

U 21 世纪大学新型参考教材系列

电子器件

〔日〕 梅野正义 编著

Inter
University



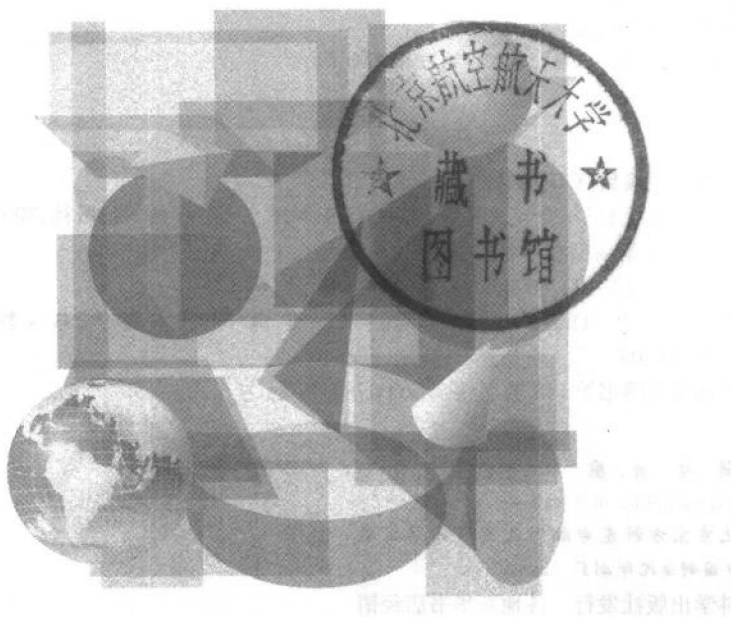
00129425



21 世纪大学新型参考教材系列

电子器件

[日] 梅野正义 编著
邵春林 王 钢 译



科学出版社 OHM 社
2001. 北京



北航 C0547951

FQ18/5

图字:01-2000-1573 号

Original Japanese edition

Intaa Yunibaashitei Denshidebaisu

Edited by Masayoshi Umeno

Written by Masayoshi Umeno, Kentarou Itou, Takashi Egawa, Takashi Mizutani, Tetsuo Soga and
Kiyoshi Yoneda

Copyright © 1997 by Masayoshi Umeno

Published by Ohmsha, Ltd.

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

Copyright © 2000

All rights reserved.

本书中文版权为科学出版社和 OHM 社所共有

インターユニバーシティ

電子デバイス

梅野正義 オーム社 1997 第1版第1刷

图书在版编目(CIP)数据

电子器件/[日]梅野正义编著;邵春林,王钢译. - 北京:科学出版社,2001

21 世纪大学新型参考教材系列

ISBN 7-03-00-008988-X

I. 电… II. ①梅… ②邵… ③王… III. 电子器件-高等学校-教学参考资料
IV. TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 81786 号

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

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 3 月第 一 版 开本:A5(890×1240)

2001 年 3 月第一次印刷 印张:4 1/2

印数:1—5 000 字数:131000

定 价:12.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

中译本序

电子学的迅速发展为现代信息化社会的发展打下了坚实的基础,并将更进一步地推动信息化社会的发展。电子学的基础是电子器件,特别是半导体晶体管发明以来,以硅材料为主的电子器件在可靠性、成本、价格、速度以及适应批量生产等方面都比真空管优越得多。此外,最近卫星转播、移动电话、车载电话等高速、简易电话及因特网的迅速发展,都离不开砷化镓等化合物半导体电子器件及光电器件。

为了在实际应用中充分发挥电子器件的特长,实现信号处理与放大的目的,必须认真学习电子器件的基本原理。同时,科研和技术人员还必须掌握与电子器件有关的各个领域的专业知识,以适应时代发展的要求。

本书通俗易懂地阐述了半导体的基本物理性质及电子器件的结构和特性。由于篇幅的限制,虽然省略了一些公式的推导过程,但对基本概念都作了深入浅出的讲解,并且力求保持内容的连贯性。

本书在每一章的开始部分均简要地介绍了该章的内容。同时,书中还穿插有“篇外话”作为正文中相关内容的补充说明。为了方便读者理解书中内容,章末附有习题,并在书后给出了部分答案。

本书可作为通信、信息工程专业的大学教课书,也可以作为研究生及在企业中从事电子器件研究、开发的技术人员的参考书。我希望本书能对想学习、掌握电子器件基本原理的读者有所帮助。

