



中航工业首席专家
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

田 泽 著

航空专用集成电路 ——设计理论与工程实践

AERIAL APPLICATION SPECIFIC
INTEGRATED CIRCUIT
DESIGN THEORY AND ENGINEERING PRACTICE

航空工业出版社

014010329

V24
17

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

航空专用集成电路

——设计理论与工程实践

田 泽 著



北航

C1696767

航空工业出版社

北 京

V24
17

内 容 提 要

基于机载应用环境,采用 ASIC/SoC/MEMS/MCM/SiP 等先进微电子技术手段研制的小型化、高可靠电路及电路模块,以及从机载总线网络协议和标准出发研制的专用协议处理电路,组成了面向航空应用的专用集成电路体系。

本书首先论述了航空专用集成电路相关概念、设计方法等基本理论,内容涉及机载总线网络及专用集成电路、面向航空电子系统小型化、单片高密度电路设计与实现方法(主要有 ASIC、SoC 及 MEMS),以及高密度航空电子封装方法(主要是 MCM 和 SiP)。在此基础上讲述了作者从事本领域多个项目的工程实践,涉及航空专用集成电路常用的 ASIC/SoC/MCM 等设计手段,以及机载总线网络协议芯片的设计与实现。最后给出了作者对航空集成电路研制及使用的一些体系性问题的探索和思考,包括如何构建完整的自主可控航空专用集成电路技术及产品体系,如何加强高可靠、高安全集成电路的机理研究以及设计过程质量保障体系建设,如何建立地面全功能、全环境应用验证体系等问题,目的是将航空集成电路研制及使用的风险降到最低。

本书可供从事微电子技术、航空电子及机载总线网络技术研究与应用开发等领域的专业人员使用,也可供相关专业的高等院校的本科生、研究生、教师及相关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

航空专用集成电路:设计理论与工程实践/田泽著

—北京:航空工业出版社,2013.9

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978-7-5165-0237-2

I. ①航… II. ①田… III. ①航空设备-电子设备-集成电路-电路设计 IV. ①V243

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 197677 号

航空专用集成电路——设计理论与工程实践

Hangkong Zhuanyong Jicheng Dianlu——Sheji Lilun yu Gongcheng Shijian

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话:010-64815615 010-64978486

北京世汉凌云印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2013 年 9 月第 1 版

2013 年 9 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:31.25 字数:780 千字

印数:1—2000

定价:160.00 元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从 2009 年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人才中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人才技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展做出更大的贡献。

21 世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。

林左鸣

中国航空工业集团公司董事长

前 言

航空电子是电子技术广泛应用于飞行器平台的产物。回顾百年飞行史,近半个世纪,每次飞行包线的扩大,都对航空电子系统提出了更高的要求,航空电子发展变化的每一个阶段,都和当时微电子技术的进步有着密切的联系。依靠先进微电子技术提供的各种集成电路和元器件能显著和全面地提升飞行器性能。一向对使用新技术持慎重态度的航空领域,已经大量使用先进微电子技术来重组航空电子系统的“基因”。

先进微电子技术及其产品已渗透到飞行器的方方面面。对于军用飞机而言主要是保障并增强飞行的性能、安全性和作战效能;对于民用飞机而言要确保飞行的性能、安全性、舒适性和经济性。微电子技术在航空领域的快速发展和广泛应用引发了航空电子革命性变革,使航空电子系统的功能和性能产生了质的飞跃,彻底改变了飞行器设计、制造、试验及运营、维护等方面的理念与流程,是飞行器性能提升的倍增器。

面向航空应用领域,必须考虑物理环境适应性。在体积、重量、功耗等资源限制和设计约束下,恶劣的运行环境,如温度、湿度、振动、冲击、电磁干扰、雷电、辐射等因素带来的问题都需要采取小型化和轻型化技术来解决。为满足航空电子小型化、轻型化、低功耗、高可靠性和高安全性的应用需求,首先要从系统基础集成电路及元器件层面考虑,然后再从系统工程化设计及加固技术角度考虑。

