



普通高等教育“十二五”规划教材



电工电子工程材料

李宝让 编



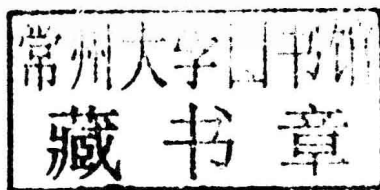
中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

电工电子工程材料

李宝让 编
郝俊杰 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。全书共8章,主要包括电工电子材料的基础内容,即导电材料、超导体、半导体材料、电阻材料、绝缘材料、电介质材料、磁学材料,同时阐述了相关领域的最新研究成果和研究热点。本书基础理论体系完善,内容新颖,材料翔实。为满足研究生教学的需要,书中还提供了相关理论推导和模型。

本书可作为高等院校材料、电气、电子信息类相关专业研究生和本科生的教材,还可供从事相关工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子工程材料/李宝让编. —北京:中国电力出版社,2012.3
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5123-2734-4

I. ①电… II. ①李… III. ①电工材料—高等学校—教材②电子材料—高等学校—教材 IV. ①TM2②TNO4

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第027565号

中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)
北京市同江印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

2012年11月第一版 2012年11月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 9.75印张 235千字
定价 18.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

功能材料是一门新兴的综合学科。21 世纪以来,功能材料的研究和发展越来越重要,研究范围也越来越广,尤其随着电子信息化的发展,电工电子功能材料已经成为功能材料热点研究的重要组成部分。

随着时代的发展,材料的研究已经开始走出狭隘的专业限制,逐渐受到其他非材料专业的重视,专业知识的交叉已经成为功能材料发展的时代要求。为了满足不同专业对相关功能材料知识的需求,编者立足于电力行业,针对电工电子工程材料的发展前沿、国内外最新研究成果,结合多年科研和教学经验编写了本书,力求达到内容新颖、材料翔实,并反映国际先进水平。

全书共 8 章,主要包括电工电子材料的基础内容,即导电材料、超导体、半导体材料、电阻材料、绝缘材料、电介质材料、磁学材料,同时阐述了相关领域的最新研究成果和研究热点。本书基础理论体系完善,内容新颖,材料翔实。为满足研究生教学的需要,书中还提供了相关理论推导和模型。

本书由华北电力大学李宝让编写。在本书的编写过程中,华北电力大学郭永权教授对相关内容进行了详细的指导。

本书由北京科技大学郝俊杰教授主审,并提出了宝贵的意见和建议,在此表示由衷的感谢。

编 者

2012 年 2 月于华北电力大学

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 功能材料及其分类	1
1.2 电工电子功能材料	6
1.3 功能材料的发展趋势	9
第2章 导电材料	10
2.1 导电材料的理论基础.....	10
2.2 导电材料的基本性能及其指标要求.....	12
2.3 导电材料的种类.....	14
2.4 电线和电缆.....	16
2.5 新型电线电缆材料.....	18
2.6 特殊导电材料.....	21
2.7 熔断材料和钎焊材料.....	23
2.8 传统电线电缆制备工艺.....	25
2.9 导电材料研究进展.....	27
第3章 超导体	29
3.1 超导体的定义研究历史.....	29
3.2 超导体的主要性能.....	29
3.3 低温超导体典型的机理模型.....	31
3.4 重要的超导体材料介绍.....	39
3.5 超导体的制备工艺.....	45
3.6 超导体的应用.....	48
第4章 半导体材料	50
4.1 半导体发展历史.....	50
4.2 半导体基础理论.....	51
4.3 半导体材料介绍.....	62
4.4 传统半导体材料单晶体制备方法.....	71
4.5 半导体材料器件及其应用.....	73
第5章 电阻材料	77
5.1 电阻及电阻器基本常识.....	77
5.2 精密电阻材料.....	78
5.3 热电、照明用电阻材料.....	79
5.4 功能电阻材料.....	83

第 6 章 绝缘材料	85
6.1 绝缘材料的基础知识	85
6.2 绝缘材料分类和用途	86
6.3 绝缘材料的检测与保管	92
6.4 绝缘子	94
第 7 章 电介质材料	96
7.1 静态极化	96
7.2 电介质极化种类和机制	97
7.3 交变电场条件下电介质极化和介电损耗	102
7.4 铁电体	105
7.5 铁电体的性能特点	108
7.6 铁电相变	110
7.7 典型的铁电体材料	112
7.8 电容器	116
7.9 反铁电体	117
7.10 固体电介质的击穿	118
7.11 压电现象	119
7.12 压电材料	121
7.13 压电材料的发展趋势	122
第 8 章 磁学材料	124
8.1 磁性起源	124
8.2 磁学的基本性能指标	126
8.3 材料的磁化	127
8.4 抗磁性和顺磁性	128
8.5 铁磁性	130
8.6 铁磁机制	132
8.7 动态磁化过程	134
8.8 复数磁导率	135
8.9 标志交变磁性的相关物理量	136
8.10 动态磁化过程的磁损耗	136
8.11 反铁磁体和亚铁磁体	137
8.12 磁性材料——软磁材料	140
8.13 磁性材料——永磁材料	145
参考文献	149

第1章 概述

1.1 功能材料及其分类

功能材料的概念是美国 Morton J 于 1965 年首先提出来的, 相对于结构材料而言, 功能材料的定义通常强调材料具有一种或几种特定的功能。一般而言, 功能材料是指具有优良的物理、化学、生物等性能, 并且能够完成各种功能之间的相互转化, 主要用来制造各种功能元器件, 广泛应用于各行业。

功能材料的研究范围非常广泛, 它是新材料领域的核心, 也是国民经济、社会发展及国防建设的基础和先导。功能材料涉及很多领域, 包括信息技术、生物工程技术、能源技术、纳米技术、环保技术、空间技术、计算机技术、海洋工程技术等现代高新技术及其产业。

功能材料的种类繁多, 目前还没有一个统一的分类标准, 有很多分类方法, 如可以按照功能材料能够实现的功能、合成材料的聚集状态、合成材料的维度等标准进行划分。总体来讲, 这些分类方法各有特点, 不能相互包括和代替。下面根据功能材料所实现的功能, 对几种典型的功能材料进行简要介绍。

1.1.1 生物医学材料

生物医学材料指的是一类与生物系统(如人体循环系统等)直接接触, 并能够发生相互作用, 以替换损坏的组织或器官并实现、恢复其功能, 同时对人体组织不会产生不良影响的材料的统称。

生物医学材料研究的最大特点是生物材料的特殊应用环境, 该环境是由生物系统本身的生命特点所需要和决定的。因此, 生物材料的研究一方面涉及学科广泛, 如细胞生物学、材料科学、临床应用等领域; 另一方面需要强调注重材料的生物相容性, 也就是指定材料在特定的应用中要与活体系统能够相互作用并能相互容纳, 实现生物系统的功能修复。

现代生物医学材料起源于 20 世纪 40 年代。20 世纪 80 年代初, 生物医学材料科学与工程学科形成。20 世纪 90 年代, 生物材料科学进入高速发展阶段, 国际上目前已经成功利用高分子合成人工肺、人工血管、人工心脏、人工皮肤、人工骨, 不久的将来可以实现人体器官完全人工化。我国自 20 世纪 70 年代开始生物材料研究, 已有一定的研究成果。例如, 清华大学材料系崔福斋教授领衔研制的人工纳米骨, 其力学性能和生理功能可与天然人骨媲美。再如, 21 世纪初四川大学生物医学工程学科博士生导师李玉宝教授致力研究的一种用纳米材料制成的人工眼球, 这种眼球不仅可以像真眼睛一样同步移动, 还可以通过电脉冲刺激大脑神经, 看到精彩世界。尽管如此, 目前国内大约 70% 的生物材料市场仍然被国外产品所占据, 在更高端的生物材料产品领域国外产品甚至占据 95% 以上的市场份额。随着中国经济的持续增长, 国际上也开始关注中国的生物材料开发。近年来, 日本、韩国的生物材料研究和产业发展也呈现出强劲增长的态势。

仿生材料是生物材料的一个分支。2011 年, 德国慕尼黑工业大学、拜罗伊特大学的科学家在《自然》杂志揭示了蜘蛛能够在短时间内利用存储在丝腺中的蜘蛛丝蛋白制造出纤长、稳定且弹性很好的蜘蛛丝的原因, 从而为人工合成弹性和韧性最高的蜘蛛丝奠定了理论

基础。如果这种人造蜘蛛丝纤维得以成功研发,将在很多领域得到应用,如手术缝合材料、自动化工业使用的纤维、防弹背心等。

1.1.2 能源材料

所谓能源材料是指与新型能源开发有关以及能实现节能降耗的新型材料。目前的新能源主要有太阳能、地热能、风能、海洋能、氢能、生物质能、核聚变能等。

(1) 太阳能。太阳能一般指太阳光的辐射能量。利用太阳能的方法最典型的就光电—光热转化,如太阳能电池或太阳能换能器。

(2) 核能。原子核内部结构发生变化而释放出的能量就是核能。典型的应用如核能发电。

(3) 海洋能。海洋能是指蕴藏于海水中的各种新能源,包括潮汐能、波浪能、海流能、海水温差能、海水盐度差能等。典型应用如波浪发电。

(4) 风能。风能主要依赖于风,和海洋能一样,具有可再生性、不污染环境等优点。典型应用如风力发电机。

(5) 生物质能。生物质能就是指来源于生物质本身所储存的能源,它是太阳能以化学能形式储存于生物中的一种新能源。到目前为止,生物质能的实际利用率低于3%,具有很大的开发前景。

