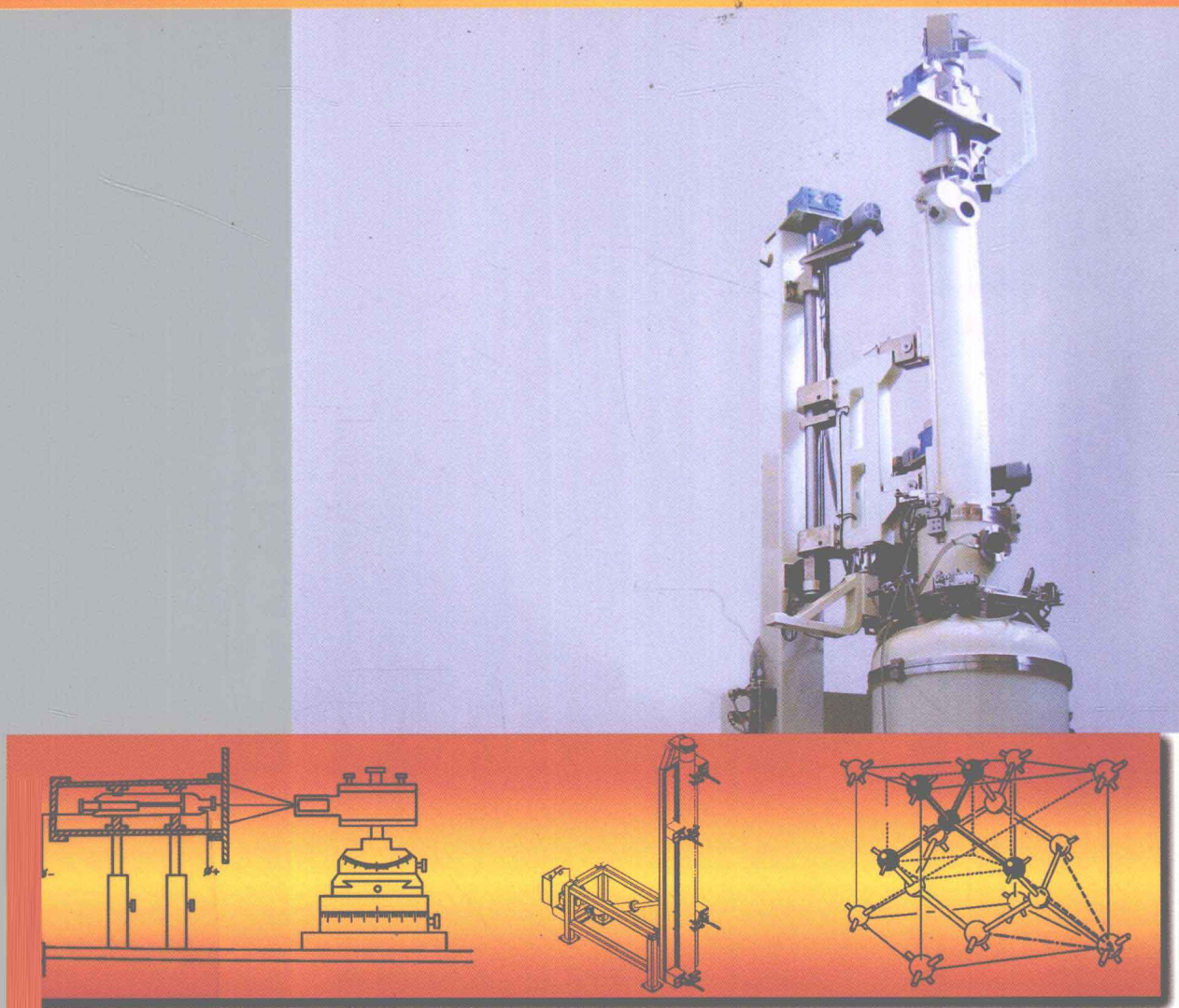


太阳能光伏产业 —— 硅材料系列教材

硅片加工技术

康自卫 王 丽 主编



太阳能光伏产业——硅材料系列教材

硅片加工技术

康自卫 王 丽 主编
陈元进 刘秀琼 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要从实际工艺的角度对硅片生产全过程进行了比较系统详细的介绍,包括硅单晶的基本特性和晶体结构,硅片生产设备的种类、性能及其使用方法,硅单晶从滚磨与开方、切割、研磨、抛光、清洗一直到检验包装的整个生产过程与管理,其中针对太阳能硅片的生产有适当的介绍,通过这些介绍,旨在使读者能够对硅片生产有一个全貌的认识,能具备硅片生产工艺与检验的基本知识,对各种设备仪器和工艺过程有所了解,有条件时可以通过实习掌握部分设备仪器的使用技能。

本书可作为高职高专太阳能光伏产业硅材料技术专业的教材,同时也可作为中专、技校和从事硅片生产的企业员工的培训教材,还可供相关专业工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

硅片加工技术/康自卫,王丽主编. —北京:化学工业出版社, 2010.8

(太阳能光伏产业——硅材料系列教材)

ISBN 978-7-122-09058-4

I. 硅… II. ①康…②王… III. 半导体工艺-教材
IV. TN305

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 129394 号

责任编辑: 张建茹

文字编辑: 向 东

责任校对: 边 涛

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 15 3/4 字数 405 千字 2010 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

