



高等学校 规划教材
电子信息类

磁性物理学

(修订本)

宛德福 马兴隆 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
URL: <http://www.phei.com.cn>

高等学校电子信息类规划教材

磁性物理学

(修订本)

宛德福 马兴隆 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 提 要

本书系统地介绍了磁性物理学的基本理论。主要内容包括:磁性起源、自发磁化、磁畴与技术磁化、磁化过程动力学与铁磁共振、磁与非磁性交叉效应等。全书共分九章。书中强调物理概念和原理的说明,对于重要的数学公式给出了推导,一些理论的应用亦有扼要讨论。各章之首,提出了学习要求;章末,归纳出全章的内容提要,并附有习题。

本书为高等工科院校电子科学与技术专业本科生教材,亦可供理科大学磁学及相关的应用物理专业的本科生、研究生、教师和从事磁学与磁性材料研究、开发的工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,翻版必究。

丛 书 名:高等学校电子信息类规划教材

书 名:磁性物理学(修订本)

编 著 者:宛德福 马兴隆

责任编辑:詹善琼

印 刷 者:北京牛山世兴印刷厂

装 订 者:三河市路通装订厂

出版发行:电子工业出版社 URL:<http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

经 销:各地新华书店

开 本:850×1168 1/32 印张:18.25 字数:508千字

版 次:1999年4月第1版 1999年4月第1次印刷

书 号: ISBN 7-5053-5157-5
G·395

定 价:32.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换。

若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作，根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》，我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社、各专业教学指导委员会，在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上，根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求，编制了《1996～2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报，经各学校、出版社推荐，由各专业教学指导委员会评选，并由我部教材办与各专指委、出版社协商后审核确定的。本轮规划教材的编制，注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需，尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时，选择了一批对学科发展具有重要意义，反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划，以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足，希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议，以便不断提高教材的编写、出版质量，共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

修订版前言

本教材系按电子工业部的《1996~2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由全国电子材料与器件教学指导委员会编审、推荐出版。本教材由华中理工大学宛德福教授主编，何华辉教授主审，责编委是过璧君教授。

本教材的参考学时数为80学时，其主要内容包括：磁性起源、自发磁化，磁畴与技术磁化，动态磁化与铁磁共振，磁与非磁性物的交叉效应等。全书共分九章。使用本教材时应注意在学生已修完电磁学、理论物理、固体物理等课程后安排。教学环节以课堂讲授为主，配合一定的课堂讨论、作业和教学实验。

本教材从1987年出版以来，除作为全国工科大学统一用书外，还有许多理科大学用它作为本科生或研究生学习磁学课的主要参考书。为继续满足教学的需求，电子工业部“九五”教材的规划中，将其立项为部级重点教材出版。现在与读者见面的新书，则是在1994年版的基础上，经过教学实践、总结提高、改进、增删修订而成的。

在修订过程中，我们做了下列考虑和具体工作：

1. 使全书更具有突出的教材特点和风格。新书除了继续保持原版的“教学流程图”、每章之首的“学习本章要求”、章后的“本章提要”和“习题”外，还增加了章后习题思考题和全书使用的重要符号列表。正文中，更重视在阐述某个原理之后的应用举例，加强全书体系的体例完整性，提高书的可自学性，以利学生的能力培养和启迪创新精神。

2. 使新书尽可能体现加强基础理论和知识更新的特点。《磁性物理学》的内容、结构，仍与原版一样，归结成四个部分分九章展开。但重视加强与现代高新技术有关的基础理论，大力度地削减与

工程技术关系不大的篇幅。如第二章中三、四两节基础理论的增加,顺磁性的平均原子磁矩和铁磁性的自发磁化强度与温度关系的微机处理方法(含附录三计算程序)的增加,削减了晶体场的计算,删去了磁畴结构计算和应力、掺杂模型下 μ 计算中的冗长篇幅,都是出于这种考虑的;至于知识更新,新书的绪论和第九章中一、五两节可以体现出来。

3. 使新书具有反映教学经验和科研成果的特色,进一步提高书的教学和科研水平。这次修订,重新撰写了绪论,用较长的篇幅阐述了磁学的历史与展望、磁性物理学的内容与研究方法和磁性物理学与技术的关系三个问题。目的是让读者步入本学科之前,首先对磁学的发展有一清楚线索与轮廓,看清发展趋势及开拓潜力,了解磁性物理学的内容与研究方法,及其学好这门课程的重要性。对于正文的修订,用了较多精力进行图文推敲。文字叙述上,重在科学、严谨,力求言简意赅;理论、原理的物理图象和概念上,讲究恰当的文字叙述,同时给出简明的数学推导。对于“磁各向异性与磁致伸缩”、“铁磁体中的自旋模式”给予单独立论,以及对铁磁体内的五种相互作用能量没有采取孤立的集中式地讨论,而是结合到相对应原理中去剖析,做出理论分析与数学推导,如此等等,这都是作者积长期教学经验和科研所得认识的结果,也是本书的独具风格。

