



当代
杰出青年
科学文库

等离子体光子晶体理论

刘少斌 章海锋 莫锦军 孔祥鲲 刘 崧 著



科学出版社

当代杰出青年科学文库

等离子体光子晶体理论

刘少斌 章海锋 莫锦军 孔祥鲲 刘 崧 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

光子晶体是介质在空间中的周期性分布,作为一种新的“光子”材料已广泛应用于各种微波器件的设计中。由于等离子体的可调性,等离子体光子晶体较传统的光子晶体具有更为广泛的应用前景。

全书共 14 章:第 1~4 章介绍光子晶体以及等离子体光子晶体的基本概念和发展现状以及等离子体的物理特性和相关算法,并对主要计算光子晶体的技术进行了概述,尤其强调了主流算法在处理等离子体光子晶体时的缺陷及解决方案;第 5~10 章主要对一维和二维等离子体光子晶体的理论分析和相关器件设计进行阐述;第 11~14 章对三维等离子体光子晶体在不同条件下的色散特性和器件设计进行介绍,如不同晶格条件、不同磁化模式以及各向异性条件。

本书可供从事微波技术、计算电磁学、光学和光通信、电子科学与技术、应用物理和凝聚态物理等领域研究和开发工作的科技人员参考,也可以作为高等院校相关专业的高年级本科生、研究生和教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

等离子体光子晶体理论/刘少斌等著. —北京:科学出版社,2016.6

ISBN 978-7-03-048130-6

I. ①等… II. ①刘… III. ①等离子体-光学晶体-研究 IV. ①O53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 090144 号

责任编辑:惠 雪 崔慧娴 曾佳佳/责任校对:李 影 刘亚琦

责任印制:张 倩/封面设计:许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京彩虹伟业印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张:35 1/4

字数:711 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在信息技术高速发展的今天,集成电路技术已被广泛应用于通信系统之中。微电子技术和超大规模集成电路技术已经广泛应用于许多微波通信器件中,如滤波器、波导、耦合器和天线等。而基于半导体技术的集成电路技术,将不可避免地面临发热量大和响应时间长等问题。在提倡节能减排和绿色环保的今天,工程师们在制造微波器件时,不会将目光仅仅局限在传统的半导体材料上,因此光子晶体 (photonic crystals) 这种新型的“光子半导体”成为一种较好的选择。尤其是近 20 多年以来,光子晶体已广泛应用于各种微波器件的设计中。然而,对于传统的介质光子晶体而言,禁带是不可调谐的。光子晶体的拓扑结构和加工误差将直接影响带隙特性。为了克服这个缺点,学者们在光子晶体中引入电磁超材料 (metamaterial),以获得可调谐性禁带。在自然界,等离子体能被视为一种电磁超材料,而且其频率可以涵盖整个微波波段,这意味着等离子体光子晶体可以用来设计可调谐和可重构的微波器件,这在民用和军事上都有着巨大的应用前景。如何在理论上给出等离子体光子晶体器件的设计方案,了解和掌握等离子体光子晶体的电磁特性成为不可回避的问题。而理论上的一维和二维模型在实际应用中不具有普适性,在工程应用中一维和二维问题本质上都是有限的三维结构,所以在理论上充分研究三维等离子体光子晶体的电磁特性是等离子体光子晶体器件走向实用过程中必不可少的一环。值得一提的是,等离子体的介电常数是关于频率的函数而且符合 Drude 模型,在数学模型上与金属、超导体和半导体等色散介质相同。这意味着等离子体光子晶体器件设计的理论和方法同样适用于含以上色散介质的光子晶体器件。因此,在理论上系统地给出等离子体光子晶体的电磁特性和相关器件的设计方法是十分必要的,应当引起业内人士足够的关注。

另外,要实现等离子体光子晶体电磁特性和相关器件的研究和设计,理论上的计算和仿真是必不可少的。现有的一些商业软件 (如 CST、HFSS、COMSOL、R-Soft 等) 已经可以实现对常规介质光子晶体特性的计算和仿真,甚至可以对等离子体光子晶体的传输特性进行计算。然而,这些仿真都是由国外的软件公司开发的,“黑盒”性强,所以长期依赖国外的仿真软件不利于国家科技的长期发展,并给国家安全带来巨大隐患。因此,在现有的基础上,改进和创新等离子体光子晶体的计算方法成为一个亟待解决的问题。因此,弥补和改进传统计算方法上的不足,使其更具有普适性就显得十分重要了。这为将来开发自主知识产权的相关计算软件奠定了基础。特别是最近几年,突破对国外仿真软件的过度依赖也越来越被业内的

