



国家科学技术学术著作出版基金资助  
先进生产规划与调度理论研究丛书  
"十二五"国家重点图书出版规划项目

丛书总主编 李培根

# 晶圆制造自动化 物料运输系统调度

Jingyuan Zhizao Zidonghua Wuliao Yunshu Xitong Diaodu

张洁 秦威 吴立辉 著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

# 晶圆制造自动化 物料运输系统调度

Jingyuan Zhizao Zidonghua Wuliao Yunshu Xitong Diaoou

张洁 秦威 吴立辉 著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

## 内 容 简 介

本书针对自动化物料运输系统(AMHS)调度问题大规模、随机性、实时性和多目标的特点,在系统、深入地进行 AMHS 建模方法和运行过程分析的基础上,分别介绍了 AMHS 中的 Interbay 系统和 Intrabay 系统的优化调度方法,介绍了 AMHS 集成调度和 AMHS 调度性能评价方法。本书提出的方法和技术将为广大企业、科研院所、高等院校进一步深入研究晶圆制造 AMHS 调度问题提供理论基础,为推动晶圆制造 AMHS 调度技术发展和企业实际应用提供参考,对提升我国晶圆制造企业的核心技术竞争力及行业综合实力具有重要意义。

本书主要面向工业工程和机械工程领域的研究者和生产管理人员,特别是将要进行晶圆制造系统调度优化方面研究的学者和工业界中期望寻找有效的晶圆制造 AMHS 调度方法的生产管理人员。本书也可作为机械工程、工业工程、自动化、计算机工程、管理工程等相关专业的研究生和高年级本科生的教材和参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

晶圆制造自动化物料运输系统调度/张洁,秦威,吴立辉著. —武汉:华中科技大学出版社,2015.12  
(先进生产规划与调度理论研究丛书)  
ISBN 978-7-5680-0902-7

I. ①晶… II. ①张… ②秦… ③吴… III. ①半导体工艺-自动化系统-物料输送系统-研究  
IV. ①TN305

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 116401 号

晶圆制造自动化物料运输系统调度

张 洁 秦 威 吴立辉 著

策划编辑:万亚军

责任编辑:姚同梅

封面设计:原色设计

责任校对:张琳

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:17.25

字 数:362千字

版 次:2015年12月第1版第1次印刷

定 价:88.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究



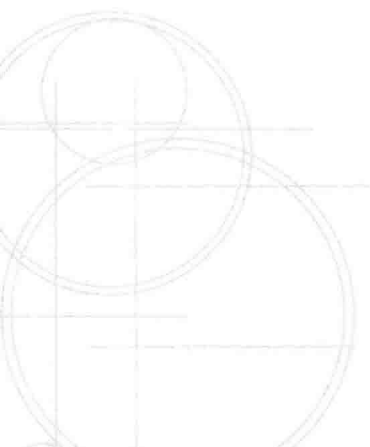
国家科学技术学术著作出版基金资助



"十二五"国家重点图书出版规划项目

先进生产规划与调度理论研究丛书

丛书总主编 李培根



# 前 言

半导体制造产业是中国目前重点推动和发展的高科技重点产业。随着半导体晶圆制造技术的发展,晶圆尺寸逐渐从 6 in(1 in=25.4 mm)、8 in 增大至 12 in,并向 18 in 方向发展。典型的 12 in 晶圆生产线中采用了自动化物料运输系统(AMHS)输送晶圆,通常系统中有数千卡晶圆在制品,单个晶圆卡的质量达 7.5 kg,完成其所有加工工序需要搬运 600~1800 次,物料运输小车走过的距离为 8~10 km。因此,我国在晶圆制造产业融入全球产业链的过程中,需要提高晶圆制造自动化物料运输系统的运行效率,以提高晶圆加工设备利用率和缩短芯片交货期,保证晶圆制造企业的市场竞争力。

早在 20 世纪 90 年代,美国的 Kumar、Leachman 等晶圆制造领域的知名专家已经开始对晶圆制造系统的调度与控制问题进行研究,其成果引起了国内外学者的广泛关注。针对晶圆制造系统中加工系统的调度与控制问题,国内外已经有大量的研究成果,笔者之前也进行了相关研究。然而到目前为止,国内外针对晶圆制造 AMHS 优化调度的研究成果仍非常有限。晶圆制造 AMHS 调度具有大规模、复杂和随机的特性,是典型的 NP-hard 问题,该类问题具有很高的学术研究价值和工业应用价值。

