

典型高性能功能 材料及其发展

江津河 王林同 主编



科学出版社

典型高性能功能材料及其发展

江津河 王林同 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从功能材料的结构出发,主要论述了在工程上应用较广和具有重要应用价值的一些功能材料,着重阐明其性能、制备、应用、发展动向等,主要内容包括功能金属材料、功能无机非金属材料、化学功能高分子材料、物理功能高分子材料、纳米材料、新型功能材料等。本书内容新颖,前瞻性较强,具有较强的可读性及参考价值。

本书可供从事功能材料研究与应用工作的科技人员与高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

典型高性能功能材料及其发展/江津河,王林同主编. —北京:科学出版社, 2017.11

ISBN 978-7-03-054540-4

I. ①典… II. ①江… ②王… III. ①功能材料—研究 IV. ①TB34

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第230864号

责任编辑:刘 畅/责任校对:王晓茜

责任印制:吴兆东/封面设计:铭轩堂

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年11月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年1月第二次印刷 印张:13

字数:254 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

材料是人类文明进步的标志，人类经历了分别以石器、青铜器、铁器为代表的石器时代、青铜器时代、铁器时代，即将跨入以新型功能材料为代表的网络时代和信息时代。

功能材料是在工业技术和人类历史的发展过程中不断发展起来的。特别是自 20 世纪 80 年代以来，电子技术、激光技术、能源技术、信息技术和空间技术等现代高技术的高速发展，强烈刺激着现代材料向功能材料方向发展，新型功能材料异军突起，促进了各种高技术的发展和应用，而功能材料本身也在各种高技术发展的同时得到了快速的发展。从 20 世纪 50 年代开始，随着微电子技术的发展和应用，半导体材料迅速发展；60 年代出现了激光技术，光学材料面貌为之一新；70 年代光电子材料，80 年代形状记忆合金等智能材料得到迅速发展。随后，包括原子反应堆材料、太阳能材料、高效电池等能源材料和生物医用材料等迅速崛起，形成了现今较为完善的功能材料体系。

功能材料是材料大家族中非常重要的成员，特别是自 20 世纪 70 年代开始，人们更是有意识地开发具有各种特殊功能的功能材料，并将以前对材料“量”的追求，即大量生产高质量结构材料，转变为对材料“质”的追求，即大力发展功能材料。

当前，国际功能材料及其应用技术正面临新的突破，超导材料、微电子材料、光子材料、信息材料、能源转换及储能材料、生态环境材料、生物医用材料及材料的分子设计和原子设计等正处于日新月异的发展之中，发展功能材料技术正在成为一些发达国家强化其经济与军事优势的重要手段。从网络技术的发展到新型生物技术的进步，处处都离不开新材料的发展，特别是新型功能材料的发展和进步。世界各国功能材料的研究极为活跃，充满了机遇和挑战，新技术、新专利层出不穷。功能材料不仅对高新技术的发展起着重要的推动和支撑作用，还对我国相关传统产业的改造和升级、实现跨越式发展起着重要的促进作用。

本书以功能材料为主线，全面系统地介绍了典型的高性能功能材料及其发展。全书共分为 7 章，主要内容有引言、功能金属材料、功能无机非金属材料、化学功能高分子材料、物理功能高分子材料、纳米材料和新型功能材料。面对繁多的新材料，如何正确地认识、选择或者设计材料是每个工程技术人员应该具有的知识。通过本书的学习，读者如果能够熟练处理功能材料制备和使用过程中遇到的

各种问题，开拓思路，提高分析问题和解决问题的能力，是作者最大的安慰，也是本书撰写最重要的出发点。

虽然本书在撰写的过程中参考了大量书籍和文献，但由于作者能力有限，文中难免出现疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2017年4月

目 录

前言

第 1 章 引言	1
1.1 功能材料的概念	1
1.2 功能材料的发展概况	1
1.3 功能材料的现状及展望	2
第 2 章 功能金属材料	4
2.1 磁性材料	4
2.2 超导材料	9
2.3 储氢合金	21
2.4 形状记忆合金	28
第 3 章 功能无机非金属材料	43
3.1 功能陶瓷	43
3.2 功能玻璃	54
3.3 半导体材料	64
第 4 章 化学功能高分子材料	74
4.1 离子交换树脂	74
4.2 吸附树脂	80
4.3 螯合树脂	84
4.4 高吸水性树脂	89
4.5 高分子化学试剂	93
4.6 高分子催化剂	99
第 5 章 物理功能高分子材料	111
5.1 电功能高分子材料	111
5.2 光功能高分子材料	123
5.3 液晶高分子材料	133
第 6 章 纳米材料	141
6.1 纳米材料概述	141
6.2 纳米材料的制备方法	146
6.3 纳米薄膜材料	164

