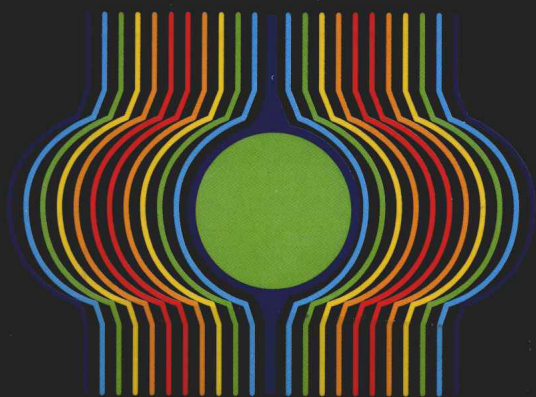


左手材料理论及其应用

Theory and Applications of Metamaterials

吴群 孟繁义 傅佳辉 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

左手材料理论及其应用

Theory and Applications of Metamaterials

吴群 孟繁义 傅佳辉 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

左手材料理论及其应用 / 吴群, 孟繁义, 傅佳辉著.
—北京: 国防工业出版社, 2010.11
ISBN 978 - 7 - 118 - 06801 - 6

I. ①左... II. ①吴...②孟...③傅... III. ①功能材料—研究 IV. ①TB34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 210145 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 9% 字数 249 千字

2010 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 40.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评

审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金

第六届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 邢海鹰 贺 明

委员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

前 言

近年来,左手材料由于其不同寻常的电磁特性在应用电磁学、固体物理学、材料科学和应用光学领域获得越来越多的关注,是当前国际电磁学研究的前沿课题之一。本书作者希望能够根据自己多年在该领域从事科研实践的成果积累,通过此著作向广大读者介绍左手材料发展现状和应用前景的相关知识。

与普通材料相比,左手材料具有一系列完全相反的电磁特性,如双负特性、左手特性、后向波特特性、负折射特性、逆多普勒效应及逆切伦科夫辐射效应等。左手材料在谐振器、滤波器、功率耦合器、天线等微波器件、光子器件、隐身等领域具有非常广泛的应用前景。2003年,人工复合左手材料的成功被 *Science* 杂志评为当年世界十大科学突破之一。可以预见,其必将为未来科技、经济和社会发展产生重要影响。左手材料研究的突破催生了超常媒质 (Metamaterial) 概念的提出。最初,人们还简单地把超常媒质等效为左手材料。随着研究的深入,超常媒质概念的范围进一步扩展,它不仅包括介电常数和磁导率同时为负的左手材料,也包括介电常数或者磁导率单独小于 1 甚至小于 0 的特殊电磁材料。

目前,左手材料研究取得了很大发展,国外已经出版了几本相关英文专著,而国内目前还很少有中文著作出现,这不能不说是一大遗憾,无疑对我国学者在该领域的研究和交流产生了一定的阻碍。为了缩短差距,让更多的学者了解和参与到左手材料甚至是超常材料领域的研究中来,作者将把在该领域的多年研究积累以专著的形式出版,力争为我国在左手材料乃至超常材料领域的发展起一定的促进作用。