在通用集成电路的基础上,进一步提高单片的集成度、性能及功能密度的航空专用集成电路,是解决上述问题最直接、最有效的方法。目前主要的设计方法有 ASIC、SoC 及 MEMS。在此基础上采用 MCM/SiP 高密度封装技术、SMT 高密度板级组装技术,来实现管芯级和功能模块级的高度集成。用 ASIC/SoC/MEMS/MCM/SiP 等先进微电子技术手段设计的小型化电路及电路模块,是航空专用集成电路的重要组成。

随着航空电子系统的发展,机载设备不断增多,飞行器上的互连布线也日益复杂,极大地增加了飞行器的体积和重量,成为机载设备应用于飞行器设计中的瓶颈。计算机总线、网络技术逐步应用于航空电子中,实现了机载电子设备间的信息交互和共享,成功解决了这些瓶颈问题,诞生了各种航空机载总线协议和标准,规范了机载设备的互连体系。由此催生的机载总线网络协议处理芯片,也成为航空专用集成电路重要组成。

笔者经过多年的艰苦实践和探索,经历过不少困惑,也有一些体会、经验和积累,强烈地感觉到一些重要的问题必须澄清。虽然没有能力也不可能给出所有航空集成电路和元器件设计流程和方法,但笔者完全可以对所从事的具体工作加以总结和升华,与大家无私地分享。笔者也曾幻想能有一本从工程实践角度系统讲述基本原理,并能够全面指导项目实践开发的教科书,这样我们的工科教育就能够面向工程应用讲理论了,我们的学生就会学得更加实际、扎实一些。正是基于这些原因,本书才逐渐成形,并有幸在这里呈献出来。

本书分 3 部分,第 1 部分是本书的前 3 章,主要讲述航空专用集成电路基本概念、机

载总线网络及专用集成电路,面向航空电子系统小型化、单片高集成度及高密度电路设计与实现方法(主要有 ASIC、SoC 及 MEMS),以及高密度航空电子封装方法(主要是 MCM 和 SiP)。这些内容是航空专用集成电路相关概念、设计方法等基本理论。第2部分讲的是几年来我们的航空专用集成电路项目实践,包括第4~第7共4章。第4章讲述利用 ASIC 技术设计实现传统机载离散量信号转换系统的全过程,充分展示 ASIC 设计技术在航空电子系统小型化方面的巨大技术优势。第5章讲述一款基于传统的 MBI 板小型化、标准化、通用化需求、采取 SoC 技术设计实现系统芯片 HKS1553BCRT 的全过程。第6章讲述采取 SoC 技术设计实现的 AFDX 端系统芯片 HKS664ES 的全过程。总线网络遍布机载设备中,采取 SoC 技术设计总线网络专用芯片,将会显著降低机载系统功耗,提高可靠性和小型化程度。第7章讲述利用 MCM 技术实现一款机载智能通信管理板的全过程,展示了以 MCM 技术为基础的高密度封装技术在航空电子系统小型化领域的独特技术优势。

航空集成电路复杂的设计验证过程及较长的研制、试用周期,促使我们尽可能提前谋划,预先突破。基于我国薄弱的微电子工业基础,建立一个相对独立完整的自主发展技术及产品体系,是我们首先要考虑的。同时面向航空应用的集成电路及元器件,包括我们设计的,其失效可能导致生命财产损失、国家安全威胁与环境破坏等重大、灾难性后果。加强我们设计的专用集成电路高可靠、高安全研制机理研究以及设计过程质量保障体系建设,加强航空使用的各种集成电路及元器件可信性机理研究以及认证体系建设,建立地面全功能、全环境应用验证体系,将应用风险降到最低,是我们刻不容缓的责任,也是我们下一步的工作重点和努力方向。第8章是我们在航空集成电路体系方面的一些考虑,是我们在长期的实践和摸索中的思考和总结,作为本书的第3部分内容。

