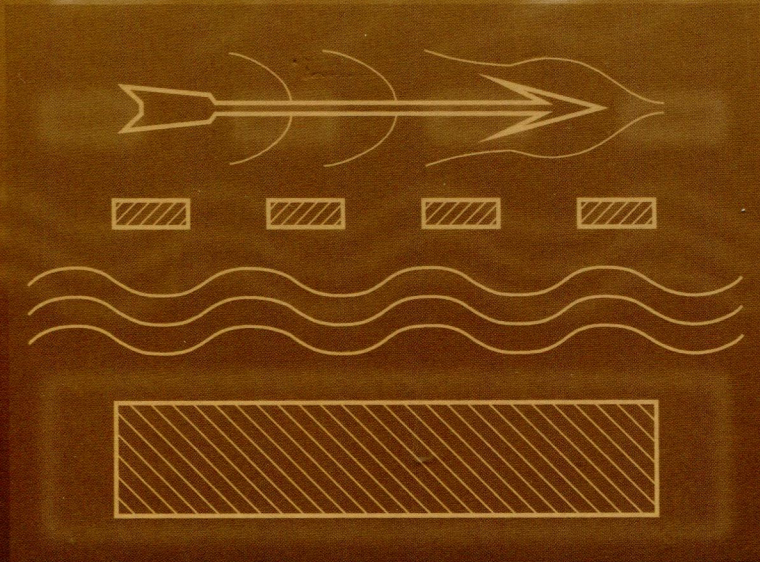


В. Г. ШАВРОВ
В. И. ЩЕГЛОВ

**МАГНИТОСТАТИЧЕСКИЕ
И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ВОЛНЫ
В СЛОЖНЫХ
СТРУКТУРАХ**



**В. Г. ШАВРОВ
В. И. ЩЕГЛОВ**

**МАГНИТОСТАТИЧЕСКИЕ
И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ВОЛНЫ
В СЛОЖНЫХ
СТРУКТУРАХ**



**МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2017**

УДК 537.874: 537.624

Ш 14

Шавров В. Г., Щеглов В. И. **Магнитостатические и электромагнитные волны в сложных структурах.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. — 360 с. — ISBN 978-5-9221-1733-3.

Монография посвящена рассмотрению магнитостатических и электромагнитных волн в сложных структурах, основой которых являются магнитные среды с малым затуханием, в первую очередь — пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ). Рассмотрено распространение магнитостатических волн в периодических структурах с различным соотношением между периодом структуры и длиной волны. Отдельное внимание уделено эффекту преобразования магнитостатических волн в электромагнитные на неоднородностях поля, проявляющемуся как излучение электромагнитных волн из феррита. Обсуждены некоторые возможности практического применения и дальнейшего исследования описываемых явлений.

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

ISBN 978-5-9221-1733-3

© ФИЗМАТЛИТ, 2017

© В. Г. Шавров, В. И. Щеглов, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	9
Список наиболее часто используемых сокращений	13
Глава 1. Магнитостатические волны в пленках ферритов-гранатов с различными неоднородностями	14
1.1. Периодические неоднородности — решетки	14
1.1.1. Решетки, образованные упругими волнами	15
1.1.2. Решетки, образованные механическими неоднородностями	15
1.1.3. Статические магнитные решетки	16
1.1.4. Магнитные каналы	16
1.1.5. Решетки других видов	17
1.1.6. Решетки с малым периодом	17
1.2. Обратные волны в магнитных структурах	18
1.2.1. Два основных вида волноведущих структур для обратных волн	19
1.2.2. Структура феррит-диэлектрик-решетка как волноведущая среда	19
1.3. Стохастические явления, сопровождающие распространение магнитостатических волн	21
1.3.1. Стохастическая неустойчивость траекторий магнитостатических волн	21
1.4. Излучение электромагнитных волн из феррита	22
1.4.1. Диаграмма направленности излучения	22
1.4.2. Теоретическая трактовка направленности излучения	23
Выводы по главе 1	25
Глава 2. Математический аппарат, используемый при расчете свойств магнитостатических волн	27
2.1. Тензор магнитной проницаемости	27
2.2. Магнитостатические волны в однородных полях и структурах	29
2.2.1. Дисперсия магнитостатических волн в ферритовой пленке со свободными поверхностями (задача Дэймона-Эшбаха)	29
2.2.2. Основные свойства дисперсии ПМСВ	36
2.3. Дисперсионные соотношения для некоторых простых структур	44
2.3.1. Свободная ферритовая пленка (ФСП)	44
2.3.2. Структура феррит-металл (ФМ)	44
2.3.3. Структура феррит-диэлектрик-металл (ФДМ)	44

