

Министерство образования и науки Украины  
Харьковский национальный университет  
имени В. Н. Каразина

**В. Б. КАЗАНСКИЙ, В. Р. ТУЗ, В. В. ХАРДИКОВ**

# **Электродинамическая теория КОМПОЗИТНЫХ сред**

Монография

Харьков – 2015

УДК 537.876  
ББК 22.313  
К 14

**Рецензенты:**

**Л. Н. Литвиненко** – академик НАНУ, доктор физико-математических наук, директор Радиоастрономического института Национальной академии наук Украины;

**С. А. Погарский** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики СВЧ факультета радиофизики, биомедицинской электроники и компьютерных систем Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина.

*Утверждено к печати решением Ученого совета  
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина  
(протокол № 5 от 27 апреля 2015 года)*

**Казанский В. Б.**

**К 14** Электродинамическая теория композитных сред : монография / В. Б. Казанский, В. Р. Туз, В. В. Хардигов. – Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2015. – 220 с.  
ISBN 978-966-285-257-8

В монографии последовательно излагаются классическая электродинамическая теория композитных сред и отдельные разделы современной электродинамики слоистых сред. В последнем случае речь идет о построении математических моделей, описывающих взаимодействие электромагнитных полей с искусственно созданными пространственно-неоднородными средами и структурами, обладающими сложной композицией и содержащими оптически-активные (анизотропные, гиротропные, киральные) включения.

Для студентов старших курсов, аспирантов и научных сотрудников.

**УДК 537.876**  
**БК 22.313**

ISBN 978-966-285-257-8

© Харьковский национальный университет  
имени В. Н. Каразина, 2015

© Казанский В. Б., Туз В. Р., Хардигов В. В., 2015

© Антюфеева М. С., макет обложки, 2015

# Оглавление

Предисловие.....	7
Введение. Объект и предмет исследования .....	10
<b>Часть 1. Общая электродинамическая теория композитных сред</b>	
<b>Раздел 1. Молекулярное моделирование (метод эффективной среды) .....</b>	<b>16</b>
1.1. Принцип молекулярного моделирования. Базовые соотношения для стационарных полей .....	16
1.1.1. Эффективные параметры композитных сред .....	16
1.1.2. Алгоритм определения эффективных параметров.....	17
1.2. Эффективная диэлектрическая проницаемость мелкослоистых сред (двулучепреломление формы) .....	19
1.2.1. Структура и граничные условия .....	19
1.2.2. Определение тензора эффективной диэлектрической проницаемости .....	19
1.3. Эффективная проводимость ламинированной композитной среды .....	21
1.4. Мелкодисперсная смесь .....	22
1.5. Сфера в однородном поле.....	24
1.5.1. Постановка задачи. Граничные условия .....	24
1.5.2. Электростатический потенциал, поляризация и дипольный момент сферы .....	26
1.6. Эллипсоид в однородном поле .....	27
1.6.1. Постановка задачи. Электростатический потенциал эллипсоида .....	27
1.6.2. Коэффициенты деполяризации и дипольный момент эллипсоида.....	30
1.7. Бинарные композиты с редкими включениями .....	32
1.7.1. Изотропные композиты.....	32
1.7.2. Анизотропные композиты .....	34
1.8. Эффективная магнитная проницаемость .....	34
1.9. Бинарные среды с повышенной концентрацией включений .....	36
1.9.1. Поля возбуждения отдельного элемента .....	36
1.9.2. Трехмерная периодическая структура из сферических элементов.....	37
1.9.3. Двумерные периодические построения .....	39
1.10. Диэлектрики в переменном поле .....	41
1.10.1. Виды поляризации .....	41
1.10.2. Зависимость поляризации от частоты внешнего поля.....	43
1.10.3. Формулы Дебая для диэлектрической проницаемости .....	44
1.11. Водные растворы белковых молекул.....	46
1.11.1. Электродинамическая модель .....	46

