

**Scheduling and Optimization  
Algorithm** for Cluster Tools of  
Wafer Fabrication

# 集束型晶圆制造装备调度 及其优化算法

李林瑛 卢睿 著



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

# 集束型晶圆制造装备调度 及其优化算法

李林瑛 卢 睿 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书以集束型晶圆制造装备为研究对象,在全面分析其调度特点及调度方法的基础上,分析集束型装备各类调度问题,运用优化调度方法设计了相应的求解方案。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集束型晶圆制造装备调度问题提供理论基础,为推动集束型晶圆制造装备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。

本书可供从事集束型晶圆制造装备计划、调度和优化等相关领域研究工作的科研人员,自动化控制、工业工程等专业研究生和教师,制造管理及微电子制造行业生产管理或工程技术人员等阅读和参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

集束型晶圆制造装备调度及其优化算法 / 李林瑛, 卢睿著. —北京: 电子工业出版社, 2017.4  
ISBN 978-7-121-31227-4

I. ①集… II. ①李… ②卢… III. ①半导体工艺设备—调度②半导体工艺设备—最优化算法 IV. ①TN305

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 065992 号

责任编辑: 靳 平

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 21.25 字数: 544 千字

版 次: 2017 年 4 月第 1 版

印 次: 2017 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 69.00 元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: (010) 88254694。

## 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

# 前 言

---



半导体芯片制造业是一个尖端技术及高附加值产业，对国民经济的发展具有巨大的战略价值，世界各国政府都将其视为国家的骨干产业。在世界制造业中心向亚太地区转移的大背景下，在国家产业政策的推动下，中国的半导体芯片产业获得了飞速的发展。要保持我国半导体芯片制造业良好的发展势头，提升我国半导体芯片制造业国际竞争能力，不仅要扩大规模，而且要注重提高制造系统绩效。把我国的半导体芯片做大、做强，不仅需要先进的半导体芯片设计技术、制造工艺技术及装备技术，而且需要先进的生产管理技术。

半导体制造的源头是芯片制造，芯片制造的关键是其制造装备。集束型晶圆制造装备（Cluster Tools）是由物料搬运机械手和若干单晶圆加工设备构成的自动化组合制造系统，代表着当今半导体制造装备的先进水平，越来越多地应用到芯片的制造中。集束型装备调度问题与生产调度问题一样具有复杂性，如建模困难（数学模型或仿真模型难以建立）、高度重入加工（半导体制造过程中晶圆多次进入相同的设备加工）、存在多约束耦合（加工能力、滞留时间、机械手能力等约束耦合）、不确定（加工时间波动、设备自动清洗、临时晶圆插入、设备故障、返工等）、多种类型机械手（单臂机械手、双臂机械手、多机械手）、多种类型晶圆混合加工（晶圆代工厂要同时生产几十种产品，生产调度要同时考虑晶圆排序和机械手搬运作业排序）、存在不同的晶圆流模式（表现为串行、并行和重入晶圆模式）、大规模（晶圆和机械手搬运作业数量庞大，解空间可能随问题规模的增大而呈指数增长等）。研究表明，绝大多数集束型装备调度问题属于 NP-hard 性质的问题，其研究具有重要的学术意义和工程价值。

本书力图总结作者和国内外同行在集束型晶圆制造装备调度问题方面所取得的一系列研究成果，主要讨论集束型晶圆制造装备重入和混流调度、集束型晶圆制造装备的多机械手调度、集束型晶圆制造装备的滞留时间约束调度、集束型晶圆制造装备的应急调度、集束型晶圆制造装备混合晶圆调度等问题的数学模型、问题特性及优化调度算法，以及基于 SEMI 标准的集束型装备控制平台的设计与验证等。全书共 8 章，主要内容如下：

