

OHM

大学参考教材系列

电工电子 功能材料

〔日〕一濑 升 编著
彭 军 译



科学出版社

www.sciencep.com

OHM 大学参考教材系列

电工电子功能材料

〔日〕一濑 升 编著
彭 军 译

科学出版社
北 京

图字:01-2003-4896 号

Original Japanese language edition

Denki Denshi Kinou Zairyou(Kaitei 2 Han)

By Noboru Ichinose

Copyright © 2003 by Noboru Ichinose

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese version published by Science Press, Beijing

Under license from Ohmsha, Ltd.

Copyright © 2003

All rights reserved

電気電子機能材料 (改訂2版)

一ノ瀬 昇 オーム社 2003

图书在版编目(CIP)数据

电工电子功能材料/(日)一瀬 升编著;彭军译. — 北京:科学出版社,2004
(OHM 大学参考教材系列)

ISBN 7-03-012395-6

I. 电… II. ①… ②彭… III. ①电工材料:功能材料-高等学校-教材
②电子材料:功能材料-高等学校-教材 IV. ①TM2②TN04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 097799 号

责任编辑 崔炳哲 责任制作 魏 谨

责任印制 刘士平 封面设计 李 力

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

2004 年 1 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2004 年 1 月第一次印刷 印张: 7

印数: 1—4 000 字数: 180 000

定 价: 19.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

前言

日本的经济可以说是在以半导体为中心的电子技术产业的支持下进入 21 世纪的。而电子技术产业的基础,则是功能材料。《电工电子功能材料》一书第一版发行于 1996 年,当时还没有功能材料方面的教科书,甚至几乎没有电工、电子类专业教学使用的讲义。在与该领域大专院校的老师们交谈时,感到很需要出版一本电工、电子类专业学生使用的功能材料方面的教科书。

本书就是在这种情况下编写的,书中内容适合于电工、电子类学科学生或工程技术人员学习和参考。本书第 1 章为功能材料的概述,其后各章分别介绍各种功能材料。

第 2 章介绍电工、电子学领域非常重要的导电材料,如铜、铝、超导材料和高分子导电材料。第 3 章介绍一般电阻材料和特殊电阻材料的特性和制作方法。半导体的代表性材料是硅(Si),第 4 章介绍硅以外的金属化合物及其基本性质以外,还涉及晶体管、半导体开关元件、存储器、激光等的应用。日本在磁性材料技术领域具有很高的水平,第 5 章将介绍软质、硬质磁性材料和磁记录材料、特殊磁性材料的一般性质。第 6 章介绍电介质和绝缘体材料,即电介质的基本电学性质、强电介质材料及其应用、电容器材料及压电材料。在电工、电子学领域,传感器的重要性日益提高,第 7 章将介绍传感材料及其在检测信息时材料特性的变化。为了加深对学习内容的理解,每章末都附有练习题,并在全书最后附

2AB312

有参考答案。

本书从第一版发行至今已经经过了6年的时间,在此期间,各种功能材料得到了进一步应用,材料科学取得了明显的进展。修订版中增加了近年来的热门话题,即纳米技术及新材料。作为教科书,在基本知识的阐述以及相关数据、资料等方面,均作了全面修订。

本书希望能够得到电工、电子功能材料领域的研究人员、工程技术人员以及学生们的有效利用。

最后,对在本书出版过程中欧姆社出版部的各位所给予的大力支持表示感谢。

一 濑 升

* * *

编著者简介

一 濑 升

1959年 早稻田大学理工学部应用物理专业毕业

1959年 东京芝浦电气(株)(现(株)东芝)入社

1967年 获理学博士

现 在 早稻田大学理工学部教授

目 录

第 1 章 功能材料概述	1
1.1 功能材料	1
1.1.1 新材料	1
1.1.2 精细陶瓷	3
1.1.3 精细金属	4
1.1.4 精细聚合物	6
1.1.5 复合材料	8
1.2 功能材料的种类及应用	11
1.2.1 导电材料	12
1.2.2 半导体材料	13
1.2.3 电介质材料及绝缘材料	16
1.2.4 磁性材料	18
1.3 功能材料的展望	20
1.3.1 倾斜功能材料	20
1.3.2 智能材料	22
1.3.3 生态材料	23
1.3.4 纳米材料	25
练习题	28
第 2 章 导电材料	29
2.1 金属的电导性	29
2.1.1 温 度	31
2.1.2 加 工	32