专家学者所关注。基于以上原因,我们编写了本书。目的是将最近几年从事等离子体光子晶体的特性研究的一些成果以及国内外同行的一些相关工作汇编成册,供从事微波技术、计算电磁学、光学和光通信、电子科学与技术、应用物理和凝聚态物理等领域研究和开发工作的科技人员参考,从而起到抛砖引玉的作用。

全书共 14 章。第 1 章是对光子晶体和等离子体光子晶体的一些基本概念和涉及的一些算法知识进行概述;第 2~5 章主要侧重于等离子体的物理特性、FDTD 算法以及等离子体光子晶体的计算方法的发展,对主流的计算方法进行探讨和分析,使其能用于对等离子光子晶体进行计算;第 6~8 章主要从一维等离子体光子晶体的应用角度出发提出不同解决方案,设计了一系列的全向反射器及其相关电磁特性;第 9、10 章主要用 PWE、FDTD 和 FDFD 等方法对二维等离子体光子晶体的电磁特性进行了研究,内容涉及二维等离子体光子晶体的线缺陷、点缺陷、全向反射带隙展宽、全角负折射和自准直等问题(第 9 章主要侧重于对二维等离子体光子晶体的基本色散和传输特性进行讨论,第 10 章主要侧重于对二维等离子体光子晶体的器件设计进行介绍);第 11 章主要介绍了三维等离子体光子晶体的基本电磁特性,内容主要关注三维等离子体光子晶体在不同晶格条件下(立方体、钻石晶格)和不同磁光效应下(磁光 Voigt、Faraday 效应)的色散特性;第 12 章对三维等离子体光子晶体的禁带展宽技术进行了介绍,如引入新型晶格结构、各向异性介质;第 13 章对三维等离子体光子晶体在微波器件设计中的应用进行了探索,并就不同磁光条件下的光开关设计技术给出了一个简单的解决方案;第 14 章对更为普适情况下的三维等离子体光子晶体的特性进行了研究,并指出了本书还未详尽阐述的内容,并对将来可能还需要进一步开展的研究工作进行了展望。

本书是作者所在课题组最近几年来在等离子体光子晶体研究方面所积累的一些研究成果,其中理论上的计算结果和设计实例主要取材于章海锋博士后的相关研究工作和博士学位论文。感谢参与本书编写的众多同行和研究生们;感谢南京航空航天大学电子信息工程学院、国防科技大学、南京炮兵学院和南昌大学理学院在本书撰写和出版过程中给予的帮助;最后感谢所有参与本书出版的人员。

本书的出版得到了国家自然科学基金(项目编号:61471368, 61307052)、江苏省博士后科研资助计划(项目编号:1501016)和第 58 批中国博士后面项目(项目编号:2015M581790)的资助,在此表示感谢。

光子晶体已经逐渐成为一门成熟的学科,而等离子体光子晶体是这个大家族中蓬勃发展的一支,其本身也是电磁场微波技术、电子科学与技术、凝聚态物理和应用光学等专业的交叉学科,为将来设计相关的通信系统的新型器件奠定了理论基础。限于作者水平,书中不妥之处在所难免,敬请读者不吝指正。

作 者

2015 年 11 月于南京

目 录

第 1 章 等离子体光子晶体概况	1
1.1 光子晶体概述	2
1.1.1 光子晶体的概念	2
1.1.2 光子晶体的前世今生	3
1.1.3 光子晶体的分类	6
1.1.4 光子晶体的应用	8
1.1.5 光子晶体的制备	17
1.2 等离子体光子晶体概述	19
1.2.1 等离子体光子晶体的由来	19
1.2.2 等离子体光子晶体的国内外研究现状	20
1.3 光子晶体的计算法	24
1.3.1 光子晶体的理论基础	26
1.3.2 光子晶体的传输矩阵法	27
1.3.3 光子晶体的 FDTD 算法	30
1.3.4 光子晶体的 PWE 算法	41
1.3.5 光子晶体的 FDFD 算法	45
第 2 章 等离子体物理学基础	50
2.1 等离子体的基本参量	50
2.1.1 等离子体频率	51
2.1.2 等离子体碰撞频率	51
2.1.3 等离子体回旋频率	52
2.2 等离子体的流体近似与介电张量表示	52
2.2.1 时域麦克斯韦方程组	52
2.2.2 频域麦克斯韦方程组	53
2.2.3 流体近似下的等离子体方程	53
2.2.4 等离子体的极化模型和极化率	56
2.2.5 等离子体的导电模型和导电率	58
2.3 电磁波在低温非磁化等离子体中的传播	60
2.4 电磁波在磁化等离子体中的传播 (外加磁场平行于波矢)	63
2.4.1 忽略等离子体碰撞频率时电磁波在磁化等离子体中的传播	63