第1章为绪论,简要介绍半导体制造产业的战略意义、半导体制造工艺、集束型装备的高度复杂性、制造系统调度、集束型装备调度资源和约束条件、集束型装备调度的分类。

第2章介绍集束型晶圆制造装备的建模方法,包括基于马尔科夫模型、数学规划模型、时序图模型、Petri网模型及仿真模型等。

第3章介绍集束型晶圆制造装备的调度方法,包括基于运筹学方法、多项式算法、启发式方法和智能优化方法等。

第4章介绍集束型晶圆制造装备的重入和混流调度的混合整数规划模型,该模型包括加工模块能力约束、机械手能力约束、重入模块约束等。

第5章论述集束型晶圆制造装备的多机械手调度,重点介绍基于分解方法和线性规划模型的搜索算法、基于LCM和Swap的 $k$ 序列策略和构造算法等。

第6章围绕集束型晶圆制造装备的滞留时间约束调度展开,重点介绍单臂和双臂机械手的可调性条件、基于线性规划模型和冲突控制策略的启发式搜索方法、基于分解思想的多集束型装备启发式调度方法。

第7章介绍集束型晶圆制造装备的应急调度,依次对基于微粒群的两层在线调度方法和基于量子进化算法的在线调度方法展开介绍。

第8章介绍CTC控制软件架构及SEMI标准,论述了CTC实时调度系统框架模型,该模型分为监督控制层、模块管理层、模块控制器层;接着介绍了通信协议的分析与设计过程,包括SEMI标准SECS-I、HSMS、SECS-II和GEM四个通信协议;最后,介绍了利用“虚拟控制”思想对模型进行仿真、调度和验证的过程。

本书所涉及的研究成果是在辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2011132)、辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2014456)、大连外国语大学科研基金项目(2014XJYB05)等的资助下取得的。另外,还要特别感谢电子工业出版社对本书的大力支持,感谢吴长萃等在书稿编辑出版过程中所给予的宝贵建议和付出的辛勤劳动。

本书可作为计算机科学与技术、管理科学与工程、机械工程等相关学科的教师、学生和研究人员参考书。集束型晶圆制造装备研究是一类NP特征的调度问题中具有高度复杂性和挑战性的课题,随着国际上对这类问题研究的不断深入,以及我国半导体制造装备的兴起与迅速发展,有关的研究还在不断发展和完善之中,本书作为作者近年来学习和研究的一个阶段性总结,其中难免会有不当甚至错误之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2016年11月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 半导体装备制造产业的战略意义 .....	1
1.2 半导体制造工艺简介 .....	4
1.3 集束型晶圆制造装备的高度复杂性 .....	8
1.4 制造系统调度简介 .....	13
1.4.1 车间调度 .....	14
1.4.2 机器人制造单元调度 .....	16
1.4.3 抓钩调度 .....	19
1.5 集束型装备调度 .....	21
1.5.1 基本概念 .....	21
1.5.2 调度资源 .....	23
1.5.3 约束条件 .....	24
1.6 集束型晶圆制造装备调度分类 .....	25
1.6.1 基于调度类型的分类方法 .....	25
1.6.2 基于三邻域 ( $\alpha   \beta   \gamma$ ) 的分类方法 .....	27
1.6.3 基于调度环境和任务的分类方法 .....	28
参考文献 .....	29
第 2 章 集束型晶圆制造装备的建模方法 .....	36
2.1 基于马尔科夫模型的集束型装备建模 .....	36
2.1.1 马尔科夫模型基础理论 .....	37
2.1.2 集束型装备马尔科夫建模过程 .....	38
2.2 基于数学规划模型的集束型装备建模 .....	39
2.2.1 数学规划模型基本理论 .....	40
2.2.2 集束型装备数学规划建模过程 .....	41
2.3 基于时序图模型的集束型装备建模 .....	43

