



现代物理基础丛书

48

磁性物理

金汉民 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

现代物理基础丛书 48

磁 性 物 理

金汉民 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书扼要介绍一般磁性,重点介绍强磁性,特别是磁性材料磁性的基本现象和基本理论,并扼要介绍其应用和磁性材料以及它们的近期发展。全书分磁性基础,原子磁性,自发磁化,强磁性介质的能量,磁畴结构,静态技术磁化过程,强磁性介质的电光性质、磁与生物、超精细相互作用,动态磁化过程,磁性材料、微波磁性器件等九章。详细的数学过程放在相关章节的附注里。书末附有物理常数、主要磁学量的单位及其换算、矢量分析公式、群论摘选、二次量子化、微扰论等六个附录。

本书适合作为磁学、磁性材料、磁性器件、凝聚态物理等领域的研究生教材,也可以作为教学、科研、工程技术人员以及研究生、高年级本科生的参考书。在小部分章节中用到高等量子力学和群论,没有学过这些课程的读者可以参考附录四~六,或跳过数学过程,掌握理论的思路 and 主要结果。

图书在版编目(CIP)数据

磁性物理/金汉民著. —北京:科学出版社, 2013

(现代物理基础丛书/杨国桢主编; 48)

ISBN 978-7-03-035906-3

I. ①磁… II. ②金… III. ①磁学 IV. ①O441.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 257557 号

责任编辑: 钱 俊 周 涵 / 责任校对: 李 影

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2013 年 1 月第一次印刷 印张: 24 1/2

字数: 470 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

符号凡例

这里收录较常用的符号。在某些章节中也用这里的符号定义只在该章节中使用的另一种量。

通用符号

$\mathbf{A}$

定义(参考章节)

矢量 $\mathbf{A}$ (1.1 节)

$\hat{A}$

算符或矩阵 A (附录四)

$A, (A)$

矩阵 A (2.1 节, 4.4 节)

$|A|$

行列式 A (2.1 节)

$(A)^T$

矩阵 A 的转置共轭 (4.3 节)

$A^+, (A)^+$

矩阵 A 的转置复数共轭 (2.1 节, 附录四)

A_{ij}

矩阵 A 的元 (4.4 节)

A^{op}

A 极小方向的 $\partial^2 A / \partial \theta \partial \phi$ 值 (4.2 节)

$\hat{J}_{\pm} \equiv \hat{J}_x \pm i\hat{J}_y, \hat{J}_{\pm 1} = \mp \hat{J}_{\pm} / \sqrt{2}, \hat{J}_0 = \hat{J}_z$ ($\hat{J}$: 任意角动量算符, 2.1 节, 附录四)

英文符号

意义

a

晶格常数 (3.2 节)

A

交换常数 (4.1 节)

$\mathbf{A}$

磁矢势 (1.1 节)

$\hat{a}^+, \hat{a}$

产生和湮没算符 (附录五)

(A)

应变张量 (4.4 节)

A_{κ}

$(\lambda (\geq |\kappa|))$: 正整数, κ : 整数) 晶场常数 (3.6 节)

A_1

电流产生的磁矢势 (1.3 节)

$\mathbf{A}_m$

磁矩产生的磁矢势 (1.3 节)

b

交变磁感应强度矢量 (7.2 节)

B

磁感应强度 (1.1 节)

$\mathbf{B}$

磁感应强度矢量 (1.1 节)

B_j

Brillouin 函数 (2.4 节)

B_s

饱和磁感应强度 (6.1 节)

c

真空中光速, 晶格常数 (3.2 节)

C

Curie 常数 (1.2 节)

$C_1 \equiv C_{12}, C_2 \equiv (C_{11} - C_{12})/2, C_3 \equiv C_{44}$

(4.4 节)

C_{11}, C_{12}, C_{44}

立方晶体的弹性模量 (4.4 节)

$C_k^{12} \equiv \omega_H - N_z \omega_M + \omega_{ex} k^2$

(8.7 节)

