



21 世纪电子电气工程师系列

半导体器件

双色

〔日〕 正田英介 主编
春木 弘 编著

ART 21
电子电气工程师

3

科学出版社

OHM 社

21 世纪电子电气工程师系列

半导体器件

〔日〕正田英介 主编

春木 弘 编著

邵志标 译

郑美珍 校



科学出版社 OHM 社

2001 北京

图字:01-2000-3682 号

Original Japanese edition

Anute 21 Handoutai Device

Edited by Hiromu Haruki

Copyright © 1999 by Hiromu Haruki

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press.

Copyright © 2001

All rights reserved.

本书中文版权为科学出版社和 OHM 社所共有

アルテ21

半導体デバイス

春木 弘 オーム社 1999

图书在版编目(CIP)数据

半导体器件/[日]春木 弘编著;邵志标译.-北京:科学出版社,2001

(21世纪电子电气工程师系列/[日]正田英介主编)

ISBN 7-03-009728-9

I. 半… II. ①春… ②邵… III. 半导体器件 IV. TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 059630 号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2001 年 10 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2001 年 10 月第一次印刷 印张: 6 1/8

印数: 1—5 000 字数: 182 000

定 价: 17.50 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

主编的话

当今,电子设备已广泛应用于国民经济的各个领域。为了用好这些电子设备,科技人员必须掌握电子技术方面的有关知识。目前,电子技术的应用领域也在迅速扩展,人材需求量很大的状况一直没有改变。因此对电子工程专业的毕业生有必要从应用的角度进行二次培训,也有必要为非电专业的技术工作者学习电气电子技术的基础知识创造更多的机会。

为了适应这一形势的需要,组织编写了“21世纪电子电气工程师系列”丛书,目的是要编写一套全面系统介绍电子电气专业基础知识的,既适用于企业技术人员培训,也适于非电专业技术人员阅读的新型教科书。丛书编委都是在日本有名的电子电气企业中长期从事职工教育培训的专家,丛书结构及各册内容均由编委会讨论决定。

本套丛书的特点首先表现在教材内容紧密联系实际。通过产品和技术模型说明基础知识与产品、系统的关系,通过具体产品的结构和系统中所发生的现象说明其工作原理或理论。另外,本丛书的所有执笔者都是在相应企业中长期从事实际技术工作或从事职工教育工作的专家,所以具有丰富的实际经验,书中的举例和例题都是他们多年工作经验的结晶。

此外,在电子技术的专业教学中,由于所涉及内容非常广泛,所以以往在对教学内容细化的同时常常忽略了对基础内容的充分消化。本丛书充分注意到了这一问题,从现象入手说明原理,从而保证了基础知识易学易懂,教材内容紧密联系实际。本丛书还可用于大专院校的专业课教学。

由于受产业全球化和社会环境的影响,21世纪的工程学科必将会发生巨大的变化。读者通过对本套丛书的学习,可以对新时期的电子技术知识有较系统的了解,并在各种领域的产品和系统的革新中充分发挥自己的聪明才智。

东京理科大学教授,工学博士

正田英介

21 世纪电子电气工程师系列

编辑委员会

主 编 正田英介（东京理科大学 前东京大学）

编 委 楠本一幸（株式会社东芝）
岛田 弥（三菱电机株式会社）
高木正藏（东芝综合人材开发株式会社）
常深信彦（株式会社日立制作所 日立京滨工业专科学院）
丹羽信昭（东京电力株式会社 综合研修中心）
春木 弘（前富士电机株式会社）
吉冈芳夫（金泽工业大学 前株式会社日立制作所）
吉永 淳（福井工业大学 前三菱电机株式会社）

执 笔 长坂浩生（前株式会社东芝）
望月 博（前株式会社东芝）
春木 弘（前富士电机株式会社）
川野 努（三菱电机株式会社）
杉本浩志（株式会社日立制作所 日立京滨工业专科学院）
吉田澄男（株式会社日立制作所 日立京滨工业专科学院）
田中寿实夫（株式会社东芝）
常深信彦（株式会社日立制作所 日立京滨工业专科学院）

前 言

半导体器件作为电子装置的大脑、电力控制的中心,在我们周围已得到广泛应用。从字面上看,“半导体器件”似乎只指一种器件,但实际上,它代表的是一个从信息的放大、计算、存储直到功率转换,甚至光电转换等多个分支领域中具有多种功能的各种器件的集合,而且与每一种器件相关的都是一个很大的技术领域,其中都需要众多科技人员为之潜心钻研。