6.4 纳米固体材料	165
6.5 纳米复合材料	166
第 7 章 新型功能材料	169
7.1 智能材料	169
7.2 隐身材料	175
7.3 梯度功能材料	181
7.4 新能源材料	192
主要参考文献	201

第1章 引言

材料是现代科技和国民经济的物质基础。一个国家生产材料的品种、数量和质量是衡量其科技和经济发展水平的重要标志。因此，材料、信息和能源为现代文明的三大支柱，新材料、信息和生物技术是新技术革命的主要标志。

1.1 功能材料的概念

尽管功能材料具有悠久的历史，但其概念在近几十年才被人们逐渐确认、接受并采用。功能材料的概念是由美国贝尔实验室的 J. A. Morton 博士于 1965 年首先提出的。后来经材料界的大力提倡，逐渐被各国普遍接受。

目前，将功能材料定义为“具有优良的电学、磁学、光学、热学、声学、力学、化学和生物学等功能及其相互转换的功能，被用于非结构目的的高技术材料”。

1.2 功能材料的发展概况

功能材料的发展历史与结构材料一样悠久，但是其产量和产值远远少于结构材料。最早的功能材料主要是为了满足电工行业的需求而发展的材料，如导电材料、磁性材料、电阻材料及触头材料等。近几十年来，随着科学技术的进步及金属、高分子、陶瓷和复合材料的飞速发展，传统的以金属结构材料占主导地位的格局已被打破，新型功能材料的开发受到了高度重视，高性能的新功能材料不断涌现。

20 世纪 50 年代随着微电子技术的发展，半导体电子功能材料得到了飞速发展，推动了光电转换、热电转换、半导体传感器等材料的出现；20 世纪 60 年代出现的激光技术推动了一系列新型光学材料的发展；20 世纪 70 年代的石油危机直接导致了发达国家投入大量的人力和财力开展新能源的研究，推动了太阳能电子材料、储氢材料等的发展和应用；近年来，信息产业的快速发展强有力地推动着信息功能材料如磁记录材料、光记录材料、显示材料等的广泛使用和不断进步；随着现代人类对资源与环境保护的高度重视，智能材料、环境材料等相继出现。在具有新功能材料随科学技术的发展不断涌现的同时，原有的功能材料也在不断发展。例如，20 世纪 60 年代初，美国科学家首先发现近等物质的量比的 Ni-Ti

合金具有形状记忆效应,其后各国科学家相继开发出多种记忆合金,并使之应用于许多领域;超导材料研究的不断进步使超导温度达到了液氮温区;永磁材料的磁能积在 20 世纪 50 年代约为 50kJ/m^3 ,到 20 世纪 80 年代,日本科学家发现了具有优异磁性能的 Nd-Fe-B 合金,到了 2000 年,制备的 Nd-Fe-B 合金磁能积高达 444kJ/m^3 ,这对于仪器仪表、电工设备、驱动装置等的小型化和降低能耗都有重要意义。

总体上看,功能材料的发展主要受到以下几方面的推动:①新的科学理论和现象的发现;②新的材料制造技术的出现;③新工程和技术的要求。目前,功能材料的发展速度仍然很快,它不但是材料的一个重要组成部分,而且对人类社会发展和物质生活有着深远、重要的影响。

功能材料与结构材料相比有其自身的特点,主要表现在以下几个方面:①在性能上,功能材料以材料的电、磁、声、光等物理、化学和生物学特性为主;②在用途上,功能材料常被制成元器件,材料与器件一体化;③在对材料的评价上,器件的功能常直接体现出材料的优劣;④在生产制造上,功能材料常常是知识密集、多学科交叉、技术含量高的产品,具有品种多、生产批量小、更新换代快的特点;⑤在微观结构上,功能材料具有超纯、超低缺陷密度、结构高度精细等特点。