太阳能光伏产业——硅材料系列教材

编审委员会

主 任：陈元进

副主任：周应胜

委 员：（按汉语拼音排序）

陈元进	邓 丰	邓永智	何 燕	黄刚娅
黄 玫	黄有志	康伟超	康自卫	乐栋贤
李志伟	刘 斌	刘秀琼	潘家平	唐正林
王 丽	王晓忠	巫显会	徐筱跃	杨 岍
易正义	尹建华	张 东	张和平	张 怡
周应胜				

前言

目前世界光伏产业以 31.2% 的年平均增长率高速发展，位于全球能源发电市场增长率的首位，预计到 2030 年光伏发电将占世界发电总量的 30% 以上，到 2050 年光伏发电将成为全球重要的能源支柱产业。各国根据这一趋势，纷纷出台有力政策或制订发展计划，使光伏市场呈现出蓬勃发展的格局。目前，中国已经有各种光伏企业超过 1000 家，中国已成为继日本、欧洲之后的太阳能电池生产大国。2008 年，可以说是中国光伏材料产业里程碑式的一年。由光伏产业热潮催生了上游原料企业的遍地开花。一批新兴光伏企业不断扩产，各地多晶硅、单晶硅项目纷纷上马，使得中国光伏产业呈现出繁华景象。

发展太阳能光伏产业，人才是实现产业可持续发展的关键。硅材料和光伏产业的快速发展与人才培养相对滞后的矛盾，造成了越来越多的硅材料及光伏生产企业人力资源的紧张；人才培养的基础是课程，而教材对支撑课程质量举足轻重。作为新开设的专业，没有现成的配套教材可资借鉴和参考，编委会根据硅技术专业岗位群的需要，依托多家硅材料企业，聘请企业的工程技术专家开发和编写出了硅材料和光伏行业的系列教材。

本系列教材以光伏材料的主产业链为主线，涉及硅材料基础、硅材料的检测、多晶硅的生产、晶体硅的制取、硅片的加工与检测、光伏材料的生产设备、太阳能电池的生产技术、太阳能组件的生产技术等。

本系列教材在编写中,理论知识方面以够用实用为原则,浅显易懂,侧重实践技能的操作。

本书主要以硅片生产理论为基础,以当今硅材料生产发展的现状为参照,从实际工艺角度对硅片生产全过程进行了比较系统的介绍,旨在使读者能够对硅片生产有一个全貌的认识,能具备硅片生产工艺与检验的基本知识,并对各种设备和工艺过程有所了解。

本书注重理论与实践的紧密结合,以职业岗位能力为主线贯穿全书,面向工作过程设计教学内容,突出应用性和实践性。

本书可作为高职高专太阳能光伏产业硅材料技术专业学生的教材,同时可作为企业对员工的岗位培训教材,也可作为相关专业的工程技术人员参考学习。

本书由康自卫、王丽主编。其中康自卫编写了第1、2、3、4章；乐栋贤编写了绪论和第5章；张东编写了第6章；王丽编写了第7章和相关附录。本书由陈元进、刘秀琼主审。参加审稿的老师提出了许多宝贵意见和建议，在此表示衷心的感谢。

教材的开发是一个循序渐进的过程,本系列教材只是一个起步,在编写过程中难免存在不足之处,恳请社会各界批评指正,编委们将在今后的工作中不断修改和完善。我们相信,本系列教材的出版发行,将促进我国硅材料及光伏事业的进一步发展。

教材编审编委会

2010 年 3 月

.....目 录.....

绪 论	1
0.1 硅	1
0.2 硅单晶	3
0.3 硅片	5
第1章 晶体滚磨与开方	7
1.1 晶体与磨削加工	7
1.2 硅片主、副参考面的制作	10
1.3 滚磨开方设备	16
1.4 滚磨开方工艺过程	21
本章小结	27
习题	29
第2章 晶体切割	30
2.1 硅单晶晶体结构	30
2.2 硅单晶的定向切割	46
2.3 硅单晶切割工序相关硅片参数	50
2.4 硅单晶内圆切割工艺	53
2.5 硅单晶多线切割工艺	57
本章小结	71
习题	73
第3章 硅片研磨	74
3.1 硅片边缘倒角	74
3.2 硅片研磨工艺及其设备	76
3.3 硅片热处理	88
本章小结	94
习题	96
第4章 硅片抛光	97
4.1 硅抛光片特性参数	97
4.2 硅片的化学减薄	99
4.3 硅片抛光方法和设备	101
4.4 硅片抛光工艺过程	106
本章小结	117
习题	119
第5章 硅片清洗	120
5.1 硅片清洗基本概念	120
5.2 硅片清洗处理方法	125
5.3 硅片清洗工艺	131
5.4 纯水制备系统简介	147
5.5 化学试剂的安全使用	150
本章小结	151
习题	153

