

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	13
Список наиболее часто используемых сокращений	22
Глава 1. Общие свойства волновых процессов и ориентационных переходов в магнитной среде (обзор литературы)	23
1.1. Волновые процессы и общая динамика намагниченности	24
1.1.1. Общая характеристика волновых процессов	24
1.1.2. Основное уравнение динамики намагниченности	25
1.1.3. Динамическая магнитная восприимчивость	26
1.1.4. Замечание о нелинейной динамической восприимчивости	26
1.1.5. Некоторые особенности ферромагнитного резонанса в нелинейном режиме	28
1.2. Волны в магнитных средах	29
1.2.1. Магнитостатические волны в ферритах	30
1.2.2. Волны в магнетиках в рамках общей электродинамики	31
1.2.3. Магнитостатические волны в неоднородных полях	31
1.2.4. Излучение электромагнитных волн из феррита	31
1.2.5. Магнитостатические волны в диссипативных средах	32
1.3. Ориентационные переходы	33
1.3.1. Общие свойства ориентационных переходов	33
1.3.2. Доменная структура при ориентационных переходах	33
1.3.3. Ферромагнитный резонанс в анизотропной среде	34
1.3.4. Частотная щель в спектре ферромагнитного резонанса	35
Выводы по главе 1	36
Глава 2. Общие свойства доменных границ и доменной структуры в магнетиках (обзор литературы)	38
2.1. Общая картина образования доменной структуры	38
2.1.1. Соотношение доменной структуры с ориентационным переходом	40
2.1.2. Историческое развитие науки о доменах	40
2.1.3. Цилиндрические магнитные домены	42
2.2. Динамические свойства доменных границ и отдельных доменов	42
2.2.1. Влияние структуры доменных границ на их динамические свойства	43
2.2.2. Предельные скорости движения доменных границ	43
2.2.3. Эффект баллистического последействия	44

2.2.4. Динамика доменных границ при большой одноосной анизотропии	44
2.2.5. Эффект «кусочного» перемагничивания	45
2.3. Динамика коллективов доменов	46
2.3.1. Динамическая самоорганизация доменных решеток	46
2.3.2. Динамические доменные структуры	47
2.4. Колебательные и волновые процессы в магнетике с доменами	47
2.4.1. Низкочастотные колебания	48
2.4.2. Резонанс доменных границ	48
2.4.3. Ферромагнитный резонанс в доменной структуре	49
2.4.4. Магнитостатические волны в доменной структуре	49
Выводы по главе 2	50
Глава 3. Общие свойства волновых возмущений солитонного типа (обзор литературы)	52
3.1. Доменная граница как область локализованного ориентационного перехода	52
3.1.1. Аналогия между доменной границей и солитоном	53
3.2. Уравнения, имеющие точные солитонные решения	53
3.2.1. Уравнение Кортевега–де Фриза	54
3.2.2. Нелинейное уравнение Шредингера	55
3.2.3. Уравнение синус-Гордона	55
3.2.4. Уравнение Клейна–Гордона	56
3.2.5. Графическое представление решений основных солитонных уравнений	57
3.3. Некоторые общие замечания, касающиеся решения солитонных уравнений	59
3.3.1. Многообразие возможных видов солитонных уравнений	59
3.3.2. Метод обратной задачи рассеяния	60
3.3.3. Особенности решения уравнения синус-Гордона	60
Выводы по главе 3	61
Глава 4. Общий математический аппарат, используемый при расчете волновых процессов	64
4.1. Решение дифференциальных уравнений волнового типа	64
4.1.1. Основные виды уравнений волнового типа	64
4.1.2. Классическое волновое уравнение без затухания	65
4.1.3. Волновое уравнение с затуханием по времени	67
4.1.4. Волновое уравнение с затуханием по координате	69
4.1.5. Сравнительные особенности затухания по времени и по координате	71
4.1.6. Волновое уравнение без затухания со смешанной производной	73

