

535.3

В71

О.Д. Вольпян, А.И. Кузьмичёв

Отрицательное преломление волн

Введение в физику и
технологии
электромагнитных
метаматериалов



О. Д. Вольпян, А. И. Кузьмичёв

Отрицательное преломление волн

**Введение в физику и технологию
электромагнитных метаматериалов**

Под редакцией академика Российской Академии
инженерных наук им. А. М. Прохорова,
доктора физ.-мат. наук, профессора Г. М. Зверева

Киев - Москва
“Аверс”
2012

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	Плазменные 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.	277
	ПРАВая И ЛЕВАЯ СИСТЕМы ВЕКТОРОВ E, H и k	

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