虽然在各相关技术领域都出版过与本领域有关的半导体器件方面的入门书或专著,但本书旨在博采众家之长汇集于一册,对与各相关技术领域有关的内容进行遴选、归纳,给出为对半导体有一个基本了解所必需的最低限度的基础知识。因而,本书不仅适合因工作需要希望学习半导体知识的非该专业人员,也有助于半导体专业技术人员拓宽知识面,了解本领域新的或相关的器件知识并灵活应用。

本书结构安排如下:

第1章 主要是半导体基础知识入门,包括 p 型、n 型半导体的概念、pn 结、晶体管工作原理等。

第2章 应该说这一章是半导体制造技术大全,内容包括集成电路(IC)设计、硅芯片工艺和封装工艺等知识。

第3章 介绍半导体分立器件,重点是难以实现集成化的功率器件,介绍该类器件的工作原理、特性和应用。

第4章 介绍模拟集成电路的设计方法、pn 结结构,以及各种模拟集成电路的应用举例。

第5章 介绍逻辑 IC 的基本特性,各种标准逻辑 IC 系列,各种半定制逻辑 IC 的基本结构、特点等。

第6章 介绍微处理器的构成和功能、单片微型计算机等方面的知识。

第7章 介绍半导体存储器的基本构成和写入、读出方法,以及各种半导体存储器的构成、工作原理和应用举例。

除了以上内容外,在最后的第8章中还介绍了我们日常生活中广泛应

用着的光电转换器件的有关知识。

本书各章分别由下述各位执笔：第1章由长坂浩生，第2章由望月 博，第3章由春木 弘，第4章由川野 努，第5章由杉本浩志，第6章由吉田澄男，第7章由田中寿实夫，第8章由常深信彦。在本书的策划、出版过程中，得到了编委会主任、东京理科大学正田英介教授的指导，以及日本欧姆社(OHMSHA)有关各位的支持和帮助，在此谨表谢意。

愿本书的出版对希望获得半导体器件知识的技术人员有所帮助，即使有一点收获，也会使编者感到万分荣幸。

春木 弘



半导体器件

内 容 简 介

“21 世纪电子电气工程师系列”是企业技术/管理干部知识更新用新型教科书。丛书特点是重视理论联系实际,用现象说明原理。反映该专业领域最新进展,通过产品与技术模型揭示学科基础知识。丛书各册执笔者均是在国际知名企业中长期从事技术、教育工作的专家。书中举例及例题均源于他们多年的工作实践。

本书主要介绍了半导体的基础知识、制造技术、半导体分立器件、模拟电路、逻辑集成电路、微处理器,以及存储器、其他半导体器件等。

本书可作为企业工程技术人员培训专用教科书,也可供高等学校相关专业及高、中级职业学校相关专业师生学习参考。

著者简介

正田英介

1965年 东京大学研究生院数理系博士
毕业

1965年 获工学博士

现 在 东京大学名誉教授
东京理科大学理工学部教授

春木 弘

1955年 大坂大学工学部电气工程专业
毕业

1957年 大坂大学研究生院硕士毕业

1957年~1998年
富士电机株式会社

1987年 获工学博士

译、校者简介

邵志标

1964年 西安交通大学数理系半导体物
理专业毕业

现 在 西安交通大学电子与信息工程
学院教授、博士生导师

郑美珍

1967年 复旦大学物理系无线电物理专
业毕业

现 在 西安交通大学高级工程师



北京东方科龙图文制作有限公司 制作
www.okbook.com.cn

目 录

第 1 章 半导体基础

1.1 概 述	1
1.2 能 带	1
1.3 n 型半导体与 p 型半导体	3
1.4 半导体中的电流	5
1.5 pn 结	6
1.6 晶体管	8
1.6.1 基极接地方式的工作机理	9
1.6.2 发射极接地方式的工作机理	10
1.7 MOSFET(金属-氧化物-半导体场效应 晶体管)	12
练 习 题	14

第 2 章 半导体制造技术

2.1 半导体器件的制造	15
2.2 设计流程	16
2.2.1 设计流程	16
2.2.2 CAD 工具	17
2.2.3 CAD 工具的任务	17
2.3 芯片工艺	19
2.3.1 氧 化	21
2.3.2 扩 散	22
2.3.3 离子注入	24

