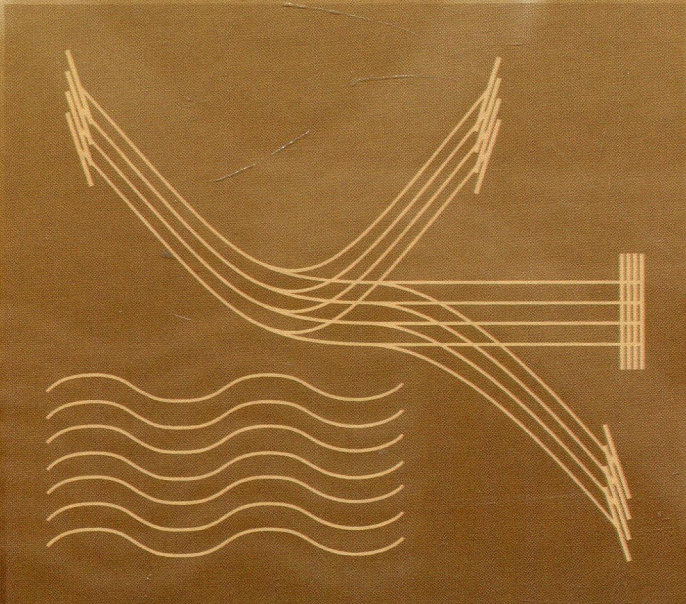


В. Г. ШАВРОВ  
В. И. ЩЕГЛОВ

**МАГНИТОСТАТИЧЕСКИЕ  
ВОЛНЫ  
В НЕОДНОРОДНЫХ  
ПОЛЯХ**



В. Г. ШАВРОВ  
В. И. ЩЕГЛОВ

**МАГНИТОСТАТИЧЕСКИЕ  
ВОЛНЫ  
В НЕОДНОРОДНЫХ  
ПОЛЯХ**



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2016

УДК 537.874: 537.624

ББК 22.33

Ш 14

*Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 14-22-00279*

Шавров В.Г., Щеглов В.И. **Магнитоэ статические волны в неоднородных полях.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. — 360 с. — ISBN 978-5-9221-1731-9.

Монография посвящена рассмотрению поверхностных магнитоэ статических волн (ПМСВ), распространяющихся в магнитных средах с малым затуханием, в первую очередь — в железо-иттриевом гранате (ЖИГ). Получены дисперсионные соотношения для ПМСВ в магнитных пленках и структурах на их основе. Рассмотрено распространение ПМСВ в неоднородных полях различных конфигураций. Получены амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики линий передачи на ПМСВ. Обсуждаются возможности практического применения ПМСВ, в частности для обработки информации и в других областях техники.

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

ISBN 978-5-9221-1731-9

© ФИЗМАТЛИТ, 2016

© В. Г. Шавров, В. И. Щеглов, 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	8
Список наиболее часто используемых сокращений . . . . .	10
<b>Глава 1. Магнитостатические волны и доменные структуры в пленках ферритов-гранатов . . . . .</b>	<b>11</b>
1.1. Колебания и волны в магнитоупорядоченных средах в приближении магнитостатики . . . . .	11
1.2. Условия существования и дисперсия МСВ в магнитных пленках и структурах на их основе . . . . .	14
1.3. Распространение ПМСВ в произвольном направлении по плоскости пленки . . . . .	17
1.4. Распространение ПМСВ в ферритовых пленках и структурах в условиях неоднородного намагничивания . . . . .	22
1.5. Распространение ПМСВ в ферритовых пленках и структурах с периодическими неоднородностями . . . . .	24
1.6. Преобразование магнитостатической волны в электромагнитную на неоднородности поля . . . . .	27
1.7. Доменные структуры в ферритовых пленках, ФМР и МСВ в условиях существования доменных структур . . . . .	28
1.8. Особенности магнитостатических волн в длинноволновом пределе . . . . .	30
1.9. Использование ФМР, МСВ и доменов в ферритовых пленках для устройств обработки информации . . . . .	32
1.10. Основные вопросы дальнейшего изложения . . . . .	34
1.11. Некоторые новые направления исследования МСВ . . . . .	35
<b>Глава 2. Математический аппарат, используемый при расчете свойств магнитостатических волн . . . . .</b>	<b>37</b>
2.1. Уравнение Ландау–Лифшица . . . . .	37
2.2. Динамическая восприимчивость магнитной среды . . . . .	41
2.3. Уравнение Уокера . . . . .	46
2.3.1. Уравнение Уокера с произвольным тензором восприимчивости . . . . .	46
2.3.2. Уравнение Уокера в задаче Дэймона–Эшбаха . . . . .	49
2.4. Дисперсионное соотношение для магнитной пластины со свободными поверхностями. Решение Дэймона–Эшбаха . . . . .	50
2.4.1. Основные уравнения . . . . .	51
2.4.2. Граничные условия . . . . .	53
2.4.3. Полная формулировка задачи . . . . .	54
2.4.4. Решение уравнений без граничных условий . . . . .	55
2.4.5. Частотные области объемных и поверхностных волн . . . . .	61
2.4.6. Вывод дисперсионного соотношения из решения и граничных условий . . . . .	62
2.4.7. Переход к полярной системе координат . . . . .	66
2.4.8. Потенциалы . . . . .	68
2.4.9. Поля . . . . .	70

