

高等职业教育校企合作新形态系列教材



现代集成电路 制造工艺（活页式）

主 编 ○ 胡晓明 周文清 张 辉



西南交通大学出版社

高等职业教育校企合作新形态系列教材

现代集成电路制造工艺

(活页式)

主 编 胡晓明 周文清 张 辉

副主编 朱 琳 卓 婧 孙晓云

主 审 中国职业教育微电子产教联盟
全国集成电路专业群职业教育标准建设委员会
杭州朗迅科技有限公司(“1+X”集成电路证书群单位)

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容简介

本书主讲内容共八个模块知识，模块一为半导体产业和摩尔定律，模块二为硅晶圆和晶圆制备，模块三为芯片制造的污染与净化，模块四为集成电路成膜工艺，模块五为光刻中的光学与工艺设备，模块六为光刻、蚀刻和掺杂工艺，模块七为集成电路封装，模块八为集成电路芯片测试工艺。

本书内容特色：本书以活页式形式编写，把课程思政纳入每一模块教学；本书重点介绍了导体制造的双轮驱动力和摩尔定律，通过学习可了解单晶硅生长和晶圆制备，理解石英砂是怎样变成电子级硅 SGS 后成晶圆的，会学习芯片制造的污染与净化问题；从（硅热）氧化和淀积工艺到光刻、蚀刻和掺杂工艺，涉及集成电路制造工艺的全流程，简要介绍了从晶圆划片，到芯片粘接，再到 IC 成品封装过程；以重力式分选机为例，通过虚拟仿真的形式对芯片测试工艺进行详细阐述。本书的配套案例实验、虚拟仿真和习题巩固等有助于读者巩固学习。

本书适用于集成电路技术、微电子技术、电子信息工程技术、应用电子技术等专业教学，作者所在单位是全国集成电路专业群职业教育标准建设委员会会员单位，积极参与“1+X”集成电路开发与测试职业技能初级、中级和高级培训试点工作，此书是“1+X”集成电路开发与测试职业技能等级标准培训系列教材。

图书在版编目（CIP）数据

现代集成电路制造工艺：活页式 / 胡晓明，周文清，
张辉主编. — 成都：西南交通大学出版社，2021.12
ISBN 978-7-5643-8534-7

I. ①现… II. ①胡… ②周… ③张… III. ①集成电路
路工艺—高等教育—教材 IV. ①TN405

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2021）第 266298 号

Xiandai Jicheng Dianlu Zhizao Gongyi

现代集成电路制造工艺

（活页式）

主 编 / 胡晓明 周文清 张 辉

责任编辑 / 穆 丰

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

（四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031）

发行部电话：028-87600564 028-87600533

网址：<http://www.xnjdcbs.com>

印刷：四川玖艺呈现印刷有限公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 16.5 字数 380 千

版次 2021 年 12 月第 1 版

印次 2021 年 12 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-8534-7

定价 59.80 元

课件咨询电话：028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562



序言

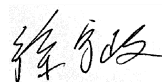
FOREWORD

2020年7月30日，集成电路设立为一级学科，2021年3月集成电路技术编入了职教专业目录，2021年10月中办国办印发《关于推动现代职业教育高质量发展的意见》，这些政策都是国家对集成电路产业最有力支持的证明，说明集成电路产业已经上升到了国家战略层面。

本书由胡晓明、周文清、张辉主编，是一部职业教育特色突出、充分反映集成电路产业发展最新进展的教材，由中国职业教育微电子产教联盟、杭州朗迅科技有限公司主审。全书共分为八个模块，模块一为半导体产业和摩尔定律，介绍了导体制造的双轮驱动力和摩尔定律；模块二为硅晶圆和晶圆制备，通过学习可了解石英砂是怎样变成电子级硅（SGS），而后形成晶圆的；模块三为芯片制造的污染与净化，介绍了芯片制造的污染问题与净化间知识；模块四为集成电路成膜工艺，介绍了（硅热）氧化和淀积工艺；模块五为光刻中的光学与光刻机技术，介绍了集成电路制造中涉及的光学知识和光刻机；模块六为光刻、蚀刻和掺杂工艺，介绍了集成电路制造工艺的全流程；模块七为集成电路封装，简要介绍了从晶圆划片，到芯片粘接再到IC成品封装过程；模块八为集成电路芯片测试工艺，以重力式分选机为例，通过虚拟仿真的形式对芯片测试工艺进行详细阐述。