(6) 地热能。地球本身就是一个热能库,蕴藏着巨大的热能,这些能量主要来自地壳变迁、重力分异、潮汐摩擦、化学反应和放射性元素衰变释放的能量等。中国地热资源丰富,分布广泛,目前已发现地热点5500处、地热田45个,地热资源总量约320万兆瓦。地热能除了用于发电之外,也可以直接用于采暖、制冷、医疗洗浴和各种形式的工农业用热及水产养殖等。放射性热能是地球主要热源。

(7) 氢能。氢能是指氢燃烧后所获取的能量。氢燃烧的产物主要是水,无环境污染,而且燃烧过程中燃烧热值高,每千克氢燃烧后的热量,约为汽油的3倍,酒精的3.9倍,焦炭的4.5倍。因此,氢将成为21世纪的理想新能源,可作为飞机、汽车的燃料,可以作为推动火箭的动力。

上述能源涉及的材料都属于能源材料的范畴。广义地说,凡是能源工业及能源技术所需的材料都可称为能源材料。从材料研究角度看,能源材料可以大致分类如下:

(1) 新能源材料。新能源材料是实现新能源的转化、利用及发展新能源技术中所要用到的关键材料,主要以核材料和太阳能电池材料为代表。太阳电池材料是典型的半导体材料,是一类能够直接将电能转换成电、光、热和其他类型能量的材料。这方面当前的研究趋势和技术涉及硅(Si)、铜铟镓硒(CIGS)、染料敏化、有机薄膜、量子点体系等。

(2) 节能材料。这些材料可节约能源,有利于保护环境,具有十分重要的实际应用价值。理论上能够实现节能的材料都可以划分为节能材料,如超导材料,传输过程可以实现无能量损耗。再如典型的低摩擦材料。这类材料可用来降低各种机械中的摩擦力,通过最小化机械能向热能和其他废能形式的转变来节约能源。

(3) 储能材料。储能材料是能够存储能量的材料。典型的储能材料如高比能电池材料、储氢材料等。电池材料通常包括锂电池、太阳能电池、燃料电池所用材料等,中国电池新材料市场主要以锂电池材料和太阳能电池材料为主。燃料电池材料目前几乎全部依赖进口。电池材料的迅速发展将带动手机、笔记本电脑、数码相机、摄像机、汽车等行业产品的经济

发展。

储氢材料是一类可逆吸收和释放氢气的材料,主要包括金属、合金、纳米材料储氢。金属储氢材料主要是金属钡,但钡价格昂贵,缺少实用价值。典型的合金储氢材料如镧镍化合物。这些材料在一定的温度和压力条件下,一些金属能够大量吸收氢气,反应生成金属氢化物,同时放出热量。其后,将这些金属氢化物加热,又会分解,将储存在其中的氢释放出来。近年来,纳米材料储氢也成为研究热点,如纳米碳管储氢等。

目前来看,氢能的存储是氢能应用的主要瓶颈。氢能工业对储氢的要求是储氢系统要安全、容量大、成本低、使用方便。

1.1.3 梯度功能材料

梯度功能材料的概念是由日本学者平井敏雄、新野正之等人于1987年提出的,最初是为了解决在设计制造新一代航天飞机的热保护系统中出现的一系列问题,研制开发出表面使用温度达2000K、表里温度相差约1000K的新型超耐热材料。

所谓梯度功能材料是指材料的组成和结构能够实现连续变化,使材料的性能和功能也呈现梯度变化的一种新型的功能性材料。从材料的结构角度来看,梯度功能材料与均一材料及复合材料均不同,后者通常强调显微结构的均匀性。

梯度功能材料的一个重要的特点是可以存在多种组合方式,从而实现多种特殊功能,如金属/合金、金属/非金属、非金属/陶瓷、金属/陶瓷、陶瓷/陶瓷等组合。梯度功能材料的另一大特点是材料组成的梯度变化方式灵活,可以是梯度功能涂覆型,强调涂层的组成渐变;可以是梯度功能连接型,强调粘接在两个基体间的接缝组成的梯度变化;可以是梯度功能整体型,强调材料的组成从一侧向另一侧的梯度渐变。这些特点使材料在不同区域会具有不同的功能。

梯度功能材料的应用领域十分广泛。在空间技术上,它能够成为制造航天飞机和火箭的重要材料。例如采用金属陶瓷功能梯度材料,一面是金属,一面是陶瓷,中间部分是从金属到陶瓷逐渐变化的板材,既具有陶瓷的硬度和耐腐蚀、耐高温的特性,还具有金属的强度和韧性,用来制造火箭发动机,会使火箭性能有很大的提高。

1.1.4 智能材料

智能材料是20世纪90年代迅速发展起来的一类新型复合材料。智能材料的构想最初来源于模仿大自然中生物的一些独特功能来制造人类能够使用的“活”工具,如模仿蜻蜓制造飞机等。智能材料的目标就是研制出一种材料,使它成为具有类似于生物的各种功能的材料。