2.4.2	考虑等离子体碰撞频率时电磁波在磁化等离子体中的传播	67
2.5	电磁波在磁化等离子体中的传播 (外加磁场垂直于波矢)	68
2.5.1	忽略等离子体碰撞频率时电磁波在磁化等离子体中的传播	68
2.5.2	考虑等离子体碰撞频率时电磁波在磁化等离子体中的传播	70
2.6	波矢和外加磁场间为任意夹角条件下电磁波与磁化等离子体的相互作用	72
第 3 章	等离子体的 FDTD 算法	76
3.1	非磁化等离子体的 FDTD 算法	76
3.1.1	非磁化等离子体的 JEC-FDTD 算法	77
3.1.2	JEC-FDTD 算法的有效性和精度验证性算例	78
3.1.3	非磁化等离子体的 PLCDRC-FDTD 算法	80
3.1.4	非磁化等离子体 PLCDRC-FDTD 算法的有效性和精度	81
3.1.5	非磁化等离子体 PLCDRC-FDTD 算法的算例	82
3.2	磁化等离子体的 PLCDRC-FDTD 算法	85
3.2.1	磁化等离子体的 PLCDRC-FDTD 算法的基本原理	85
3.2.2	磁化等离子体 PLCDRC-FDTD 算法的有效性和精度	88
第 4 章	等离子体光子晶体计算方法与发展	91
4.1	等离子体光子晶体的计算方法	91
4.1.1	TMM 的特点	91
4.1.2	PWE 算法的特点	92
4.1.3	FDTD 算法的特点	92
4.1.4	FDFD 算法的特点	93
4.2	等离子体光子晶体的 FDTD 算法	93
4.3	等离子体光子晶体的 PWE 算法	96
4.3.1	TE 模式下二维非磁化等离子体光子晶体色散关系的求解公式	96
4.3.2	基于网格法的 PWE 算法	101
4.3.3	基于打靶法的 PWE 算法	105
4.4	等离子体光子晶体的 FDFD 算法	107
第 5 章	一维非磁化等离子体光子晶体禁带特性	111
5.1	用于计算的物理模型和 FDTD 计算的参数	111
5.2	一维非磁化等离子体光子晶体禁带周期特性	112
5.2.1	用于仿真计算的 FDTD 算法	112
5.2.2	周期常数对光子禁带周期特性的影响	113
5.2.3	空间结构参数 b 对光子禁带周期特性的影响	114
5.2.4	等离子体碰撞频率对光子禁带周期特性的影响	115

5.2.5	等离子体频率对光子禁带周期特性的影响	116
5.3	温度、密度对一维非磁化等离子体光子晶体禁带特性的影响	117
5.3.1	用于仿真计算的 FDTD 算法	118
5.3.2	温度对禁带特性的影响	119
5.3.3	密度对禁带特性的影响	120
5.4	一维时变非磁化等离子体光子晶体禁带特性	122
5.5	一维非磁化等离子体光子晶体缺陷态的研究	124
5.5.1	用于仿真计算的 PLCDRC-FDTD 算法	124
5.5.2	缺陷层的介电常数对缺陷模的影响	125
5.5.3	缺陷层的位置和周期常数对缺陷模的影响	126
5.5.4	缺陷层的厚度对缺陷模的影响	127
5.5.5	等离子体参数对缺陷模的影响	128
第 6 章	一维磁化等离子体光子晶体禁带特性	130
6.1	用于计算的物理模型和 FDTD 计算的参数	130
6.2	一维磁化等离子体光子晶体禁带的周期特性	132
6.2.1	周期常数对光子禁带周期特性的影响	132
6.2.2	空间结构常数 b 对光子禁带周期特性的影响	133
6.2.3	等离子体频率对光子禁带周期特性的影响	135
6.2.4	等离子体碰撞频率对光子禁带周期特性的影响	136
6.2.5	等离子体回旋频率对光子禁带周期特性的影响	138
6.3	温度、密度对一维磁化等离子体光子晶体禁带特性的影响	140
6.3.1	温度对禁带特性的影响	141
6.3.2	密度对禁带特性的影响	143
6.4	一维时变磁化等离子体光子晶体禁带特性	145
6.5	一维磁化等离子体光子晶体缺陷态的研究	148
6.5.1	缺陷层的介电常数对缺陷模的影响	148
6.5.2	缺陷层的位置和周期常数对缺陷模的影响	150
6.5.3	缺陷层的厚度对缺陷模的影响	151
6.5.4	等离子体频率对缺陷模的影响	152
6.5.5	等离子体碰撞频率对缺陷模的影响	153
6.5.6	等离子体回旋频率对缺陷模的影响	154
第 7 章	斜入射一维等离子体光子晶体的禁带特性	156
7.1	一维斜入射等离子体光子晶体色散特性	156
7.1.1	理论模型和数值方法	156
7.1.2	计算结果与分析	159

