



高 等 学 校
工 科 电 子 类 规 划 教 材

磁性物理学

宛德福 马兴隆

电子科技大学出版社

磁性物理学

宛德福 马兴隆

电子科技大学出版社

• 1994 •

[川]新登字 016 号

内 容 提 要

本书系统地介绍了磁性物理学的基本概念、原理和方法。全书由磁性起源和自发磁化、磁畴理论和技术磁化、磁化过程动力学、磁与非磁因素(电、光、热、应力等)的交叉效应四部分组成,共九章。各章列有“学习本章要求”、“本章提要”和“习题”。书中强调物理概念和原理的阐述,对重要数学公式亦有推导,并扼要地讨论了理论的应用。

本书为高等工科院校电子材料与元器件专业磁学方向本科生教材,也可供微电子技术、物理学等相关学科领域的大学本科生、研究生、教师及工程技术人员参考。

DL87/19

磁性物理学

宛德福 马兴隆

*

电子科技大学出版社出版

(成都建设北路二段四号) 邮编 610054

电子科技大学出版社印刷厂印刷

新华书店经销

*

开本 850×1168 1/32 印张 18.0625 字数 447 千字

版次 1994 年 11 月第一版 印次 1994 年 11 月第一次印刷

印数 1—3000 册

ISBN 7-81016-833-9/TN · 170

定价:10.30 元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定，我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978~1990年，已编审、出版了三个轮次教材，及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神，“以全面提高教材质量水平为中心，保证重点教材，保持教材相对稳定，适当扩大教材品种，逐步完善教材配套”，作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想，组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会，在总结前三轮教材工作的基础上，根据教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1991~1995年的“八五”（第四轮）教材编审出版规划。列入规划的，以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作，由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿，其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的，其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的，其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会（小组）、教学指导委员会和有关出版社，为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评和建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部电子类专业教材办公室

前 言

磁性物理学是研究物质的磁性起源及在外界因素作用下磁性发生变化的基本规律的学科。本书包括四部分，即磁性起源和自发磁化、磁畴和技术磁化、磁化过程动力学、磁与非磁因素耦合效应。通过物理图像和概念叙述及简明的数学推导，系统阐述有关上述内容的实验规律和基本理论。本书与我们在1987年编写出版的《磁性物理》相比，突出地加强了与工程方面有密切关系的物理内容，大幅度地削减了陈旧或与工程方面关系不太大的篇幅；在每章列有“学习本章要求”、“本章提要”和“习题”。希望通过这些“要求”和“提要”，启迪读者发挥学习主动性和自我学习检查；至于“习题”，希望读者真正把做过的每一道题从概念原理上彻底弄清楚，考虑从理解和掌握基本概念和规律的需要出发，只选编了少量的题目。

本书由宛德福主编统稿，电子科技大学过璧君教授主审。第一、二、三章由马兴隆撰写，绪论、第四至第九章由宛德福撰写。

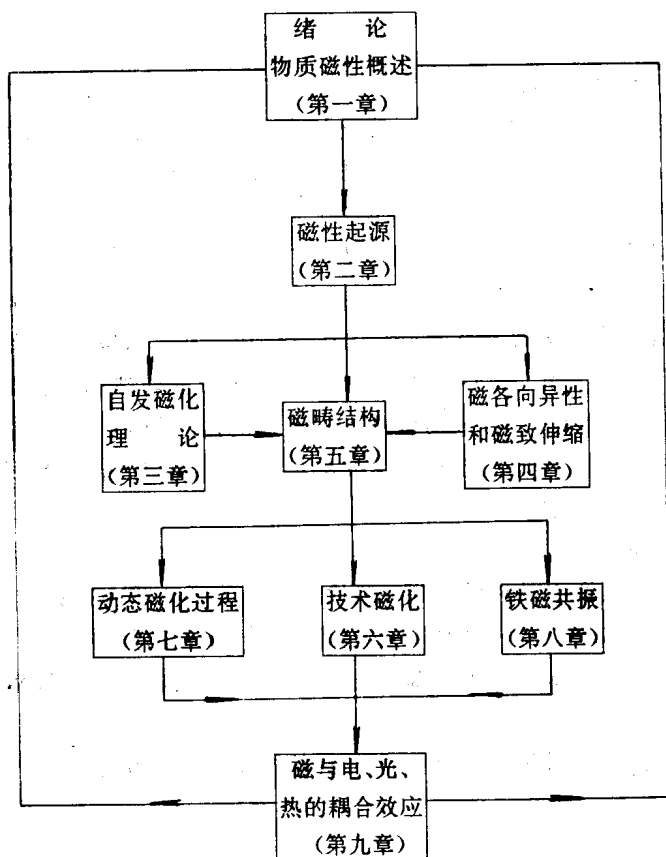
在完成本书的过程中，我们借鉴了国内外的许多教材，得到了电子材料与元器件教材编审委员会的热情关怀，作者谨致以谢意。