为达到功能材料常需的结构高度精细化和成分高度精确的要求,常常需要采用一些先进的材料制备技术来制备功能材料,如真空镀膜技术(包括离子镀、电子束蒸发沉积、离子注入、激光蒸发沉积等)、分子束外延、快速凝固、机械合金化、单晶生长、极限条件下(高温、高压、失重)制备材料等。采用这些先进的材料制备技术,可以获得具有超纯、超低缺陷密度、微观结构高度精细(如超晶格、纳米多层膜、量子点等)、亚稳态结构等微观结构特征的材料。

基于目前材料科学发展的这种趋势,本书运用材料物理、材料学、材料工艺学的知识,论述了一些重要的功能材料之所以具有特殊功能的基本原理,材料制备方法,材料的结构、性能特点和应用。值得指出的是,新的功能材料的发展与材料制备新工艺方法的发展是密切相关的。因此,本书也适当介绍了一些材料制备的新方法。

1.3 功能材料的现状及展望

近年来,功能材料迅速发展,已有几十大类、10 万多个品种,且每年都有大量新品种问世。日本的 21 世纪基础技术开发计划的 46 个领域中,有 13 个领域是功能材料。

功能材料的历史和现状与结构材料一样,也有着十分悠久的历史。例如,罗

盘的使用在我国至少可追溯到公元 2 世纪,并在公元 13 世纪传到欧洲。随着工业革命的兴起,机器制造业、交通、建筑等快速发展,结构材料的发展十分迅速,形成了庞大的生产体系,产量急剧增加。除了电工材料随电力工业的发展而有较大的增长外,功能材料的发展相对较为缓慢。

随着第二次世界大战之后高科技的发展,微电子工业、信息产业、新能源、自动化技术、空间技术、海洋技术、生物和医学工程等高技术产业迅速兴起并飞速发展,在国民经济中占据了日益重要的地位,而功能材料则是支撑这些高技术产业的重要物质基础。因此,功能材料在近几十年来受到日益广泛的重视。功能材料的品种越来越多,功能材料的应用范围越来越广。尽管从产量上看,功能材料仍远远低于结构材料,但从其产生的经济效益和在国民经济中的作用上看,功能材料已大有与结构材料并驾齐驱之势,尤其是在高技术领域,其作用与地位十分显著。

我国也很重视对功能材料的研究,国家自然科学基金、863 计划、973 计划和国防预研基金都列有许多功能材料的项目,在半导体、介电、压电、铁电、新型铁氧体、光源、信息传输、信息储存和处理、光纤、电色、光色、形状记忆合金、非线性光学晶体、超导、电磁和生物医学等材料的研究和开发方面都取得了很大进展。目前,无机非线性光学晶体、有机高密度光电子信息存储材料、碳纳米管和功能陶瓷等的研发已达到国际先进水平。

展望 21 世纪,高新技术迅速发展,对功能材料已提出的新设计有化学模式识别设计、分子设计、非平衡态设计、量子化学和统计力学计算法等,这些新设计方法都要采用计算机辅助设计(CAD),这就要求建立数据库和计算机专家系统,已提出的新工艺有激光加工、离子注入、等离子技术、分子束外延、电子和离子束沉积、固相外延、精细刻蚀、生物技术及在特定条件下(如高温、高压、低温、高真空、微重力、强电磁场、强辐射、急冷和超净等)的工艺技术。对上述的新设计和新工艺要进一步发展和实用化,然而更重要的是要探索和研究前人还没有提出的新设计和新工艺。

第2章 功能金属材料

在科学技术发展的漫长过程中,功能金属材料具有优良的电学、磁学、光学、热学、生物医学等功能,主要用来制造各种功能元器件,被广泛应用于各类高科技领域。本章主要讲述各种功能金属材料的构造及应用,为各个工程领域开拓了新的研究内容,带来了新的生命力和发展前景。