7.2 可调谐一维三元磁化等离子体光子晶体禁带特性研究	162
7.2.1 计算方法和物理模型	163
7.2.2 等离子体频率对禁带特性的影响	165
7.2.3 等离子体碰撞频率对禁带特性的影响	166
7.2.4 等离子体回旋频率对禁带特性的影响	166
7.2.5 等离子体的填充率对禁带特性的影响	167
7.2.6 入射角对禁带特性的影响	168
7.2.7 介质层的相对介电常数对禁带特性的影响	169
7.3 磁光 Voigt 效应下的一维磁化等离子体光子晶体	169
7.3.1 磁化等离子体的介电函数	170
7.3.2 物理模型与计算方法	171
7.3.3 外加磁场对等离子体介电函数的影响	177
7.3.4 外加磁场对 TE 极化波电磁特性的影响	179
7.3.5 入射角对 TE 极化波电磁特性的影响	182
7.3.6 等离子体碰撞频率对 TE 极化波电磁特性的影响	183
7.3.7 介质介电常数对 TE 极化波电磁特性的影响	185
7.4 入射波与外加磁场夹角任意时一维磁化等离子体光子晶体的色散特性	186
7.4.1 等离子体层的有效折射率公式	186
7.4.2 传输矩阵与色散关系的公式	190
7.4.3 θ 对磁化等离子体有效介电函数的影响	192
7.4.4 介质层介电常数对 PBGs 和色散关系的影响	193
7.4.5 等离子体碰撞频率对 PBGs 和色散关系的影响	195
7.4.6 θ_1 对 PBGs 和色散关系的影响	197
7.4.7 等离子体填充率对 PBGs 和色散关系的影响	199
7.4.8 θ 对 PBGs 和色散关系的影响	201
7.4.9 外加磁场对 PBGs 和色散关系的影响	203
7.4.10 等离子体频率对 PBGs 和色散关系的影响	205
第 8 章 基于一维等离子体光子晶体的全向反射器设计	208
8.1 基于拼接技术的全向反射器的设计	208
8.1.1 物理模型和计算方法	209
8.1.2 混合结构的 OBG 特性	210
8.1.3 等离子体层厚度对 OBG 的影响	213
8.1.4 等离子体密度对 OBG 的影响	214
8.2 基于匹配层技术的全向反射器的设计	216

