

IU

21 世纪大学新型参考教材系列

电气电子材料

〔日〕 水谷照吉 编著

Inter
University



科学出版社

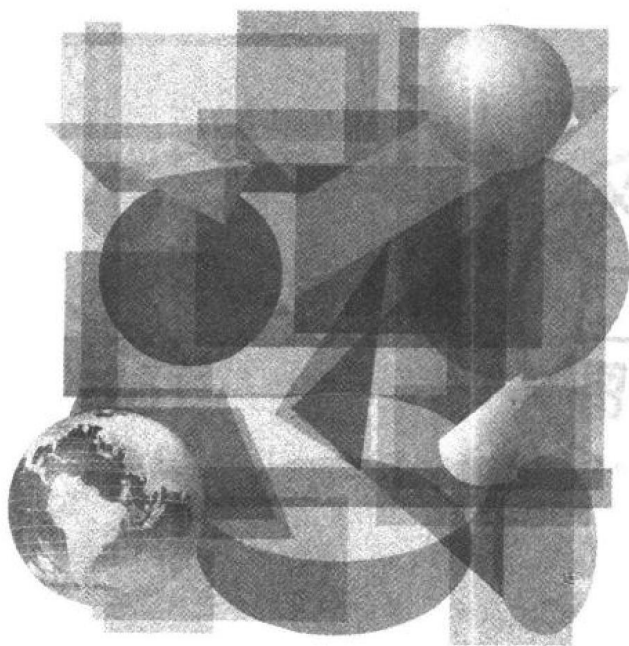
OHM 社

17311
142

21 世纪大学新型参考教材系列

电气电子材料

〔日〕水谷照吉 编著
王力衡 译



科学出版社

OHM 社

2001. 北京

2011113

AAE 97/08

图字:01-2000-4331 号

Original Japanese edition

Interuniversity Denki · Denshi Zairyou

By Teruyoshi Mizutani et al.

Copyright © 1997 by Teruyoshi Mizutani

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

インターユニバーシティ

電気・電子材料

水谷照吉 オーム社 2000年1版3刷

图书在版编目(CIP)数据

电气电子材料/[日]水谷照吉编著;王力衡译.-北京:科学出版社,2001

(21世纪大学新型参考教材系列)

ISBN 7-03-009522-7

I. 电… II. ①水… ②王… III. ①电工材料-高等学校-教材 ②电子材料-高等学校-教材 IV. TM2②TN04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 037943 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 8 月第 一 版 开本: A5(890 × 1240)

2001 年 8 月第一次印刷 印张: 4 1/8

印数: 1—5 000 字数: 116 000

定 价: 12.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

电气能源基础
等离子体电子工程学
电力系统工程学
电气电子材料
高电压/绝缘工程学
电动机器
电力电子学

电气能源

公共基础

电磁学A
电磁学B
电气电路A
电气电路B
电子电路A
电子电路B
电气数学
信息数学
程序设计

测量 · 控制

系统与amp;控制
信号分析
传感测量
柔性信息处理
机器人控制

信息通信

逻辑电路与自动机械
计算机工程学
程序语言设计
信息传送和符号的理论
信息通信工程学
信息网络

为了适应21世纪的要求

面向21世纪,日本各大学进行了系与学科的改编、研究生院的调整、导入两期制等。伴随着这些调整,现有的教材已不能适应现代学生的水平和兴趣要求。因此就要求有一套从版面到内容都更新颖的教科书。

本系列正是考虑到这种新的要求,经过不断深入考察和讨论,按照全新的整体编排形式制作完成的新型教材。曾荣获第七届日本工科教育协会奖「业绩奖」。

电子器件

电子物性
半导体工程学
电子器件
集成电路A
集成电路B
光电子学

21世纪大学新型参考教材系列 编辑委员会

主任委员: 家田正之 (爱知工业大学)
编 委: 稻垣康善 (名古屋大学)
白井支朗 (丰桥技术科学大学)
梅野正义 (名古屋工业大学)
大熊 繁 (名古屋大学)
绳田正人 (名城大学)