笔者近年来围绕晶圆制造的 AMHS 建模、调度与控制问题进行了广泛而深入的研究,主持了多项国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划项目。在这些项目的支持下,笔者对晶圆制造系统 AMHS 调度中涉及的关键技术进行了研究,取得了一批重要的理论成果。本书在总结这些成果的基础之上,系统全面介绍了晶圆制造系统中 AMHS 建模、AMHS 运行特性分析、AMHS 调度方法、调度性能评价等内容,希望为晶圆制造 AMHS 调度问题的解决提供借鉴和参考。

在本书完成过程中,研究生孙寅斌、潘聪等承担了不少工作,付出了大量心血,对他们表示由衷的感谢。研究生杨俊刚、吕佑龙、朱琼、张朋、汪俊亮、杨小龙、李腾达、周亚平等也参加了部分编写工作,在此对他们表示感谢。书稿完成过程中参考了大量的文献,笔者在书中已尽可能地标注了,若有疏忽未标注的,敬请读者谅解。

同时,华中科技大学段正澄院士、清华大学融亦鸣教授和香港大学黄国全教授对本书的撰写提出了不少建设性的意见,在此表示由衷的感谢!也要感谢华中科技大学出版社的编辑们,他们为本书的出版付出了大量的心血。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目“晶圆制造 Interbay 物料运输系统的动态调度研究”(No:51275307)和“大数据驱动的智能车间的运行分析与决策方法的研究”(No:51435009)的资助,本书出版获得了国家科学技术学术著作出版基



金的资助,在此一一表示感谢!

晶圆制造 AMHS 调度的相关理论、方法和应用还处在迅速发展之中,并且已经引起越来越多的研究和应用人员的关注。由于笔者的水平和能力有限,书中的缺点和错误在所难免,欢迎广大读者批评指正。

张洁 秦威 吴立辉

2015 年 4 月于上海

# 目 录

<b>第 1 章 晶圆制造系统</b> .....	(1)
1.1 半导体制造产业 .....	(1)
1.1.1 半导体制造产业的发展与现状 .....	(1)
1.1.2 未来半导体制造产业面临的挑战 .....	(6)
1.2 半导体芯片制造工艺 .....	(7)
1.2.1 晶圆制备 .....	(7)
1.2.2 晶圆制造 .....	(7)
1.2.3 晶圆拣选测试 .....	(10)
1.2.4 芯片封装 .....	(10)
1.2.5 芯片封装测试 .....	(11)
1.3 晶圆制造系统的构成 .....	(11)
1.3.1 晶圆加工系统 .....	(11)
1.3.2 晶圆制造物料运输系统 .....	(15)
1.4 晶圆制造系统的调度 .....	(17)
本章参考文献 .....	(18)
<b>第 2 章 晶圆制造自动化物料运输系统</b> .....	(21)
2.1 晶圆制造物料运输系统的发展 .....	(21)
2.1.1 半自动化物料运输系统 .....	(21)
2.1.2 自动化物料运输系统 .....	(22)
2.1.3 智能化物料运输系统 .....	(23)
2.2 晶圆制造自动化物料运输系统的组成 .....	(24)
2.2.1 晶圆卡 .....	(24)
2.2.2 传送系统 .....	(25)
2.2.3 存储系统 .....	(27)
2.2.4 跟踪系统 .....	(28)
2.2.5 控制系统 .....	(29)
2.3 晶圆制造物料运输系统布局 .....	(29)



2.3.1	单脊椎型布局	(29)
2.3.2	双脊椎型布局	(30)
2.3.3	整体式布局	(30)
2.3.4	周边布局	(31)
2.3.5	混合式布局	(33)
2.4	晶圆制造自动化物料运输系统的特点	(33)
	本章参考文献	(34)
<b>第3章</b>	<b>晶圆制造 AMHS 的建模</b>	<b>(35)</b>
3.1	基于网络流模型的晶圆制造 AMHS 建模	(35)
3.1.1	网络流模型基本理论	(35)
3.1.2	晶圆制造 AMHS 网络流建模过程	(36)
3.2	基于排队论模型的晶圆制造 AMHS 建模	(40)
3.2.1	排队论模型基本理论	(40)
3.2.2	晶圆制造 AMHS 排队论建模过程	(42)
3.3	基于数学规划模型的晶圆制造 AMHS 建模	(46)
3.3.1	数学规划模型基本理论	(46)
3.3.2	晶圆制造 AMHS 数学规划建模过程	(48)
3.4	基于马尔可夫模型的晶圆制造 AMHS 建模	(49)
3.4.1	马尔可夫模型基本理论	(50)
3.4.2	晶圆制造 AMHS 马尔可夫建模过程	(51)
3.5	基于仿真模型的晶圆制造 AMHS 建模	(53)
3.5.1	仿真模型基本理论	(54)
3.5.2	晶圆制造 AMHS 仿真建模过程	(55)
3.6	基于 Petri 网模型的晶圆制造 AMHS 建模	(62)
3.6.1	Petri 网模型基本理论	(62)
3.6.2	晶圆制造 AMHS 的 Petri 网建模过程	(63)
3.7	本章小结	(70)
	本章参考文献	(70)
<b>第4章</b>	<b>晶圆制造 AMHS 运行特性分析</b>	<b>(72)</b>
4.1	AMHS 运行过程描述	(72)
4.2	常用 AMHS 运行分析方法	(73)
4.3	晶圆制造 AMHS 扩展马尔可夫模型	(75)



