



同济大学 1907-2017
Tongji University



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

江海涛 陈鸿 著

含特异材料(Metamaterials)的光子晶体及 相关问题的理论研究

Theoretical Study on the Photonic Crystals
with Metamaterials and Other Related Problems



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



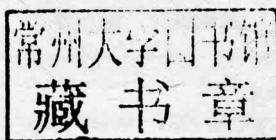
同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

江海涛 陈 鸿 著

含特异材料(Metamaterials)的光子晶体及 相关问题的理论研究

Theoretical Study on the Photonic Crystals
with Metamaterials and Other Related Problems



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书采用转移矩阵和时域有限差分方法,分别研究了含两类特异材料(Metamaterials)的一维光子晶体的输运特性。这两类特异材料包括负折射率材料(介电常数和磁导率同时为负,又称双负材料或左手材料),以及介电常数为正和磁导率为负(或介电常数为负和磁导率为正)的单负材料。

本书适于相关研究人员使用,也可供相关专业研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

含特异材料(Metamaterials)的光子晶体及相关问题的理论研究/江海涛,陈鸿著. —上海:同济大学出版社,2017.8

(同济博士论丛/伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-6842-4

I. ①含… II. ①江… ②陈… III. ①特种材料—光学晶体—研究 IV. ①TB383 ②O7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 067599 号

含特异材料(Metamaterials)的光子晶体及相关问题的理论研究

江海涛 陈 鸿 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 李小敏 胡晗欣

责任校对 谢卫奋 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjiipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 7.25

字 数 145 000

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6842-4

定 价 42.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关侗红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何品晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城	莫天伟	夏四清	顾 明	顾祥林	钱梦騄
徐 政	徐 鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	阎耀保	黄一如	黄宏伟	黄茂松
戚正武	彭正龙	葛耀君	董德存	蒋昌俊	韩传峰
童小华	曾国荪	楼梦麟	路秉杰	蔡永洁	蔡克峰
薛 雷	霍佳震				

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姗 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际,喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行,倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时,我曾以《百年同济,大学对社会的承诺》为题作了演讲,如今看到付梓的“同济博士论丛”,我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果,也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色,向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学,历经 110 年历史风云,承古续今、汇聚东西,秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,发扬自强不息、追求卓越的精神,在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行,谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今,同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才,包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生,薪火相传,将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任,她的社会责任就是融入国家的创新体系之中,成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新,对实施创新驱动发展战略作出系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首,强调创新是引领发展的第一动力,要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略,以科技创新为核心带动全面创新,以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版110余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017年5月

前言

近年来,通过设计周期性结构来控制电磁波与凝聚态物质的相互作用引起了人们的极大兴趣。当结构的晶格常数可与波长比拟时,波的多重散射机制起主导作用,典型结构有具有 Bragg 能隙的普通(仅含正折射率材料)光子晶体。当结构的晶格常数远小于波长时,局域共振机制起主导作用,此类亚波长周期性结构又被称为特异材料。特异材料能够带来许多在常规材料没有的新奇的物理现象,如负折射、逆多普勒效应、完美成像等。由于特异材料在基础研究及应用方面的重要意义,它被美国《科学》杂志列为 2003 年十大重大突破之一。

对普通光子晶体,人们已进行了广泛而深入的研究。对特异材料,人们也做了大量的初步研究。然而,对含特异材料的光子晶体,这方面的研究还很少。由于特异材料奇异的电磁特性,可以想象含特异材料的光子晶体中必定蕴含着许多崭新的物理机制。对此类特殊周期性结构的研究将会拓宽人们对复杂人工结构中光子输运行为的认识,并发现一系列难以预计的新的应用。

本书采用转移矩阵和时域有限差分方法,分别研究了含两类特异材料的一维光子晶体的输运特性。这两类特异材料包括负折射率材料

(介电常数和磁导率同时为负,又称双负材料或左手材料),以及介电常数为正和磁导率为负(或介电常数为负和磁导率为正)的单负材料。本书的最后还对光子晶体耦合腔波导的色散特性这一相关问题做了理论上的研究。