译者的话

本书是日本大学电气电子类专业系列参考教材之一,适用于电气电子专业和电子物理专业等高年级学生。全书共分7章,第1章除了提出为什么要学习电气电子材料之外,主要介绍了学习材料的重要性及其发展方向;第2章介绍了电气电子材料的基础知识,为后面学习各种材料,在理论上打下了基础;第3章导电材料,除了介绍一般导电材料的理论与应用外,还介绍了高温超导材料的理论与应用;第4章半导体材料与元器件,除了介绍半导体的一般理论外,还介绍了半导体材料的一些效应及其应用;第5章介绍了绝缘材料与介电材料的性质和应用,以及铁电体的一些独特的效应及其应用;第6章介绍了磁性材料的理论与应用,以及磁区与磁壁的形成及其对材料性能的影响。另外还介绍了磁性材料在视听觉系统中的应用;第7章主要介绍了新的功能材料和应用,以及今后的发展方向。此外还介绍了新兴的电子学领域,如有机电子学、分子电子学和生物电子学等。这一章所涉及的知识既广又深,但作者以深入浅出的方式介绍了一些很有兴趣和未来的发展。

书中每一章后均附有习题,而且在书末均给出了答案。

本书可作为我国相关专业的参考书甚至教材,当然亦可作为从事开发、研究电气电子材料及其元器件的工程技术人员参考书。因此,译者特向广大读者推荐此书。

由于译者知识水平和翻译水平有限再兼时间仓促,书中不妥之处在所难免,敬请读者指正。

前言

人类真正开始利用电是 1882 年美国在世界上第一次开始商业性发电以后(日本比美国晚 4 年,于 1886 年开始)的事,到现在也只剩有一百多年的历史。但是在这期间,电气电子技术有了惊人的发展。无污染且易使用的电迅速得到普及,并与各种电气电子机器、家电产品等的开发、普及相辅相成支撑着现代社会的发展。后来 1948 年晶体管的发明和其后的 IC、LSI 技术的进步,促进了电子学和电子计算机技术的发展,从而迎来了 21 世纪的高科技与信息化时代。

在这样迅速发展电气电子技术的过程中,半导体物性等材料物性学的发展和材料控制技术的进步起到了很大的作用。例如,最近流行的手提式计算机,说它与半导体集成电路、磁存储器、液晶显示器等的技术开发及其相关材料的开发、高性能化分不开也不为过。在这种计算机内使用了半导体材料和高分子材料等各种各样的材料,这些材料和电子元器件的好坏是制约计算机性能和发展的主要因素。换句话说,在新的电气电子产品的开发过程中,对电气电子材料的充分理解和适宜的高性能材料的开发、选择越来越变得重要。另外,材料科学的进步,不仅实现了现有材料的高性能化,而且设计出具有理想功能材料已成为可能。为了使电气电子技术进一步发展,对电气电子材料的研究将越来越重要。

正因为考虑到这样的背景,在编写本书时把重点放在对电气电子材料基础知识的理解上。具体内容安排为:第 2 章 电气电子材料的基础知识;第 3 章 导体材料;第 4 章 半导体材料;第 5 章 绝缘与介质材料;第 6 章 磁性材料。另外,在第 7 章中介绍了未来几种材料的发展方向。因篇幅所限,故对电气电子材料的基础物性和重要的应用例,虽尽可能地努力说明,但不可能全面介绍多分支的电气电子材料。对不得不割爱的内容,请读者自行参考有关的专业书籍。

在本书出版之际,向本系列书编委会主任家田正之教授、编委绳田正人教授和各位执笔者,以及欧姆社(OHMSHA)的有关各位深表谢意。

水谷照吉

目 录

1 电气电子材料的学习方法	
1.1 技术进步与电气电子材料	2
1.2 环保和节省资源材料开发	3
1.3 电气电子材料的学习内容	3
2 电气电子材料基础	
2.1 组成物质的原子	6
2.2 原子和原子的结合	9
2.3 微观世界的粒子集聚特性	13
2.4 固体中电子的能带理论	18
2.5 金属中的电流	20
练 习 题	23
3 导电材料及其性质	
3.1 导电材料	26
3.2 导电性良好的材料	30
3.3 各种大电阻材料	32
3.4 导体间的相互接触	33
3.5 超导材料	33
3.6 特殊导电材料及其使用方法	38
练 习 题	40
4 半导体材料的性质和功能	
4.1 半导体材料	44
4.2 半导体材料的导电性	44