智能材料与仿生材料相比,更注重智能化。这符合未来社会发展的趋势。因此,智能材料的研究是材料科学研究的重要方向。其本质是根据感受到的外部刺激信息能够自动响应、判断、控制和调整以适应外界条件变化,实现智能化需求。因此,智能材料必须具备感知、驱动和控制这三个基本要素。具体体现为四点:自修复性、可调整性、自诊断性及备用性。目前,智能材料一般多由两种或两种以上的材料复合构成一个智能材料系统。材料一般比较单一,难以满足智能材料的要求,这使智能材料的设计、制造、加工和性能结构特征相关的研究成为材料科学的最活跃和最先进的发展方向。

智能材料的应用领域很广。例如日常生活中人们配戴的太阳镜,某些太阳镜的镜片当中含有智能材料,这种智能材料能感知周围的光,并能够对光的强弱进行判断。当光强时,它

就变暗,当光弱时;它就会变得透明。再如智能宇航服,在此基础上研制的智能面料已经融入百姓家,如保暖内衣等。最近,通用汽车研发人员实现了智能材料在汽车上的应用。可记忆的合金和聚合材料是两种最典型的应用于汽车的智能材料,这些材料能够随着温度、压力、磁场、电压等条件的不同变化,相应改变自身的密度、硬度,甚至外形。凭借上述优势,智能材料可能在未来汽车先进材料领域中扮演至关重要的角色,甚至可以在汽车发生事故后实现自我修复的功能,或改变汽车的颜色和外观。

1.1.5 生态环境材料

生态环境材料是指那些具有良好的使用性能,同时又满足环保要求,与环境相互作用能产生优良的环境协调性的材料。这个概念是日本东京大学山本良一等在20世纪90年代初提出来的,主要强调材料开发和利用要和环境和谐。因此,环境材料一般需要具有一定的先进性、环境协调性和舒适性。生态环境材料其实早已经深入我们生活的领域。例如购物使用的方便袋,丢弃后往往会由于材料降解能力差而浮于地表,形成大地的“白色癌症”,对土质有很大伤害。20世纪80年代后出现的生物降解材料便可解决这种污染。这些具有降解能力的材料是在一定条件下、一定时间内能被细菌、霉菌、藻类等微生物降解的一类高分子材料。

1.1.6 发光材料

发光材料是指在各种类型激发作用下能产生光发射的材料。发光材料的种类繁多,按照发光材料的发光方式,主要分为光致发光、阴极射线发光、电致发光、热释发光、光释发光、辐射发光等。光致发光粉主要制作发光油墨、发光涂料、发光塑料、发光印花浆的理想材料,是发光材料的一个典型应用。

1.1.7 隐身材料

隐身材料并不能真正的隐身。一般来讲,军事上的隐身技术准确的术语应该是“低可探测技术”,即通过技术手段来改变自己本身具有的可探测性信息特征,从而降低被对方探测系统发现的概率。

隐身技术一般包括雷达隐身、红外隐身、磁隐身、声隐身、可见光隐身等,相应的材料按频谱可分为声、雷达、红外、可见光、激光、声控隐身材料。按材料用途可分为隐身涂层材料和隐身结构材料。典型的隐身材料包括雷达吸波材料、红外隐身材料、纳米复合隐身材料。

1.1.8 防弹材料

所谓防弹材料就是指能够实现防止子弹杀伤而具有一定保护能力的材料。在所有防弹材料制备的器件中,防弹衣较为典型。下面简单介绍防弹衣材料的研究历程。

最初的防弹衣是以天然纤维织物为服装衬里,配以钢板制成的防弹衣。为了改进防弹功能,第二次世界大战中出现了以特种钢为主的防弹衣,例如1942年英军首先研制成功的防弹背心就由三块高锰钢板组成。考虑到比重的不同,1945年铝合金与高强尼龙组合的防弹背心成功研制,这种防弹背心虽然重量有所减轻,但是体积大。为解决这一问题,20世纪70年代初,以高性能纺织纤维为构造主题的软体防弹衣开始出现,并广泛应用于军界、警界和政界。为了进一步提高防弹衣对高速枪弹的防御,人们又研制出一种复合式的防弹衣,通常以轻质陶瓷片为外层,以Kevlar等高性能纤维织物为内层,是目前防弹衣主要的发展方向。

1.1.9 杂化材料

杂化材料不同于一般复合材料。复合材料是由两种或两种以上不同性质的材料,通过物理或化学的方法,在宏观上组成具有新性能的材料。各种材料在性能上互相取长补短,产生协同效应,使复合材料的综合性能优于原组成材料而满足各种不同的要求。而杂化材料一般指两种以上、不同种类的有机、无机、金属材料在原子、分子水平上杂化,从而产生具有新型原子、分子集合结构的物质,含有这种结构要素的物质称为杂化材料。杂化材料可分为三类:功能杂化材料、结构杂化材料,医用杂化材料。纳米杂化技术是未来生物材料发展的重要方向和关键技术。

国内东华大学利用功能杂化技术成功制备防晒服装的衣料,可以屏蔽 99.7% 的紫外线,防晒指数 (UPF) 达 50 以上。事实上,功能杂化材料不仅能让纤维制品抗紫外线,还能大大提高抗静电、防辐射、轻薄、舒适等“特异功能”。同时作为一种性能优异的新型材料,其还在生物材料、医药材料、电子材料等众多领域有着用武之地。