2.4.10. Намагниченности . . . . .	71
2.4.11. Угол отсечки для соотношения Дэймона–Эшбаха . . . . .	72
2.4.12. Дисперсионное соотношение Дэймона–Эшбаха в декартовой системе координат . . . . .	74
2.5. Дисперсионное соотношение для структуры металл–диэлектрик–феррит–диэлектрик–металл (МДФДМ) и его частные случаи . . . . .	77
2.5.1. Общий вывод дисперсионного соотношения . . . . .	77
2.5.2. Дисперсионное соотношение при произвольном направлении распространения фазового фронта . . . . .	82
2.5.3. Переход к полярной системе координат . . . . .	84
2.5.4. Предельный переход к дисперсионным соотношениям для других структур . . . . .	86
2.6. Дисперсионное соотношение для структуры металл–диэлектрик–феррит–феррит–диэлектрик–металл (МДФФДМ) . . . . .	88
2.6.1. Общий вывод и характер дисперсионного соотношения . . . . .	88
2.6.2. Предельный переход к дисперсионным соотношениям для других структур . . . . .	92
2.7. Фазовая и групповая скорости, набег фазы и время задержки волновых пучков ПМСВ . . . . .	93
2.7.1. Фазовая и групповая скорости . . . . .	94
2.7.2. Набег фазы и время задержки . . . . .	98
2.8. Система уравнений для метода Гамильтона–Аулда . . . . .	99
2.8.1. Общий вывод уравнений Гамильтона–Аулда . . . . .	100
2.8.2. Переход к полярной системе координат . . . . .	101
2.9. Производные от дисперсионного соотношения для структуры феррит–диэлектрик–металл . . . . .	106
2.10. Эквивалентность различных видов уравнений динамики в классической механике . . . . .	109
2.11. Задача Коши при распространении ПМСВ . . . . .	111
2.12. Техника расчета траекторий волновых пучков МСВ в неоднородном поле . . . . .	115
Выводы по главе 2 . . . . .	118
<b>Глава 3. Магнитостатические волны в однородно намагниченных ферритовых пленках и структурах на их основе . . . . .</b>	<b>119</b>
3.1. Условия существования и дисперсия ПМСВ в ферритовых пленках и структура на их основе . . . . .	119
3.1.1. Дисперсионные свойства прямых и обратных ПМСВ в структуре ФДМ . . . . .	119
3.1.2. Экспериментальное исследование дисперсии ПМСВ в структуре ФДМ . . . . .	125
3.1.3. О возможности экспериментального наблюдения обратных волн . . . . .	135
3.2. Распространение ПМСВ в двухкомпонентной среде, состоящей из свободной ферритовой пленки и структуры ФДМ . . . . .	136
3.2.1. Анализ преломления ПМСВ с помощью метода изочастотных кривых . . . . .	136
3.2.2. Экспериментальное исследование преломления ПМСВ . . . . .	143
3.2.3. Коэффициент отражения ПМСВ от границы раздела сред . . . . .	149

