
# Surface Roughness Changes

- Sawing, edging, lapping, etching and CMP

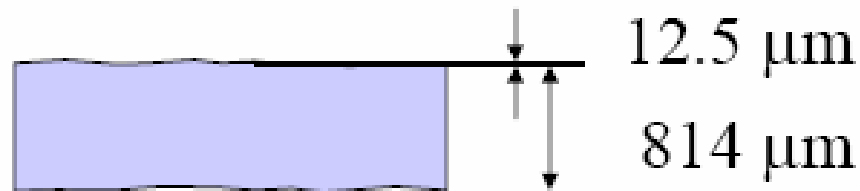
**After Wafer Sawing**  
(切片)



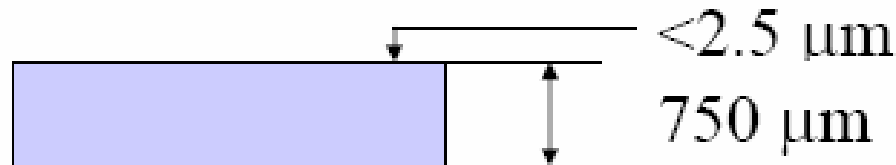
**After Edge Rounding**  
(边缘圆滑化)



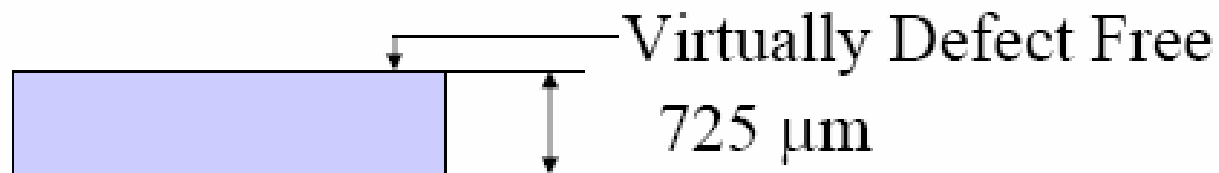
**After Lapping**  
(粗磨)



**After Etch**  
(刻蚀)



**After CMP**  
(化学机械研磨)





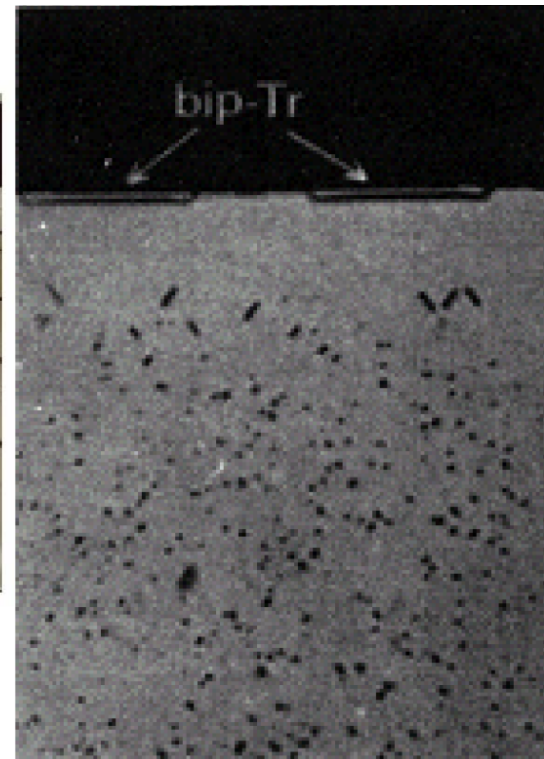
吉林大学

# 实验室净化及硅片清洗

JILIN UNIVERSITY

控制污染有三道防线：

- ✓环境净化 (clean room)
- ✓硅片清洗 (wafer cleaning)
- ✓吸杂 (gettering)





吉林大学

# 实验室净化及硅片清洗

JILIN UNIVERSITY

## 1、空气净化



From Intel Museum



集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



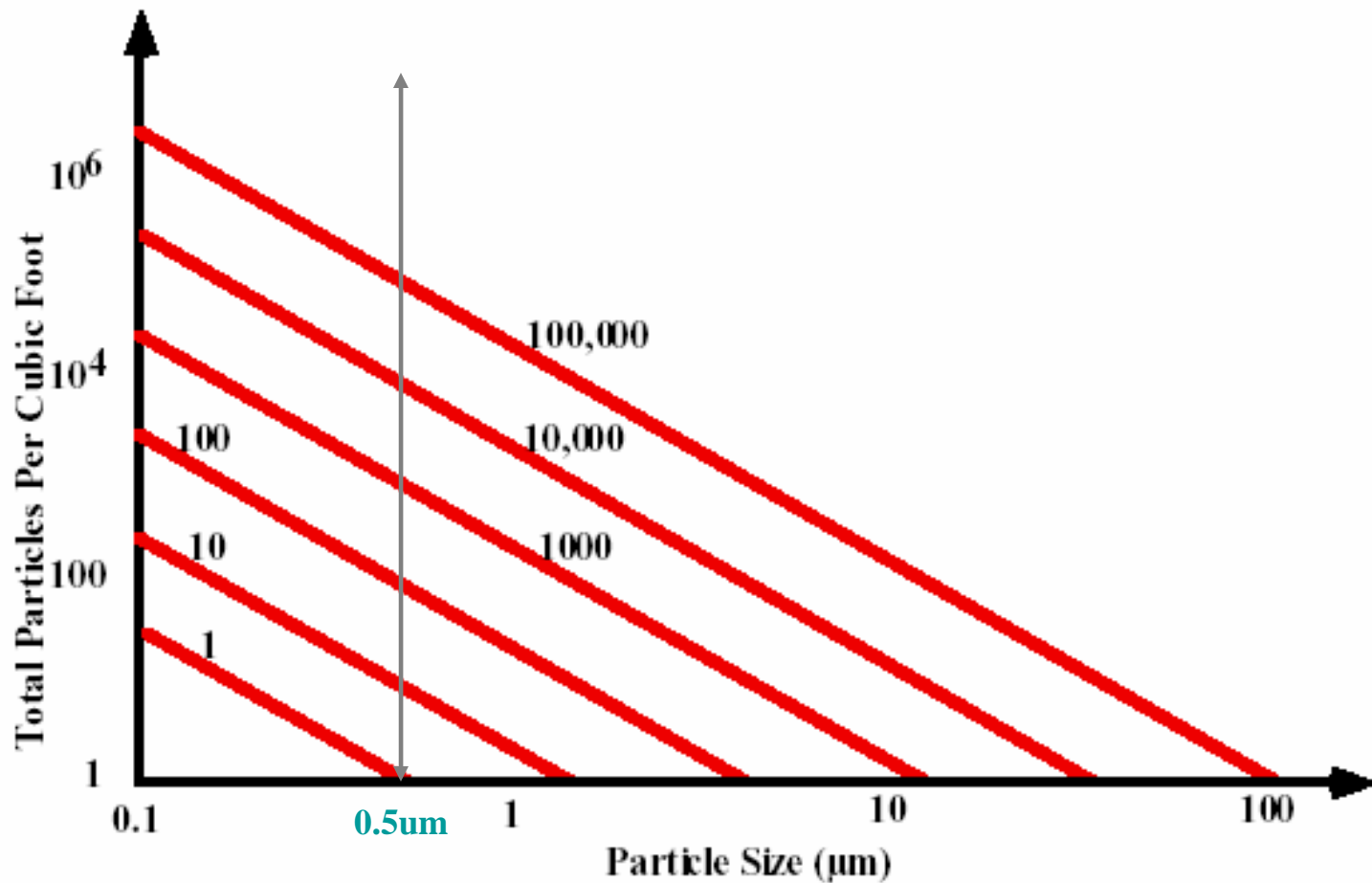


吉林大学

# 实验室净化及硅片清洗

JILIN UNIVERSITY

净化级别：每立方英尺空气中含有尺度大于  
 $0.5\mu\text{m}$ 的粒子总数不超过X个。





吉林大学

# 实验室净化及硅片清洗

JILIN UNIVERSITY

	Particle Diameter ( $\mu\text{m}$ )			
Class	0.1	0.3	0.5	5.0
1	35	3	1	
10	350	30	10	
100		300	100	
1000			1000	7
10000			10000	70
100000			100000	700

集成电路工艺

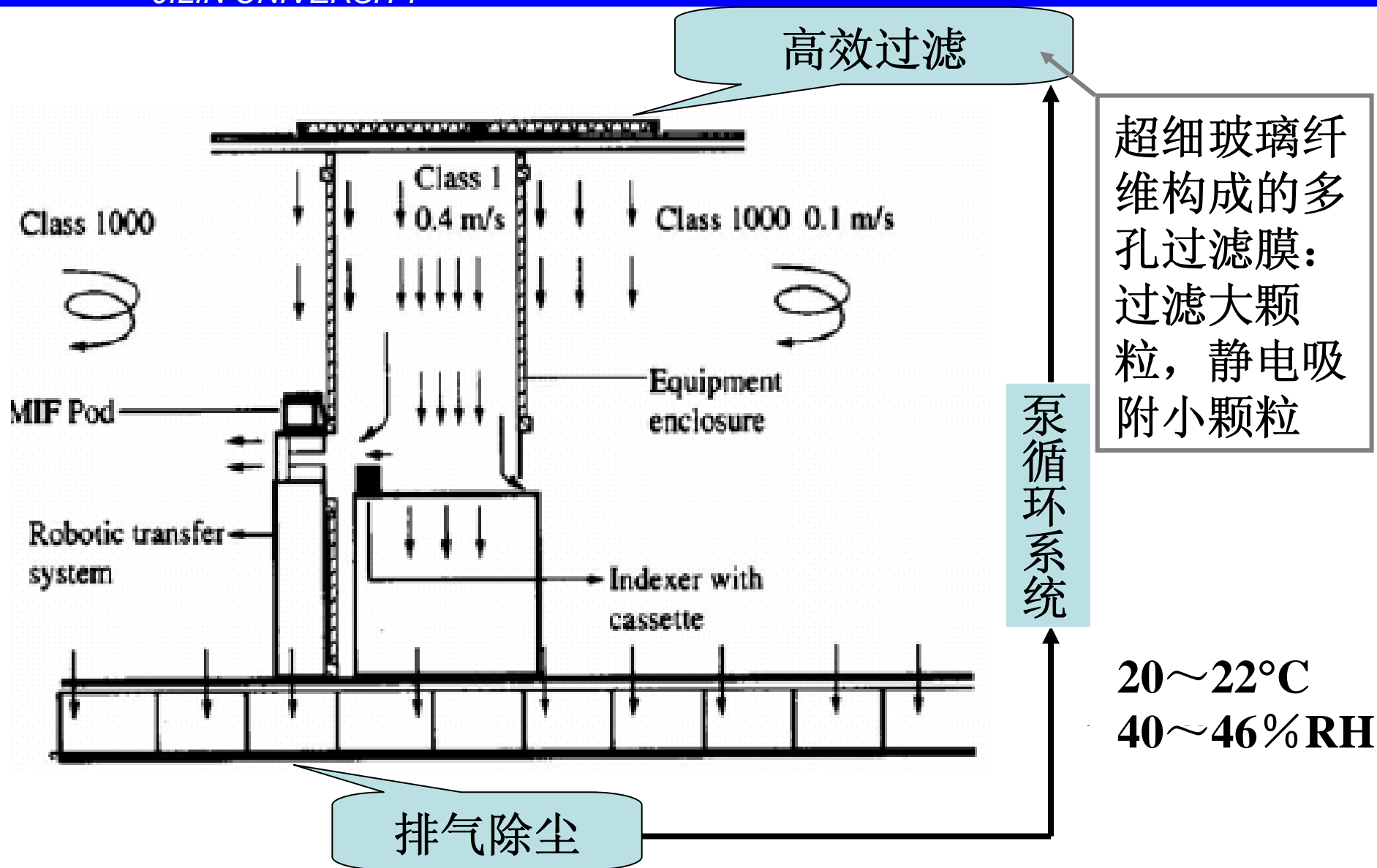
INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