2.3.1	时序图模型基础理论	43
2.3.2	集束型装备时序图建模过程	44
2.4	基于 Petri 网模型的集束型装备建模	48
2.4.1	Petri 网模型基础理论	48
2.4.2	集束型装备 Petri 网建模过程	54
2.5	基于仿真模型的集束型装备建模	58
2.5.1	仿真模型的基本理论	59
2.5.2	集束型装备仿真建模过程	61
2.6	小结	66
	参考文献	66
<b>第 3 章</b>	<b>集束型晶圆制造装备的调度方法</b>	<b>71</b>
3.1	基于运筹学方法的集束型装备调度	71
3.1.1	运筹学方法概述	72
3.1.2	混合整数规划在集束型装备调度中的应用	79
3.1.3	分支定界算法在集束型装备调度中的应用	88
3.2	基于多项式算法的集束型装备调度	94
3.2.1	多项式算法概述	94
3.2.2	多项式算法在集束型装备调度中的应用	97
3.3	基于启发式方法的集束型装备调度	99
3.3.1	启发式方法概述	100
3.3.2	启发式方法在集束型装备调度中的应用	105
3.4	基于智能优化方法的集束型装备调度	107
3.4.1	智能优化方法概述	108
3.4.2	智能优化方法在集束型装备调度中的应用	118
3.5	小结	120
	参考文献	121
<b>第 4 章</b>	<b>集束型晶圆制造装备的重入和混流调度</b>	<b>129</b>
4.1	引言	129
4.2	重入调度的混合整数规划模型	130
4.2.1	问题描述	130
4.2.2	约束条件分析	132
4.2.3	仿真	136
4.3	混流调度的混合整数规划模型	138
4.3.1	调度问题	139
4.3.2	混合整数规划模型	141



4.3.3 生产周期下界分析	144
4.3.4 仿真	148
4.4 小结	151
参考文献	151
<b>第 5 章 集束型晶圆制造装备的多机械手调度</b>	<b>154</b>
5.1 引言	154
5.2 基于分解方法的两集束型装备调度	155
5.2.1 符号定义和问题描述	155
5.2.2 问题的分解分析和模型的建立	157
5.2.3 机械手在缓冲模块无碰撞的判断条件	159
5.2.4 基于分解方法和线性规划模型的搜索算法	161
5.2.5 仿真	162
5.3 有滞留时间约束的两集束型装备调度模型	164
5.3.1 符号定义和问题描述	164
5.3.2 集束型装备的混合整数规划模型	166
5.3.3 并行加工模块	168
5.3.4 仿真	169
5.4 求解 $k$ 晶圆周期序列的多集束型装备调度	173
5.4.1 符号定义和问题描述	174
5.4.2 $k$ 序列的平均周期下界	175
5.4.3 $k$ 序列的构造策略	177
5.4.4 仿真	182
5.5 小结	191
参考文献	192
<b>第 6 章 集束型晶圆制造装备的滞留时间约束调度</b>	<b>194</b>
6.1 引言	194
6.2 单臂机械手集束型装备可调度性与调度	195
6.2.1 问题描述	195
6.2.2 并行加工模块加工时间的等效性证明	197
6.2.3 可调度性分析	199
6.2.4 仿真	201
6.3 双臂机械手集束型装备可调度性与调度	203
6.3.1 符号定义和问题描述	203
6.3.2 有晶圆滞留时间约束的线性规划模型	204
6.3.3 集束型装备的可调度性分析	205

6.3.4	仿真	207
6.4	单臂机械手的集束型装备启发式搜索方法	211
6.4.1	问题描述	212
6.4.2	调度模型	213
6.4.3	基于线性规划模型和冲突控制策略的启发式搜索方法	214
6.4.4	仿真	216
6.5	基于分解思想的多集束型装备启发式调度方法	217
6.5.1	问题描述和定义	217
6.5.2	周期性调度过程分析	218
6.5.3	启发式调度方法	219
6.5.4	仿真	220
6.6	基于遗传算法的集束型装备调度方法	222
6.6.1	问题描述和调度问题	222
6.6.2	改进遗传算法	224
6.6.3	仿真	228
6.7	小结	230
	参考文献	231
<b>第 7 章</b>	<b>集束型晶圆制造装备的应急调度</b>	<b>234</b>
7.1	引言	234
7.2	基于 PSO 的启发式调度方法	236
7.2.1	调度问题描述和数学模型	236
7.2.2	基于前向和后向递归方法的内层算法	237
7.2.3	微粒群算法优化算法分析	242
7.2.4	基于微粒群算法的两层在线调度方法	245
7.2.5	仿真	247
7.3	基于量子进化算法的在线调度方法	250
7.3.1	在线调度问题	250
7.3.2	在线调度方法	251
7.3.3	外层量子进化算法	253
7.3.4	仿真	256
7.4	小结	258
	参考文献	259
<b>第 8 章</b>	<b>基于 SEMI 标准的集束型晶圆制造装备控制平台</b>	<b>261</b>
8.1	引言	261
8.2	CTC 控制软件概述	262