4.3.1	参数定义与假设 .....	(75)
4.3.2	扩展马尔可夫模型定义 .....	(77)
4.3.3	扩展马尔可夫模型的分析过程 .....	(78)
4.3.4	模型有效性验证 .....	(85)
4.4	基于扩展马尔可夫模型的 AMHS 运行分析 .....	(90)
4.4.1	运输小车平均利用率分析 .....	(90)
4.4.2	空载运输小车平均到达时间间隔分析 .....	(92)
4.4.3	期望和实际运输量分析 .....	(93)
4.4.4	晶圆卡等待时间分析 .....	(94)
4.4.5	运输小车堵塞相关指标分析 .....	(97)
4.4.6	AMHS 运行分析实例 .....	(100)
4.5	本章小结 .....	(103)
	本章参考文献 .....	(103)
<b>第 5 章</b>	<b>晶圆制造 AMHS 调度方法 .....</b>	<b>(104)</b>
5.1	基于启发式规则的晶圆制造 AMHS 调度 .....	(104)
5.1.1	启发式规则概述 .....	(104)
5.1.2	启发式规则在晶圆制造 AMHS 调度中的应用 .....	(108)
5.2	基于运筹学方法的晶圆制造 AMHS 调度 .....	(111)
5.2.1	运筹学方法概述 .....	(111)
5.2.2	运筹学方法在 AMHS 调度中的应用 .....	(115)
5.3	基于智能算法的晶圆制造 AMHS 调度 .....	(119)
5.3.1	智能算法概述 .....	(119)
5.3.2	智能算法在 AMHS 调度中的应用 .....	(126)
5.4	本章小结 .....	(132)
	本章参考文献 .....	(132)
<b>第 6 章</b>	<b>Interbay 物料运输系统调度 .....</b>	<b>(134)</b>
6.1	Interbay 物料运输调度问题描述 .....	(134)
6.2	基于 AMPHI 的 Interbay 物料运输调度方法 .....	(136)
6.2.1	基于 AMPHI 的 Interbay 物料运输调度模型 .....	(136)
6.2.2	基于 AMPHI 的 Interbay 物料运输系统调度框架 .....	(138)
6.2.3	Interbay 物料运输任务指派 .....	(139)
6.2.4	基于模糊逻辑的参数权重调节 .....	(144)



6.2.5	实例验证	(152)
6.3	基于复合启发式规则的 Interbay 物料运输调度方法	(161)
6.3.1	Interbay 物料运输全局优化调度模型	(162)
6.3.2	基于复合启发式规则的 Interbay 物料运输调度框架	(164)
6.3.3	基于遗传规划的复合规则生成算法	(165)
6.3.4	实例验证	(173)
6.4	本章小结	(177)
	本章参考文献	(178)
<b>第 7 章</b>	<b>Intrabay 物料运输系统调度</b>	<b>(179)</b>
7.1	Intrabay 物料运输调度问题描述	(179)
7.2	基于 GDP 的 Intrabay 物料运输调度方法	(180)
7.2.1	基于 GDP 的 Intrabay 物料运输调度模型	(180)
7.2.2	基于 GDP 的 Intrabay 物料运输调度框架	(183)
7.2.3	基于模糊逻辑的晶圆卡运输动态优先级决策	(183)
7.2.4	基于匈牙利算法的 Intrabay 物料运输任务指派方法	(187)
7.2.5	基于贪婪优化的运输小车调度策略	(188)
7.2.6	实例验证	(189)
7.3	基于推拉结合策略的 Intrabay 物料运输调度方法	(193)
7.3.1	基于推拉结合策略的 Intrabay 物料运输调度框架	(196)
7.3.2	推拉结合的 VSL 和 LSV 调度规则	(196)
7.3.3	实例验证	(198)
7.4	本章小结	(203)
	本章参考文献	(203)
<b>第 8 章</b>	<b>晶圆制造 AMHS 集成调度</b>	<b>(204)</b>
8.1	AMHS 集成调度问题描述	(204)
8.2	基于 PMOGA 的 AMHS 集成调度方法	(206)
8.2.1	基于 PMOGA 的 AMHS 集成调度模型	(206)
8.2.2	基于 PMOGA 的 AMHS 集成调度框架	(208)
8.2.3	面向 AMHS 集成调度的并行多目标遗传算法	(208)
8.2.4	实例验证	(219)
8.3	基于 GARL 的 AMHS 复合启发式集成调度方法	(223)
8.3.1	AMHS 集成调度基本规则	(223)

