

С. В. В О Н С О В С К И Й

МАГНЕТИЗМ

С. В. ВОНСОВСКИЙ

МАГНЕТИЗМ

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДИА-, ПАРА-,
ФЕРРО-, АНТИФЕРРО-,
И ФЕРРИМАГНЕТИКОВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1971

531.9
В 73
УДК 538.0

Магнетизм. С. В. В о н с о в с к и й, монография, Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1971.

Цель книги — изложить современное состояние физических представлений о магнитных свойствах различных твердых тел.

В первой части изложены основные сведения об электродинамике, термодинамике и статистической механике магнитных сред; дана также общая классификация магнитных веществ.

Вторая часть книги посвящена физике магнетизма слабомагнитных веществ, не обладающих атомным магнитным порядком, т. е. диа- и парамагнетиков. Здесь рассмотрен диамагнетизм неметаллических тел, магнитные свойства сверхпроводников, парамагнетизм атомов, молекул и кристаллов, магнитные свойства слабомагнитных металлов и полупроводников; рассмотрен электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), гальвано- и термомагнитные свойства, магнетооптические явления и методы магнитного охлаждения тел.

Третья часть посвящена описанию сильномагнитных веществ, обладающих атомным магнитным порядком, т. е. ферро-, ферри- и антиферромагнетиков. Здесь дано качественное описание ферро- и антиферромагнетиков, теория молекулярного поля, квантовая теория ферро- и антиферромагнетиков — *d*- и *f*-металлов и сплавов; приводятся основные положения современной теории технической кривой намагничивания, проблемы магнетодинамики ферромагнетиков, немагнитные свойства магнитно-упорядоченных веществ. В конце книги описаны ядерные эффекты в веществах с атомным магнитным порядком.

Табл. 57. Рис. 446. Библ. 7000 назв.

Сергей Васильевич Вонсовский
Магнетизм

М., 1971 г., 1032 стр. с илл.

Редактор А. А. Гусев

Техн. редактор К. Ф. Брудно

Корректоры Т. С. Плетнева, Н. Д. Дорохова

Сдано в набор 16/III 1971 г.

Подписано к печати 1/IX 1971 г.

Бумага 70×108¹/₁₆

Физ. печ. л. 64,5.

Условн. печ. л. 90,30.

Уч.-изд. л. 103,5.

Тираж 12 000 экз.

Т-14341. Цена книги 6 р. 73 к. Заказ 847.

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы

Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Московская типография №16 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Москва, Трехпрудный пер., 9

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	9
-----------------------	---

ЧАСТЬ I

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МАГНЕТИЗМА

Глава 1. Введение	15
§ 1. Общие замечания (15). § 2. Краткие исторические сведения о развитии учения о магнетизме веществ (17). Литература к главе 1 (22).	
Глава 2. Краткие сведения о магнитных свойствах электрона и электронной оболочки атома	24
§ 1. Спин и спиновый магнитный момент электрона (24). § 2. Орбитальный магнетизм одноэлектронного атома (25). § 3. Орбитальный магнитный момент оболочки многоэлектронного атома (25). § 4. Зеемановское расщепление атомных энергетических уровней (29). § 5. Аномальный магнитный момент электрона (32). § 6. Магнитный монополю Дирака (33). § 7. Атом во внешнем магнитном поле: парамагнитный и диамагнитный эффекты (33). Литература к главе 2 (35).	
Глава 3. Краткие сведения о магнитных свойствах нуклонов и атомных ядер	36
§ 1. Магнитные моменты протона и нейтрона (36). § 2. Магнитные моменты атомных ядер (36). § 3. Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) и взаимодействие сверхтонкой структуры (СТС) (38). Литература к главе 3 (40).	
Глава 4. Основы электродинамики магнетиков	41
§ 1. Магнитные действия постоянного электрического тока (41). § 2. Магнитные действия магнетиков, намагниченность (43). § 3. Основные типы магнетиков (45). § 4. Кривая намагничивания, петля гистерезиса и магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость (46). § 5. Теорема Ампера (48). § 6. Общее микроскопическое определение магнитного момента (48). Литература к главе 4 (49).	
Глава 5. Основы термодинамики и статистической механики магнетиков	50
§ 1. Уравнения 1-го и 2-го начала термодинамики (50). § 2. Термодинамические условия равновесия (52). § 3. Основные дифференциальные соотношения термодинамики (52). § 4. Статистическая механика (53). § 5. Общее квантовомеханическое определение энергии и среднего магнитного момента электрона в магнитном поле (56). Литература к главе 5 (58).	