$C_k^{21} \equiv \omega_H - N_z \omega_M + \omega_{ex} k^2 + \omega_M \sin^2 \theta_k$

(8.7 节)

d	尺寸
D	尺寸
D	电位移矢量(1.1 节)
e	电子电荷(1.1 节)
E	能量, 本征能
E	电场强度矢量(1.1 节)
e_α	α 方向的单位矢(1.1 节)
f	Fermi 分布函数(3.9 节), 频率
f. u.	formula unit
F	自由能(Helmholtz 自由能)(1.5 节)
f	力
F_d	退磁能密度(4.6 节)
F_{el}	弹性能密度(4.4 节)
F_{ex}	交换能密度(4.1 节)
F_H	Zeeman 能密度(6.5 节)
F_K	磁晶各向异性能密度(4.2 节)
F_{ms}	磁弹性能密度(4.4 节)
F_σ	应力能密度(4.5 节)
g	g 因子(Landé g 因子)(2.3 节)
G	热力势 (Gibbs 自由能)(1.5 节)
h	厚度, 交变磁场强度(7.2 节), H/H_K (6.5 节)
H	磁场强度(1.1 节)
h	交变磁场强度矢量(7.2 节), $\mathbf{H}/H_K$ (6.5 节)
$\mathbf{H}$	磁场强度矢量(1.1 节)
$\hat{h}$	单电子单体算符(2.1 节)
$\hat{H}$	总哈密顿(2.1 节)
H_c	矫顽力(1.2 节)
$i H_c$	内禀矫顽力(1.2 节)
H_1	电流产生的磁场(1.3 节)
H_K	磁晶各向异性场(4.2 节)
H_m	磁矩产生的磁场强度(1.3 节)
H_K^θ	θ 方向的磁晶各向异性场(4.2 节)
H_K^ϕ	ϕ 方向的磁晶各向异性场(4.2 节)
H_d	退磁场(4.6 节)
H_{ef}	恒定有效磁场(8.4 节)
H_{eff}	包括交变场的总有效磁场(8.4 节)
H_{ex}	交换场(4.3 节)
H_{ml}	分子场(3.3 节)

$\hat{H}_{\text{CF}}$	晶场作用(3.6 节)
$\hat{H}_{\text{ex}}$	交换作用(2.5 节)
$\hat{H}_{\text{eo}}$	原子核与和它重叠的电子的超精细电 Coulomb 相互作用(7.4 节)
$\hat{H}_{\text{hf}}$	超精细相互作用(7.4 节)
$\hat{H}_{\text{hm}}$	超精细磁相互作用(7.4 节)
$\hat{\mathbf{H}}_{\text{hm}}$	超精细场(7.4 节)
$\hat{H}_{\text{LS}}$	自旋-轨道耦合作用(2.2 节)
$\hat{H}_{\text{q}}$	电四极矩相互作用(7.4 节)
$\hat{H}_1$	总单体哈密顿(2.1 节)
$\hat{H}_2$	总双体哈密顿(2.1 节)
I	电流, 原子核的自旋量子数(7.4 节)
j	电流密度(1.1 节)
J	磁极化强度(1.1 节), 总角动量量子数(2.1 节)
$\mathbf{J}$	磁极化强度矢量(1.1 节)
$\hat{\mathbf{J}}$	总角动量算符(2.1 节)
J_A	交换积分(2.5 节)
J_r	剩磁(1.2 节)
J_s	饱和(自发)磁极化强度(1.2 节)
K	电 Coulomb 相互作用(2.5 节), 各向异性常数(4.7 节)
$\mathbf{k}$	波矢(3.5 节)
k_{B}	Boltzmann 常数
k_{F}	Fermi 半径(3.7 节)
K_i	(i =正整数) 磁晶各向异性常数(4.2 节)
l	长度, 单电子轨道量子数(2.1 节)
L	长度, 总轨道角动量量子数(2.2 节)
$\mathbf{L}$	力矩
$\hat{l}$	单电子轨道角动量算符(2.1 节)
$\hat{\mathbf{L}}$	总轨道角动量算符(2.2 节)
m	电子静止质量(1.1 节), 交变磁化强度(7.2 节)
M	磁化强度(1.1 节)
$\mathbf{m}$	交变磁化强度矢量(7.2 节)
$\mathbf{M}$	磁化强度矢量(1.1 节)
M_j	总角动量磁量子数(2.2 节)
m_i	单电子轨道磁量子数(2.1 节)