8.3.2	小车路径库构建·····	(224)
8.3.3	基于遗传算法的路径智能选择算法·····	(224)
8.3.4	实例验证·····	(224)
8.4	本章小结·····	(228)
	本章参考文献·····	(228)
<b>第9章</b>	<b>晶圆制造 AMHS 调度性能评价</b> ·····	<b>(230)</b>
9.1	AMHS 调度性能评价的建模需求·····	(230)
9.2	基于面向多代理的知识有色赋时 Petri 网模型的 AMHS 建模方法 ·····	(232)
9.2.1	面向多代理的知识有色赋时 Petri 网的定义·····	(232)
9.2.2	基于 AOCKTPN 的 AMHS 建模过程·····	(235)
9.2.3	AOKCTPN 模型的可行性分析·····	(247)
9.3	基于 AOKCTPN 模型的 AMHS 调度性能评价·····	(251)
9.3.1	变迁时间分析·····	(251)
9.3.2	调度性能评价指标·····	(252)
9.3.3	调度性能评价方法·····	(253)
9.4	晶圆制造 AMHS 调度性能评价实例·····	(254)
9.4.1	AOKCTPN 模型可行性的实例验证·····	(254)
9.4.2	基于 AOKCTPN 模型的 AMHS 调度性能评价·····	(254)
9.5	本章小结·····	(261)
	本章参考文献·····	(262)
后记	·····	(263)

# 第 1 章 晶圆制造系统

## 1.1 半导体制造产业

进入 21 世纪以来,现代高科技得到了高速发展,尤其是电子技术的广泛应用,标志着人类社会已经跨入信息时代。在这个以信息网络为核心的“新经济”时代,信息产业成为了世界经济中规模最大、发展最为迅猛的产业之一。信息化和互联网技术正在对人类经济和社会生活产生革命性的影响,而半导体产业则是其基础和核心。利用半导体材料制成的集成电路、微波器件、光电子器件等,是电子工业和信息产业的核心产品,已经被广泛应用于人们日常生活中,遍布世界的各个角落,渗透到数字娱乐、移动通信、电子商务、汽车、医疗、航空航天等多个领域。事实上,当今人类社会生存和发展的每一步都离不开半导体芯片技术的发展与支持。目前我国正全面进入“互联网+”时代,半导体制造产业作为国民经济和社会发展的战略性、基础性产业,在推动经济发展、社会进步和保障国家安全等方面发挥着重要的核心作用。拥有强大的半导体产业和技术,是迈向创新型国家的重要标志。可以说,谁拥有了半导体产业,谁就拥有了世界的未来<sup>[1]</sup>。

### 1.1.1 半导体制造产业的发展与现状

半导体制造业是在 20 世纪上半叶涌现的真空管电子学、无线电通信及固体物理技术的基础上发展而来的。第二次世界大战后,贝尔电话实验室的科学家们开始致力于研究固态硅和锗的半导体器件。1947 年他们发明了第一个固体晶体管,这一发明促成了以固体材料和技术为基础的现代半导体产业。仙童半导体公司的罗伯特·诺伊思和德州仪器公司的杰克·基尔比在 1959 年分别独立发明了集成电路(IC),罗伯特·诺伊思把集成电路的概念扩展到在平面硅材料上相互连接不同的元器件。这一概念激励着工程师们去设计更为复杂的电子电路,来满足客户新的需求<sup>[2]</sup>。

随着科技的进步和集成技术的发展,集成电路的载体从普通平面硅材料时代进入晶圆时代,开始半导体芯片的制造,即通过光刻、蚀刻、镀膜、平坦化、离子注入等众多的制造工艺在晶圆上制造出大量的互补金属氧化物半导体(CMOS)元件,并把它们用金属线连接起来,变成具有逻辑功能或存储功能的芯片。