我们热切地盼望读者对此书的各方面提出宝贵意见。

编 者

于一九九三年十一月

磁性物理教学流程图



目 录

绪 论	(1)
1 磁学发展梗概	(1)
2 磁性物理学的内容	(7)
3 磁性问题的理论研究方法	(8)
4 磁性物理学与技术的关系	(11)
第一章 物质磁性概述	(14)
1.1 基本磁学量	(14)
1.2 磁化状态下磁体中的静磁能量	(25)
1.3 物质按磁性分类	(29)
1.4 磁性材料的磁化曲线和磁滞回线	(36)
本章提要	(39)
习题一	(40)
第二章 磁性起源	(41)
2.1 电子的轨道磁矩和自旋磁矩	(41)
2.2 原子磁矩	(45)
2.3 回旋磁效应	(52)
2.4 过渡族金属的原子磁矩	(55)
2.5 轨道角动量冻结	(57)
2.6 稀土金属的原子磁矩	(63)
2.7 铁磁性合金的磁矩	(65)
本章提要	(72)
习题二	(72)
第三章 自发磁化理论	(74)
3.1 铁磁性物质的基本特征	(74)
3.2 铁磁性分子场理论	(77)

3.3	次晶格与定域分子场	(90)
3.4	亚铁磁性的基本理论	(97)
3.5	直接交换作用	(119)
3.6	超交换作用	(130)
3.7	低温自发磁化的 $T^{3/2}$ 定律	(135)
3.8	铁磁性的能带理论	(139)
3.9	RKKY 理论概述	(142)
	本章提要	(146)
	习题三	(148)
第四章	磁各向异性与磁致伸缩	(150)
4.1	磁各向异性类型	(150)
4.2	磁晶各向异性的唯象理论	(154)
4.3	磁晶各向异性常数	(162)
4.4	磁晶各向异性等效场	(168)
4.5	磁晶各向异性的来源	(171)
4.6	感生磁各向异性	(176)
4.7	交换各向异性	(181)
4.8	磁致伸缩	(185)
4.9	磁弹性能量	(205)
	本章提要	(211)
	习题四	(211)
第五章	磁畴理论	(213)
5.1	磁畴的成因	(213)
5.2	磁畴壁结构及其特性	(219)
5.3	畴壁厚度和畴壁能计算	(228)
5.4	磁畴结构计算	(237)
5.5	薄膜的磁畴结构	(259)
5.6	磁畴、畴壁观察技术	(275)
	本章提要	(281)
	习题五	(282)
第六章	技术磁化	(284)

6.1	磁化过程概述	(284)
6.2	可逆畴壁位移磁化过程	(292)
6.3	畴壁位移的起始磁化率	(301)
6.4	可逆磁畴转动磁化过程	(310)
6.5	不可逆磁化过程	(319)
6.6	磁化曲线的计算	(329)
6.7	反磁化过程	(342)
6.8	剩余磁化	(363)
6.9	静态磁参数分析	(370)
	本章提要	(386)
	习题六	(388)
第七章	动态磁化过程	(389)
7.1	动态磁性参数	(389)
7.2	动态磁化过程的磁损耗	(402)
7.3	磁性涡流损耗	(406)
7.4	磁滞损耗	(416)
7.5	剩余损耗	(421)
7.6	磁化强度矢量的运动方程	(437)
7.7	畴壁动态特性	(442)
7.8	磁畴自然共振	(452)
7.9	磁谱	(459)
	本章提要	(462)
	习题七	(464)
第八章	微波磁性基础	(465)
8.1	张量磁导率 $[\mu]$	(466)
8.2	正负圆偏振波磁场下的磁导率	(474)
8.3	铁磁共振线宽	(478)
8.4	铁磁体中的自旋模式	(482)
8.5	一致进动自旋模式	(484)
8.6	非一致进动自旋模式	(501)
8.7	高功率现象与理论	(521)

