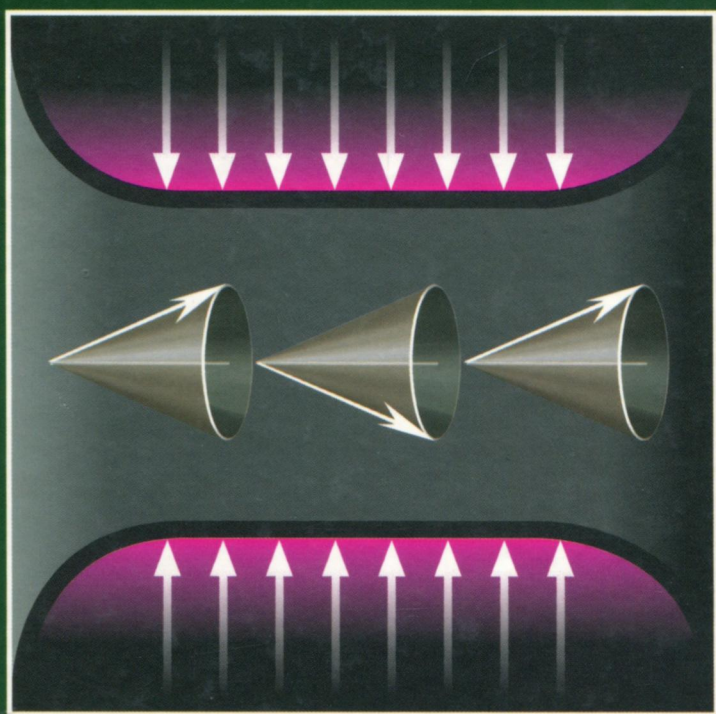


В.Г. Шавров
В.И. Щеглов

СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ В СРЕДАХ С ОБМЕНОМ И ДИССИПАЦИЕЙ



В.Г. Шавров
В.И. Щеглов

СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ В СРЕДАХ С ОБМЕНОМ И ДИССИПАЦИЕЙ

Рекомендовано

*Федеральным учебно-методическим объединением в системе
высшего образования по укрупненной группе специальностей
и направлений подготовки 03.00.00 «Физика и астрономия»
в качестве учебного пособия для обучающихся по основным
образовательным программам высшего образования
по направлению подготовки «Физика»
уровней бакалавриата (03.03.02) и магистратуры (03.04.02)
специалитета по специальности
«Фундаментальная и прикладная физика» (03.05.02)*



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2022

УДК 537.874; 537.624

ББК 22.33

Ш 14

Шавров В.Г., Щеглов В.И. **Спиновые волны в средах с обменом и диссипацией.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2022. — 496 с. — ISBN 978-5-9221-1940-5.

Монография посвящена рассмотрению дисперсионных свойств спиновых волн в средах, обладающих неоднородным обменным взаимодействием, а также умеренной и малой диссипацией, каковыми в первую очередь являются пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ). Рассмотрены свойства гиротропной волны в бигиротропной среде. Отмечено влияние диссипации на магнито-статические волнам нанометровой длины, для которых проявления динамического размагничивания и неоднородного обменного взаимодействия являются решающими факторами, формирующими закон дисперсии. Обсуждены перспективы применения нанометровых обменных волн в устройствах обработки информации терагерцевого диапазона частот.

Монография предназначена специалистам, работающим в области физики магнитных явлений, инженерам и конструкторам СВЧ-аппаратуры, а также студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