4.3 二极管及其整流功能	48
4.4 晶体管	52
4.5 半导体集成电路	54
4.6 半导体的其他现象	57
练习题	60
5 绝缘材料、介电材料及其性质	
5.1 绝缘材料	62
5.2 绝缘材料的介电性	65
5.3 绝缘体中的电流	68
5.4 用复数表示介电常数的理由	71
5.5 失去绝缘性的绝缘体	74
5.6 铁电体的独特功能	76
练习题	80
6 材料的磁性	
6.1 材料磁性的决定	82
6.2 强磁性材料在磁场中的表现	86
6.3 硬磁材料——永久磁铁	91
6.4 软磁性材料	94
6.5 磁记录中使用的磁性材料	95
练习题	98
7 魅力无穷的功能材料	
7.1 光功能材料	100
7.2 量子效应的应用	104
7.3 新的电子学领域	105
练习题	108
练习题解答	109
参考文献	115

篇外话

极小的球和纳米管——最近发现的碳素结合体	13
约瑟夫逊元件	38
非晶体半导体	43
液体和固体的相对介电常数在 2 以上,那么金属的介电常数 为多少?	68
原子磁矩的大小	84
磁导系数	92

1

电气电子材料的 学习方法

在未正式进入学习电气电子材料之前,首先弄清楚为什么要学习电气电子材料,其意义何在?该学习哪些内容?本章将对全书的内容和构成加以说明。

1.1 技术进步与电气电子材料

近半个世纪,电气、电子技术有了惊人的进步。五十年前晶体管的发明(1948年)和其后的半导体集成电路(IC、LSI)技术的发展,对当今电子学领域的飞速发展都起到了重大作用。因此,以新材料、元器件的开发作为技术革新和技术飞速发展后盾的例子很多。不言而喻,不仅对电气电子机器,而且对各种工业产品的高性能化和新产品的开发都与材料开发的成功有着密切的关系。在这一意义上,即使说制造材料就是开创技术也一点不过分。

下面看一下家电中的电视机。如果打开电视机的后盖,就可以发现它是由很多的电子元器件、印刷线路板和半导体集成电路,以及结构材料构成的。它所使用的材料也是各种各样的,如半导体、金属、高分子材料等等。可以说是各种元器件技术和材料技术的综合产物。如果这些电子元器件和材料中的哪一样是次品,电视机也就成了次品。因此,为了开发高性能的电视机就需要掌握关于电气电子材料和元器件的广泛知识和检测技术。更重要的是要正确掌握这些材料的性能以及选择与开发最适合的材料。

在这近半个世纪里,电气电子技术不断进行革新,这对科学和技术的进步作出了贡献。由于电子学和计算机的蓬勃发展,大容量、高速通讯技术等电气电子技术领域的发展,使社会发生了很大的变化,这定会迎来21世纪的高度信息化的时代。在这种形势下,人们强烈期待着上述电子学、计算机、信息与通讯领域更进一步得到发展。同时也期待着光电子学、分子电子学和生物电子学等新领域的发展。电气电子材料的高性能化和新原材料的开发将会越来越受重视。

这对有志于从事电气电子领域的技术人员来说,为了正确理解电气电子材料并顺应新技术的发展进行新产品的开发,掌握开发新材料知识是至关重要的。

1.2 环保和节省资源的材料开发

电气电子材料的开发是以材料的高性能化和低成本为目标进行的。最近收回废品怎样再次有效利用资源正成为重要的课题。现在已出现了大量生产与大量消费导致浪费地球上有限的贵重资源的状况。同时,与此相伴随的大量废弃物,将会给社会环境带来严重的恶果。因此,要求开发易回收的材料,或者废弃后也不破坏环境的材料。据说石油资源再过五十年会枯竭,但人们仍然大量浪费燃料。由于 CO_2 气体的大量放出,导致了地球温室化,同时由石油生产的大量塑料也产生垃圾公害问题。