2.4. Магнитостатические волны в неоднородных полях	45
2.4.1. Методы расчета распространения МСВ в неоднородных полях	45
2.5. Электромагнитная волна в среде с тензорными параметрами	46
2.5.1. Волна в бигиротропной среде	46
2.5.2. Гиромагнитная и giroэлектрическая волны	48
2.5.3. Поля гиромагнитной волны	49
2.5.4. Переход к полярной системе координат	50
2.5.5. Импедансы и адмиттансы	51
2.6. Падение гиромагнитной волны на границу раздела двух сред	52
2.7. Частотные свойства гиромагнитной волны	56
2.7.1. Характерные частоты	56
2.7.2. Параметр расходимости	56
2.7.3. Три интервала параметра затухания	57
2.8. О корректности анализа волновых процессов в приближении магнитостатики	63
Выводы по главе 2	68
Глава 3. Распространение МСВ в решетках, период которых значительно меньше длины волны	70
3.1. Основные уравнения и граничные условия	70
3.1.1. Общая геометрия задачи	70
3.1.2. Качественные предпосылки эффекта просачивания	71
3.1.3. Параметр экранирования	72
3.1.4. Потенциал в условиях просачивания	72
3.1.5. Граничные условия и потенциал при наличии просачивания	73
3.2. Дисперсионное соотношение	75
3.2.1. Соотношение в декартовой системе координат	75
3.2.2. Переход к полярной системе координат	77
3.3. Параметр экранирования решетки в виде разложения по волновому числу	78
3.3.1. Сравнение со структурой феррит-металл	78
3.3.2. Переход от непрерывного металла к дискретной решетке	79
3.3.3. Параметр экранирования при различных коэффициентах разложения	80
3.3.4. Выражение параметра экранирования через ширину щелей решетки	83
3.4. Влияние параметра экранирования на дисперсию поверхностных магнитостатических волн	84
3.4.1. Влияние нулевого члена разложения	84
3.4.2. Влияние первого члена разложения	86
3.4.3. Влияние второго члена разложения	87

3.5. Дисперсионные кривые при различной толщине слоя диэлектрика	88
3.6. Дисперсионные кривые при различной толщине ферритовой пластины	89
3.7. Дисперсия при высоких порядках разложения параметра экранирования.	91
3.8. Сравнение с данными эксперимента	92
3.9. Распространение ПМСВ в структуре ФДР, намагниченной неоднородным полем	95
3.9.1. Метод исследования распространения волн в структуре феррит–диэлектрик–решетка, намагниченной неоднородным полем	95
3.9.2. Линейное продольно неоднородное поле	97
3.9.3. Квадратичное поле типа «долины»	103
3.9.4. Квадратичное поле типа «вала»	110
Выводы по главе 3	115
Глава 4. Распространение МСВ в решетках, период которых того же порядка, что и длина волны.	118
4.1. Традиционный математический аппарат, используемый для анализа распространения волн в периодических структурах.	118
4.1.1. Теорема Флоке	119
4.1.2. Метод Кронига–Пенни	123
4.1.3. Метод Хилла	131
4.2. Методы решения задач с произвольными неоднородностями	142
4.2.1. Метод пошагового алгоритма	144
4.3. Результаты расчета амплитуд волн с применением пошагового алгоритма.	148
4.3.1. Амплитуды волн в крайних слоях структуры	148
4.3.2. Пространственная модуляция амплитуды	150
4.4. Отражающие и пропускающие свойства структуры	158
4.4.1. Отражающие свойства структуры	158
4.4.2. Пропускающие свойства структуры	160
4.4.3. Некоторые качественные особенности	162
4.5. Сравнение различных методов	162
4.6. Особенности распространения электромагнитных волн.	164
4.6.1. Слабая и сильная неоднородность	164
4.6.2. Распределение амплитуд в магнитной структуре	168
Выводы по главе 4	180

