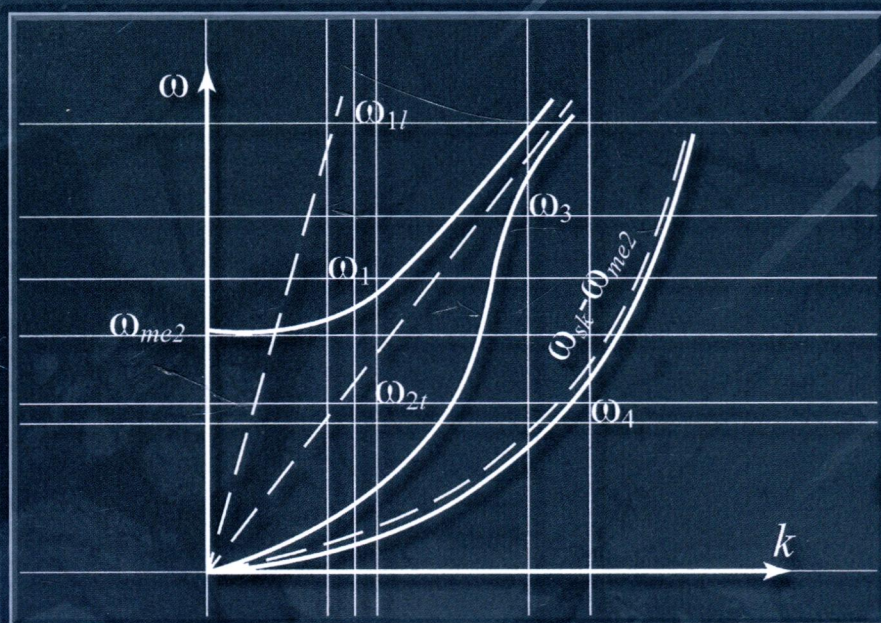


В.Г. Шавров
В.Д. Бучельников
И.В. Бычков

СВЯЗАННЫЕ ВОЛНЫ В МАГНЕТИКАХ



**В.Г. Шавров
В.Д. Бучельников
И.В. Бычков**

СВЯЗАННЫЕ ВОЛНЫ В МАГНЕТИКАХ



**МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2019**

УДК 537.6
ББК 22.33
Ш 14

Шавров В. Г., Бучельников В. Д., Бычков И. В. **Связанные волны в магнетиках.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. — 480 с. — ISBN 978-5-9221-1859-0.

Монография посвящена исследованию взаимодействия спиновых, упругих и электромагнитных волн в магнитных материалах с различным магнитным упорядочением. Рассматривается магнитоакустика ферро-, антиферро- и геликоидальных магнетиков. Анализируются дисперсионные соотношения связанных волн с учетом взаимодействия спиновой и упругой подсистем и электромагнитного поля в области ориентационных фазовых переходов. Исследуются новый тип поверхностных магнитоупругих волн, нелинейные магнитоупругие волны, термодинамика и кинетика магнетиков при магнитных фазовых переходах. Рассматриваются процессы электромагнитно-акустического преобразования в ферро-, антиферро- и спиральных магнетиках.

Для специалистов в области магнитных явлений, спектроскопии твердого тела, а также для аспирантов и студентов старших курсов физических факультетов.

ISBN 978-5-9221-1859-0

© ФИЗМАТЛИТ, 2019

© В. Г. Шавров, В. Д. Бучельников,
И. В. Бычков, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	9
Глава 1. Магнитоакустика одноосных и двуосных кристаллов	30
1.1. Легкоплоскостные ферромагнетики	31
1.1.1. Энергия. Основное состояние и его устойчивость	31
1.1.2. Магнитоупругая щель и мягкие магнитоакустические моды	34
1.1.3. Магнитная восприимчивость и феноменологический учет затухания	39
1.1.4. Редкоземельные ферромагнетики	44
1.2. Легкоплоскостные антиферромагнетики	45
1.2.1. Основное состояние. Фазовые переходы по упругому напряжению и полю	46
1.2.2. Антиферромагнитный резонанс. Магнитоупругая щель	48
1.2.3. Мягкая магнитоакустическая мода	50
1.2.4. Спин-спиновый резонанс в упругонапряженных антиферромагнетиках вблизи перехода «спин-флоп»	53
1.2.5. Обменное усилие магнитоупругой связи	57
1.2.6. Щель в спин-волновом спектре, обусловленная магнитоэлектрическим эффектом. Влияние электрического поля на частоту АФМР в магнитоэлектриках	59
1.3. Двуосные магнетики-ортоферриты. Ориентационные переходы по температуре	62
Глава 2. Магнитоупругие свойства кубических кристаллов	70
2.1. Ориентационные фазовые переходы в кубических магнетиках при внешних упругих напряжениях.	70
2.1.1. Ориентационные фазовые переходы при напряжениях вдоль осей типа $\{100\}$	70
2.1.2. Ориентационные фазовые переходы при напряжениях вдоль осей типа $\{110\}$ и напряжениях сдвига	75
2.1.3. Аномально широкая доменная граница в кубических ферромагнетиках и перестройка доменной структуры при упругом напряжении	79
2.2. Магнитоакустические волны в кубических магнетиках.	84
2.2.1. Магнитоакустические волны в ненапряженном кристалле	84
2.2.2. Магнитоакустические волны при упругом напряжении вдоль оси $[001]$	96
2.2.3. Магнитоакустические волны при упругом напряжении вдоль оси $[110]$ и напряжении сдвига	104
2.3. Магнитоупругая щель в кубических антиферромагнетиках	109