§ 1. Феноменологическая классификация (59). § 2. Физическая классификация (59). § 3. Основные типы магнитных состояний вещества (62). § 4. Детальная физическая классификация магнитных состояний вещества (63). Литература к главе 6 (66).

ЧАСТЬ II

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ, НЕ ОБЛАДАЮЩИХ АТОМНЫМ МАГНИТНЫМ ПОРЯДКОМ. СЛАБОМАГНИТНЫЕ ТЕЛА — ДИАМАГНЕТИКИ И ПАРАМАГНЕТИКИ!

§ 1. Теория диамагнитной восприимчивости атомов, ионов и молекул (69). § 2. Основные опытные данные (77). § 3. Метод молекулярных орбит (82). § 4. Магнитное экранирование ядер (83). § 5. Диамагнетизм неметаллических кристаллов (84). Литература к главе 7 (86).

§ 1. Критическая температура и критическое магнитное поле (89). § 2. Магнитные свойства сверхпроводников (91). § 3. Основы микроскопической теории сверхпроводимости. Куперовские пары (92). § 4. Объяснение магнитных свойств (94). § 5. Природа «промежуточного» состояния по Ландау (доменная структура) (96). § 6. Природа поверхностной энергии на границе сверхпроводящей фазы. Сверхпроводники I и II рода (97). § 7. Феноменологическая теория Гинзбурга — Ландау и ее обобщение по Абрикосову — Горькову (98). § 8. «Накачка» магнитного потока с помощью сверхпроводника (101). § 9. Разрушение сверхпроводимости током (101). § 10. Квантование магнитного потока (102). § 11. Гиромангнитный эффект (102). Литература к главе 8 (104).

§ 1. Теория парамагнетизма атомов и ионов (107). § 2. Основные опытные данные (120). § 3. Парамагнетизм молекул (126). Литература к главе 9 (129).

§ 1. Типы неметаллических парамагнитных кристаллов (130). § 2. Влияние на магнитные ионы внутрикристаллического окружения (поле лигандов) (130). § 3. Гамильтониан магнитного иона в кристалле (131). § 4. Частные случаи, различающиеся величиной лигандного поля (132). § 5. Теоретико-групповая трактовка внутрикристаллических расщеплений уровней магнитных ионов (133). § 6. Физическая интерпретация расщепления атомных уровней в кристаллах (143). § 7. Влияние спина и «замораживание» орбитальных моментов (147). § 8. Теоретико-групповая трактовка спин-орбитального расщепления (151). § 9. Теорема Крамерса (153). § 10. Эффект Яна — Теллера (154). § 11. Оценки величин расщеплений (155). § 12. Эффект «размораживания» орбитальных моментов (156). § 13. Метод спин-гамильтониана

(159). § 14. Учет магнитного взаимодействия ионов (161). § 15. Гиромагнитное отношение ионов в парамагнитных кристаллах (162). Литература к главе 10 (164).

Глава 11. Магнитные свойства металлов, не обладающих атомной магнитной структурой	166
А. Металлы нормальных групп	166
§ 1. Введение (166). § 2. Основные свойства идеального ферми-газа. Поверхность Ферми (168). § 3. Паулиевский парамагнетизм электронов проводимости (170). § 4. Диамагнетизм электронов проводимости (175). § 5. Основы электронной теории (слабого) магнетизма металлов с произвольным законом дисперсии (187). § 6. Эффект де Гааза — ван Альфена при произвольном законе дисперсии (207).	
Б. Металлы переходных групп	216
§ 7. Магнитные свойства переходных металлов (216). Литература к главе 11 (224).	
Глава 12. Магнитные свойства полупроводников	229
§ 1. Электронная структура полупроводников (229). § 2. Условие нейтральности, химический потенциал (231). § 3. Различные составляющие магнитной восприимчивости (235). § 4. Сравнение с опытом (247). § 5. Связь магнитных свойств полупроводников с природой химических связей в них (251). § 6. Заключение (251). Литература к главе 12 (252).	
Глава 13. Магнитный (электронный) резонанс в веществах, не обладающих атомным магнитным порядком	254
§ 1. Циклотронный резонанс (254). § 2. Электронный парамагнитный резонанс (278). § 3. Резонансное поглощение звука в парамагнетиках (магнетоакустический парамагнитный резонанс) (300). Литература к главе 13 (303).	
Глава 14. Гальвано- и термомагнитные явления в металлах и полупроводниках, не обладающих магнитным порядком	313
§ 1. Феноменологическая теория гальвано- и термомагнитных эффектов (313). § 2. Магнетосопротивление и эффект Холла (318). § 3. Микроскопическая теория магнетосопротивления и эффекта Холла по модели свободных электронов (320). § 4. Трудности модели свободных электронов (323). § 5. Модель двух полос (двухзонная модель) и правило Коле-ра (325). § 6. Теория гальваномагнитных явлений в металлах при произвольном законе дисперсии (327). § 7. Гальваномагнитные явления в квантующем магнитном поле (335). § 8. Термомагнитные явления в квантующем магнитном поле (339). Литература к главе 14 (342).	
Глава 15. Магнетооптические явления	346
§ 1. Феноменологическая теория эффекта Фарадея и эффекта Коттона—Мутона (Фохта) (346). § 2. Микроскопическая теория (352). § 3. Магнетооптические свойства полупроводников (357). § 4. Магнетооптические свойства металлов (360). § 5. Геллконь (360). § 6. Фотомагнитный эффект (эффект Кикоина — Носкова) (362). § 7. Рассеяние света на магнитном поле (363). Литература к главе 15 (363).	