本书不是无所不包的关于航空专用集成电路及元器件百科全书,而只是给出一些对我们多年来的工程实践及认识的基本描述。在此特向为本书涉及的相关开发内容做出贡献的西安航空计算技术研究所微电子研究室的全体人员表示衷心的感谢。希望本书的出版,能让大家对于行业微电子的发展给予更多的关注和支持,也真诚希望本书能够引起相关专家及管理层的重视,在注重飞机总体设计的宏观技术的同时,协同发展“集成电路及元器件”等微观核心技术,切实加强高安全性领域的集成电路的研制和使用工作,共同推动航空工业的发展,让我们的飞机承载着航空之“芯”,安全地翱翔在祖国的万里长空。由于编写水平有限,难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

田 泽

2012 年 11 月 8 日

目 录

第 1 章 航空专用集成电路导论	(1)
1.1 微电子技术及发展	(1)
1.1.1 概述	(1)
1.1.2 微电子技术及发展	(5)
1.2 航空微电子技术及专用集成电路	(18)
1.2.1 航空电子系统与微电子技术	(19)
1.2.2 航空电子核心集成电路和元器件	(22)
1.2.3 航空专用集成电路设计技术	(30)
1.2.4 航空专用集成电路	(32)
1.3 航空微电子国内外产业概述	(34)
第 2 章 机载总线网络及专用集成电路	(37)
2.1 总线及网络技术基础	(37)
2.1.1 总线技术概述	(37)
2.1.2 网络技术概述	(40)
2.2 机载总线网络技术及发展	(45)
2.2.1 机载总线网络技术概述	(45)
2.2.2 机载总线网络技术发展	(48)
2.3 ARINC429 总线	(49)
2.3.1 ARINC429 总线拓扑结构	(49)
2.3.2 ARINC429 协议概述	(50)
2.3.3 ARINC429 总线通信控制	(52)
2.3.4 ARINC429 总线专用集成电路及产品	(52)
2.4 CAN 总线	(53)
2.4.1 CAN 总线拓扑结构	(53)
2.4.2 CAN 总线协议概述	(53)
2.4.3 CAN 总线通信控制	(55)
2.5 ARINC629 总线	(58)
2.5.1 ARINC629 总线拓扑结构	(58)
2.5.2 ARINC629 协议概述	(59)
2.5.3 ARINC629 总线通信控制	(60)
2.6 MIL - STD - 1553B 总线	(61)
2.6.1 MIL - STD - 1553B 总线拓扑结构	(61)
2.6.2 MIL - STD - 1553B 协议概述	(62)
2.6.3 MIL - STD - 1553B 总线专用集成电路及产品	(67)

2.7 MIL-STD-1773 总线	(68)
2.7.1 MIL-STD-1773 总线拓扑结构	(68)
2.7.2 MIL-STD-1773 协议概述	(69)
2.8 ARINC659 总线	(70)
2.8.1 ARINC659 总线拓扑结构	(70)
2.8.2 ARINC659 协议概述	(71)
2.8.3 ARINC659 总线协议芯片简介	(74)
2.8.4 ARINC659 总线协议芯片相关产品	(76)
2.8.5 ARINC659 总线配置工具	(77)
2.9 Mil-1394b 总线	(77)
2.9.1 1394 总线发展	(77)
2.9.2 Mil-1394b 总线特点	(78)
2.9.3 Mil-1394b 总线协议概述	(79)
2.9.4 Mil-1394 总线拓扑结构	(81)
2.9.5 Mil-1394b 总线专用集成电路及产品	(85)
2.10 AFDX 网络	(86)
2.10.1 AFDX 网络拓扑结构及组成	(87)
2.10.2 AFDX 网络协议	(89)
2.10.3 AFDX 网络专用集成电路及产品	(96)
2.10.4 AFDX 网络应用	(96)
2.11 光纤信道	(96)
2.11.1 光纤信道拓扑结构	(97)
2.11.2 光纤信道协议	(99)
2.11.3 光纤信道专用集成电路及产品	(109)
2.11.4 光纤信道技术在航空机载网络中的应用	(109)
2.12 ARINC818 总线	(112)
2.12.1 ARINC818 拓扑结构	(112)
2.12.2 ARINC818 协议概述	(112)
2.13 TTP 总线	(114)
2.13.1 TTP 总线拓扑结构	(114)
2.13.2 TTP 总线协议概述	(115)
2.14 TTE 网络	(117)
2.14.1 TTE 网络构件	(117)
2.14.2 TTE 网络拓扑结构	(118)
2.14.3 TTE 网络协议概述	(119)
2.15 机载总线/网络技术比较与分析	(121)
第3章 航空专用集成电路设计技术	(124)
3.1 专用集成电路技术	(124)
3.1.1 概述	(124)