# 实验室净化及硅片清洗

JILIN UNIVERSITY







吉林大学

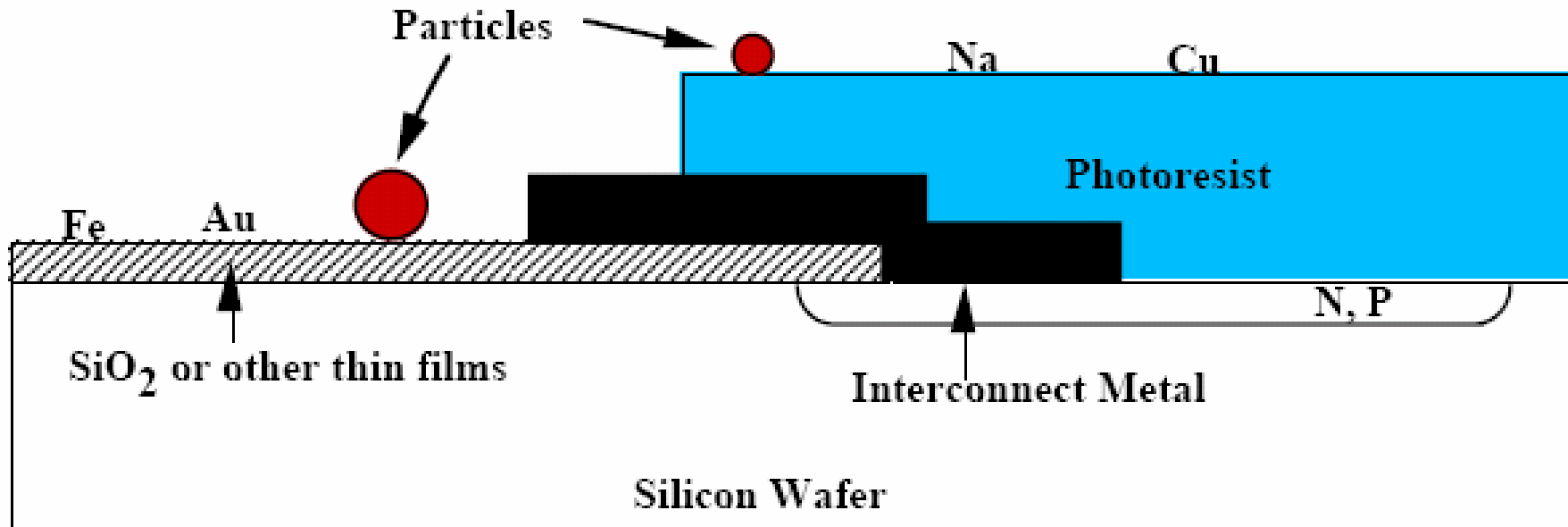
# 实验室净化及硅片清洗

JILIN UNIVERSITY

由于集成电路内各元件及连线相当微细，因此制造过程中，如果遭到灰尘、金属的污染，很容易造成芯片内电路功能的损坏，形成短路或断路，导致集成电路的失效！在现代的VLSI工厂中，75%的产品率下降都来源于硅芯片上的颗粒污染。成品率提高3.8%，年利率增加1000万美元。

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



Contaminants may consist of particles, organic films (photoresist), heavy metals or alkali ions.



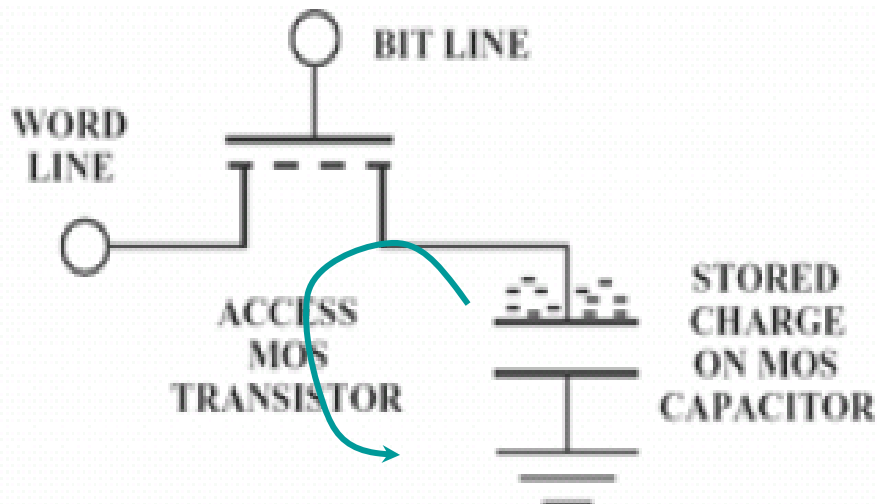
## 外来杂质的危害性

### 例2. MOS阈值电压受碱金属离子的影响

$$V_{th} = V_{FB} + 2\Phi_f + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\Phi_f)}}{C_{ox}} + \frac{qQ_M}{C_{ox}}$$

当 $t_{ox}=10\text{ nm}$ ,  $Q_M=6.5\times 10^{11}\text{ cm}^{-2}$  ( $\approx 10\text{ ppm}$ )时,  $\Delta V_{th}=0.1\text{ V}$

### 例3. MOS DRAM的刷新时间对重金属离子含量 $N_t$ 的要求



$$\tau_G = \frac{1}{\sigma v_{th} N_t}$$

$\sigma=10^{-15}\text{ cm}^2$ ,  $v_{th}=10^7\text{ cm/s}$   
若要求 $\tau_G=100\text{ }\mu\text{s}$ , 则 $N_t\approx 10^{12}\text{ cm}^{-3}$   
 $=0.02\text{ ppb !!}$



吉林大学

# 实验室净化及硅片清洗

JILIN UNIVERSITY

## 颗粒粘附

所有可以落在硅片表面的都称作颗粒。

颗粒来源：

✓空气

✓人体

✓设备

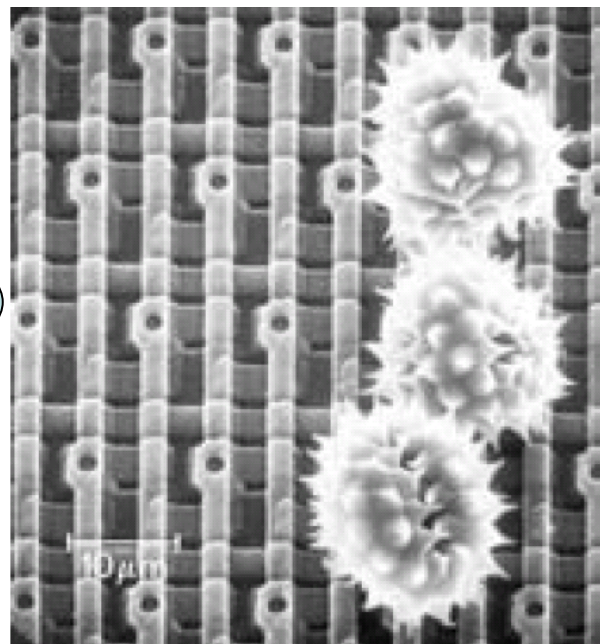
✓化学品

超级净化空气

风淋吹扫、防护服、面罩、手套等，机器人/人

特殊设计及材料  
定期清洗

超纯化学品  
去离子水



集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

# 实验室净化及硅片清洗

JILIN UNIVERSITY

在ULSI级化学试剂中的颗粒浓度（数目/ml）

	$>0.2\mu\text{m}$	$>0.5\mu\text{m}$
$\text{NH}_4\text{OH}$	130-240	15-30
$\text{H}_2\text{O}_2$	20-100	5-20
$\text{HF}$	0-1	0
$\text{HCl}$	2-7	1-2
$\text{H}_2\text{SO}_4$	180-1150	10-80

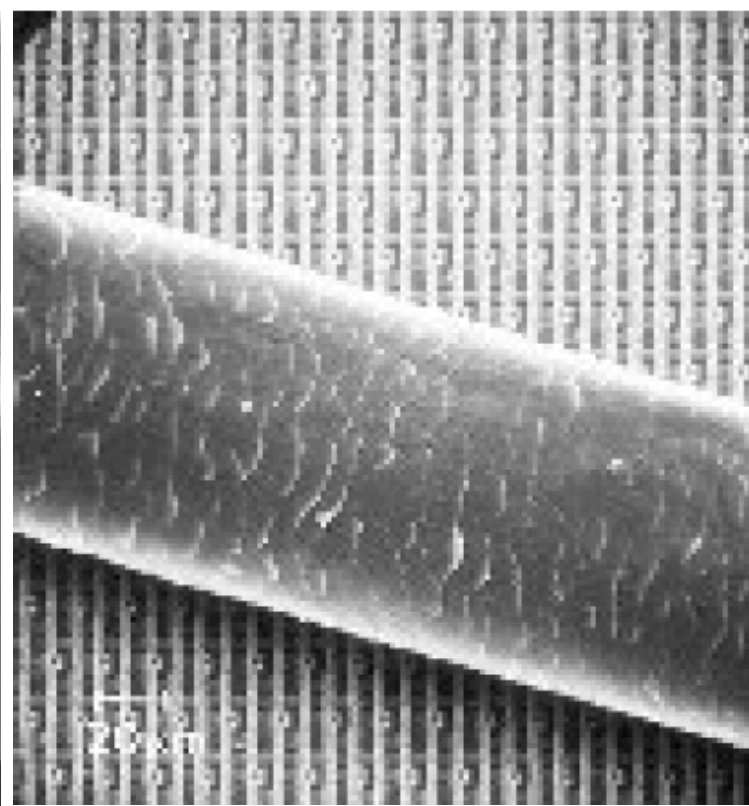
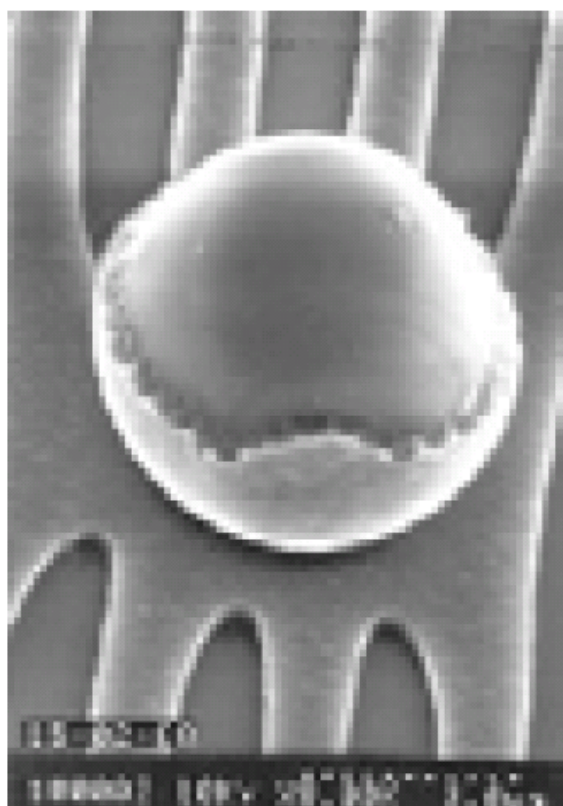
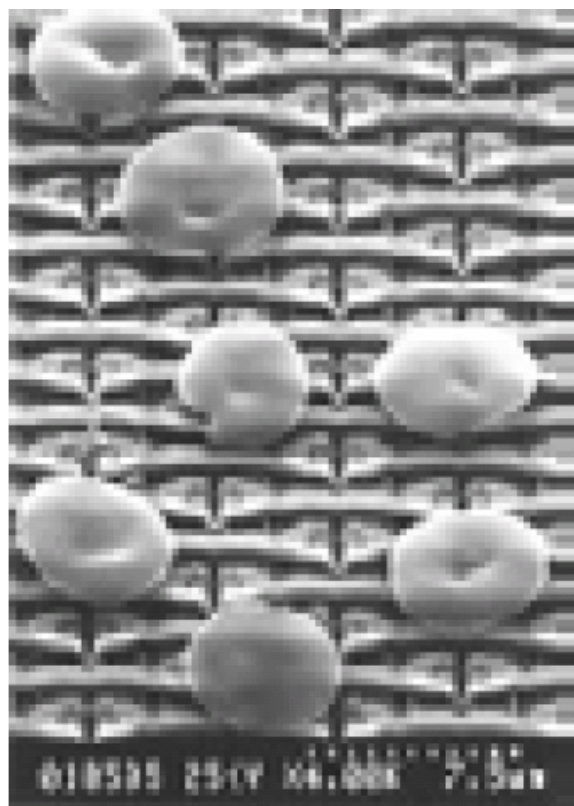