2.1.3	合 金	32
2.2	导电材料	33
2.2.1	铜及其合金	34
2.2.2	铝及铝合金	35
2.2.3	电线和电缆	36
2.3	特殊导电材料	37
2.3.1	接触材料	37
2.3.2	熔断材料与钎焊材料	40
2.4	超导材料	42
2.4.1	超导现象	42
2.4.2	金属系超导材料	47
2.4.3	氧化物高温超导体	47
2.5	高分子导电材料	50
	练习题	52

第3章 电阻材料 54

3.1	精密电阻用合金	54
3.1.1	Cu-Mn-Ni 系合金	54
3.1.2	Cu-Ni 系合金	55
3.1.3	Ni-Cr 系和 Fe-Cr-Al 系合金	56
3.1.4	Ag-Mn-Sn 系合金	57
3.2	调节电流用电阻材料	57
3.2.1	调节中小电流用的金属系元件和碳系元件	58
3.2.2	调节大电流用的金属和水	61
3.3	热电、照明用电阻材料	62
3.3.1	热电用发热体	63
3.3.2	照明用钨	67
3.4	功能电阻材料的电阻变化	67
3.4.1	感温电阻(热敏电阻)用氧化物陶瓷	68

3.4.2	非线性电阻用材料	69
3.4.3	气敏、湿敏电阻用多孔质材料	72
3.4.4	力敏电阻用合金与硅	73
3.4.5	磁敏电阻用铋和铋化铟	74
3.4.6	光敏电阻用半导体	75
	练习题	76

第 4 章 半导体材料 77

4.1	半导体的发展与种类	77
4.2	半导体的导电机构	80
4.2.1	半导体的载流子	80
4.2.2	本征半导体	82
4.2.3	n 型半导体	82
4.2.4	p 型半导体	84
4.2.5	半导体的电导	85
4.3	金属-半导体接触与 p-n 结	88
4.3.1	金属与半导体的接触	88
4.3.2	p-n 结	90
4.4	晶体管 and 开关器件	94
4.4.1	面结型晶体管	94
4.4.2	场效应晶体管	97
4.4.3	SCR	99
4.5	半导体存储器材料	101
4.5.1	半导体存储器	101
4.5.2	非易失性半导体存储器	103
4.5.3	电路的集成化	105
4.6	激光器	107
4.6.1	激光的分类	107
4.6.2	激光器用材料	110

练习题 113

第 5 章 磁性材料 114

- 5.1 什么是磁性材料 114
- 5.2 软磁材料 118
 - 5.2.1 软磁铁氧体 118
 - 5.2.2 金属、合金系材料 123
- 5.3 硬磁材料 128
 - 5.3.1 铁氧体磁石 130
 - 5.3.2 铝镍钴合金磁石, Fe-Cr-Co 系磁石 132
 - 5.3.3 Sm-Co 系磁石 133
 - 5.3.4 Nd-Fe-B 系化合物 135
 - 5.3.5 Sm-Fe-N 系化合物 138
- 5.4 磁记录材料 140
 - 5.4.1 磁头材料 140
 - 5.4.2 磁记录介质材料 144
 - 5.4.3 光磁记录材料 146
- 5.5 特殊磁性材料 147
 - 5.5.1 整磁材料 147
 - 5.5.2 非磁性材料 148
 - 5.5.3 磁流体 149

练习题 151

第 6 章 电介质材料与绝缘材料 153

- 6.1 电介质的微观性质 153
 - 6.1.1 电介质的极化 153
 - 6.1.2 内部电场的计算 155
- 6.2 电介质极化的机理 156
 - 6.2.1 感生极化的种类 156

6.2.2	交变电场中电介质的功能	158
6.3	电容器的结构与特征	159
6.4	强电介质的结构与性质	161
6.5	压电体与热释电体	163
6.5.1	BaTiO ₃ 系	164
6.5.2	PZT 系电介质	165
6.6	绝缘材料的种类和特征	167
6.6.1	绝缘材料的种类与 JIS 的耐热划分	167
6.6.2	气体绝缘材料	169
6.6.3	液体绝缘材料	170
6.6.4	固体绝缘材料	172
练习题		182