最后,衷心感谢中国科学出版社,日本欧姆社对出版本书中文版的支持,感谢译者和有关人员为出版本书付出的辛勤劳动。

梅野正义

2000年8月盛夏

译者序

电子技术的高度发展为计算机和通信技术的发展打下了坚实基础,电视、电话、传真、计算机等的普及,特别是全球因特网的联网,使信息的传递有了飞速的发展,人类开始进入多媒体的信息时代。电子技术的高度发展也给人民的和社会经济活动带来了巨大的影响。今后,特别是在 21 世纪中,人类需要解决的许多问题都期待着电子技术的发展。因而,加速培养更多的掌握先进电子技术的人才是非常重要的,这是电子技术领域的教学工作者、科学研究工作者和技术人员的历史使命。

为此,将国外一些比较好的教材翻译成中文,介绍给广大的读者,是一项很有价值的工作。最近,由日本高校校际教材编辑委员会主任家田正之先生任主编,组织编著了一套电子工程教科书(欧姆社出版)。这一套教科书主要包括五大方面的内容:(1) 电子工程基础,(2) 电力工程,(3) 电子器件,(4) 信息通信,(5) 计测控制。每个方面均由丛书编委会的一位编委(日本中部地区高等学校知名的教授)负责,由教学科研第一线的教授专家们执笔编写而成的。其中的电子器件部分,已经出版了梅野正义编著的《电子器件》、荒井英辅编著的《集成电路 A》和《集成电路 B》、神保孝志编著的《光电子学》、中嶋坚志郎编著的《半导体工程学》等 5 册书。这些书具有内容新颖、重点突出、简单明了、流畅易懂等特点,每书各章的开始有该章的内容概要,章末附有习题,书后附有略解,以方便读者深入理解书中内容。书中还穿插有《篇外话》作为正文中相关内容的补充说明,书后列出了参考文献,供读者参考。

我们陆续将上述日文书翻译成中文,供电子专业的大学生或硕士研究生作为教材或教学参考书。也可供将要从事或者正在从事电子专业,特别是半导体专业的科研、生产、教学的年轻的朋友们阅读。

在翻译这些书的过程中,我们获得了能和原书编著者共同讨论书中内容这样一个良好的环境,使我们加深了对原书的理解,以便我们尽可能正确地将原书翻译成中文,同时对原书中个别误漏之处也及时作了更正。由于

原书的编者、执笔者对我们翻译工作的支持和帮助,使我们能在比较短的时间内完成这些书的翻译、校对工作。在此我们对原书的编者、执笔者的支持和帮助表示衷心的感谢。

同时,我们还要感谢日本欧姆出版社常务董事、出版局局长森正树先生以及有关人员对我们的翻译工作给予的支持和帮助。感谢科学出版社对出版这些高科技书籍给予的热情支持和帮助,感谢有关人员在出版本书时付出的辛勤劳动。

尽管译者作了多次的校正,但错误在所难免,希望读者批评指正。

邵春林

2000年10月

目 录

1 电子器件的学习方法

1.1 电子器件的发展史	2
1.2 本书的构成	4
1.3 电子器件的学习方法	5
练 习 题	6

2 半导体器件的基础

2.1 本征半导体与非本征半导体	8
2.2 半导体的导电现象	11
2.3 载流子的扩散	13
2.4 过剩载流子电流	15
2.5 载流子的复合	18
练 习 题	24

3 pn 结及其势垒结构

3.1 pn 结的能带图	28
3.2 pn 结的伏-安特性	29
3.3 pn 结反向击穿特性	33
3.4 pn 结电容	34
3.5 隧道二极管	39
3.6 金属-半导体结	40
练 习 题	43

4 双极型晶体管及可控硅

4.1 双极型晶体管的工作原理	46
-----------------------	----

4.2 可控硅和大功率晶体管	54
练 习 题	59
5 单极型晶体管的工作原理	
5.1 单极型晶体管的种类	62
5.2 MOS 结构	63
5.3 MOS 晶体管的伏-安特性	67
5.4 结型场效应晶体管	70
5.5 金属-半导体场效应晶体管(MESFET)	73
5.6 静电感应晶体管	75
5.7 电荷耦合器件	77
练 习 题	80
6 半导体光器件	
6.1 光吸收及光辐射的机理	82
6.2 光探测器件的工作原理	84
6.3 太阳电池的工作原理	88
6.4 发光器件的工作原理	92
练 习 题	96
7 集成电路	
7.1 双极型晶体管技术	98
7.2 MOSFET 技术	103
7.3 MESFET 技术	110
7.4 集成电路尺寸的极限	114
练 习 题	120
练习题解答	121
参考文献	127