人们把石油以外的地球上贵重资源作为电气电子材料利用的同时,也考虑多次有效的再利用问题。因此,环保问题和为此而进行的新材料开发技术将越来越重要了。从而,材料的开发如图 1.1 所示那样,性能、价格和环境已成为人们关注的焦点。

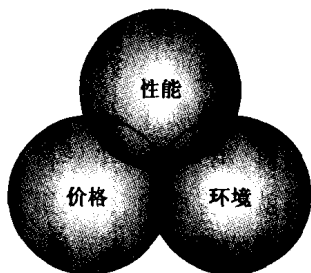


图 1.1 21 世纪的材料开发重点

1.3 电气电子材料的学习内容

现在的电气电子材料有多种多样,例如,导电材料的金属和超导材料、半导体材料、绝缘与介电材料以及磁性材料等。因此要学习的内容也很广泛,与此同时还要接连不断地进行新材料开发。在本书中由于篇幅有限,详细介绍这些全部材料是不可能的。因此,本书中不是把重点放在对各种材料的罗列上,而是把重点放在理解电气电子材料的基础特性上。

最近的材料开发,不仅想改善现有材料的性能,而且把现有材料进行成功地组合,有效地利用每种材料所具有的性能实现材料高性能化。这就是目前人们所关注的复合材料技术。另外,用原子技术和分子技术设计、创造

出材料的高性能,开发出新材料也将成为可能。可以预见,这些将成为 21 世纪材料开发的主流。因此,正确掌握材料所具有的基本特性和其物理结构,理论上正确掌握合理的材料开发的基础知识和常识是非常重要的。

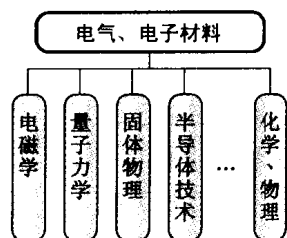


图 1.2 电气电子材料与其
相关的学科

为了充分理解电气电子材料的基础知识,就需要电磁学、量子力学、固体物理、电气电子电路、半导体技术、电介质与绝缘技术,以及磁性物质等相关领域的知识(图 1.2)。例如,在学习半导体材料时,需要量子力学、固体物理、半导体技术和化学等知识。因篇幅有限,故在本书中不能涉及到的知识,请参照相关方面的教材。

作为本书的构成,在第 2 章的电气电子材料基础中说明第 3 章以后的有关各种材料共性的固体物理基础。作为各种材料的排列顺序是以材料导电性能的优良顺序进行编写的,即第 3 章为导电材料,第 4 章为半导体材料,第 5 章为绝缘与介电材料。第 4 章的半导体材料就不言而喻,但在第 3 章的超导材料,随着高温超导材料的出现人们期待着它的新应用。另外,第 5 章的介电材料,随着光电子学的发展,向光器件的应用方面发展。这一点在第 7 章也涉及到。在第 6 章中对磁性材料的性质和应用进行了介绍。磁性材料作为高密度的信息记录材料起到重要的作用。最后,在第 7 章还介绍了期待今后发展的某些新材料。因为除了这些材料之外受到注视的新材料还很多,所以,感兴趣的读者以本书中介绍的内容为线索自行查阅为好。

电气电子材料基础

组成物质的原子性质与原子结构,即电子的排列情况有关,特别是最外层电子的作用很大。在本章中将介绍原子与原子的结合为什么是可能的?固体中微观的电子、原子及分子之间是怎样的关系?物质为什么分为易通过电流的导体和难通过电流的绝缘体?为什么碳元素(C)既能形成绝缘体又能形成导体?固体中形成电流的是电子,可是电子又从哪里来的?固体中电子又是怎样移动的,以及决定电流大小的原因等等。