本书根据集成电路制造工艺最新的岗位需求和工艺技术要求写成，对应生产线上较新工艺流程，是符合《“十四五”职业教育规划教材建设实施方案》

(教职成厅〔2021〕3 号) 文件规定的教材。本书适用于集成电路技术、微电子技术、电子信息工程技术、应用电子技术等专业教学，也可服务于“1 + X”集成电路开发与测试的初级、中级和高级培训。本书为智媒体、活页式，把课程思政纳入每一模块教学，其配套案例实验和虚拟仿真及习题等有助于读者进行更好的学习。



杭州朗迅科技有限公司

2021 年 3 月于杭州



前言

PREFACE

集成电路产业是高精尖电子技术发展的基石和灵魂，是国家战略性、基础性和先导性产业，是国家安全的重要保障，也是经济转型和产业升级的重要着力点，其发展水平已成为衡量一个国家综合实力的重要标志。芯片制造作为二十一世纪高新技术产业，被喻为国家的“工业粮食”，是所有整机设备的“心脏”，普遍应用于计算机、消费类电子、网络通信、汽车电子等领域，起着关键作用。集成电路产业是重点战略新兴产业，如果国家没有自己的集成电路产业，高新技术发展就受制于人，命运就掌握在别人手里。集成电路产业技术水平和产业规模已成为衡量一个国家的经济发展和科技进步的重要标志。从人才储备上来看，预计到 2030 年，集成电路产业人才缺口将达到 30~50 万人，形势较严峻，制造业、封测业、设计和制造工艺岗位（新增制造厂）需求巨大。2021 年前后，我国集成电路产业人才需求规模约为 72.2 万人，设计业为 26.8 万人，制造业为 24.6 万人，封测业为 20.8 万人，至 2021 年，我国集成电路产业仍然存在 26.1 万人的缺口。2020 年 7 月 30 日，教育部将集成电路设为一级学科；同年 8 月国务院颁布了《新时期促进集成电路产业高质量发展的若干政策》；2021 年 3 月，教育部把集成电路技术编入了职教专业目录（目录为 452-510401）。这些都为开展有中国特色的集成电路产业及人才培养提供了有力的政策支持，目前虽然我国集成电路制造工艺与国外存在技术代差，但是正在努力追赶，例如中芯国际的“N+2”工艺，完美绕开 7 nm 芯片的生产工艺。现在，我国已经把集成电路专业和产业提升到国家战略层面，这是支撑集成电路产业和专业改革的重要有力保证。本书在此背景下编写而成，愿为我国集成电路基础教育添一点力，发一分光。

本书共分为八个模块。模块一为半导体产业和摩尔定律，重点介绍了导体制造的双轮驱动力和摩尔定律；模块二为硅晶圆和晶圆制备，通过学习可了解单晶硅生长和晶圆制备，理解石英砂怎样变成电子级硅 SGS，再成晶圆；

模块三为芯片制造的污染与净化；模块四为集成电路成膜工艺，着重介绍（硅热）氧化和淀积工艺；模块五为光刻中的光学与光刻机技术，介绍了集成电路制造中涉及的光学知识和光刻机；模块六为集成电路制造的光刻、蚀刻和掺杂工艺，涉及集成电路制造工艺的全流程，从集成电路是如何光刻到晶圆上开始，到最后的 chip on wafer（有电路晶圆）是如何实现；模块七为集成电路封装介绍，简要介绍了从晶圆划片，到芯片粘接，再到 IC 封装成品过程；模块八为集成电路芯片测试工艺，以重力式分选机的操作过程为例通过虚拟仿真的形式进行芯片测试的详细阐述。本书适用于集成电路技术、微电子技术、电子信息工程技术、应用电子技术等专业教学，作者所在单位是全国集成电路专业群职业教育标准建设委员会会员单位，积极参与“1+X”集成电路开发与测试职业技能初级、中级和高级培训试点工作，此书是“1+X”集成电路开发与测试职业技能等级标准培训系列教材。