吉林大学

# 实验室净化及硅片清洗

JILIN UNIVERSITY



各种可能落在芯片表面的颗粒

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY

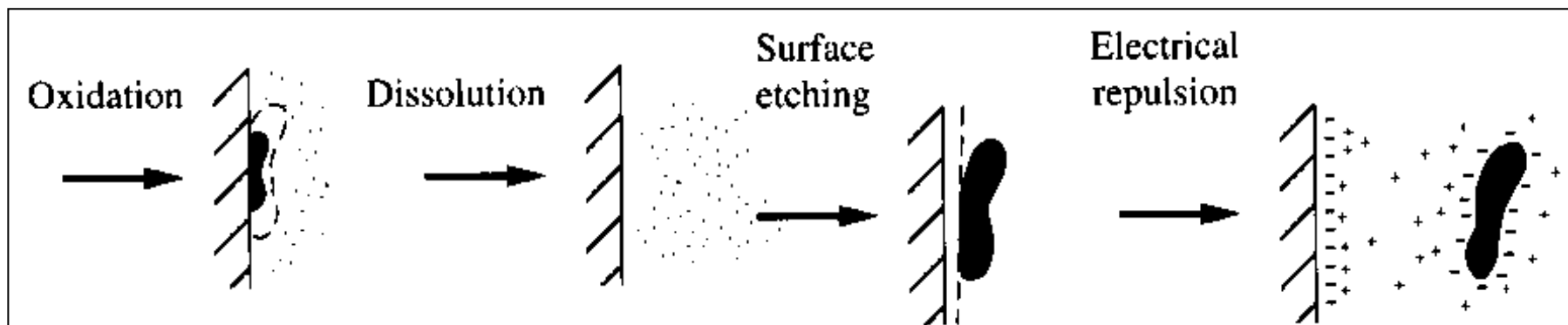


❖ 粒子附着的机理：静电力，范德华力，化学键等

❖ 去除的机理有四种：

- 1 氧化分解
- 2 溶解
- 3 对硅片表面轻微的腐蚀去除
- 4 粒子和硅片表面的电排斥

• 去除方法：SC-1, megasonic（超声清洗）



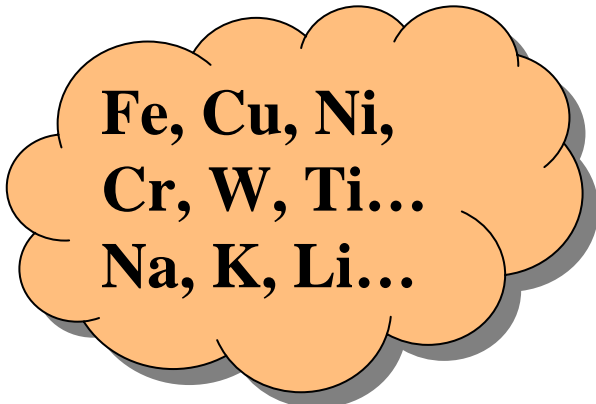




## 金属的玷污

➤ 来源：化学试剂，离子注入、反应离子刻蚀等工艺

❖ 量级： $10^{10}$ 原子/cm<sup>2</sup>



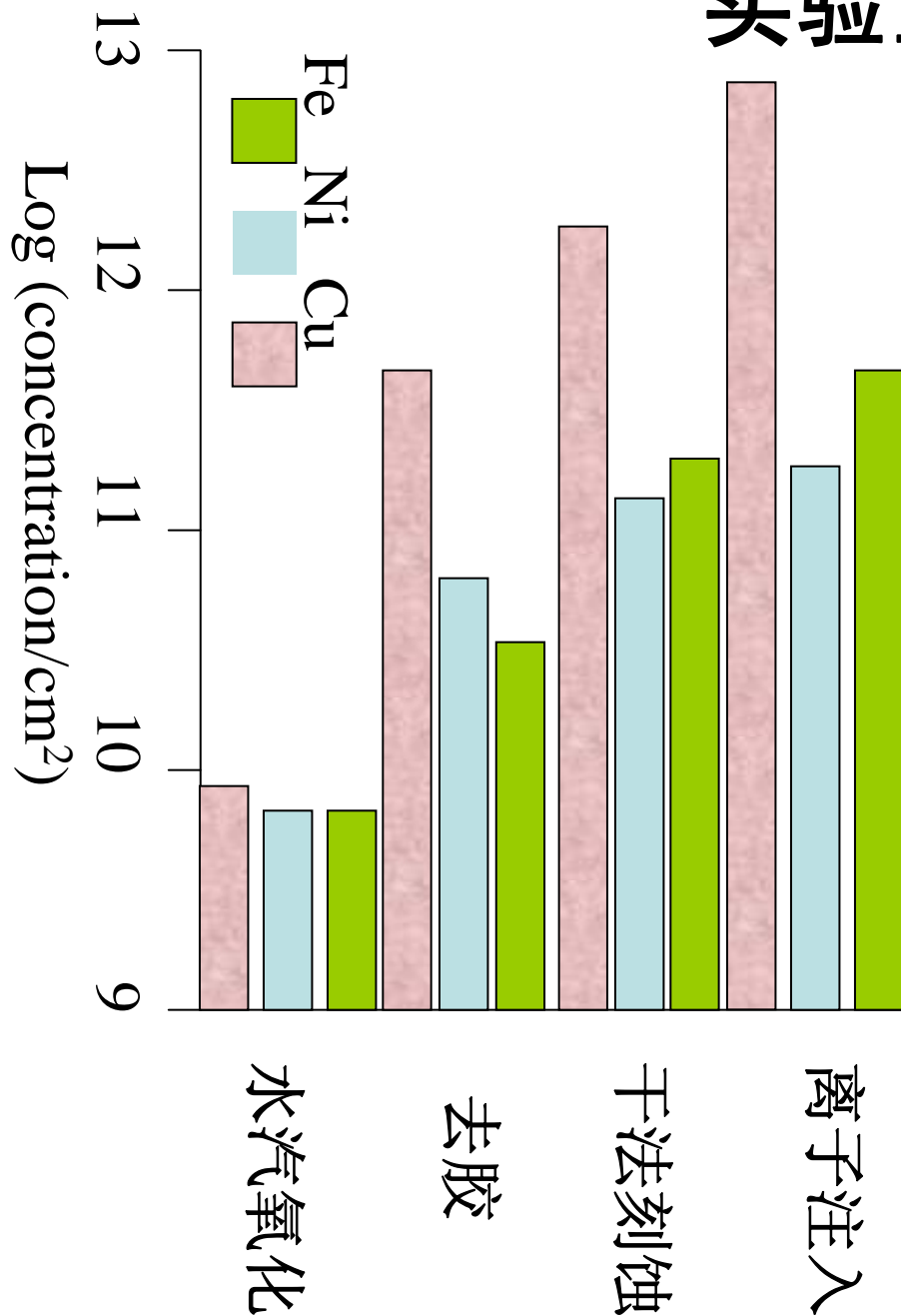
Fe, Cu, Ni,  
Cr, W, Ti...  
Na, K, Li...

➤ 影响：

✓ 在界面形成缺陷，影响器件性能，成品率下降

✓ 增加p-n结的漏电流，减少少数载流子的寿命

# 实验室净化及硅片清洗



不同工艺过程引入的金属污染

集成电路工艺

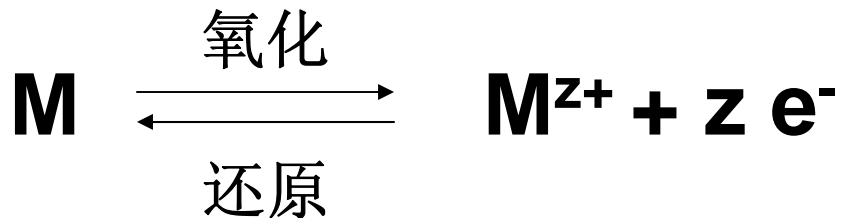
INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



## ➤ 金属杂质沉淀到硅表面的机理

- 通过金属离子和硅表面终端的氢原子之间的电荷交换，和硅结合。（难以去除）
- 氧化时发生：硅在氧化时，杂质会进入

## ➤ 去除方法：使金属原子氧化变成可溶性离子



## ➤ 去除溶液：SC-1, SC-2 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ : 强氧化剂)



吉林大学

# 实验室净化及硅片清洗

JILIN UNIVERSITY

Element	Electron Negativity
Au	2.4
Pt	2.2
Ag	1.9
Hg	1.9
Cu	1.9
Si	1.8
Pb	1.8
Sn	1.8
Ni	1.8
Fe	1.8
Zn	1.6
Al	1.5
Mg	1.2
Ca	1.0
Na	0.9
K	0.8

电负性

Easier to  
precipitate on  
bare silicon  
surface



!路工艺

CUIT TECHNOLOGY



吉林大学

实验室净化及硅片清洗

JILIN UNIVERSITY

# 有机物的玷污

## ➤ 来源:

- 环境中的有机蒸汽
- 存储容器
- 光刻胶的残留物

## ➤ 去除方法: 强氧化

- 臭氧干法
- Piranha:  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$
- 臭氧注入纯水



吉林大学

实验室净化及硅片清洗

JILIN UNIVERSITY

# 自然氧化层 (Native Oxide)

- 在空气、水中迅速生长
- 带来的问题:
  - ✓ 接触电阻增大
  - ✓ 难实现选择性的CVD或外延
  - ✓ 成为金属杂质源
  - ✓ 难以生长金属硅化物
- 清洗工艺:  $\text{HF} + \text{H}_2\text{O}$  (ca. 1: 50)



## 2、硅片清洗

有机物/光刻  
胶的两种清除  
方法：

**SPM: sulfuric/peroxide mixture**

**$\text{H}_2\text{SO}_4(98\%):\text{H}_2\text{O}_2(30\%)=2:1\sim4:1$**

把光刻胶分解为  **$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$**

（适合于几乎所有有机物）

氧等离子体干法刻蚀：把光刻胶分解  
为气态  **$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$**

（适用于大多数高分子膜）

注意：高温工艺过程会使污染物扩散进入硅片或薄膜

前端工艺（**FEOL**）的清洗尤为重要





吉林大学

# 实验室净化及硅片清洗

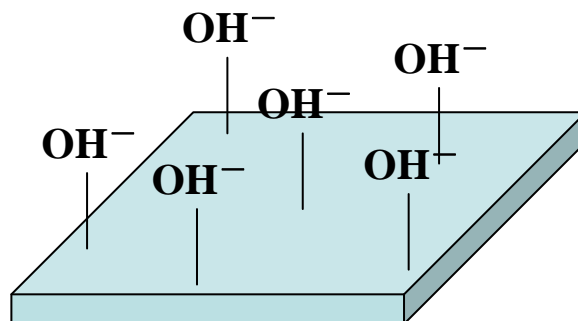
JILIN UNIVERSITY

## RCA——标准清洗

**SC-1 (APM, Ammonia Peroxide Mixture) :**  
 **$\text{NH}_4\text{OH}(28\%):\text{H}_2\text{O}_2(30%):\text{DIH}_2\text{O}=1:1:5\sim 1:2:7$**   
 **$70\sim 80^\circ\text{C}, 10\text{min}$                       碱性 (pH值>7)**

VIII B		铜族 I B	锌族 II B
27 Co 钴	28 Ni 镍	29 Cu 铜	30 Zn 锌
75.93	58.69	63.54	65.39
		47 Ag 银	48 Cd 镉
		107.87	112.41
		79 Au 金	80 Hg 汞
		196.97	200.59

- ✓可以氧化有机膜
- ✓和金属形成络合物
- ✓缓慢溶解原始氧化层，并再氧化——可以去除颗粒
- ✓ $\text{NH}_4\text{OH}$ 对硅有腐蚀作用