左手材料的出现为电磁理论研究开辟了崭新的发展方向,由此可见,即使是传统的、经典的电磁理论问题也会有不断创新的课题,科学永无止境。本书作者遵循“以左手材料电磁特性分析结合激发机理研究为基础,以性能优良的左手材料设计、验证方法承上启下,以利用左手材料改善微波器件性能的应用效果为验证标准”的思路,实现普及左手材料基本理论,促进左手材料研究领域在国内迅速发展的目的。因此,在文字上力求简洁易读、清晰流畅,注重理论结合实践的力度。通过列举大量仿真实例突出基础性、系统性和实用性。本书第1章,较为详细地介绍了左手材料的概念起源,阐述了左手材料研究领域的发展历史、左手材料的应用领域,讨论了左手材料的几个主要的反常电磁特性及它们的理论来源等。第2章,阐述了利用时域有限差分方法(FDTD)对左手材料电磁特性的计算方法,通过仿真结果向读者展示左手材料包括后向波特性和负折射特性在内的一系列反常电磁特性是如何由于左手材料的引入而产生的。第3章,求解了左手材料几何体以及左手材料作为目标覆盖层时的散射场严格解,并详尽分析了它们的远、近场散射特性。第4章,针对多种具有共形超常媒质隐身覆盖层的隐身条件以及隐身特性进行了分析,并对损耗对隐身效果的影响进行讨论。第5章,致力于从多个研究角度建立左手材料的本构参数模型,并对所建立模型的正确性和准确性进行了验证,深入分析了现有左手材料的激发机理。第6章,论述了设计性能优良的新型左手材料的一些基本方法、手段以及验证这些左手材料设计正确性的常用方法和它们的理论依据。第7章,讨论了超常媒质在新型微带天线、喇叭天线以及漏波天线中的应用,并对超常媒质在这些新型天线中的应用机理、应用方法以及应用效果进行了详细阐述。第8章,系统论述了各向异性超常媒质矩形波导的电磁特性,求解并分析了各向异性超常媒质矩形波导中的波动方程和场分布方程。第9章,阐述了三维各向异性超常媒质交错结构的亚波长谐振条件和谐振模式,并设计了一种能够同时缩小长度和宽度的改进的小型化谐振腔以及相应的谐振腔式滤

波器。

本书是作者在该领域多年研究而凝练出的成果总结,也是课题组全体成员不懈努力的结果。吴群作为主编对全书进行统稿,主要编写人员有吴群、孟繁义、傅佳辉、张狂、王海龙、武明峰、潘攀、梁英等,另外杨国辉、王玥、汤奇、张少卿、边莉、贺训军等青年教师、博士后研究人员和研究生直接参与了本书的编写工作。同时,本书的编写得到各方同行专家的关心和指教,使得书稿不断得到充实和完善,在此深表谢意。限于编者的学识和水平有限,书中难免有欠妥之处,敬请读者指正。

编 者

2010年2月于哈尔滨

目 录

第1章 绪论	1
1.1 左手材料的发展历程	1
1.2 左手材料的异常电磁特性	8
1.2.1 左手特性	9
1.2.2 后向波特特性	10
1.2.3 负折射特性	11
1.3 左手材料以及超常媒质的应用领域	14
1.4 左手材料的实验验证	22
1.5 人工磁导体	25
第2章 左手材料时域有限差分法的研究	34
2.1 左手材料的时域有限差分法(FDTD)电磁模型	34
2.1.1 左手材料电磁参数模型	34
2.1.2 麦克斯韦方程与 Yee 氏算法	37
2.1.3 解的稳定性及数值色散问题	39
2.1.4 激励源的类型与设置	40
2.1.5 左手材料的 FDTD 差分格式	43
2.1.6 电磁激励的选择	48
2.2 左手材料电磁特性分析与仿真	50
2.2.1 左手材料的负折射率	50
2.2.2 左手材料的平面透镜效应	56
2.2.3 相位补偿效应	61
第3章 左手材料模型的近远场电磁特性	65
3.1 水平电偶极子激励单层无耗左手材料球电磁特性	65
3.1.1 水平电偶极子激励球的普适电磁模型	65

3.1.2	水平电偶极子激励球的近场电磁特性	65
3.2	左手材料覆盖的理想金属圆柱体电磁特性	72
3.2.1	具有介质覆盖层的金属圆柱体的普适散射 模型	72
3.2.2	左手材料覆盖的金属圆柱体的近场散射特性	75
3.2.3	左手材料覆盖的金属圆柱体的远场散射特性	81
3.3	左手材料覆盖的普通介质圆柱体电磁特性	88
3.3.1	双层介质圆柱体的普适散射模型	88
3.3.2	无耗左手材料覆盖的普通介质圆柱体的近场散 射特性	91
3.3.3	无耗左手材料覆盖的普通介质圆柱体的远场散 射特性	97
3.3.4	有耗左手材料覆盖的普通介质圆柱体的近场散 射特性	101
3.3.5	有耗左手材料覆盖的普通介质圆柱体的远场散 射特性	106
第4章	超常媒质模型的隐身特性研究	109
4.1	无限长圆柱体隐身特性	110
4.1.1	无限长圆柱体隐身特性分析	110
4.1.2	无限长圆柱体隐身特性数值计算结果	115
4.2	无限长棱柱体隐身特性	117
4.2.1	无限长棱柱体隐身条件求解	117
4.2.2	无限长棱柱体隐身特性研究	123
4.3	球体隐身特性	132
4.3.1	电磁模型的解析解	132
4.3.2	计算结果分析	141
4.4	椭球体隐身特性	145
4.4.1	椭球体隐身条件求解	145
4.4.2	椭球体隐身特性研究	150
第5章	左手材料的本构参数模型	154
5.1	金属细导线阵列有效介电常数模型	154