本书编写团队由胡晓明，周文清，张辉，朱琳，卓婧，孙晓云组成。张辉负责模块一和各模块课程思政的编写，孙晓云负责模块二及习题编写，朱琳负责模块七编写及全文的核对排版，卓婧负责模块八编写，周文清负责通读全文并初审，胡晓明负责模块三至模块六的编写并负责统稿和审核全文，同时感谢成书过程获得中国职业教育微电子产教联盟、全国集成电路专业群职业教育标准建设委员会的支持。本书在编写过程中还得到了杭州朗迅科技有限公司的技术支持，在公司多位资深技术工程师的配合下得以完成本书的编撰工作。此外，编写者对支持本书编写的所有人和单位表示由衷的感谢。

由于编者学术水平有限，书中难免存在表达欠妥之处，因此，编者由衷希望广大读者朋友和专家学者能够拨冗提出宝贵的修改建议，以便改进。修改建议可直接反馈至编者的电子邮箱：1049343550@qq.com。

书中专业术语较多，阅读时请参考文后附录。

编写组

2021年3月春



目录

CONTENT

模块一	半导体产业和摩尔定律	001
任务一	半导体产业简介	002
任务二	半导体发展方向	007
任务三	摩尔定律	010
任务四	IC 制造中的一些专业术语	013
模块二	硅晶圆和晶圆制备	021
任务一	半导体和硅	022
任务二	单晶硅生长和晶圆制备	029
任务三	晶圆检测	043
任务四	晶圆尺寸演变	045
模块三	芯片制造的污染与净化	052
任务一	芯片制造的污染	053
任务二	芯片制造的净化	059
模块四	集成电路成膜工艺	081
任务一	(硅热)氧化工艺	082
任务二	淀积	089
任务三	物理气相沉积法	103
模块五	光刻中的光学与光刻机技术	112
任务一	光刻中的光学	113
任务二	光刻工艺设备	120

模块六	光刻、蚀刻和掺杂工艺	145
任务一	光 刻	146
任务二	蚀 刻	155
任务三	掺 杂	162
模块七	集成电路封装	178
任务一	前段工艺	180
任务二	后段工艺	190
任务三	集成电路封装	195
模块八	集成电路芯片测试工艺（现场实例）——“1+X”证书考证实例	210
任务一	晶圆探针测试	211
任务二	典型重力式分选机测试工艺	219
参考文献	239
附录	半导体制造专业词汇英汉对照	240



模块一

半导体产业和摩尔定律

课程思政——要在厚植爱国主义情怀上下功夫

习近平总书记强调，要在坚定理想信念上下功夫，教育引导树立共产主义远大理想和中国特色社会主义共同理想，增强学生的中国特色社会主义道路自信、理论自信、制度自信、文化自信，立志肩负起民族复兴的时代重任。要在厚植爱国主义情怀上下功夫，让爱国主义精神在学生心中牢牢扎根，教育引导热爱和拥护中国共产党，立志听党话、跟党走，立志扎根人民、奉献国家。（摘自 2018 年 9 月 11 日人民网）

模块导读

芯片制造是高新技术产业，被喻为国家的“工业粮食”，是所有整机设备的“心脏”。半导体芯片行业作为半导体行业的主要代表，是整个电子信息技术行业的基础。摩尔定律得到业界认可并日益显示出对推动半导体产业发展的巨大作用，它对半导体发展的预测，目前基本正确。任务一介绍半导体产业；任务二说明半导体产业发展方向；任务三介绍摩尔定律，任务四列出了半导体制造的专业术语。

模块学习目标

- (1) 了解半导体产业链的基本概念，理解半导体产业发展的重要意义。
- (2) 了解半导体制造技术的发展方向，理解半导体制造的双轮驱动。
- (3) 掌握半导体产业的“摩尔定律”和特征尺寸概念。
- (4) 熟练掌握 IC（集成电路）制造中的一些专业术语。



任务一 半导体产业简介

子任务 1 半导体产业发展的重要意义

半导体产业（或集成电路产业）是高精尖电子技术发展的基石，是电子科技产品的灵魂，是国家战略性、基础性和先导性产业，是国家安全的重要保障，也是经济转型和产业升级的重要着力点，其发展水平已成为衡量一个国家综合实力的重要标志。

芯片作为人类电子世界最伟大的发明之一，已经出现在我们生活的方方面面，影响并改变着我们的生活方式。2000 年以来，以集成电路为基础的电子信息产业成为世界第一大产业。目前，发达国家 GDP（国内生产总值）增长部分的 65% 与集成电路有关。世界各国与地区纷纷将芯片作为国家重点战略，美国、欧洲、日本等发达国家与地区通过大量的研发投入确保技术领先，韩国、新加坡等通过积极的产业政策推动集成电路产业取得飞速发展。集成电路产业其技术水平和产业规模已成为衡量一个国家或地区经济发展、科技进步的重要标志。图 1.1 所示为集成电路芯片局部放大照片，图 1.2 所示为 QFP（扁平封）芯片。