8.2.1 国内外半导体制造自动化公司	262
8.2.2 SEMI 协会和 SEMI 标准	264
8.3 实时调度系统框架模型	266
8.3.1 基于 SEMI 标准的 CTC 控制软件	266
8.3.2 实时调度系统框架模型	267
8.4 实时调度系统的监督控制层	268
8.4.1 扩展有限状态机	269
8.4.2 基于 EFSM 的调度控制逻辑模型	269
8.5 基于 CTMC 标准的实时调度系统模块管理层	272
8.5.1 作业分解过程	272
8.5.2 基于 CTMC 的作业执行	273
8.6 数据通信协议的分析与设计	276
8.6.1 通信协议简介	276
8.6.2 通信协议设计	308
8.6.3 通信协议开发	311
8.6.4 通信协议实现	316
8.7 模块控制器层	320
8.7.1 加工模块控制器软件架构	320
8.7.2 模块控制器层模型	321
8.8 实时调度系统的测试与验证	321
8.8.1 测试和验证过程概述	322
8.8.2 测试和验证系统需求分析	322
8.8.3 测试和验证系统实现	323
8.9 小结	326
参考文献	326

半导体制造业已成为国民经济的支柱产业，具有重要的战略意义。本章介绍半导体制造业中集束型装备（Cluster Tools）涉及的相关加工工艺，以及集束型装备的复杂性和性能指标，并且对车间调度、机器人制造单元调度和抓钩调度进行简要介绍，阐述集束型装备调度的基本概念、资源和约束条件，最后介绍集束型装备调度问题的分类方法。

### 1.1 半导体装备制造产业的战略意义

半导体产业主要由四部分组成：半导体设计业、半导体制造业、半导体封装业和半导体测试业。半导体产业是当今信息技术产业高速发展的基础和原动力，已经高度渗透和融合到国民经济和社会发展的每个领域，其技术水平和发展规模已成为衡量一个国家产业竞争力和综合国力的重要标志之一。国际金融危机后，发达国家加紧经济结构战略性调整，半导体产业的战略性、基础性、先导性地位进一步凸显，美国更将其视为未来 20 年从根本上改造制造业的四大技术领域之首。

加快发展半导体产业，是推动信息技术产业转型升级的根本要求，是提升国家信息安全水平的基本保障。我国信息技术产业规模多年位居世界第一，2013 年产业规模达到 12.4 万亿元，生产了 14.6 亿部手机、3.4 亿台计算机、1.3 亿台彩色电视机，但主要以整机制造为主，由于以集成电路和软件为核心的价值链核心环节缺失，行业平均利润率仅为 4.5%，低于工业平均水平 1.6 个百分点。因此，向以集成电路和软件为核心的价值链核心环节发展，既是产业转型升级的内部动力，也是市场激烈竞争的外部压力。与此同时，我国半导体产业还十分弱小，远不能支撑国民经济和社会发展，以及国家信息安全、国防安