3.1.2	ASIC 设计与实现的关键技术	(124)
3.1.3	ASIC 技术的发展趋势	(127)
3.2	系统级芯片技术 (SoC)	(127)
3.2.1	概述	(127)
3.2.2	SoC 设计及实现关键技术	(129)
3.2.3	SoC 技术在军事及航空领域的应用	(148)
3.2.4	SoC 技术发展趋势及面临的挑战	(148)
3.3	微机电系统技术	(151)
3.3.1	概述	(151)
3.3.2	MEMS 器件分类	(152)
3.3.3	MEMS 设计及实现关键技术	(153)
3.3.4	MEMS 技术在航空航天领域的应用	(155)
3.3.5	MEMS 技术的现状	(156)
3.4	多芯片组件 (MCM)	(156)
3.4.1	概述	(156)
3.4.2	MCM 特点	(156)
3.4.3	MCM 分类	(157)
3.4.4	MCM 设计及实现关键技术	(158)
3.4.5	MCM 技术在航空领域的应用	(165)
3.4.6	MCM 技术的现状与发展趋势	(165)
3.5	系统级封装技术 (SiP)	(166)
3.5.1	概述	(166)
3.5.2	SiP 设计及实现关键技术	(166)
3.5.3	SiP 技术在航空领域的应用	(168)
第 4 章	航空离散量转换的 ASIC 小型化设计与实现	(170)
4.1	概述	(170)
4.2	应用背景	(171)
4.2.1	离散量的应用领域	(171)
4.2.2	常规离散量的处理方式	(171)
4.2.3	离散量信号的环境和电气特性要求	(174)
4.2.4	离散量信号采集系统的共性要求	(175)
4.2.5	常规离散量处理的局限性	(176)
4.3	离散量转换单片解决方案	(177)
4.3.1	离散量数字接口芯片功能规划	(178)
4.3.2	离散量数字接口芯片设计流程	(178)
4.4	离散量数字接口芯片系统设计	(180)
4.4.1	离散量处理	(180)
4.4.2	离散量数字接口芯片系统架构设计	(180)
4.5	离散量数字接口芯片设计与验证	(183)

4.5.1	模块设计	(183)
4.5.2	离散量数字接口芯片验证	(194)
4.6	离散量数字接口芯片物理设计	(196)
4.6.1	设计工具	(196)
4.6.2	布局规划	(196)
4.6.3	版图绘制	(196)
4.6.4	物理设计检查	(197)
4.6.5	离散量数字接口电路版图	(199)
4.7	芯片封装	(199)
4.8	离散量数字接口芯片功能验证及系统应用方案	(199)
4.8.1	GJB 181A 耐受性测试	(199)
4.8.2	可靠性试验	(201)
4.8.3	ATE 功能测试	(201)
4.8.4	系统板测试	(201)
4.8.5	DO-160F 间接雷效应耐受性测试	(203)
4.9	离散量芯片的应用及方案比较	(205)
4.9.1	系统应用	(205)
4.9.2	离散量处理方案对比	(205)
4.10	小结	(207)
第5章	HKS1553BCRT 设计与实现	(208)
5.1	HKS1553BCRT 设计流程	(208)
5.2	HKS1553BCRT 研制背景	(208)
5.3	HKS1553BCRT 需求分析	(210)
5.4	HKS1553BCRT 系统级设计	(212)
5.4.1	高速 1553B 传输指标体系研究	(212)
5.4.2	软硬件功能划分	(231)
5.4.3	软硬件接口定义	(232)
5.4.4	HKS1553BCRT 硬件架构设计	(240)
5.4.5	HKS1553BCRT 软件规划与设计	(242)
5.5	HKS1553BCRT 逻辑级设计与验证	(243)
5.5.1	模块级设计及验证	(243)
5.5.2	集成互连	(264)
5.5.3	软硬件协同验证	(266)
5.6	HKS1553BCRT 物理设计与验证	(279)
5.6.1	概述	(279)
5.6.2	物理设计策划	(280)
5.6.3	设计准备	(281)
5.6.4	逻辑综合	(281)
5.6.5	可测性设计	(282)