1.1.10 光电材料

光电材料是指应用于制造各种光电设备的材料,主要包括激光材料、红外材料、光纤材料、非线性光学材料等。

(1) 激光材料。激光材料就是把各种电、光、射线能量转换为激光的材料。从激光器结构上看,激光器的核心是激光工作物质。激光材料实质就是激光器的工作物质,主要包括激光工质材料、激光调 Q 材料、激光调频材料和激光偏转材料。激光材料的开发和利用是激光器的重要发展发向。激光材料的一个重要研究方向是透明陶瓷。

透明陶瓷外形类似于玻璃材料,透明,同时具有高强度、高硬度等优点,抗表面损坏性能好。在军事领域,透明陶瓷可作为护目头盔和坦克、飞机等的窗口材料。在民用领域,可以使用透明陶瓷制成照相机内的组合镜片。

激光透明陶瓷可以在高功率激光器中得到应用,如果能够规模化生产,则可能引起激光器系统的功率极限急剧升高。该方面关键技术在于陶瓷的烧结技术与设备。我国在 2006 年由中国科学院上海光学精密机械研究所测试,中科院上海硅酸盐研究所自主研发成功了激光透明陶瓷,这标志着我国在激光材料方面取得重大突破,成为世界上仅有的几个掌握这一尖端技术的国家之一。

(2) 红外材料。红外材料一般指与红外线的辐射、吸收、透射、探测等相关的材料。红外材料主要有两类:红外探测材料和红外透波材料。

红外探测材料很多,其中铟化铟和碲镉汞是目前军用红外光电系统采用的主要红外探测材料。特别是碲镉汞,是当前较成熟也是各国侧重研究发展的主要红外材料。

红外透波材料主要有锗盐玻璃、人工多晶锗、氟化镁 (MgF_2)、人工蓝宝石、氮酸铝等。远红外材料是红外透波材料当前研究发展的重点之一。在 $8\sim 14\mu\text{m}$ 长波红外透波材料中, ZnS 是一种较好的远红外透波材料。

(3) 光纤材料。光纤是光导纤维的简写,是一种利用光在玻璃或塑料制成的纤维中能够全原理而制成的光传导工具。前香港中文大学校长高锟和 George A. Hockham 首先提出光纤可以用于通信传输的设想并因此获得 2009 年诺贝尔物理学奖。光纤材料主要是用于光纤的材料。

光纤一般是由纤芯、包层和涂敷层构成的多层介质结构的对称圆柱体。具有两种主要特

性：损耗和色散。因此，光纤材料实际包括由透明材料做成的纤芯和在它周围采用比纤芯的折射率稍低的用做包层的材料，射入纤芯的光信号，经包层界面反射，使光信号在纤芯中传播前进。

按照制作材料划分，光纤通常包括以下几种：

1) 高纯度石英玻璃光纤。这种材料损耗低，在波长时，最低达 0.47dB/km 。用锗硅材料作芯子、硼—硅材料作包层的多模光纤，损耗最低为 0.5dB/km ，具有类似的损耗—波谱曲线。采用三元化合物材料，可能获得最好的损耗—波谱曲线。

2) 多组分玻璃光纤。通常用更常规的玻璃制成，损耗也很低。

3) 塑料光纤。它与石英光纤相比具有重量轻、成本低、柔软性好、加工方便等特点，但损耗相对较大。目前，对塑料光纤的研制取得了重要的进展，光损耗率已降到 $9\sim 25\text{dB/km}$ 。工作波长扩展到 870nm （近红外光），接近于石英玻璃光纤的实用水平。

光纤的用途很多，典型的应用就是信息传输。利用光导纤维进行的通信叫光纤通信。光纤还可以制作传感器；利用光导纤维制成的内窥镜和光刀，可以帮助医生检查胃、食道、十二指肠等的疾病。

(4) 非线性光学材料。非线性光学指的是光与物质相互作用时产生的光频率改变等非线性光学效应。之所以称为非线性是因为频率发生改变，而光的出射光强与入射光强不呈正比，一般为平方或高次方关系。

非线性光学材料一般有二阶和三阶非线性光学材料。二阶非线性光学材料按照性质又可以分为无机晶体材料（如磷酸二氢钾、铌酸锂等）、半导体晶体材料（如碲和淡红银矿等）和有机晶体材料。三阶非线性光学材料可以是气体、原子蒸汽、液体、液晶、等离子体及各类晶体、光学玻璃等。典型的气体材料如各种惰性气体、碱金属和碱土金属的金属原子蒸汽；液体材料如 CS_2 、硝基苯等。最近的研究发现有些半导体如 InSb ，在红外区域有非常大的三阶非线性极化率，适用于各种非线性器件。

非线性光学晶体是重要的光电信息功能材料之一，广泛应用于激光倍频、和频、差频、光参量放大及电光调制、电光偏转等，是光电子技术，特别是激光技术的重要物质基础。

我国在非线性光学晶体研制方面成绩卓著，某些晶体特别是可见、紫外波段非线性晶体的研究方面一直处于世界领先地位。如掺镁铌酸锂晶体、性能优异的紫外非线性光学晶体等一系列硼酸盐的成功开发，开创了紫外激光倍频的新纪元，我国也是首次在国际上用溶剂法生长出可实际应用的磷酸二氢钾大单晶并实现产业化的国家，使磷酸二氢钾晶体在全世界得到普遍的应用，促进了激光技术的发展。另外，我国多种非线性光学晶体的生长技术也居国际先进水平，几乎所有重要的非线性光学晶体都已生长出来，在国际上享有较好的声誉。

1.2 电工电子功能材料

电工电子功能材料是指电工电子领域应用的各类材料的统称，包括导电材料、半导体材料、绝缘材料、电阻材料、电介质材料、磁性材料等。这些材料均具有一定的电学或磁学性能，主要用于电力电子行业。

1.2.1 导体材料

导体材料通常指在能量损耗相对比较小的情况下能够实现电流传输的材料。如在电工设备中常作为导体,如铜、铝等,其典型产品是电线、电缆的导电线心。因此,导体材料首先要求导电性能良好,具有高电导率。广义地讲,一般用于制造电触头、温差电偶、熔丝等用于电路熔断和触头的材料,也属于导体材料。但是这些材料和导体材料的性能要求相比,除电导率高外,还要求一些特殊性能,如制造熔丝的材料需要具有相对低的熔点,触头材料往往需要高的耐电弧性能等。随着科技的发展,导体材料也迅猛发展,导体材料的开发主要集中于合金化和新型导电材料的开发。例如,用于电线电缆的导线材料已经由单一的铜铝等线材发展到铝基的复合材料如铝(铝合金)基碳纤维或者碳化硅芯导线等。近年来,导电高分子作为一种新的电解质,在锂电池、太阳能电池和大容量电容器上得到应用。通过掺杂可以在一定范围内控制高分子材料的导电率,这一发现和开发使日本筑波大学白川英树等三人在2000年获得诺贝尔化学奖。

1.2.2 超导体材料

超导体就是导电能力超级强大的导体。简而言之,超导体材料就是没有电阻或电阻极小的导电材料。超导体一般在接近一定温度下工作,其电阻率接近为零,因此,超导体最独特的性能就是电能输送过程中几乎不会损失。几乎没有电损耗。

超导技术的核心主体是超导材料。自从荷兰科学家发现汞具有超导现象以后,20世纪80年代已发现上千种超导材料,其中有元素类,也有化合物。1986年后发现的高温超导体(即钡铋铜氧化物陶瓷)在液氮温度(77K)即具有超导性,引领了国际超导研究的新时代,这对超导技术的普及,甚至对人类文明产生深远影响。近年来,随着材料科学的发展,超导体材料的性能不断优化,实现超导的临界温度越来越高。新的超导氧化物系列也不断涌现,如Bi-Ca-CuO、Tl-Ba-Ca-CuO等,它们的超导转变温度超过了120K。

超导体可用于很多领域。例如,可以使用超导材料制备输电线,进行电力传输;采用超导材料还可以制备大容量超导发电机的关键部件——线圈和磁体;超导技术还可以用于磁力悬浮高速列车,也可作为核聚变时需要的能提供强大磁场的超导磁体。

1.2.3 半导体材料

半导体材料是指电阻率介于导电材料和绝缘材料之间的材料,电阻温度系数一般为负,禁带宽度为0.08~3eV。半导体材料经过第一代、第二代的发展和应用,目前发展开发的第三代半导体材料的禁带宽度更高些,如氧化锌,禁带宽度约为3.4eV。

半导体元素“杂化”技术是半导体材料研究的一个重要手段。导体的电导率通常随温度升高而下降。与导体相比,半导体的电导率一般和载流子有关,随温度升高而增大。因此,实际半导体材料在使用过程中为满足实际性能需要,往往需要进行杂化,通过缺陷和杂质含量的改变来调整半导性能,即利用掺杂来控制其性能以获得电子型(N型)半导体和空穴型(P型)半导体。

目前,半导体材料在电子工业和微电子工业中主要用来制作晶体管、集成电路、固态激光器等器件。无线电和电话就是建立在半导体基本器件——三极管的基础上发展而来的。近年来,发光二极管产品的应用正在引起世界各国的广泛关注。21世纪将是发光二极管为代表的新型照明光源时代。

1.2.4 电阻材料

通常在电子产品中所谓的电阻是指电阻器元件。电阻器是电气、电子设备应用最多的基本元器件之一，主要用于控制和调节电路中的负载。电阻器的分类有很多方法，按照材料进行分类，包括碳膜电阻、水泥电阻、金属膜电阻、线绕电阻等。除了按照材料分类外，还可以按照功率、电阻值的精确度等进行分类。电阻器材料是指用于制备电阻的材料。一般认为分两大类，一类强调电阻值在环境条件下的稳定性，另一类则正好相反，强调电阻阻值随环境因素变化而变化。前者一般用做精密电阻，调节电流用电阻和发热电阻；而后者则多用于功能性电阻。