第 7 章 传感器材料 183

7.1	传感器与传感器技术	183
7.2	用金属材料制造的传感器	186
7.2.1	磁敏传感器	186
7.2.2	温度传感器	187
7.2.3	扭矩传感器	189
7.2.4	气体传感器	190
7.3	用陶瓷材料制作的传感器	190
7.3.1	红外线传感器	190
7.3.2	温度传感器	191
7.3.3	湿度传感器	193
7.3.4	气体传感器	195
7.4	用高分子材料制作的传感器	197
7.4.1	湿度传感器	197
7.4.2	气体传感器	198
7.4.3	气味传感器	199

7.5	用半导体材料制作的传感器	200
7.5.1	光敏传感器	200
7.5.2	压力传感器	202
7.5.3	磁敏传感器	202
7.5.4	气体传感器	204
7.5.5	生物传感器	205
7.6	未来的传感器及其材料	206
	练习题	208
练习题简答		209
参考文献		213

第 1 章 功能材料概述

本章将新材料分类为精细陶瓷、精细金属、精细聚合物和复合物,并分别加以介绍,从而使读者能对新材料中的许多功能材料有所了解。

展望功能材料的未来,介绍日本研究开发的倾斜功能材料以及智能材料、节能生态材料。了解各种材料的价值,希望积极开展研发工作。

1.1 功能材料

1.1.1 新材料

所谓新材料,包括新金属材料、高分子功能材料、精细陶瓷及复合材料。它与电子学、生物技术并列为支撑 21 世纪产业、经济的高新技术,从而受到人们的广泛关注。钢铁、有色金属、化学和陶瓷等各领域的产业部门都在积极地采用新技术,在新材料的各领域研究和开发新的产品。同时,机电、运输等产业从材料应用的角度也融入了新材料的领域。

今天,新材料一词已被广泛使用着。但是关于它的范围、定义未必有共通的理解。就新材料的定义,已经有几种提法,但是目前还不能说已经达成共识。

这里介绍日本基础新材料研究会 1989 年在“新材料产业今后应有的状态”报告书中的定义以供参考。

“所谓新材料,是指以金属系、无机系、有机系的原料以及由它们组合的原料为基础,通过高水平的制造、加工技术(例如在原子、分子水平上微制造控制、高纯度化、复合化等)或商品化技术,产生过去没有的、具有所期望的特性和新的社会效益的、附加值高的材料”。

读者可以通过本书学习电工、电子领域应用的诸多功能材料。但是功能材料涉及范围很宽,因此将新材料按照精细陶瓷、精细金属、精细聚合物、复合材料分类,分别介绍其部分实用价值高的材料(参见图 1.1)。

这些材料都是电工、电子领域不可缺少的材料。希望材料专业的学生、研究生及技术人员能够努力学习,并且能够认真对待每章最后的练习题。

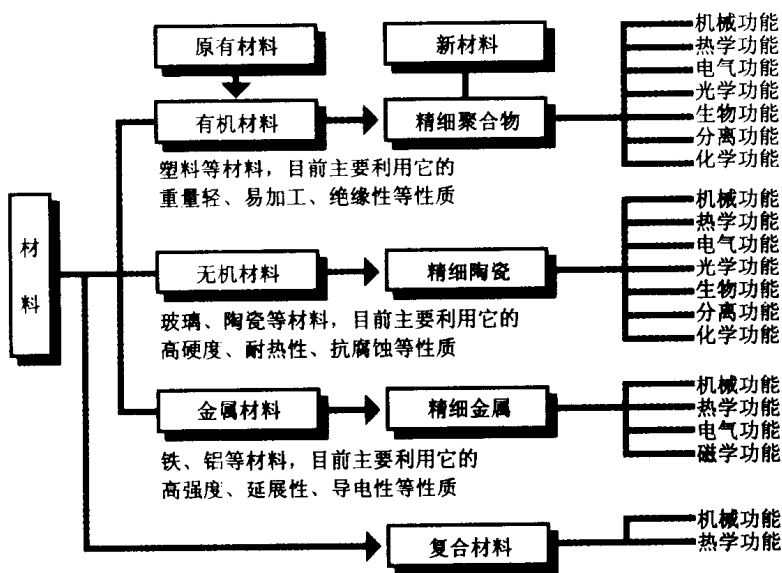


图 1.1 新材料的体系

新材料的定义(例)

(1) 日本产业结构研究会(通产省政策局)的定义(1984年3月)