**RCA clean is  
“standard  
process” used to  
remove organics,  
heavy metals and  
alkali ions.**



**SC-2:**

**HCl(73%):H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(30%):DIH<sub>2</sub>O=1:1:6~1:2:8**

**70~80°C, 10min      酸性 (pH值<7)**

- ✓可以将碱金属离子及Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup>和Mg<sup>2+</sup>在SC-1溶液中形成的不溶的氢氧化物反应成溶于水的络合物
- ✓可以进一步去除残留的重金属污染（如Au）

**RCA与超声波振动共同作用，可以有更好的去颗粒作用  
20~50kHz 或 1MHz左右。**

平行于硅片表面的声压波使粒子浸润，然后溶液扩散入界面，最后粒子完全浸润，并成为悬浮的自由粒子。



吉林大学

# 实验室净化及硅片清洗

JILIN UNIVERSITY

## 现代CMOS的硅片清洗工艺

	化学溶剂	清洗温度	清除的污染物
1	$\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 (4:1)$	120°C, 10min	有机污染物
2	D.I. $\text{H}_2\text{O}$	室温	
3	$\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (1:1:5) (SC-1)	80°C, 10min	微尘
4	D.I. $\text{H}_2\text{O}$	室温	
5	$\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (1:1:6) (SC-2)	80°C, 10min	金属离子
6	D.I. $\text{H}_2\text{O}$	室温	
7	$\text{HF} + \text{H}_2\text{O}$ (1:50)	室温	氧化层
8	D.I. $\text{H}_2\text{O}$	室温	
9			干燥



吉林大学

# 实验室净化及硅片清洗

JILIN UNIVERSITY

其它先进湿法清洗工艺，如Ohmi

From IMEC (Interuniversity Microelectronic Center)

(1)  $\text{H}_2\text{O} + \text{O}_3$  (<1 ppb)

去除有机物

(2)  $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$  (0.05:1:5)

去除颗粒、有机物和金属

(3)  $\text{HF}$  (0.5%) +  $\text{H}_2\text{O}_2$  (10%)

天然氧化层和金属

(4) DI  $\text{H}_2\text{O}$ 清洗 (>18M $\Omega$ -cm)

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



## 3、吸杂

把重金属离子和碱金属离子从有源区引导到不重要的区域。

- ✓ 器件正面的碱金属离子被吸杂到介质层（钝化层），如PSG、 $\text{Si}_3\text{N}_4$
- ✓ 硅片中的金属离子则被俘获到体硅中（本征吸杂）或硅片背面（非本征吸杂）



# 吉林大学

## 实验室净化及硅片清洗

碱族 I A																	氮族 VIII A														
1 H 氢 1.0079																	2 He 氦 4.003														
3 Li 锂 6.941	4 Be 铍 9.012															5 B 硼 10.811	6 C 碳 12.011	7 N 氮 14.007	8 O 氧 15.999	9 F 氟 18.998	10 Ne 氖 20.180										
11 Na 钠 22.990	12 Mg 镁 24.305	13 Al 铝 26.982	14 Si 硅 28.086	15 P 磷 30.974	16 S 硫 32.066	17 Cl 氯 35.453	18 Ar 氩 39.948																								
19 K 钾 39.098	20 Ca 钙 40.078	21 Sc 钪 44.956	22 Ti 钛 47.88	23 V 钒 50.942	24 Cr 铬 51.996	25 Mn 锰 54.938	26 Fe 铁 55.847	27 Co 钴 58.933	28 Ni 镍 58.693	29 Cu 铜 63.546	30 Zn 锌 65.39	31 Ga 镓 69.723	32 Ge 锗 72.61	33 As 砷 74.922	34 Se 硒 78.96	35 Br 溴 79.904	36 Kr 氪 83.80														
37 Rb 铷 85.468	38 Sr 锶 87.62	39 Y 钇 88.906	40 Zr 锆 91.224	41 Nb 铌 92.906	42 Mo 钼 95.94	43 Tc 锝 98.906	44 Ru 钌 101.07	45 Rh 铑 102.91	46 Pd 钯 106.42	47 Ag 银 107.87	48 Cd 镉 112.41	49 In 铟 114.82	50 Sn 锡 118.71	51 Sb 锑 121.76	52 Te 碲 127.60	53 I 碘 126.90	54 Xe 氙 131.29														
55 Cs 铯 132.91	56 Ba 钡 137.33	57 La 镧 138.91	58 Ce 铈 140.12	59 Pr 镨 140.91	60 Nd 钕 144.24	61 Pm 钷 144.91	62 Sm 钐 150.36	63 Eu 铕 151.96	64 Gd 钆 157.25	65 Tb 铽 158.93	66 Dy 镝 162.50	67 Ho 铥 164.93	68 Er 铒 167.26	69 Tm 铥 168.93	70 Yb 镱 173.05	71 Lu 镥 174.97	72 Hf 铪 178.49	73 Ta 钽 180.95	74 W 钨 183.85	75 Re 铼 186.21	76 Os 锇 190.23	77 Ir 铱 192.22	78 Pt 铂 195.08	79 Au 金 196.97	80 Hg 汞 200.59	81 Tl 铊 204.38	82 Pb 铅 207.2	83 Bi 铋 208.98	84 Po 钋 (209)	85 At 砹 (210)	86 Rn 氡 (222)
87 Fr 钫 (223)	88 Ra 镭 (226)	89 Ac 锕 (227)	90 Th 钍 (232)	91 Pa 镤 (231)	92 U 铀 (238)	93 Np 镎 (237)	94 Pu 钚 (244)	95 Am 镅 (243)	96 Cm 锔 (247)	97 Bk 锫 (247)	98 Cf 锿 (251)	99 Es 镅 (252)	100 Fm 镆 (257)	101 Md 镎 (258)	102 No 钆 (259)	103 Lr 铹 (262)															

说明

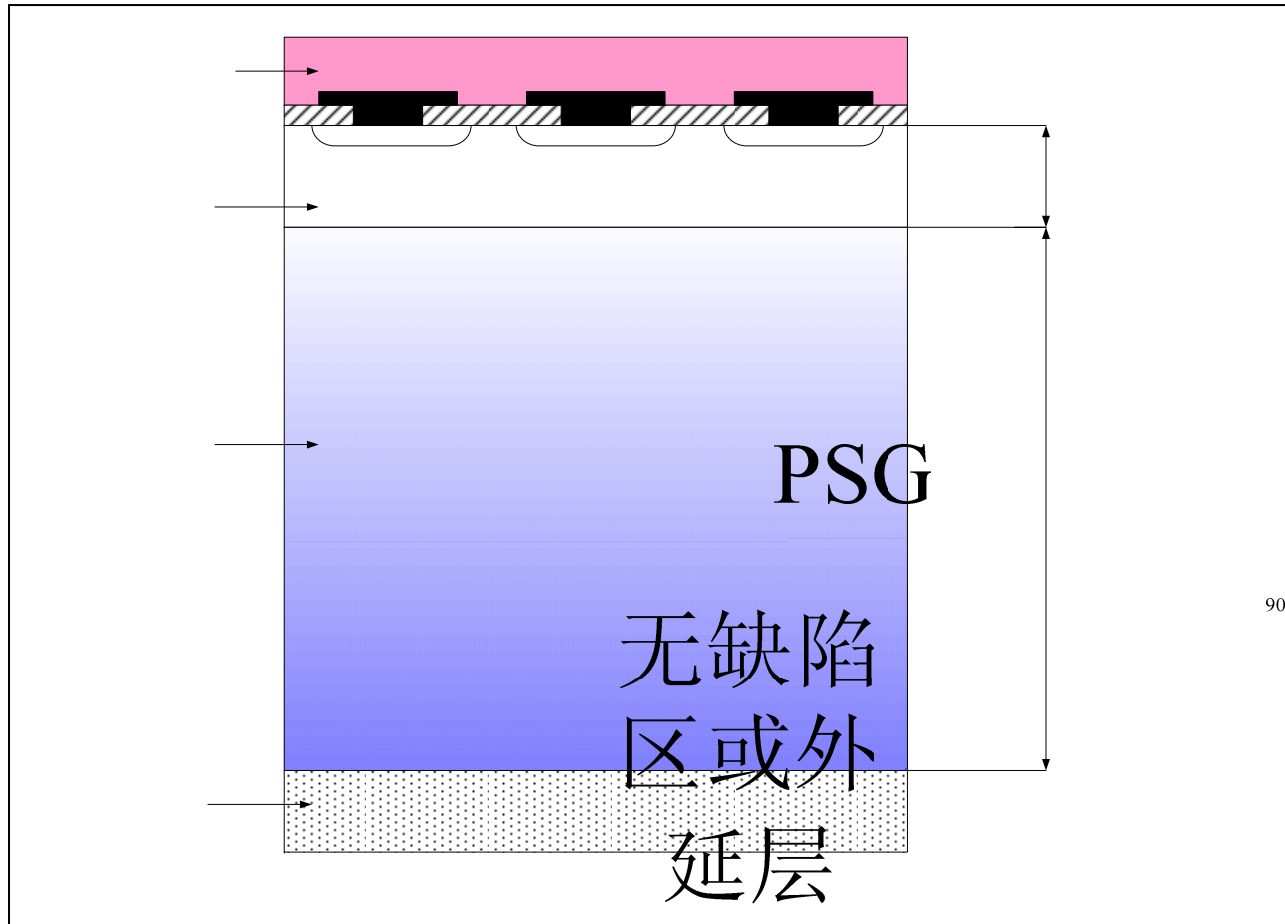
1 H 氢 1.0079

原子序  
元素符号  
元素名称  
原子量

气体  
液体  
固体  
人造元素

硅中深能级杂质 (SRH中心)

扩散系数大  
容易被各种机械缺陷和化学陷阱区域俘获



90

- 吸杂三步骤：
- ✓ 杂质元素从原有陷阱中被释放，成为可动原子
  - ✓ 杂质元素扩散到吸杂中心
  - ✓ 杂质元素被吸杂中心俘获





吉林大学

JILIN UNIVERSITY

## 金属沾污途径:

✓通过金属离子与硅片表面的氢离子交换而被束缚在硅片表面。

✓被淀积到硅片表面。

一粒食盐足以在5000片硅片上淀积每平方厘米 $10^{12}$ 个钠离子。

集成电路工艺

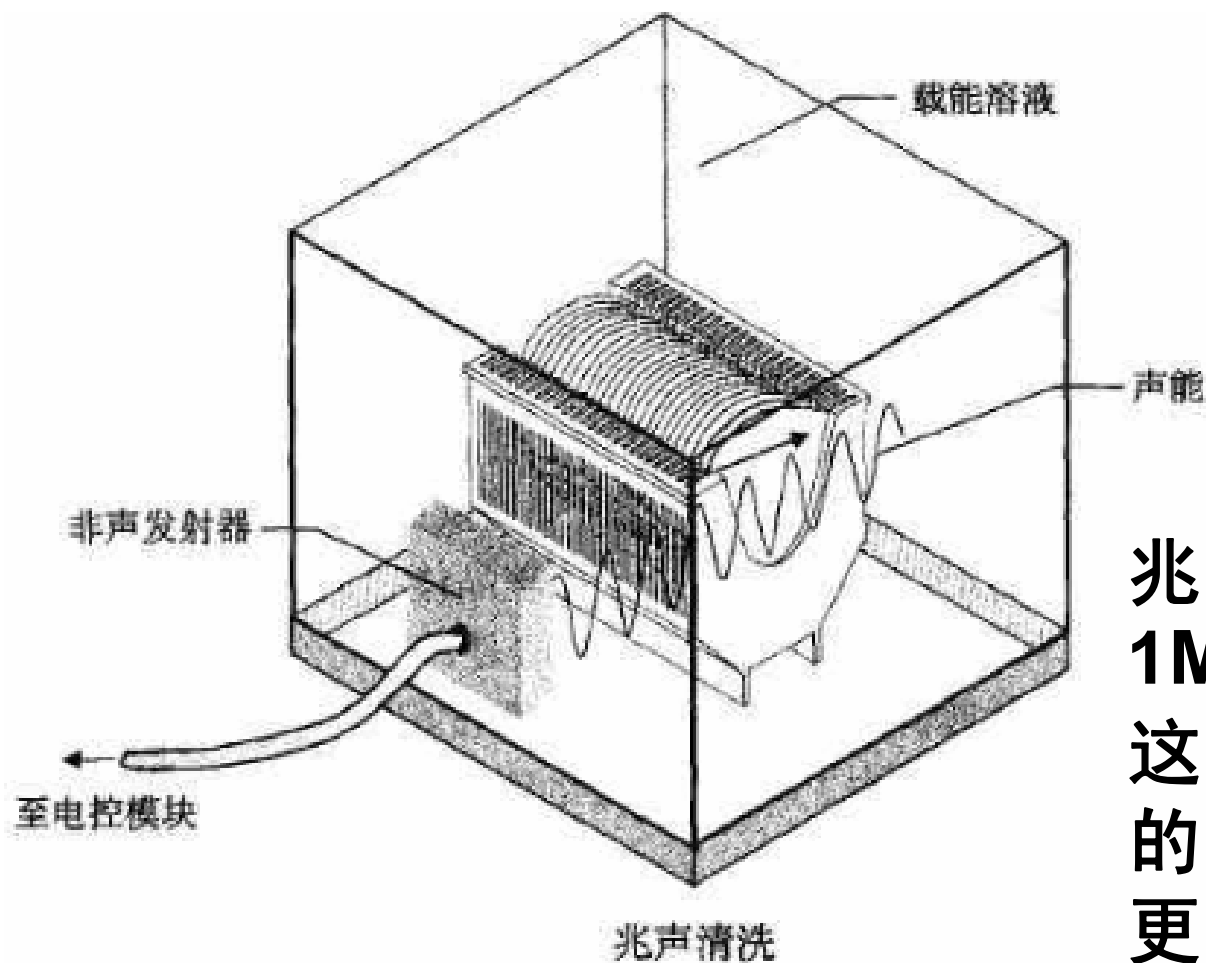
INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

