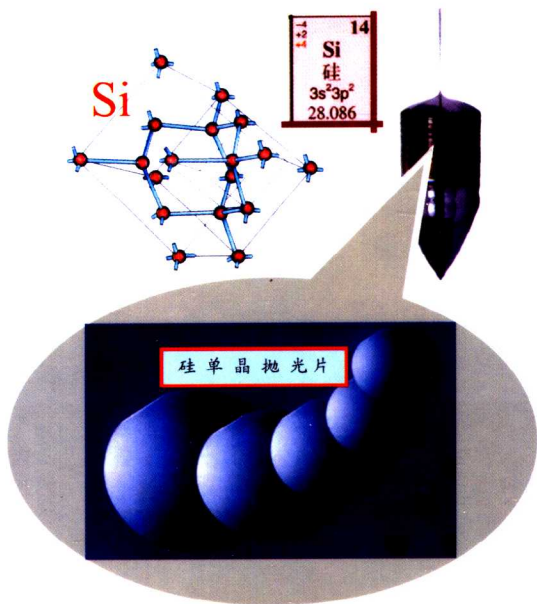


张厥宗 编著

硅单晶抛光片的 加工技术



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

硅单晶抛光片的加工技术

张厥宗 编著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

硅单晶抛光片的加工技术/张厥宗编著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 6
ISBN 7-5025-7224-4

I. 硅… II. 张… III. 半导体材料-硅-抛光-加工工艺 IV. TN305.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 077513 号

硅单晶抛光片的加工技术

张厥宗 编著

责任编辑: 丁尚林

责任校对: 于志岩

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 10 字数 270 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7224-4

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

当今社会已经进入电子信息时代，微处理芯片的发明彻底改变了世界，微电子、信息技术的水平已被视为一个国家现代化水平高低的重要标志。

单晶硅材料是半导体工业的基础，因此从事半导体硅集成电路和半导体硅单晶、抛光片加工领域的工程技术人员，都必须深入了解半导体硅材料的基本性质与其抛光片的加工工艺技术。随着大规模集成电路技术的不断发展，目前 IC 技术已迈进了特征尺寸线宽小于 $0.10\mu\text{m}$ 的纳米电子时代，对半导体硅单晶、抛光片加工质量的要求愈来愈高。硅单晶、抛光片尺寸也将由直径 150mm (6in)、直径 200mm (8in) 向直径 300mm (12in) 发展。

国内、外关于半导体硅单晶的制备、性能和质量控制的研究及相关技术文献、资料虽有报道，但对其有关半导体硅单晶抛光片的加工技术、性能、质量控制的相关技术的综合、系统报道甚少，使得许多从事半导体硅单晶抛光片加工领域的工程技术人员，苦于无一综合、有系统的专业书籍、资料以供学习、参考之用。

因此，为了满足广大科研、工程技术及企业管理人员的需要，我将自己多年来的 一些工作体会，在国内、外看到的、学习得到的、所积累的有关半导体硅单晶抛光片加工技术方面的知识和体会，整理、汇集、编著成此书，以提供给致力于从事半导体硅单晶抛光片加工领域的工程技术人员、企业管理人员和在校学生或热爱半导体材料硅的各界朋友参考、使用。

本书在内容上采取由浅入深的方式，在介绍半导体硅及集成电路有关知识的同时，结合能满足小于线宽 $0.13 \sim 0.10\mu\text{m}$ IC 工艺用优质大直径硅单晶抛光片的加工技术进行全面、系统地介绍。本书共分七章，除简单介绍半导体工业发展及动态和国外、国内半导

体硅单晶、抛光片的发展概况外，书中主要包含以下内容：国外、国内半导体工业的发展，硅的物理、化学及其半导体的性质，集成电路对半导体硅单晶、抛光片的技术要求及半导体硅单晶、抛光片的制备，硅外延片及其他硅的晶片、硅单晶、抛光片的测试，洁净室技术，超纯水系统，高纯化学试剂等。书中附有大量的图、表以供读者参考。

本书在编写期间，得到了不少朋友、同事的鼓励及提供宝贵的意见和许多资料，尤其是得到张椿先生对此书文稿的热心修改；在本书中还引用了许多国内、外著名的半导体行业、公司、工厂、供应商的产品和相关资料；我的妻子（金红妹）仔细地为我整理各种资料，我的儿子参与了本书的封面设计，在此特致谢意！