M_L	总轨道磁量子数(2.2节)
m_s	单电子自旋磁量子数(2.1节)
M_s	饱和(自发)磁化强度(3.3节)
M_S	总自旋磁量子数(2.2节)
n	正整数,主量子数(1.2节)
$n(\varepsilon)$	自旋态密度(3.7节)
N	正整数
$\mathbf{n}$	单位矢
(N)	退磁因子张量(4.6节)
N_a	退磁因子(4.6节)
$\mathbf{p}$	动量(1.6节)
$\mathbf{P}$	电极化强度矢量(1.1节)
$\mathbf{p}_M$	磁矩(1.1节)
$\mathbf{p}_J$	磁偶极矩(1.1节)
Q	四极矩(7.4节)
r	距离
R	距离,电阻
$\mathbf{r}$	位矢
$\mathbf{R}$	位矢
$r_{ij} \equiv \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j $	(2.1节)
R_{nl}	径向波函数(2.1节)
s	单电子自旋量子数(2.1节)
S	面积,熵(1.5节),总自旋量子数(2.2节)
$\mathbf{S}$	面积矢量,离子自旋(3.8节)
S_{ab}	重叠积分(3.4节)
$\hat{s}$	单电子自旋(2.1节)
t	时间
T	温度
T_C	Curie 温度(1.2节)
T_N	Néel 温度(1.2节)
u	位能
U	内能(1.5节)
$U_{m_l}^l \equiv \sqrt{4\pi/(2l+1)}Y_{lm_l}$	(附录四)
v	体积
V	电位(1.3节)
$\mathbf{v}$	速度
V_m	磁位(1.3节)
$V_{\alpha\beta}$	在原点的 $\partial^2 V/\partial\alpha\partial\beta$ (7.4节)

W	Racah 系数(附录四), 损耗
Y_{lm_l}	球谐函数(2.1 节)
Z	配分函数(1.5 节), 原子序数(质子数)(2.1 节)
希腊字母符号	意义
α	衰减系数(7.2 节)
α_i	方向余弦
β	电磁波相位常数(7.2 节)
β_i	方向余弦
γ	旋磁比(2.3 节)
γ_w	畴壁能密度(5.1 节)
δ	位相角(8.1 节)
$\delta(m, n)$	Kronecker 的 δ 函数(2.1 节)
$\delta(r)$	Dirac 的 δ 函数(3.8 节)
ΔH	共振线宽(8.5 节)
δ_w	畴壁厚度(5.1 节)
$\delta_0 \equiv \sqrt{A/K_1}$	交换长度(5.1 节)
ϵ	相对介电常数(1.1 节), 本征能, (ϵ) 的对角元(7.2 节)
(ϵ)	张量介电常数(7.2 节)
ϵ_F	Fermi 能(3.7 节)
ϵ_0	真空介电常数(1.1 节)
ϵ_1	(ϵ) 的非对角元 $\pm i\epsilon_1$ 的成分(7.2 节)
θ	角度
θ_C	顺磁 Curie 温度(1.2 节)
Θ	角度
λ	自旋-轨道耦合常数(2.2 节), 波长, 磁致伸缩(4.4 节)
$\lambda_s = (2\lambda_{100} + 3\lambda_{111})/5$	(4.4 节)
$\lambda_{100}, \lambda_{111}$	磁致伸缩系数(4.4 节)
μ	相对磁导率(1.1 节), (μ) 的对角元(7.2 节)
(μ)	张量磁导率(7.2 节)
μ'	$\mu = \mu' - i\mu''$ 的实数部分(7.2 节)
μ''	$\mu = \mu' - i\mu''$ 的虚数成分(7.2 节)
$\mu_a = \chi_a$	(μ) 的非对角元 $\pm i\mu_a$ 的成分(7.2 节)
μ_B	Bohr 磁子(1.1 节)
μ_e	有效磁导率(8.1 节)
μ_i	起始磁导率(6.1 节)
$\mu_{\max}$	最大磁导率(6.1 节)
μ_0	磁性常数(1.1 节)
ρ	自由电荷体密度(1.1 节), 电子密度(3.9 节), 电阻率