第 6 章 硅片检验与包装

6.1 硅片检验基本知识

6.2 硅片电学参数检验

6.3 硅片表面取向检验

6.4 硅片几何参数检验

6.5 硅片表面质量检验

6.6 硅片氧化诱生缺陷检验

6.7 硅片检验设备举例

6.8 硅片包装与运输

本章小结

习题

第 7 章 硅片生产管理与质量控制

7.1 硅片生产过程管理

7.2 硅片生产现场管理

7.3 硅片生产工序控制

7.4 硅片生产质量分析

本章小结

习题

附录 I 硅片生产加工名词术语

附录 II 硅片生产加工相关标准

参考文献

154

154

169

178

180

195

196

202

207

209

209

211

211

215

220

224

233

235

236

239

241

绪 论

学习目标

了解：
• 硅、硅单晶与硅片
• 硅片生产工艺流程

硅是地壳中含量最丰富的元素之一，其发现不过两百年历史，但是随着人们对它的认识不断深入，其应用越来越广泛，硅片加工也随之迅猛发展。

这里从硅是什么出发，引导读者走进硅的世界，去认识硅多晶、硅单晶和硅片，了解硅片生产的大致过程及其发展历史，从而进入硅片生产加工领域。

0.1 硅

硅的应用已越来越广泛，以至渗透到了每一个领域，几乎是无所不在。硅是什么？什么是硅多晶和硅单晶？硅片又是怎么制作出来的？

0.1.1 硅是什么

硅，如图 0-1 所示，化学符号 Si，原子序号 14，位于元素周期表上 IV A 族（图 0-2），密度 2.33g/cm^3 ，熔点 1420°C ，沸点 2355°C 。表 0-1 列出了硅的主要性质。

表 0-1 硅的主要性质

项 目	参 数	项 目	参 数	项 目	参 数
元素英文名	Silicon	晶体结构	金刚石	颜色	银白色
元素中文名	硅	熔点/ $^\circ\text{C}$	1420	折射率	3.87
原子序数	14	沸点/ $^\circ\text{C}$	2355	延展性	脆性
相对原子质量	28.0855	相对密度	2.33	熔化热/ (kJ/g 原子)	39.65
原子半径/ $\text{\AA}$	12.1	硬度	6.25(莫氏)	核外电子排布	2,8,4
共价半径/ $\text{\AA}$	1.176	氧化态	4.2	比热容/ $[\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})]$	0.703(25°C)
离子半径/ $\text{\AA}$	2.71(-4) 0.42(+4)	还原电位/V	$\text{SiF}_6^{2-} \rightarrow \text{Si} + 6\text{F} - 1.2$	线膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	4.2×10^{-6} ($10 \sim 50^\circ\text{C}$)
价电子	3p^2	电子结构	$[\text{Ne}]3\text{s}^23\text{p}^2$	热导率/ $[\text{cal}/(\text{s}^3 \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C})]$	0.20(20°C)
电负性	1.9	电容率	12	体积压缩系数/ (cm/dyn)	0.98×10^{-12}

① $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$; $1\text{cal} = 4.1840\text{J}$; $1\text{dyn} = 10^{-5}\text{N}$ 。

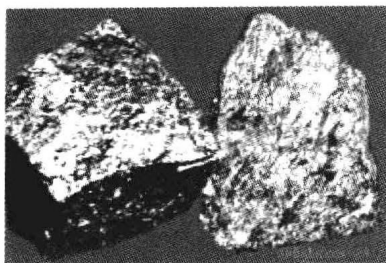


图 0-1 硅

硅是地球上含量最丰富的元素之一，其分布仅次于氧。但是在自然界中没有单质状态的硅存在，硅在地壳中通常以化合物的形式存在于岩石和砂子中，硅的化合物主要是二氧化硅（硅石）和硅酸盐。水晶、玛瑙、碧石、蛋白石、石英、砂子以及燧石等都是二氧化硅类，长石、云母、黏土、橄榄石和角闪石等都是硅酸盐类。常见的花岗岩就是由石英、长石和云母混合组成的，砂子和砂岩是不纯硅石的变体，或者是天然硅酸盐岩石风化后的产物。

元 素 周 期 表																		VIII A
I A	H	II A											III A	IV A	V A	VI A	VII A	He
	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
	Na	Mg	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII	I B	II B			Al	Si	P	S	Cl	Ar
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

图 0-2 元素周期表

0.1.2 硅的发现

1810 年瑞典人贝采利乌斯 (J. J. Berzelius) 在加热石英砂、炭和铁时，得到一种金属，根据拉丁文 *silex* (燧石) 命名为 *silicon*，当时得到的实际是硅铁。1824 年分离出硅，定为元素。1854 年法国人德维尔 (S. C. De-ville) 用混合氯化物熔盐电解法制得晶体硅；以后，得到纯度超过 99% 的纯硅；再后，美国杜邦公司用锌还原四氯化硅得到纯度超过 99.97% 的针状硅。

0.1.3 硅的用途

硅被广泛应用于各行各业及人们生活的方方面面，可以毫不夸张地说，每个人每天的生活都离不开硅。

硅可以以合金的形式用于汽车和机械制造业，在钢铁工业中广泛用硅铁作合金添加剂，在多种金属冶炼中用硅作还原剂，冶炼铝合金时加入少量的纯度为 98% 的冶金级硅可大大改善铝合金的性能。硅还能与陶瓷材料一起做成金属陶瓷。金属陶瓷耐高温，富韧性，可以切割，既继承了金属和陶瓷的各自优点，又弥补了两者的先天缺陷，是宇宙航行的重要材料。第一架航天飞机“哥伦比亚号”的外壳上，就拼砌了三万一千块硅瓦，所以能抵挡住高速穿行稠密大气时摩擦产生的高温。

用纯二氧化硅可以拉制出高透明度的玻璃纤维，激光在玻璃纤维的通路里，无数次的全反射向前传输，代替了笨重的电缆。一根头发丝那么细的玻璃纤维，可以同时传输 256 路电话。光导纤维通信以其容量大、抗干扰力强和保密性高而成为现代通信的