由于本人知识水平有限，书中的不足之处欢迎广大读者批评指正。

张厥宇

于北京

2005年6月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 半导体工业的发展	1
1.2 国外半导体工业发展的动态	3
1.2.1 硅集成电路发展现状	3
1.2.2 硅集成电路今后的发展概况	13
1.2.3 硅片产业的发展现状	25
1.3 中国半导体工业的发展	31
第 2 章 硅的物理、化学及其半导体性质	39
2.1 硅的基本物理、化学性质	39
2.2 硅的半导体物理、化学性质	41
2.2.1 硅的晶体结构	41
2.2.2 硅的电学性质	47
2.2.3 硅的光学性质	51
2.2.4 硅的热学性质	52
2.2.5 硅的机械性质	52
2.2.6 硅的化学性质	52
第 3 章 集成电路用硅单晶、抛光片的制备	55
3.1 集成电路对硅单晶、抛光片的技术要求	55
3.2 控制硅片质量的相关主要特征参数及有关专用技术术语解释	58
3.3 硅单晶的制备	71
3.3.1 直拉单晶生长方法	72
3.3.2 区熔单晶生长方法	83
3.4 硅单晶抛光片的制备	87
3.4.1 硅单晶抛光片的制造工艺流程	88
3.4.2 硅单晶棒的截断	91
3.4.3 硅单晶棒的外圆磨削	93
3.4.4 硅单晶片定位面加工	95

3.4.5	硅晶棒表面的腐蚀	96
3.4.6	硅切片	96
3.4.7	硅片倒角	103
3.4.8	硅片的双面研磨或硅片的表面磨削	107
3.4.9	硅片的腐蚀	119
3.4.10	硅片的表面处理	124
3.4.11	硅片的边缘抛光	127
3.4.12	硅片的表面抛光	128
3.4.13	硅片的激光刻码	149
3.4.14	硅片清洗	153
3.4.15	硅抛光片的洁净包装	170
3.4.16	其他的硅晶片	172
第4章	硅片的运、载	188
4.1	氟塑料 (TEFLON) 的基本特性	188
4.2	半导体工业常用的塑料制品——硅片的运、载花篮及包装盒	192
4.3	硅抛光片的洁净包装	196
4.4	其他相关的工装用具	198
第5章	硅单晶、抛光片的测试	203
5.1	硅片主要机械加工参数的测量	204
5.2	硅单晶棒或晶片的晶向测量	209
5.3	导电类型 (导电型号) 的测量	215
5.4	电阻率及载流子浓度的测量	217
5.5	少子寿命测量	220
5.6	氧、碳浓度测量	224
5.7	硅的晶体缺陷测量	228
5.8	电子显微镜和其他超微量的分析技术	234
第6章	洁净室技术	252
6.1	概述	252
6.2	洁净室空气洁净度等级及标准	252
6.3	洁净室在半导体工业中适用范围	262
6.4	洁净室的设计	267
6.5	洁净室的维护及管理	270
第7章	半导体工厂的动力供给系统	277

7.1 电力供给系统	277
7.2 超纯水系统	278
7.2.1 半导体及 IC 工业对超纯水的技术要求	279
7.2.2 超纯水的制备	281
7.3 高纯化学试剂及高纯气体	288
7.3.1 半导体工业用的高纯化学试剂	288
7.3.2 高纯气体	291
7.4 三废（废水、废气、废物）处理系统及相关安全防务系统	297
参考文献	299

第 1 章 概 述

1.1 半导体工业的发展

硅 (Si) 是地球地壳中仅次于氢和氧含量以外的元素, 它通常以化合物的形态 (例如硅酸盐和氧化硅等) 存在于大自然中。

随着社会的发展, 直到 20 世纪, 世人才发现硅具有半导体的性质。这些性质包括其电阻率随着温度的增加而递减、光电效应 (经光照后电阻率减小)、热电效应、磁电效应、霍尔 (Hall) 效应及其与金属接触的整流效应等。

1947 年 12 月 23 日, Bardeen (巴第恩)、Brattain (布拉顿) 及 Shockler (肖克利)^[1] 等人在美国贝尔实验室发明了晶体管 (Transistor) 后, 正式拉开了半导体时代的序幕。在 1950 年, G. Teal (蒂尔) 及 Little^[2] (里特尔) 俩人将 Czochralski^[3] (乔赫拉斯基) 于 1917 年发明的拉晶方法, 应用在锗 (Ge) 及硅单晶的生长上。这种拉晶技术已经成为现代生产高质量硅单晶的主要方法。后来经 Little (里特尔) 持续致力于单晶体生长技术的研发, 终于证实了单晶体材料的少数载流子寿命要比多晶体材料长。