2.3.4	光刻	26
2.3.5	腐蚀	28
2.3.6	CVD	32
2.3.7	金属化工艺	33
2.4	封装工艺	34
2.4.1	管芯分割工艺	35
2.4.2	芯片粘贴	36
2.4.3	引线键合	36
2.4.4	模压(塑封)	37
2.4.5	封装	39
	练习题	42

第3章 半导体分立器件

3.1	功率器件的使用	43
3.2	各种二极管	44
3.3	典型的晶闸管的构造和工作原理	47
3.3.1	硅可控整流器	47
3.3.2	GTO 硅可控整流器	50
3.3.3	三端双向可控硅开关器件	51
3.4	双极型晶体管的特性和结构	52
3.4.1	静态特性	53
3.4.2	开关时间	54
3.4.3	集电极-发射极间的电压-电流特性和安全工作区	55
3.4.4	达林顿晶体管及其结构	57
3.5	MOSFET 的构造、工作原理和特性	59
3.5.1	结构和静态特性	59
3.5.2	开关特性	61
3.5.3	极限参数	62
3.5.4	应用	63

3.6	IGBT 的结构、工作原理及特性	63
3.6.1	结构和工作原理	64
3.6.2	开关特性	66
3.7	可靠性技术概要	67
3.7.1	可靠性	67
3.7.2	可靠性试验	68
3.7.3	失效分析	70
练 习 题		71

第 4 章 模拟集成电路

4.1	概 述	73
4.2	模拟集成电路的设计方法	75
4.2.1	规划、性能确定	76
4.2.2	电路(逻辑)设计	76
4.2.3	版图(lay out)设计	77
4.2.4	检验工序	78
4.3	使用双极型工艺的模拟 IC 的结构	78
4.3.1	元件间的隔离	79
4.3.2	电 阻	80
4.3.3	电 容	81
4.4	模拟 IC 中的 MOS 器件的定位及 CMOS 器件的特征	81
4.5	BiCMOS 工艺结构	83
4.5.1	BiCMOS 工艺特点	83
4.5.2	结构和元件的种类	84
4.6	模拟 IC 的应用举例	84
4.6.1	双极型模拟 IC	85
4.6.2	CMOS 模拟 IC	86
4.6.3	BiCMOS 模拟 IC	89
练 习 题		91

第 5 章 逻辑集成电路

5.1 逻辑集成电路的基本特性	93
5.1.1 传输特性	93
5.1.2 通态电平、关态电平	94
5.1.3 信号幅度	94
5.1.4 阈值电压:L 和 H 的界限	94
5.1.5 噪声容限(noise margin)	94
5.1.6 逻辑 IC 的性能指标	94
5.2 标准逻辑 IC	96
5.2.1 风靡一时的 TTL	97
5.2.2 功耗小的 CMOS IC	100
5.2.3 双极与 CMOS 结合的 BiCMOS	103
5.2.4 高速 ECL 逻辑 IC	104
5.3 半定制逻辑 IC	106
5.3.1 PLD,FPGA	107
5.3.2 门阵列	108
5.3.3 库单元 IC	110
5.4 全定制逻辑 IC	111
练习题	111

第 6 章 微处理器

6.1 概 述	113
6.1.1 微处理器的定义	113
6.1.2 微处理器的发展史	113
6.2 微处理器的 CPU 结构	116
6.2.1 CPU 的结构	116
6.2.2 CISC 和 RISC	119
6.2.3 CPU 总线	120
6.2.4 CPU 和存储器	121

6.2.5 CPU 和 I/O	122
6.3 单片微计算机	124
6.3.1 单片微计算机的种类	124
6.3.2 单片微计算机实例	125
练习 题	126

第 7 章 存储器

7.1 半导体存储器的发展和分类	127
7.2 常见实用存储器的结构	129
7.2.1 电容和数字电路	129
7.2.2 引脚功能	131
7.2.3 存储器的基本构成	132
7.2.4 封装小型化的转换卡:多路传输地址	135
7.3 各种存储器的工作原理	136
7.3.1 DRAM 的工作原理	136
7.3.2 SRAM 的工作原理	142
7.3.3 掩模 ROM 的工作原理	144
7.3.4 PROM 的工作原理	146
7.4 各种存储器的应用	152
7.4.1 计算机与存储器的关系	152
7.4.2 半导体存储器的比较	153
7.4.3 存储器应用举例	154
练习 题	157