5.1.1	基于等离子体理论的有效介电常数模型	155
5.1.2	基于本构关系的有效介电常数模型	156
5.1.3	等效传输线型有效介电常数模型	159
5.2	开口谐振环阵列有效磁导率模型	165
5.3	左手材料的神经网络建模	172
5.3.1	神经网络建模原理	173
5.3.2	实例分析	174
5.3.3	实验结果及分析	176
第6章	左手材料的设计与验证	180
6.1	体型左手材料设计	180
6.1.1	单元结构设计	180
6.1.2	左手材料验证	189
6.2	左右手复合传输线的精确解析表征	192
6.2.1	左手传输线基本理论	193
6.2.2	左手传输线等效电路模型	195
6.2.3	全波仿真结果分析	197
6.3	新型平面微带线左手材料设计	198
6.4	小型化平面微带线左手材料设计	203
6.4.1	结构设计	204
6.4.2	后向波特性和验证	209
6.5	互补螺旋谐振环平面微带线左手材料设计	211
6.5.1	结构设计	211
6.5.2	特性验证	215
第7章	超常媒质在天线技术中的应用	217
7.1	基于左手材料的小型化微带贴片天线设计与实现	217
7.2	平面型左手材料的微带环形天线	222
7.3	基于左手波导的漏波天线设计与实现	225
7.3.1	波纹加载的左手波导等效电路	226
7.3.2	波纹加载的左手波导色散特性	228

7.3.3	波纹加载的左手波导后向波效应	229
7.3.4	漏波天线设计与实现	230
7.4	基于零折射喇叭天线的设计与实现	232
7.4.1	零折射材料	234
7.4.2	基于零折射材料透镜的小型化喇叭天线设计 与实现	236
第8章	超常媒质矩形波导	243
8.1	各向异性矩形波导理论分析	244
8.1.1	TE 模式电磁波的传输特性	246
8.1.2	TM 模式电磁波的传输特性	251
8.2	计算结果	256
8.2.1	TE 模式的计算结果	256
8.2.2	TM 模式的计算结果	259
8.3	理论验证	261
第9章	超常媒质小型化谐振腔	264
9.1	引言	264
9.2	三维各向异性超常媒质交错结构的亚波长谐振 特性	266
9.3	小型化超常媒质谐振腔	278
9.4	小型化腔体式滤波器设计与实现	287
9.4.1	同轴馈电的小型化滤波器的设计与实现	287
9.4.2	共面波导馈电的小型化滤波器的设计与实现 ...	290
参考文献		293

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Development of left-handed metamaterial	1
1.2 Extraordinary electromagnetic properties of left-handed metamaterial	8
1.2.1 Left-handed property	9
1.2.2 Backward wave property	10
1.2.3 Negative refraction property	11
1.3 Applications of metamaterials	14
1.4 Experimental verification of left-handed metamaterials	22
1.5 Artificial magnetic conductor	25
Chapter 2 FDTD analysis of left-handed metamaterial	34
2.1 FDTD modeling of left-handed metamaterial	34
2.1.1 Electromagnetic parameter description of left-handed metamaterial	34
2.1.2 Maxwell's equations and Yee's method	37
2.1.3 Solution stability and numerical dispersion	39
2.1.4 Different excitation sources	40
2.1.5 FDTD interaction form of left-handed metamaterials	43
2.1.6 The choice of excitation sources	48
2.2 Analysis and simulation of left-handed metamaterial	50
2.2.1 Simulation of negative refraction index of left-handed metamaterial	50
2.2.2 Flat lens constructed from left-handed metamaterial	56
2.2.3 Phase compensation effect of left-handed metamaterial	61
Chapter 3 Near- and far-field properties of left-handed	