# 清洗设备

JILIN UNIVERSITY



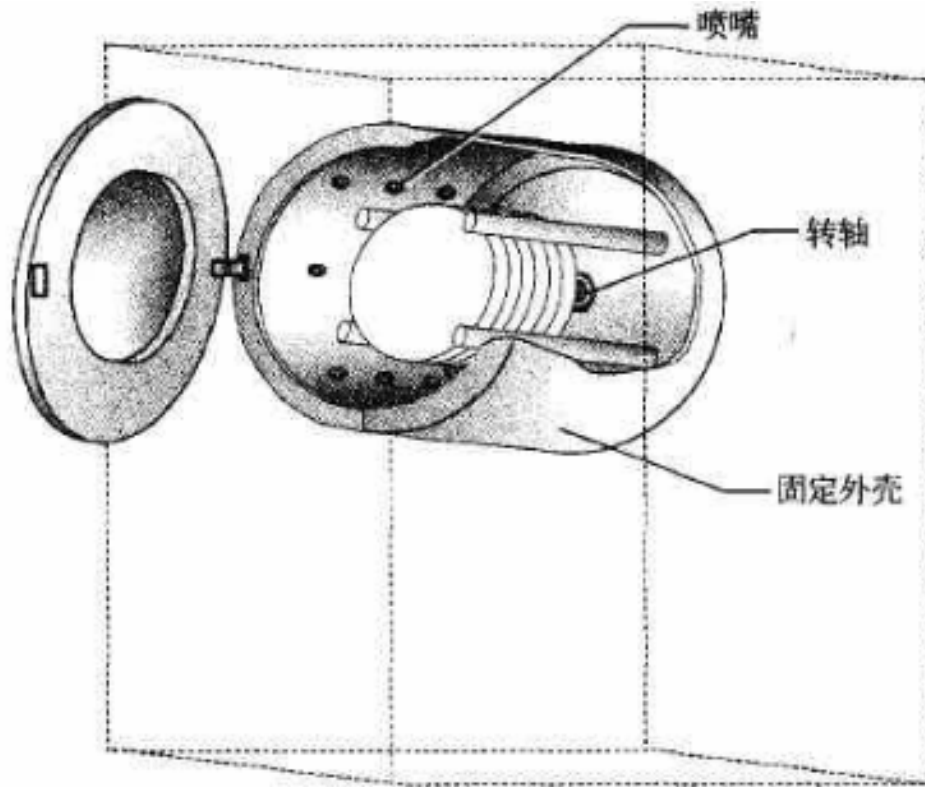
兆声清洗采用接近1MHz的超声能量，这种工艺能在更低的溶液温度下实现更有效的颗粒去除。



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

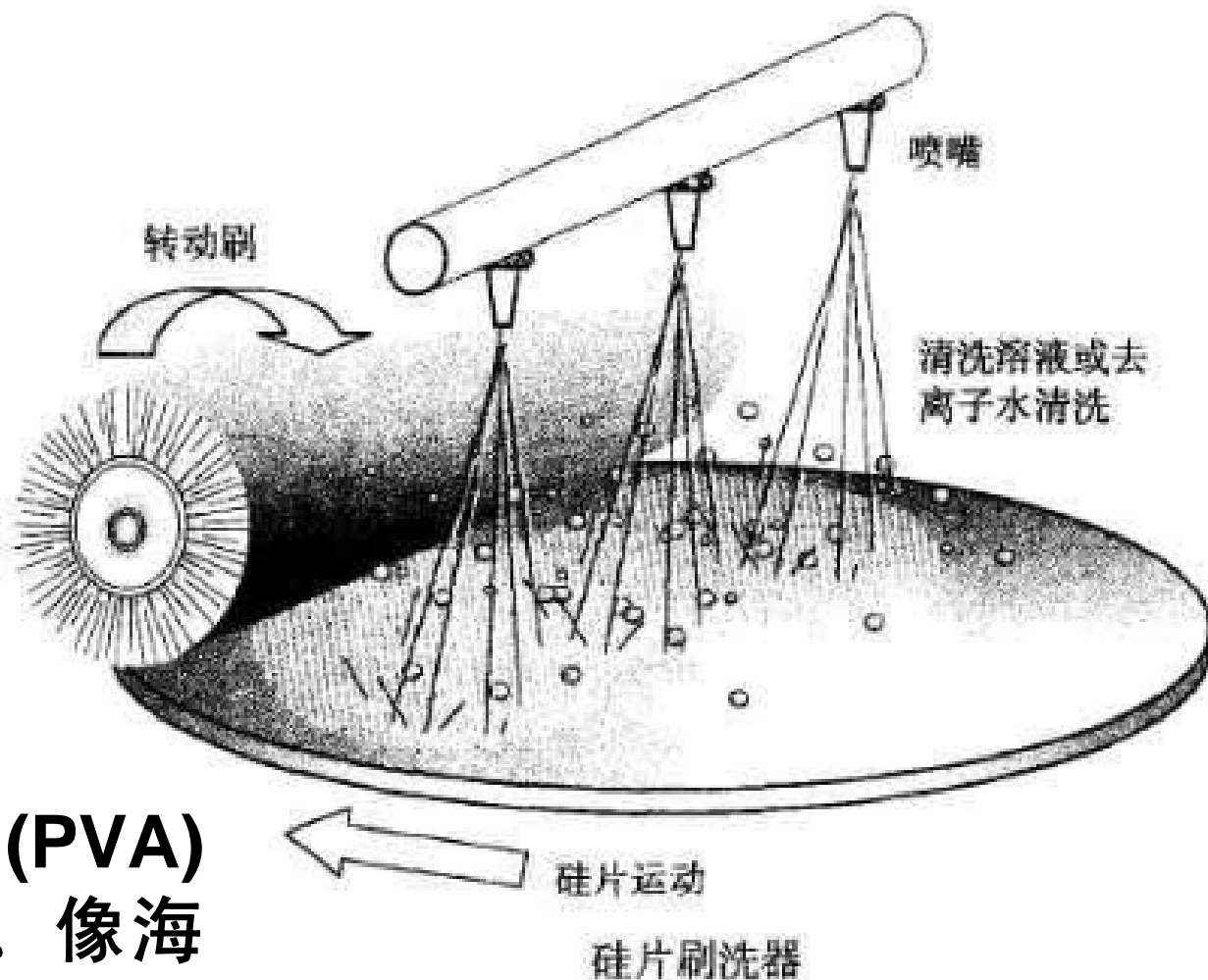
# 清洗设备



用于硅片清洗的喷射设备设计

在喷雾清洗技术中，湿法清洗化学品被喷射到置于旋转密封腔内片架的硅片上，每隔清洗步骤后，去离子水清洗液喷射到硅片上，并对去离子水的电阻率进行监测，以确定何时所有的化学物都被去除。