所谓新材料,是指经过物性研究,材料设计,材料加工,试验、评价的研究,能够弥补现有材料的缺欠,产生出卓越的特性,实现高性能、结构特性的高附

加值材料。

(2) 日本兴业银行的定义(引自[兴银资料]No. 227, 1985 年 No. 4)

所谓新材料,是指对于金属、无机、有机原料以及将它们组合的原料,采用新的制造技术或者商品化技术,产生过去没有的新的物性(性能、功能、特性)和社会效益(用途)的材料。

(3) 日刊工业新闻社的定义(引自[各种新素材·新材料], 1986 年 8 月)

所谓新材料,是指对单独的金属系、无机系、有机系或者它们的两种或三种的组合,通过新的单元运行,必要时通过组合新的商品化技术,使之成为适应社会需求、具有新的物性价值(性能、功能)和社会效益(用途)的材料。

1.1.2 精细陶瓷

精细陶瓷,通常是由金属元素与非金属元素构成的氧化物或非氧化物化合而成的(也有碳等的例外)。因此,它的特征是种类多、涉及的功能范围广泛。

最近,精细陶瓷一词作为高附加值的材料的代名词而被广泛使用着。那么,它的含义究竟是什么?

仅仅采用低级的粉末成型、烧结的方法是展现不出物质的更多功能的。为了发掘陶瓷材料更多有价值的功能,必须采用“严格精选的原料粉末”,通过“精密地调整化学成分”和“能够有效控制的成型、烧结法”合成陶瓷。经过这样的工艺过程获得的陶瓷称为精细陶瓷。图 1.2 示出了精细陶瓷的概念。

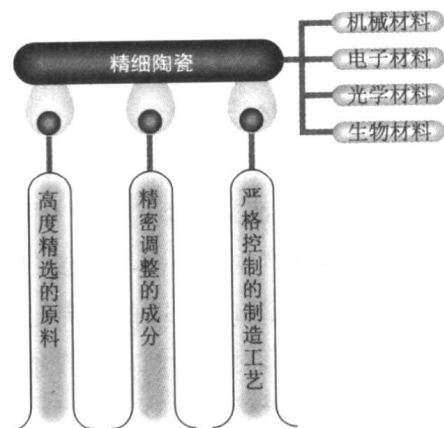


图 1.2 精细陶瓷的概念图

按照 1993 年制定的 JIS R1600,所谓的精细陶瓷定义为“以充分发掘某种功能为目的,通过控制其化学组成、微细组织、形状以及制造工程而得到的陶瓷”。

1.1.3 精细金属

根据祝德(Drude)的自由电子模型,金属可以描写为在整个金属离子晶格中充满着电子气。依靠自由电子与离子间的静电作用结合起来的是金属键结合,与离子键结合和共价键结合相比,价电子是非局域化的。由于价电子能够在整个金属中的自由运动,产生了良好的导电性。

碱金属原子间的距离较大,所以比较容易变形。过渡金属由于部分填满的d电子壳层对金属键的结合有贡献,所以具有熔点高的性质。

作为新材料的金属功能材料,一般采用金属化合物。目前多数还处于开发阶段,是一类未来型的材料。这里仅最近开发出的被称为精细金属的新功能性金属材料作以简单介绍。

1. 半导体材料

元素周期表中ⅡB族与ⅥB族,ⅢB族与ⅤB族或者ⅣB族与ⅥB族,ⅤB族与ⅥB族元素间形成的化合物大多是半导体,广泛应用于晶体管、二极管、发光二极管、半导体激光器、太阳能电池和热电交换器件等。

2. 超导材料

多数 A_{15} 型结晶的金属化合物,例如 Nb_3Al , Nb_3Ga , Nb_3Ge , Nb_3Sn , V_3Ga 都是典型的超导金属化合物。其中, Nb_3Sn , V_3Ga 已经线材化,用作产生超强磁场的磁石。

不过, Nb_3Sn , V_3Ga 的临界温度都在 20K 以下。自氧化物超导化合物发现以来,对这种超导化合物的研究似乎处于停滞状态。

3. 磁性材料

有各种各样的金属化合物属于软磁性材料或硬磁性材料。软磁性材料中,典型的材料是被称为铁硅铝磁合金的 DO_3 型晶体结构的 $Fe(Al, Si)$,多用作音响设备的磁头。