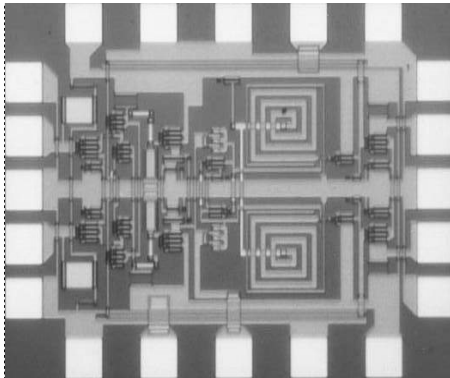


图 1.1 集成电路芯片局部放大照片

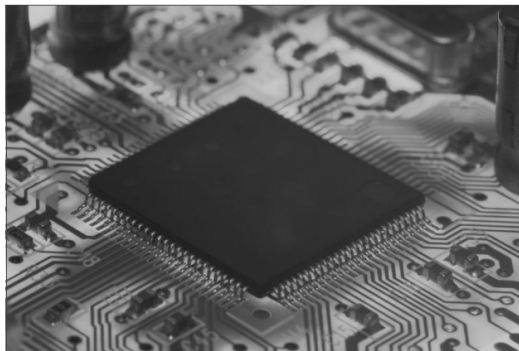


图 1.2 QFP 芯片图



集成电路具有很强的撬动性，促进了包括自动化装备、制造装备以及精密仪器、微细加工等 40 多个工程技术的发展。芯片产业 1 美元的产值，可以带动信息产业 10 美元的产值和 100 美元 GDP，如图 1.3 所示。而全世界集成电路的全年产值撬动的生产总值相当于中国和美国 GDP 之和。日本是我国电子元件进口的最大来源国，特别是在电容、电阻和电感等产品领域更为突出。2010 年以来三类产品自日进口所占比重分别为 35.0%、28.1%和 18.6%。

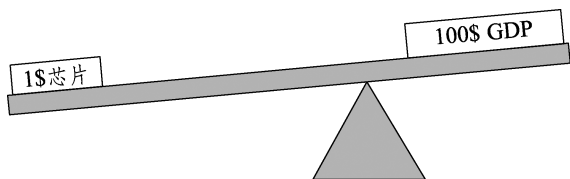


图 1.3 IC 的撬动经济比

集成电路 (Integrated Circuit, IC) 是国家重点战略新兴产业，我国如果没有自己的集成电路产业，高新技术发展就受制于人，命运就掌握在别人手里。未来中国如果不建立自己的产业核心技术体系，失去的不仅仅是经济利益，产业安全也将没有保障。我们要为集成电路专业和产业发展贡献力量！

子任务 2 半导体芯片产业链

半导体芯片行业作为半导体行业的主要代表，是整个电子信息技术行业的基础。半导体芯片产业链（见图 1.4）环节包括 IC 设计、晶圆制造及加工、封装及测试环节，拥有复杂的工序和工艺。

1. 半导体芯片上游产业：芯片设计

芯片设计主要根据芯片的设计目的进行逻辑设计和规则制定，并根据设计图制作掩模以供后续光刻步骤使用。根据 SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International, 国际半导体协会) 数据，我国芯片设计行业保持了较快的增长态势，2020 年我国芯片设计行业销售额首次突破 500 亿美元，全行业设计企业数量为 2 218 家，同比增长 24.6%。

20 世纪 80 年代，电子行业出现了几种新的分工模式，包括 IDM (Integrated Device Manufacture, 集成电路制造) 模式、Fabless 模式和 Foundry 模式。在台积电成立以前，半导体行业只有 IDM 一种模式。IDM 模式，是指由一个厂商独立完成芯片设计、制造和封装三大环节，英特尔、三星和德州仪器是全球最具代表性的 IDM 企业。IDM 模式的优势在于资源的内部整合优势，以及具有较高的利润率。Fabless (无晶圆制造的设计公司) 是指专注于芯片设计业务，只负责芯片的电路设计与销售，将生产、测试、封装等环节外包的设计模式，代表企业有高通、博通、英伟达、AMD 等。Foundry 即晶圆代工厂，指只负责制造、封测的一个或多个环节，不负责芯片设计，可以同时为多家设计公司提供服务的模式，代表企业有台积电、中芯国际、格罗方德等。



2. 半导体芯片中游产业：晶圆制造及加工

晶圆制造是半导体制造过程中最重要也是最复杂的环节，其主要的工艺流程包括热处理、光刻、蚀刻、离子注入、薄膜沉积、化学机械研磨和清洗。根据 ICinsights 数据，全球前十大硅晶圆制造厂中，台积电、联电和力晶来自中国台湾地区，格罗方德（Global Foundries）来自美国，三星（Samsung）来自韩国，中芯国际和华虹半导体来自中国大陆，Towerjazz 来自以色列。2020 年第四季度全球晶圆代工营收排行中，中芯国际和华虹半导体分别位列第 5 名和第 9 名。近年来随着半导体产能逐渐向中国大陆转移，中国大陆迎来投资建厂热潮，以半导体芯片中的核心材料晶圆为例，2017—2020 年全球拟投产品圆厂近 42%集中在中国大陆。

3. 半导体芯片下游产业：封装及测试

芯片封测完成对芯片的封装和性能、功能测试，是产品交付前的最后工序。封装测试位于半导体产业链的中下游，包括封装和测试两个环节。根据 Gartner 测算，封装和测试在整个封测流程中的市场份额占比约为 80%~85%和 15%~20%。封装是指对制造完成的晶圆进行划片、贴片、键合、电镀等一系列工艺，以保护晶圆上的芯片免受物理、化学等环境因素造成的损伤，增强芯片的散热性能，以及将芯片的 I/O 端口引出的半导体产业环节。

半导体测试贯穿了半导体整个产业链，芯片设计、晶圆制造以及最后的芯片封装环节都需要进行相应的测试，以保证产品的良率。目前国内封测市场在全球占比达 70%，行业的规模优势明显，更多是通过资源整合和规模扩张来推动市占率的提升。中国封装业起步早、发展快，中国封测环节在全球已经具备一定的竞争力，2020 年全球前十大封测企业中，中国企业长电科技、通富微电和华天科技分别位列 3、6、7 名。

4. 半导体产业设备

半导体设备是集成电路产业的重要支撑，价值量较高，且具有较高的技术壁垒，研发难度大、周期长，直接关系到芯片设计能否落成实物，产品可靠性和良率能否达到设计标准，以及国内行业是否能够参与全球竞争。根据 iBS（IBS 公司数据报告）数据，先进工艺的集成电路大规模生产线投资可达到百亿美元量级，其中 70%~80%是半导体设备相关投资，用于芯片制造的设备占半导体设备总支出的 81%。半导体设备集中应用于晶圆制造和封测两个环节，其市场规模随着下游半导体的技术发展和市场需求而波动。在晶圆制造环节使用的设备被称为前道工艺设备，在封测环节使用的被称为后道工艺设备。前道工艺设备进一步细分为晶圆处理设备和其他前端设备，如光刻机等；后道工艺设备分为测试设备和封装设备。SEMI 在 2020 年 12 月 15 日发布报告，预测 2020—2022 年半导体设备市场规模持续上升，2020 年市场规模达到 689 亿美元，2022 年将达到 761 亿美元。