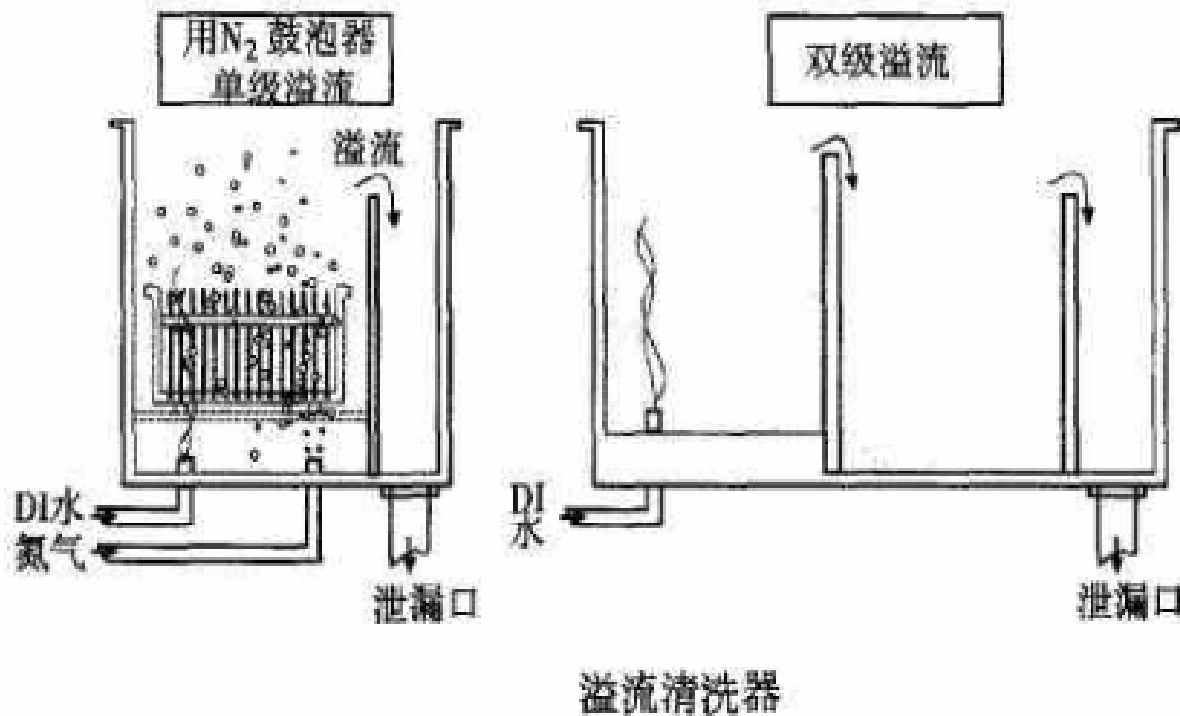
# 清洗设备



刷子用聚乙烯醇(PVA)制成，PVA柔软、像海绵一样可压缩。PVA刷子能有效的去除颗粒而不损伤硅片表面。



## 清洗设备



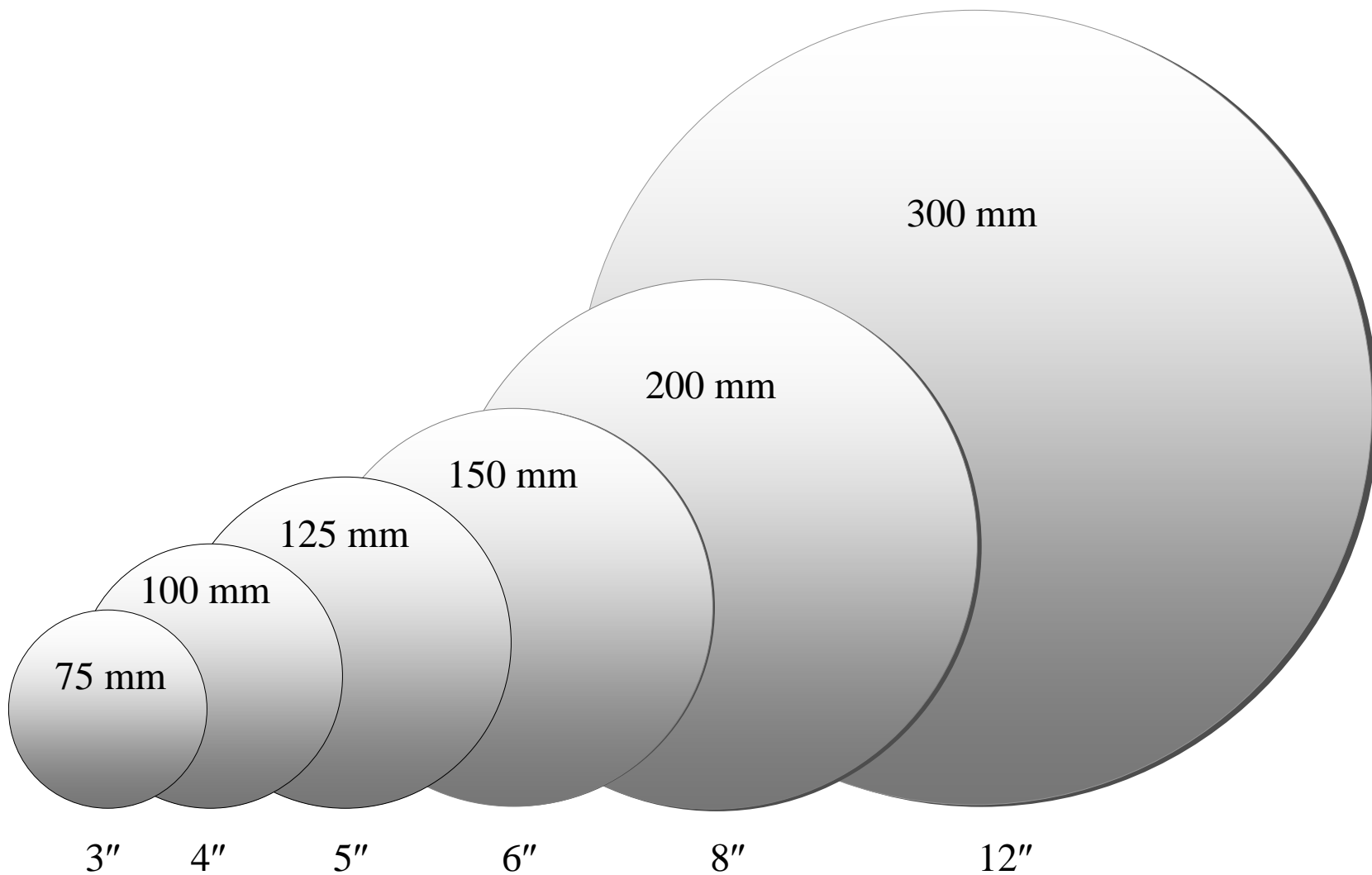
传统上绝大多数的去离子水清洗都使用溢流清洗器。去离子水被送入清洗系统流经并环绕硅片。溢流清洗器的流体运动用来去除从硅片表面扩散到水流中的沾污。



吉林大学

# 硅片直径趋势

JILIN UNIVERSITY





吉林大学

JILIN UNIVERSITY

**300mm硅片比200mm硅片面积大2.25倍，这样就会在一块硅片上生产更多的芯片。每块芯片加工和处理时间都减少了，设备生产效率提高了。使用300mm直径的硅片可以把每块芯片的成本减少30%。节省成本是驱使半导体业转向使用更大直径硅片的主要原因。**

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY





吉林大学

# 硅片尺寸和参数

JILIN UNIVERSITY

直径 (mm)	厚度 ( $\mu\text{m}$ )	面积 ( $\text{cm}^2$ )	重量 (克/磅)	25 块硅片重 (磅)
150	$675 \pm 20$	176.71	28 / 0.06	1.5
200	$725 \pm 20$	314.16	53.08 / 0.12	3
300	$775 \pm 20$	706.86	127.64 / 0.28	7
400	$825 \pm 20$	1256.64	241.56 / 0.53	13

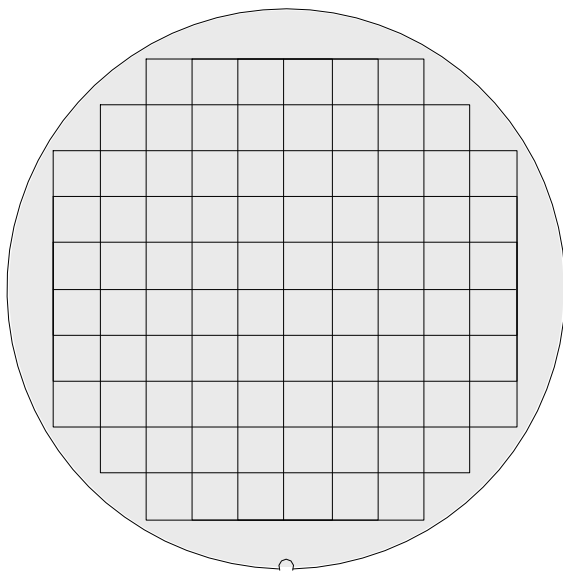
集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY

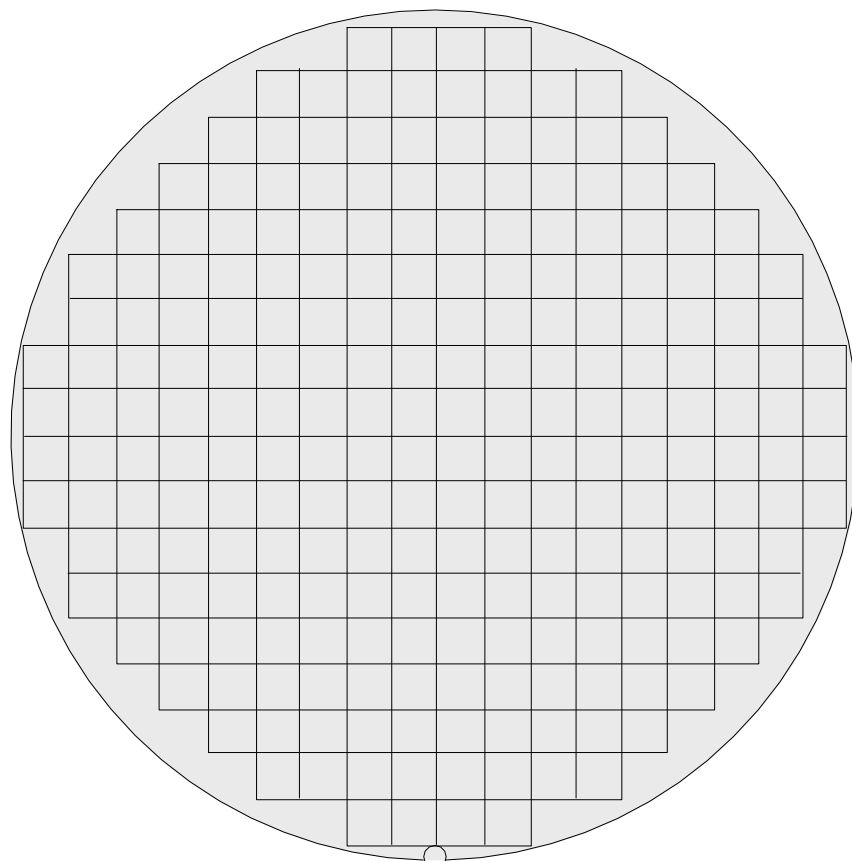


# 吉林大学更大直径硅片上芯片数的增长

JILIN UNIVERSITY



88块芯片  
200mm晶圆



232块芯片  
300mm晶圆

# 300mm硅片尺寸和晶向要求的发展说明

JILIN UNIVERSITY

参数	单位	数值	容许误差
直径	mm	300.00	$\pm 0.20$
厚度（中心点）	$\mu\text{m}$	775	$\pm 25$
翘曲（最大）	$\mu\text{m}$	100	
九点厚度差异（最大）	$\mu\text{m}$	10	
定位槽深度	mm	1.00	+ 0.25, -0.00
定位槽角度	度	90	+5, -1
背面修整		明亮腐蚀 / 抛光	
边缘轮廓表面完成		抛光	
FQA（固定质量区域—硅片表面半径允许范围）	mm	147	

From H. Huff, R. Foodall, R. Nilson, and S. Griffiths, "Thermal Processing Issues for 300-mm Silicon Wafers: Challenges and Opportunities," ULSI Science and Technology (New Jersey: The Electrochemical Society, 1997), p. 139.



吉林大学

# 硅中的晶体缺陷

JILIN UNIVERSITY

**晶体缺陷（微缺陷）是指任何妨碍单位晶胞在晶体中重复性地出现。**

**晶体缺陷依其形式可分为3大类：**

- 1. 点缺陷：原子级的局部缺陷(Frenkel缺陷)。**
- 2. 位错：单位晶胞错位。**
- 3. 层错：晶体结构的缺陷。**

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY

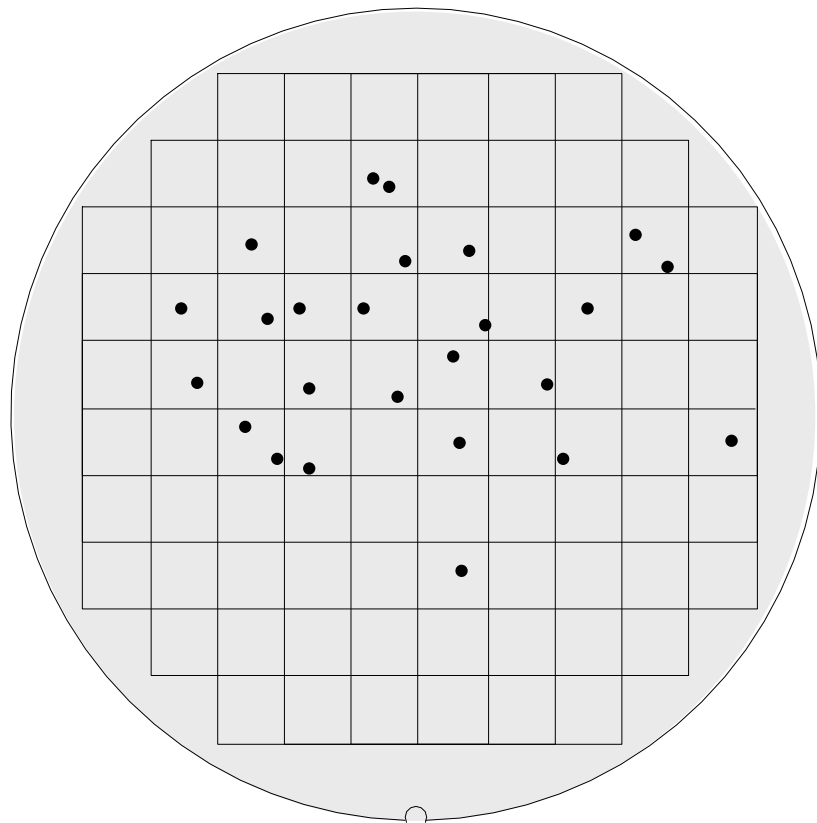


吉林大学

JILIN UNIVERSITY

# 硅片上的成品率

$$\text{成品率} = \frac{66 \text{ 块好芯片}}{88 \text{ 块总芯片}} = 75\%$$



集成电路工艺

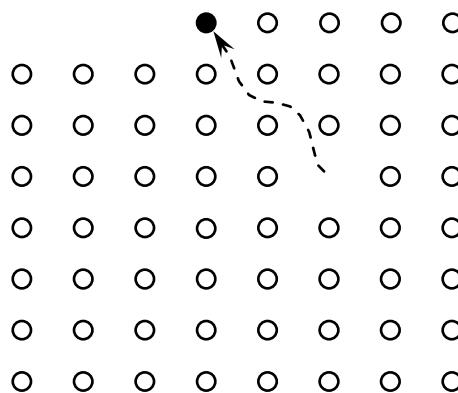
INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