ISBN 978-5-9221-1940-5

© ФИЗМАТЛИТ, 2022

© В. Г. Шавров, В. И. Щеглов, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список наиболее часто используемых сокращений	11
Введение	12
Глава 1. Общие волновые процессы в магнитных средах (обзор литературы)	16
1.1. Первое упоминание о спиновых волнах — тепловые магноны	16
1.2. Ферромагнитный резонанс и невзаимные устройства	17
1.3. Стабильные и нестабильные нелинейные процессы	17
1.4. Обменные волны по толщине пленки	18
1.5. Появление железоиттриевого граната	20
1.6. Магнитостатические резонансные типы	20
1.7. Магнитостатические волны дипольного характера	22
1.8. Магнитоупругие волны	23
1.9. Магнитооптические эффекты	24
1.10. Линии задержки с неоднородным полем	25
1.11. Различие фазовой и групповой скоростей	26
1.12. Магнитостатические волны в неоднородном поле	26
1.13. Возбуждение волн импульсами света	28
1.14. Современные работы по магнитостатическим волнам	30
1.15. Заключительное замечание	31
Выводы по главе 1	31
Глава 2. Математический аппарат, используемый при расчете дисперсионных свойств волн в магнитной среде	36
2.1. Основные виды электромагнитных волн в магнитной среде	36
2.2. Роль магнитной проницаемости в распространении волн в магнитной среде	37
2.2.1. Тензор магнитной проницаемости	38
2.2.2. Получение тензоров магнитной восприимчивости и проницаемости путем линеаризации уравнения движения	40
2.2.3. Общая схема получения тензора магнитной проницаемости	44
2.3. Уравнение Уокера	45
2.4. Граничные условия	49
2.5. Дисперсионное соотношение для магнитной пластины со свободными поверхностями (задача Дэймона–Эшбаха)	51
2.5.1. Полная формулировка задачи	51
2.5.2. Решение уравнений без граничных условий	52

2.5.3. Вывод дисперсионного соотношения	58
2.5.4. Дисперсионное соотношение в полярной системе координат	61
2.6. Частотные области существования объемных и поверхностных волн	62
2.7. Замечание о дальнейшем рассмотрении	65
2.8. Уравнение второго порядка со смешанной производной	65
2.8.1. Частный случай решения уравнения со смешанной производной	67
2.8.2. Классическое решение уравнения со смешанной производной	68
2.9. Методы решения уравнений высоких степеней	75
2.9.1. Уравнения третьей степени	76
2.9.2. Уравнения четвертой степени	85
Выводы по главе 2	91
Глава 3. Дисперсионные свойства гиромагнитной волны в пластине феррита с диссипацией	94
3.1. Общий характер гиромагнитной волны в магнитной среде	94
3.2. Уравнения электродинамики для безграничной бигиротропной среды.	95
3.3. Гиромагнитная и гироэлектрическая волны	100
3.4. Поля гиромагнитной волны	103
3.5. Гиромагнитная волна в ферритовой пластине	104
3.5.1. Общая геометрия задачи	104
3.5.2. Поля гиромагнитной волны в принятой геометрии	105
3.5.3. Граничные условия	107
3.5.4. Дисперсионное соотношение в общем виде	107
3.5.5. Дисперсионное соотношение, выраженное через волновое число вдоль направления распространения волны	110
3.6. Дисперсия гиромагнитной волны в пластине феррита без диссипации	113
3.6.1. Решение дисперсионного соотношения методом поиска нуля	114
3.6.2. Дисперсия в большом интервале волновых чисел	115
3.6.3. Дисперсия при малых значениях волнового числа	117
3.6.4. Влияние диэлектрической проницаемости среды	121
3.7. Общий характер дисперсии гиромагнитной волны в среде с диссипацией	123
3.8. Дисперсионное соотношение для гиромагнитной волны в среде с диссипацией	124
3.8.1. Получение компонент параметров A, B, C, D	126
3.8.2. Преобразование квадратного корня	126
3.8.3. Преобразование левой части дисперсионного соотношения	128
3.8.4. Преобразование правой части дисперсионного соотношения	129

