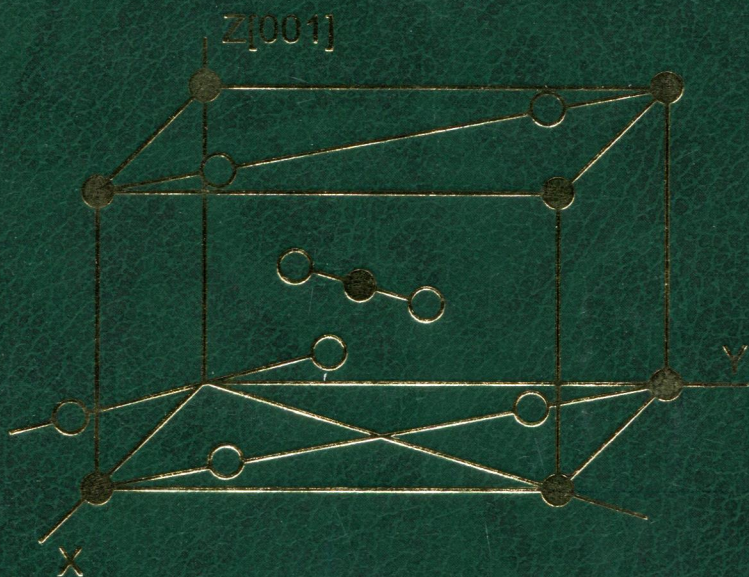


А.В. КОЛЧАНОВ, В.В. МЕНЬШЕНИН,
МИРСАЕВ, В.В. НИКОЛАЕВ

СИММЕТРИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ
2001

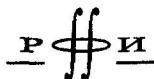
Е.А. ТУРОВ, А.В. КОЛЧАНОВ, В.В. МЕНЬШЕНИН,
И.Ф. МИРСАЕВ, В.В. НИКОЛАЕВ

СИММЕТРИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ
2001

УДК 537.622
ББК 2237
Т86



*Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 02-30013*

Туров Е.А., Колчанов А.В., Меньшенин В.В., Мирсаев И.Ф., Николаев В.В. **Симметрия и физические свойства антиферромагнетиков.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. — 560 с. — ISBN 5-9221-0099-8.

Антиферромагнетики не только составляют подавляющее большинство среди магнитоупорядоченных веществ (магнетиков), но и обладают многими специфическими физическими свойствами, характерными только для них, во всех областях магнитофизики — собственно магнетизма (линейного и нелинейного), гальваномагнетизма, магнитооптики, магнитоакустики, акустооптики и пр. Систематическому рассмотрению всех этих свойств на уровне, предполагающем знания лишь в пределах общего курса физики, и посвящена книга.

Для студентов и преподавателей, научных работников и инженеров-разработчиков физико-технического профиля, интересующихся применением новых физических явлений в твердотельной электронике. Многие теоретические предсказания призваны стимулировать экспериментальное открытие таких новых явлений.

Может служить дополнительным пособием для изучения магнетиков с точки зрения симметрии, кристаллохимической и магнитной.

ISBN 5-9221-0099-8

© ФИЗМАТЛИТ, 2001
© Е.А. Туров, А.В. Колчанов, В.В. Меньшенин,
И.Ф. Мирсаев, В.В. Николаев., 2001

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	10
Глава 1. ВВЕДЕНИЕ: ПОЧЕМУ НЕОБХОДИМА СПЕЦИАЛЬНАЯ КНИГА ОБ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКАХ .	13
Глава 2. ЭЛЕМЕНТЫ КРИСТАЛЛОГРАФИИ И ТЕОРИИ СИММЕТРИИ КРИСТАЛЛОВ	17
2.1. Вводные замечания	17
2.2. Трансляционная симметрия и решетки Браве	19
2.3. Оси и плоскости симметрии	20
2.4. Пространственные (федоровские) и точечные группы симметрии кристаллов	23
2.5. Сингонии и типы решеток. Ячейка Браве и элементарная ячейка	24
2.6. Символы и графическое изображение пространственных групп	27
2.7. Примеры пространственных групп	28
2.8. Позиции кратных точек	30
2.9. Что значит знать структуру кристалла	34
Глава 3. МАГНИТОУПОРЯДОЧЕННЫЕ КРИСТАЛЛЫ И ИХ СИММЕТРИЙНОЕ ОПИСАНИЕ	36
3.1. Типы магнитных структур	36
3.2. Кристаллохимическая и магнитная симметрия	41
3.3. Магнитные подрешетки и их локальные намагниченности ..	46
3.4. Коллинеарная обменная магнитная структура, ее шифр и векторный параметр порядка	48
3.5. Обменное взаимодействие и перестановочная симметрия. Коллинеарные и неколлинеарные обменные магнитные структуры	51
Глава 4. ЛИНЕЙНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ИНВАРИАНТНОСТЬ МАТЕРИАЛЬНЫХ ТЕНЗОРОВ	60
4.1. Материальные тензоры и динамические переменные	60
4.1.1. Преобразование векторов. Полярные и аксиальные векторы (60). 4.1.2. Преобразование тензоров (65). 4.1.3. Преобразование векторов антиферромагнетизма (69).	