4.1.7. Классическое решение уравнения со смешанной производной	75
4.1.8. Некоторые дополнительные замечания о смешанной производной	83
4.2. Волновые уравнения электродинамики для проводящей среды	84
4.2.1. Введение электрической и магнитной проводимости	84
4.2.2. Общая схема получения волновых уравнений для среды с проводимостью	85
4.2.3. Волновые уравнения при гармонической зависимости от времени	86
4.3. Некоторые полезные приемы математических вычислений.	88
4.3.1. Комплексная амплитуда	88
4.3.2. Представление комплексного числа в виде произведения действительного числа на экспоненту с мнимым показателем	89
4.3.3. Сведение волнового уравнения второго порядка к двум уравнениям первого порядка	92
4.3.4. Представление уравнения гармонических колебаний второго порядка в виде уравнения первого порядка	92
4.3.5. Гиперболический арктангенс комплексного числа	94
Выводы по главе 4	98
Глава 5. Математический аппарат, используемый при расчете динамики намагниченности	100
5.1. Уравнение движения для намагниченности.	100
5.1.1. Тензор магнитной восприимчивости	102
5.1.2. Тензор магнитной проницаемости	103
5.2. Плотности энергии различных видов в декартовых и сферических координатах.	104
5.2.1. Плотность энергии взаимодействия намагниченности с внешним полем	104
5.2.2. Плотность энергии поля размагничивания	105
5.2.3. Плотность энергии одноосной анизотропии второго и четвертого порядков	106
5.2.4. Плотность энергии неоднородного обменного взаимодействия	108
5.3. Общая характеристика магнитостатических волн	111
5.3.1. Дипольные и обменные магнитостатические волны	111
Выводы по главе 5	112
Глава 6. Математический аппарат, используемый при расчете свойств дипольных магнитостатических волн.	113
6.1. Решение задачи Дэймона–Эшбаха через потенциал.	113
6.1.1. Общая геометрия задачи	113
6.1.2. Приближение магнитостатики	115
6.1.3. Граничные условия для поля и индукции	115

6.1.4. Введение потенциала	115
6.1.5. Полная задача для потенциала во всех трех средах	116
6.1.6. Решение уравнений без граничных условий	117
6.1.7. Дисперсионное соотношение в декартовой системе координат	118
6.2. Решение задачи Дэймона–Эшбаха через поля.	119
6.2.1. Уравнение Уокера для переменного поля	120
6.2.2. Решение уравнения Уокера для поля	122
6.2.3. Полный вид решения в трех областях	124
6.2.4. Соотношения между компонентами полей	127
6.2.5. Компоненты полей в заданной геометрии	129
6.2.6. Граничные условия	131
6.2.7. Дисперсионное соотношение в декартовой системе координат	132
6.2.8. Переход к полярной системе координат	134
6.3. Основные свойства дисперсии поверхностных магнитостатических волн	134
6.3.1. Угол отсечки для ПМСВ	135
6.3.2. Графическая иллюстрация дисперсии ПМСВ	135
6.3.3. Вектор групповой скорости	139
Выводы по главе 6	142
Глава 7. Математический аппарат, используемый при расчете свойств обменных магнитостатических волн	144
7.1. Дисперсионные свойства обменных магнитостатических волн	144
7.1.1. Дипольное поле обменной магнитостатической волны	145
7.1.2. Обменное поле обменной магнитостатической волны	147
7.1.3. Решение уравнения движения вектора намагниченности для обменной магнитостатической волны	151
7.1.4. Частные случаи закона дисперсии	154
7.1.5. Графическая иллюстрация дисперсии обменных волн	155
7.2. Вынужденная обменная магнитостатическая волна	155
7.2.1. Уравнение движения и эффективные поля	156
7.2.2. Эффективная динамическая восприимчивость	159
7.3. Замечания о возможности возбуждения обменных волн в эксперименте	160
7.3.1. Обменные волны, распространяющиеся по толщине пленки	161
7.3.2. Обменные волны, распространяющиеся в плоскости пленки	161
7.3.3. Общая задача о возбуждении волны волной	163
Выводы по главе 7	165
Глава 8. Некоторые вопросы распространения волн в неоднородной среде.	167
8.1. Метод Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна (ВКБ)	167
8.1.1. Метод ВКБ. Первое приближение	168
8.1.2. Метод ВКБ. Второе приближение	169