1952 年 W. Pfann (普凡) 发明的区熔法 (Zone Refining)^[4] 单晶体生长技术大幅度提高了材料纯化的技术水平, 使得商用半导体晶体管也跟着于 1953 年问世。由于锗有较高的纯度与低温特性, 故当时大多数半导体公司使用锗作为晶体管的材料。直到 1954 年, G. Teal (蒂尔) 才在美国得州仪器公司 (TI) 成功地开发出世界第一个硅晶体管^[5]。由于这项技术的突破, 使得美国得州仪器公司由一个无名的小公司逐渐成为半导体行业的著名大公司。

继硅晶体管发明之后, 虽然可利用 Czochralski (乔赫拉斯基) 法来制备硅单晶体, 但是直拉 (CZ) 法生长的硅单晶, 因由于使

用的石英坩埚会受到硅熔体（Silicon Melt）的侵蚀而增加氧的沾污。为了获得高纯度的硅单晶体，1956 年 Henry Theurer（亨利·休里尔）发明了区熔法（Float-Zone Technique）^[6]。区熔（FZ）法因没有使用石英坩埚容器来盛装硅熔体，故不存在氧污染的问题。之后，在 1958 年由于 Dash^[7]（戴什）发明了一种无位错（Dislocation-free）单晶生长法，才使得生长优质大直径硅单晶技术得到了不断发展。

1958 年，Kilby（基尔比）在美国得州仪器公司发明了集成电路^[8]，奠定了信息时代到来的基础。自从第一代 IC（集成电路）问世后，半导体工业迅速得到了发展，晶片上的电子元器件的密度和复杂性，也就从小规模集成电路 SSI（Small Scale Integration）向中规模集成电路 MSI（Medium Scale Integration）、向大规模集成电路 LSI（Large Scale Integration）、向极大规模集成电路 VLSI（Very Large Scale Integration）、向超大规模集成电路 ULSI（Ultra Large Scale Integration）得到不断地发展。集成电路的应用范围相当广泛，按不同的用途集成电路的分类可见图 1-1 所示^[9]。

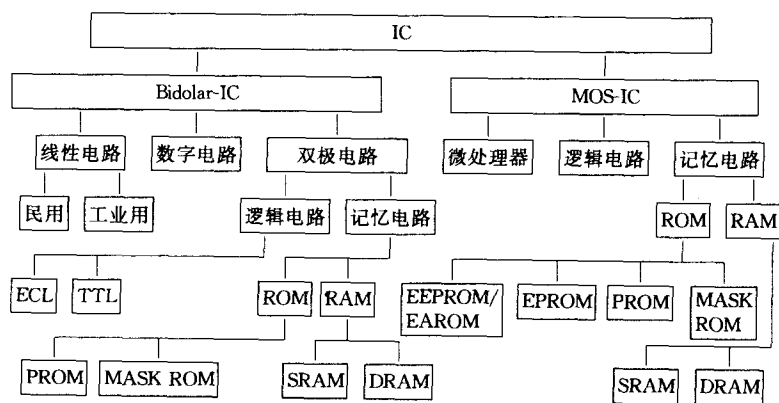


图 1-1 集成电路的分类

以硅材料为主的半导体专用材料已是电子信息产业最重要的基

础功能材料，在国民经济和军事工业中占有很重要的地位。全世界的半导体器件中有 95% 以上是用硅材料制成，其中 85% 的集成电路也是由硅材料制成。

1.2 国外半导体工业发展的动态

随着 IC 工艺、技术的不断发展，硅单晶的直径尺寸越做越大，四十多年来，直径小于 200mm 的硅单晶片已经进入商业生产应用的水平，大直径 300mm 的硅单晶抛光片也已在特征尺寸线宽小于 $0.13\mu\text{m}$ 的 IC 器件工艺中得到了广泛应用，并已进入了研制、生产的阶段，直径大于 400mm 的硅单晶也进入了开发、研究的阶段。纳米电子技术必将成为今后研究和发展的方向。

1.2.1 硅集成电路发展现状

制备集成电路用的硅单晶直径研制发展历史见表 1-1 所示。

表 1-1 硅单晶直径研制发展历史

年份	1958	1959	1966	1968	1970	1979	1986	1996	1998	2000 后
直径	mm	15	25	40	50	100	150	200	300	400 ^①
	in	0.6	1.0	1.6	2.0	4.0	6.0	8.0	12.0	16.0