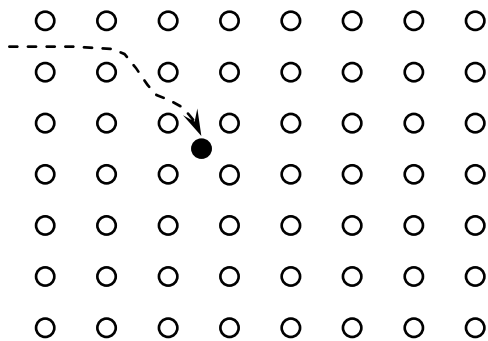
JILIN UNIVERSITY

# 点缺陷

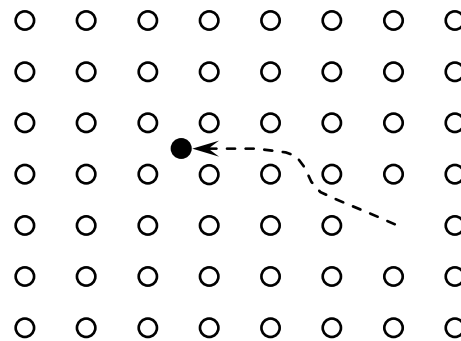


当一个原子从其格点位置移动到晶体表面时出现的缺陷。

(a)空位缺陷



(b)间隙原子缺陷



(c) Frenkel缺陷

间隙原子存在于晶体结构的空隙中。

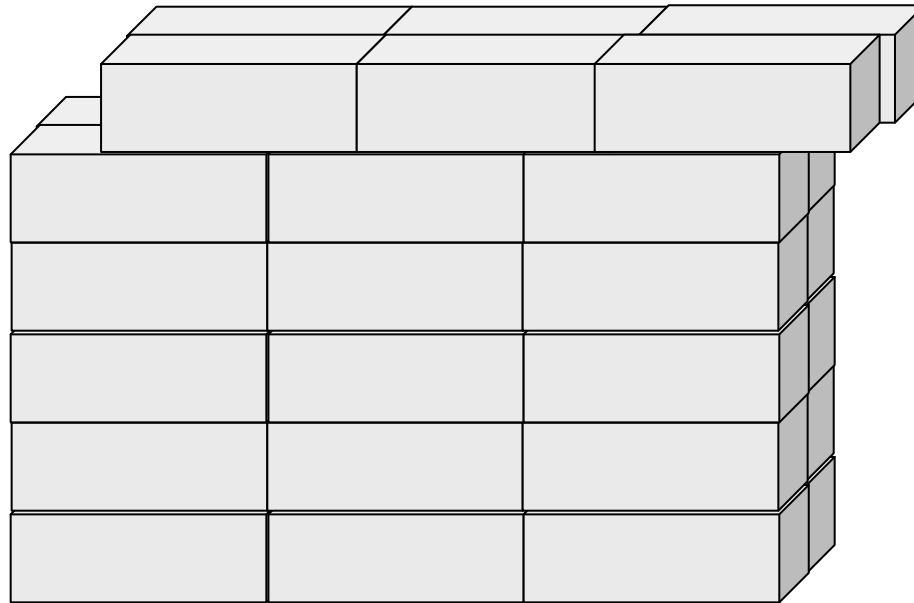
当一个原子离开其格点位置并产生一个空位时，会产生原子-空位对。



吉林大学

# 位错

JILIN UNIVERSITY



集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY

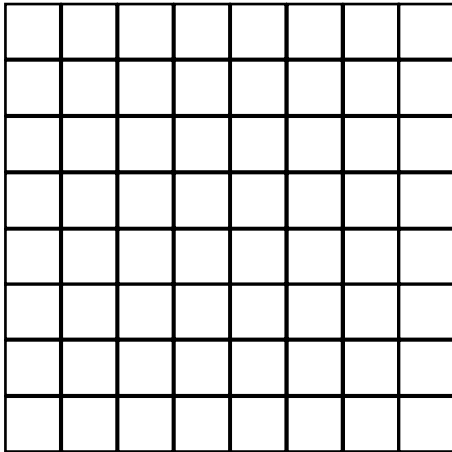




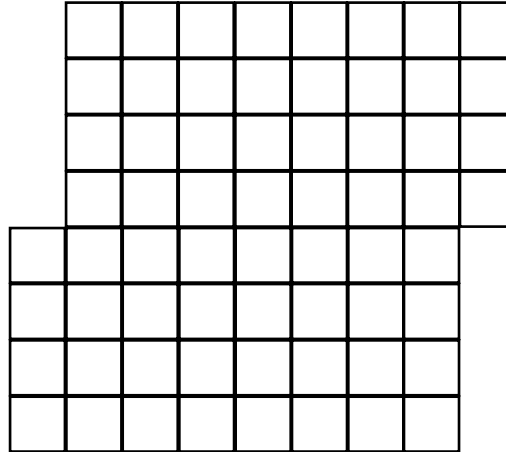
吉林大学

# 层错

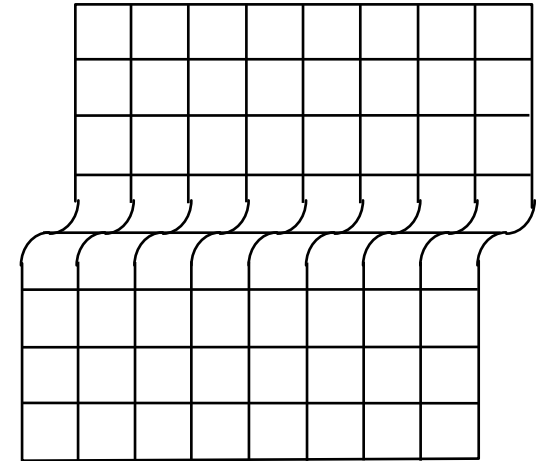
JILIN UNIVERSITY



(a)



(b)



(c)

Redrawn from Sorab K. Ghandi, *VLSI Fabrication Principles: Silicon and Gallium Arsenide*, 2nd edition, New York, Wiley, 1994, page 49

集成电路工艺

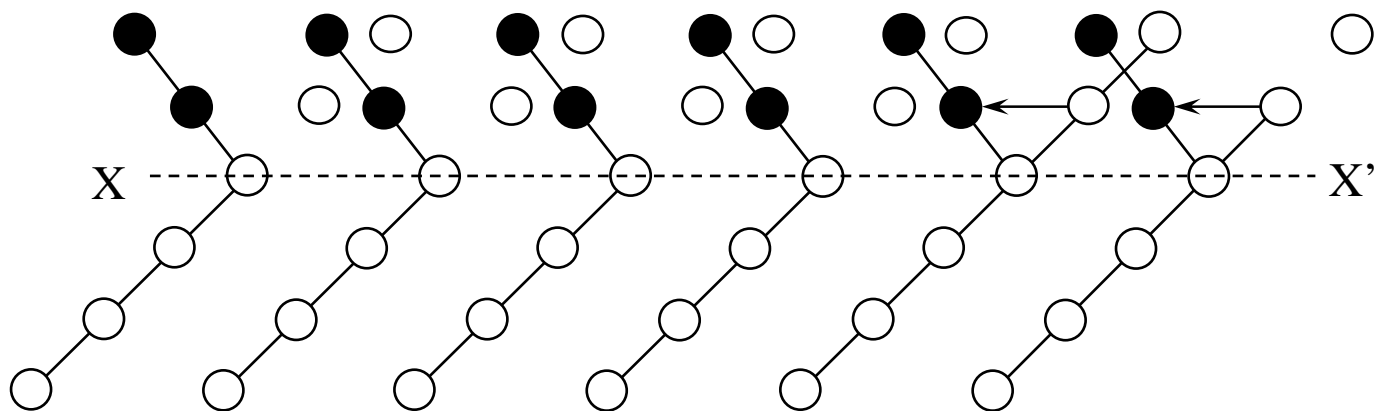
INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

# 晶体孪生平面

JILIN UNIVERSITY



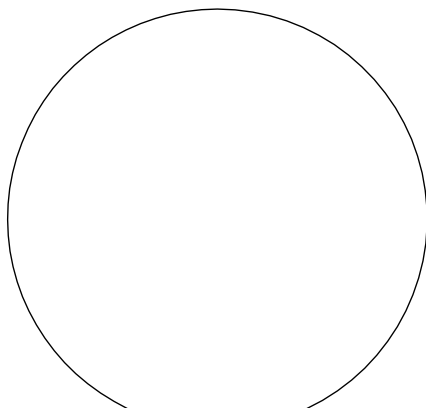
在一个平面上，晶体沿着两个不同的方向生长。



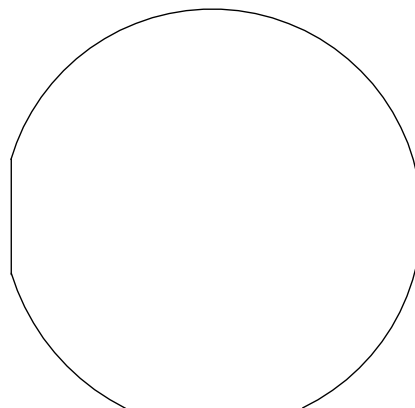
吉林大学

# 硅片标识定位边

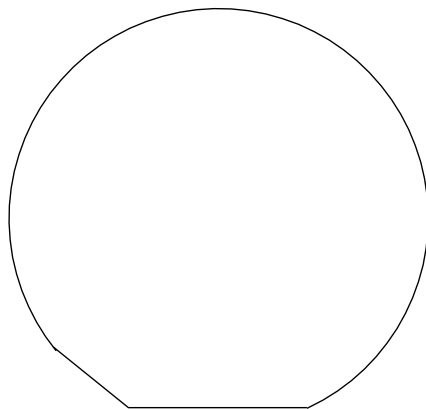
JILIN UNIVERSITY



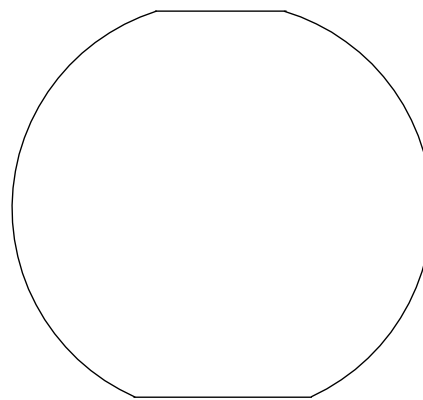
**P型 (111)**



**P型 (100)**



**N型 (111)**



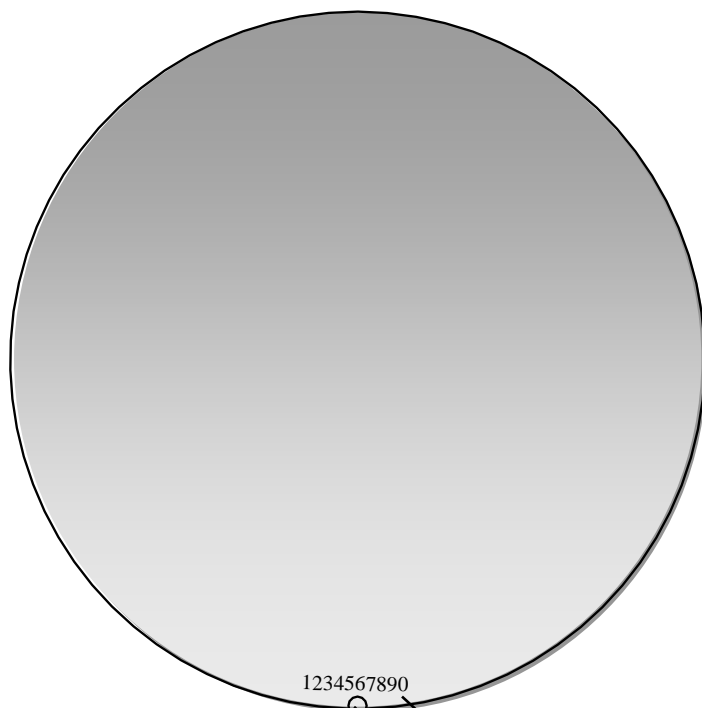
**N型 (100)**



吉林大学

# 硅片定位槽和激光刻印

JILIN UNIVERSITY



定位槽

被刻印的标识数字

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



吉林大学

# 质量测量

JILIN UNIVERSITY

- 物理尺寸
- 平整度
- 微粗糙度
- 氧含量
- 晶体缺陷
- 颗粒
- 体电阻率

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY



# 吉林大学

# 改进的硅片要求

JILIN UNIVERSITY

	年 (标准尺寸)			
	1995 (0.35 $\mu\text{m}$ )	1998 (0.25 $\mu\text{m}$ )	2000 (0.18 $\mu\text{m}$ )	2004 (0.13 $\mu\text{m}$ )
硅片直径(mm)	200	200	300	300
位置平整度 <sup>A</sup> ( $\mu\text{m}$ )	0.23	0.17	0.12	0.08
位置尺寸(mm x mm)	(22 x 22)	(26 x 32)	26 x 32	26 x 36
上表面粗糙度 <sup>B</sup> (RMS) <sup>C</sup> (nm)	0.2	0.15	0.1	0.1
氧含量(ppm) <sup>D</sup>	$\leq 24 \pm 2$	$\leq 23 \pm 2$	$\leq 23 \pm 1.5$	$\leq 22 \pm 1.5$
体微缺陷 <sup>E</sup> (缺陷数/ $\text{cm}^2$ )	$\leq 5000$	$\leq 1000$	$\leq 500$	$\leq 100$
单元面积颗粒数(#/ $\text{cm}^2$ )	0.17	0.13	0.075	0.055
( $\pm$ % 均匀性) ( $\mu\text{m}$ )	3.0 ( $\pm$ 5%)	2.0 ( $\pm$ 3%)	1.4 ( $\pm$ 2%)	1.0 ( $\pm$ 2%)