8.2.1	物理模型和计算方法	216
8.2.2	引入匹配层来改善 PBG 和 OBG 的特性	217
8.2.3	等离子体层厚度对 OBG 的影响	220
8.2.4	等离子体密度对 OBG 的影响	221
8.3	基于变周期结构的全向反射器的设计	222
8.3.1	基于变周期结构的全向反射器的实现	223
8.3.2	介质层的平均厚度对 OBG 的影响	225
8.3.3	等离子体层的平均厚度对 OBG 的影响	226
8.3.4	等离子体频率对 OBG 的影响	226
8.3.5	等离子体和介质层的渐变系数对 OBG 的影响	227
8.4	基于准周期或分形结构的全向反射器的设计	228
8.4.1	基于 Thue-Morse 准周期结构的全向反射器的实现	228
8.4.2	等离子体层厚度对 OBG 的影响	230
8.4.3	Thue-Morse 序列的阶数 N 对 OBG 的影响	230
8.4.4	等离子体密度对 OBG 的影响	231
8.4.5	等离子体碰撞频率对 OBG 的影响	231
8.5	基于三元 Fibonacci 准周期结构的全向反射器的设计	232
8.5.1	基于三元 Fibonacci 准周期结构的全向反射器的实现	233
8.5.2	Fibonacci 序列的阶数 N 对 OBG 的影响	235
8.5.3	等离子体层厚度对 OBG 的影响	236
8.5.4	等离子体密度对 OBG 的影响	237
8.6	基于改进型 Fibonacci 序列的全向反射器的设计	238
8.6.1	基于改进型 Fibonacci 序列的全向反射器的实现	238
8.6.2	Fibonacci 序列的阶数 N 对 OBG 的影响	242
8.6.3	等离子体层厚度对 OBG 的影响	244
8.6.4	等离子体密度对 OBG 的影响	245
8.6.5	等离子体碰撞频率对 OBG 的影响	246
第 9 章	二维等离子体光子晶体的电磁特性	247
9.1	二维等离子体光子晶体的禁带特性	247
9.1.1	二维菱形晶格等离子体光子晶体的理论模型与仿真计算	247
9.1.2	二维菱形晶格等离子体光子晶体的色散特性	253
9.1.3	等离子体柱半径对 PBGs 的影响	255
9.1.4	等离子体频率对 PBGs 的影响	255
9.1.5	介质背景对 PBGs 的影响	256
9.2	二维磁化等离子体光子晶体的禁带特性研究	257

9.2.1	二维磁化等离子体光子晶体的物理模型	257
9.2.2	磁化等离子体的 FDTD 辅助方程法	264
9.2.3	TM 模式下的粒子模拟	270
9.2.4	TE 模式下的色散特性	272
9.3	有限周期结构的二维等离子体光子晶体的传输特性	279
9.3.1	计算方法与理论模型	279
9.3.2	介质圆柱相对介电常数对禁带特性的影响	280
9.3.3	周期常数对禁带特性的影响	281
9.3.4	R 和 a 对禁带特性的影响	282
9.3.5	等离子体参数对禁带特性的影响	283
9.4	新型二维等离子体光子晶体的禁带特性	285
9.4.1	理论模型与计算方法	286
9.4.2	type-1 和 type-2 等离子体光子晶体的色散特性	289
9.4.3	外加磁场对等离子体光子晶体色散特性的影响	291
9.4.4	等离子体碰撞频率对等离子体光子晶体色散特性的影响	292
9.4.5	等离子体频率对等离子体光子晶体色散特性的影响	294
9.4.6	填充率对等离子体光子晶体色散特性的影响	295
第 10 章	二维等离子体光子晶体应用设计基础	297
10.1	二维等离子体光子晶体的线缺陷与点缺陷	297
10.1.1	二维线缺陷等离子体光子晶体的理论模型与仿真计算	297
10.1.2	ε_2 对缺陷模的影响	299
10.1.3	周期常数和缺陷层位置对缺陷模的影响	300
10.1.4	R 和 a 对缺陷模的影响	301
10.1.5	r 和 b 对缺陷模的影响	303
10.1.6	等离子体频率和等离子体碰撞频率对缺陷模的影响	305
10.1.7	含点缺陷二维等离子体光子晶体的物理模型与计算方法	306
10.1.8	二维等离子体光子晶体的点缺陷特性	307
10.1.9	光子晶体参数对缺陷模的影响	309
10.2	二维等离子体光子晶体全向禁带的拓展技术	310
10.2.1	理论模型与二维等离子体光子晶体的 CPBGs	311
10.2.2	填充介质 ε_a 对 CPBGs 的影响	314
10.2.3	参数 θ 对 CPBGs 的影响	314
10.2.4	参数 d 对 CPBGs 的影响	315
10.2.5	参数 R 对 CPBGs 的影响	316
10.2.6	参数 r 对 CPBGs 的影响	317