5.6.6	芯片版图规划	(283)
5.6.7	布局布线	(286)
5.6.8	等效性检查	(287)
5.6.9	静态时序分析	(288)
5.6.10	后仿真	(289)
5.6.11	总结	(289)
5.7	HKS1553BCRT 封装、测试	(290)
5.7.1	封装	(290)
5.7.2	芯片测试	(290)
5.8	HKS1553BCRT 样片功能验证及系统应用验证	(291)
5.8.1	基于样片的功能测试	(293)
5.8.2	协议符合性测试	(293)
5.8.3	系统应用验证	(293)
5.9	基于 HKS1553BCRT 芯片的系统应用解决方案	(293)
5.9.1	系统方案概述	(293)
5.9.2	最小系统设计	(296)
5.9.3	配套软件设计	(296)
5.9.4	基于 HKS1553BCRT 的货架产品	(304)
5.10	小结	(306)
第 6 章	HKS664ES 的设计与实现	(307)
6.1	AFDX 网络协议及端系统应用概述	(307)
6.2	设计流程	(309)
6.3	系统级设计	(309)
6.3.1	协议解读	(309)
6.3.2	需求分析	(311)
6.3.3	系统架构设计	(312)
6.4	模块设计及仿真验证	(316)
6.4.1	IP/模块级设计与验证介绍	(316)
6.4.2	ARM922T 处理器功能概述	(319)
6.4.3	PCI 总线控制器设计与验证	(320)
6.4.4	以太网 MAC 设计与验证	(326)
6.4.5	中央控制单元设计与验证	(330)
6.5	IP/模块集成互连及验证	(335)
6.5.1	IP/模块集成互连概述	(335)
6.5.2	全局功能模块开发	(336)
6.5.3	HKS664ES 集成互连	(338)
6.6	软硬件协同验证	(339)
6.6.1	软硬件协同验证策划	(339)
6.6.2	虚拟原型软硬件协同验证	(347)

6.6.3	FPGA 原型软硬件协同验证	(349)
6.7	后端物理设计及验证	(354)
6.7.1	芯片特点分析	(354)
6.7.2	物理设计流程	(355)
6.7.3	可测试设计	(356)
6.7.4	版图布局布线	(358)
6.7.5	后仿真	(359)
6.7.6	SignOff 检查验证	(359)
6.8	流片、封装、测试	(359)
6.8.1	概述	(359)
6.8.2	流片加工	(359)
6.8.3	封装	(360)
6.8.4	芯片测试	(361)
6.9	样片功能验证及系统应用验证	(362)
6.9.1	基于样片的板级测试验证	(362)
6.9.2	基于样片的协议符合性测试验证	(363)
6.9.3	基于样片的系统应用验证	(368)
6.10	基于 HKS664ES 芯片应用解决方案	(370)
6.10.1	概述	(370)
6.10.2	最小系统设计	(371)
6.10.3	配套软件设计	(373)
6.10.4	基于 HKS664ES 的货架产品	(378)
6.11	小结	(384)
第7章	智能多路串行接口 MCM 设计与实现	(385)
7.1	概述	(385)
7.2	智能多路串行接口模块概述	(385)
7.2.1	基本原理	(385)
7.2.2	系统组成	(386)
7.2.3	软件配置	(388)
7.3	智能多路串行接口 MCM 设计与验证	(390)
7.3.1	概述	(390)
7.3.2	智能多路串行接口 MCM 设计流程	(390)
7.3.3	智能多路串行接口 MCM 系统设计	(392)
7.3.4	智能多路串行接口 MCM 封装结构及基板设计	(394)
7.3.5	智能多路串行接口 MCM 热分析	(395)
7.3.6	智能多路串行接口 MCM 基板加工及 MCM 组装	(397)
7.3.7	智能多路串行接口 MCM 测试与验证	(400)
7.4	智能多路串行接口 MCM 关键技术	(403)
7.4.1	一体化封装外壳技术	(403)