Глава 3. Связанные магнитоупругие и электромагнитные волны в кубических ферромагнетиках в области ориентационных фазовых переходов	114
3.1. Энергия и основное состояние ферромагнетика	115
3.2. Спектр взаимодействующих колебаний ферромагнетика	116
3.3. Ферромагнитный диэлектрик	118
3.4. Ферромагнитный металл в слабом магнитном поле	120
3.5. Ферромагнитный металл в сильном магнитном поле	123
3.6. Вращение плоскости поляризации звуковых и электромагнитных волн в ферромагнитном диэлектрике	127
3.7. Особенности связанных электромагнитных и магнитоупругих волн в ограниченных средах	128
3.8. Связанные магнитоупругие и электромагнитные волны в гексагональных магнитных металлах	128
3.9. Особенности излучения Вавилова–Черенкова в анизотропном ферромагнитном диэлектрике в области ориентационного фазового перехода	132
Глава 4. Отражение электромагнитных волн от поверхности ферромагнитного диэлектрика	139
4.1. Основные уравнения	140
4.2. Отражение электромагнитных волн от поверхности полубесконечного ферромагнитного диэлектрика	142
4.2.1. Частотная зависимость КО ЭМВ	144
4.2.2. Полевая зависимость КО ЭМВ	147
4.3. Отражение электромагнитных волн от поверхности пластины ферромагнитного диэлектрика	149
4.3.1. Частотная зависимость отражения	157
4.3.2. Полевые зависимости отражения	165
4.4. Отражение электромагнитных волн от структуры ферромагнитный диэлектрик–металл	171
4.4.1. Спектры связанных колебаний и граничные условия	171
4.4.2. Частотная зависимость отражения	174
4.4.3. Полевые зависимости отражения	177
Глава 5. Взаимодействие колебаний в редкоземельных ортоферритах	181
5.1. Спектр колебаний в ортоферритах с крамерсовскими редкоземельными ионами	183
5.1.1. Энергия ортоферрита	183
5.1.2. Основное состояние	184
5.1.3. Уравнения движения	186
5.1.4. Дисперсионные уравнения	187
5.1.5. Обсуждение результатов и сравнение с экспериментом	189

5.2. Спектр связанных колебаний в ортоферритах с некрамерсовскими редкоземельными ионами	198
5.2.1. Основное состояние	198
5.2.2. Дисперсионные уравнения	199
5.2.3. Обсуждение результатов и сравнение с экспериментом	202
5.3. Влияние продольной восприимчивости на спектр связанных колебаний при индуцированных ОФП	208
Глава 6. Затухание магнитоупругих волн в области ориентационных фазовых переходов	212
6.1. Взаимодействие магнитоупругих волн в ФЛП и АФЛП	213
6.2. Затухание спиновых волн	219
6.2.1. Коэффициент затухания квазимагнонов	219
6.2.2. Сравнение с экспериментом	223
6.2.3. Средние коэффициенты затухания квазимагнонов	224
6.3. Затухание ультразвука	226
6.3.1. Затухание поперечных ультразвуковых волн в области $\Omega\tau \gg 1$	226
6.3.2. Затухание продольного ультразвука при $\Omega\tau \gg 1$	230
6.3.3. Особенности затухания ультразвука при $\Omega\tau \ll 1$	231
6.3.4. Учет дипольного взаимодействия	232
6.3.5. Сравнение с экспериментом	232
6.3.6. Средние коэффициенты затухания квазифононов	233
6.4. Заключительные замечания	235
Глава 7. Новый тип сдвиговых поверхностных магнитоакустических волн в пьезомагнетиках	238
7.1. Поверхностные волны в кристаллах. Постановка задачи	238
7.2. Сдвиговые поверхностные магнитоакустические волны в гексагональных пьезомагнетиках	242
7.3. Сдвиговые поверхностные магнитоакустические волны в тетрагональных пьезомагнетиках	247
7.4. Сдвиговые поверхностные магнитоакустические волны вблизи ориентационных фазовых переходов	248
Глава 8. Нелинейные магнитоупругие явления	255
8.1. Неоднородное состояние магнетика в окрестности ОФП	256
8.2. Магнитная сверхструктура, индуцированная звуковой волной	260
8.3. Генерация третьей гармоники в магнетиках в области спиновой переориентации	264
8.4. Уединенные магнитоупругие волны в ортоферритах (качественная теория)	267
8.5. Точные решения для уединенных магнитоупругих волн в легкоплоскостных магнетиках	274