Adapted from K. M. Kim, "Bigger and Better CZ Silicon Crystals," *Solid State Technology* (November 1996), p. 71.

A：硅片平整度是指在通过硅片或硅片上某一位置的直线上的厚度变化（见下面）。

B：见下面对微粗糙度的解释。

C：RMS是一种用来对一组测量做出最佳评估的方法。在这种情况下，表面完成了测量（见下面）。它用均方根来计算(所有测量数值平方的平均数的平方根)。表面修整测量是通过表面的最高点和相关最低点得到的。

D：ppm是百万分之一。

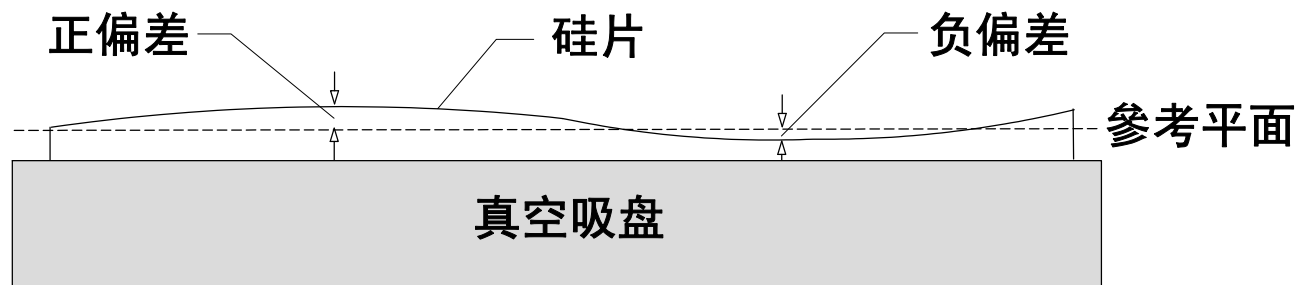
E：体微缺陷代表 $1\text{cm}^2$ 内所有缺陷。



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

# 硅片形变



集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY

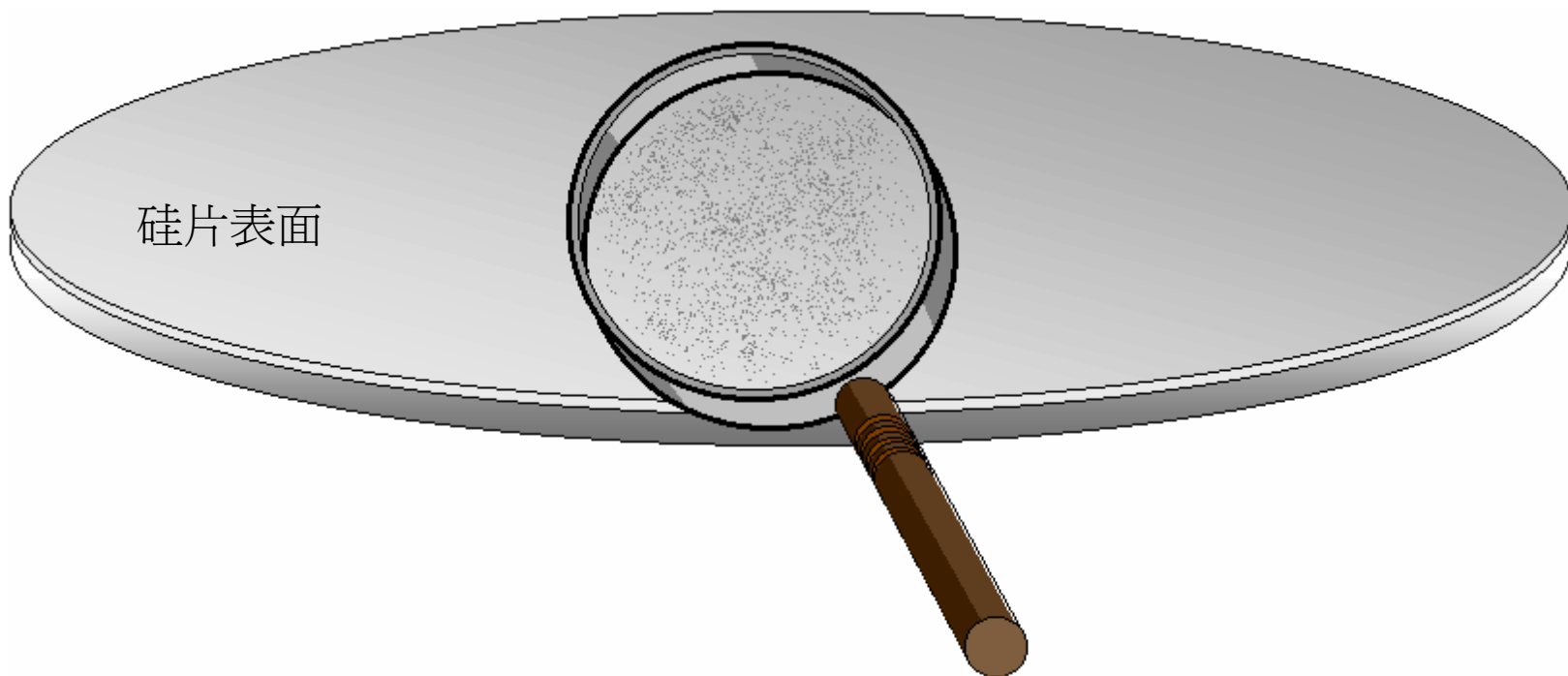




吉林大学

JILIN UNIVERSITY

# 硅片表面的平整度



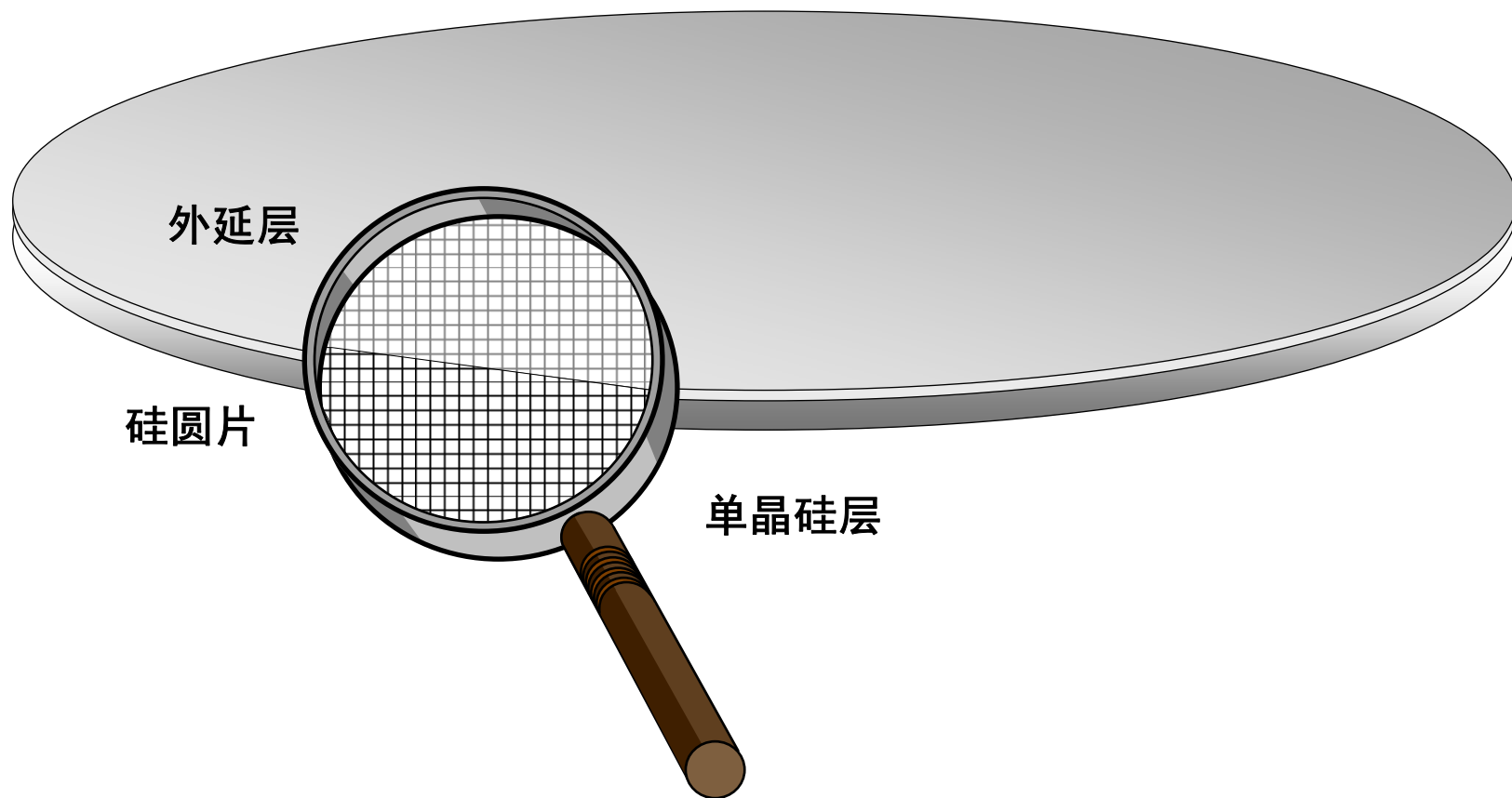
平整度是硅片最主要的参数之一，主要因为光刻工艺对局部位位置的平整度是非常敏感的。



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

# 硅外延层的结构



在某些情况下，需要硅片有非常纯的、与衬底有相同晶体结构的硅表面，还要保持对掺杂类型和浓度的控制。这要通过在硅片表面淀积一层外延层来实现。



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

**外延定义:外延(epitaxy)是在单晶衬底上生长一层单晶膜的技术。新生单晶层按衬底晶向延伸生长,并称此为外延层。长了外延层的衬底称为外延片。**

**特点:**

- ◆ **晶体结构良好**
- ◆ **掺入的杂质浓度易控制**
- ◆ **可形成接近突变p—n结**

**集成电路工艺**

**INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY**



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

作业:

- 1、列举得到半导体级硅的步骤，给出半导体级硅的纯度。
- 2、为什么要用单晶硅制造集成电路？
- 3、直拉法和区熔法的优缺点。
- 4、给出更大直径硅片的好处。
- 5、硅片为什么要导角？作用是什么？

集成电路工艺

INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY