




职业技术·职业资格培训教材

集成电路 测试技术员

中级

JICHENG DIANLU
CESHI JISHUYUAN

劳动和社会保障部教材办公室 组织编写
上海市职业培训指导中心

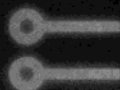
 中国劳动社会保障出版社



职业技术·职业资格培训教材

集成电路 测试技术员

中级



JICHENG DIANLU
CESHI JISHUYUAN

主 编 贺 德 洪
执 行 主 编 邓 善 修
主 张 理 国



中国劳动社会保障出版社

图书在版编目(CIP)数据

集成电路测试技术员：中级/邓善修主编. —北京：中国劳动社会保障出版社，2007
职业技术·职业资格培训教材
ISBN 978 - 7 - 5045 - 6173 - 2

I. 集… II. 邓… III. 集成电路-测试技术-技术培训-教材 IV. TN407

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 070197 号

中国劳动社会保障出版社出版发行

(北京市惠新东街1号 邮政编码：100029)

出版人：张梦欣

*

世界知识印刷厂印刷装订 新华书店经销

787毫米×1092毫米 16开本 10印张 201千字

2007年6月第1版 2007年6月第1次印刷

定价：18.00元

读者服务部电话：010 - 64929211

发行部电话：010 - 64927085

出版社网址：<http://www.class.com.cn>

版权专有 侵权必究

举报电话：010 - 64954652



内 容 简 介

本书由劳动和社会保障部教材办公室、上海市职业培训指导中心依据上海 1+X 职业技能鉴定细目——集成电路测试技术员（国家职业资格四级）组织编写。本书从强化培养操作技能，掌握一门实用技术的角度出发，较好地体现了本职业当前最新的实用知识与操作技术，对于提高从业人员基本素质，掌握中级集成电路测试技术员的核心知识与技能有直接的帮助和指导作用。

本书内容分为三个单元，主要内容包括：集成电路基础、集成电路晶圆测试基础、集成电路成品测试基础等。为便于读者掌握本教材的重点内容，每一单元后附有单元测试题及答案，全书后附有知识考核模拟试卷和技能考核模拟试卷及答案，用于检验和巩固所学知识 with 技能。

本书可作为集成电路测试技术员（国家职业资格四级）职业技能培训与鉴定考核教材，也可供中、高等职业院校师生，以及相关从业人员参加岗位培训、就业培训使用。



前 言

职业资格证书制度的推行，对广大劳动者系统地学习相关职业的知识和技能，提高就业能力、工作能力和职业转换能力有着重要的作用和意义，也为企业合理用工以及劳动者自主择业提供了依据。

随着我国科技进步、产业结构调整以及市场经济的不断发展，特别是加入世界贸易组织以后，各种新兴职业不断涌现，传统职业的知识和技术也越来越多地融进当代新知识、新技术、新工艺的内容。为适应新形势的发展，优化劳动力素质，上海市劳动和社会保障局在提升职业标准、完善技能鉴定方面做了积极的探索和尝试，推出了1+X的鉴定考核细目和题库。1+X中的1代表国家职业标准和鉴定题库，X是为适应上海市经济发展的需要，对职业标准和题库进行的提升，包括增加了职业标准未覆盖的职业，也包括对传统职业的知识技能要求的提高。

上海市职业标准的提升和1+X的鉴定模式，得到了国家劳动和社会保障部领导的肯定。为配合上海市开展的1+X鉴定考核与培训的需要，劳动和社会保障部教材办公室、上海市职业培训指导中心联合组织有关方面的专家、技术人员共同编写了职业技术·职业资格培训系列教材。

职业技术·职业资格培训教材严格按照1+X鉴定考核细目进行编写，教材内容充分反映了当前从事职业活动所需要的最新核心知识与技能，较好地体现了科学性、先进性与超前性。聘请编写1+X鉴定考核细目的专家，以及相关行业的专家参与教材的编审工作，保证了教材与鉴定考核细目和题库的紧密衔接。

职业技术·职业资格培训教材突出了适应职业技能培训的特色，按等级、分模块单元的编写模式，使学员通过学习与培训，不仅能够有助于通过鉴定考核，而且能够有针对性地系统学习，真正掌握本职业的实用技术与操作技能，从而实现我会做什么，而不只是我懂什么。每个模块单元所附单元测试题和答

集成电路测试技术员（中级）

案用于检验学习效果，教材后附本级别的模拟试卷，使受培训者巩固提高所学知识技能。

本教材结合上海市对职业标准的提升而开发，适用于上海市职业培训和职业资格鉴定考核，同时，也可为全国其他省市开展新职业、新技术职业培训和鉴定考核提供借鉴或参考。

新教材的编写是一项探索性工作，由于时间紧迫，不足之处在所难免，欢迎各使用单位及个人对教材提出宝贵意见和建议，以便教材修订时补充更正。

劳动和社会保障部教材办公室
上海市职业培训指导中心



目 录

● 第1单元 集成电路基础

1.1 集成电路概述	3
1.1.1 晶体管和集成电路的发明	3
1.1.2 集成电路的发展与动力	3
1.1.3 集成电路的产品族分类	5
1.2 集成电路产业链	8
1.2.1 集成电路设计业	8
1.2.2 集成电路芯片制造业	11
1.2.3 集成电路封装业	12
1.2.4 集成电路测试业	13
单元测试题	15
单元测试题答案	18

● 第2单元 集成电路晶圆测试基础

2.1 硅片	21
2.1.1 硅片制备与检测	21
2.1.2 半导体材料与特性	24
2.2 晶圆	27
2.2.1 晶圆的表形构成	27
2.2.2 晶体管基本原理和结构	29
2.2.3 集成电路基本原理和结构	36
2.3 晶圆测试项目	65
2.3.1 性能参数测试项目	65



2.3.2 微电子测试结构图	66
2.4 晶圆测试设备	70
2.4.1 手动探针测试台	71
2.4.2 自动探针测试台	73
2.5 晶圆测试操作	77
2.5.1 手动探针台测试操作	78
2.5.2 自动探针台测试操作	79
单元测试题	81
单元测试题答案	87

● 第3单元 集成电路成品测试基础

3.1 集成电路封装体	91
3.1.1 集成电路的封装形式	91
3.1.2 集成电路封装外引脚	95
3.1.3 半导体集成电路型号命名	97
3.2 成品测试基础	99
3.2.1 测试基本问题	99
3.2.2 测试主要项目	104
3.2.3 测试基本方法	106
3.2.4 集成电路自动测试平台简介	108
3.3 自动测试设备(Advantest 公司的专供资料)	108
3.3.1 ATE 的基本组成	108
3.3.2 ATE 的基本操作	113
3.3.3 软件调试工具的初步使用	115

3.4 自动分选机	121
3.4.1 自动分选机的基本组成	122
3.4.2 自动分选机的基本操作	124
3.5 成品测试实例	125
3.5.1 成品测试前准备工作	125
3.5.2 成品测试步骤	129
单元测试题	131
单元测试题答案	134
知识考核模拟试卷	137
知识考核模拟试卷答案	141
技能考核模拟试卷	142
技能考核模拟试卷评分表与答案	143
索引——汉英术语对照	145

1

第 1 单元

集成电路基础

- 1.1 集成电路概述 /3
- 1.2 集成电路产业链 /8



引 导 语

综观高科技的各个领域和各种产品，都离不开常见的集成电路（Integrated Circuit，简称 IC）。集成电路是微电子的核心产品族和主要研究对象。微电子（Microelectronics）可理解为按“微细加工、微量控制、微（纳）米尺度”制备的超微小型集成电子电路、机电微系统或光机电微系统。

作为集成电路行业的测试技术人员，要了解集成电路的过去、现在和将来，就必须知道集成电路的发明和发展的简史，还要知道集成电路的产品分类，更要熟悉集成电路的产业链。集成电路是集成电路测试技术员的工作对象，集成电路测试技术员更需知道集成电路的产品族。集成电路测试是产业链中的重要链环，集成电路测试职业的工作内容和过程与电路设计、芯片制造和成品封装紧密相关，集成电路测试技术人员必须熟悉测试职业和其他相关职业之间的关系。

在本单元中，首先介绍集成电路的发明、发展和产品族，然后阐述集成电路产业链中测试业与设计业、芯片制造业和封装业之间的关系。

各单元职业技能鉴定要点中必须设定的重要星级程度具有相对性，仅供参考。仅从掌握职业技能的角度考虑，技能训练肯定比理论知识更重要，星级就要高。如果从提升集成电路测试技术员进一步发展的基础和后劲考虑，理论知识准备和积累具有铺垫、引导和驱动作用，它要比单纯的技能操作重要，理论准备的星级不能低。只有不受重要星级程度的过分束缚，通过理论知识和技能操作的融会贯通，变成学员的综合知识，才能真正有效地提升学员的职业能力。

1.1 集成电路概述

集成电路的出现和发展，源自晶体管的发明、集成电路工艺技术的进步、市场需求的推动、成本利润的刺激，以及可靠性和管理上的完善。

1.1.1 晶体管和集成电路的发明

集成电路的发明源自半导体材料和特性的发现、固体物理量子理论的提出和深入研究、固态晶体管的发明和完善，以及集成电路概念的提出与实践。

1. 晶体管的发明

1947年12月第一个点接触晶体管（观察到放大效应）在美国电报电话公司（AT&T）贝尔实验室（Bell lab）的诞生，以及1949年NPN型晶体管的发明，表明人类步入了飞速发展的电子信息时代，它对人类社会的所有领域进步都产生了深刻影响。发明固态半导体晶体管的三位美国科学家约翰·巴丁（John Bardeen）、沃尔特·布拉顿（Walter Brattain）和威廉·肖克莱（William Shockley）共同获得了1956年的诺贝尔物理学奖。

2. 集成电路的发明

1952年5月英国皇家研究所的达默（G. W. A. Dummer）在专业协会的会议论文上第一次提出了“集成电路”的设想。1959年2月美国德州仪器（TI）公司的杰克·基尔比（Jack Kilby）发明了台面双极型集成电路（实属混合IC），并申请专利（1964年获得美国专利）。1959年7月美国仙童（Fairchild）半导体公司的罗伯特·诺伊思（Robert Noyce）发明了平面工艺硅集成电路（单片IC的雏形），并申请专利（1961年获得美国专利）。1959年4月库尔特·莱霍维克（Kurt Lehovec）采用PN结对IC上的元器件进行隔离，解决了集成电路单片集成制造中的一个关键问题。

1930年德国科学家Lilienfield曾提出了关于金属-氧化物-半导体（MOS）场效应晶体管（FET）的概念、工作原理和具体实施方案。但是，实际应用的MOSFET历经30年，直到1960年才诞生，1962年以后出现了基于MOSFET的各种实用MOS集成电路。

1.1.2 集成电路的发展与动力

据有关资料测算，集成电路对国民经济的贡献远高于其他门类的产品。如果单位质量钢筋对GNP（国民生产总值）的贡献为1，则小轿车为5，彩电为30，计算机为1000，集成电路则高达2000。从发达国家的发展过程统计来看，电子工业增长速度是国家GNP增长速度的3倍，集成电路工业增长速度又是电子工业增长速度的2倍，可见集成电路产业的发展速度是十分惊人的，其中美国有名的“硅谷”发展速度和产生的效益是最有代表性的。再从持续发展的角度来看，其中集成电路能效率最高，消耗的单位自然资源量最少，集成电路的主要衬底基础材料是单晶硅，而在地球上硅石是固体储藏资源中最丰富的。

集成电路的应用领域很广，拓展空间很大，持续时间久远。它的应用渗透能力无孔不入，自身发展更新潜力深不可测。

集成电路的发展与集成电路的应用市场需求广泛、工艺/设备/材料/管理技术的进步、制造成本的降低和丰厚的利润回报，以及可靠性与质量管理水平的提高紧密相关。

集成电路企业、市场用户和政府各部门共同推动着集成电路的不断发展。

1. 市场需求和技术进步

市场需求和技术进步是集成电路产品发展的驱动力。集成电路应用不断扩展到社会的各个领域，深入到政府各部门、各种企业公司、家庭和个人，市场需求节节攀升，其市场销售额几乎每四年翻一番、增长率在4~5年有一次大的涨落。1964年Intel公司的戈登·摩尔（Gordon Moore）提出了著名的预言集成电路发展的摩尔定律，即芯片上的晶体管数每隔一年翻一番，1975年修正为每18个月翻一番，2003年又提出其增长规律还可维持10年左右，其动力主要是以芯片的器件特征尺寸的缩小，换来晶体管数的增加。在代表集成电路技术发展水平的微处理器和存储器上，摩尔定律惊人地准确。

以提高集成电路芯片性能、可靠性和降低芯片成本为核心的工艺/设备/材料等技术的进步，使量产制备芯片的晶圆直径可达300 mm（12 in）；使芯片上的器件尺寸（纵向和横向）可按比例缩小，目前可量产加工的最小特征尺寸已达0.1 μm；使芯片合格率趋近6σ（99.999 7%）的技术管理日趋成熟。器件特征尺寸按比例缩小可同时使芯片的集成度增加、面积减小、速度提高、功耗降低、故障率下降。

2. 成本和利润

产品的生存时间和发展空间在于成本和利润。资本是逐利的。目前，投资一条新的150~300 mm（6~12 in）集成电路晶圆生产线需要1亿至几十亿美元。如果没有很大的利润空间，没有政府的支持，没有人愿意冒此风险进行投资。现在，产品市场竞争十分激烈，高成本的产品生存时间很短，除非该产品具有垄断性或保护性。低成本就意味着产品具有竞争力，可使产品的市场占有率稳步提升。高利润为开拓新产品打下基础，使企业走上良性发展之路。根据经验可知，在正常情况下，集成电路的合格率会随着生产量的增加而提高，累计生产量增加10倍，成本可下降30%左右。

典型普及产品有台式计算机、便携式计算机、手机、彩电、电子手表等，这些产品的核心就是集成电路。这些产品的性能/功能/质量/轻便程度的提升和发展如日中天、日新月异，而同类/同级别的产品价格却是日趋下降、频频跳水，这与集成电路的更新/提升性价比有着直接紧密的关系。当然，能占有先机、用最高水平IC组装的最新款式/型号的新产品，其价格相对昂贵，利润绝对丰厚。所有这一切，说明这些产品的核心部件——集成电路的成本和利润这两个要素会直接影响到这些产品的生存、发展和淘汰。

3. 可靠性和质量管理

可靠性和质量管理是集成电路产品生存和发展的基本保障。随着集成电路的应用日趋

拓展和扩大,集成电路已渗透到国家安全、国防、国民经济各部门和人民生活的各方面,提高集成电路的可靠性也显得更为重要和迫切。

集成电路的发展贯穿着军用和民用两条主线。军用集成电路的质量和可靠性是以性能为核心,其代表是美国;民用集成电路的质量和可靠性是以成本为核心,其代表是日本。实际上,在某种特定条件下,军用和民用是能相互转移和渗透的,军用和民用是相通的,其共性是质量和可靠性,是产品的性能价格比。从各国的集成电路发展史中,能见到可靠性和质量管理的深深踪迹,它是伴随着集成电路的发展而不断发展的。例如,美国在1957年由于2美元的集成电路失效导致了220万美元的“先锋号”卫星坠毁。1952年美国国防部成立的电子设备可靠性咨询组(AGREE),在1957年发表了具有可靠性发展重要里程碑标志的《军用电子设备可靠性》研究报告,提出了一整套可靠性设计、试验和管理方法,形成了各种相应的标准,使电子装备的可靠性有了大幅度的提高。例如,20世纪50年代的“先驱者号”卫星发射11次,只有3次成功,而20世纪60年代的阿波罗登月飞船,除阿波罗13以外,每次发射都能成功登陆月球,并能安全返回地球的预定地点。以生产电子产品为主业的美国Motorola公司在20世纪90年代初首先提出并实施了6 σ 质量管理模式,三年间产品不合格率从6 210件/百万件(4 σ)减少到32件/百万件(5.5 σ),节约成本20亿美元。1995年美国通用电气公司在实施6 σ 质量管理后,成品率、节约成本费和利润率都逐年提高,仅1998年度就节约成本7.5亿美元,利润率从1995年的13.6%提高到16.7%,1999年度节约成本达15亿美元。目前,使集成电路芯片合格率趋近6 σ (99.999 7%)的技术质量管理标准等日趋成熟,可适应芯片制造过程中多达几百道工序的质量管理。

1.1.3 集成电路的产品族分类

集成电路发展很快,应用范围很广,产品族的门类繁杂。目前,还没有一个统一的标准分类方法。通常以常规、常见、习惯的方法分类,大致可按电路功能/处理信号、结构形式/芯片制造工艺、规模大小/集成度、应用领域/生产性质、组装形式/集成技术等进行分类。集成电路产品族的分类,如图1-1所示。

1. 按电路功能/处理信号分类

集成电路按电路功能/处理信号的不同,可分为数字集成电路、模拟集成电路和数模混合集成电路。

(1) 数字集成电路。数字集成电路又称逻辑电路,按二进制处理的信号和输入信号的时序关系,可细分为组合逻辑电路、时序逻辑电路和存储器电路。与非门、或非门、反相器和多路开关属组合逻辑电路,触发器、寄存器、编/译码器和计数器属时序逻辑电路,动态随机存储器(DRAM)、静态随机存储器(SRAM)、只读存储器(ROM)和快闪存储器属存储器电路,还有可编程逻辑阵列(PLA)、现场可编程门阵列(FPGA)属半定制电路。

