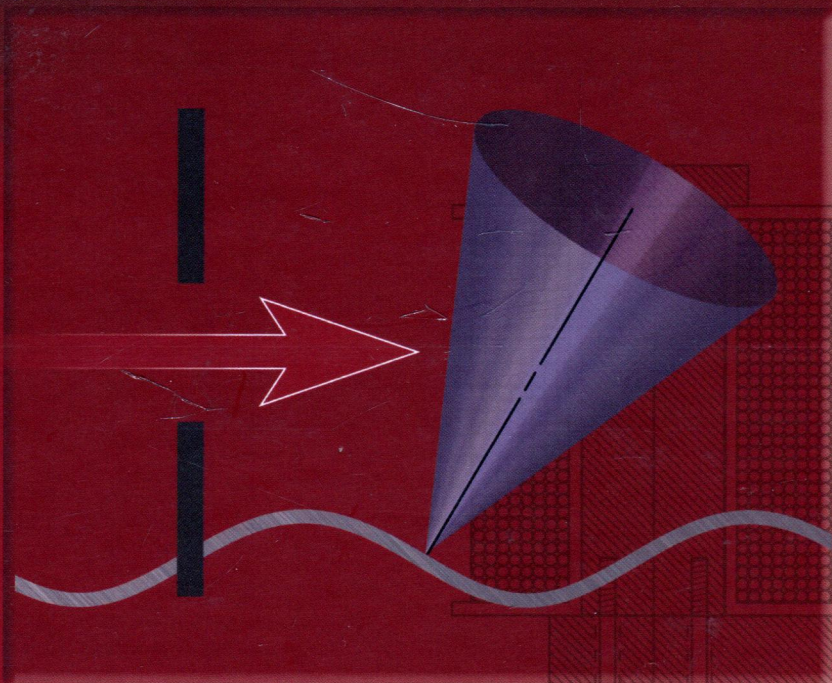


В.Г. Шавров  
В.И. Щеглов

# ДИНАМИКА НАМАГНИЧЕННОСТИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ЕЁ ОРИЕНТАЦИИ



**В.Г. Шавров**  
**В.И. Щеглов**

**ДИНАМИКА НАМАГНИЧЕННОСТИ  
В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ  
ЕЁ ОРИЕНТАЦИИ**



**МОСКВА**  
**ФИЗМАТЛИТ®**  
**2019**

УДК 537.874; 537.624

ББК 22.33

Ш 14

Шавров В.Г., Щеглов В.И. **Динамика намагниченности в условиях изменения её ориентации.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. — 472 с. — ISBN 978-5-9221-1837-8.

Монография посвящена рассмотрению динамических явлений в среде с магнитным упорядочением, имеющих место при изменении ориентации равновесного состояния вектора намагниченности. Рассмотрено пространственно однородное изменение намагниченности в условиях ориентационного перехода, а также пространственно неоднородное в пределах доменной границы и структуры в целом. Построены модели ферромагнитного резонанса, распространения магнитостатических волн и локальных возмущений намагниченности типа солитонов. Приведены результаты экспериментального исследования магнитостатических волн в пленке феррита-граната в ненасыщенном состоянии. Рассмотрено распространение электромагнитных волн в многослойной композиционной среде, отдельные элементы которой находятся в условиях ориентационного перехода.

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

ISBN 978-5-9221-1837-8

© ФИЗМАТЛИТ, 2019

© В. Г. Шавров, В. И. Щеглов, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> . . . . .	13
<b>Список наиболее часто используемых сокращений</b> . . . . .	22
<b>Глава 1. Общие свойства волновых процессов и ориентационных переходов в магнитной среде (обзор литературы)</b> . . . . .	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
<b>Глава 2. Общие свойства доменных границ и доменной структуры в магнетиках (обзор литературы)</b> . . . . .	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 последствия . . . . .	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
<b>Глава 3. Общие свойства волновых возмущений солитонного типа (обзор литературы)</b> . . . . .	<b>52</b>
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
<b>Глава 4. Общий математический аппарат, используемый при расчете волновых процессов</b> . . . . .	<b>64</b>
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
<b>Глава 5. Математический аппарат, используемый при расчете динамики намагниченности . . . . .</b>	<b>100</b>
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
<b>Глава 6. Математический аппарат, используемый при расчете свойств дипольных магнитостатических волн. . . . .</b>	<b>113</b>
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
<b>Глава 7. Математический аппарат, используемый при расчете свойств обменных магнитостатических волн . . . . .</b>	<b>144</b>
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
<b>Глава 8. Некоторые вопросы распространения волн в неоднородной среде . . . . .</b>	<b>167</b>
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. Магнитостатические 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
<b>Глава 9. Некоторые вопросы, касающиеся расчета ориентационных переходов . . . . .</b>	<b>187</b>
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
<b>Глава 10. Динамическая магнитная восприимчивость при ориентационном переходе . . . . .</b>	<b>213</b>
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
<b>Глава 11. Математический аппарат, используемый при работе со статикой и динамикой доменных границ . . . . .</b>	<b>239</b>
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
<b>Глава 12. Экспериментальное исследование распространения магнитостатических волн в пленках с доменной структурой . . . . .</b>	<b>280</b>
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
<b>Глава 13. Ферромагнитный резонанс в пластине с доменами . . . . .</b>	<b>305</b>
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
<b>Глава 14. Магнитостатические волны в условиях ориентационного перехода . . . . .</b>	<b>345</b>
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
<b>Глава 15. Электромагнитные волны в многослойной структуре с ориентационным переходом . . . . .</b>	<b>399</b>
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 гирозлектрическая 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 гиромангнитной 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 гиромангнитной 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
<b>Литература</b> . . . . .	429