2.1 组成物质的原子

当在理论上可以解释物质的物性并且物质合成技术已被确立之际,利用分子原子论控制物性,即所谓的分子设计已成为可能。所有的物质都是由原子构成,构成物质的原子有一百多种。这些原子的中心处有原子核,在其周围有若干电子,原子核周围的电子按照一定规则作轨道运动,这使原子有了它的特点。下边以原子结构最简单的氢原子(H)为例加以说明。

氢原子像图 2.1 所示那样,原子核是由位于中心的一个质子和围绕原子核作圆周运动的电子构成。图中 r 为半径, ϵ_0 为真空中的介电常数, m 为电子质量, v 为电子运动速度, q 为电子的电荷。

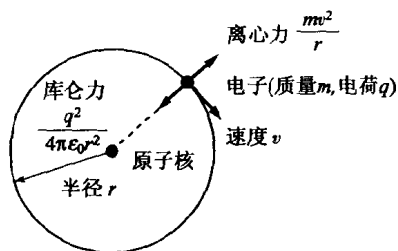


图 2.1 玻尔氢原子模型

这个电子受到原子核和电场力(即库仑力: $q^2/4\pi\epsilon_0 r^2$)以及圆周运动的离心力(即 mv^2/r)三个力的作用,在三个力平衡的位置上作旋转。玻尔(Bohr)在原子波谱的研究中得到电子轨道不是连续存在,而是像下式给出那样,当把角动量 p 以沿着轨道的路径(即对坐标 x)进行积分时,其积分值为普朗克常数 h ($= 6.625$

$\times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)整数倍的轨道。即

$$\oint p dx = nh \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (2.1)$$

称上式为玻尔量子化条件。根据这一条件,如果计算电子圆周运动的轨道半径为

$$r_n = n^2 a_0 \quad (a_0 = 0.0529 \text{ nm}) \quad (2.2)$$

$$E_n = -\frac{E_h}{n^2} \quad (E_h = 13.6 \text{ eV}) \quad (2.3)$$

式中, $n = 1, 2, 3, \dots$

把 $n = 1$ 时的状态称为基态。如果将 13.6 eV 的能量一给予这个状态的

氢原子,处于基态的电子得到这一能量后就被激发出来。也就是说,氢原子分离成氢离子和电子。基态的 s 轨道是圆轨道,但是一般情况下,电子轨道是以原子核为焦点的椭圆轨道。电子的运动状态(轨道)是由 4 个数值决定。将这个数值称为量子数,量子数有主量子数 n ,方位量子数 l ,磁量子数 m ,以及自旋量子数 s 。

由这 4 个量子数决定的轨道(状态)上,只能存在一个电子。这是由泡利(Pauli)不相容原理决定的。电子是从能量低的轨道依次排列而形成原子。表 2.1 给出的元素周期表是按这个规则排列核外电子的,并且是从电子少的开始依次排列的。

表 2.1 核外电子的排列

壳层名	K		L							
<i>n</i>	1		2							
<i>l</i>	0		0	1						
电子名	1s		2s	2p						
<i>m</i>	0		0	-1	0	1				
<i>s</i>	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$		
电子数	2		2	6						
元素符号	H	He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
原子序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

为了表示不同的原子在不同的轨道上拥有怎样的电子排列,如图 2.2 所示那样,使用了数字和符号 s 、 p 、 d 等,这个符号前的数字是表示主量子数,其右上角的数表示电子数。一般来说,因为外层轨道的电子所具有的能量低,所以容易逸出。

另外,轨道填满电子后,就有稳定的倾向。例如惰性元素的 He、Ar、Ne 等就属于这一情况。与此相对,Ⅰ族的碱金属元素 s 轨道的电子容易逸出,Ⅶ族的卤素元素容易接受电子。

电子轨道成为不连续的原因,在于玻尔量子化条件的设定。这是在采用了

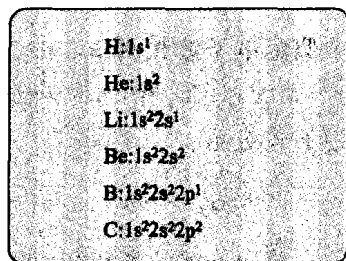


图 2.2 核外电子排列的表达式