3.3. Дисперсионные свойства ПМСВ в структурах, содержащих два ферритовых слоя . . . . .	150
3.3.1. Структура феррит–феррит (ФФ) . . . . .	150
3.3.2. Структура металл–диэлектрик–феррит–феррит–диэлектрик–металл (МДФФДМ) . . . . .	152
3.3.3. Экспериментальное исследование дисперсии ПМСВ . . . . .	153
Выводы по главе 3 . . . . .	155
<b>Глава 4. Методы исследования и анализ распространения ПМСВ в условиях подмагничивания продольно неоднородным полем . . . . .</b>	<b>158</b>
4.1. Основные виды неоднородностей подмагничивающего поля . . . . .	158
4.2. Пространственная конфигурация областей распространения ПМСВ . . . . .	160
4.3. Методы анализа распространения ПМСВ в условиях неоднородного подмагничивания . . . . .	161
4.3.1. Метод изочастотных кривых . . . . .	161
4.3.2. Метод Гамильтона–Аулда . . . . .	163
4.3.3. Сравнение методов анализа траекторий ПМСВ . . . . .	164
4.4. Распространение ПМСВ в ферритовой пленке со свободными поверхностями . . . . .	165
4.4.1. Анализ траекторий ПМСВ методом изочастотных кривых . . . . .	165
4.4.2. Анализ траекторий ПМСВ методом Гамильтона–Аулда . . . . .	169
4.5. Распространение ПМСВ в структуре феррит–металл . . . . .	178
4.5.1. Линейно неоднородное поле . . . . .	178
4.5.2. Поле типа «долины» . . . . .	180
4.5.3. Поле типа «вала» . . . . .	181
4.5.4. Каналы первого и второго типов . . . . .	181
4.6. Распространение ПМСВ в структуре феррит–диэлектрик–металл . . . . .	181
4.6.1. Анализ траекторий ПМСВ методом изочастотных кривых . . . . .	182
4.6.2. Анализ траекторий ПМСВ методом Гамильтона–Аулда . . . . .	189
4.7. Набег фазы и время задержки . . . . .	194
4.7.1. Линейно неоднородное поле . . . . .	194
4.7.2. Поле типа «долины» . . . . .	196
4.7.3. Поле типа «вала» . . . . .	198
4.8. Экспериментальное исследование траекторий ПМСВ . . . . .	201
4.8.1. Основные параметры эксперимента . . . . .	201
4.8.2. Линейно неоднородное поле . . . . .	202
4.8.3. Поле типа «долины» . . . . .	203
4.8.4. Поле типа «вала» . . . . .	204
4.8.5. Изменение различных параметров эксперимента . . . . .	205
Выводы по главе 4 . . . . .	206
<b>Глава 5. Распространение волновых пучков конечной ширины в неоднородно намагниченных ферритовых пленках . . . . .</b>	<b>212</b>
5.1. Пространственная трансформация широких пучков ПМСВ, распространяющихся в неоднородно намагниченных пленках . . . . .	212
5.1.1. Линейно неоднородное поле . . . . .	212
5.1.2. Поле типа «долины» . . . . .	214
5.1.3. Поле типа «вала» . . . . .	215