7.4.2 电阻排芯片	(404)
7.4.3 带式炉多层陶瓷烧结技术	(405)
7.4.4 细线丝网印刷技术	(406)
7.5 总结	(406)
第8章 航空集成电路体系建设探索	(407)
8.1 概述	(407)
8.2 航空集成电路自主可控思考	(408)
8.3 航空集成电路体系规划	(410)
8.4 航空专用集成电路技术体系	(412)
8.4.1 概述	(412)
8.4.2 航空专用集成电路定义及产品顶层规划技术	(412)
8.4.3 集成电路设计技术	(414)
8.4.4 航空专用集成电路技术	(449)
8.5 航空集成电路研制质量保证体系	(466)
8.5.1 需求的获取、表征、实现及充分验证	(467)
8.5.2 设计实现过程中的可信性	(468)
8.5.3 HDL 编码标准、代码质量及评测体系	(469)
8.5.4 技术状态管理	(469)
8.5.5 项目管理	(470)
8.5.6 外协加工质量控制	(470)
8.5.7 总结	(471)
8.6 航空集成电路可靠性体系	(471)
8.6.1 概述	(472)
8.6.2 航空集成电路的可靠性特性	(473)
8.6.3 航空集成电路的可靠性研究	(473)
8.7 小结	(477)
参考文献	(478)
附录	(484)

第1章 航空专用集成电路导论

微电子产业是关系到国民经济和社会发展全局的基础性、先导性和战略性产业，是国家发展水平和综合国力的重要标志，是新一代信息技术发展的核心和关键。超高容量、超小型、超高速、超高频、超低功耗是信息技术无止境追求的目标，是微电子技术和产业迅速发展的永恒动力。以微电子技术为核心的信息技术革命，正在以惊人的速度和多种方式改变着我们生活的各个方面，使我们无时无刻都能感受到它的存在。

面向应用领域的专用微电子技术，最先起源于军事应用，其能够更进一步地挖掘微电子技术的潜能，使它发挥更大的作用和效能。现代战争已经是电子战和信息战为特点、以集成电路为关键技术的高科技战争。

面向航空应用的微电子技术有效地支撑了航空电子系统的研制，促进了航空产业的发展。西方国家的航空电子设备供应商为了保持在航空电子系统的领先地位，大量采用先进微电子技术，大力发展以航空专用集成电路和元器件为核心的航空微电子技术，给航空电子系统带来了巨大的性能提升。本章在讲述微电子技术及专用集成电路的基础上对航空微电子技术及其国内外产业进行概述，使读者对航空专用集成电路的基本概念和技术体系有一个基本了解。