本章提要	(534)
习题八	(535)
第九章 磁与电、光、热的耦合效应	(537)
9.1 磁场电效应	(537)
9.2 磁光效应类型	(544)
9.3 磁光效应的物理原理	(547)
9.4 磁光效应的量子理论	(552)
9.5 磁光效应的应用	(556)
9.6 磁致热效应	(558)
本章提要	(564)
习题九	(564)
附录	(565)

绪 论

1. 磁学发展梗概

物质的磁性是一个历史悠久的研究领域,约在三千多年前受到人们的注意。中国是最先应用磁性的国家。公元前四世纪我国使用磁石制成了司南,它是世界上最早的指南针。在《鬼谷子》一书中记载:“郑人取玉,必载司南,为其不惑也。”《论衡》中更明确地指出,“司南之杓,投之于地,其柢指南。”司南是掌握方向之意,它就是指南针的前身。图1是我国古代司南的复原图。

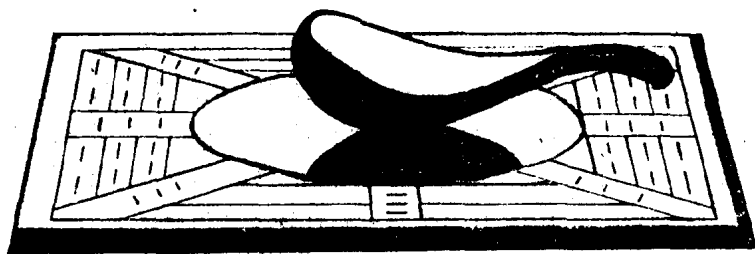


图1 中国古代司南复原图

从司南到指南针的发明,当推中国的文献记载了。北宋时期的《梦溪笔谈》巨著中,不仅记载了指南针的制法,而且还总结了应用方法。书云:“方家以磁石磨针锋,则能指南,……水浮多荡摇,指抓

及碗唇上皆可为之,运转尤速,但坚滑易坠,不若缕悬之最善。其法取矿中独茧缕,以芥子许蜡,缀于针腰,无风处悬之,则针常指南”。可以说,此为磁性应用的最早记载。以后,航海事业上用的罗盘,就是在指南针的基础上改进的。

磁学史上,第一部磁学专著是英国吉耳伯特(WGilbert)的《论磁石》(1600年),在这本书里介绍了那时书籍有关的磁性知识。然而,磁性作为一门科学,却到19世纪前半期才开始发展。例如,丹麦物理学家奥斯特在1820年发现电流的磁效应,拉开了磁与电之间联系的序幕;法国物理学家安培于1820年末,证明通电圆形线圈和普通磁铁一样,有相同的吸引或排斥作用。安培随后又提出著名的“分子电流”假说,它预言了原子和物质的磁性的现代电子理论,成为磁学的理论基础,对磁学的发展起了推动作用。到了1831年,英国科学家法拉第,发现了电磁感应定律,从而揭示出电与磁之间的内在联系。即动电生磁,动磁生电。后来,苏格兰物理学家麦克斯韦,将电磁的联系建立起严密的电磁场理论。他发展了法拉第的思想,用数学形式即麦克斯韦方程,总结出电场和磁场的联系。

在上述一般磁性理论发展的同时,也在研究磁性现象物理学中的许多专题。例如,1845年法拉第确定了抗磁性和顺磁性的存在,居里(Curie)对抗磁性和顺磁性的温度关系进行了广泛的实验研究,至1905年,郎之万(Langevin)利用拉莫(Larmor)进动和洛伦兹(Lorentz)电子理论,对上述两种磁性现象作出解释。