ρ_m	磁荷体密度(1.3 节)
ζ	化学势(3.9 节)
σ	电导率,张力(4.5 节)
(σ)	应力张量(4.4 节)
σ_m	磁荷面密度(1.3 节)
σ_{ij}	(σ)的元(4.4 节)
$\hat{\sigma}_i$	Pauli 矩阵(2.1 节)
τ	弛豫时间(8.3 节)
φ	单电子轨道波函数(2.1 节)
Φ	总轨道波函数(2.2 节),角度
χ	相对磁化率(1.1 节),(χ)的对角元(7.2 节)
X	总自旋波函数(2.2 节)
(χ)	张量磁化率(7.2 节)
χ_a	(χ)的非对角元 $\pm i\chi_a$ 的成分(7.2 节)
χ_i	起始磁化率(1.2 节)
$\chi_{\max}$	最大磁化率(6.4 节)
$\chi_\sigma (\sigma=\pm)$	单电子自旋波函数(2.1 节)
χ'	$\chi=\chi'-i\chi''$ 的实数部分(7.2 节)
χ''	$\chi=\chi'-i\chi''$ 的虚数成分(7.2 节)
χ'_a	$\chi_a=\chi'_a-i\chi''_a$ 的实数部分(7.2 节)
χ''_a	$\chi_a=\chi'_a-i\chi''_a$ 的虚数成分(7.2 节)
ϕ	角度
ψ	单电子自旋轨道波函数(3.4 节)
Ψ	总自旋轨道波函数(2.1 节)
$\omega=2\pi f$	角频率(3.5 节)
$\omega_{cx}\equiv 2A\gamma/\mu_0 M_s$	(8.7 节)
$\omega_H\equiv\gamma H$	(7.2 节)
$\omega_M\equiv\gamma M_s$	(7.2 节)
ω_r	固有角频率(8.4 节)
$\hbar$	约化 Planck 常数

目 录

符号凡例

第 1 章 磁性基础	1
1.1 磁学的基本定律和基本量	1
1.1.1 磁力定律,磁感应强度矢量,磁矩	1
1.1.2 磁化强度矢量,磁偶极矩,磁极化强度矢量,磁场强度矢量	1
1.1.3 Maxwell 方程,磁矢势,磁通量	2
1.1.4 磁矩	3
1.1.5 磁感应强度,磁(极)化强度,磁导率,磁化率,比磁化强度	4
1.1.6 磁学量的单位	4
1.2 物质磁性的分类	5
1.2.1 抗磁性	5
1.2.2 顺磁性	6
1.2.3 反铁磁性	7
1.2.4 铁磁性	7
1.2.5 亚铁磁性	9
1.2.6 磁性玻璃	9
1.3 磁 Coulomb 定律,静磁场	10
1.3.1 磁荷,磁 Coulomb 定律	10
1.3.2 磁矩在磁场中受的力矩,磁矩和电流产生的磁场	12
1.3.3 磁路,磁阻	14
1.4 静磁能	17
1.4.1 Zeeman 能,磁化能	17
1.4.2 磁场能,磁矩相互作用能,磁荷相互作用能,静磁能	18
1.5 磁介质的热力学	20
1.5.1 磁介质的热力学原理	20
1.5.2 一级和二级相变	21
1.5.3 磁卡效应	22
1.6 带电粒子在静电磁场中的哈密顿	24
参考文献	25