篇外话

pn 结	31
少数载流子注入	33
简并半导体	40
跨导与迁移率、速度之间的关系	75
光是什么	84
大气质量(AM)	91
外延生长	103
自对准技术	109
GaAs 肖特基结	112

电子器件的学习方法

晶体管诞生之后,仅仅几十年的时间内,电子器件的理论和制造技术就获得了飞速的发展。电子器件的应用和发展,不仅使技术得到进步,而且刺激了各工业领域的发展。由此产生的先进技术进一步使电子器件具有更新的功能。本章将简要地介绍电子器件的发展史,阐述学习电子器件知识的重要性。此外,还简要地介绍电子器件的学习方法。

1.1 电子器件的发展史

1947 年点接触型晶体管发明后不久,提出了结型晶体管理论。后来,结型晶体管的研制成功使电子学发展史从真空管时代进入了晶体管时代。在结型晶体管研制成功以后的几十年间,半导体工业得到了飞速的发展。电子器件本身也从初期的点接触型二极管、三极管发展到了大规模、超大规模集成电路。现在,已经形成了作为高技术产业代表的半导体工业。

首先,让我们来回顾一下电子器件的发展史。1906 年,De. Frest 发明了真空三极管,用来放大电话的音声电流。从那以后,人们强烈地期待着能够诞生一种固体器件,用来作为长寿命、轻量、廉价的放大器和电子开关。1947 年,终于发明了点接触型锗晶体管。点接触型锗晶体管的诞生,在电子器件的发展史上具有重要的划时代意义。但是,这种点接触型晶体管在构造上有着致命的弱点:接触点不稳定。

虽然在点接触型晶体管开发成功的同时,就提出了结型晶体管的理论。但是,结型晶体管是在获得超高纯度的单晶以及能够任意地控制晶体的导电类型以后才诞生的。最早的具有实用价值的锗合金型晶体管诞生于 1950 年,而结型硅晶体管则诞生于 1954 年。此后,人们提出了利用晶体表面的反型层制作场效应晶体管的构想。这以后,由于人们掌握了无缺陷结晶和缺陷控制等材料技术,以及晶体外延生长技术和扩散掺杂技术,发现了耐压氧化膜,加上腐蚀和光刻技术的进步,才诞生了各种优质的电子器件。

由于社会发展的需要,电子装置变得越来越复杂。这就要求电子装置必须具有可靠性好、速度快、消耗功率小以及轻量、小型化等特点,而且还要降低制造成本。自 20 世纪 50 年代提出集成电路的设想后,由于材料技术、器件技术和电路设计等综合技术的进步,终于在 60 年代制成了第一代集成电路。集成电路的诞生在半导体发展史上具有重要的作用。它的诞生和发展,推动了通信技术和计算机的进步,使科学的各个领域以及社会的各个工业部门发生了历史性的变革。卓越的技术诞生了集成电路,集成电路又产生了更先进的技术,这些先进的技术又进一步促使更高性能、更廉价的集成电路的出现。两者保持着良性循环。从而,推动了工业的发展,使社会更加

繁荣昌盛。这种趋势在今后还将得到继续。

表 1.1 总结了不断进步的电子器件的开发历程。表中给出了 50 年代以来每个年代的器件的尺寸(l)、体积($V=l^3$)、响应时间(T),以及工作频率(f)的大概值。典型的电子器件每隔 10 年,尺寸缩小到 1/10(即体积缩小到 1/1000),响应时间缩短到 1/100,而且传送信号的频率增加了大约 100 倍。和 20 世纪 50 年代的真空管相比,90 年代的电子器件的尺寸实际上缩小到万亿分之一($1/10^{12}$)。