3.8.5. Система уравнений для компонент волнового числа	130
3.8.6. Структура полученной системы уравнений	131
3.8.7. Тензор магнитной проницаемости	132
3.9. Универсальный характер полученного решения и его упрощенный вариант	133
3.10. Общая схема решения дисперсионного соотношения	134
3.11. Дисперсия для действительной части волнового числа	135
3.11.1. Дисперсия в отсутствие диссипации	135
3.11.2. Влияние диссипации среды	137
3.11.3. Дисперсионные кривые	138
3.12. Влияние диэлектрической проницаемости на дисперсию гиромангнитной волны	140
3.13. Дисперсия гиромангнитной волны при больших волновых числах	141
Выводы по главе 3	144
Глава 4. Дисперсионные свойства магнитоэлектрических волн в каталитически намагниченной пластине феррита с диссипацией	149
4.1. Общий характер дисперсии в среде с диссипацией	149
4.1.1. Общая геометрия задачи	150
4.1.2. Дисперсионное соотношение в отсутствие диссипации	150
4.1.3. Магнитная восприимчивость в среде с затуханием	151
4.1.4. Упрощенное преобразование параметра ϑ в случае комплексного волнового числа	152
4.1.5. Общий вид волновой функции и дисперсионного соотношения в случае комплексного волнового числа	155
4.2. Дисперсионное соотношение для действительной части волнового числа	155
4.2.1. Преобразование левой части дисперсионного соотношения	156
4.2.2. Преобразование правой части дисперсионного соотношения	157
4.2.3. Полное дисперсионное соотношение	158
4.2.4. Оценка предельных значений частот при типичных параметрах эксперимента	161
4.2.5. Предельный переход к соотношению Дэймона–Эшбаха	163
4.3. Дисперсионное соотношение для мнимой части волнового числа	164
4.3.1. Выделение из полного дисперсионного соотношения части, соответствующей мнимой компоненте волнового числа	164
4.3.2. Дисперсионное соотношение для мнимой части волнового числа в явном виде	166
4.4. Дисперсионные кривые при параметрах эксперимента	167
4.4.1. Дисперсионные кривые для длины волны при параметрах эксперимента	167
4.4.2. Дисперсионные кривые для диссипации при параметрах эксперимента	169
4.4.3. Зависимости амплитуды ПМСВ от частоты	171

4.5. Распространение волны перпендикулярно направлению поля . . .	172
4.5.1. Основные алгоритмы расчета	173
4.5.2. Схема определения времени установления	175
4.6. Роль диссипации в формировании дисперсии действительной части волнового числа для прямых ПМСВ	176
4.6.1. Групповая скорость волны	179
4.6.2. Механизм ограничения дисперсионных кривых для прямых ПМСВ	180
4.7. Роль диссипации в формировании дисперсии волнового числа для обратных ПМСВ	183
4.7.1. Механизм ограничения дисперсионных кривых для обратных ПМСВ	185
4.8. Области существования прямых и обратных волн по параметру затухания	187
4.9. Роль диссипации в формировании дисперсии мнимой части волнового числа	188
4.10. Аналогия со случаем электромагнитных волн	190
4.11. Распространение волны в произвольном направлении относительно поля	193
4.11.1. Волновое число и дисперсионные соотношения	193
4.12. Дисперсия прямых ПМСВ при изменении действительной части волнового числа	194
4.12.1. Малое затухание	194
4.12.2. Большое затухание	196
4.13. Дисперсия обратных ПМСВ при изменении действительной части волнового числа	199
4.13.1. Малое затухание	199
4.13.2. Большое затухание	201
4.14. Дисперсия ПМСВ при изменении мнимой части волнового числа	204
4.14.1. Малое затухание	204
4.14.2. Большое затухание	207
4.15. Возбуждение ПМСВ линейным преобразователем	209
4.16. Замечание о наблюдении прямых ПМСВ в эксперименте	210
4.17. Некоторые рекомендации для наблюдения диссипативных ПМСВ в эксперименте	211
Выводы по главе 4	212
Глава 5. Влияние поля размагничивания на дисперсию поверхностной волны Дэймона–Эшбаха	219
5.1. Обоснование необходимости рассмотрения влияния размагничивания на дисперсию магнитостатической волны	219
5.2. Общий характер влияния динамического размагничивания на распространение магнитостатической волны	220
5.3. Эффективные поля магнитостатической волны	221
5.3.1. Дипольное поле магнитостатической волны	222
5.3.2. Размагничивающее поле дипольной волны в тонкой пластине	224