4.2. Инвариантность материальных тензоров и уравнений связи	72
4.2.1. Ненарушенная кристаллохимическая симметрия (72).	
4.2.2. Магнитная симметрия (74).	
4.2.3. Магнетики с позиций кристаллохимической симметрии (76).	
4.3. Соотношения Онсагера и другие общие свойства материальных тензоров	78
Глава 5. ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СВОЙСТВА МАГНЕТИКОВ	85
5.1. Обменное взаимодействие	86
5.1.1. Произвольная обменная магнитная структура. Переход к приближению сплошной среды (86).	
5.1.2. Двух-подрешеточный антиферромагнетик (90).	
5.1.3. Четырех- и трехподрешеточные обменные магнитные структуры, в том числе, неколлинеарные. Биквадратичный обмен (92).	
5.2. Энергия магнитной анизотропии	94
5.2.1. Одноионная анизотропия (94).	
5.2.2. Межионная анизотропия. Антисимметричный обмен Дзялошинского-Мории (101).	
5.2.3. Диполь-дипольное взаимодействие (105).	
5.3. Целый рациональный базис инвариантов	109
5.4. Магнитоэлектрическое взаимодействие	112
5.4.1. Общие замечания (112).	
5.4.2. Магнитоэлектрическое взаимодействие в терминах кристаллохимической симметрии (114).	
5.5. Магнитоупругое взаимодействие. Пьезомагнетизм	116
5.6. Другие взаимодействия и замечания по модели	119
5.6.1. Зеemanовская и упругая энергии (119).	
5.6.2. Модель равномодульных спиновых плотностей и анизотропия g -фактора (121).	
Глава 6. МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА И ОСНОВНОЕ СОСТОЯНИЕ РОМБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ	126
6.1. Общие замечания об используемых методах и моделях	126
6.1.1. Четыре шага симметричного подхода (126).	
6.1.2. Магнитные фазовые переходы (129).	
6.1.3. О классификации антиферромагнетиков (133).	
6.2. Ортоферриты и ортохромиты	134
6.3. Ортоалюминаты. Магнитные свойства	151
6.3.1. Ортоалюминат гадолия (152).	
6.3.2. Ортоалюминаты диспрозия и тербия (157).	
6.4. Ортоалюминаты. Магнитоэлектрический эффект	167

6.5. Ортоферриты с магнитными R-ионами	170
6.6. Ортофосфаты. Магнитная структура и магнитоэлектрический эффект	176
6.7. Магнитный структурный фазовый переход от антиферромагнетизма к слабому ферромагнетизму в CoSO_4 , вызванный магнитным полем	183
6.8. UFeO_4 и фазовый переход из антиферромагнитной структуры в ферромагнитную со слабым антиферромагнетизмом...	192
6.9. О других орторомбических антиферромагнетиках	196

Глава 7. АНТИФЕРРОМАГНЕТИЗМ В ТЕТРАГОНАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛАХ

198

7.1. Фториды со структурой рутила	198
7.1.1. Легкая ось. Продольное намагничивание (201).	
7.1.2. Легкая ось. Поперечное намагничивание (203).	
7.1.3. Обсуждение MnF_2 (205). 7.1.4. Фторид кобальта (208).	
7.1.5. Легкая плоскость. NiF_2 (213).	
7.2. Центроантисимметричные антиферромагнетики	214
7.2.1. Трирутилы. Магнитная структура (214). 7.2.2. Трирутилы. Магнитные свойства и магнитоэлектрический эффект (217).	
7.3. Редкоземельные фосфаты и ванадаты	220

Глава 8. ТРИГОНАЛЬНЫЕ И ГЕКСАГОНАЛЬНЫЕ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ

224

8.1. Одноосные центросимметричные антиферромагнетики с обменной магнитной структурой, чётной относительно главной оси	224
8.1.1. Кристаллы с симметрией $R\bar{3}c$ (224). 8.1.2. Целый рациональный базис инвариантов, термодинамический потенциал и магнитные свойства в квадратичном по базисным векторам приближении (226). 8.1.3. Роль магнитной анизотропии выше второго порядка (229). 8.1.4. Эксперимент (231).	
8.2. Магнитоэлектрический эффект в Cr_2O_3	239
8.2.1. Рассмотрение с позиций кристаллохимической симметрии (239). 8.2.2. Тензор магнитоэлектрической восприимчивости и магнитная симметрия (244).	
8.3. Гексагональные антиферромагнетики с нечетной обменной магнитной структурой относительно гексагональной оси симметрии	247

Глава 9. АНТИФЕРРОМАГНЕТИЗМ В КРИСТАЛЛЕ БЕЗ ЦЕНТРА СИММЕТРИИ НА ПРИМЕРЕ KNiPO_4	252
9.1. Кристаллическая решетка и магнитная структура. Их сопоставление с экспериментом.....	253
9.2. Возможные коллинеарные обменные магнитные структуры, их шифры и векторные параметры порядка.....	255
9.3. Преобразование динамических переменных и энергетические инварианты	257
9.4. Суперпозиция различных обменных магнитных структур и магнитная симметрия	260
9.5. Возможные ориентационные состояния и их устойчивость ..	262
9.6. Кривые намагничивания.....	265
9.7. Обсуждение результатов.....	268
Глава 10. КУБИЧЕСКИЕ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ. ТРЕУГОЛЬНАЯ ОБМЕННАЯ МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА .	272
10.1. Обменная магнитная структура типа MnO	272
10.2. Термодинамический потенциал и обменная магнитная структура металлических перовскитов	273
10.3. Магнитоанизотропное взаимодействие и ориентационный фазовый переход.....	275
10.4. Магнитная восприимчивость	280
Глава 11. ЭЛЕМЕНТЫ МАГНИТНОЙ (СПИНОВОЙ) ДИНАМИКИ	282
11.1. Об уравнениях, применяемых в динамике антиферромагнетиков.....	282
11.1.1. Уравнения Ландау-Лифшица (283). 11.1.2 Онсагеровский и лагранжевы подходы в линейной магнитодинамике и связь между ними (287). 11.1.3. Нелинейный лагранжевый подход в терминах вектора \vec{L} (294). 11.1.4. Вывод уравнений движения по Андрееву-Марченко (298).	
11.2. Спиновые волны и антиферромагнитный резонанс.....	301
11.2.1. Спиновые волны как элементарные линейные возбуждения магнетика (301). 11.2.2. Частота АФМР в YFeO_3 и других ортоферритах (307). 11.2.3. Уравнения движения с учетом анизотропии g -фактора (312). 11.2.4. Магнитная симметрия и разделение мод колебаний (316). 11.2.5. Частоты АФМР, рассчитанные из уравнений Власова-Ишмухаметова (326). 11.2.6. Применение к NaNiF_3 (331).	

11.3. Ориентационный фазовый переход и мягкая мода	333
11.4. АФМР в тетрагональных центросимметричных антиферромагнетиках с нечетной осью $4_z(-)$	344
11.4.1. Фторид марганца (345). 11.4.2. Фторид кобальта (348).	
11.5. Центросимметричные антиферромагнетики с четной главной осью симметрии	352
11.5.1. Теоретические формулы для частот АФМР (352).	
11.5.2. Эксперимент: α - Fe_2O_3 , FeVO_3 и MnCO_3 (357).	
11.6. Спиновые волны в антиферромагнетиках с неколлинеарной (треугольной) обменной магнитной структурой	363
11.7. Центроантисимметричные антиферромагнетики. Роль магнитоэлектрического эффекта	366
11.7.1. Тетрагональные центроантисимметричные антиферромагнетики (367). 11.7.2. Cr_2O_3 (376).	
 Глава 12. ОБЗОР НЕМАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С АНТИФЕРРОМАГНЕТИЗМОМ	 378
12.1. Кинетика (гальваномагнитные эффекты) — центросимметричные антиферромагнетики	378
12.1.1. Спонтанный (антиферромагнитный) эффект Холла (380). 12.1.2. Эффект Холла, квадратичный по магнитному полю (381). 12.1.3. Эффекты типа (LL) и (LH) в кинетике — магнитосопротивление и поперечный гальваномагнитный эффект (383).	
12.2. Оптика	385
12.2.1. Некоторые общие понятия кристаллооптики и классификация оптических эффектов в антиферромагнетиках (385). 12.2.2. Гиротропный эффект кругового дупреломления типа (L) и эллиптичность (391). 12.2.3. Квадратичный по полю \vec{H} эффект Фарадея (394). 12.2.4. Эффект типа (LL) и (LH) в оптике (центросимметричный случай) (396).	
12.3. Магнитоупругое взаимодействие и антиферроакустика. Симметричный подход	403
12.3.1. Магнитоупругая щель и мягкая магнитоакустическая мода как эффекты спонтанно нарушенной симметрии (403). 12.3.2. Акустическое дупреломление, линейное и круговое. Симметричный подход (409). 12.3.3. Об эффекте усиления магнитоупругого взаимодействия (420). 12.3.4. Магнитоакустика на основе связанных уравнений магнитоупругой динамики. (Центросимметричные антиферромагнетики) (422).	