2.1 磁性材料

2.1.1 磁性的基本概念

1. 磁矩

“磁”来源于“电”。由物理学可知,一个环形电流周围的磁场,如一条形磁铁的磁场,其方向符合右手螺旋法则,如图 2-1 所示。磁矩定义为

$$\mathbf{M} = I \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{n}$$

式中, $\mathbf{M}$ 为载流线圈的磁矩; $\mathbf{n}$ 为线圈平面法线方向上的单位矢量; S 为线圈的面积; I 为线圈通过的电流。

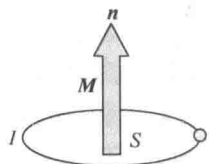


图 2-1 磁矩示意图

在磁性材料中存在磁矩,磁矩可以看作由北极和南极组成的小磁棒,其方向由南指向北。磁矩在磁场中受到磁场对它的力矩作用时,将沿磁场方向取向,以降低系统的静磁能。

2. 磁场强度、磁感应强度、磁化强度及其关系

磁场强度 H : 如果磁场是由长度为 l 、电流为 I 的圆柱状线圈 (N 匝) 产生的(图 2-2), 则磁场强度 (单位为 A/m) 不考虑介质特性, 仅考虑由电流决定的磁场, 则

$$H = \frac{NI}{l}$$

磁感应强度 B : 表示材料在外磁场 H 的作用下在材料内部的磁通量密度, 磁感应强度是考虑介质特性, 由介质和电流共同决定的磁场。 B 的单位为 T 。

B 和 H 都是磁场向量，不但有大小，而且有方向。

磁场强度和磁感应强度的关系为

$$B = \mu H$$

式中， μ 为磁导率（单位为 H/m ），是材料的特性常数，表示材料在单位磁场强度的外磁场作用下，材料内部的磁通量密度 [图 2-2 (b)]。

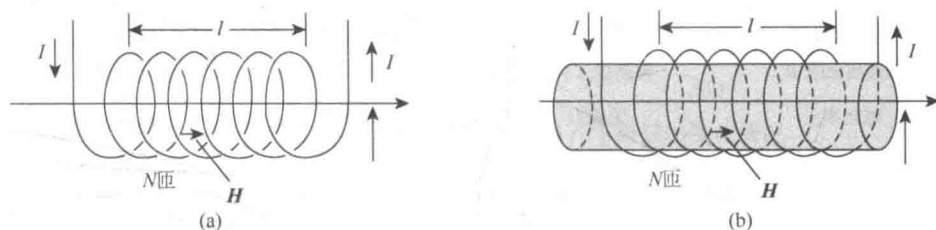


图 2-2 通电线圈产生的磁感应强度

(a) 在真空中产生的磁感应强度；(b) 在固体介质中产生的磁感应强度

在真空中 [图 2-2 (a)]，磁感应强度 (B_0) 为

$$B_0 = \mu_0 H$$

式中， μ_0 为真空磁导率，为普适常数，其值为 $4\pi \times 10^{-7} H/m$ 。

描述固体材料磁性的参数有相对磁导率、磁化强度和磁化率，其定义如下。

1) 相对磁导率 (μ_r) (无量纲参数) 是材料的磁导率 (μ) 与真空磁导率 (μ_0) 之比，即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

2) 单位体积的磁矩称为磁化强度，用 M 表示，即磁化强度为在外磁场 H 的作用下，材料中因磁矩沿外场方向排列而使磁场强化的量度。 M 的大小与外磁场强度成正比，即

$$M = \chi H$$

式中， χ 为磁化率，为无量纲参数。

3) 任何物质在外磁场作用下，都会产生极化，并有

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

磁化率 χ 与相对磁导率之间的关系为

$$B = \mu H = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 H + \mu_0 \chi H = \mu_0 (1 + \chi) H$$

$$\mu / \mu_0 = \mu_r = 1 + \chi$$

$$\chi = \mu_r - 1$$

上述磁学量的单位，目前经常用国际单位制 (SI) 和高斯单位制 (CGS)

两种，容易引起混淆，为此在表 2-1 中列出了两种单位制中部分磁学量的换算关系。

表 2-1 两种单位制的换算关系

磁学量	国际单位制	高斯单位制	换算关系
磁场强度 H	安/米 (A/m)	奥斯特 (Oe)	$1\text{A/m} = 4\pi \times 10^{-3}\text{Oe}$
磁化强度 M	安/米 (A/m)	高斯 (Gs)	$1\text{A/m} = 10^{-3}\text{Gs}$
磁感应强度 B	特斯拉 (T)	高斯 (Gs)	$1\text{T} = 10^4\text{Gs}$
磁化率 χ	无量纲	无量纲	$\chi_{\text{国际}} = 4\pi\chi_{\text{高斯}}$
磁导率 μ	亨 [利] /米 (H/m)	无量纲	$\mu_{\text{国际}} = 10^7(4\pi)^{-1}\mu_{\text{高斯}}$