1.11.2. Эффективная проницаемость бинарной среды с неоднородными включениями .....	48
1.11.3. Структурный параметр и дипольный момент неоднородной сферы.....	50
1.12. Резонаторный метод измерения диэлектрической проницаемости веществ с большими потерями .....	51
1.12.1. Выбор диапазона и метода измерения водных растворов белков ...	51
1.12.2. Теория метода измерения $\varepsilon$ с использованием $H_{01n}$ -резонатора ...	52
<b>Раздел 2. Регулярные композитные среды с одиночными рассеивателями .</b>	<b>55</b>
2.1. Уравнение для истинных полей в композитной среде.....	56
2.2. Постановка задачи и поля в изотропной полубесконечной композитной среде .....	57
2.2.1. Структура и поля рассеяния .....	57
2.2.2. Зависимость рассеянного поля от возбуждающего поля .....	59
2.3. Интегральные уравнения для возбуждающего поля.....	61
2.4. Решения интегральных уравнений. Эффективные параметры композитной среды .....	64
2.5. Электродинамические особенности изотропных композитных сред.....	65
2.6. Весовая функция усреднения .....	67
2.7. Уравнения Максвелла для усредненных полей.....	69
2.7.1. Связь среднего поля с возбуждающим полем.....	69
2.7.2. Эффективные проницаемости .....	70
<b>Раздел 3. Искусственный диэлектрик с периодическими решетками из проводящих лент .....</b>	<b>72</b>
3.1. Задачи дифракции в многоволновом режиме .....	74
3.1.1. Поля рассеяния ленточного искусственного диэлектрика .....	74
3.1.2. Результаты численного анализа.....	75
3.2. Собственные волны ленточного искусственного диэлектрика.....	80
3.2.1. Задача распространения. Дисперсионные уравнения .....	80
3.2.2. Поля в бесконечной последовательности ленточных решеток.....	85
<b>Часть 2. Специальные главы. Электродинамика слоистых систем</b>	
<b>Раздел 4. Методы исследования слоистых систем. Матрицы передачи .....</b>	<b>96</b>
4.1. Метод дифференциальных матриц передачи ( $4 \times 4$ – матриц Берремана) .....	97
4.1.1. Формализм $4 \times 4$ – матрицы передачи .....	98
4.1.2. Собственные волны (волны Блоха) .....	103

4.1.3. Устойчивость решения. Зоны распространения и нераспространения собственных волн .....	104
4.1.4. Получение коэффициентов отражения и прохождения из матрицы передачи Берремана .....	106
4.2. Метод матриц передачи СВЧ.....	107
4.2.1. Математическое описание СВЧ цепей .....	108
4.2.2. Матрицы передачи СВЧ в одномодовом режиме .....	112
4.2.3. Получение коэффициентов отражения и прохождения из матрицы передачи СВЧ .....	113
4.3. Операторный метод для полубесконечных структур.....	115
4.3.1. Определение бесконечного матричного оператора коэффициента отражения .....	115
4.3.2. Получение коэффициентов отражения и прохождения из оператора отражения полубесконечной системы.....	117
<b>Раздел 5. Композитные среды в волноводах .....</b>	<b>118</b>
5.1. Взаимное преобразование $TE_{mn}$ и $TM_{mn}$ волн в волноводном фильтре ..	119
5.1.1. Модель волноводного фильтра .....	120
5.1.2. Эквивалентные граничные условия .....	122
5.1.3. Матрицы передачи базового элемента и их последовательного соединения .....	123
5.1.4. Собственные волны периодически диафрагмированного волновода .....	124
5.1.5. Преобразование, частотная, поляризация и пространственная селекция полей .....	126
5.2. Композиты в круглом волноводе .....	129
5.2.1. Поля в среде заполнения. Матрица передачи периода .....	130
5.2.2. Коэффициенты рассеяния симметричных волн. Зоны прозрачности и запираания .....	133
5.2.3. Анализ резонансных явлений .....	137
5.2.4. Анализ комплексных частот .....	139
<b>Раздел 6. Магнитогиротропные композитные структуры .....</b>	<b>143</b>
6.1. Усиление магнитооптических эффектов в магнитофотонном кристалле вблизи частоты ферромагнитного резонанса .....	146
6.1.1. Матрица Берремана структуры феррит-полупроводник .....	147
6.1.2. Собственные волны .....	150
6.1.3. Коэффициенты отражения и прохождения линейно поляризованных волн .....	155

6.2. Свойства композита феррит-полупроводник с малыми $\varepsilon$ и $\mu$ (gyrotropic-nihility среда) .....	160
6.2.1. Теория эффективной гиротропной среды.....	162
6.2.2. Коэффициенты отражения и прохождения для gyrotropic-nihility слоя.....	171
<b>Раздел 7. Киральные композитные структуры</b> .....	178
7.1. Поляризаационное преобразование волн в системе киральных слоев....	180
7.1.1. Электромагнитные волны в безграничной киральной среде .....	181
7.1.2. Блочные матрицы передачи.....	183
7.1.3. Собственные волны. Анализ полей отражения и прохождения.....	186
7.2. Характеристики слоистой киральной среды с малыми $\varepsilon$ и $\mu$ (chiral-nihility среда) .....	190
7.2.1. Поля в chiral-nihility среде.....	190
7.2.2. Коэффициенты отражения и прохождения для chiral-nihility слоя .	192
7.2.3. Коэффициенты отражения и прохождения для слоистой chiral-nihility среды .....	194
<b>Литература</b> .....	197
<b>Приложения</b> .....	212
Приложение 1. Эллипсоидальная система координат .....	212
Приложение 2. Суммирование условно сходящихся рядов .....	214
Приложение 3. Диаграмма Коул-Коула.....	215
Приложение 4. Сторонние токи. Векторы Герца.....	216
Приложение 5. Рассеянное поле в сферической системе координат.....	217
Приложение 6. Коэффициенты матрицы передачи <b>A</b> .....	218