① 现尚处于开发、研究的阶段。

直径 300mm 硅单晶片与其他直径硅单晶片的比较见表 1-2 所示。

表 1-2 直径 300mm 与其他直径硅单晶片的质量、面积对比

直径 ϕ (公差)	mm	100.0 (± 0.2)	150.0 (± 0.2)	200.0 (± 0.2)	300.0 (± 0.2)	400	450
	in	4	6	8	12	16	18
厚度 $T/\mu\text{m}$ (公差)		425~525 (± 25)	625~675 (± 25)	725 (± 25)	775 (± 25)	待定	待定
面积 $S/(\text{mm}^2/\text{片})$		7850	17662.5	31400	70650	125600	158962.5

续表

直径 ϕ (公差)	mm	100.0 (± 0.2)	150.0 (± 0.2)	200.0 (± 0.2)	300.0 (± 0.2)	400	450
	in	4	6	8	12	16	18
面积比			$2.25 \times S_4$	$1.78 \times S_6$ $4.0 \times S_4$	$2.25 \times S_8$ $4.0 \times S_6$	$1.78 \times S_{12}$ $4.0 \times S_8$ $7.1 \times S_6$	$1.27 \times S_{16}$ $2.25 \times S_{12}$ $5.1 \times S_8$ $9.0 \times S_6$
质量 W /(g/ 片)		7.78~ 9.60	25.7~ 27.8	53.0	127.6	待定	待定
质量比			$3.30 \times W_4$	$(2.06 \sim 1.91) \times W_6$ $6.8 \times W_4$	$2.40 \times W_8$ $(4.96 \sim 4.59) \times W_6$	—	—

根据《国际半导体技术路线指南 International Technology Roadmap Semiconductors》对 IC 用硅抛光片的技术要求预测报道^[10], 关于未来 15 年内的半导体制造技术分析, 对集成电路芯片的特征尺寸变化及对硅抛光片的几何尺寸加工精度有了更严格要求。可参见图 1-2~图 1-5 和表 1-3~表 1-6 所示。

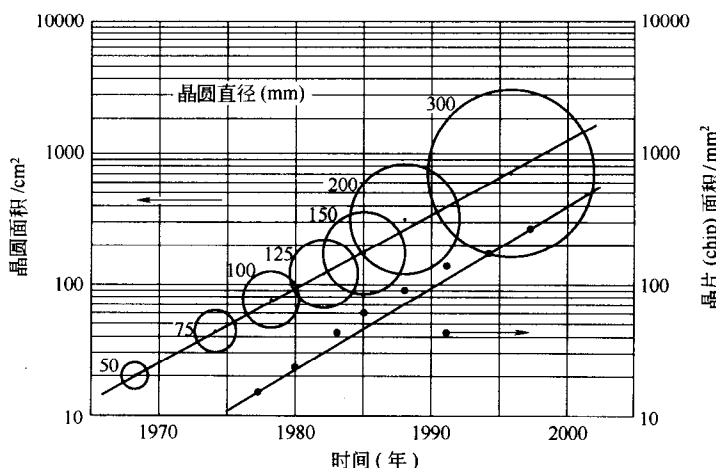


图 1-2 硅芯片直径尺寸的发展趋势

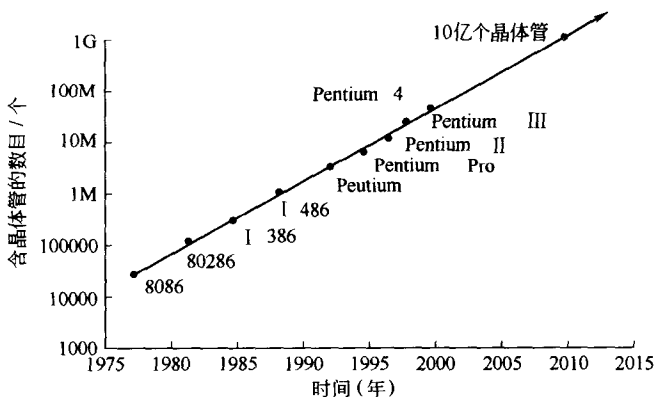


图 1-3 美国英特尔公司对微处理器的发展及预测

美国英特尔公司最初创始人之一的 Gordon Moore (戈登·摩尔) 先生首先预测到集成电路芯片的容量 (集成度) 会逐年递增翻番, 而价格上则是相应的逐年递减, 认为单个微处理器芯片的性能增长是按照指数曲线、几何级数的规律增长, 在对数图上呈现的是一条直线型的发展趋势, 而且一直到今天这种发展趋势都得到了事实的验证。故这种发展趋势就以美国英特尔公司最初创始人之一的 Gordon Moore 先生的名字命名, 称为摩尔定律^[11] (Moore's Law)。