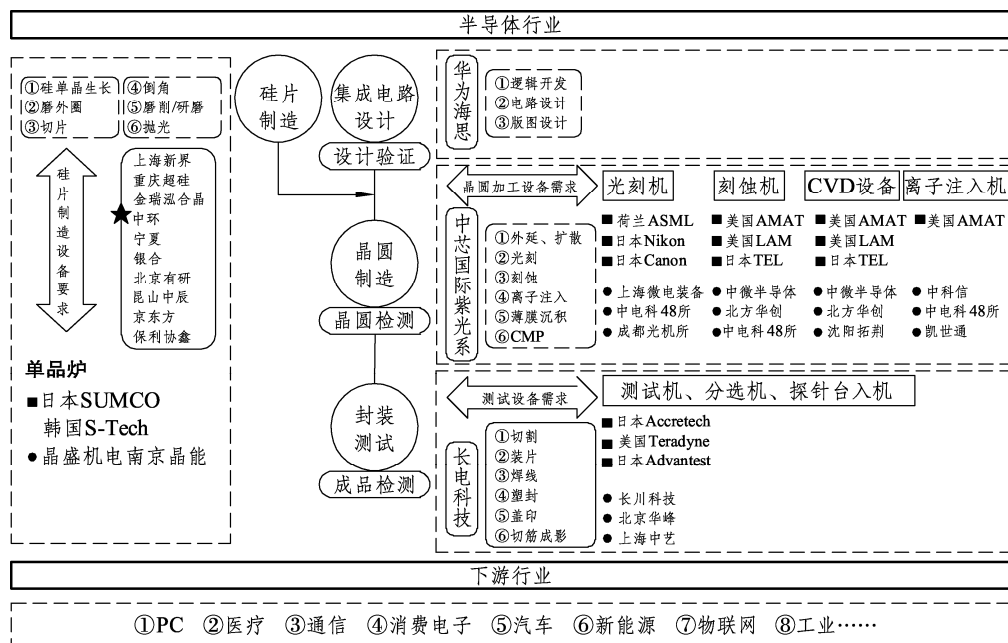


图 1.4 半导体芯片产业链

2018年,中国进口集成电路为4 175.7亿个,总金额为3 120.6亿美元(20 584.1亿人民币),比2017年增加19.8%,占我国进口总额的14.6%。集成电路进口额第一次超过3 000亿美元,进口额不仅超过了原油这一战略物资,而且超过了农产品、铁矿、铜、铜矿、医药品的总和。中国集成电路产值不足全球产值的10%,而市场需求却接近全球1/3;全球77%的手机是中国制造,但其中不到3%的手机芯片是国产的。2019年,中国集成电路进口数量为4 451.34亿个,同比增长6.6%。在进口金额方面,2019年,中国集成电路进口金额为3 055.5亿美元,同比下降2.1%。到2020年6月,尽管疫情的影响仍然在蔓延,但全球半导体贸易统计组织(WST)预期其半导体市场会有一个小幅的反弹(至4 260亿美元),而2021年则预期会上升至4 520亿美元。在未来十几年,汽车电子和工业电子有望成为半导体行业增长最迅速的两大领域,而消费电子、数据处理和通信电子的增速将趋于稳定。根据预测,2022年全球半导体行业销售收入将达到5 426.4亿美元,下游应用市场的变革将进一步推动芯片的需求。



任务一学习成果评价

以团队小组为单位完成任务，以学生个人为单位实行考核。

姓名	半导体产业发展的重要意义			半导体产业链			得分
	自评	同学评	教师评	自评	同学评	教师评	

说明：

1. 每人总分为 100 分。
2. 每人每项为 50 分制，计分标准为：不会讨论计 1~15 分，基本会讨论计 16~30 分，会讨论和提问较好计 31~40 分，讨论学习很好计 41~50 分。
3. 采用分层打分制，建议权重记为：自评分占 0.2，同学评分占 0.3，教师评分占 0.5，然后加权算出每名同学在本实验中的综合成绩。



任务二 半导体发展方向

子任务 1 半导体制造技术发展之路

在今后十年里,便携式电子产品(如智能电话、便携式计算机、掌上计算机 PDA、电子医疗器械等)以其小型化、低重量、低电压、低功耗、无须制冷等优点而备受青睐,有望成为发展最快的电子产品门类。据报道,1993年,低压、低功耗 IC 在整个 IC 市场所占份额仅为 4%,而到 2018 年,低压、低功耗 IC 将占整个 IC 市场的 40%,这些电子产品对 IC 芯片(如 DRAM、SRAM、DSP 等)的要求是低压(电源电压为 1 V 或更低)、低功耗(小于 100 mW)、高性能。尽管按等比缩小的 CMOS 工艺以集成度高、功耗最低、成本最低被认为是实现上述要求的最佳工艺,但是最近研究表明,当电源电压低于 1 V 时,普通体硅 CMOS 电路速度剧减,这是因为当降低阈值电压时,很难做到不使器件电流驱动性能下降和不增大静态泄漏电流,加之器件驱动性能的下降因器件寄生效应(如源、漏间结电容)、内层互连布线和结电容的增加而显得更为严重。因此,为了实现 CMOS 芯片的高速、低功耗,必须在以下几个方面进行技术上的革新,如更新 IC 设计,采用新型材料(如 SOI、低介电介质),使低阻金属(Cu)互连。更新体硅 IC 设计必将增加电路的复杂性,从而增加 IC 制造成本。因此,除了在改进 IC 设计和优化工艺方面下功夫以外,更应着重寻找新材料与新结构的器件。