第 8 章 其它半导体器件

8.1 发光二极管(LED)	159
8.1.1 发光二极管的用途	159
8.1.2 发光二极管的结构	160
8.2 太阳能电池	163

8.2.1	太阳电池的用途	163
8.2.2	太阳电池的种类与结构	164
8.3	半导体激光	166
8.3.1	半导体激光器的用途	166
8.3.2	半导体激光器的构造	167
8.4	固体摄像器件(图像传感器)	168
8.4.1	固体摄像器件的用途和种类	168
8.4.2	CCD 图像传感器(固体摄像器件)	169
	练习题	170
	练习题解答	173

第 1 章 半导体基础

本章从原子中电子的性质谈起,并应用能带的概念来说明。什么是半导体?它具有哪些电特性?文中也介绍一些半导体特有的术语,接着对第2章以后将要介绍的各种各样器件的基本构成要素 pn 结、双极型晶体管、MOSFET 及其结构和基本工作等作一概述。

1.1 概 述

所谓半导体,顾名思义是指其导电性具有介于导体(金属)和非导体(绝缘体)之间的物质,用表征电流流过的难易程度的电阻率 ρ 来衡量,金属的电阻率是 $10^{-10} \Omega \cdot \text{cm}$ 左右,绝缘体是 $10^8 \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 左右,而半导体大约在 $10^{-6} \sim 10 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围。

但是,半导体不仅仅是电阻率与导体和绝缘体有所不同,而且具备各种特有的性能。正是利用了这些特性,使今天的半导体器件(二极管、晶体管、IC 等)取得了举世瞩目的发展。作为半导体器件所使用的物质,大部分是硅(Si),而对于光电器件、微波器件等特殊用途则采用以砷化镓(GaAs)为代表的化合物半导体材料。

1.2 能 带

半导体器件的电特性是由带电粒子在半导体中如何运动来决定的。带电粒子运动表明它具有能量,在本节我们来讨论一下带电粒子能量的问题。

通常,单原子中的电子处于原子核的控制下,由于没有得到足够的能

量,不能离开原子核。但是,一旦原子大量聚集而组成晶体时,原子中的电子就会脱离原子核的控制,成为在晶体中自由运动的电子。将此从能量角度来解释,则如图 1.1 中所示的 Si 原子那样,单个原子内的电子各处于某种确定的能量状态(将该状态称为**能级**,并用一条直线表示),电子不能脱离这个能级。但是,如图 1.2 所示,当许多原子聚集构成晶体时,各原子的能级密集在一起,在晶体中形成分裂的单原子能级的集合体(大量的、能量很接近的能级)称之为**能带**,而能带之间的间隙叫做**禁带**。

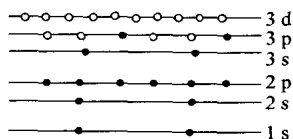


图 1.1 Si 原子内电子能级和电子分配

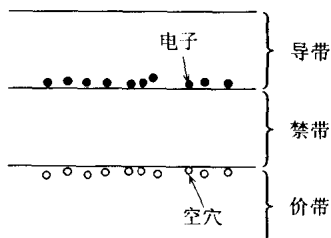


图 1.2 半导体的能带

一般原子中,内层电子的能级被电子填满,当原子组成晶体后,与这些内层的能级相对应的能带也是被电子填满的,能量最高的是价电子填充的能带,称之为**价带**。价带以上的能带基本上没有电子,能量最低的能带称为**导带**。所以能带有三种,相对于电子的能量而言,按能量自高往低的顺序,分别称为**导带**、**禁带**和**价带**。

当温度 $T=300\text{K}$ 左右时(常称室温),硅价带上方的电子,取得热能量跃迁到导带,如果对导带上的电子施加电压,就会在晶体中自由地运动,这就形成电流。另一方面,由于原来价带中无空隙地充满着电子,当有电子跃迁到导带,则在价带上出现了电子的空位,这些空位像带正电的粒子一样在晶体中运动,把这个虚拟的粒子称为**空穴**。如果对空穴施加电压,则空穴也会在晶体中运动形成电流。

我们将这些电子和空穴称为**载流子**。所谓载流子就是“搬运工”的意思,而电子和空穴搬运的是电荷。也就是说,必须注意到在半导体中,不仅存在带负电的载流子(电子),而且还存在带正电的载流子(空穴)。