Глава 5. Распространение МСВ в решетках, период которых значительно больше длины волны	183
5.1. Устойчивое распространение ПМСВ в поле, периодическом по одной координате.	183
5.1.1. Геометрия задачи	183
5.1.2. Магнитное поле, создаваемое периодической магнитной системой	184
5.1.3. Траектории ПМСВ в периодическом поле	187
5.1.4. Интерпретация хода траекторий	191
5.2. Стохастическая неустойчивость ПМСВ в поле типа «вала» с периодической модуляцией	192
5.2.1. Геометрия задачи и основные уравнения	193
5.2.2. Модуляция поля типа «вала»	194
5.2.3. Общая картина неустойчивости траекторий ПМСВ	195
5.2.4. Траектории при высвечивании	199
5.2.5. Характер траекторий при различных видах модуляции	206
5.2.6. Изменение частоты возбуждения ПМСВ	211
5.2.7. Некоторые дополнительные особенности неустойчивости траекторий	213
5.3. Многоканальная стохастическая неустойчивость траекторий ПМСВ в дважды периодическом поле	216
5.3.1. Геометрическая структура дважды периодического поля	216
5.3.2. Распространение ПМСВ в многоканальной структуре	221
5.4. Рекомендации для наблюдения стохастической неустойчивости в эксперименте	223
Выводы по главе 5	225
Глава 6. Распространение ПМСВ в условиях медленно меняющегося поперечно неоднородного поля	228
6.1. Различие между продольной и поперечной неоднородностями поля	228
6.2. Распространение ПМСВ в поперечно неоднородном поле	229
6.2.1. Линейно меняющееся поперечно неоднородное поле	229
6.3. Экспериментальное исследование распространения ПМСВ в поперечно неоднородном поле	234
6.4. Распространение ПМСВ в полях других конфигураций и в сложных структурах	236
6.4.1. Поля типа «долины» и «вала»	236
6.4.2. Поле произвольной конфигурации	237
6.4.3. Структуры феррит–металл и феррит–диэлектрик–металл	238
Выводы по главе 6	239

Глава 7. Излучение электромагнитных волн при распространении ПМСВ в поперечно неоднородном поле	242
7.1. Общая геометрия задачи	242
7.2. Общие положения задачи об излучении	244
7.3. Введение магнитных зарядов	244
7.3.1. Поля и потенциалы, создаваемые магнитными зарядами	249
7.3.2. Сравнение уравнений для потенциалов и полей, образованных электрическими и магнитными зарядами	251
7.4. Запаздывающие потенциалы	252
7.5. Поля, определяемые магнитными зарядами	254
7.6. Поля излучаемых волн	255
7.6.1. Поле излучения от точечного заряда	257
7.6.2. Диаграмма направленности излучения от одного заряда	258
7.7. Поле излучения от распределенного заряда	258
7.7.1. Приближения, следующие из эксперимента	259
7.7.2. Усреднение намагниченности	261
7.7.3. Переменная намагниченность	263
7.8. Приближения по данным эксперимента	266
7.8.1. Функция высвечивания	266
7.8.2. Функция координатной зависимости намагниченности	268
7.8.3. Приближенный вид динамической намагниченности	269
7.8.4. Составляющие интеграла поля излучаемой волны	269
7.9. Формирование диаграммы направленности излучения	271
7.9.1. Частотные свойства диаграммы направленности	273
7.10. Диаграмма направленности при произвольной точке наблюдения	274
7.11. Диаграмма направленности при неколлинеарном характере ПМСВ	276
7.11.1. Общая геометрия задачи	277
7.11.2. Расчет диаграммы направленности	279
7.11.3. Конфигурация области излучения	280
7.11.4. Ориентационный множитель	282
7.11.5. Диаграммы с учетом ориентационного множителя	283
7.11.6. Полная диаграмма направленности	287
Выводы по главе 7	287
Глава 8. Пространственные характеристики излучения электромагнитных волн, сопровождающего распространение ПМСВ в сложных структурах	290
8.1. Общая схема формирования диаграммы направленности	290
8.1.1. Геометрия задачи	290

8.1.2. Характер распространения ПМСВ	292
8.1.3. Суперпозиция полей отдельных источников	294
8.1.4. Возбуждение источников ЭМВ затухающей ПМСВ волной	300
8.2. Диаграмма направленности для двух источников	303
8.2.1. Изменение расстояния между источниками	303
8.2.2. Изменение волнового числа ПМСВ	305
8.3. Диаграмма направленности при большом числе источников	306
8.3.1. Суммирование по одному индексу	306
8.3.2. Изменение количества источников	308
8.3.3. Изменение расстояния между источниками	309
8.3.4. Изменение параметра затухания	312
8.4. Нерегулярное распределение источников	313
8.4.1. Формирование областей излучения	313
8.4.2. Формирование диаграммы направленности	316
8.5. Многослойное распределение источников.	320
8.5.1. Геометрия структуры и областей излучения	320
8.5.2. Формирование диаграммы направленности	322
8.5.3. Диаграмма направленности от двух источников	324
8.5.4. Расщепление диаграммы за счет множественности источ- ников	330
8.6. Некоторые заключительные замечания, касающиеся излучения	332
Выводы по главе 8	334
Литература	338