5.2. Метод анализа амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик линий передачи на ПМСВ . . . . .	216
5.2.1. Общая схема метода расчета АЧХ и ФЧХ . . . . .	217
5.2.2. Схема построения АЧХ . . . . .	219
5.2.3. Схема построения ФЧХ . . . . .	220
5.3. Амплитудно-частотные характеристики пропускания линий передачи на ферритовых пленках, намагниченных полями различных конфигураций . . . . .	222
5.3.1. Однородное поле . . . . .	222
5.3.2. Линейно неоднородное поле . . . . .	226
5.3.3. Поле типа «долины» . . . . .	230
5.3.4. Поле типа «вала» . . . . .	233
5.4. Амплитудно-частотные характеристики волноведущего канала для ПМСВ, образованного неоднородным полем типа «вала» . . . . .	240
5.4.1. Изменение длины канала . . . . .	240
5.4.2. Изменение условий возбуждения канала . . . . .	242
5.5. Амплитудно-частотные характеристики линии передачи на ПМСВ при произвольной ориентации подмагничивающего поля . . . . .	245
5.5.1. Общая геометрия двух вариантов расположения преобразователей: взаимно противоположащего и взаимно сдвинутого . . . . .	245
5.5.2. Фильтрация первого типа, взаимно противоположащая геометрия . . . . .	247
5.5.3. Фильтрация второго типа, взаимно сдвинутая геометрия . . . . .	249
5.6. Экспериментальное исследование пучков ПМСВ конечной ширины и амплитудно-частотных характеристик . . . . .	251
5.6.1. Линейно неоднородное поле . . . . .	252
5.6.2. Поле типа «долины» . . . . .	252
5.6.3. Поле типа «вала» . . . . .	253
Выводы по главе 5 . . . . .	254
<b>Глава 6. Амплитудно-частотные свойства линий передачи на магнитостатических волнах с учетом набега фазы . . . . .</b>	<b>258</b>
6.1. Общие характеристики типичных линий передачи на ПМСВ . . . . .	258
6.2. Общий случай волн в магнитной среде . . . . .	259
6.3. Случай поверхностных магнитостатических волн . . . . .	263
6.4. Характеристики пропускания линии передачи по амплитуде при различных ее геометрических параметрах . . . . .	264
6.4.1. Зависимость амплитуды проходящего сигнала от частоты при изменении взаимной ориентации преобразователей . . . . .	265
6.4.2. Зависимость амплитуды проходящего сигнала от частоты при изменении ширины волнового пучка . . . . .	267
6.4.3. Зависимость амплитуды проходящего сигнала от взаимной ориентации преобразователей при фиксированной частоте сигнала . . . . .	270
6.4.4. Зависимость фазы проходящего сигнала от частоты при изменении взаимной ориентации преобразователей . . . . .	270
6.5. Влияние набега фазы на АЧХ . . . . .	274
6.5.1. Геометрия задачи при относительном взаимном смещении преобразователей . . . . .	274

6.5.2. Формирование амплитудно-частотной характеристики . . . . .	275
6.5.3. Формирование фазочастотной характеристики . . . . .	277
6.5.4. Влияние длины преобразователей на структуру АЧХ . . . . .	277
6.6. Деформация волнового фронта поверхностных магнитостатических волн в ферритовых пленках, намагниченных линейно неоднородным полем. . . . .	280
6.6.1. Общая геометрия задачи . . . . .	281
6.6.2. Различные случаи ориентации излучающего преобразователя . . . . .	283
6.7. Общий характер трансформации области распространения ПМСВ при изменении различных параметров структуры . . . . .	289
6.7.1. Изменение ориентации излучающего преобразователя . . . . .	289
6.7.2. Изменение частоты . . . . .	289
6.7.3. Изменение градиента поля . . . . .	290
6.8. Рекомендации для оптимизации параметров линии передачи на ПМСВ . . . . .	292
Выводы по главе 6 . . . . .	292
<b>Глава 7. Использование магнитостатических волн в неоднородно намагниченных ферритовых пленках для устройств обработки информации и других технических приложений . . . . .</b>	<b>295</b>
7.1. Краткий обзор возможных технических приложений . . . . .	295
7.2. Волноведущие структуры для ПМСВ на ферритовых пленках, намагниченных полем типа «вала» . . . . .	296
7.3. Оптимизация формы преобразователей ПМСВ для устройств на неоднородно намагниченных ферритовых пленках . . . . .	299
7.4. Многоканальный фильтр на ферритовой пленке, намагниченной полем типа «долины» . . . . .	302
7.5. Многоканальный фильтр на пакетированных ферритовых структурах . . . . .	304
7.6. Линия задержки сигнала СВЧ на ферритовой пленке, намагниченной полем типа «вала» . . . . .	307
7.7. Измерение параметров пленок железо-иттриевого граната со сложным характером анизотропии . . . . .	309
7.8. Исследование пространственного распределения магнитного поля с помощью датчика на ПМСВ . . . . .	311
7.9. Использование линии передачи на ПМСВ для определения ориентации магнитного поля . . . . .	312
Выводы по главе 7 . . . . .	314
Список литературы . . . . .	317