第 2 章 原子磁性	26
2.1 电子结构	26
2.1.1 电子自旋	26
2.1.2 Hartree-Fock 方程, 单电子近似	27
2.1.3 中心场近似	28
2.1.4 电子结构	31
2.1.5 角动量	31
2.2 光谱项, 多重态	34
2.2.1 剩余 Coulomb 作用, 光谱项	34
2.2.2 自旋-轨道耦合作用, 多重态	36
2.3 原子的固有磁矩, 旋磁比	40
2.3.1 原子中一个电子的磁矩和旋磁比	40
2.3.2 多电子原子的磁矩和旋磁比	40
2.4 原子的抗磁性和顺磁性	44
2.4.1 在外磁场中的原子磁矩	44
2.4.2 抗磁性	44
2.4.3 顺磁性	45
2.5 原子内部的交换作用	47
2.5.1 交换作用哈密顿	47
2.5.2 交换积分	49
参考文献	25
第 3 章 自发磁化	50
3.1 固体的原子(离子)磁矩	50
3.1.1 Fe-Ni 合金	50
3.1.2 合金的 3d 原子磁矩	51
3.1.3 氧化物的 3d 离子磁矩	52
3.1.4 固体的 4f 离子磁矩	52
3.2 中子衍射, 磁结构	53
3.2.1 中子衍射	53
3.2.2 MnO 的磁结构	54
3.2.3 金属 Ho 的磁结构	54
3.2.4 尖晶石铁氧体 $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, Fe_3O_4 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的磁结构	55
3.2.5 磁铅石铁氧体的磁结构	56
3.2.6 石榴石铁氧体的磁结构	57
3.2.7 钙钛石结构铁氧体(正铁氧体)的磁结构	58

3.2.8 强磁性氧化物中磁矩的空间分布	59
3.2.9 金属 Fe 的磁结构	59
3.3 分子场理论	60
3.3.1 Weiss 的分子场理论	60
3.3.2 磁性分析	62
3.3.3 Néel 的分子场理论	63
3.4 直接交换作用	65
3.4.1 H ₂ 分子的交换作用	65
3.4.2 固体的交换作用	67
3.4.3 分子场的起源	68
3.5 自旋波	71
3.5.1 自旋波	71
3.5.2 自旋波的半经典物理图像	74
3.5.3 $T^{3/2}$ 定律	74
3.6 晶场效应	76
3.6.1 晶场,晶场中的 3d 和 4f 离子	76
3.6.2 晶场作用哈密顿	77
3.6.3 3d 离子在尖晶石铁氧体 B 位的晶场效应	78
3.6.4 Jahn-Teller 效应	79
3.6.5 轨道淬灭	80
3.6.6 回转磁效应	80
3.7 自由电子气体的磁性	83
3.7.1 自由电子的本征态,本征能	83
3.7.2 自由电子气体的能带结构	83
3.7.3 自由电子气体的磁化率	84
3.8 RKKY 交换作用	84
3.8.1 f-s 交换作用哈密顿	85
3.8.2 f-s 交换作用的一级微扰	86
3.8.3 传导电子的衰减振荡磁化	86
3.8.4 稀土离子间的间接交换作用	88
3.8.5 Curie 温度和 de Gennes 因子	89
3.9 金属的铁磁性理论	94
3.9.1 Bloch 波函数	95
3.9.2 基于平均场近似的能带理论	96
3.9.3 Stoner 的铁磁性理论	97