8.1.3. Оценка точности метода ВКБ на реальном примере уравнения второго порядка	172
8.1.4. Получение коэффициентов a и b по двум точкам	173
8.1.5. Решение при различных входных параметрах	174
8.2. Уравнение Рэлея для волны в неоднородной среде	177
8.2.1. Аналитическое решение уравнения Рэлея	177
8.2.2. Графическая иллюстрация решения уравнения Рэлея	179
8.3. Магнитоэлектрические волны в неоднородном поле	182
8.3.1. Метод Гамильтона–Аулда для двух измерений	183
8.3.2. Метод Гамильтона–Аулда для трех измерений	184
Выводы по главе 8	185
Глава 9. Некоторые вопросы, касающиеся расчета ориентационных переходов	187
9.1. Общая идеология ориентационного перехода	187
9.1.1. Общее понятие ориентационного перехода	187
9.1.2. Пример простого ориентационного перехода	189
9.2. Условия ориентационного перехода	194
9.2.1. Требование минимизации энергии при ориентационном переходе	194
9.2.2. Аналитическое определение равновесного положения вектора намагниченности	195
9.3. Численные методы нахождения равновесного положения вектора намагниченности	196
9.3.1. Метод поиска нуля	198
9.3.2. Метод установления	199
9.3.3. Метод динамического установления	201
9.4. Аппарат матриц перехода	202
9.4.1. Общая схема преобразования	203
9.4.2. Преобразование вектора	204
9.4.3. Преобразование тензора	204
9.4.4. Преобразование тензоров первого вида	205
9.4.5. Преобразование тензоров второго вида	206
9.4.6. Структура матриц перехода	208
Выводы по главе 9	210
Глава 10. Динамическая магнитная восприимчивость при ориентационном переходе	213
10.1. Некоторые виды магнитной анизотропии	213
10.1.1. Магнитная кристаллографическая анизотропия	214
10.1.2. Анизотропия формы (размагничивания)	216
10.1.3. Анизотропия внешнего поля	217

10.2. Преобразование вектора намагниченности при повороте координат	218
10.2.1. Преобразование компонент вектора в декартовой системе координат	218
10.3. Свободный ферромагнитный резонанс при ориентационном переходе	219
10.3.1. Приложенное поле меньше поля анизотропии	219
10.3.2. Приложенное поле больше поля анизотропии	223
10.3.3. Произвольное значение приложенного поля	224
10.4. Вынужденный ферромагнитный резонанс при ориентационном переходе	226
10.4.1. Приложенное поле меньше поля анизотропии	227
10.4.2. Приложенное поле больше поля анизотропии	235
Выводы по главе 10	236
Глава 11. Математический аппарат, используемый при работе со статикой и динамикой доменных границ	239
11.1. Стационарное распределение намагниченности в доменной границе	239
11.1.1. Общая геометрия распределения намагниченности в доменной границе	240
11.1.2. Плотность энергии и уравнения стационарного состояния	241
11.1.3. Блоховская доменная граница	245
11.1.4. Неелевская доменная граница	247
11.1.5. Краткая сводка формул для обоих видов границ	248
11.1.6. Приведение уравнений для блоховской и неелевской границ к одинаковому виду	248
11.2. Уравнение движения вектора намагниченности в сферических координатах	249
11.2.1. Соотношение между декартовой и сферической системами координат	250
11.2.2. Полные уравнения движения в декартовой системе координат	250
11.2.3. Переход к сферической системе координат	251
11.2.4. Полные уравнения движения для полярной и азимутальной компонент вектора намагниченности	253
11.3. Приведение уравнения движения для намагниченности к солитонному виду	254
11.3.1. Плотность энергии в сферической системе координат	254
11.3.2. Уравнение движения доменной границы в предположении постоянства азимутального угла вектора намагниченности	255
11.3.3. Солитонный вид уравнения движения доменной границы	256
11.3.4. Геометрическая интерпретация профиля движущейся доменной границы	257
11.3.5. Приведение уравнения для движущейся границы к уравнению для стационарной границы	259