10.2.7	参数 dx 对 CPBGs 的影响	317
10.2.8	等离子体频率 ω_p 对 CPBGs 的影响	318
10.3	二维等离子体光子晶体的全角负折射特性	319
10.3.1	理论模型与计算方法	319
10.3.2	两类二维阿基米德晶格等离子体光子晶体的 PBGs 特性	322
10.3.3	光子晶体参数对 PBGs 的影响	323
10.3.4	二维阿基米德晶格等离子体光子晶体的可调谐 AANR 特性	328
10.4	二维等离子体光子晶体的全向反射器的设计	335
10.4.1	理论模型与计算方法	336
10.4.2	二维三角晶格等离子体光子晶体的 OBG 特性	338
10.4.3	光子晶体参数对 OBG 特性的影响	340
10.4.4	各向异性介质对大角度 CPBG 的影响	343
第 11 章	三维等离子体光子晶体的基本电磁特性	346
11.1	三维立方体晶格等离子体光子晶体的禁带特性	346
11.1.1	理论模型和计算方法	346
11.1.2	三维立方体晶格等离子体光子晶体的 PBGs 特性	350
11.1.3	介质的相对介电常数对 PBGs 的影响	352
11.1.4	填充率对 PBGs 的影响	354
11.1.5	等离子体频率对 PBGs 的影响	355
11.1.6	等离子体碰撞频率对 PBGs 的影响	356
11.2	三维钻石晶格等离子体光子晶体的色散特性	357
11.2.1	物理模型和数值计算	358
11.2.2	两类三维钻石晶格等离子体光子晶体的色散特性	359
11.2.3	光子晶体参数对色散特性的影响	360
11.3	磁光 Voigt 效应下非寻常波在三维磁化等离子体光子晶体中的色散特性	368
11.3.1	理论模型和计算方法	369
11.3.2	三维面心晶格磁化等离子体光子晶体的色散特性	371
11.3.3	ϵ_a 对色散特性的影响	373
11.3.4	外加磁场对色散特性的影响	374
11.3.5	ω_p 对色散特性的影响	376
11.3.6	磁化等离子体球的填充率对色散特性的影响	377
11.3.7	等离子体碰撞频率对 PBG 的影响	379
11.3.8	水平带隙区域的特性	380

11.4 磁光 Faraday 效应下 RCP 波在三维磁化等离子体光子晶体中的色散特性	381
11.4.1 ω_c 对 RCP 波和 LCP 波有效介电常数的影响	381
11.4.2 物理模型与计算方法	383
11.4.3 RCP 波在两类三维磁化等离子体光子晶体中的色散特性	386
11.4.4 ϵ_a 对 PBG 特性的影响	388
11.4.5 外加磁场对 PBG 特性的影响	389
11.4.6 填充率对 PBG 特性的影响	391
11.4.7 等离子体参数对 PBG 特性的影响	392
11.4.8 水平带隙区域的特性	393
第 12 章 三维等离子体光子晶体的禁带拓展技术	396
12.1 改变晶格结构实现对三维等离子体光子晶体禁带的拓展	396
12.1.1 理论和数值方法	398
12.1.2 三维烧绿石晶格非磁化等离子体光子晶体的 PBG 特性	400
12.1.3 介质球的相对介电常数对 PBG 的影响	402
12.1.4 等离子体频率对 PBG 的影响	403
12.1.5 填充介质球的半径对 PBG 的影响	404
12.1.6 等离子体碰撞频率对 PBG 的影响	404
12.2 三维各向异性等离子体光子晶体的禁带特性	405
12.2.1 PWE 方法的计算公式	405
12.2.2 不同晶格条件下三维各向异性等离子体光子晶体的 PBGs	408
12.2.3 n_e 对各向异性 PBGs 的影响	413
12.2.4 n_o 对各向异性 PBGs 的影响	414
12.2.5 填充率对各向异性 PBGs 的影响	415
12.2.6 等离子体频率对各向异性 PBGs 的影响	416
12.3 RCP 波在三维各向异性磁化等离子体光子晶体中的禁带特性	417
12.3.1 理论和计算方法	418
12.3.2 磁光 Faraday 效应对 RCP 波 PBGs 的影响	420
12.3.3 n_e 对 RCP 波的各向异性 PBGs 的影响	427
12.3.4 n_o 对 RCP 波的各向异性 PBGs 的影响	428
12.3.5 等离子体频率对 RCP 波的各向异性 PBGs 的影响	429
12.3.6 填充率对 RCP 波的各向异性 PBGs 的影响	430
12.3.7 等离子体回旋频率对 RCP 波的各向异性 PBGs 的影响	431
12.4 非寻常波在三维各向异性磁化等离子体光子晶体中的色散特性	432
12.4.1 理论模型与数值方法	433