本书的第2章研究由正、负折射率材料交替生长形成的一维光子晶体的性质。我们发现,由于相位补偿机制,该结构存在一带边几乎不随入射角度和偏振变化的零平均折射率全向能隙。这一特性可用来设计带宽固定的全角度反射器。通过掺杂在零平均折射率能隙中引入的缺陷模同样对入射角度和偏振的变化很不敏感,而且跟晶格常数的标度(scaling)无关。对普通的一维掺杂光子晶体,实现大角度滤波非常困难。而利用零平均折射率能隙中缺陷模的奇特性则可以设计小型化大角度滤波器。最后,利用周期性加载集总电容-电感元件形成的左手微带线,可从实验上观测到零平均折射率能隙。

本书的第3章研究由两种单负材料交替生长形成的一维光子晶体的性质。我们发现,该结构存在一个不同于Bragg能隙的零有效相位能隙。该能隙的形成源于迅衰场(evanescent wave)之间的相互作用,完全不同于通常的Bragg相干散射机制。这种基于局域共振的能带形成机制(类似固体物理中的紧束缚模型)使得零有效相位能隙具有跟Bragg能隙完全不同的特点,即与晶格常数的标度和涨落无关,而且对入射角度和偏振的变化很不敏感。此外,给定材料参数,零有效相位能隙能够通过调整两种材料厚度的比值扩展得很宽,而零平均折射率能隙不行。零有效相位能隙的这些特点可用来设计带宽固定的宽频带全角度反射器。我们用传输线模型解释了零有效相位能隙的奇异性质。利用基于零有效相位能隙构成的光量子阱结构,可以设计小型化多通道滤波器。对普通一维掺杂光子晶体,当材料参数给定后,结构的品质因子的提高

须以增大体积为代价。然而,对含单负材料的一维掺杂光子晶体,由于缺陷模的半高宽可以通过改变两种材料厚度的比值来调节,因而在提高品质因子的同时可以大大减小体积。这一特性可用来设计具有高品质因子的小型化滤波器。最后,我们用开口金属谐振环阵列和金属叉阵列分别等效两种单负材料,设计了实际的含单负材料的一维光子晶体。用时域有限差分方法对该结构进行全场分析后的结果证实了零有效相位能隙的存在。

本书的第4章研究了光子晶体耦合腔波导的色散特性。我们发现,在判断正常色散还是反常色散时,人们易忽略电磁波的相位累积效应。例如,对于一个二维圆柱体正方形阵列中在某个特定方向上周期性引入缺陷后的结构,有文献认为仅通过调节相邻缺陷间的距离也可得到反常色散。我们分析认为,由于单个缺陷模的场分布只有一种对称性,因而这种二维耦合腔波导在缺陷排列的方向上等效为一维耦合腔链。我们计算了一维光子晶体耦合腔波导的能带和有效折射率,发现所谓的反常色散只是光子能带在第一布里渊区折叠后的假象。最后,我们通过紧束缚方法说明光子晶体耦合腔波导中杂质带的色散性质取决于相邻缺陷间电磁场的耦合特性,而不是相邻缺陷间距离的大小。

目 录

总序	
论丛前言	
前言	

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 光子晶体简介	2
1.2.1 光子晶体概述	2
1.2.2 光子晶体中的负折射现象	3
1.3 左手材料(负折射率材料)简介	4
1.3.1 左手材料的提出	4
1.3.2 左手材料的制备	6
1.3.3 左手材料的(潜在)应用	8
1.4 光子晶体和特异材料的异同	11
1.5 含特异材料的光子晶体	12
第 2 章 含双负材料的一维光子晶体的特性	15
2.1 概述	15
2.2 零平均折射率全向能隙	17
2.3 零平均折射率能隙中的缺陷模	23