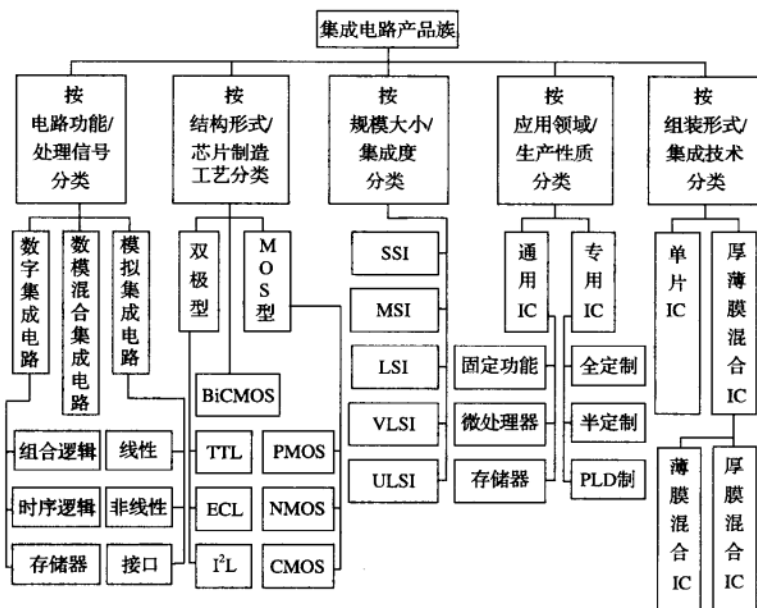


图 1-1 集成电路产品族的分类

(2) 模拟集成电路。模拟集成电路处理的是连续变化的模拟信号，按输出信号与输入信号的线性关系，可细分为线性电路、非线性电路和接口电路。运算放大器、跟随器和电压比较器属于线性电路，定时器、振荡器和乘法器属于非线性电路，CMOS-TTL、TTL-CMOS 和 CMOS-NMOS 统属接口电路。

(3) 数模混合集成电路。数模混合集成电路是数字电路和模拟电路进行单片集成的混合电路。数模转换器 (DAC)、模数转换器 (ADC)、电压-频率转换器 (VFC)、频率-电压转换器 (FVC)、通信电路、功率集成电路和集成传感器均属数模混合集成电路。

2. 按晶体管结构形式/芯片制造工艺分类

集成电路按晶体管结构形式/芯片制造工艺的不同，可分为双极型集成电路 (Bipolar)、MOS 型集成电路和 BiCMOS 型集成电路。

(1) 双极型集成电路。双极型集成电路是半导体集成电路中最早出现的集成电路形式，它以电子和空穴两种载流子同时进行工作而得名“双极型”，通常有 NPN 和 PNP 之分。双极型集成电路的主要优点是速度高、负载驱动能力强、与其他电路易匹配，缺点是集成度相对较低、功耗较大。

(2) MOS 型集成电路。MOS 型集成电路是以金属-氧化物-半导体结构形式，通过半导体表面电场感应产生导电沟道，只有一种载流子 (电子或空穴) 参与工作，通常有 NMOS, PMOS 和 CMOS (NMOS 管和 PMOS 管互补) 之分。

MOS 型集成电路输入阻抗高、抗干扰能力强、功耗低、集成度高, 适合大规模集成, 互补 MOS 晶体管结构形式的 CMOS 集成电路更具有静态功耗趋近于零、动态功耗也极低、输出电压范围宽、结构简单等显著优点, 亚微米级 CMOS 电路的工作速度已可达到大于几百 MHz 的水平。CMOS 集成电路已成为大规模集成电路发展的主流。

(3) BiMOS 型集成电路。在 BiMOS 型集成电路中, BiCMOS 集成电路是主体。它是双极型和 CMOS 型集成电路的相容和综合体, 其目的是综合各自优点, 发挥各自长处。为追求工艺相容, 势必造成芯片制造工艺复杂化, 成本激增, 但是它在数模混合电路中具有独特的难以替代的重要地位。

3. 按规模大小/集成度分类

集成度是指每个集成电路芯片上的元器件数或每个芯片上的元器件数/cm²。通常数字电路以每个芯片上的等效门数表征集成度, 一般情况下, 一个等效门指一个两输入端的与非门。

集成电路按规模大小/集成度的不同, 可分为小规模集成电路 (SSI)、中规模集成电路 (MSI)、大规模集成电路 (LSI)、超大规模集成电路 (VLSI) 和特大规模集成电路 (ULSI)。

自 1959 年集成电路发明以来, 元器件的尺寸越来越小, 集成度不断提高, 也就自然形成了几个发展阶段。其演进归类为每个集成电路芯片上的元器件数/cm² 由少于 100 个 (SSI) → 10²~10³ 个 (MSI) → 10³~10⁵ 个 (LSI) → 10⁵~10⁷ 个 (VLSI) → 大于 10⁷ 个 (ULSI), 人脑的神经细胞数目为 1.2×10¹⁰ (120 亿) 个。

4. 按应用领域/生产性质分类

集成电路按应用领域/生产性质的不同, 可分为通用集成电路和专用集成电路 (ASIC)。

(1) 通用集成电路。通用集成电路通常指有标准固定功能的各种数字集成电路、模拟集成电路和数模混合集成电路, 它们的引脚编号和引脚定义往往会固定不变, 具有大批量性和互换性。