4. 改正了原版中的一些错误。

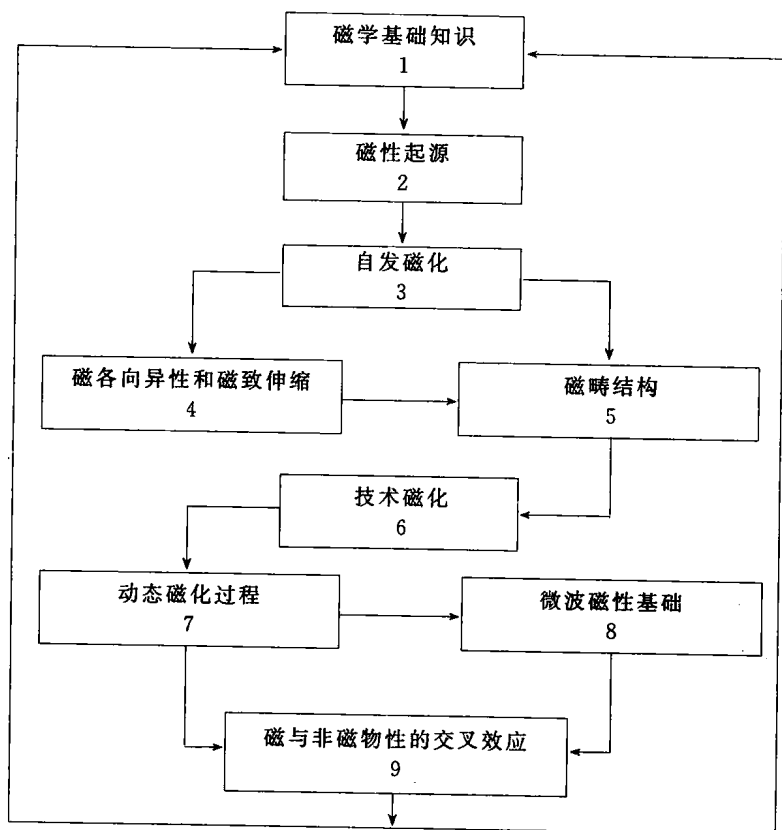
本书由宛德福教授全面修订完稿,马兴隆副教授对原版的一些错误提出了刊正意见。全书由何华辉教授审定。本书出版得到电子工业部教材办公室、全国电子材料与器件教学指导委员会的支持,中国电子科技大学过璧君教授、华中理工大学何华辉教授、赵振声教授和李平文高级工程师等热情关心与帮助,电子工业出版社詹善琼副编审为本书也付出了辛勤的劳动,在此表示诚挚的谢意。与此同时,还要向本书中所借鉴、引用的参考文献的所有作者、译者以及帮助完成此书的友人表示衷心的感谢。

最后, 恳望读者对书中不妥与错误之处, 提出批评指正。

宛德福

1998 年 12 月于武汉

磁性物理学教学流程图



符 号 凡 例

A	交换积分
B	磁感应强度
B_s	饱和磁感应强度
B_r	剩余磁感应强度
C	居里常数
D	电位移
E	电场强度, 能量
F	自由能密度, 力
H	磁场强度
H_c	矫顽力
H_d	退磁场
I	稳恒电流
J	总角量子数
J_e	涡流
J_m	磁极化强度
K	磁各向异性常数
L	原子总轨道角量子数, 力矩
M	磁化强度
M_0	绝对饱和磁化强度
M_s	自发磁化强度, 饱和磁化强度
M_r	剩余磁化强度
N	退磁因子
N_A	阿伏伽德罗数
P	原子动量矩(角动量), 功率
Q	品质因数, 热量
R	电阻
R_0	单畴临界尺寸
R_s	反常霍尔系数

S	原子总自旋量子数
T	温度
T_c	居里温度
T_d	抵消温度
T_N	奈耳温度
T_P	顺磁居里温度
U	内能
V	体积
W	功
Z	配分函数
a	晶格常数
b	瑞利常数
c	光速, 比热
d	密度
e	电子电荷
f	频率
g	朗德因子
h	普朗克常数
$\hbar$	$h/2\pi$
i	电流
j_m	磁偶极矩
k	波矢
k_B	玻尔兹曼常数
l	电子轨道角量子数
m	磁极
m_e	电子静态质量
m_l	电子轨道磁量子数
m_s	电子自旋磁量子数
n_f	克原子的有效玻尔磁子数
p	电子动量矩(角动量)
s	电子自旋量子数
t	时间
u	氧参量