12.4.2	磁光 Voigt 效应下非寻常波的 PBGs 特性	437
12.4.3	n_e 对各向异性非寻常波 PBG 的影响	440
12.4.4	n_o 对各向异性非寻常波 PBG 的影响	441
12.4.5	填充率对各向异性非寻常波 PBG 的影响	441
12.4.6	等离子体频率对各向异性非寻常波 PBG 的影响	442
12.4.7	外加磁场对各向异性非寻常波 PBG 的影响	443
12.4.8	水平带隙区域的特性	444
第 13 章	基于三维等离子体光子晶体的器件设计	446
13.1	基于三维等离子体光子晶体的光开关设计技术	447
13.1.1	理论模型和数值方法	447
13.1.2	表面等离子体激元模的特性	451
13.1.3	可调谐 SWBG 的特性	456
13.2	磁光 Faraday 效应下 RCP 波光开关的设计技术	458
13.2.1	理论模型与计算方法	458
13.2.2	磁光 Faraday 效应下 RCP 波的色散特性	462
13.2.3	磁光 Faraday 效应下表面等离子体激元模的特性	463
13.2.4	RCP 波的可调谐 SWBG 的特性	468
13.3	磁光 Voigt 效应下非寻常波光开关的设计技术	471
13.3.1	理论模型和计算方法	471
13.3.2	表面等离子体激元模的特性	474
13.3.3	非寻常波的 SWBG 特性	478
第 14 章	三维磁化等离子体光子晶体中的磁光效应	482
14.1	三维磁化等离子体的磁光 Faraday 效应	482
14.1.1	理论模型和数值方法	482
14.1.2	考虑混合极化波时三维磁化等离子体的带隙结构	487
14.1.3	水平带区域的特性	489
14.1.4	三维磁化等离子体光子晶体的 PBG 特性	490
14.2	三维磁化等离子体的磁光 Voigt 效应	493
14.2.1	理论模型和数值方法	493
14.2.2	三维磁化等离子体中电磁模式的带隙结构	498
14.2.3	水平带区域的特性	500
14.2.4	三维磁化等离子体光子晶体参数对 PBG 的影响	501
14.3	三维各向异性磁化等离子体光子晶体中的 Faraday 效应	504
14.3.1	理论模型和计算方法	505
14.3.2	磁光 Faraday 效应对各向异性 PBGs 的影响	508

14.3.3	表面等离子激元模的特性	511
14.3.4	填充率对各向异性 PBGs 的影响	512
14.3.5	等离子体频率对各向异性 PBGs 的影响	513
14.3.6	等离子体回旋频率对各向异性 PBGs 的影响	514
14.4	三维各向异性磁化等离子体光子晶体中的 Voigt 效应	515
14.4.1	理论模型与数值方法	515
14.4.2	磁光 Voigt 效应下的各向异性 PBGs 特性	518
14.4.3	表面等离子激元模的特性	521
14.4.4	填充率对各向异性 PBGs 的影响	522
14.4.5	等离子体频率对各向异性 PBGs 的影响	523
14.4.6	等离子体回旋频率对各向异性 PBGs 的影响	524
14.5	写在最后	524
参考文献		527
索引		547