2.4	零平均折射率能隙的实验验证	26
2.5	本章小结	28
第3章	含单负材料的一维光子晶体的特性	29
3.1	概述	29
3.2	零有效相位能隙	30
3.3	传输线模型	37
3.4	零有效相位能隙和零平均折射率能隙的异同	43
3.5	基于零有效相位能隙的光量子阱结构	44
3.6	宽频带的全向能隙	46
3.7	具有高品质因子的小型滤波器	51
3.7.1	缺陷模频率的本征方程	52
3.7.2	有限周期结构的缺陷模	57
3.8	时域有限差分数值模拟	60
3.9	本章小结	65
第4章	光子晶体耦合腔波导的色散特性	67
4.1	概述	67
4.2	由能带折叠产生的反常色散	68
4.3	紧束缚方法	75
4.4	本章小结	78
第5章	结论与展望	80
5.1	结论	80
5.2	进一步工作的方向	81
	参考文献	83
	后记	100

第 1 章

绪 论

1.1 概 述

近年来,通过设计周期性结构来控制电磁波与凝聚态物质的相互作用问题受到人们的极大关注。结构的周期长度可与电磁波波长比拟或者远小于电磁波波长。在 1987 年,Yablonovitch^[1]和 John^[2]各自独立提出了光子晶体(photonic crystals)的概念。光子晶体是周期长度可与电磁波波长比拟的周期性介电结构或金属-介电结构。它的最显著特征是具有光子带隙(photonic bandgaps,简称 PBGs)。频率落在光子带隙中的电磁波的传播被禁止,这一性质被用来调控光子流的运动。2000 年前后,Smith 等^[3-5]通过设计周期长度远小于电磁波波长的周期性金属-介电结构,实现了 Veselago^[6]于 1968 年在理论上设想的左手材料(left-handed materials),并通过实验观察到了微波波段的电磁波通过这种人工媒质与空气的交界面时发生的负折射现象。由于这类周期性复合结构具有单元结构所没有的新的功能和性质,它们又被称为特异材料(metamaterials)。此外,亚波长尺度的表面微结构能够产生许多新的表面电磁模,带来包括透射增强等一系列奇异现象^[7-9]。

1.2 光子晶体简介

1.2.1 光子晶体概述

众所周知,电子在固体晶格中输运时,由于电子波受到周期性势场的布拉格散射,会形成能带结构,带与带之间可能存在带隙。电子波的能量如果落在带隙中,传播是禁止的。其实,不管任何波,只要受到周期性调制,都有能带结构,也都有可能出现带隙。能量落在带隙中的波是不能传播的,电磁波也不会例外。当电磁波在周期性介质或金属-介质材料中传播时,电磁波将会受到多重散射。由于散射波之间的干涉作用,电磁模式形成能带结构。在某些频率下,电磁波不能在其中传播,形成光子带隙。这种具有光子带隙的周期性复合结构被称为光子晶体或者光子带隙材料^[1,2]。它的最显著特点是可以像半导体调控电子运动那样调控光子的运动,为操纵电磁波的输运提供了一个理想的工作平台。尽管光子晶体和半导体在调控波的原理上类似,但光子晶体在可调性方面远远优于半导体材料。例如,掺入光子晶体中的缺陷可具有任意尺寸和形状,而且缺陷的介电常数可以在很大的范围内选择。因此,光子带隙中的缺陷态可以根据需要调至任一频率处。相比较而言,掺杂半导体中的杂质态的可调性要小得多。此外,人们还可以通过调整结构的对称性来控制光子局域(缺陷)态模式的对称性,例如奇模或者偶模。所有这些半导体材料所没有的新特点使得人们能够在新的“维度”上调控光子流的运动。尽管光子晶体的最初提出是为了抑制自发辐射从而降低激光器的阈值^[1],但随着人们对光子晶体的深入研究,越来越多的基于光子晶体的应用不断涌现了出来。其中具有代表性的应用包括:高效率天线衬底、高品质谐振腔、激光器、光子晶体光纤、波导、基于光子晶