全建设需要。2013 年我国集成电路进口 2313 亿美元<sup>[1,2]</sup>。旺盛的国内市场需求也是发展我国半导体产业的强大动因。我国拥有全球最大、增长最快的集成电路市场，2013 年规模达 9166 亿元，占全球市场份额的 50% 左右。随着我国经济发展方式的转变、产业结构的加快调整，以及新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化同步发展，工业化和信息化深度融合，大力推进信息消费，市场对集成电路的需求将大幅增长，2015 年市场规模已达 1.2 万亿元。2015 年，我国建立了与半导体产业规模相适应的管理决策体系、融资平台和政策环境，全行业销售收入超过 3500 亿元。到 2020 年，与国际先进水平的差距逐步缩小，全行业销售收入年均增速超过 20%。到 2030 年，产业链主要环节达到国际先进水平，实现跨越发展。

SEMI 的全球半导体设备市场报告称，2014 年半导体制造设备的销售额（新产品）将达到比上年增加 19.3% 的 380 亿美元，2015 年的销售额将比上年增加 15.2%，接近 440 亿美元，继续保持稳定的增长态势。《国家中长期科学和技术发展规划纲要》确定的 16 个国家重大专项中，“极大规模集成电路制造装备及成套工艺”列第二位。如图 1-1 所示，晶圆（Wafer）是用于生产集成电路的硅晶载体，是最常用的半导体材料，其形状是圆形的。目前常见直径有 8in（200mm）和 12in（300mm），近年来国际上研发的主流规格是大直径 450mm 晶圆。晶圆尺寸越大，可以生产的 IC 芯片数量越多，因此可降低成本，但对生产技术要求更高。

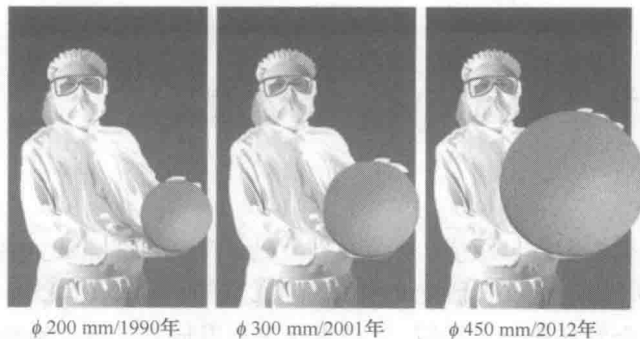


图 1-1 晶圆的尺寸

随着晶圆直径越来越大，加工工艺越来越复杂，传统半导体的批加工已经不能满足刻蚀、化学气相淀积和光刻等工艺的要求。因此，技术水平要求高且直径为 200mm 以上的晶圆越来越多地采用集束型装备进行加工，以满足更加严格和一致的质量需求<sup>[3]</sup>。采用集束型装备实现单晶圆加工、封闭的微加工环境（Closed Mini-Environment）和全自动化的物料搬运，体现了晶圆制造的最新技术，也是大直径晶圆制造的必然趋势。如图 1-2 所示是典型的集束型装备，其中处于装备中心位置的物料搬运设备分别为单臂机械手（Single-Arm）和双臂机械手（Double-Arm）， $PM_i$  表示实现单晶圆加工技术的加工模块（Processing Modules），AL 表示定位模块（Alignment Module），CL 表示冷却模块（Cooler Module），两个 Load Lock 分别表示输入和输出装载室。