11.3.6. Математическая эквивалентность двух видов решения солитонного уравнения	261
11.3.7. Преобразование уравнения для движущейся границы в классическое уравнение синус-Гордона	262
11.4. Решение Уокера для скорости плоской доменной границы.	264
11.4.1. Общая геометрия задачи и влияние продвигающего поля	264
11.4.2. Плотность энергии движущейся границы	267
11.4.3. Уравнения движения вектора намагниченности с учетом его переориентации	267
11.4.4. Приведение уравнения движения границы к зависимости от переменной Даламбера	268
11.4.5. Критическое поле Уокера	270
11.4.6. Предельная скорость Уокера	271
11.5. Замечание об энергии доменной границы.	273
Выводы по главе 11	274
Глава 12. Экспериментальное исследование распространения магнитостатических волн в пленках с доменной структурой.	280
12.1. Техника эксперимента и методика измерений	281
12.1.1. Основная техника эксперимента	281
12.1.2. Методика измерений	289
12.2. Основные свойства пленок ЖИГ и доменных структур в них	290
12.2.1. Разделение пленок на два типа по характеру доменной структуры	290
12.2.2. Роль нормальной анизотропии	291
12.2.3. Экспериментальное исследование анизотропных свойств пленок	292
12.2.4. Доменная структура пленок	294
12.3. Распространение МСВ в пленках ЖИГ с доменами.	296
12.3.1. Распространение МСВ в пленках первого типа	296
12.3.2. Распространение МСВ в пленках второго типа	300
12.3.3. Основные факторы, определяющие природу наблюдаемых явлений	302
Выводы по главе 12	303
Глава 13. Ферромагнитный резонанс в пластине с доменами	305
13.1. Модель локальных эффективных полей	305
13.1.1. Общая геометрия задачи	306
13.1.2. Внутренние поля доменов в полной структуре	308
13.1.3. Поля размагничивания собственных граней	308
13.1.4. Поля воздействия соседних доменов друг на друга	309
13.1.5. Полная плотность энергии	312
13.2. Ориентация намагниченности в доменах	314
13.2.1. Ориентационные переходы в доменах	316
13.2.2. Плотность энергии в системе, связанной с намагниченностью	316
13.2.3. Эффективные поля	320

13.3. Уравнения движения и резонансные частоты	320
13.3.1. Уравнения движения для векторов намагниченности в доменах двух знаков	320
13.3.2. Резонансные частоты собственных колебаний	323
13.3.3. Условия дискретности и вырождения резонансных частот	326
13.4. Зависимости резонансных частот от параметров модели	327
13.4.1. Изменение внешнего поля	328
13.4.2. Влияние поля размагничивания торцов доменов	328
13.4.3. Влияние поля размагничивания боковых граней доменов	330
13.4.4. Влияние полей воздействия доменов друг на друга	331
13.4.5. Обсуждение полевых зависимостей и вырождения ветвей спектра	333
13.5. Сравнение с экспериментом	335
13.5.1. Поле анизотропии больше намагниченности	335
13.5.2. Поле анизотропии меньше намагниченности	336
13.5.3. Интерпретация полученных результатов на основе гипотезы об энергетической щели	337
13.5.4. Возможные механизмы формирования щели	338
Выводы по главе 13	340
Глава 14. Магнитостатические волны в условиях ориентационного перехода	345
14.1. Общая постановка задачи	345
14.1.1. Общая геометрия задачи	346
14.1.2. Геометрия задачи, соответствующая ориентационному переходу	347
14.1.3. Общее приближение магнитостатики	348
14.1.4. Уравнение Уокера с произвольным тензором восприимчивости	350
14.1.5. Уравнения движения и граничные условия	351
14.2. Задача для структуры из трех сред	353
14.2.1. Решение уравнений без граничных условий	354
14.2.2. Соотношение между волновыми числами	360
14.2.3. Потенциалы во всех областях	360
14.3. Дисперсионное соотношение	361
14.3.1. Дисперсионное соотношение в декартовой системе координат	361
14.3.2. Переход к полярной системе координат	363
14.4. Потенциалы, поля, намагниченность	367
14.4.1. Потенциалы	367
14.4.2. Поля	371
14.4.3. Намагниченность	372
14.5. Типы МСВ и структура их полей	372
14.5.1. Квазиобъемные и квазиповерхностные волны	372
14.5.2. Особенности решения в другой полуплоскости	375
14.5.3. Замечание о невзаимном характере волн	376