随着设备、材料、工艺的发展,半导体芯片的制造线宽先后跨越了 0.18  $\mu\text{m}$ 、0.13  $\mu\text{m}$ 、90 nm、65 nm、45 nm 等阶段,现在主流的制造线宽已经达到 32 nm,甚至 28 nm,晶圆的直径也从 200 mm 发展到 300 mm,并逐渐向 450 mm 发展。早在 2008 年



5月6日, Intel公司就宣布与三星、台积电公司(TSMC)达成合作协议, 决定共同合作发展450 mm晶圆, 初始目标定于2012年组建450 mm试验性生产线, 2013—2014年形成运行能力, 2015—2016年形成正式生产线。由于450 mm晶圆苛刻的工艺要求, 原计划被推迟两年, Intel公司于2013年8月宣布其位于俄勒冈的D1X工厂开始向450 mm晶圆工艺升级, 预计将在2018—2023年间投入应用。450 mm晶圆的硅片面积为300 mm晶圆的2.25倍, 单一晶圆切割芯片数达到300 mm晶圆的2倍, 因此每个芯片的单位制造成本会大大降低。另外, 大尺寸晶圆还会提高能源、水等资源的利用效率, 有助于应对环境污染、温室效应、水资源短缺等环境问题。Intel公司此番升级必然会让半导体芯片制造的经济性得到进一步提升。

随着半导体芯片制造工艺越来越复杂、要求越来越高, 半导体制造设备的成本与半导体制造厂的建造成本也越来越高, 越来越多的欧美公司退出半导体制造领域而专注于设计。半导体制造产业企业也逐渐分工为半导体设备供应商、半导体设计公司(fabless模式, 即无工厂模式)、半导体制造公司(foundry模式, 即代工厂模式)。当然还有一些公司, 如Intel公司, 为了保护半导体芯片的关键技术, 建有自己的制造工厂以生产先进的芯片, 像这一类的大厂, 其制造工艺比专业的纯半导体制造厂(代工厂)的制造工艺领先至少一代。

晶圆制造是半导体集成电路产业的核心和基础, 其规模在一个相当长的时间内都处于增长趋势。全球半导体联盟(GSA)与市场研究公司IC Insights联手进行的调查报告显示, 全球晶圆代工厂销售额在2014年达到479亿美元, 增长了13%, 这一增长数字延续了2013年约13%以及2012年约18%的销售增长势头。此外, 该调查报告预计全球晶圆代工厂的集成电路销售将在2015年时达到537亿美元, 增长率为12%。晶圆代工厂制造的集成电路在整个芯片市场所占的比重, 从2004年的21%增加到2009年的24%, 2014年快速跃升至37%。这表明半导体产业正处于从垂直整合的组件制造过渡至以轻晶圆工厂(fab-lite, 指仅在内部进行少量制造, 而将更多的制造任务转交代工厂)或无晶圆工厂模式的发展过程中, 目前正处于产业生命周期S曲线的陡峭部分。GSA与IC Insights预计, 在2018年以前, 代工厂所制造的集成电路销售额可望占到整个产业芯片销售额的46%。图1-1所示为2015—2018年全球晶圆代工厂销售额与增长率的预测。受到需求的刺激, 晶圆代工企业也在逐步扩大规模, 积极走向超级工厂(MegaFab)的模式。所谓超级工厂, 根据业界共识, 是指月产能10万~15万片, 投资金额70亿~80亿美元的12 in(1 in=25.4 mm)晶圆工厂。

半导体集成电路应用领域覆盖了几乎所有的电子设备, 并且由于其具有推动作用强、倍增效应大的特点, 对诸如计算机、家用电器、数码电子、自动化、通信、航天等产业的发展意义重大。据中国半导体行业协会统计, 2010—2014年, 中国半导体集成电路产业销售额基本保持两位数的高增长速度, 占GDP的比重总体上呈上升态势, 如图1-2所示。2015年我国集成电路产业销售收入预计将超过3500亿元, 重回