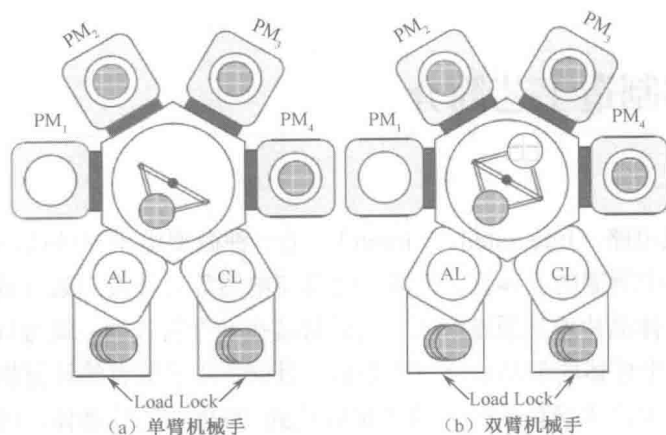


图 1-2 集束型装备示意图

近年来,国内半导体设备得到了快速发展,涌现出一批具有自主知识产权的企业,开发了许多 200mm 和 300mm 的半导体设备,如表 1-1 所示是国内主要半导体设备制造公司的典型产品,其中绝大多数属于集束型装备。从总体来看,国内设备的技术仍落后于国外,尤其是设备的控制系统基本上来自国外,这极大地影响了国内设备厂商的产品升级。半导体制造装备已成为 2014 年《国家半导体产业发展推进纲要》的发展目标和首要任务,其研发成果将提升我国 IC 装备制造与生产改造能力、降低 IC 装备控制系统实施的难度和成本、突破国外在极大规模集成电路制造技术和成套工艺等方面的技术垄断。

表 1-1 国内主要半导体设备制造公司的典型产品

公 司	产 品
北方微电子	刻蚀机、薄膜生长
七星华创	化学气相淀积、刻蚀、清洗、热处理等
上海微电子装备	光刻机
中微半导体	化学气相淀积、刻蚀
中科院电子装备	离子注入机、测试仪、太阳能设备(清洗、扩散、刻蚀、PECVD等)
中电集团第 45 研究所	光刻机、清洗干燥设备、检测设备、划片设备
中电集团第 2 研究所	自动装片机、多晶硅铸锭炉
盛美半导体	化学机械抛光、SFP、ECP
沈阳芯源	匀胶显影设备
沈阳科仪	PECVD 等薄膜设备
睿励科学仪器	检测设备
北京中联科利	清洗设备
中科院微电子所	PECVD、刻蚀、Sputter 等设备
青岛赛瑞达	扩散炉、清洗、LPCVD 等
青岛圣豪	扩散炉、烧结炉

## 1.2 半导体制造工艺简介

芯片，即集成电路（Integrated Circuit），是一种微型电子器件或部件，采用一定的工艺，把一个电路中所需的晶体管、电阻、电容和电感等元件及布线互连一起，制作在一小块或几小块半导体晶片或介质基片上，然后封装在一个管壳内，成为具有所需电路功能的微型结构。生产半导体的最基本原材料是硅。目前，几乎所有的计算机芯片都是使用硅材料制造的。用于生产半导体的硅提纯净化后达到 99.99% 的硅晶体，经过切割和抛光，最终获得能在其上进行电路层生产的硅片，由于其形状是圆形，也称为晶圆<sup>[4,5]</sup>。

半导体制造是当今最先进和最复杂的制造工业之一，制造过程分为 4 个阶段：晶圆加工、芯片检测、芯片封装及最终产品测试。如图 1-3 所示，其中的晶圆制造和芯片测试又称为前端工艺，封装与最后产品测试被称为后端工艺。前端工艺主要在晶圆上完成电路印刷工作，一般包含 15~30 层电路，每层需要 20~40 道加工步骤，平均要经过 400~600 步的加工步骤，使用上百台设备在晶圆上加工各个芯片。在对加工完成的芯片进行检测后，进入后端工艺，即对芯片进行相应的封装，成为集成电路。最后，对最终产品进行测试，并检验合格率<sup>[6]</sup>。