2.1.2 物质的磁性分类

物质的磁性源自于构成该物质的所有原子磁矩的叠加。由于电子的循轨运动和自旋运动存在于一切物质中，因此严格来说，一切物质都是磁性体（也称为磁质），只是其磁场的磁化方向和强度因物质不同而显示出很大差别而已。所有物质不论处于什么状态都显示或强或弱的磁性。根据物质磁化率的大小，可以把物质的磁性大致分为以下 3 类。

1. 抗磁性

抗磁质的磁化场与外场方向相反，因此具有负的磁化率，一般为 $-10^{-5} \sim -10^{-6}$ 。抗磁性的产生是由于在外磁场作用下，原子内的电子轨道绕磁场方向运动，获得附加的角速度和微观环形电流，从而产生与外磁场方向相反的感生磁矩。原子磁矩叠加的结果，是使宏观物质产生与外场方向相反的磁矩。图 2-3 为抗磁性材料在无磁场和有磁场条件下磁矩的变化情况。

2. 顺磁性

顺磁性是指磁质被磁化后，磁化场方向与外场方向相同。顺磁性的起因是电子的轨道运动或自旋产生原子磁矩或分子磁矩，在外加磁场作用下，沿外场方向平行排列，使磁质沿外场方向产生一定强度的附加磁场。顺磁性物质主要包括 Mo、Al、Pt、Sn 等。顺磁体的磁化率 χ 为正值，为 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ ，在磁场中受微弱吸力。图 2-4 为顺磁性材料在无磁场和有磁场条件下磁矩变化示意图。

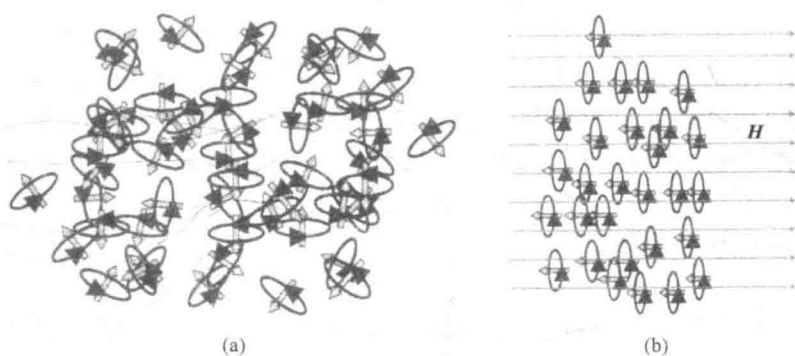


图 2-3 抗磁性材料在无磁场和有磁场条件下磁矩的变化情况

(a) 无磁场; (b) 有磁场

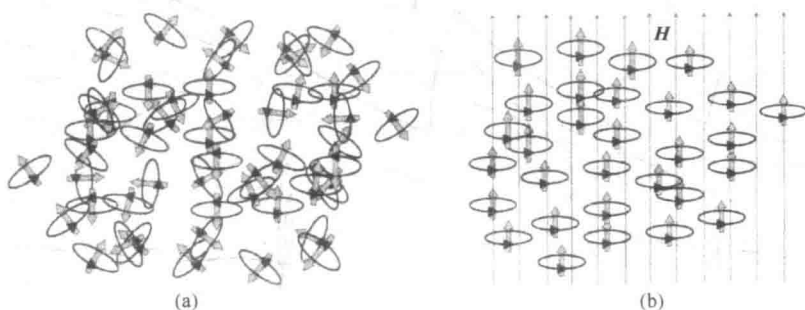


图 2-4 顺磁性材料在无磁场和有磁场条件下磁矩变化示意图

(a) 无磁场; (b) 有磁场

3. 铁磁性

铁磁性物质主要为 Fe、Ni、Co 和一些稀土元素在足够低的温度下甚至在没有外场时, 由于原子间的交换作用, 原子磁矩发生有序的排列, 即产生所谓的自发磁化, 这种自发磁化的特性称为铁磁性。铁磁质的磁化率为 $1 \sim 10^4$ 。3d 金属元素如 Fe、Ni、Co 的自发磁化源于 3d 电子之间的交换作用。4f 稀土元素的自发磁化则源于 4f 电子的间接交换作用, 即通过 4f 电子与 6s 电子的交换作用使 6s 电子极化, 而极化 6s 电子的自旋将 4f 电子的自旋与相邻原子的 4f 电子自旋间接地耦合起来, 从而产生自发磁化。在热力学温度 0K 时, 铁磁质中原子磁矩都平行排列。