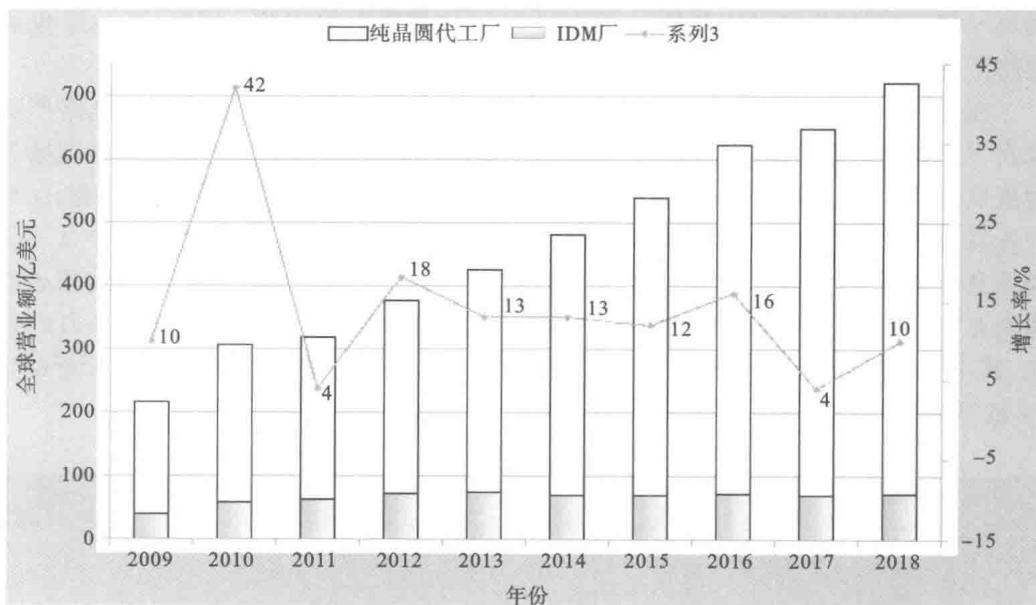


图 1-1 2015—2018 年全球晶圆代工厂销售额与增长率预测

数据来源:2015 Foundry Almanac (IC Insights)

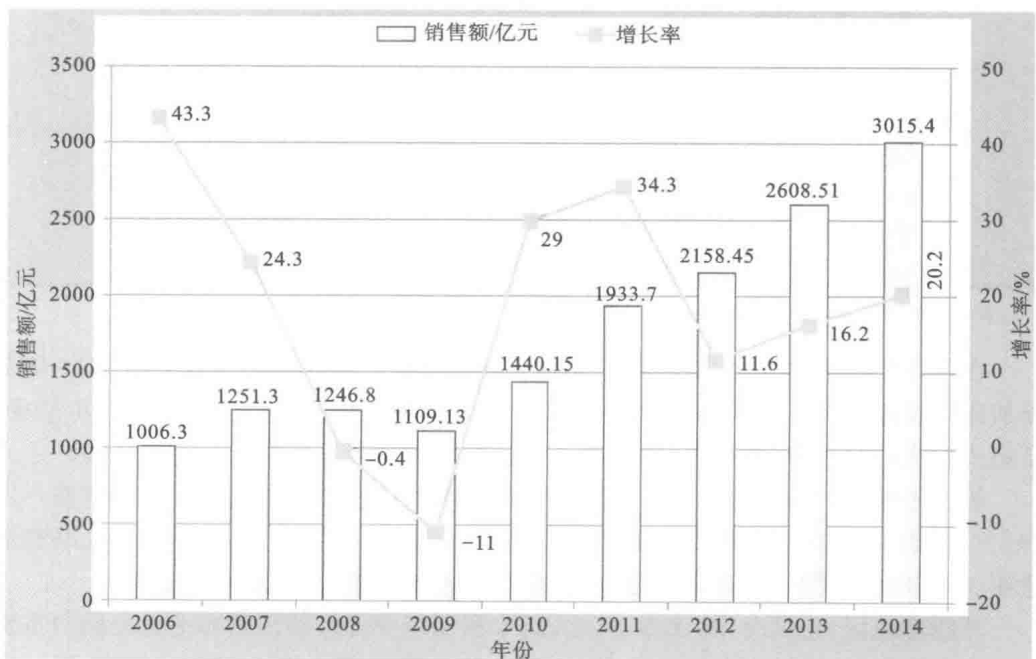


图 1-2 2006—2014 年中国集成电路产业销售额



平稳、较快的增长轨道。而目前发达国家信息产业产值已占国民经济总产值的40%~60%，国民经济总产值增长部分的65%与集成电路有关。因此，抓住了集成电路产业发展，就能抓住国民经济发展的主动权。

在全球半导体集成电路产业前景向好的大环境下，中国的半导体集成电路产业也在飞速发展。在2011—2015年“十二五”规划期间，半导体集成电路产业继续被列为重点扶植产业之一，而未来五年是我国集成电路产业发展的重要战略机遇期，也是产业发展的攻坚时期。面对即将启动的“十三五”规划，为全面推进2014年6月工业和信息化部发布的《国家集成电路产业发展推进纲要》，完成纲要的预定目标，集成电路企业“十三五”发展规划的编制正在展开。中国已培育出一批有较强竞争力的企业，其中中芯国际(SMIC)和华虹宏力(Huahong Grace)已进入全球晶圆代工企业前10名(见表1-1)。