表 1.1 电子器件开发的历程

年代	1950	1960	1970	1980	1990
器件	真空管	晶体管	IC (集成电路)	LSI (大规模集成电路)	VLSI (超大规模集成电路)
评价项目	收音机时代	电视时代	微波时代	卫星通信时代	光通信时代
尺寸 l	$\sim 5\text{cm}$	$\sim 5 \times 10^{-1}\text{cm}$ (5mm)	$\sim 5 \times 10^{-2}\text{cm}$ (0.5mm)	$\sim 5 \times 10^{-3}\text{cm}$ (50 μm)	$\sim 5 \times 10^{-4}\text{cm}$ (5 μm)
体积比 $v_r = V/V_{1955}$	1	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
响应(处理)时间 T	$\sim 10^{-4}\text{s}$ (0.1ms)	$\sim 10^{-6}\text{s}$ (μs)	$\sim 10^{-8}\text{s}$ (10ns)	$\sim 10^{-10}\text{s}$ (0.1ns)	$\sim 10^{-12}\text{s}$ (0.1ps)
$t_r = T/T_{1955}$	1	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}
工作频率 f	$\sim 10^6\text{Hz}$	$\sim 10^8\text{Hz}$	$\sim 10^{10}\text{Hz}$	$\sim 10^{12}\text{Hz}$	$\sim 10^{14}\text{Hz}$
$f_r = f/f_{1955}$	1	10^2	10^4	10^6	10^8

对电子器件来说,体积越小集成度越高;响应时间越短计算处理的速度就越快;输送频率越高传送的信息量就越大。我们定义器件的综合评价指标 $F = f/(V \times T)$,就会发现每隔 10 年 F 增大 10^7 倍,如果各项特性获得充分利用的话,则器件的性能在 10 年间提高 10^7 倍,也就是说以每年 5 倍的速度在进步。电子器件的不断革新和巨大进步,对电子工业以及各行各业的发展做出了很大的贡献,促使了能源的节省和经济的发展。

现代社会里,从日常生活到社会的各个角落,电子器件都是不可缺少的。手表、电子记事本、无线电话、电视、传真机和微计算机等被广泛使用。在家庭生活中,微波炉、电饭锅、空调机必不可少;在社会生活中,银行联机在线系统、综合数字通信网、因特网、宇宙卫星及其控制系统等,都离不开电子器件。由此可见,从你的身边到茫茫的宇宙,使用了无数的电子器件。现

在,半导体被称为现代工业的基础,半导体技术也显得越来越重要。与此同时,半导体工业也发展成为一个独立的高科技产业。随着半导体技术的进步,材料、通信、交通等各行各业相互促进,一个高度信息化的时代,也就是多媒体时代正在到来。

在这种情况下,学习作为电子学基础的电子器件理论就显得越来越重要。

1.2 本书的构成

在第2章中,以高中学过的物理、化学以及数学知识为基础,概括地论述与半导体导电性有关的载流子浓度、载流子迁移、载流子寿命、载流子的扩散长度、载流子的产生和复合以及费米能级等基础知识。还介绍了温度、电场、光等因素对半导体特性的影响。另外,还将分析半导体在电场或光的作用下,过剩载流子的产生及过剩载流子密度的时间、空间变化过程。这些知识是理解半导体器件工作原理的基础。

在第3章中,为了深入理解pn结以及金属-半导体接触等电子器件的基本构造,详细地讲述了pn结的能带图。利用在第2章中学习过的知识,推导出流过pn结的电流密度方程,得到pn结的伏-安特性。此外,由于pn结区形成了耗尽层,从而pn结具有结电容性质。所以我们将叙述pn结电容与杂质分布以及外加电压的关系,介绍金属-半导体间的肖特基接触和欧姆接触。

在第4章中,以由两个pn结构成的双极型晶体管以及由三个以上pn结构成的可控硅为主题,简明易懂地介绍它们的构造和工作原理。此外,还对大功率晶体管的使用注意事项作了说明。

第5章中介绍的单极型晶体管的工作原理与第4章中介绍的双极型晶体管不同,双极型晶体管是利用电子和空穴两种载流子来工作的,而单极型晶体管则利用电子或空穴中任一种载流子来工作。典型的场效应晶体管可以利用外加电场来改变电导率,从而提高工作频率。金属-氧化物-半导体多层结构的MOS场效应晶体管(MOSFET)是集成电路的关键器件,所以在第5章中详细地讲解了它的工作原理。此外,还介绍了结型场效应晶体管、

静电感应型晶体管以及电荷耦合器件。

在第6章中,首先阐述半导体的光吸收和光辐射。然后介绍光电转换的典型器件:太阳能电池和激光器。此外,作为光探测器的光电二极管以及光电晶体管已经获得了广泛的应用,所以希望读者能充分理解这些光电转换器件的构造和工作原理。

第7章深入浅出地讲解了集成电路。为了有助于理解双极技术、MOSFET技术和MESFET技术,分别以各种技术的典型电路为例,作详细说明。在本章最后,对读者关心的集成电路尺寸的理论极限进行了讨论。