根据 1965 年 Gordon Moore 的摩尔定律预言: 单位平方英寸 ($1\text{in}=0.0254\text{m}$) 芯片上晶体管的数目每隔 18~24 个月就将增加一倍。事实上在一个芯片上的晶体管数目已经由 1969 年的 2300 个增长到 2000 年 Pentium 4 微处理器的 4200 万个, 即增长了 1.8 万多倍。目前, 已能在一个芯片上集成 10^8 个晶体管。20 世纪 90 年代末, 集成电路、微处理器的芯片制造工艺已从“微米级”、“深亚微米级”进入到“纳米电子级”的系统单芯片 (System On Chip, SOC) 时代, 在一个芯片上, 可集成包括 CPU、DSP、逻辑电路、模拟电路、射频电路、存储器和其他电路模块及嵌入软件等, 并相互连接构成完整的系统。到 2004 年后, 小于 90nm 的制造工艺将会

表 1-3 半导体技术年代及芯片尺寸及预测

首批产品上市的年份	1997	1999	2002	2005	2008	2011	2014
密集线条(DRAM 半节距)/nm	250	180	130	100	70	50	35
孤立线条(MPU 栅)/nm	200	140	100	70	50	35	25
存储器							
产品代 样品/引入阶段/Bit	256M	1G	4G	16G	64G	256G	1T
产品代-大量生产阶段/Bit	64M	256M	1G	4G	16G	64G	256G
样品引入阶段集成度/(Bit/cm ²)	96M	270M	770M	2.2B	6.1B	17B	48B
逻辑电路(大批量生产,性能价格,MPU)①							
逻辑晶体管数/cm ² (封装后,包括片上 SRAM)	3.7M	6.2M	18M	39M	84M	180M	390M
逻辑电路(小批量生产:ASIC)②							
有效晶体管数/cm ² (自动布线)	8M	14M	24M	40M	64M	100M	160M
每个芯片上的功能数							
DRAM 比特/每个芯片(1~6 年)	267M	1.07G	4.29G	17.2G	68.7G	275G	1.10T
MPU 总晶体管数/每个芯片(1~6 年)	11M	21M	76M	200M	520M	1.40B	3.62B
芯片尺寸/mm ² (样品引入阶段)							
DRAM-第 1 年	280	400	560	790	1120	1580	2240
DRAM-第 3 年(第二次缩小)	170	240	340	480	670	950	1340
DRAM-第 6 年(第二次缩小,下一代)	100	140	200	280	390	550	780

续表

芯片尺寸/mm ² (样品引入阶段)	1997	1999	2002	2005	2008	2011	2014
MPU-第1年	300	340	430	520	620	750	901
MPU-第3年(第二次缩小)	180	205	260	310	370	450	540
MPU-第6年(第二次缩小-下一代)	110	125	150	180	220	260	312
ASIC(以最大光刻场面积计)	480	800	900	1000	1100	1300	1482
光刻场面积/mm ²	22×22	25×32	25×36	25×40	25×44	25×52	25×59
衬底的最大直径/mm	484	800	900	1000	1100	1300	1482
抛光片或外延片或 SOI [®] 片	200	300	300	300	300	450	450