表 1-1 2013 年全球晶圆代工企业排名

排名	公司	国家或(地区)	销售额/亿美元	同比增长/(%)
1	台积电	中国台湾	198.5	17
2	GlobalFoundries	美国	42.61	6
3	联华电子	中国台湾	39.59	6
4	Samsung	韩国	39.50	15
5	中芯国际	中国	19.73	28
6	Powerchip	中国台湾	11.75	88
7	Vanguard	中国台湾	7.13	23
8	华虹宏力	中国	7.10	5
9	Dongbu	韩国	5.70	6
10	TowerJazz	以色列	5.09	-20

数据来源:IC Insight(2014年2月)。

在地区分布上，中国集成电路产业呈现群聚效应。前瞻产业研究院在2014年发布的集成电路封装行业报告中指出，目前中国集成电路产业集群化分布进一步显现，已初步形成以长三角、环渤海、珠三角三大核心区域聚集发展的产业空间格局。

长三角地区:包括上海、江苏和浙江的长三角地区是国内最主要的集成电路开发和生产基地，在国内集成电路产业中占有重要地位。目前国内55%的集成电路制造企业、80%的封装测试企业以及近50%的集成电路设计企业都集中在该地区<sup>[3]</sup>。

环渤海地区:包括北京、天津、河北、辽宁和山东等省市的环渤海地区是国内重要的集成电路研发、设计和制造基地，该地区已基本形成了从设计、制造、封装、测试到设备、材料的产业链，具备了相互支撑、协作发展的条件。以北京市为例，共有规模以上集成电路制造企业20家，资产规模达99.39亿元，实现销售收入114.65亿元。

珠三角地区:珠三角地区是国内重要的电子整机生产基地和主要的集成电路器件市场,集成电路市场需求一直占全国集成电路市场需求的40%以上。依托发达的电子整机制造业,近年来该地区的集成电路设计业发展较快,在国内集成电路产业中所占比重也逐年上升。

这其中,以上海为龙头的长三角地区拥有全国一半左右的晶圆制造企业,并已经形成了以华力、Intel、中芯国际、台积电等国际半导体生产企业为首的芯片制造加工密集区。上海已初步形成了所谓“一带二区”的芯片加工区,即以张江高科技园区为核心、连接金桥出口工业区和外高桥保税区的面积达22 km<sup>2</sup>的浦东微电子产业带,并连带辐射漕河泾新兴技术区与松江出口加工区。同时,作为上海制造业战略升级的重点,浦东、松江、青浦和漕河泾地区将逐步形成上海八大产业群之一的微电子及信息产业群,并将建设成具有国际先进水平的半导体芯片制造基地,成为上海市重点建设的六个世界级制造基地之一。根据2003年发布的《上海制造业战略升级行动纲要》,到2020年上海将力争拥有30条集成电路生产线,成为世界上最大、技术领先的微电子制造基地。截至2014年,上海集成电路产业已经在高端芯片设计、先进工艺技术开发等方面取得重大突破;在高端设备和关键材料方面取得了一大批达到世界先进水平的研发成果<sup>[3]</sup>。在12 in 晶圆制造这一半导体产业的龙头领域上,目前国内共建成五家晶圆工厂,其中两家落户上海。从整体上来看,上海集成电路产业已经形成了涵盖设计、制造、封装测试、装备材料及配套服务等环节的较为完整的产业链体系,为上海集成电路产业实现“2020战略升级”夯实了基础。

但从另一方面来看,我国半导体产业产值虽然大幅攀升,其整体竞争力并不强。2013年产能仅占全球产能的13.3%(见图1-3),而在制程技术上,国内技术最领先的中芯国际与领导厂商台积电、联华电子(UMC)相比,仍然有两年左右的技术落差<sup>[3]</sup>。所以在2011—2015年的“十二五”规划期间,我国半导体产业政策发展方向从追求产能与产值的成长,转变为先进技术与先进产能研发能力的提升,逐步培育出了一批具

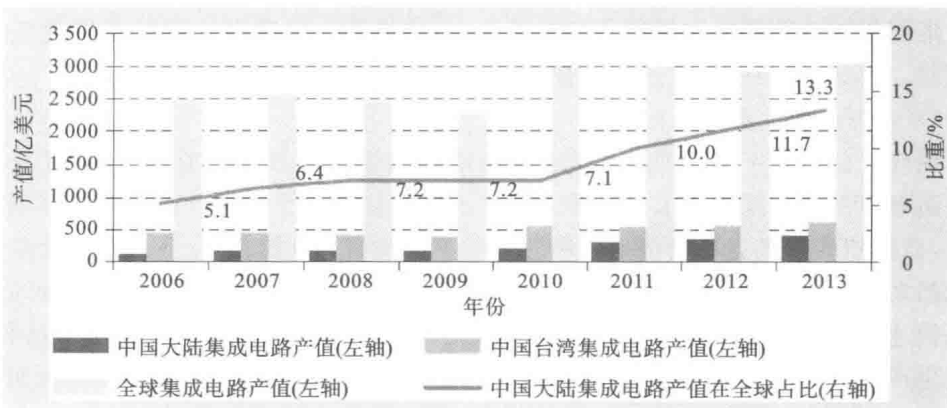


图 1-3 2006—2013 我国集成电路产值占全球比重

数据来源:WSTS,CSIA,中银国际研究





技术创新能力且有相当全球市场占有率的半导体企业,极大地提升了我国的半导体生产技术。《国家集成电路产业发展推进纲要》的发布,为集成电路产业的发展制定了宏伟目标,我国的集成电路产业将出现前所未有的跨越式发展态势。

### 1.1.2 未来半导体制造产业面临的挑战

在过去的半个世纪中,半导体产业发生了巨大的变化,并在可预见的未来二十年内将继续面对挑战和变革,具体表现在以下三个方面<sup>[11]</sup>:

#### 1) 技术变革速度加快

半导体芯片工业于 1960 年开始快速发展,在不到六十年的时间里集成电路的最小特征尺寸已大幅度缩小:从 1960 年的  $50\ \mu\text{m}$  演进到 21 世纪初的  $0.18\ \mu\text{m}$ ,到现在最小特征尺寸为  $40\ \text{nm}$  的集成电路已经非常成熟了,最小特征尺寸为  $28\ \text{nm}$  的集成电路也已正式进入量产,而且目前看来还会继续朝着  $22\ \text{nm}$ 、 $16\ \text{nm}$  乃至更微细的尺度演进。目前,全球工艺最先进的企业 Intel 公司的  $22\ \text{nm}$  技术已实现量产(领先行业 1~2 年), $14\ \text{nm}$  的工艺也已成熟。技术的快速变革使得新产品以更快的速度不断涌现,产品寿命周期不断缩短。因此,以摩尔速度缩短产品制造周期、降低生产成本,在日益缩短的产品生命周期内获得最大的利润是半导体制造企业所面临的首要挑战。

#### 2) 半导体芯片制造产业规模亟待扩大

由于开发和实施下一代制程的成本都在迅速上升,要想成为业内的领导厂商就必须在半导体工艺研发方面走在前列,而只有规模够大的公司才能够承担这些费用。基于此,晶圆代工产业的并购成为 2008 年以来的行业焦点。Tower Semiconductor Ltd. 在 2008 年收购了 Jazz Semiconductor Inc., Global Foundries 在 2009 年收购了新加坡特许半导体,一跃成为第二大晶圆代工企业,日本主要的芯片制造商 NEC 和 Renesas 也在 2010 年宣布合并。这一并购浪潮同样影响了中国,2010 年华虹 NEC 与宏力半导体合并,2012 年同方国芯以定向增发的方式并购深圳国微电子,2013 年紫光集团相继并购展讯和锐迪科微电子公司,这将极大地改变中国的晶圆代工产业的现状。因此,半导体制造产业规模提升是未来一个重要的发展趋势。

#### 3) 市场需求多元化

现代社会对数字电子产品的依赖和需求程度无论在数量和质量,还是在花样品种方面都将保持持续快速上升态势。技术上的革新使得半导体产品的生命周期越来越短,而激烈的市场竞争使得半导体芯片的单位利润越来越低,企业只有迎合市场多元化的动态需求,在最短的时间内生产出大量的满足不同顾客要求的高质量的新产品并快速抢占市场才能赚取最大利润。因此,有效集成企业内外资源,以少品种、大批量生产的成本满足制造多品种、大批量产品的需求,也是半导体制造企业所面临的重大挑战。

发展半导体产业对我国来说具有重要的战略意义,然而我国半导体产业起步较晚,不但技术水平落后,在管理上也存在很大的不足。在寻求技术革新的同时,有效