1.2.5 绝缘材料

绝缘材料是指电阻率约为 $10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ 以上的材料。实用中优良绝缘材料的电阻率在室温下都大于 $10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ 。绝缘材料的作用是在电气设备中把电动势不同的带电部分隔离开来。因此绝缘材料往往有一定的基本的要求，而且不同的电工设备对绝缘材料性能的要求各有侧重。

绝缘材料分类方法很多，最简单、最常用的就是常按其聚集状态而分为固态、液态和气态。绝缘材料多数属于固体。无机固体绝缘材料，以离子型结构为主，主要特点为耐热性高，工作温度一般大于 180°C ，稳定性好，耐大气老化性、耐化学药品性及长期在电场作用下的老化性能好；缺点是脆性高，耐冲击强度低，耐压高而抗张强度低，工艺性差。有机绝缘材料一般为聚合物，平均分子量在 $10^4 \sim 10^6$ ，其耐热性通常低于无机材料。含有芳环、杂环和硅、钛、氟等元素的材料其耐热性则高于一般线链形高分子材料。

1.2.6 磁性材料

一般磁性材料主要是指过渡元素铁、钴、镍及其合金等能够直接或间接产生磁性的物质。

自 20 世纪 50 年代以来，磁性材料在全球的产值和产量几乎每十年就翻一番。21 世纪是信息技术的时代，随着信息产业结构调整和节约能源降低损耗的环保需求，磁性材料总体发展趋势是小、轻、薄以及多功能、数字化、智能化。例如，利用镍—钛系研制试验宇宙飞船的无线电通信天线。纳米磁性材料是未来磁性材料发展的一个重要方向，纳米磁性材料是纳米材料最早进入工业化的功能材料。其应用前景十分可观，在信息存储、处理和传输中占据重要地位。

1.2.7 电介质材料

电工中一般认为电阻率超过 $10 \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质便归于电介质。电介质的带电粒子被原子、分子的内力或分子间的力紧密束缚着，属于束缚电荷。在外电场作用下，这些电荷也只能在微观范围内移动，产生极化。能产生极化现象的物质统称为电介质。电介质的主要性能指标包括介电常数、介电损耗因子、介电强度。按照介电常数的大小，电介质可以分为高介电常数和低介电常数两大类。前者主要用于大容量电容器、微波领域等；后者主要用于超大规模集成电路，逐渐会成为半导体行业的一个分支。

电介质材料的一个重要组成部分就是包括具有压电性的压电材料、具有热释电性的热释电材料、具有铁电性的铁电材料。这些具有特殊性能的材料可用于机械、热、声、光、电之间的转换。在国防、探测、通信等领域具有极为重要的意义。

1.3 功能材料的发展趋势

功能材料是新材料领域的核心,在全球新材料研究领域,功能材料约占85%。随着信息社会的到来,特种功能材料对高新技术的发展起着重要的推动和支撑作用,是信息、生物、能源、环保、空间等高新技术领域的关键材料,因而成为世界各国新材料领域研究发展的重点。未来功能材料的发展趋势包括以下几个方面:①新型功能材料开发,特别是在极端环境下和特殊领域所需要的高性能的功能材料;②功能材料的功能性将从单一向复合,低级向高级的方向发展;③功能性和结构性能的兼容,即要求功能的优化,同时提高结构的层次;④发展功能材料的制备新工艺、新方法、新设计、新概念等;⑤拓展新型功能材料的产业化。

纳米功能材料是近些年迅速发展起来的一个功能材料研究领域。纳米材料是指三维空间尺度至少有一维处于纳米量级(1~100nm)的材料,它是由尺寸介于原子、分子和宏观体系之间的纳米粒子所组成的新一代材料。由于其组成单元的尺度小,界面占用相当大的成分。因此,纳米材料具有多种特点,如尺寸效应、表面效应等,导致一系列不同于一般材料的声、光、电、磁、热等物理化学性能,如当晶粒尺寸降到纳米长度范围时,同强度一样,塑性也被认为会升高,从而得到广泛的关注。

第2章 导电材料

2.1 导电材料的理论基础

2.1.1 经典导电理论

金属导体中的载流子主要是电子，电子的运动具有波粒二象性。也就是说，在研究电子运动的规律时，可以将电子视为微粒，也可以将其视为某种波动。因此，研究电子运动产生的电导时可以从两方面出发，一方面将电子看成粒子；另一方面将电子运动看成平面波。

传统经典导电理论是将电子看成粒子即将电子看成运动的质点，然后通过运动学理论进行研究。不存在电场的情况下，电子做无规则热运动，运动速率和温度成正比，不发生定向运动；有外加电场的情况下，电子发生定向移动，产生电流。