佼佼者。

性能优异的硅有机化合物具有表面张力低、压缩性高和气体渗透性高等基本性质，并且耐高低温、耐氧化、耐腐蚀、难燃与憎水，是极好的防水涂布和电气绝缘材料，被广泛应用于密封、黏合、润滑、涂层、表面活性、脱模、消泡、抑泡、防水、防潮和惰性填充等，尤其是地下工程、古文物保护和建筑雕塑等方面更是不可缺少的重要材料。

硅单晶是重要的半导体材料，利用硅单晶的性质，可以做成各种大功率晶体管、整流器、集成电路和太阳能电池等。近几年来，太阳能光伏产业在能源开发方面异军突起，其中将辐射能转变为电能的太阳能电池绝大多数就是用硅材料制作的。据设计计算，一栋总面积约 3 万平方米的研究中心，若所有建筑的顶面和立面都被利用起来，安装上 1 万多平方米各种形态的太阳能电池，每年能发电 100 万千瓦时。除满足该研究中心用电外，多余的电可直接通过并网向市电网供电。

0.2 硅单晶

硅单晶是重要的半导体材料，广泛用于计算机、微波通信、光纤通信、太阳能发电等方面。然而生产硅单晶的原材料离不开高纯硅多晶。

0.2.1 硅多晶的制备

用于半导体器件的硅片是由硅单晶加工而成，用于太阳能电池的硅片有硅单晶片，也有硅多晶片。用于太阳能电池的硅多晶通常为硅铸锭多晶，硅铸锭多晶是利用熔炼凝固的方法生产的，其纯度可以达到 5~6 个 9，用作硅太阳能电池片基材，与生产高纯硅单晶的原料硅多晶不是一个概念。

硅多晶是生产硅单晶的原材料，其纯度可以达到 8 个 9 以上，在本教材中所说的“硅多晶”即指这种，如果是铸锭多晶则写明为“铸锭多晶”。图 0-3 显示的即为硅多晶。



图 0-3 硅多晶

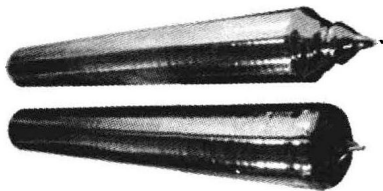
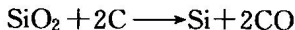


图 0-4 硅单晶

通常先将硅石矿在电弧炉中用碳还原二氧化硅并经提纯而得到纯度为 99.7%~99.8% 的金属硅，其化学反应方程式为：



金属硅可以通过各种途径制得硅多晶。

超纯硅多晶的制备，除个别工厂采用硅烷法和硫化床法外，一般都采用三氯氢硅氢还原方法，也就是通常说的西门子法。目前用得最多的是改良西门子法，在超低碳的不锈钢或镍基合金制成的水冷炉壁还原炉内，用氢将三氯氢硅还原成硅，其主要过程为

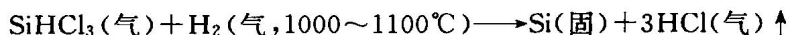
① 工业硅粉的氯化反应制备粗 SiHCl_3 。

主反应： $\text{Si}(\text{粉状}) + 3\text{HCl}(\text{气}, 220^\circ\text{C}) \longrightarrow \text{SiHCl}_3(\text{气}) + \text{H}_2(\text{气}) \uparrow$

主要副反应： $\text{Si}(\text{粉状}) + 4\text{HCl}(\text{气}) \longrightarrow \text{SiCl}_4(\text{气}) + 2\text{H}_2(\text{气}) \uparrow$

② 粗 SiHCl_3 经过粗馏提纯，再经过低温精馏除去其中的杂质。

③ 氢还原法制备高纯多晶硅。



铸锭多晶硅生产工艺主要有定向凝固法和浇铸法两种。

定向凝固法是将硅料放在坩埚中加以熔融，然后将坩埚从热场中逐渐下降或从坩埚底部通上冷源以造成一定的温度梯度，使固液界面从坩埚底部向上移动而形成晶锭。

浇铸法是将熔化后的硅液从坩埚中倒入另一模具中凝固以形成晶锭。

0.2.2 硅单晶的生长方法

图 0-4 所示即为硅单晶。硅单晶的生长方法，有直拉法、区域熔化法、布里奇曼法、枝蔓生长法和气相沉积生长法等。目前半导体材料工业上广泛应用的是直拉法（即 CZ 法）和区熔法（即 FZ 法）两种。