① 第1年的集成度会小于后来线宽进一步缩小的数据。

② 指高性能、尖端嵌入阵列的专用集成电路。

③ 绝缘层上的硅。

注：资料摘译自《International Technology Roadmap for Semiconductors 1998 Update》。

附注：内存存储器可分为“只读存储器”(ROM)和“随机存储器”(RAM)两个部分，其内存容量可用“字节”来表示。每一个英文字母算作是一个“字节”，并作如下规定：

1024个“字节”=1K个“字节”(千字节)；

1024K个“字节”=1M个“字节”(兆字节)；

1024M个“字节”=1G个“字节”(千兆字节)；

1024G个“字节”=1T个“字节”。

被运用到大量的芯片生产之中。

在过去近四十多年来，全球半导体产业的发展一直是遵循着这条摩尔定律而得到了高速的发展。

当然，目前对关于摩尔定律还能适用多久，已经存在着有两种不同的看法：

(1) 一种观点认为十年内摩尔定律仍然有效；

(2) 另外一种观点则认为摩尔定律将面临着难以克服的障碍，最终会影响摩尔定律的继续引用。

当前关于摩尔定律还能适用多久的争论实质上就是对缩小芯片的特征尺寸的争论。

但是 Gordon Moore 博士 2003 年 12 月 10 日在美国旧金山召开的一次国际会议上向与会的著名芯片设计人员、工程师们曾讲过，摩尔定律的未来将取决于芯片设计人员的创新能力，并同时鼓励他们迎接新的挑战。

美国英特尔公司微处理器的发展就是这条摩尔定律的明证。图 1-3 所示便是美国英特尔公司对微处理器的发展及预测。

美国英特尔公司自 1969 年推出世界上第一块 4 位微处理器芯片 4004，集成度是 2300 个晶体管；于 2000 年推出微处理器芯片 Pentium 4，集成度是 4200 万个晶体管。目前，已能在一个芯片上集成 10^8 个晶体管。英特尔公司预言，2010 年将推出集成度为 10 亿个晶体管的微处理器，其性能为 10 万 MIPS。

随着 VLSI 技术的发展，CMOS 电路的集成度也不断提高，电路线宽尺寸大约每隔三年就会缩小了约 30%。

表 1-4 集成电路芯片的特征尺寸变化及预测

年 份	2000 前	2001	2003	2004	2005	2006	2007
芯片特征尺寸	0.25~0.18 μm	0.13 μm	100nm	90nm	80nm	70nm	65nm
年 份	2008	2009	2010	2013	2016	2018	
芯片特征尺寸	57nm	50nm	45nm	32nm	22nm	18nm	

据全球晶圆厂半导体协会 (Fabless Semiconductor Associa-

tion, FSA) 统计, 在 2003~2004 年间集成电路芯片的特征尺寸仍然是以 $0.18\mu\text{m}$ 为主流产品, 约占总量的 35%~41%。但 $0.13\mu\text{m}$ 产品的使用量将逐步增加, 在 2003 年的第一季度, 直径 200mm 和直径 300mm 的 $0.13\mu\text{m}$ 产品分别占有量是 6% 和 2%, 预测到第四季度直径 200mm 和直径 300mm 的 $0.13\mu\text{m}$ 产品占有量分别可提升到 15% 和 4%, 并于 2004 年提高到直径 200mm 和直径 300mm 的 $0.13\mu\text{m}$ 产品分别占有量的 20% 和 9%。

相反, $0.35\mu\text{m}$ 和 $0.25\mu\text{m}$ 产品将从 2002 年的 15% 和 23% 大幅度减为 2004 年的 9% 和 10%。

在 2004 年采用 $0.09\mu\text{m}$ 技术的直径 300mm 实际需求量, 将占芯片总量的 1%~2%。

从表 1-5 可知, ULSI 技术为了扩大动态随机存储器 (DRAM) 容量, 在三十多年来, IC 芯片制造商找到了在一个晶圆片上能生产集成度的容量向 4G~16G 推进、增多芯片容量的办法: 缩小 IC 芯片的特征尺寸或增大晶圆片的直径尺寸。

表 1-5 VLSI 芯片的特征尺寸及硅片直径的变化预测^[12]

年 份		1995		1998			2001~2003				2004		
线宽/ μm		0.35		0.25			0.18~0.13				0.13~<0.10		
容量 (DRAM)/ 位		64M	16M	256M	64M	16M	1G	256M	64M	16M	4G	1G	64M
芯片面积/ mm^2		210	70	320	110	40	480	160	58	22	720	240	86
硅片上相 当取得的 芯片个数	$\Phi 200\text{mm}$	100	301	66	191	526	44	131	363	956	29	88	245
	$\Phi 300\text{mm}$	225	675	148	430	1183	99	296	816	2152	66	197	550
	$\Phi 400\text{mm}$	401	1202	263	765	2104	175	526	1451	3825	117	351	979

目前全世界销售的硅片中, 按其面积统计, 在 2001 年, 直径 150mm、200mm 与 300mm 硅片产量共占全球硅片市场的 84%, 预计在 2005 年可增长到 90%。

进入 21 世纪后, 由于纳米电子技术的迅速发展, 加速硅片市