假设电场强度为 E ，电子质量为 m ，则电子的加速度为

$$\frac{dv_x}{dt} = a = -\frac{eE_x}{m}$$

相应的电流密度为

$$J_x = -nev_x$$

考虑电子在运动过程中将发生碰撞，速率将降低，速率随时间变化遵循式 (2-1)

$$v_x = v_{x0} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2-1)$$

其中 τ 为弛豫时间。将式 (2-1) 进行微分，有

$$\left[\frac{dv_x}{dt} \right]_{\text{碰撞}} = (v_{x0} e^{-\frac{t}{\tau}})' = v_{x0} e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \left(-\frac{1}{\tau} \right) = v_x \cdot \left(-\frac{1}{\tau} \right)$$

即

$$-\frac{eE_x}{m} + v_x \cdot \left(-\frac{1}{\tau} \right) = 0$$

根据

$$\frac{dv_x}{dt} = \left[\frac{dv_x}{dt} \right]_E + \left[\frac{dv_x}{dt} \right]_{\text{碰撞}} = 0$$

有

$$v_x = -\frac{e\tau}{m} E_x$$

代入电流密度表达式

$$J_x = -\frac{ne^2\tau}{m} E_x$$

从而

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

这里 σ 是金属电导率，它是一个表征物质固有属性的物理参数，和材料的属性无关。

2.1.2 玻尔兹曼传输方程

传统经典理论是在假设电子具有平均速度的条件下求取的，这种情况下求取电导率往往

要求知道粒子的运动速度。虽然我们可以将粒子看成运动的个体，但是由于微观粒子运动不同于宏观物体，每个粒子的速度是不可能求得的。因此，为了精确求解，反映微观运动的实际，通常采用统计学的分布函数来研究微观粒子的电导。通过大学物理的学习，我们知道玻尔兹曼分布函数是一种物理学常用的统计分布方法，利用这种统计分布的观点来研究电导所得到的方程就是玻尔兹曼传输方程，下面简要介绍该方程的内容。

如图 2-1 所示，针对时刻 t 、位置 x 、速度为 v 的粒子数可以采用速度分布函数 $f(t, x, v)$ 来表示，根据粒子从时刻 t 、位置 x 、速度为 v 变化到时刻 $t + dt$ 、位置 $x + vdt$ 、速度为 $v + a dt$ 时，粒子数不变，所以有方程 (2-2) 成立

$$f(t, x, v) = f(t + dt, x + vdt, v + a dt) \quad (2-2)$$

式中： a 为加速度； v 为速度。

$$a = \frac{e}{m} (E + vB) \quad (2-3)$$

式中： m 为粒子质量； E 为电场强度； B 为磁感应强度。

对式 (2-2) 进行泰勒级数展开，并取一次近似，则可以得到式 (2-4)

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t} + v \nabla_x f + a \nabla_v f &= 0 \\ \nabla_x &\equiv i \frac{\partial}{\partial x_1} + j \frac{\partial}{\partial x_2} + k \frac{\partial}{\partial x_3} \\ \nabla_v &\equiv i \frac{\partial}{\partial v_1} + j \frac{\partial}{\partial v_2} + k \frac{\partial}{\partial v_3} \end{aligned} \quad (2-4)$$

式中： i 、 j 、 k 分别表示 1、2、3 方向上的单位矢量。考虑到电子与电子和电子与离子之间的碰撞可能会改变分布函数，所以式 (2-4) 变为

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \nabla_x f + a \nabla_v f = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{碰撞}} \quad (2-5)$$

式 (2-5) 即为玻尔兹曼传输方程。

2.1.3 索末菲电导理论

索末菲电导理论也是采用统计分析方法研究电导，不同于玻尔兹曼分布函数的是这种方法采用的是费米狄拉克统计。利用这种方法推导得到的电导率的表达式为

$$\sigma = \frac{16\pi}{3h^3} (2m)^{1/2} e^2 \tau(E_F) E_F^{3/2} \quad (2-6)$$

式中： E_F 为费米能级。该部分详细推导见固体物理学相关内容。

2.1.4 电导的波动理论

上述模型都是将电子的运动看成质点的运动，采用物理学的运动理论进行电导率的推导。事实上，由于电子本身的质量和运动速率，可以从波动的角度研究电子的运动。将电子运动看成是某种波动时，电子波的运动将和晶体中晶格、杂质、缺陷等发生相互作用，形成散射。这种作用将进一步影响电子在运动过程中的障碍，形成电阻。因此，在计算电子电导

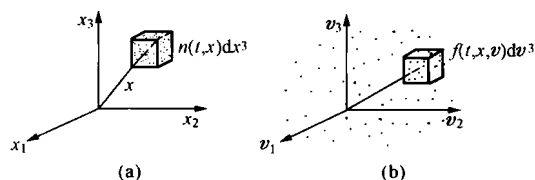


图 2-1 粒子在实空间和速度空间的分布
(a) 实空间；(b) 速度空间