metamaterials	65
3.1 Electromagnetic properties of a left-handed metamaterial sphere excited by a horizontal electric dipole	65
3.1.1 General electromagnetic model of a sphere excited by a horizontal electric dipole	65
3.1.2 Near-field properties of a sphere excited by a horizontal electric dipole	65
3.2 Electromagnetic properties of a PEC cylinder covered by left-handed metamaterials	72
3.2.1 General electromagnetic model of a PEC cylinder covered by uniform material	72
3.2.2 Near-field scattering properties of a PEC cylinder covered by left-handed metamaterials	75
3.2.3 Far-field scattering properties of a PEC cylinder covered by left-handed metamaterials	81
3.3 Electromagnetic properties of a dielectric cylinder covered by left-handed metamaterials	88
3.3.1 General model of a double-layered dielectric cylinder	88
3.3.2 Near-field scattering properties of a dielectric cylinder covered by lossless left-handed metamaterials	91
3.3.3 Far-field scattering properties of the dielectric cylinder covered by lossless left-handed metamaterials	97
3.3.4 Near-field scattering properties of the dielectric cylinder covered by lossy left-handed metamaterials	101
3.3.5 Far-field scattering properties of the dielectric cylinder covered by lossy left-handed metamaterials	106
Chapter 4 Invisible properties of metamaterials	109
4.1 Invisible properties of an infinitely long cylinder	110
4.1.1 Analysis of the invisible properties of an infinitely long cylinder	110
4.1.2 Numerical results of the invisible properties of the infinitely long cylinder	115
4.2 Invisible properties of a infinitely long polygonal	

cloak	117
4. 2. 1 Analysis of the invisible conditions of an infinitely long cylinder	117
4. 2. 2 Invisible properties of the infinitely long polygonal cloak	123
4. 3 Invisible properties of a metamaterial sphere	132
4. 3. 1 Analytical solution of the invisible sphere model	132
4. 3. 2 Calculation results	141
4. 4 Invisible properties of a metamaterial axiolytic cloak	145
4. 4. 1 Analytical solution of the invisible axiolytic cloak	145
4. 4. 2 Invisible properties of a metamaterial axiolytic cloak	150
Chapter 5 Constitutive parameter model of left-handed metamaterials	154
5. 1 Effective permittivity model of wired-array	154
5. 1. 1 Effective permittivity model based on plasma theory	154
5. 1. 2 Effective permittivity model based on constitutive equation	156
5. 1. 3 Effective permittivity model based on equivalent transmission line	159
5. 2 Effective permeability model of Split Ring Resonator Array	165
5. 3 Modeling of left-handed metamaterial based on Neural network	172
5. 3. 1 Theory of neural network modeling	173
5. 3. 2 Case study	174
5. 3. 3 Experiment results and analysis	176
Chapter 6 Design and Implementation of left-handed metamaterials	180
6. 1 Design of bulk metamaterials	180
6. 1. 1 Designing of cell structure	180
6. 1. 2 Verification of left-handed metamaterial	189

6.2	Characterization of composite right/left handed transmission line	192
6.2.1	Basic theory of composite right/left handed transmission line	193
6.2.2	Equivalent circuit model of composite right/left handed transmission line	195
6.2.3	Full-wave simulation results	197
6.3	Design of a novel left-handed transmission lines	198
6.4	Design of miniaturized left-handed transmission lines	203
6.4.1	Structure design.	204
6.4.2	Verification of backward-wave properties	209
6.5	Design of left-handed metamaterial with complementary spiral resonator	211
6.5.1	Structure design	211
6.5.2	Verification of left-handed properties	215
Chapter 7	Applications of metamaterials in antennas	217
7.1	Design and implementation of miniaturized microstrip patch antenna based on left-handed metamaterials	217
7.2	Microstrip loop antenna based on planar left-handed metamaterials	222
7.3	Design and implementation of leaky-wave antenna based on left-handed waveguide	225
7.3.1	Equivalent circuit of corrugation loaded left-handed waveguide	226
7.3.2	Dispersion properties of corrugation loaded left-handed waveguide	228
7.3.3	Backward-wave properties of corrugation loaded left-handed waveguide	229
7.3.4	Design and implementation of leaky wave antenna	230
7.4	Design and implementation of zero-index horn antenna	232
7.4.1	Zero Index Metamaterials	234