关于铁磁性理论的系统研究工作开始于本世纪初叶,1907年,法国物理学家外斯(Weiss)在郎之万顺磁性理论基础上,第一次成功地建立起铁磁性现象的物理模型,奠定了现代铁磁性理论的基础。从此,现代铁磁性理论得到迅速发展。近一个世纪以来,磁学和磁性材料的发展,已对人类社会产生了巨大的影响。为了解释各种各样的铁磁性物质的磁性起源,磁学研究者们提出了各种

理论模型。这些理论模型有：

(1)“分子场”理论模型 前面已提到,本世纪初,外斯为了解释铁磁性物质的磁化曲线和磁化特征,他首先引入了“分子场”的概念。这是对铁磁物质特性最早的理论描述。但是,这个理论模型对分子场的物理本质和原子为什么有一定大小的磁矩这两个问题却悬而未决。

(2)交换作用模型 本世纪 20 年代,量子力学迅速发展起来,人们开始用量子力学作工具来解释物质磁性起源。1928 年,海森堡(Heisenberg)成功地把量子力学引用到铁磁性理论中,建立了局域性电子自发磁化的理论模型。到这时,人们对分子场开始有实质性的认识,分子场来源于相邻原子中电子间的交换作用模型,唯象地解释了铁磁性的起源。并对铁磁性理论的发展起了决定性的作用。从此以后,解释铁磁性物质自发磁化问题的理论,发展成为两个理论分支,即分子场理论和交换作用理论。

(3)局域电子模型和巡游电子模型 在发展自发磁化理论时,人们根据各种铁磁性材料的实验事实,从交换作用模型出发,使交换作用理论又发展成为两个学派,即局域电子模型和巡游电子模型。前者在解释稀土金属及其合金的磁性取得了成功;而后者在解释 3d 过渡族金属的磁性取得了满意的结果。以局域电子模型为基础,为解释铁氧体、稀土金属的磁性,发展有超交换作用理论和 RKKY 作用理论。在发展亚铁磁性理论方面,法国物理学家奈耳(Neel)作了杰出的贡献。以巡游电子模型为基础,为阐明 3d 过渡金属的磁性,具体发展有斯东纳(Stoner)能带模型理论,哈伯德(Hubbard)模型以及 d_i - d_j 交换极化模型等。

(4)自旋涨落理论 我们仔细地考察一下,局域电子模型和巡游电子模型两者是采用了相反出发点的理论,前者以实空间的局域电子态为出发点,后者以倒空间(即波数空间)里的局域电子为出发点。理论发展初期,导出的结果与实验数据比较时,出现相

互对立又相互补充地说明铁磁性物质特性的格局。日本守谷(Moriya)评论说,“在相互补充的意义上是功过各半”。现在,过渡族金属的d电子已确认是巡游的,描述过渡族金属的磁性,似乎应该是巡游电子模型,但是,依据斯东纳理论,却不能说明有限温区的诸性质,必须要求计入窄d带里的电子关联来改进理论。近期,守谷提出的自旋涨落概念,就是试图在局域电子模型和巡游电子模型之间寻找一个统一的图像。守谷对弱铁磁性及反铁磁性金属系统,考虑各自自旋涨落模式间的耦合,同时,自治地求出自旋涨落,并计入热平衡状态,从而描述了弱铁磁性,近代磁性和反铁磁性的许多特性。自旋涨落模型,打开局域电子模型和巡游电子模型向统一理论发展的局面,这方面的研究工作正在发展中。

对铁磁体的特性方面的研究,磁畴理论较为成熟。毕特(Bitter)最早用粉纹法,从实验上证实磁畴的存在。定量的铁磁畴理论,由朗道和里弗西兹(Landau & Lifshits)于1935年建立起来。他们从铁磁晶体的简单模型,推导出磁畴结构,给磁畴理论奠定了坚实基础。磁畴的存在,乃是自发磁化分布应满足平衡状态下自由能极小的必然结果;畴壁位移或磁畴旋转,能够对技术磁化过程作出原则性的解释。