第1章 等离子体光子晶体概况

随着信息技术的发展,人们对于半导体技术的依赖性越来越强。不论是生活中用到的手机、网络、计算机和家用电器,还是用于国防建设的雷达、预警机、导弹和通信卫星,都离不开芯片技术,也就是常说的集成电路技术。随着人们对信息交流、索取和保存的种类和数量越来越大,对于各类通信和生活电子产品都提出了更高效率、更快速度和更大容量的要求。就是在这样一个大的潮流下,基于半导体工艺的集成电路工艺在过去几年间得以飞速发展。在神奇的摩尔定律(当价格不变时,集成电路上可容纳的元器件的数目每隔 18~24 个月便会增加一倍,性能也将提升一倍)的推动下,半导体的集成技术也在近几十年内得到了飞速发展,现代人们正享受着技术不断革新而带来的便利。然而,在最近几年,摩尔定律似乎遇到了瓶颈,随着半导体器件集成度的空前提高,过高的集成度将使电子间的作用更为明显。由于库仑力的存在,所以电子间的热效应更为明显,这将直接导致集成电路热量堆积,从而影响其性能。过度的能量消耗、较长的响应时间和信息传输速率下降成为半导体集成技术的缺陷,同时也制约着当代信息技术的进一步发展。在提倡节能减排和绿色环保的今天,工程师们不得不考虑用新一代材料替代现有的半导体材料,因此用“光子”代替“电子”来传递信息成为一种必然的选择。“光子”较“电子”优势明显:首先,光子没有电荷,也就不存在电磁场的相互作用,所以在传播时可以相互交叉,不会发生干涉,这使得光波导能传递更大的信息量;其次,光子没有静止的质量,所以在真空或介质中传播,其传播速度约是电子在导线中传播速度的 1000 倍,这使得光子传递信息的速度更快;最后,光子还具有抗干扰性强、能耗低和保密性好等优点。光子晶体就是这样一种材料,是人们梦寐以求的“光子半导体”。人们正在尝试着用光子晶体来实现“集成光路”,努力实现如光计算、光存储和光通信,最终实现信息技术的飞跃性发展。尤其对于通信网络中的微波器件而言,人们不但要求其具备高性能和小型化等优点,还对其可重构性提出了要求,即不仅要求器件在频率上实现可重构,还要求其在功能上也实现可重构。这对承担技术革新使命的光子晶体而言,又提出了进一步的要求。因此,在光子晶体中引入电磁超材料成为一种较好的解决方案。等离子体(plasma)作为物质的第四态,在自然界中,它也能被视为一种电磁超材料,且它的物理学特性容易通过外部实现调节,如外加磁场、电压和电子密度等参数。近几年来,等离子体越来越多地被用于电磁隐身、目标识别和航空航天等技术的开发,已经成为一个新兴的研究热

点。作为光子晶体的一个分支——等离子体光子晶体用来设计可调谐和可重构的微波器件,这在民用和军事上都有着巨大的应用前景。本章将对光子晶体的基本概念和理论进行简要的介绍,内容涉及光子晶体的概念、原理和器件设计,并对等离子体光子晶体目前在国内的发展情况进行简要叙述,对等离子体光子晶体的理论、器件设计和实验验证工作进行综述;最后,对现有的主流的光子晶体的计算方法进行介绍,侧重介绍几种主流的计算方法,为本书后续章节在方法学上奠定基础。

1.1 光子晶体概述

光子晶体作为一种新型的“光子”材料被人们所关注,其作为一种人工材料,可以用于设计大量的工作在微波、毫米波、红外波段甚至光波波段的器件。下面从以下几个方面对光子晶体相关知识进行简单的概述。

1.1.1 光子晶体的概念

简单来说,光子晶体 (photonic crystals) 就是一种人工合成的材料,即不同介质在空间的周期性分布。当然,这种不同介质的周期性分布可以是两种也可以是多种,通常光子晶体由两种不同的介质构成。由于这种周期性的介质分布是空间的分布函数,所以从周期分布的角度来说,光子晶体可以划分为一维、二维和三维结构,也就是我们所称的一维、二维和三维光子晶体,其结构图如图 1.1 所示。这个概念于 1987 年分别由学者 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 独立提出。当电磁波通过周期分布的介质时,由于 Bragg 散射的作用,光子晶体能产生能带结构——光子禁带 (photonic band gaps, PBGs)^[3,4]。在这一点上光子晶体和半导体极为相似,但半导体内是周期性变化的原子,而光子晶体则是周期性变化的介质。当周期性分布的介质相差足够大时,这种周期性排列将产生一定的“势场”,这样在不同介质的分界面上将产生 Bragg 散射,因此光子禁带就产生了。当入射电磁波的频率位于 PBGs 中时,入射电磁波将不能通过光子晶体。光子晶体的另外一个特点是光子局域化,又称为缺陷模^[5]。图 1.2 给出了最简单的一维二元光子晶体中含单一缺陷层时频率和光子密度态 ($D(\omega)$) 的关系图。当光子晶体的几何拓扑结构或者空间介质分布发生变化时,入射电磁波通过光子晶体时将产生光子局域现象,即光子能在 PBGs 中发生隧穿而形成缺陷模。这两个有趣的特性使得光子晶体能够用于设计许多实用的器件,如全向反射器^[6]、高 Q 值的微波谐振腔^[7]、低阈值激光^[8]、全光开关^[9] 和光学晶体管^[10] 等。在短短的几十年内,光子晶体理论及其应用研究得到了“井喷式”的发展,每年发表与此相关的论文都在数千篇,并且每年关键词为“光子晶体”的论文数量大体呈现增长的趋势,内容涵盖理论研究、算法实现、性能优化、器件设计、实验测量和实验制备等方面。另外,由于光子晶体本身又是凝聚态物理、光