8.6. Типы нелинейных магнитоупругих волн в легкоплоскостных магнетиках	279
8.6.1. Основные уравнения	279
8.6.2. Типы нелинейных магнитоупругих волн	281
8.6.3. Влияние диссипации	287
Глава 9. Термодинамика магнетиков вблизи ориентационных фазовых переходов. Кинетические явления	290
9.1. Свободная энергия, фононная энтропия и теплоемкость.	290
9.2. Магнитокалорический эффект	294
9.3. Магнитный момент и статическая восприимчивость.	295
9.4. Волны второго звука в магнетиках	297
9.4.1. Кинетические уравнения	298
9.4.2. Второй магнитный звук в легкоплоскостных антиферромагнетиках	300
9.4.3. Второй магнитный звук в легкоосных антиферромагнетиках	304
9.4.4. Второй звук в окрестности спиновой переориентации	307
9.4.5. Область существования второго звука	311
9.5. Процессы теплопроводности вблизи ориентационных переходов	312
Глава 10. Связанные магнитоупругие и электромагнитные колебания в геликоидальных магнетиках	323
10.1. Магнитоупругие волны в геликоидальных магнетиках в ферромагнитной фазе	324
10.2. Магнитоупругие волны в геликоидальных магнетиках в спиральной фазе.	328
10.2.1. Основное состояние геликоидального магнетика в спиральной фазе	329
10.2.2. Дисперсионное уравнение магнитоупругих колебаний в спиральной фазе	331
10.3. Связанные спиновые и упругие волны в одноосных кристаллах со спиральной магнитной структурой во внешнем магнитном поле вдоль оси симметрии.	334
10.3.1. Основное состояние	334
10.3.2. Спектр связанных магнитоупругих волн	336
10.3.3. Фазовый переход ферромагнитная спираль–ферромагнетик	339
10.3.4. Фазовый переход ферромагнитная спираль – простая спираль	341
10.4. Связанные магнитоупругие и электромагнитные волны в кристаллах со спиральной магнитной структурой.	345
10.4.1. Спектр связанных волн в кристаллах со структурой типа простая спираль	347
10.4.2. Обсуждение результатов	349

Глава 11. Электромагнитное возбуждение ультразвука в магнетиках	350
11.1. Постановка задачи	351
11.1.1. Система уравнений взаимодействующих электромагнитных, спиновых и упругих волн в магнетиках	351
11.1.2. Граничные условия	353
11.1.3. Дисперсионное уравнение и спектры связанных колебаний	353
11.1.4. Возбуждение упругих мод и основные приближения	354
11.2. Электромагнитное возбуждение ультразвука в изотропных магнетиках	355
11.2.1. Индукционное взаимодействие	356
11.2.2. Магнитоупругое взаимодействие	357
11.2.3. Сопоставление эффективностей индукционного и магнитоупругого механизмов	358
11.2.4. Экспериментальные методы исследования	359
11.3. Генерация продольного ультразвука в ферромагнетике за счет смещения доменных границ	363
11.4. Электромагнитное возбуждение ультразвука в анизотропных ферромагнетиках	364
11.4.1. Генерация продольного ультразвука в магнетиках за счет процессов вращения (спин-переориентационные переходы)	365
11.4.2. Экспериментальные исследования ЭМАП в монокристаллических ферромагнетиках	368
11.5. Резонансная генерация поперечного ультразвука в однодоменных ферромагнетиках	384
11.5.1. Генерация поперечного ультразвука в нормальном магнитном поле вдоль гексагональной оси	385
11.5.2. Генерация поперечного звука в нормальном магнитном поле в плоскости базиса	389
11.6. Электромагнитное возбуждение поперечного звука в ферромагнитных металлах за счет эффекта Холла	393
11.7. Особенности магнитоупругого механизма ЭМАП в антиферромагнетиках	395
11.8. О возможности ЭМАП в ферродиелектриках	399
11.9. ЭМАП в конечном образце	400
Глава 12. Электромагнитное возбуждение звука в кристаллах с модулированной магнитной структурой	404
12.1. Генерация звука в монокристалле диспрозия	406
12.1.1. Энергия, основное состояние и система уравнений взаимодействующих электромагнитных, спиновых и упругих волн	406
12.1.2. Дисперсионные уравнения	411

12.1.3. Амплитуды ультразвуковых волн и коэффициенты ЭМАП	412
12.1.4. Обсуждение результатов и сравнение с экспериментом . .	413
12.2. Электромагнитно-акустическое преобразование в монокристалле эрбия	415
12.2.1. Основное состояние	415
12.2.2. Генерация звука в фазе LSW	416
12.2.3. Генерация звука в фазе FS	419
12.2.4. Обсуждение результатов	420
Глава 13. Связанные колебания в двухподрешеточных антиферромагнетиках с анизотропным g-фактором	424
13.1. Плотность свободной энергии и основное состояние антиферромагнетика	425
13.2. Система уравнений взаимодействующих колебаний в АФМ . . .	427
13.3. Колебания, связанные с квазиферромагнитной модой	428
13.4. Колебания, связанные с квазиантиферромагнитной модой	430
13.5. Обсуждение результатов	431
Приложения	433
Литература	441