Глава 16. Магнитное охлаждение	368
§ 1. Введение (368). § 2. Магнитный метод охлаждения (368).	
§ 3. Метод магнитного охлаждения для ядерных парамагнетиков (375).	
§ 4. Время релаксации при адиабатическом размагничивании (375).	
§ 5. Типичная схема магнитных установок для получения сверхнизких температур (377). § 6. Использование сверхпроводящего фазового перехода для получения низких температур (379). § 7. Использование адиабатического размагничивания металлов и некоторые другие вопросы (380). Литература к главе 16 (381).	

ЧАСТЬ III

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ С АТОМНЫМ МАГНИТНЫМ ПОРЯДКОМ. СИЛЬНОМАГНИТНЫЕ ТЕЛА — ФЕРРОМАГНЕТИКИ, АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ, ФЕРРИМАГНЕТИКИ

Глава 17. Самопроизвольная намагниченность и природа атомных носителей магнетизма веществ	385
--	-----

§ 1. Основные свойства ферромагнетиков (385). § 2. Основные свойства антиферромагнетиков и ферримагнетиков (389). § 3. Молекулярное поле Вейсса (391). § 4. Определение природы атомных носителей магнитного момента по парамагнитному эффекту (393). § 5. Обменное взаимодействие: метод магнитной нейтронографии (397). Литература к главе 17 (398).

Глава 18. Феноменологическое описание ферромагнитного состояния	400
--	-----

§ 1. Феноменологическая теория молекулярного поля (400). § 2. Уточнение теории молекулярного поля в рамках квазиклассического метода (407). § 3. Термодинамическая теория ферромагнитного превращения (417). § 4. О критических явлениях вблизи точки Кюри (431). § 5. Попытки построения строгой теории фазовых переходов второго рода (438). § 6. Магнитные переходы первого рода (440). Литература к главе 18 (446).

Глава 19. Теория самопроизвольной намагниченности ферромагнетика	455
---	-----

§ 1. Обменная теория ферромагнетизма — метод энергетических центров тяжести (455). § 2. Классическая теория спиновых волн (462). § 3. Квантовая теория спиновых волн (472). § 4. Уточнение теории ферромагнетизма (484). § 5. Применение квантостатистического метода функций Грина (492). § 6. Оценка параметра обменного взаимодействия (503). Литература к главе 19 (505).

Глава 20. Теория ферромагнетизма и антиферромагнетизма переходных металлов	512
---	-----

§ 1. Предварительные замечания (512). § 2. Распределение зарядовой и спиновой электронной плотности в *d*- и *f*-металлах (513). § 3. Обменное взаимодействие в *f*- и *d*-металлах (521). § 4. Ферромагнетизм в модели коллективизированных электронов (526). § 5. Основы *s* — *f*-обменной модели (553). § 6. Особенности магнитных и некоторых других физических свойств редкоземельных металлов (564). § 7. Микроскопическая *s* — *f*-обменная модель (574). § 8. Объяснение магнитных

свойств РЗМ на основе $s - f$ -обменной модели (589). § 9. Заключительные замечания (603). Литература к главе 20 (605).