3.9.4 密度泛函理论, LDA, LSDA, GGA	100
3.9.5 能带计算方法简介	102
3.9.6 能带结构举例	103
3.10 超交换作用	107
3.10.1 超交换作用的物理图像	107
3.10.2 超交换作用的半定量分析	108
3.10.3 Anderson 的势交换和运动交换	111
参考文献	114
第4章 强磁性介质的能量	115
4.1 交换能的经典表达式	115
4.1.1 立方晶体的交换能密度, 交换常数	115
4.1.2 非立方晶体的交换能密度	116
4.2 磁晶各向异性	117
4.2.1 磁晶各向异性的概念	117
4.2.2 磁晶各向异性与磁化方向的关系	118
4.2.3 各向异性场	120
4.3 磁晶各向异性机理	122
4.3.1 磁矩相互作用模型	122
4.3.2 单离子模型	122
4.3.3 双离子模型	132
4.4 磁致伸缩, 磁弹性能	132
4.4.1 立方晶体的弹性力学	133
4.4.2 立方晶体的磁弹性能	134
4.4.3 立方晶体的自发应变张量	135
4.4.4 立方晶体的磁致伸缩	135
4.4.5 六方晶体的磁致伸缩	136
4.4.6 磁致伸缩机理要点	137
4.5 应力能	139
4.5.1 立方晶体的应力能	140
4.5.2 立方多晶体的应力能	141
4.6 退磁场, 退磁能	142
4.6.1 椭球磁体的退磁因子和退磁能, 形状各向异性	142
4.6.2 易轴垂直于磁体表面的片形和棋盘形畴结构的退磁能	143
4.6.3 易轴几乎平行于磁体表面的片形畴结构的退磁能	144
4.7 磁感生各向异性	146

4.7.1 金属 Co 的磁场冷却感生各向异性	146
4.7.2 原子对有序排列各向异性	146
4.7.3 多晶磁性薄膜的感生各向异性	149
4.7.4 AlNiCo 永磁合金的磁场热处理感生各向异性	151
4.7.5 Co-CoO 的磁场冷却感生各向异性	152
4.7.6 非晶 Gd-Co 薄膜的膜面法线方向为易轴的轴各向异性	153
4.7.7 自旋玻璃 Cu-Mn 合金的磁场感生各向异性	153
4.8 混乱各向异性,有效各向异性	157
4.8.1 非晶磁体的混乱各向异性,有效各向异性	157
4.8.2 纳米晶材料的有效各向异性	159
参考文献	159
第 5 章 磁畴结构	161
5.1 畴壁	161
5.1.1 Bloch 壁	161
5.1.2 薄膜的畴壁	166
5.2 磁畴结构	166
5.2.1 观察磁畴的方法	167
5.2.2 易轴 (z) 垂直于板面 (xy) 的单轴单晶板的磁畴结构	168
5.2.3 立方晶体片的磁畴	172
5.2.4 多晶体的磁畴	173
5.2.5 单畴	174
5.2.6 微小 Fe-80%Ni 合金薄膜的磁结构	175
5.2.7 磁泡	175
5.2.8 磁泡存储器	177
参考文献	178
第 6 章 静态技术磁化过程	180
6.1 静态磁化过程概述,磁化特性的典型应用	180
6.1.1 磁化曲线	180
6.1.2 磁滞回线	181
6.1.3 磁化特性的典型应用	182
6.2 畴壁位移过程概述	184
6.2.1 180° 畴壁位移	185
6.2.2 90° 畴壁位移	186
6.3 可逆畴壁位移过程,起始磁化率	186
6.3.1 应力模型	186

6.3.2 掺杂模型	188
6.3.3 掺杂表面磁荷的钉扎作用	189
6.3.4 起始磁导率与晶粒尺寸的关系	189
6.3.5 Hopkinson 效应及其应用实例	190
6.4 不可逆畴壁位移过程, 矫顽力, 反磁化形核	192
6.4.1 应力模型	193
6.4.2 掺杂模型	193
6.4.3 面缺陷模型	193
6.4.4 矫顽力与晶粒尺寸的关系	197
6.4.5 反磁化形核	198
6.5 磁转动过程	201
6.5.1 起始磁化率	201
6.5.2 磁滞回线	202
6.5.3 星形线	204
6.5.4 趋近饱和定律	205
6.5.5 超顺磁性	205
6.5.6 微小颗粒的矫顽力	206
6.5.7 磁芯存储器	206
6.5.8 磁膜存储器	207
6.5.9 磁流体	208
6.6 微磁学	209
6.6.1 Brown 方程	209
6.6.2 无限长圆柱体的反磁化形核	210
6.6.3 有限元数值计算法	212
参考文献	220
第 7 章 强磁性介质的电光性质, 磁与生物, 超精细相互作用	222
7.1 强磁性介质的电性质	222
7.1.1 电阻	222
7.1.2 Hall 效应	222
7.1.3 各向异性磁电阻效应	224
7.1.4 巨磁电阻效应	225
7.1.5 隧道磁电阻效应	227
7.1.6 双交换作用, 超大磁电阻效应	227
7.1.7 磁电阻读出磁头	229
7.1.8 磁电阻随机存储器	230