14.6. Частотные диапазоны и интервалы полей существования различных типов МСВ	377
14.6.1. Частотно-полевые области существования МСВ различных типов	377
14.6.2. Частотные границы между областями квазиповерхностных и квазиобъемных волн	380
14.6.3. Предельные частоты дисперсионного соотношения	385
14.6.4. Деформация областей существования квазиобъемных и квазиповерхностных волн при изменении поля анизотропии	385
14.6.5. Границы областей существования квазиобъемных и квазиповерхностных волн при различных ориентациях волнового вектора	388
14.7. Дисперсионные свойства различных МСВ	390
14.7.1. Распространение волн перпендикулярно направлению поля	390
14.7.2. Распространение волн параллельно направлению поля	392
14.8. Сравнение с экспериментом	393
14.8.1. Основные свойства спектров МСВ	393
14.8.2. Соотношение теории с экспериментальными результатами	394
Выводы по главе 14	395
Глава 15. Электромагнитные волны в многослойной структуре с ориентационным переходом	399
15.1. Общий случай электромагнитной волны в среде с тензорными параметрами	399
15.1.1. Общий случай среды тензорного характера	400
15.2. Электромагнитные волны, распространяющиеся в бигиротропной среде	401
15.2.1. Гиромагнитная и giroэлектрическая волны	402
15.2.2. Поля гиромагнитной волны	403
15.2.3. Линейномагнитный и гиромагнитный импедансы	404
15.3. Тензор магнитной проницаемости композиционной среды	405
15.3.1. Схема получения тензора динамической восприимчивости для композиционной среды	405
15.3.2. Явный вид компонент тензора магнитной восприимчивости	407
15.3.3. Явный вид компонент тензора магнитной проницаемости	408
15.4. Дисперсионные свойства гиромагнитной волны в композиционной среде	409
15.4.1. Дисперсионные кривые при различных значениях анизотропии	409
15.5. Падение электромагнитной волны на композиционную структуру, содержащую гиромагнитные элементы в условиях ориентационного перехода	410
15.5.1. Ориентация полей и волновых векторов гиромагнитных волн противоположных направлений	410

15.6. Отражение и прохождение электромагнитных волн при падении на одну границу между двумя композиционными средами	412
15.6.1. Общая геометрия задачи	412
15.6.2. Поля гиромагнитной волны и граничные условия	413
15.6.3. Амплитуды волн в обеих средах	414
15.6.4. Коэффициенты отражения и прохождения по полям . . .	415
15.6.5. Частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения	415
15.7. Отражение и прохождение электромагнитных волн при падении на трехслойную композиционную структуру.	419
15.7.1. Нормальное падение гиромагнитной волны на структуру, состоящую из трех сред	419
15.7.2. Поля распространяющихся волн	420
15.7.3. Коэффициенты отражения и прохождения по полям . . .	423
15.7.4. Частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения	423
Выводы по главе 15	425
Литература	429