从理论角度看,作为基础概念的磁畴和畴壁是以假设而引入的,而且,自由能极小原理,在假定形成磁畴结构的限制下应用,所以,磁畴理论在体系上是不完善的。在计算磁畴结构时,也难给出精确的结果。为克服这个困难,发展出微磁化理论,即直接由铁磁体系内磁化矢量运动方程求解的理论。布朗(Brown)、杜宁(Doring)、基特耳(Kittel)和奈耳等人,对微磁化理论作了系统研究。

自本世纪50年代以来,出现了关于磁性基础理论研究和磁性应用相结合的局面,这加速了磁性领域的发展。这方面,玻饶士(Bozorth)起了积极的作用,他组织磁学学术活动的热情工作和他

的著作,帮助许多人投身到这个领域;由于范弗列克(Van Vleck)和奈耳在磁学方面的杰出贡献,还赢得了诺贝尔奖金;我国的磁学先驱者施汝为、潘孝硕、戴礼智等对促进中国磁学发展起了积极作用。现在中国拥有一支宏大的从事磁学与磁性材料研究、开发的科技队伍。

总括前述,可以看到,磁学理论的发展是错综复杂的,她的历史悠久,充满活力。今天,有关磁性问题的研究文献,浩如烟海,即使只取代表性的工作,也得费尽心思从大量文献资料中加以取舍。表 1 中,我们列出了磁学与磁性材料近代发展概要。

表 1 磁学与磁性材料近代发展概要

年 代	实验与理论进展
1895 年	Curie(居里)定律
1905 年	抗、顺磁性 Langevin(朗之万)理论
1907 年	铁磁性 Weiss(外斯)分子场理论
1915 年	A. Einstein and W. J. De haas(爱因斯坦和德·哈斯)回转磁效应实验
1919 年	Barkhausen(巴克好生)效应
1920 年	Elmen(依耳密)发明坡明伐合金
1925 年	Uhlenbeck and goudsmit(乌伦别克和古德许密特)电子自旋磁矩实验
1927 年	Brillouin(布里渊)函数
1928 年	Heisenberg(海森堡)交换相互作用
1930 年	Frenkel and Dorfman(弗仑克耳和多尔夫曼)提出单畴粒子理论。Bloch(布洛赫)建立低温自旋波理论
1931 年	Bitter(毕特)粉纹磁畴实验 Mishima(米西马)发明铝-镍-钴硬磁

续表 1

1932 年	Van Vleck (范弗列克) 提出原子磁矩性质。Nee (奈耳), Landau (朗道) 提出反铁磁理论
1935 年	Landau and Lifshitz (朗道和里弗西兹) 建立磁畴结构理论
1936 年	Slater (斯莱特) 的铁磁性能带理论
1938 年	磁铅石型铁氧体合成
1945 年	Snoek (斯诺克) 等人发展铁氧体 (从 1935 年开始)
1946 年	Griffiths (格里菲西) 金属的铁磁共振实验
1948 年	奈耳建立亚铁磁性理论
1949 年	Polder (波耳德尔) 建立旋磁性和张量磁导率理论
1951 年	Herring (海林), Kittel (基特尔) 提出巡游电子铁磁性理论
1952 年	钡铁氧体合成
1953 年	Van Vleck (范弗列克) 提出局域磁矩模型
1954 年	Camras (卡姆拉斯) 发表 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 磁粉专利
1955 年	奈耳畴壁。石榴石型铁氧体合成
1957 年	Walker (沃克) 静磁模理论, RKKY 作用理论形成。Williams (威廉姆斯) 研究 MnBi 合金膜提出磁光记录原理
1958 年	Mössbauer (穆斯堡尔) 效应。出现超导性铁磁合金
1959 年	Anderson (安德生) 建立绝缘化合物铁磁性理论
1960 年	(日) 金夫秀子发明铁-铬-钴硬磁
1964 年	近藤 (Kondo) 效应
1967 年	Boeck (博贝克) 发明磁泡。第一代稀土钴硬磁产生