(1) 直拉单晶硅的生长

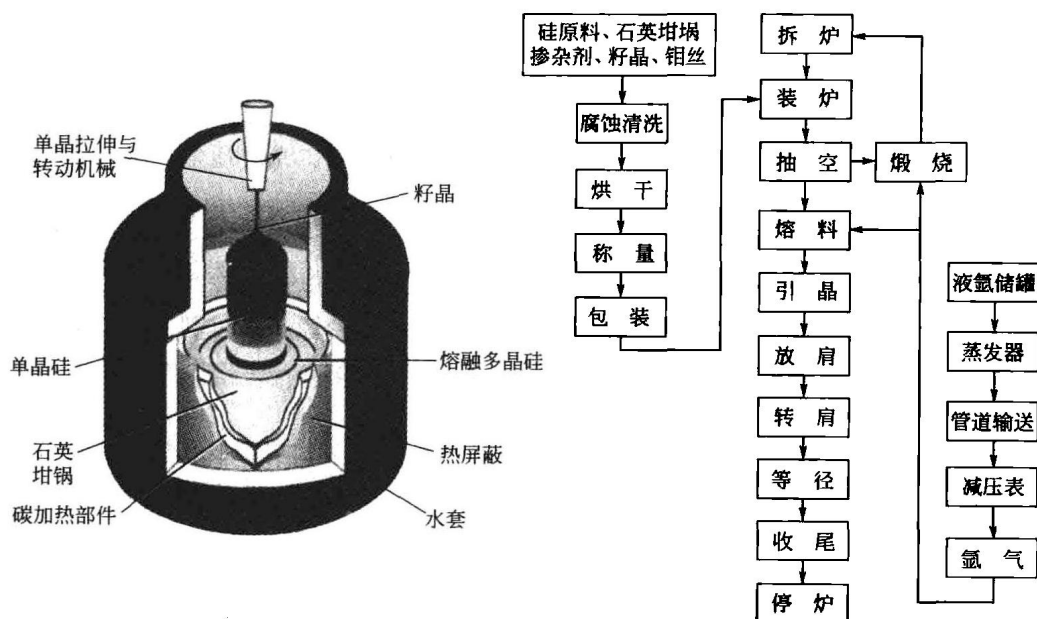


图 0-5 直拉法工艺示意及其流程图

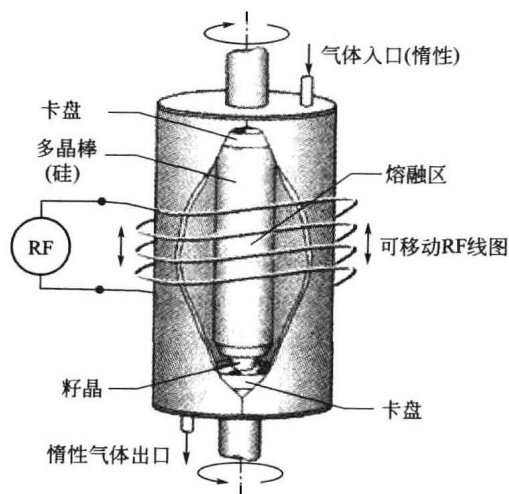


图 0-6 区熔法单晶硅生长示意图

1917 年，乔赫拉斯基为了确定金属的结晶生长速度，将奈钦最先用来从熔体中生长邻羟基甲酸苯酯单晶的方法改进并引用到金属方面，后来又经过许多人的不断改进，才呈现今天的面貌，因此，后人为了纪念乔赫拉斯基，就取名为“乔赫拉斯基生长法”，简称“直拉法”用英文字母“CZ”来表示。

图 0-5 显示了直拉法工艺示意及其流程。直拉法通过直拉单晶硅炉装置，采用电阻加热的方式，将盛放在高纯石英坩埚内的多晶硅原料（块状）高温熔化，使溶液温度保持在比硅熔点稍高一点的状态，把安装在拉晶轴下端的籽晶缓慢插入溶液，待籽晶与溶液完全接触吻合后，缓慢降低熔体温度，然后在籽晶与石英坩埚作

相反方向旋转的同时，慢慢地向上提拉籽晶，实现单晶硅的直接拉制的生长过程，所以，简称为直拉法即 CZ 法。

(2) 区熔单晶硅的生长

将事先准备好的棒状多晶硅料，按工艺技术要求装入区熔单晶炉内，同时，在炉内的籽晶夹头里安装籽晶，关好炉门抽真空至一定程度后，适时向炉膛内通入高纯氩气，移动加热线圈，致多晶硅料局部熔化并形成熔区，使熔区从多晶硅棒的一端移动到另一端，熔区在“籽晶种子”的引导下，生长成单晶，就叫区熔单晶硅即 FZ 单晶硅。图 0-6 为区熔法单晶硅生长示意图。

0.3 硅片

硅片是硅单晶经专门技术分割制作成的薄片，视其用途不同而分为电路级、晶体管级和太阳能级，按其生产工艺又分为切割片、研磨片、化腐片和抛光片等。近年来硅铸锭多晶在太阳能光伏领域被大量使用，在涉及相关工艺时将一并介绍。

0.3.1 硅片生产工艺流程

通过单晶工艺生长出的硅棒，是圆柱状的，铸锭多晶更是重达几百公斤的大块体。为适应器件生产的需要，必须将其分割成符合一定要求的薄片，硅片生产就是利用专门的机器、设备和仪器，通过滚磨、切割、研磨及抛光等特定工艺，将硅单晶锭（或铸锭多晶）加工成符合使用要求的薄片的过程。

图 0-7 显示了硅单晶抛光片的主要生产流程。硅单晶首先进行外形整形（滚磨），以获得需要的硅片形状，再将其切割成一定厚度的薄片，对其边缘进行处理后经研磨、热处理、化学腐蚀和抛光，其间每一步进行与之对应的清洗和检验，最后经包装完成整个流程。