v	速度
w	外斯分子场系数
z	最近邻原子数
Φ	热力学势能函数
Ψ	磁势
α	吉耳伯特阻尼系数, 畴壁填充因子
α_i	方向余弦
β	杂质浓度
γ	磁力比
γ_w	畴壁能密度
δ	畴壁厚度
ϵ	介电常数
θ_F	法拉第磁光旋转角
θ_K	克尔磁光旋转角
λ	朗道-里弗西兹阻尼力矩系数
λ_k	自旋波波长
λ_S	磁致伸缩系数
μ	磁导率
μ_B	玻尔磁子
μ_m	磁矩
μ_0	真空磁导率
ξ	自旋-轨道耦合系数
ρ	电阻率
ρ_H	霍尔电阻
σ	比磁化强度, 应力
σ_S	约化自发磁化强度
τ	弛豫时间
χ	磁化率
ω	角频率
ω_L	拉摩进动频率
ω_0	磁矩进动本征频率
ω_r	弛豫频率
ω_{res}	共振频率

目 录

绪论	(1)
一、磁学的历史与展望	(1)
二、磁性物理学的内容与研究方法	(10)
三、磁性物理学与技术的关系	(14)
第一章 磁学基础知识	(18)
第一节 基本磁学量	(18)
第二节 磁化状态下磁体中的静磁能量	(28)
第三节 磁性分类	(33)
第四节 磁性材料的磁化	(40)
本章提要	(44)
习题一	(45)
第二章 磁性起源	(46)
第一节 原子磁矩	(47)
第二节 回旋磁效应	(58)
第三节 物质的抗磁性	(60)
第四节 顺磁性朗之万理论	(64)
第五节 过渡族元素的离子磁矩	(69)
第六节 稀土元素的离子磁矩	(77)
第七节 铁磁性合金的磁矩	(78)
本章提要	(84)
习题二	(85)
第三章 自发磁化	(87)
第一节 铁磁性物质的基本特征	(87)
第二节 铁磁性分子场理论	(91)
第三节 次晶格与定域分子场	(99)
第四节 亚铁磁性的基本理论	(105)
第五节 直接交换作用	(126)

第六节	超交换作用	(138)
第七节	低温自发磁化的 $T^{3/2}$ 定律	(142)
第八节	铁磁性的能带理论	(145)
第九节	RKKY 模型	(149)
本章提要	.....	(153)
习题三	.....	(155)
第四章	磁各向异性与磁致伸缩	(157)
第一节	磁各向异性的类型	(157)
第二节	磁晶各向异性的唯像理论	(162)
第三节	磁晶各向异性常数	(170)
第四节	磁晶各向异性等效场	(175)
第五节	磁晶各向异性的来源	(179)
第六节	感生磁各向异性	(183)
第七节	交换各向异性	(189)
第八节	磁致伸缩	(193)
第九节	磁弹性能量	(213)
本章提要	.....	(218)
习题四	.....	(219)
第五章	磁畴结构	(220)
第一节	磁畴的成因	(220)
第二节	磁畴壁结构及其特性	(226)
第三节	畴壁厚度和畴壁能计算	(235)
第四节	磁畴结构计算	(244)
第五节	薄膜的磁畴结构	(263)
第六节	磁畴、畴壁观察技术	(278)
本章提要	.....	(283)
习题五	.....	(285)
第六章	技术磁化	(287)
第一节	磁化过程概述	(287)
第二节	可逆畴壁位移磁化过程	(295)
第三节	畴壁位移的起始磁化率	(303)
第四节	可逆磁畴转动磁化过程	(312)
第五节	不可逆磁化过程	(320)

第六节	磁化曲线的计算	(330)
第七节	反磁化过程	(342)
第八节	剩余磁化强度	(361)
第九节	静态磁参数分析	(369)
本章提要	.....	(385)
习题六	.....	(387)
第七章	动态磁化过程	(389)
第一节	动态磁性参数	(389)
第二节	动态磁化过程的磁损耗	(401)
第三节	磁性涡流损耗	(405)
第四节	磁滞损耗	(414)
第五节	剩余损耗	(418)
第六节	磁化强度的运动方程	(434)
第七节	畴壁动态特性	(440)
第八节	磁畴自然共振	(450)
第九节	磁谱	(456)
本章提要	.....	(459)
习题七	.....	(461)
第八章	微波磁性基础	(462)
第一节	张量磁导率	(463)
第二节	正、负圆偏振波磁场下的磁导率	(471)
第三节	铁磁共振线宽	(474)
第四节	铁磁体中的自旋模式	(479)
第五节	一致进动自旋模式	(482)
第六节	非一致进动自旋模式	(497)
第七节	高功率现象与理论	(516)
本章提要	.....	(528)
习题八	.....	(529)
第九章	磁与非磁物性的交叉效应	(531)
第一节	磁场电效应	(531)
第二节	磁光效应的类型	(540)
第三节	磁光效应的物理原理	(543)
第四节	磁光效应的量子理论	(549)