2.1.3 磁记录材料进展

1. 高磁记录密度磁膜材料

磁记录技术的发展要求有高磁记录密度的材料, 近来报道了 CoCrPtTa 和 CoCrTa

磁膜材料,其磁记录密度分别为 0.8Gb/cm^2 和 0.128Gb/cm^2 。此外,利用有高矫顽力的铁氧体或稀土合金膜和有高饱和磁化强度的磁性金属膜组成双层膜,也可以得到兼有高矫顽力和高饱和磁化强度的高磁记录密度磁膜材料,如钴铁氧体/铁的饱和磁化强度达 1000kA/m , SmCo/Cr 的矫顽力达 155kA/m 。

2. 高频和自旋阀磁头材料

高频和自旋阀磁头材料是磁记录技术发展急需的材料。一般的磁头材料,在高频下性能要变坏。近年来出现了两种高频磁头材料:一种是用电镀法制成的 $\text{NiFe}(80/20)$ 磁头,其写入气息宽度和窄磁极厚度分别为 0.25mm 和 3mm ;另一种是用测射法制成的多层 FeN 膜磁头, FeN 膜厚 29.7nm ,膜间用 2.5nm 的 Al_{203} 膜隔开,共有 102 层,其写入气息宽度和窄磁极厚度分别为 0.3mm 和 3nm 。自旋阀巨磁电阻磁头比一般各向异性磁电阻磁头的磁电阻输出高,响应线性好,不需附加横偏压层。例如, NiFe/CoFe 双层膜作软磁自由层,用测射法在玻璃基片上淀积的 $\text{Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/FeMn/Ta}$ 多层膜,其磁电阻率为 7%。

3. 低磁场庞磁电阻材料

由于庞磁电阻材料有极高的磁电阻率,因此在磁头、磁传感器和磁存储器中有可能得到重要的应用。一般情况下,庞磁电阻都在很高的磁场 (1T) 中才产生,要在实际应用时,必须研制能在低磁场 (如小于 0.1T) 下产生庞磁电阻的材料。

4. 巨霍尔效应磁性材料

巨霍尔 (Hall) 效应磁性材料的霍尔效应比一般磁性材料高几倍到几十倍甚至更高,它能显著提高霍尔效应器件的灵敏度。近年来,有报道 $(\text{NiFe})_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ (x 为 $0.53\sim 0.61$) 颗粒型薄膜材料在 0.4T 磁场中,异常霍尔电阻率达 $200\mu\Omega\cdot\text{cm}$; $\text{Fe}_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ 颗粒型薄膜 (膜厚约为 $0.5\mu\text{m}$) 在其 x 小于金属-绝缘体相变成分 x_c 时,室温下的正常霍尔系数和饱和和异常霍尔电阻率分别为 $10/\text{T}$ 和 $250\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 。

5. 巨磁阻抗材料

继发现巨磁电阻效应后,1994 年又报道了巨磁阻抗效应 (giant magneto-impedance effect, GMI): 在一非晶态高磁导率软磁细线的两端施加高频电流 ($50\sim 100\text{MHz}$),由于趋肤效应,感生的两端阻抗 (或电压) 随频率变化而有大的变化,

其灵敏度高达 $0.125\% \sim 1\%$ 。巨磁阻抗效应在磁信息技术中有很多潜在用途。有文献表明,直径 44cm 的欧姆合金 (Ni-Fe) 丝在 16kA/m 的直流磁场作用下,在 $0.1 \sim 10^4$ MHz 的频率时,有巨磁阻抗效应;在 $0.1 \sim 50$ MHz 频率时,磁阻抗率随频率升高而下降到负值;在 $50 \sim 10^3$ MHz 时,磁阻抗率随频率升高而升高;在频率为 4×10^3 MHz 时,达到最大值 190%;频率大于 4×10^3 MHz 后,磁阻抗率又急剧下降。