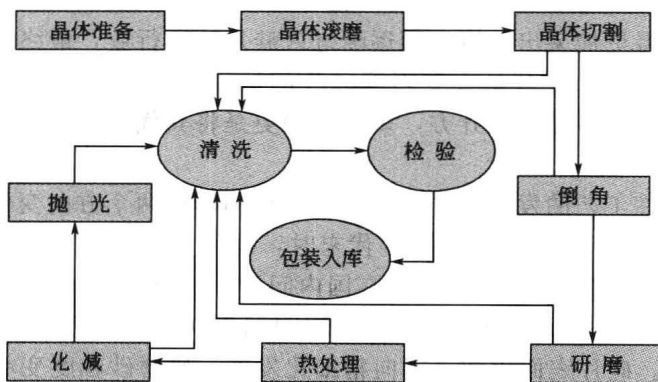


图 0-7 硅单晶抛光片生产流程图

图 0-8 显示了太阳能硅片的生产流程。和抛光片一样，不管是硅单晶还是硅铸锭多晶，首先第一步都是进行外形处理，即对硅单晶进行滚磨切方，硅铸锭多晶进行开方，然后经切割、清洗、检验与包装后完工。

本教材以硅单晶抛光片的生产工艺技术为主线，同时兼顾太阳能硅片的生产制作工艺。

0.3.2 硅片生产的历史与发展

硅片作为半导体器件不可缺少的重要材料，其发展总是与器件的发展同步并互相促进的。

1945 年制造的世界上第一台电子计算机，装有 18000 个电子管、70000 只电阻和 10000

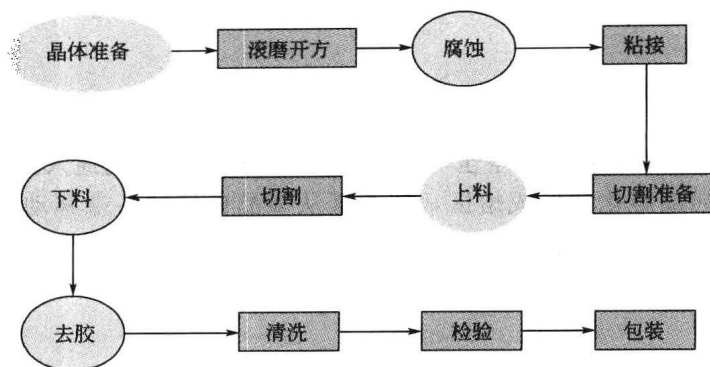


图 0-8 太阳能硅片生产流程图

只电容，整个机器重 30t，占地 170m²，相当于 10 间房子大小。而今天的电子计算机，由于技术的进步和材质的改善，在一个指甲盖大小的硅片上，可以容纳上万个晶体管；并且有输入、输出、运算、存储和信息控制等一系列功能。这种技术的进步和材质的改善，也反映出硅片加工生产技术的进步与发展。

早期的硅片生产，直径都比较小，虽说也是采用滚磨、切割、研磨、化减和抛光等一系列工艺来实现加工目的，但毕竟是很粗糙的。

就滚磨工艺来说，一开始就是简单的外形滚圆，没有定向，也无参考面（定位面），随着器件工艺的发展，开始在硅片上制作主、副参考面，以满足用户划片的需要和工艺流水线上的分辨要求，随着硅片直径的增大，参考面又发展成为切口。对于硅棒的表面，早先的工艺都是采用先滚磨然后进行化学腐蚀以去除其表面损伤，后来，将滚磨分为粗磨、精磨及抛光滚磨。

20 世纪的硅片切割一般都是内圆切割，随着器件要求的提高，加之硅片直径增大，内圆切割的弊病就显露得更加突出，线切割逐渐进入硅片加工行业，最终以前所未有的优势取得硅晶体切割的主导地位，尤其是在太阳能硅片的加工生产中，从单晶切割到铸锭多晶切割，再到单晶切方，铸锭多晶破锭开方，多线切割更是将其优势发挥到了极致，完全取代了内圆切割。

总的来说，和器件工艺的发展一样，硅片生产也同样向两个方向变化，即硅片直径的增大和加工质量参数的细微化，20 世纪 70 年代末时，硅片直径以 20~40mm 为常见，80 年代发展到 76.2mm，如今 300mm 的硅片已经在国内问世，150~200mm 硅片已成为主流产品。硅片厚度越来越薄，现在的太阳能硅片，已经切割到 180μm 的厚度，有的公司已经试切出厚度为 80μm 的硅片。硅片表面也越来越向精细化发展，研磨砂粒度变小，硅片弯曲度、翘曲度、平行度和平整度的要求提高，增加了热处理、边缘倒角和精细抛光及双面抛光等工艺。为适应新的应用需要，数控机床被引入到硅片生产加工行业以完成精确开槽、打孔等特殊作业。硅片的应用逐渐进入越来越广泛的领域，硅片生产行业也展现出越来越宽阔的前景。

..... 第1章 晶体滚磨与开方

学习目标

- 掌握：**
- 磨削加工基本知识
 - 硅片主、副参考面的选取与制作
 - 滚磨开方工艺过程
- 理解：**
- 晶体的性质与特征
- 了解：**
- 滚磨开方设备

经单晶工艺生长的硅棒，其外形是不规则的圆柱体，切割成片以前必须按一定规范对其进行整形。铸锭多晶也是一样，首先必须按一定规格进行整形与分割，方能进行下一步加工。因此，硅片生产的第一道工序，就是要利用定向仪、单晶切方滚磨机、带锯或线锯等专用设备对晶体进行磨削与分割加工，使其外形（包括直径、参考面和边长等）符合使用要求，通常称之为滚磨开方工序。