1.1 微电子技术及发展

1.1.1 概述

在人类发展的历史长河中，生产力是推动社会发展的决定性力量，生产力的每一次巨大飞跃都与重大技术的出现和广泛应用息息相关。技术是人类运用所掌握的知识、工具及技能解决实际问题的有效方法和手段，每一项重大技术的出现必将给人类带来翻天覆地的变化。燧石取火使人类走出了茹毛饮血的野蛮时代，开始步入文明；石器工具的制作和使用以及农牧技术的出现为人类创造出比以往更多的物质财富，最终推动着人类进入了奴隶社会；随着金属冶炼和制造技术被人类逐渐掌握，大量的青铜器和铁器出现在人们的生产和生活中，大大推动了社会生产力发展和人类文明的进步，并促使了封建时代的到来。人类技术水平的不断提高，推动着生产方式的改变，当原有的以手工作坊为主的生产方式无法满足生产力的发展时，便迎来了资本主义革命，使生产力得到解放，人类进入了财富快速积累的资本主义社会。到了近代，技术对生产力的推动作用更加明显，18世纪蒸汽机的发明和广泛应用产生了近代纺织业和机械制造业，人类进入利用机器来延伸和拓展人类体力劳动的时代，引发了人类社会第一次工业革命；19世纪下半叶，随着发电机发明并被大量应用于工业，引发了第二次技术革命，使人类进入了电气化时代；当前，我们正经历着一场以微电子技术为核心的信息技术革命，即第三次技术革命，它正以前所未有的速

度，深刻地影响和改变着我们生活的各个方面，使我们时时刻刻都能真切地感受到它的存在。

由智人演变为现代直立人，经历了 20 多万年的漫长时间。这 20 多万年分为石器时代、铜器时代和铁器时代。目前我们已经进入信息时代，而信息的特征性材料是硅，人类的历史因而正式进入了一个“硅器时代”。

以“硅”为基础的微电子产品全面渗透于现实生活中的每一个角落，为我们服务，改变我们的生活方式。硅是地壳中除氧以外含量最丰富的元素，许多岩石的主要成分都是二氧化硅，这样一块黑褐色小片，肉眼看上去没有任何吸引人的地方，经过人们的创新设计和数百道微电子工艺加工制成的集成电路，将人类的智慧与创造固化在硅芯片上，成为知识创新的载体，其价值可达上万美元，这就是典型的“点石成金”。这种“点石成金”的微电子技术是近代科学的最伟大的奇迹之一，不仅成为现代产业和科学技术的基础，而且正在创造着代表信息时代的硅文化（Silicon Culture）。

人类历史学家往往将人类物质文明归功于工具的制作和使用，若以材料使用作为文明阶段的标识，那么人类的科学发展过程也可以看成是一个不停地寻找和使用新材料的过程。但上帝似乎和人类开了一个玩笑，用了 20 万年的时间我们的材料从“石器时代”的“石头”又回到了“硅器时代”的石头！然而，其间每一次时代的变更都象征着人类科学和技术的一次质的飞跃，也正是由于科学和技术的发展才推动了人类社会的前进。从 1948 年第一支晶体管诞生至今仅有 60 多年的时间，但是人类在这 60 多年时间内创造的财富是过去几个时代的总和。

微电子的“微”原是微小的意思，与微缩景观、微缩胶卷、微雕艺术中的“微”字意义相近。微雕艺人把几十个字刻在头发上已令人赞叹，而我们现在可以利用微电子技术指甲大小的硅片上集成数十亿个电子元器件。这项优秀的技术和学科的诞生归功于晶体管的发明，它具有深刻的科学理论突破、文化背景支撑、经济基础后盾以及需求推动。

经过 18 世纪的工业革命和 19 世纪的技术革命，科学技术对生产力的推动作用得到了前所未有的展现，人类社会创造了空前的物质财富，科学技术也得到了前所未有的发展。在不到 200 年的时间里，人类征服了天空，开始对无垠的宇宙进行探索，同时物理学也得到了巨大的发展。1900 年普朗克量子理论建立、1905 年爱因斯坦提出狭义相对论、1915 年广义相对论诞生，之后海森堡、薛定谔提出量子力学理论体系，人类开始了对微观物理世界的深入研究，从此进入了量子时代。20 世纪 30 年代现代物理学的建立，大大推动了现代电子信息技术革命，同时固体物理学、量子力学、统计物理学等学科的发展也为微电子技术的诞生提供了理论基础。只有在量子理论基础上的固体物理、半导体物理理论得到发展后，晶体管才能从设想变为现实，才能最终促成集成电路的出现。