Глава 21. Атомный магнитный порядок в металлических сплавах 615

§ 1. Классификация магнитных сплавов (615). § 2. Атомные магнитные моменты и точки Кюри ферромагнитных сплавов (616). § 3. Сильно разбавленные растворы парамагнитных атомов в кристаллах (625). § 4. Общая задача поведения атомов магнитной примеси в металлических кристаллах (630). § 5. Теория бинарных ферромагнитных сплавов по модели Гейзенберга (638). § 6. Спин-волновая теория магнитно-упорядоченных кристаллов с примесями (651). § 7. Эффекты, обусловленные взаимодействием примесей (659). § 8. Случай линейных и плоских дефектов (664). § 9. Зависимость среднего атомного магнитного момента сплава от состава и степени порядка по $s - d$ -модели (666). § 10. Средний магнитный момент сплава с обменными взаимодействиями разных знаков (667). § 11. Заключительные замечания (671). Литература к главе 21 (672).

Глава 22. Теория антиферромагнетизма и ферримагнетизма 679

§ 1. Вводные замечания (679). § 2. Проблема основного состояния (680). § 3. Нейтронографические исследования антиферромагнетиков (686). § 4. Косвенная обменная связь в неметаллических соединениях (687). § 5. Квазиклассическая теория антиферромагнетизма (приближение молекулярного поля) (702). § 6. Термодинамическая теория антиферромагнетизма (714). § 7. Теория спиновых волн в антиферромагнетиках (718). § 8. Квазиклассическая теория ферримагнетизма (724). § 9. Теория магнитных структур в антиферромагнетиках неметаллах по Дзялошинскому (741). § 10. Феноменологическая трактовка ферримагнетизма (742). § 11. Слабый ферромагнетизм (749). § 12. Антиферромагнетики со слоистой структурой и метамагнетизм (759). § 13. Антиферромагнитные металлы (761). § 14. Ферромагнетизм и антиферромагнетизм соединений элементов группы урана (762). Литература к главе 22 (763).

Глава 23. Теория кривых намагничивания ферромагнетиков 774

§ 1. Введение (774). § 2. Основные типы взаимодействий в ферромагнитном кристалле (774). § 3. Другие типы магнитной анизотропии (789). § 4. Распределение самопроизвольной намагниченности в кристалле (793). § 5. Малые (однодоменные) ферромагнитные частицы (800). § 6. Суперпарамагнетизм (805). § 7. Тонкие ферромагнитные пленки (808). § 8. Экспериментальные доказательства существования доменов (811). § 9. Процессы намагничивания (826). § 10. Обратимые процессы смещения (826). § 11. Обратимые процессы вращения (833). § 12. Приближение к насыщению (838). § 13. Магнитный гистерезис (839). § 14. Магнитные материалы (853). Литература к главе 23 (861).

Глава 24. Магнитно-упорядоченные вещества в переменных магнитных полях и временные эффекты 878

§ 1. Дисперсия магнитной проницаемости (феноменологическая трактовка) (878). § 2. Влияние доменной структуры на дисперсию магнитной проницаемости (881). § 3. Ферромагнитный резонанс, однородные магнетостатические колебания (886). § 4. Неоднородные магнетостатические колебания (891). § 5. Спин-волновой резонанс (893).

§ 6. Связи ферромагнитного резонанса с магнетомеханическими эффектами (895). § 7. Ферромагнитные релаксационные процессы и проблема ширины резонансной линии (897). § 8. Нелинейные эффекты и некоторые другие эффекты (898). § 9. Ферримагнитный и антиферромагнитный резонанс (901). § 10. Магнитная вязкость (903). Литература к главе 24 (907).

Глава 25. Влияние атомного магнитного порядка на немагнитные свойства вещества	917
§ 1. Тепловые свойства (917). § 2. Магнитострикция и магнитоупругие свойства ферромагнетиков (918). § 3. Электрические свойства ферромагнетиков (925). § 4. Теплопроводность (940). § 5. Гальваномагнитные и термомагнитные четные эффекты (941). § 6. Нечетные кинетические эффекты (948). § 7. Оптические, магнитооптические и некоторые другие свойства ферромагнетиков (958). § 8. Сверхпроводимость в металлах с магнитными ионами и влияние на нее магнитного порядка (965). § 9. Эффект Кондо (969). Литература к главе 25 (974).	
Глава 26. Ядерные методы исследований в магнетизме	987
§ 1. Введение (987). § 2. Магнитная нейтрография (987). § 3. Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) в магнитно-упорядоченных веществах (993). § 4. Эффект Мессбауэра и его применение в исследованиях магнетизма (1000). Литература к главе 26 (1011).	
Литература	1020
I. Общая литература (1020). II. Сборники по различным вопросам магнетизма (1023). III. Всесоюзные и международные конференции по различным вопросам магнетизма (1026).	
Предметный указатель	1027