

О.Д. Вольпян, А.И. Кузьмичёв

Отрицательное преломление волн

Введение в физику и
технологии
электромагнитных
метаматериалов



УДК 535.3: 537.8

ББК 22.343

В67, К89

Рецензенты:

Е.Д. Белявский, доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры физической и биомедицинской электроники Национального технического университета Украины “Киевский политехнический институт”

К.П. Шамрай, доктор физ.-мат. наук, заведующий отделом теории плазмы института ядерных исследований Национальной Академии наук Украины

Рекомендовано к печати Учёным Советом факультета электроники Национального технического университета Украины “Киевский политехнический институт”, кафедрой полупроводниковой электроники ГОУ ВПО “Московский энергетический институт (технический университет)”

Вольпян О.Д., Кузьмичёв А.И.

Отрицательное преломление волн. Введение в физику и технологию электромагнитных метаматериалов / Под ред. Г.М. Зверева. – К.-М.: Аверс, 2012. – 360 с.

ISBN 966-8934-23-7

Изложены основы физики и технологии метаматериалов, обладающих отрицательным показателем преломления для электромагнитных волн оптического и СВЧ диапазонов.

Для студентов и аспирантов, специализирующихся в области нанофотоники и техники СВЧ, а также научных и инженерно-технических работников.

УДК 535.3: 537.8

ББК 22.343

ISBN 966-8934-23-7

© О.Д. Вольпян, А.И. Кузьмичёв, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	8
	В.1 Немного о терминологии	14
1	ИСТОРИЯ И НАУЧНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ	17
	1.1 Предыстория электромагнитных метаматериалов	18
	1.2 Из лекции проф. Л.И. Мандельштама	32
	1.3 Концепция проф. В.Г. Веселаго для вещества с отрицательным показателем преломления	36
	1.4 Корректировка формул для законов оптики при учёте знака показателя преломления	45
2	ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРВЫХ ОБРАЗЦОВ МЕТАМАТЕРИАЛОВ ГИГАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА	48
	2.1 Первые экспериментальные подтверждения получения реальных метаматериалов	54
	2.2 Экспериментальное подтверждение отрицательного показателя преломления	62
	2.3 Особенности экспериментального выявления отрицательной магнитной проницаемости	76
3	ФОКУСИРУЮЩИЕ ЛИНЗЫ ГИГАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА ИЗ ОДНОРОДНЫХ И ГРАДИЕНТНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ	81
	3.1 Фокусировка излучения плоско-вогнутой линзой с отрицательным показателем преломления	83
	3.2 Метаматериалы с градиентом показателя преломления	89
	3.3 Градиентные фокусирующие линзы	99
4	ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАМАТЕРИАЛОВ ГИГАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА	111

5	ОСВОЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН	116
5.1	Отрицательная магнитная проницаемость метаматериала на основе резонаторов из разрезанных колец в терагерцевом диапазоне	121
5.2	Технология получения многослойных метаматериалов терагерцевого диапазона на основе резонаторов из разрезанных колец	154
5.3	Метаматериалы на основе резонаторов из спаренных проводников	163
5.4	Плазмонные резонансы в метаматериалах	181
5.5	Принцип Бабинэ и его реализация в метаматериалах с отверстиями или в виде сеток	187
5.6	“Одно- и двукратно отрицательные” метаматериалы	199
5.7	Многослойные сетчатые метаматериалы	205
6	НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАМАТЕРИАЛОВ	225
6.1	Линзы с субволновым разрешением	225
6.2	Получение эффекта невидимости, “плащ-невидимка”	241
7	АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ МЕТАМАТЕРИАЛОВ	257
7.1	Структуры на основе ВЧ передающих линий	257
7.2	Фотонные и электромагнитные кристаллы	262
7.3	Металпокрытия с градиентом показателя преломления (наноградиентные оптические покрытия)	263
7.4	Структуры на основе газо-плазменных образований	271
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	276
П1	ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ПРАВАЯ И ЛЕВАЯ СИСТЕМЫ ВЕКТОРОВ E, H и k	277

П2 ПРИЛОЖЕНИЕ 2.	279
ИСКУССТВЕННЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ И МАГНЕТИКИ	
П 2.1 Периодические пространственные мезоструктуры из тонких проволок, генерация плазмонов низкой частоты	279
П 2.2 Магнетизм проводниковых структур и усиление нелинейных эффектов	286
П3 ПРИЛОЖЕНИЕ 3.	313
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО МЕТАМАТЕРИАЛА В ВИДЕ СЕТКИ	
П4 ПРИЛОЖЕНИЕ 4.	325
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ ФОТОННЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ	
ЛИТЕРАТУРА	340