2.2 超导材料

超导材料的发展经历了一个从简单到复杂,即由一元系到二元系、三元系以至多元系的过程,如图 2-5 所示。

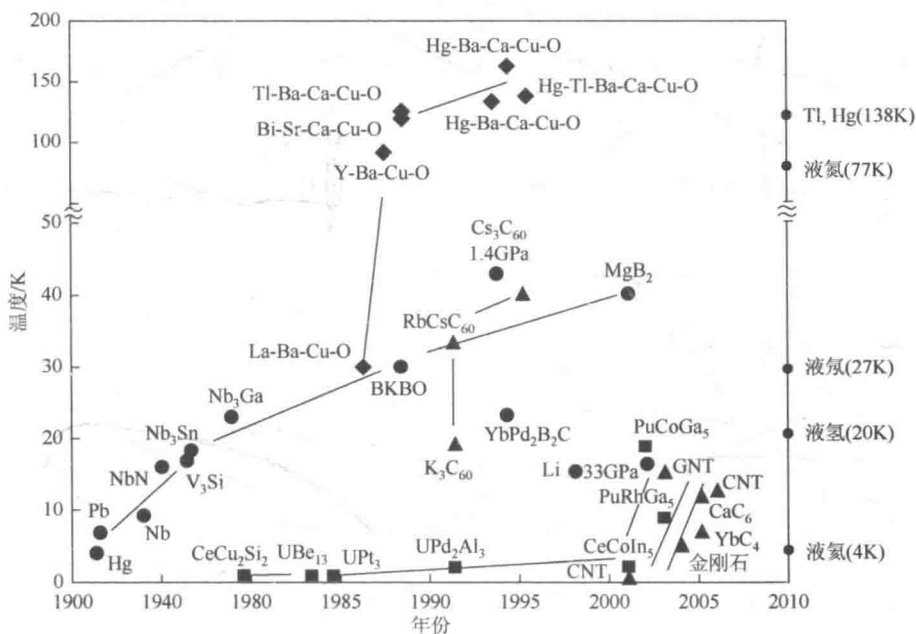


图 2-5 超导体临界温度随年份的变化

2.2.1 超导材料的基本物理性质

如果把超导金属制成一个闭合环,且通过电磁感应在环中激起电流,那么,这个电流将在环中维持数年之久。物质在超低温条件下失去电阻的性质称为超导电性;相应的具有这种性质的物质称为超导体。超导体在电阻消失前的状态称为常导状态;电阻消失后的状态称为超导状态。

1. 零电阻现象

在理想的金属晶体中, 电子的运动是畅通无阻的。因此, 理想晶体是没有电阻的, 这就是常导体的零电阻。实际上, 金属晶格原子的运动会产生一定的电阻, 即使温度降为零时, 其电阻率 ρ_0 也不为零。超导体具有零电阻现象与常导体零电阻在实质上截然不同。当温度 T 降至某一数值居里温度(T_c)或以下时, 超导体的电阻突然变为零 (电阻率约为 $10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$), 这就是超导体的零电阻现象。电阻率 ρ 与温度 T 的关系见图 2-6。

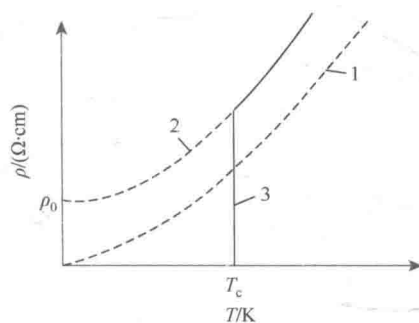


图 2-6 电阻率 ρ 与温度 T 的关系

1. 纯金属晶体; 2. 含杂质和缺陷的金属晶体; 3. 超导体

2. 三个临界参数的关系

要使超导体处于超导状态, 必须将它置于三个临界值 T_c 、 H_c 和 I_c 之下。其中, T_c 、 H_c 只与材料的电子结构有关, 是材料的本征参数。而 I_c 和 H_c 不是相互独立的, 它们彼此有关并依赖于温度。三者关系可用图 2-7 所示曲面来表示。

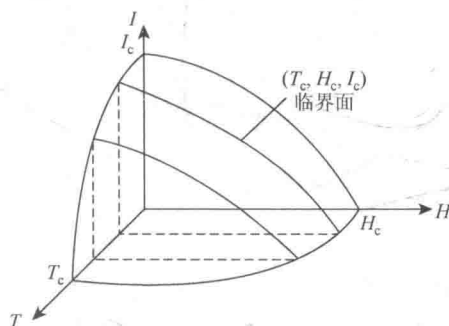


图 2-7 三个临界参数之间的关系