本书各章末均设有习题,书后附有习题解答,以帮助读者深入地理解正文的内容。

本书可以作为大学或工业专科学校的教材。希望能对正在学习电子器件基础,将来立志从事电子器件研究的同学们有所帮助。同时,本书也可作为现在从事科研生产的技术工作者的参考书。

1.3 电子器件的学习方法

要用电子的量子效应来完全理解电子器件的工作原理,需要掌握统计力学、固体物理、电磁学、量子力学以及半导体技术等多学科知识。因为电子器件多种多样,要完全掌握各种电子器件的工作原理相当困难。

在学习电子器件时,希望注意以下几点:

首先,要完全掌握固体物理的基础知识。例如,要熟记第2章讲的半导体能带图、pn结的构造及特性等半导体器件的基础知识。如果做到这一点,就很容易理解结型晶体管、可控硅等多结型器件的工作原理。

其次,要想正确地理解电子器件的工作原理,泛读和精读本教材是很重要的。比如,一开始学习,可以不必深究细部,只掌握基本概念就可以了。然后再多次精读本教材,参阅更多的其他资料。这样,疑难之处就会逐渐得到理解。

“百闻不如一见”,是说任何事情只有经过亲身经历,才能全面地理解。学习电子器件也是如此,希望在理解书中叙述的内容后,独立地完成各章的习题。如果有条件的话,最好能自己制作pn结和晶体管。这样,有助于加

深理解电子器件的构造和工作原理。只要大家不懈地努力,一定能掌握电子器件的原理与技术。

练 习 题

1 如果把电子器件的综合评价指标 F 定义为 $F = f/(V \times T)$, 按表 1.1 所列数据, 则每隔 10 年, $F_{10} = 10^7$ 。请证明每隔一年电子器件的综合评价指标 F_1 增大为 5.01 倍 (500%)。

2

半导体器件的基础

半导体二极管、晶体管以及半导体激光器等都是电子技术不可缺少的元器件。本章简要介绍为掌握这些器件工作原理所必需的基础知识。重点阐述与这些器件工作原理密切相关的半导体物理和载流子的扩散机理。掌握了本章所介绍的概念、模型和基本公式,基本上可以预测哪些物理过程决定着器件的工作特性。

2.1 本征半导体与非本征半导体

‘现在让我们将材质均匀的半导体保持在温度为 T 的环境中。因为大多数的半导体器件都在室温下工作,所以温度 T 设为 300K。在没有电场和光等外部因素的影响下,半导体处于热平衡状态。下面将讨论当半导体处于热平衡时,半导体性质以及杂质与决定半导体导电性能的重要参数——电子、空穴浓度以及费米能级之间的关系。

我们称完全不含杂质以及没有晶格缺陷的半导体为**本征半导体**。在本征半导体中,电子和空穴的数量相同。单位体积内含有的电子或者空穴的数目称为**本征载流子浓度** n_i ,通常本征载流子浓度 n_i 非常低, n_i 可由下式给出:

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (2.1)$$

式中, N_c 和 N_v 分别是导带和价带的有效状态密度, E_g 是半导体的禁带宽度, k_B 是玻尔兹曼常数。对半导体 Si 来说, $T = 300\text{K}$ 时, $N_c = 2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_v = 1.02 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $E_g = 1.12\text{eV}$ 。在室温下,本征载流子浓度 n_i 为 $1.6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,但随着温度升高, n_i 呈指数函数急剧增加。往半导体里添加杂质称为**掺杂**。杂质分为**施主杂质**和**受主杂质**两类。当杂质的浓度比本征载流子浓度高几个数量级时,即使存在很微量的杂质,半导体的电阻率也会大大降低。这时半导体的导电特性是由外部杂质来决定的,所以称为**杂质半导体**。当往 Si 中添加施主杂质(例如磷)时,导电性是由带负电荷的电子来承担的,这种导电形式叫作 **n 型**。由于半导体处于电中性状态。因此,下式保持成立:

$$n + N_a^- = N_d^+ + p \quad (2.2)$$

式中, n 、 p 分别为电子和空穴浓度。 N_d^+ 为电离了的带正电荷的施主杂质浓度, N_a^- 为电离了的带负电荷的受主杂质浓度。在室温时,几乎所有的施主杂质(浓度为 N_d)和受主杂质(浓度为 N_a)都是处于电离状态。另外,在 n 型半导体中空穴浓度 p 值非常小,可以忽略不计,所以 n 型半导体中,电子浓度 n 与施主杂质的浓度几乎相等,如下式所示: