

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список наиболее часто используемых сокращений	12
Введение	13
Глава 1. Общие свойства ферромагнитного резонанса и ориентационных переходов (обзор литературы)	17
1.1. Ферромагнитный резонанс	17
1.1.1. Общее уравнение динамики намагниченности	17
1.1.2. Ферромагнитный резонанс в анизотропной среде	18
1.1.3. Частотная щель в спектре ферромагнитного резонанса	20
1.1.4. Измерение параметров магнитных материалов	21
1.1.5. Композиционные среды на основе магнетиков	21
1.1.6. Некоторые особенности нелинейного ферромагнитного резонанса	23
1.2. Ориентационный и фазовый переходы	24
1.2.1. Соотношение понятий ориентационного и фазового переходов	24
1.2.2. Фазовые переходы первого и второго рода	25
1.2.3. Свойства ориентационных переходов	27
1.3. Доменная структура	27
1.3.1. Физика доменных структур	28
1.3.2. Доменная структура при ориентационных переходах	31
Выводы по главе 1	34
Глава 2. Математический аппарат, используемый при расчете ферромагнитного резонанса	37
2.1. Плотности энергии и эффективные поля	37
2.1.1. Полная плотность энергии магнитного кристалла	37
2.1.2. Эффективные поля	39
2.2. Динамическая восприимчивость магнитной среды	40
2.2.1. Уравнение Ландау–Лифшица и процедура линеаризации	41
2.2.2. Тензор магнитной восприимчивости	42
2.2.3. Тензор магнитной проницаемости	43
2.2.4. Различные виды записи компонент тензора восприимчивости	44
2.2.5. Частотная зависимость и резонансная частота	45
2.2.6. Два определения резонансной частоты	47
2.2.7. Два вида записи тензора восприимчивости	49
2.2.8. Замечание о зависимости компонент тензора от поля	50
2.2.9. Полные уравнения движения для намагниченности	52
2.3. Метод Смита–Сула	55

2.3.1. Уравнения движения намагниченности в декартовой системе координат	55
2.3.2. Переход к сферической системе координат	56
2.3.3. Сохранение длины вектора намагниченности	57
2.3.4. Линеаризация уравнений движения	60
2.3.5. Решение уравнений движения. Формула Смита–Сула	61
2.4. Методы решения уравнений высоких степеней	61
2.4.1. Уравнения третьей степени	63
2.4.2. Уравнения четвертой степени	71
Выводы по главе 2	77
Глава 3. Математический аппарат, используемый при работе с кристаллами различной симметрии	80
3.1. Симметрия кристаллической решетки	80
3.1.1. Типы симметрии решетки	81
3.1.2. Магнитная анизотропия	86
3.1.3. Анизотропия типа «легкая ось» и «легкая плоскость»	87
3.1.4. Другие виды магнитной анизотропии	88
3.1.5. Особенности структуры реальных материалов	89
3.2. Основная техника работы с анизотропией	93
3.2.1. Определение матрицы перехода	94
3.2.2. Пример прямого преобразования	95
3.2.3. Пример обратного преобразования	96
3.2.4. Матрица перехода в общем виде	97
3.2.5. Переход из одной декартовой системы координат в другую	97
3.2.6. Матрицы прямая и обратная	99
3.3. Общие правила решения задач о переходе между различными системами координат	102
3.3.1. Вспомогательные геометрические задачи, используемые для получения матрицы преобразования координат	103
3.4. Матрицы преобразования в случае одноосной анизотропии.	107
3.4.1. Общая геометрия задачи при произвольной ориентации оси анизотропии	107
3.4.2. Общая структура матрицы прямого перехода	108
3.4.3. Координаты основных точек	108
3.4.4. Определение угла поворота вокруг оси анизотропии	110
3.4.5. Получение направляющих векторов повернутой системы координат через угол поворота вокруг оси анизотропии	112
3.4.6. Набор единичных векторов повернутой системы координат	115
3.4.7. Полный вид матрицы прямого перехода	115
3.4.8. Матрица обратного перехода	116
3.4.9. Матрицы перехода в сферической системе координат	117
3.5. Кубическая анизотропия	119
3.5.1. Обозначение осей кубической ячейки	119
3.5.2. Кристаллографические направления	120
3.5.3. Кристаллографические плоскости	121
3.5.4. Схема кубической ячейки	123

3.5.5. Различные ориентации кубической ячейки относительно плоскости магнитной пластины	124
3.6. Матрицы преобразования в случае кубической анизотропии . . .	128
3.6.1. Матрица преобразования для оси [001]	128
3.6.2. Матрица преобразования для оси [011]	131
3.6.3. Матрица преобразования для оси [111]	139
3.6.4. Многообразие вариантов получения матриц преобразования	147
Выводы по главе 3	147
Глава 4. Плотность энергии магнитной анизотропии	149
4.1. Операции симметрии	149
4.1.1. Отражение в координатных плоскостях	149
4.1.2. Поворот на некоторые характерные углы	151
4.1.3. Поворот на произвольный угол	154
4.1.4. Поворот в случаях тригональной и гексагональной симметрии	155
4.2. Плотность энергии одноосной магнитной анизотропии	156
4.2.1. Анизотропия второго порядка по намагниченности	157
4.2.2. Анизотропия типа «легкая ось» и «легкая плоскость» . . .	159
4.2.3. Одноосная анизотропия высоких порядков	160
4.2.4. Плотность энергии одноосной магнитной анизотропии с произвольным направлением оси	160
4.2.5. Азимутальная диаграмма плотности энергии магнитной одноосной анизотропии с произвольным направлением оси . .	165
4.2.6. Другой вид выражения для плотности энергии одноосной магнитной анизотропии с произвольным направлением оси	165
4.3. Плотность энергии кубической магнитной анизотропии	168
4.3.1. Плотность энергии кубической анизотропии для ориентации [001]	168
4.3.2. Поле кубической анизотропии	171
4.3.3. Особенности кубической анизотропии железиттриевого граната	172
4.3.4. Плотность энергии кубической анизотропии для ориентации [001] в сферической системе координат	173
4.3.5. Азимутальная диаграмма плотности энергии магнитной анизотропии для ориентации [001]	174
4.3.6. Плотность энергии кубической анизотропии для ориентации [011]	175
4.3.7. Азимутальная диаграмма плотности энергии магнитной анизотропии для ориентации [011]	178
4.3.8. Плотность энергии кубической анизотропии для ориентации [111]	179
4.3.9. Азимутальная диаграмма плотности энергии магнитной анизотропии для ориентации [111]	181
4.3.10. Плотность энергии при некоторых других углах поворота относительно оси [111]	182

4.4. Плотности энергии, эффективные поля и их производные по времени для кубической магнитной анизотропии при различных ориентациях кубической ячейки	183
4.4.1. Ориентация [001] (ребро куба)	184
4.4.2. Ориентация [011] (диагональ грани куба)	184
4.4.3. Ориентация [111] (пространственная диагональ куба)	185
4.5. Физический смысл различных видов выражений для плотности энергии магнитной анизотропии	185
4.5.1. Анизотропия одноосная	185
4.5.2. Анизотропия формы (размагничивания)	188
4.5.3. Анизотропия внешнего поля	189
4.5.4. Анизотропия кубическая	189
4.6. Некоторые другие виды анизотропии.	191
4.6.1. Анизотропия высоких порядков	191
4.6.2. Ромбическая анизотропия	192
4.6.3. Наклонная одноосная анизотропия	193
Выводы по главе 4	195
Глава 5. Ориентационный переход в магнитной среде	198
5.1. Общая идеология ориентационного перехода	198
5.1.1. Простой ориентационный переход	202
5.1.2. Затянутый ориентационный переход	207
5.1.3. Размазывание фазового перехода	212
5.1.4. Основная схема метода установления	213
5.1.5. Сходимость метода установления	214
5.1.6. Метод динамического установления	216
5.2. Ориентационный переход в пленках смешанных ферритов-гранатов	217
5.2.1. Отклонение оси легкого намагничивания от нормали к плоскости пленки	217
5.2.2. Влияние наклона оси на насыщение пленок	221
5.2.3. Общая ориентационная зависимость поля насыщения пленки	225
5.3. Экспериментальное исследование пленок с наклоном оси анизотропии	226
5.3.1. Поле анизотропии и период доменной структуры	226
5.3.2. Ориентационные зависимости поля насыщения	229
Выводы по главе 5	232
Глава 6. Ферромагнитный резонанс в пластине с одноосной и кубической анизотропией.	235
6.1. Касательное намагничивание	235
6.1.1. Плотность энергии	235
6.1.2. Матрица преобразования при повороте вокруг оси [111]	241
6.1.3. Уравнения движения при поле, параллельном проекции оси [111]	242
6.1.4. Два способа линеаризации полученных уравнений	243

6.1.5. Конечный результат линеаризации и решение линеаризованных уравнений	247
6.1.6. Решение задачи при поле, перпендикулярном проекции оси типа [111]	249
6.1.7. Сравнение резонансных частот для рассмотренных ориентаций	250
6.2. Нормальное намагничивание	251
6.3. Свободный ферромагнитный резонанс при ориентационном переходе	253
6.3.1. Преобразование вектора намагниченности при повороте координат	254
6.3.2. Особенности условий ферромагнитного резонанса в полном интервале изменения поля	256
6.3.3. Приложенное поле меньше поля анизотропии	256
6.3.4. Приложенное поле больше поля анизотропии	262
6.3.5. Произвольное значение приложенного поля	263
6.4. Динамическая магнитная восприимчивость при вынужденном ферромагнитном резонансе в условиях ориентационного перехода.	265
6.4.1. Общая геометрия задачи	266
6.4.2. Приложенное поле меньше поля анизотропии	267
6.4.3. Восприимчивость в системе, связанной с намагниченностью	267
6.4.4. Восприимчивость в системе, связанной с полем	270
6.4.5. Приложенное поле больше поля анизотропии	274
Выводы по главе 6	276
Глава 7. Ферромагнитный резонанс в пленках с наклоном оси легкого намагничивания	279
7.1. Общие положения расчета ферромагнитного резонанса в пленках с наклоном оси легкого намагничивания	279
7.1.1. Общая методология расчета	279
7.1.2. Общая геометрия задачи	280
7.1.3. Введение сферических координат	281
7.1.4. Плотности энергии различных видов	282
7.2. Параллельно-перпендикулярная геометрия	283
7.2.1. Эквивалентность двух выражений для плотности энергии	284
7.2.2. Два характерных варианта наклонной геометрии	285
7.3. Вариант первый: ось легкого намагничивания лежит в плоскости изменения поля	286
7.3.1. Равновесное положение намагниченности в отсутствие внешнего поля	288
7.3.2. Равновесное положение намагниченности в присутствии внешнего поля	290
7.3.3. Ориентационная зависимость минимума энергии	291
7.3.4. Скачкообразное изменение ориентации вектора намагниченности	295
7.3.5. Условия ферромагнитного резонанса	297

7.3.6. Резонансное поле	301
7.3.7. Приближение сильного поля	303
7.4. Вариант второй: ось легкого намагничивания лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости изменения поля	305
7.4.1. Равновесное положение намагниченности в отсутствие внешнего поля	306
7.4.2. Равновесное положение намагниченности в присутствии внешнего поля	310
7.4.3. Решение методом установления	311
7.4.4. Выбор выражений для плотности энергии	313
7.4.5. Некоторые особенности метода установления	314
7.4.6. Равновесная ориентация намагниченности	315
7.4.7. Особенности ориентации намагниченности при малом поле	316
7.4.8. Влияние начальной ориентации намагниченности	318
7.4.9. Замечание о потенциальном характере наблюдаемых зависимостей	320
7.4.10. Условия ферромагнитного резонанса	322
7.4.11. Резонансное поле	324
7.4.12. Приближение сильного поля	325
7.5. О возможности отдельного экспериментального определения константы одноосной анизотропии и намагниченности	327
7.6. Экспериментальное исследование ферромагнитного резонанса в пленках ферритов-гранатов	329
Выводы по главе 7	332
Глава 8. Ферромагнитный резонанс в композиционной среде, состоящей из анизотропных ферритовых частиц	337
8.1. Общая постановка задачи	337
8.1.1. Системы координат	339
8.1.2. Равновесная ориентация намагниченности	341
8.2. Последовательный порядок решения задачи	345
8.2.1. Матрицы переходов	346
8.2.2. Представление полной задачи в виде последовательности отдельных шагов	347
8.2.3. Реализация последовательных шагов решения задачи	348
8.2.4. Компоненты тензора восприимчивости в комплексном виде	356
8.3. Представление компонент тензора восприимчивости через параметры материала и постоянного поля	357
8.4. Процедура усреднения	359
8.4.1. Общая схема процедуры усреднения	359
8.4.2. Усреднение по полярному углу	360
8.4.3. Усреднение по азимутальному углу	361
8.4.4. Суммирование по всем возможным направлениям	363
8.4.5. О порядке численного расчета тензора восприимчивости	363
8.5. Зависимости компонент тензора от частоты	366
8.5.1. Крайние частоты резонансов восприимчивости	367

8.5.2. Особенности процедуры усреднения при изменении величины шага	369
8.5.3. Зависимости компонент тензора от частоты при усреднении по полярному углу	371
8.5.4. Зависимости компонент тензора от параметров среды . . .	373
8.5.5. Усреднение по азимутальному углу	374
8.6. Возможный случай аналитического усреднения.	376
8.7. Формирование заданных свойств магнитной восприимчивости среды.	377
8.7.1. Упорядочение ориентации частиц	378
8.7.2. Упорядочение по полярному углу	379
8.7.3. Упорядочение по азимутальному углу	382
8.7.4. Общие возможности формирования параметров среды . . .	383
Выводы по главе 8	383

Глава 9. Прецессия положения равновесия намагниченности в условиях ориентационного перехода	387
9.1. Общая иллюстрация прецессии положения равновесия.	387
9.1.1. Геометрия задачи и основные уравнения	388
9.1.2. Иллюстрация прецессии положения равновесия	390
9.1.3. Схема образования прецессии положения равновесия . . .	394
9.1.4. Векторная модель	395
9.2. Основные свойства прецессии положения равновесия.	398
9.2.1. Зависимости периода от постоянного и переменного полей	399
9.2.2. Соотношение вынуждающей частоты с собственной	401
9.2.3. Критическое значение частоты возбуждения	403
9.2.4. Влияние диссипации на параметры прецессии положения равновесия	406
9.2.5. Влияние намагниченности на параметры прецессии положения равновесия	407
9.3. Мультирежимный характер прецессии положения равновесия . .	409
9.3.1. Развитие колебаний во времени и прецессионные портреты для различных режимов	409
9.3.2. Некоторые особенности отдельных режимов	413
9.4. Механическая аналогия прецессии положения равновесия	414
9.4.1. Плоский маятник с боковым пружинным подвесом	414
9.4.2. Цилиндрический маятник с боковым пружинным подвесом	416
9.4.3. Формирование колебаний маятника при различных частотах возбуждающей силы	419
9.4.4. Особенности мультирежимного характера колебаний цилиндрического маятника	422
9.5. Специфические свойства мультирежимного характера прецессии положения равновесия намагниченности	423
9.5.1. Переходы между режимами прецессии намагниченности на основе модели потенциала	423
9.5.2. Условия возбуждения режимов прецессии при различных параметрах затухания и амплитудах переменного поля . .	425