硬磁性材料,也就是永久磁石材料,可以举出 $SmCo_5$, $Nd_2Fe_{14}B$ 等。 $Nd_2Fe_{14}B$ 的居里温度(313℃)并不比其他永久磁石高,但是它是

目前最强的磁石材料,具有最大能积 320kJ/m^3 (40MGoe)。

今后能否开发出超过 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 的强力永久磁石材料,也是一个令人感兴趣的问题。正在研究开发的 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 系磁石有这种可能性。另外,日本还开发了硅铝铁粉、Nd 系磁石、Sm 系磁石。

4. 非晶合金

如果从分子、原子水平上看气体、固体和液体三态物质,那么气体和液体是无序状态,固体可取有序和无序两种状态。无序状态的固体统称为**非晶态**。我们常见的玻璃就是非晶态。所以非晶态亦称为**玻璃态**。

固体的非晶态与气体、液体的情况稍微不同,它在近邻的两三个原子范围内可认为是有序的。这种序在玻璃、半导体、金属中未必一定相同,它表征原子、分子的结合特性。

非晶态固体与有序状态固体在性质上有本质的不同,它被称为“梦幻合金”或“世纪材料”,这反映出人们对这种材料的期待。非晶合金有 Fe-B-Si 系、Co-Fe-Si-B 系等。

5. 形状记忆合金

形状记忆合金表现出从通常的金属常识中分离出来的变形举动。例如,即使施加一个外观上超过屈服点的大的形变,在脱离外力后或者像橡皮那样恢复原形(准弹性),或者稍许提高温度而恢复原形(形状记忆效应)。这种现象最初是 Read 于 20 世纪 50 年代初在 Au-Cd 和 In-Tl 合金中发现的。

其后的重要发现是 1963 年美国海军武器研究所的 Buehler 等人在 Ti-Ni 合金中发现了显著的形状记忆效应。1970 年明确了这是一种附属于热弹性型马氏体变态的现象。现在,在 Cu-Zn-Al, Fe-Pt 等许多合金中都发现了形状记忆效应。

6. 贮氢合金

人们很早就知道金属与氢结合能够形成氢化合物。也曾试验利用这种现象将氢储存在金属中。但是,后来人们发现 LaNi_5 , FeTi , Mg_2Ni 通过压力操作能够很容易地实现氢的储存与释放。

贮氢合金是两种金属的组合,一种金属能使氢形成接近 H^- 状态的氢化合物,另一种金属能使氢以 H^+ 状态固溶。 H^- 状态促使形成氢化合物, H^+ 状态使氢容易离解和移动。前者有 Mg 和 III-V 族金属,后者是 VI-VIII 族金属。为了在室温下容易实现对氢气的吸收和离解,要求合金的氢化合物生成焓变化量为 $-(7 \pm 3) \text{ kcal/mol}^{1)}$ 。

1.1.4 精细聚合物

高分子材料过去是作为制造纤维、薄膜、成型品物体的基础材料,就是说,作为结构材料被使用着。譬如,在人的肢体中,可以用高分子结构材料担当骨骼或肌肉,或者是制作人的体形所必须的材料。不过,人类为了生存还需要能够维持生命的材料。

为了生命的活动,功能性的器官是不可缺少的。例如接受外界刺激的视觉、听觉、触觉等感官,将外界刺激传达给大脑的神经,记忆和判断外界刺激的大脑,或者给生命活动提供能量的内脏器官。所谓生命现象,就是指能够接受来自外界的刺激并做出反应的现象。所以,作为功能性的定义可以说是对外界刺激具有响应能力。

所谓功能性高分子,定义为具有对来自外界刺激做出响应的能力,并且能够进行某种作业的材料。就是说,对于外界的光、热、电、压力等各种刺激,能够有选择性地进行了特异作业的高分子材料。

上述那样能够对外部刺激做出响应和作业的高分子称为精细聚合物。在具有功能的意义上,英语也称精细聚合物为 function polymer。在同样的意义上,例如医药品或染料那样具有非常精密功能的材料有时也称为 fine chemical。

过去高分子材料按照化学结构或者制造方法分类。而精细聚合物材料的重点在于功能,所以它按照功能分类。表 1.1 示出精细聚合物的分类。

由该表可以看到有四个领域,一个是具有力学特性、机械特性的

1) cal(卡),能量单位。1cal=4.1868J(焦[耳])。——译者注