通用数字集成电路有量产大的各种逻辑门电路、运算器、比较器、编码器、译码器、多路选择器、移位寄存器、计数器、微处理器、存储器、DSP 和可编程逻辑器件等。通用模拟集成电路有各种运算放大器、振荡器、电源电路、锁相环等。数模混合集成电路有数模变换电路、模数变换电路、I/O 接口电路、驱动电路、开关电源等。

(2) 专用集成电路。专用集成电路指为特定需求而定制的集成电路, 有全定制、半定制和可编程逻辑器件 (PLD) 制等。

专用集成电路广泛应用于各行各业。它涉及和渗透于工农业、商贸、交通运输、网络通信、自动控制、仪器仪表、工装设备、教育卫生、文化娱乐、航空航天和武器装备等行业和领域。专用集成电路非常有利于知识产权的保护, 其保密性强。但是, 专用集成电路相对通用集成电路而言, 其制作成本要高。

5. 按组装形式/集成技术分类

集成电路按组装形式/集成技术的不同,可分为单片集成电路和厚薄膜混合集成电路。不能单片集成的电路/系统,通常采用厚薄膜混合集成电路技术进行电子组装,即把芯片(集成电路和晶体管等有源器件)、片式无源元件(电阻器、电容器和电感器)和具有多层互连金属线的绝缘基板(常用陶瓷作多层基板)组装后,再封装成一体。

目前,单片集成电路的最高形式是系统集成在芯片(SOC)上和晶圆级芯片尺寸封装(WLCSP)形式;厚薄膜混合集成电路的最高组装形式是三维叠装的三维结构多芯片组件(3D-MCM)群。

(1) 单片集成电路。往往把工艺能相容的电路/系统集成在一个芯片上的集成电路,称为单片集成电路。单片集成可提高其性能价格比,但是,前期投入的资金、时间和风险成本会很大。

(2) 厚薄膜集成电路。厚膜集成电路是通过丝网漏印的方法,把各种浆料(导体/电阻/介质)涂敷在陶瓷基板上,再烧结成形(膜厚 $>1\mu\text{m}$),以分别形成互连导体/电阻/带孔的多层介质层,也可用印有导体互连线和电阻的多层陶瓷生坯片叠压烧结成形。

薄膜集成电路是利用光刻和刻蚀等工艺,对真空蒸发、溅射、电镀和化学气相沉积(CVD)等技术制备的薄膜(膜厚 $<1\mu\text{m}$)进行微细加工,形成绝缘基板上的电阻、电容、金属化互连线和介质层,再与芯片等元器件组装成一体。

厚薄膜混合集成电路是厚膜、薄膜工艺技术和微电子封装技术相结合的三维封装体。

1.2 集成电路产业链

集成电路产业链主要由设计、芯片制造、封装和测试四个部分构成,还有工装设备(精密模具、光掩模、光机电一体化、大型测试仪器等)、材料(硅材料、特种材料)、精细化学试剂、特种气体和软件等配套、支撑产业。

早期的完整集成电路制造企业包括设计、芯片制造(前道)和封装测试(后道)。目前,随着集成电路产业的发展和市场的细化,集成电路产业有按“产品”和“加工”分离的趋势。

集成电路产业链中的各个企业公司以分工、合作和相互依存的独立方式存在,已成为集成电路企业发展的主流方向。

1.2.1 集成电路设计业

1. 概述

现代集成电路设计业(Fabless)是自己没有制造工厂,而紧紧依托并围绕集成电路制造业而存在的企业。

集成电路设计的发展是随着集成电路的发展而不断进步的。其发展历程为:原始的人力手工设计制版→人工设计计算机辅助制版→计算机辅助设计制版(CAD)→电子设计自