12.4. Акустическая дифракция света. Антиферромагнитные механизмы	430
12.4.1. Два режима дифракции света на звуке — Брэгга и Рамана-Ната (430). 12.4.2. Антиферромагнитная часть диэлектрической проницаемости и связанные с ней механизмы фотоупругого взаимодействия (432). 12.4.3. Брэгговский режим (434). 12.4.4. Режим Рамана-Ната. Новый механизм, связанный с акустической модуляцией поляризации света (437). 12.4.5. Раман-Натовская дифракция при $H_z \gg H_{\perp}$ (441).	
12.5. Фазовые переходы антиферромагнетизм-ферромагнетизм. Роль обменной стрикции	445
12.5.1. О структуре Mn_2Sb (с примесями) и фазовом переходе первого рода антиферромагнетизм-ферромагнетизм (445). 12.5.2. Термодинамический потенциал и фазовый переход антиферромагнетизм-ферромагнетизм (447). 12.5.3. Эффективные модули упругости вблизи точки фазового перехода (450). 12.5.4. Эффекты кругового акустического дупреломления (452).	
12.6. Центроантисимметричные антиферромагнетики: кинетика, оптика, акустика	454
12.6.1. Предварительные замечания (454). 12.6.2. Гальваноантиферромагнитные эффекты типа (LE). Квадратичный по току аналог эффекта Холла (456). 12.6.3. Оптические эффекты типа (LE) и (Lk) в Sr_2O_3 (460). 12.6.4. Оптические эффекты (LE) и (Lk) в тетрагональных кристаллах (467). 12.6.5. Немного об эффектах (LE) и (Lk) в акустике (471).	
Глава 13. КОЕ-ЧТО О КУПРАТАХ	474
13.1. La_2CuO_4 : кинетика, оптика, акустика	475
13.1.1. Кристаллическая и магнитная структуры (475). 13.1.2. Гальваномагнитные явления (480). 13.1.3. Оптические эффекты (481). 13.1.4. Акустические эффекты (482).	
13.2. Киральность обменных магнитных структур и ее проявление в оптике и акустике: Nd_2CuO_4	484
13.2.1. Оптика (485). 13.2.2. Акустика (487).	
Глава 14. О НЕКОТОРЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ МАГНИТОУПРУГИХ ЯВЛЕНИЯХ В АНТИФЕРРОМАГНЕТИКАХ	489
14.1. Ангармонические эффекты упругих и магнитоупругих возбуждений	489
14.2. Эффективный упругий ангармонизм антиферромагнетиков	490

14.3. Эксперименты по нелинейным магнитоакустическим эффектам	492
14.4. Нелинейная генерация квазизвуковой волны в ортоферритах	494
14.5. Нелинейные процессы в центроантисимметричных тетрагональных антиферромагнетиках	499
Глава 15. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	504
15.1. Некоторые выводы и предложения	504
15.1.1. Кинетика: гальвано-антиферромагнитные явления (504). 15.1.2. Антиферромагнитные эффекты в оптике (505). 15.1.3. Антиферромагнитоакустика (505). 15.1.4. Новый (поляризационный) механизм акустической дифракции света (506). 15.1.5. Оптический и акустический методы идентификации магнитных структур в обменном дублете по их киральности (507).	
15.2. Актуальные проблемы, не вошедшие в книгу	507
 ПРИЛОЖЕНИЯ	 513
Пояснения к приложениям I–VI	513
Приложение I. Решетки Браве черно-белой (магнитной) симметрии	516
Приложение II. СФ инварианты для ЦС ОМС	519
Приложение III. g-тензоры для 2-х подрешеточной ЦС ОМС ...	520
Приложение IV. Пьезомагнитные коэффициенты	521
Приложение V. Магнитоэлектрические коэффициенты (ЦАС $I^- \equiv \bar{I}(-)$)	523
Приложение VI. Магнитные вклады в ϵ_{ij} или ρ_{ij}	524
Соотношения между единицами гауссовой (СГС) системы и СИ	527
 Указатель соединений	 528
 Список литературы	 530