20 世纪 50 年代，微电子技术首先出现在美国，这并非偶然，而是科学技术的发展和美国特殊的历史和文化共同作用的结果。美国是一个移民国家，从诞生之初便决定了它的文化的特殊性。多种不同的文化、种族及宗教长期融合，使其在文化上具有多元性，对外来文化有很强的包容性，这吸引了大量具有不同文化背景和专业知识的优秀人才来到这里共同工作，使这里汇聚了大量先进的思想和技术，形成了适合微电子技术诞生的土壤和文化背景。

1776年7月4日,《独立宣言》的宣布标志这个新兴国家的诞生。经过独立战争和南北战争结束了动荡的战争时代,进入了一个平稳快速发展的阶段。到1894年美国的工业总产值已跃居世界第一。两次世界大战,美国成为了最大的赢家,经济、军事力量快速膨胀,造就了其世界霸主的地位,促使美国将很多新技术应用在军事领域,并加大了美国对新技术研究及应用的投入,为微电子技术的诞生提供了良好的经济基础。

微电子技术是使电子元器件和由它组成的电子装备微型化的技术,是在电子电路和系统的超小型化和微型化过程中逐渐形成和发展起来的。第二次世界大战中后期,由于军事需要对电子设备提出了不少具有重要意义的设想,并研究出一些有用的技术。20世纪50、60年代,美国经济处于一个国民经济军事化的阶段,为了满足陆、海、空、天的不断发展对高科技武器装备高性能的迫切要求,大量使用先进的微电子技术减轻电子设备的重量^①、减小体积、降低功耗,实现电子装备小型化,这些要求都与微电子技术固有的特点不谋而合。

早在20世纪初,人们掌握了电子在真空中的运动基本规律,发明了真空三极管(电子管),开创了电子技术的新领域。但是真空三极管的使用效率非常低,加上灯丝过热,使用时间短,特别是处理高频信号的效果不理想,科学家们一直在寻找新的材料来代替真空管。1947年12月23日,美国贝尔(Bell)实验室的威廉·肖克利(William Shockly)等人制造出了世界上第一只半导体晶体管,标志着微电子技术的诞生。从此电子技术从真空转为固体,电子设备开始了小型化、轻量化和节能化的进程。1958年由于半导体表面技术的发展,可以在半导体表面形成晶体管,经过导线连接形成集成电路。集成电路的发明,使各种电子设备进一步小型化、轻量化和节能化。1967年大规模集成电路研制成功,1978年超大规模集成电路研制成功,从此电子技术进入微电子时代。

微电子学是从固体物理学和半导体物理学发展而来的,是电子学的一个分支。微电子学最初倾向于理论研究,属于物理类学科,主要研究电子在固体材料中的运动规律。很多教育部直属的综合大学物理系一般都设有该专业,开设的课程主要包括半导体物理、固体物理学、器件物理学及量子力学等。随着基础理论逐渐成熟,微电子学逐渐从物理类学科发展演变成了技术性专业学科,其内容也不再仅限于基础理论的研究,而是更倾向于利用理论知识在固体(主要是半导体)材料上实现微小型化电路及电路系统,并利用它实现信号处理功能。现在的微电子学已经发展成为一门综合性很强的前沿学科,包括了半导体器件物理、集成电路工艺和集成电路及系统的设计、测试、制造等多方面的内容,涉及固体物理学、量子力学、热力学与统计物理学、材料科学、电子电路、信号处理、计算机辅助设计、测试和加工、图论、化学等多个领域。随着器件的特征尺寸越来越小,空间尺度进入纳米量级、时间尺度进入飞秒量级,电子已不能被简单地视为一种纯粹的粒子,其波动性质再也不能被忽视,这时电子所表现出来的波动特征和拥有的量子功能就成为了纳米电子学的任务。纳米电子学主要研究以扫描隧道显微镜为工具的单原子或单分子操纵技术。随着纳米级加工技术的成熟,纳米级器件已成为现实,纳米电子学将会继续推动微电子技术朝着更高密度的方向发展。科学家们已经预言,纳米电子学将导致一场电子技术的

① 本书中重量均指质量。