滚磨开方是硅片加工的第一个工序，在对其工艺进行介绍前，本章将首先介绍晶体的主要特征以及多晶与单晶的概念，然后对磨削加工进行必要的讨论，再从硅片主、副参考面的选取制作进入滚磨开方工序，并以滚磨开方机为例对其设备与工艺进行深入的讨论。

1.1 晶体与磨削加工

1.1.1 晶体的基本特征

自然界的物质分为固体、液体和气体。固体又分为晶体与非晶体。玻璃、塑料、木头、松香等是非晶体；而大多数的物质如岩盐、水晶、钻石等天然矿物，铜、铁、铅、钨等金属，还有石英、石墨和云母等，都属于晶体；硅、锗、砷化镓等半导体材料也是晶体。

非晶体原子排列杂乱无规律可循，而晶体则是由许多质点（包括原子、离子或分子）在三维空间作有规则的周期性重复排列而构成的固体。正因为如此，晶体具有一些特殊的性质。

晶体具有均匀性、有限性、对称性、各向异性和解理性。从而使晶体具有以下一些特征。

（1）晶体有规则而对称的外形

由于晶体中的原子和分子呈有规则的重复排列，使晶体具有规则而对称的外形。非晶体则不呈现这种周期性的规则排列和规则而对称的外形。

（2）晶体有固定的熔点

熔点是固体将其物态由固态转变（熔化）为液态的温度。晶体熔化时的温度叫做熔点。

将晶体加热，观察记录其开始熔化时的温度，会发现每一种晶体都分别具有一定的熔化温度，即熔点。例如，食盐的熔点为 801°C ；铜的熔点为 1083°C ；硅的熔点为 1420°C ；钨的熔点高达 3410°C ；而石墨的熔点更高，为 3662°C 。

将晶体或非晶体逐渐加热，每隔一定时间测量记录其温度，一直到其完全熔化为液体，可以做出温度和时间关系曲线——熔化曲线，如图 1-1 所示。观察晶体的熔化曲线： $a \rightarrow b$ 温度逐渐升高； $b \rightarrow c$ 温度恒定不变； $c \rightarrow d$ 温度继续上升。非晶体的熔化曲线：温度不断升高，没有一个恒定的温度平台， $b \rightarrow c$ 段处于软化状态。普通玻璃是非晶体，就没有熔点，在加热过程中只会有一个软化温度，大概在 $600 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 。

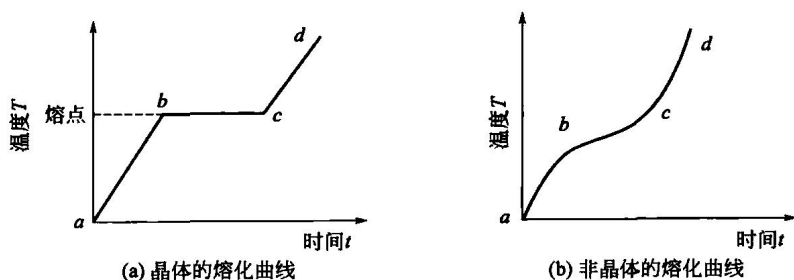


图 1-1 熔化曲线

(3) 晶体有各向异性的特征

在晶体中，不同的结晶方向表现出不同的物理化学性质，称为晶体的各向异性。

可以进行一个实验：在云母片和玻璃片上分别涂上石蜡，分别用一个加热的金属针尖放在其上，触点周围的石蜡会逐渐熔化。观察其形状会发现，玻璃片上的石蜡呈圆形，而云母片上的石蜡则呈椭圆形，如图 1-2 所示。这便是由于玻璃的导热性与方向无关，而云母的导热性与方向有关所致。



图 1-2 石蜡熔化的实验

从表 1-1 也可以看到，同一种物质，在不同的方向上具有不同的物理性质。比如铜单晶的延伸率，最大可达 55%，而最小只有 10%。

表 1-1 单晶体的各向异性

类别	弹性模量/MPa		抗拉强度/MPa		延伸率/%	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小
Cu	191000	66700	346	128	55	10
α -Fe	293000	125000	225	158	80	20

(4) 解理性

晶体在受到一定外力时会沿特定的面断裂开，称为解理性，这种特定的断裂面称为解理面。例如，云母会沿解理面分裂成小薄片；硅单晶的解理面是 $\{111\}$ ， (111) 硅片会解理分

裂成小三角形；(100) 硅片则会解理分裂成小的矩形。

晶体的解理面是很光滑的完美平面。

综上所述，晶体与非晶体的区别可以归纳为：

- ① 根本区别在于，质点是否在三维空间作有规则的周期性重复排列，晶体具备此有序排列，而非晶体则不具备；
- ② 晶体具有规则的外形，非晶体则没有（无定形体）；
- ③ 晶体熔化时具有固定的熔点，而非晶体无明显熔点，只存在一个软化温度范围；
- ④ 晶体具有各向异性，非晶体则呈各向同性；
- ⑤ 晶体具解理性，非晶体没有解理。

1.1.2 单晶体与多晶体

一块晶体中，若其内部的原子排列的长程有序规律是连续的，则称为单晶体；若某一固体物质是由许许多多的晶体颗粒所组成，则称之为多晶体，多晶体中晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。图 1-3 形象化地表示了这两种结构的不同。