1959 年美国仙童公司的诺伊思(R.Noicy)开发出用于 IC(见图 1.5)的 Si 平面工艺技术,从而推动了 IC 制造业的大发展。

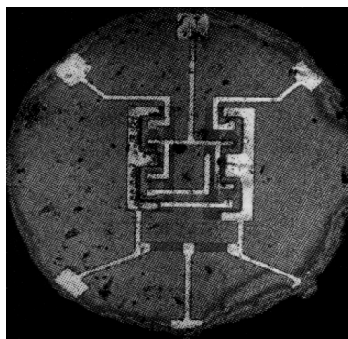


图 1.5 仙童公司制造的 IC(1959 年)

子任务 2 半导体制造的双轮驱动力发展

1. 特征尺寸

从技术发展路线说,半导体制造的驱动力之一是特征尺寸(feature size)不断



缩小。集成度是集成电路技术进步的标识性参数，提高集成度的关键是缩小晶体管尺寸，而缩小晶体管尺寸集的关键是微细加工技术，其标志即半导体制造的特征尺寸，是衡量集成电路工艺水平的关键指标。

特征尺寸，指的是半导体制造工艺可以实现的平面结构的最小尺寸，通常是指最窄的线宽。把集成电路芯片放大，可以看到类似印制电路板上的线条（见图 1.6）。而集成电路的细胞是晶体管，是由不同导电物理性能的区域形成，这些区域从平面看就是不同形状、不同尺寸的线条。特征尺寸指的就是可以做到的线宽或间隙的最小尺寸，显然这个尺寸越小，晶体管的尺寸就越小，在硅片的单位面积所容纳的晶体管就越多，集成电路的集成度就越高。换句话说，同样规模的集成电路，特征尺寸越小，占用的硅片面积就越小，集成电路的成本就越低。

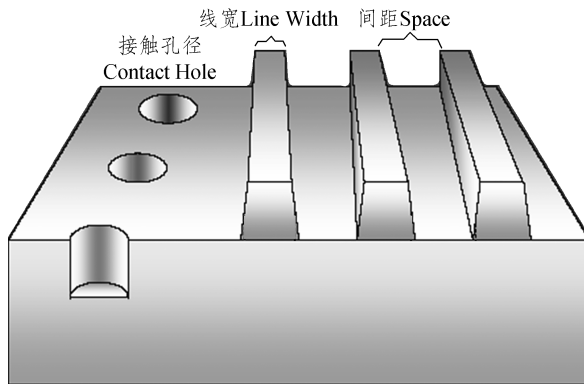


图 1.6 特征尺寸与关键尺寸

特征尺寸是集成电路水平的标志，集成电路特征尺寸的大小取决于一系列制造工艺的复杂性和设备的精确度，其中最关键的是光刻工艺和设备，有关技术将在后面专门介绍。特征尺寸越小，技术门槛越高，制造厂需要的投资越大。从早期的几十亿美元到近年超过百亿美元的巨大投资和随之而来的风险，使特征尺寸一次又一次地减小成为企业激烈竞争的焦点。特征尺寸的减小带来的进步，不仅仅是集成度的提高。在电路内部，特征尺寸越小，信号传递距离越短，速度越快；同时还有工作电源电压降低，功率消耗降低的优点。特征尺寸的关键，又称为关键尺寸（Critical Dimension, CD），是芯片上的最小物理尺寸，是衡量工艺难度的标志，代表集成电路的工艺水平。

2. 晶圆尺寸

半导体制造的驱动力之二是晶圆尺寸不断增大。晶圆直径增加一半，产出芯片数量翻番。2018 年，上海华力一条 12 inch（1 inch \approx 2.54 cm）全自动芯片线上，首批 55 nm 工艺产品顺着轨道进入流水线，开始试流片。这标志着总投资 135 亿元的“909”工程升级改造项，历经短短 16 个月，已建成第一条国资控股、超大规模的 12 inch 集成电路芯片生产线，验收后将跨入更高工艺级别。显微镜下，一片锅盖大小的“晶圆”，集成排布着万千枚芯片。当今集成电路业界，高端晶圆直径渐大，可