9.5.3. Свойства поперечной компоненты намагниченности при различных режимах прецессии	427
9.5.4. Зависимость периода прецессии положения равновесия от амплитуды переменного поля	429
9.6. Прецессия положения равновесия в условиях нарушения симметричности	431
9.6.1. Общие замечания о нарушении симметричности	431
9.7. Нарушение симметричности по постоянному полю	433
9.7.1. Влияние несимметричности постоянного поля на характер прецессии положения равновесия	433
9.7.2. Критичность несимметричности постоянного поля	435
9.7.3. Левая прецессия	436
9.7.4. Механизмы формирования прецессионного портрета	437
9.7.5. Проверка формулы для периода	441
9.7.6. Области существования прецессии положения равновесия	441
9.7.7. Объяснение вида областей существования на основе энергетической модели	444
9.7.8. Зависимость периода прецессии положения равновесия от несимметричности постоянного поля	445
9.7.9. Частотные свойства периода прецессии при несимметричности постоянного поля	448
9.8. Нарушение симметричности по поперечному переменному полю	450
9.8.1. Симметричные условия возбуждения	450
9.8.2. Несимметричное поперечное переменное поле	451
9.8.3. Случаи малой и большой амплитуды	452
9.8.4. Схема образования сгущений малых колец на прецессионном портрете	455
9.8.5. Различие между низким и высоким уровнями возбуждения	457
9.8.6. Период прецессии положения равновесия при различной степени несимметричности переменного поля	458
9.8.7. Критическая степень несимметричности переменного поля	459
9.9. Нарушение симметричности по продольному переменному полю	462
9.9.1. Общая картина колебаний намагниченности при продольной несимметричности переменного поля	462
9.9.2. Механизм образования сгущения малых колец	462
9.9.3. Некоторые общие свойства прецессии при несимметричности переменного поля	464
9.9.4. Компенсирующее воздействие несимметричного постоянного поля	464
Выводы по главе 9	467
Глава 10. Прецессия положения равновесия намагниченности в анизотропной среде	472
10.1. Прецессия положения равновесия намагниченности в среде с одноосной анизотропией.	472
10.1.1. Геометрия задачи	472
10.1.2. Матрица перехода	473

10.1.3. Полная плотность энергии, эффективные поля и уравнения движения в исходной (лабораторной) системе координат	474
10.1.4. Прецессионные портреты	476
10.1.5. Модель образования сгущений и разрежений	478
10.1.6. Критичность нарушения симметрии системы	481
10.1.7. Трансформация сгущения колец при изменении наклона оси анизотропии	482
10.1.8. Компенсация наклона оси постоянным полем	485
10.1.9. Критичность к константе анизотропии	488
10.2. Прецессия положения равновесия намагниченности в среде с кубической анизотропией	489
10.2.1. Геометрия задачи	490
10.2.2. Основные уравнения	491
10.2.3. Ориентация [001]	493
10.2.4. Ориентация [011]	495
10.2.5. Ориентация [111]	497
10.2.6. Прецессионные портреты	499
10.2.7. Критичность нарушения симметрии системы	502
10.3. Особенности дополнительного воздействия постоянного и переменного полей в случае кубической анизотропии.	503
10.3.1. Постоянное поле в плоскости пластины	504
10.3.2. Переменное поле в плоскости пластины	504
10.3.3. Синхронизм с частотой возбуждения	505
10.3.4. Синхронизм с частотой прецессии положения равновесия	508
10.4. Некоторые дополнительные замечания	512
10.5. Кинетика перехода между различными режимами прецессии положения равновесия	513
10.6. Условия наблюдения прецессии положения равновесия в эксперименте	517
10.6.1. Частотно-полевые и энергетические параметры	517
10.6.2. Геометрические параметры	518
10.6.3. Доменная структура	519
10.6.4. О возможности наблюдения прецессии положения равновесия в несимметричных условиях	520
10.6.5. Техника создания полей	521
10.7. Возможные технические применения.	523
10.7.1. Ферромагнитный резонанс	523
10.7.2. Преобразование частоты	523
10.7.3. Компенсация несимметричности	524
10.7.4. Скачкообразный срыв	524
10.7.5. Одноосная анизотропия	525
10.7.6. Кубическая анизотропия	525
10.8. Вопросы для дальнейших исследований.	526
Выводы по главе 10	529
Литература	534