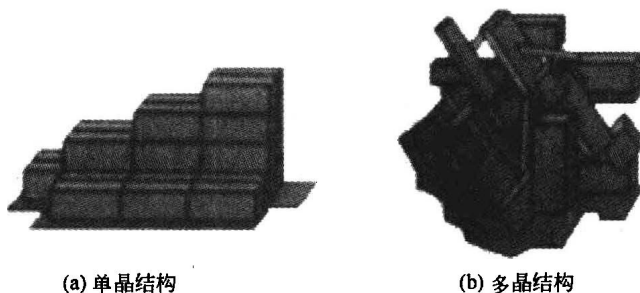


图 1-3 单晶和多晶结构示意图

(1) 单晶体

质点按同一取向有序连续排列，由一个核心（称为晶核）生长而成的晶体称为单晶体。

单晶体具有晶体的所有特征。如硅单晶，其原子排列的有序性与均匀性决定了晶体不同部位的宏观性质相同；有限性使其自发地形成规则的几何外形， $\langle 111 \rangle$ 和 $\langle 100 \rangle$ 硅单晶分别具有三条和四条对称的生长线；晶体的对称性使晶体在某些特定方向上表现出完全相同的物理化学性质，比如硅单晶的等效面特征以及具有固定的熔点等；硅单晶也具明显的各向异性，不同的晶面，其共价键密度、面间距等均有所不同，表现出不同的生长速率、加工速率和腐蚀坑形态等；硅单晶具解理性，其最好的解理面是 $\{111\}$ ，其次为 $\{110\}$ 。

(2) 多晶体

多晶体通常由许多不同位向的小晶体（晶粒）所组成。

多晶体和单晶体一样具有固定的熔点，但显现不出晶体的各向异性（如果多晶内晶粒排布是随机的话），一般显示出各向同性——假等向性。多晶的物理性质不仅取决于所包含晶粒的性质，而且晶粒的大小及其相互间的取向关系也起着重要的作用。

铸锭多晶硅的平均晶粒尺寸与工艺有关，一般为几毫米或厘米大小。

1.1.3 磨削加工基本知识

滚磨开方是一个机械磨削加工过程，通过磨轮（刀具）与工件产生相对运动，使磨轮（刀具）上的金刚石颗粒对工件进行磨削而达到加工目的。

磨削加工是指用磨料来去除工件表面多余材料的方法，其应用范围非常广泛，根据工艺目的和要求不同，已发展为多种形式的加工工艺，并正在向高速、高效、高精度、低粗糙度

及自动化方向不断发展。在硅片生产中,磨削加工几乎从头到尾贯穿于整个制作过程。

(1) 磨削加工的分类

磨削加工通常按磨削工具的类型分类,有固定磨粒加工和游离磨粒加工两大类。不同形式加工的用途、工作原理和运动情况有很大的差别。但是,磨削过程中都存在摩擦、微切削和表面化学物理反应等现象,只是形式和程度不同而已。

硅片加工中,硅单晶滚磨、内圆切割、金刚线切割和倒角等都属于固定磨粒加工;而研磨、喷砂、多线切割和抛光等则属于游离磨粒加工。

(2) 磨削过程的三个阶段

磨粒在磨削过程中经历三个阶段,具体情况如下。

第一阶段:弹性变形阶段

磨粒与工件开始接触,磨粒未切入工件而仅在表面产生摩擦,表层产生热应力(变形应力),此为弹性变形阶段。

第二阶段:刻划阶段

磨削过程中随着磨粒切入量增加,磨粒逐渐切入工件,使该部分材料向两旁隆起,工件表面形成刻痕,为刻划阶段。

第三阶段:切削阶段

磨粒已切入一定深度,法向切削力增至一定程度后,被切处已达到一定温度,此部分切削材料沿剪切面滑移而形成切屑流出,在工件表层产生热应力和变形应力,此阶段称为切削阶段。

(3) 磨削加工的特点

磨削加工稳定性好、精度高、速度快并且能加工各种高硬度的材料,所以被广泛使用,尤其是在精加工领域,当然也就非常适合硅片的生产加工。磨削加工具有以下特点。

① 不管是哪种磨削,磨削界面都有大量磨粒,其形状、大小和分布为不规则的随机状态,参加切削的刃数随具体条件而定。磨粒刃端面圆弧半径较大,切削时呈负前角(一般为 $-85^{\circ}\sim-65^{\circ}$)。

② 磨粒硬度高,热稳定性好,可磨削各种高硬度的材料,这些材料用一般的车、铣是很难加工的。

③ 每颗磨粒的切削厚度很薄,一般只有几微米,因此加工表面可获得高的精度和好的表面粗糙度。磨削加工的精度可达IT6~IT7级,表面粗糙度(R_a)可达 $0.05\sim0.08\mu\text{m}$,故常被使用在精细加工中,如硅片加工、石英片加工和宝石加工等。

④ 磨削加工的效率,一般磨削速度约为普通刀具的20倍以上,因此可获得较高的去除率。

⑤ 磨粒具有一定的脆性,在磨削力的作用下会破裂,从而更新其磨削力,这叫磨粒的“自锐作用”。不过随着破裂的增加,磨粒粒度减小,磨削力便会降低。

1.2 硅片主、副参考面的制作

电路级的硅片通常都需要制作参考面,硅片参考面的制作就是在滚磨工序完成的。

首先,要了解什么是硅片的参考面,它的作用是什么。

1.2.1 硅片参考面及其作用

硅片参考面指在硅片边缘专门制作的小平面,也称作定位面,有主、副之分,主参考面的长度大于副参考面。主参考面是为了在器件生产中获得管芯分割的最佳划片合格率而制作