7.1.9 巨磁阻抗效应	231
7.1.10 电压诱导铁磁性	231
7.2 强磁性介质的磁光效应	232
7.2.1 Faraday 旋转效应和 Kerr 效应现象	233
7.2.2 在真空中传播的平面电磁波	233
7.2.3 磁化强度矢量的进动方程,张量磁化率	234
7.2.4 张量介电常数	237
7.2.5 在强磁性介质中传播的电磁波	238
7.2.6 Faraday 旋转效应	241
7.2.7 Kerr 效应	241
7.2.8 光照射的磁性效应	243
7.2.9 磁光存储器	244
7.3 磁与生物	246
7.3.1 生物体内的强磁体和磁场感受性	246
7.3.2 恒定磁场的生物效应	247
7.3.3 交变磁场的生物效应	248
7.3.4 磁共振成像	249
7.3.5 磁性微粒的医学应用	250
7.4 原子的超精细相互作用	251
7.4.1 原子核的磁矩和电四极矩	251
7.4.2 超精细相互作用	252
7.5 固体的超精细相互作用,核磁共振,Mössbauer 谱	257
7.5.1 超精细参数	257
7.5.2 超精细能级,超精细场	258
7.5.3 核磁共振(NMR)实验原理	260
7.5.4 Mössbauer 谱实验原理	260
7.5.5 核磁共振和 Mössbauer 谱的应用例	262
参考文献	265
第 8 章 动态磁化过程	267
8.1 复数磁导率	267
8.1.1 复数磁导率	267
8.1.2 复数磁导率的测量	268
8.1.3 品质因数	268
8.1.4 损耗来源	269
8.2 涡流	270

8.2.1 趋肤深度	270
8.2.2 涡流损耗	271
8.3 磁后效	273
8.3.1 磁后效的现象学	273
8.3.2 磁后效引起的磁谱	274
8.3.3 磁后效机理	275
8.3.4 磁导率减落	277
8.3.5 热起伏磁后效	277
8.4 自由一致进动	278
8.4.1 自由进动,固有进动频率	278
8.4.2 磁体形状对固有进动频率的影响	279
8.4.3 恒定有效场的普遍表达式	279
8.4.4 固有进动频率的普遍表达式	279
8.4.5 磁晶各向异性对固有进动频率的影响	281
8.4.6 弛豫时间	282
8.5 强制一致进动	283
8.5.1 强制一致进动,铁磁共振	283
8.5.2 单畴晶体的自然共振和磁谱	286
8.5.3 磁性薄膜的截止频率	289
8.5.4 多畴晶体的自然共振	289
8.6 畴壁共振	292
8.6.1 畴壁位移机制	292
8.6.2 畴壁的有效质量	293
8.6.3 交变磁场作用下的畴壁运动方程	293
8.6.4 畴壁振动引起的磁谱	294
8.6.5 畴壁共振频率与静态起始磁化率的关系	295
8.7 非一致进动	295
8.7.1 自旋波	295
8.7.2 静磁模	300
8.8 高功率现象	302
8.8.1 一致进动和自旋波共存时的进动方程	303
8.8.2 平行泵($\mathbf{h}=\mathbf{he}_z$)下的高功率现象	305
8.8.3 垂直泵($\mathbf{h}=\mathbf{he}_x$)下的高功率现象	307
参考文献	311