5.3.3. Параметр размагничивания дипольной волны	226
5.3.4. Нормировка параметра размагничивания	227
5.3.5. Зависимость поля размагничивания от волнового числа	228
5.4. Тензор магнитной восприимчивости с учетом размагничивания	230
5.5. Уравнение Уокера с учетом размагничивания	234
5.5.1. Решение уравнения Уокера	235
5.5.2. Критическая частота волны	243
5.6. Полная формулировка задачи о распространении поверхностной волны	247
5.7. Решение в трех областях	248
5.8. Вывод дисперсионного соотношения из решения и граничных условий	252
5.8.1. Левая часть дисперсионного соотношения	255
5.8.2. Последовательность расчета левой части	256
5.8.3. Правая часть дисперсионного соотношения	256
5.8.4. Последовательность расчета правой части	261
5.9. Действительная и мнимая части дисперсионного соотношения	262
5.10. Дисперсия поверхностной волны с учетом размагничивания	263
5.10.1. Степень деформации дисперсионной кривой	266
5.11. Дисперсионная кривая при изменении параметра размагничивания	267
5.12. Структура распределения намагниченности внутри пластины	269
5.13. Динамический потенциал внутри пластины	272
5.14. Степень влияния поля размагничивания на дисперсию волн при различной толщине пластины	274
Выводы по главе 5	277
Глава 6. Влияние обменного взаимодействия и динамического размагничивания на дисперсию поверхностной волны Дэймона-Эшбаха	281
6.1. Обоснование необходимости рассмотрения влияния неоднородного обменного взаимодействия на дисперсию магнитостатической волны	281
6.2. Общий характер влияния обменного взаимодействия на распространение магнитостатической волны	283
6.3. Эффективные поля магнитостатической волны	283
6.4. Тензор восприимчивости с учетом размагничивания и обмена	285
6.4.1. Уравнения движения для компонент намагниченности	285
6.4.2. Линеаризация уравнений движения	286
6.4.3. Тензор динамической восприимчивости	287
6.5. Уравнение Уокера для обменных волн	290
6.5.1. Решение уравнения Уокера	292
6.5.2. Упрощение коэффициентов уравнения Уокера	296
6.6. Двойственный характер поперечного волнового числа	298
6.7. Действительная и мнимая части поперечного волнового числа в отсутствие обмена	300

6.8. Влияние размагничивания на поперечное волновое число	304
6.9. Уравнение для определения поперечного волнового числа при заданном продольном волновом числе с учетом обменного взаимодействия.	309
6.9.1. Алгоритмизация решения системы уравнений для компонент поперечного волнового числа	314
6.10. Соотношение между компонентами волнового числа в реальных условиях	315
6.11. Проявление двойственности поперечного волнового числа	316
6.12. Расчет компонент поперечного волнового числа по полной системе уравнений методом поиска нуля	317
6.12.1. Замечание о предпочтительном выборе мнимой компоненты поперечного волнового числа	321
6.12.2. Нули функции, определяющей компоненты поперечного волнового числа	322
6.12.3. Влияние обменного взаимодействия на компоненты поперечного волнового числа	324
6.13. Качественная интерпретация наблюдаемых явлений.	326
6.13.1. Роль динамического размагничивания	326
6.13.2. Роль обменного взаимодействия	331
6.13.3. Роль жесткости системы	333
6.14. Дисперсионное соотношение	335
6.14.1. Общая структура компонент тензора магнитной проницаемости	335
6.14.2. Общая постановка задачи о распространении поверхностной волны	335
6.14.3. Решение общей задачи методом разделения переменных	336
6.14.4. Вывод дисперсионного соотношения из решения и граничных условий	337
6.15. Общая структура компонент поперечного волнового числа	339
6.15.1. Компоненты поперечного волнового числа в отсутствие обмена	339
6.15.2. Компоненты поперечного волнового числа при наличии обменного взаимодействия	340
6.15.3. Последовательность расчета компонент поперечного волнового числа при наличии обмена	340
6.16. Общая схема получения закона дисперсии	341
6.17. Получение компонент тензора проницаемости и промежуточных параметров	342
6.17.1. Компоненты тензора проницаемости при $k_x \rightarrow k_x^{(+)}$	342
6.17.2. Последовательность расчета компонент тензора проницаемости при $k_x \rightarrow k_x^{(+)}$	345
6.17.3. Компоненты тензора проницаемости при $k_x \rightarrow k_x^{(-)}$	346
6.17.4. Последовательность расчета компонент тензора проницаемости при $k_x \rightarrow k_x^{(-)}$	349