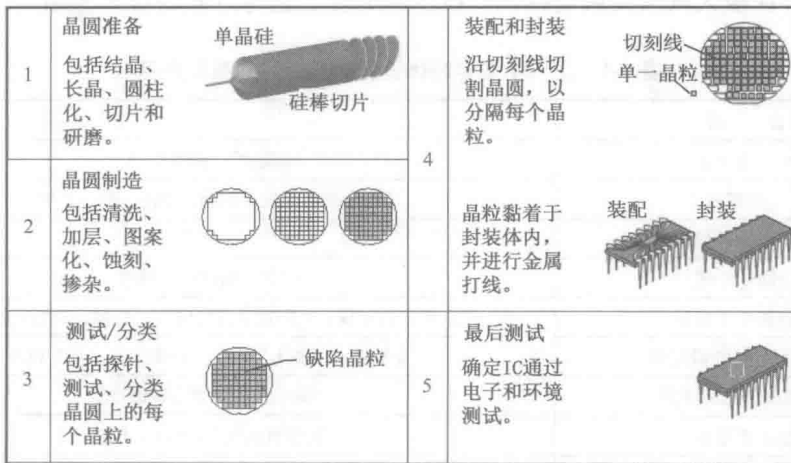


图 1-3 半导体制造各阶段

如图 1-4 所示的前端工艺的主要加工步骤包括氧化、光刻、刻蚀、离子注入和金属化<sup>[7]</sup>。氧化是将  $\text{SiO}_2$  覆盖整个晶圆表面，目的是在许多器件结构里起绝缘层作用。光刻技术用来确定 PN 结的几何结构：首先在晶圆表面覆盖一层称为抗蚀剂的紫外光（UV）光敏材料，然后在  $80\sim 100^\circ\text{C}$  的高温下烘烤晶圆，以便除净抗蚀剂中的溶剂，从而硬化抗蚀剂，提高其黏附性，最后用 UV 光源透过有图形的掩膜对晶圆进行曝光。

刻蚀主要是用氢氟酸 (HF) 溶液除去未受保护的  $\text{SiO}_2$  层面。离子注入是通过加速杂质离子到高能级, 并把它们植入半导体, 这样要用的掺杂物就被引入半导体内, 而  $\text{SiO}_2$  用来阻挡掺杂物的扩散或离子注入。金属化是用化学气相淀积或者物理气相淀积方法在晶圆表面形成金属膜, 以实现欧姆接触和互连。前端工艺常常直接被称为半导体生产线, 是半导体制造过程中最复杂和最关键的部分, 在 300mm 晶圆生产线上, 有 60% 以上的设备是采用单晶圆制造技术的集束型装备, 故集束型装备的产能极大影响着半导体生产线的效率。

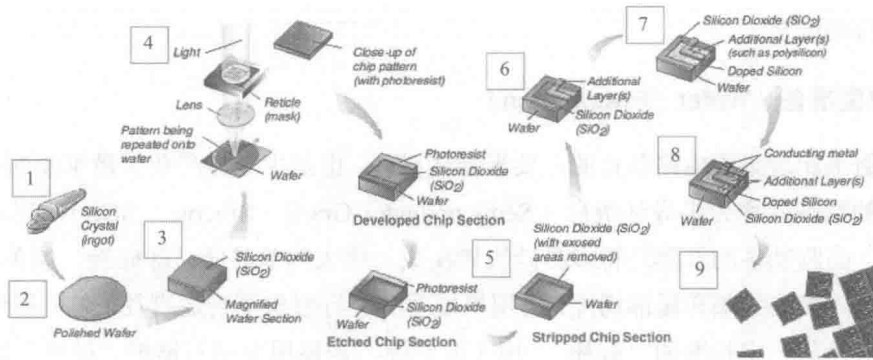


图 1-4 半导体制造过程<sup>[7]</sup>

根据所形成电路层的不同, 加工完成一层电路所采用的工序也有不同。以在硅衬底上的指定区域内形成 P 型 Si 为例, 其过程首先将硅片清洗干净, 在硅衬底上采用氧化工艺形成一层  $\text{SiO}_2$  薄膜, 然后采用光刻工艺将所形成 P 型硅的区域 ( $\text{SiO}_2$  薄膜) 暴露出来; 利用刻蚀工艺将暴露的  $\text{SiO}_2$  薄膜腐蚀掉, 露出硅衬底, 并将硅片清洗, 去除硅片表面的杂质; 接着采用注入工艺将三价元素硼注入暴露出的硅衬底中; 最后采用扩散工艺使注入的硼元素分布均匀, 形成所需的 P 型硅区域。