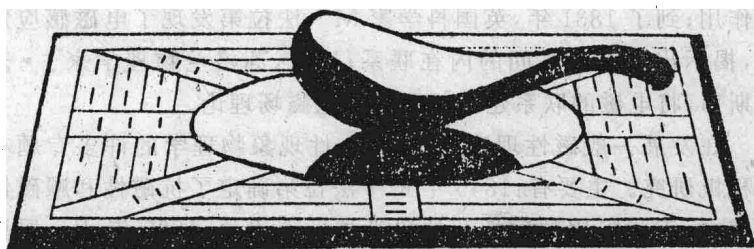
第五节 磁光效应的应用	(553)
第六节 磁热效应	(556)
本章提要	(561)
习题九	(562)
附录	(563)
附录一 常用物理常数	(563)
附录二 磁学量单位及其换算	(564)
附录三 顺磁性平均磁矩和铁磁性自发磁化 强度的计算程序	(565)
主要参考书	(570)

绪 论

一、磁学的历史与展望

1. 历史简述

磁学的历史发展是从研究永磁体开始的。天然磁铁矿(Fe_3O_4)是人类最早发现和应用的永磁体。中国古籍《鬼谷子·谋篇》记载：“郑人取玉，必载司南，为其不惑也”。“司南”即指南器，“为其不惑也”意即为了不迷失方向。东汉初年，王充在《论衡》一书里对司南作了比较具体的描述：“司南之杓，投之于地，其柢指南”。图1示出中国古代之司南的复原图。从司南到指南针的发明，当推中国文献记载，北宋曾公亮在公元1044年写成的《武经总要》书中，记述了指南鱼的制作方法及其应用，就在《武经总要》成书前后，中国已把



根据先秦、两汉时代典籍记载而复原的“司南”模型

图1 中国古代司南复原图

指南鱼逐步改进为指南针了。指南针就是利用磁体的指极性质而制成的，为中国古代四大发明之一，对世界文明作出了重大的贡献。北宋杰出的自然科学家沈括在《梦溪笔谈》一书中总结了指南针的制法和应用，该书卷二十四《杂志一》里写道：“方家以磁石磨

针锋,则能指南,然常微偏东,不全南也。水浮多荡摇,指爪及碗唇上皆可为之,运转尤速,但坚滑易坠,不若缕悬之最善。其法取新纆中独茧缕,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科学记载。指南针的发明反映了中国古代对磁性研究的辉煌成就。以后,指南针由中国传到阿拉伯国家,继而传到欧洲,促进了航海事业的发展。

直到 1600 年,英国 W·吉耳伯特(W·Gilbert)的《论磁体》问世,这是一本最早的比较系统地记述多种磁性和地磁现象的专著。在 17 世纪以前一个较长时期内,磁极之间的力的作用现象,一直按库仑定律相互作用着的“磁荷”这个观念给予说明。虽然这种解释不正确,但磁的库仑定律却成为磁学的出发点。然而,磁学作为一门科学,却到 19 世纪前半期才开始发展。几个主要标志是:丹麦物理学家 H·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;同年,法国物理学家 A·安培证明通电的圆形线圈和普通磁铁一样,有相同的吸引或排斥作用,随后,提出磁体的“分子电流”假说,认为一切磁性都起源于电流,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,对发展磁学起了推动作用;到了 1831 年,英国科学家 M·法拉第发现了电磁感应定律,揭示出电与磁之间的内在联系;后来,苏格兰物理学家 J·麦克斯韦,将电磁的联系建立起严密的电磁场理论。

在发展一般磁性理论的同时,磁性现象物理学的许多专题亦在积极研究。主要有:1845 年 M·法拉第确定了抗磁性和顺磁性的存在,正式引用顺磁性和抗磁性这两个术语;1895 年,P·居里(P·Curie)对抗磁性和顺磁性的温度关系作了实验研究,总结出定量描述顺磁性的居里定律;1905 年,P·朗之万(P·Langevin)建立起顺磁性和抗磁性的经典理论;顺磁性的量子力学理论,由 J·H·范弗列克(Van Vleck)于 1927 年完成,指出不对称原子和分子电子云的极化顺磁性,后称做范弗列克顺磁性;同年,W·泡利(W·Pauli)提出金属中电子顺磁性理论,后称做泡利顺磁性;1932 年,L·奈耳(L·N'eel)首先提出反铁磁性概念。C. G. 舒尔