6.17.5. Промежуточные параметры $\varepsilon^{(+)}$ и $\varepsilon^{(-)}$	350
6.17.6. Последовательность расчета промежуточных параметров $\varepsilon^{(+)}$ и $\varepsilon^{(-)}$	351
6.18. Схема структуры дисперсионного соотношения	351
6.18.1. Левая часть дисперсионного соотношения	352
6.18.2. Последовательность расчета левой части	353
6.18.3. Правая часть дисперсионного соотношения	354
6.18.4. Последовательность расчета правой части	355
6.19. Действительная и мнимая части дисперсионного соотношения	356
6.19.1. Последовательность расчета действительной и мнимой частей дисперсионного соотношения	357
6.20. Общая схема получения закона дисперсии	358
6.21. Примеры расчета закона дисперсии в реальных ситуациях	359
6.21.1. Классическая обменная волна в безграничном пространстве и в тонкой пластине	359
6.21.2. Дисперсия с размагничиванием и обменом	361
6.21.3. Зависимость дисперсии от толщины пластины	363
6.21.4. Зависимость дисперсии от величины обменного взаимодействия	365
6.22. Замечание об ограничении диапазона по волновому числу	367
6.23. Особые случаи дисперсии	367
6.23.1. Дисперсионное соотношение	368
6.23.2. Дисперсия при больших волновых числах	370
6.23.3. Дополнительное решение дисперсионного соотношения	375
Выводы по главе 6	379
Глава 7. Влияние обмена и размагничивания на ограничение волнового числа в задаче Дэймона–Эшбаха с диссипацией.	389
7.1. Общие замечания о постановке задачи об ограничении волнового числа	389
7.2. Дисперсионное соотношение	393
7.3. Время собственного пробега волны	394
7.3.1. Влияние дискретности развертки по волновому числу на время собственного пробега волны	397
7.4. Время релаксации	399
7.4.1. Определение времени релаксации для колебаний намагниченности	400
7.4.2. Задача о возбуждении однородной прецессии намагниченности	401
7.4.3. Схема определения времени релаксации	402
7.4.4. Времена релаксации магнитных колебаний при различном затухании	403
7.5. Сравнение времен релаксации и собственного пробега волны	406
7.6. Времена собственного пробега и релаксации в диапазоне частот	408
7.6.1. Время собственного пробега	408
7.6.2. Время релаксации	410

7.7. Время релаксации в широком диапазоне частот	413
7.8. Влияние толщины пластины на ограничение волнового числа . .	415
7.9. Некоторые практические рекомендации	419
Выводы по главе 7	420
Глава 8. Спин-волновой резонанс в тонких магнитных пленках в отсутствие поверхностной анизотропии	424
8.1. Краткий обзор основных исследований спин-волнового резонанса	425
8.2. Общая геометрия задачи	426
8.3. Модель поверхностной анизотропии	427
8.3.1. Тензор магнитной восприимчивости	431
8.3.2. Интеграл перекрытия в модели поверхностной анизотропии	432
8.3.3. Развитие модели поверхностной анизотропии	435
8.3.4. Оценка величины поверхностной анизотропии	436
8.3.5. Обсуждение модели поверхностной анизотропии	438
8.4. Модель жесткой струны	440
8.4.1. Сопrotивление изгибу жесткой струны	441
8.4.2. Волновое уравнение с третьей производной	444
8.4.3. Колебания смещения в жесткой струне	447
8.4.4. Спектр резонансных частот колебаний жесткой струны . .	453
8.4.5. Замечание о роли интеграла перекрытия в задаче о струне	456
8.5. Модель спиновой цепочки	457
8.5.1. Эффективные поля, действующие на цепочку спинов в магнитной пленке	457
8.5.2. Механизм выпрямления спиновой цепочки	459
8.5.3. Прецессия намагниченности спиновой цепочки	460
8.5.4. Решение с учетом граничных условий	461
8.5.5. Интеграл перекрытия	463
8.6. Некоторые дополнительные замечания	464
Выводы по главе 8	466
Глава 9. Вопросы дальнейших исследований и применения обменных волн	469
9.1. Некоторые вопросы, требующие дальнейшей разработки.	469
9.2. Возможные применения обменных волн	471
Выводы по главе 9	473
Литература	475