半导体制造业为了面对不断降低成本和提高生产力的要求, 一直在晶圆加工设备方面进行技术创新。大多数晶圆加工是化学过程, 近 20 多年来晶圆的尺寸越来越大, 电子线路更加密集, 传统的批量加工 (如 1 批次有 25 片晶圆) 设备很难在大面积的晶圆上控制气体或化学扩散的均匀一致, 不能保证晶圆加工质量。因此, 半导体制造业广泛采用单片晶圆加工技术。单片晶圆在加工模块的加工腔中加工, 加工完一片晶圆后再加工另外一片。由于工艺步骤很多, 而且大尺寸晶圆质量大, 在加工模块之间的搬运任务量很大, 人工运作很困难, 且效率低, 所以要把几个连续工艺步骤的加工模块组合安置在距离很近的集成真空环境中, 用机械手完成卸载、运输、装载晶圆的搬运作业。这个集成加工环境即集束型装备。

从本质上讲, 集束型装备是半导体生产线的缩小版。例如, Track 机是典型的多集束型装备, 能够完成整个光刻过程所需的 18 道工艺, 且晶圆在不同工艺之间的运输也是由



该设备内部的多个机械手完成。

从 20 世纪 90 年代开始,集束型装备的单晶圆加工方式逐渐代替传统的批量加工。由于集束型装备提供了高洁净度的环境(大大降低污染或引起硅片氧化)和高度自动化流程,从而可以提高产量、缩短生产节拍、精确控制生产过程,同时也充分利用净室空间、减少在制品,因而得到广泛采用,它可用于光刻、刻蚀、淀积、检测等大多数类型的晶圆加工工艺<sup>[8]</sup>。

晶圆制造过程中的主要工艺包括晶圆的准备、淀积、光刻、刻蚀、离子植入、电镀与切割封装与测试<sup>[9]</sup>。

### 1. 晶圆准备 (Wafer Preparation)

硅是用来制造集成电路芯片的主要半导体材料,也是半导体产业中最重要的材料。用来做芯片的高纯硅称为半导体级硅 (Semiconductor-Grade Silicon, SGS),有时也称为电子级硅。晶圆制备的基础是将多晶硅块转换成一块大的单晶硅,即硅锭。制备晶圆时,首先将单晶硅棒的头部和尾部切掉,再用机械对其进行修整至合适直径,之后得到的是一个有合适直径和一定长度的“硅棒”。由于硅很硬,需要用金刚石锯把“硅棒”切成一片片薄薄的圆片,圆片每一处的厚度必须是近似相等的。将单晶硅棒切成晶圆片后,要对晶圆片进行研磨,目的是减少晶圆片正面和背面的锯痕和表面损伤,同时打薄晶圆片。研磨后再对晶圆片进行刻蚀和清洗,即使用氢氧化钠、乙酸和硝酸的混合物情况,以减轻磨片过程中产生的损伤和裂纹。之后,利用倒角工艺将晶圆片的边缘磨圆,彻底消除将在电路制作过程中发生破损的可能性。倒角之后,对晶圆片的边缘进行抛光,以提高整体清洁度,从而进一步减少破损。以上步骤完成后就形成了一片片的晶圆。

### 2. 淀积 (Deposition)

制造晶圆的第一步是在晶圆上淀积一层不导电的二氧化硅薄膜。在晶圆的后续制作过程中,二氧化硅层的成长、淀积会进行很多次。二氧化硅薄膜成型的技术主要可分为物理气相淀积 (Physical Vapor Deposition, PVD) 与化学气相淀积 (Chemical Vapor Deposition, CVD)。物理气相淀积技术是对欲沉积薄膜的材料源施加热能或动能,使之分解为原子或原子的集合体,并在晶圆表面结合或凝聚形成薄膜。物理气相淀积技术分为电阻加热蒸镀法、电子枪蒸镀法和溅镀法三类。化学气相淀积则是将反应气体导入高温炉,用气态的化学原料在晶圆表面产生某种化学作用,并在晶圆表面淀积一层薄膜。如图 1-5 所示是一套实现 CVD 工艺的集束型装备。