

GUANGZI JINGTI FUZA XITONG DE LILUN HE MONI YANJIU

光子晶体复杂系统的 理论和模拟研究

王宏 韩艳玲 著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

光子晶体复杂系统的 理论和模拟研究

GUANGZI JINGTI FUZA XITONG
DE LILUN HE MONI YANJIU

王宏 韩艳玲 著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

摘 要

光子晶体是近十年来光学和光电子领域中的研究热点,作为未来电子材料的替代品,它在光通信、光信息处理以及光电子器件设计等领域有重要的应用前景。本书系统地介绍了光子晶体中的各种光学现象及其应用。基于光子晶体理论和激光理论,采用时域有限差分法、传输矩阵法,求解 Maxwell 方程组,详细探讨了材料的增益、色散、各向异性和介质结构的周期性、随机性等因素导致的光学特性,以及这些特性在电光调谐、磁性调谐器件方面的应用。

本书的内容主要介绍了作者最近几年的研究进展,在理论和应用的系统性方面也兼顾他人的观点和结论,选择其中较为成熟和最重要的成果。本书可供光通信及光电信息等领域的科技人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光子晶体复杂系统的理论和模拟研究/王宏,韩艳玲著. —武汉:中国地质大学出版社,2013. 11

ISBN 978-7-5625-3320-7

I. ①光…

II. ①王…②韩…

III. ①光学晶体-研究

IV. ①07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 307371 号

光子晶体复杂系统的理论和模拟研究

王 宏 韩艳玲 著

责任编辑:马新兵

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号) 邮政编码:430074

电话:(027)67883511

传真:67883580

E-mail: cbb @ cug. edu. cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×960 毫米 1/16

字数:180 千字 印张:8

版次:2013 年 11 月第 1 版

印次:2013 年 11 月第 1 次印刷

印刷:三新大洋数字出版技术有限公司

ISBN 978-7-5625-3320-7

定价:28.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

自从 1987 年 John 和 Yablonovitch 等人提出光子晶体的概念后,作为未来电子材料的替代品,光子晶体的理论和应用研究已成为物理电子学、激光物理学、光子学、集成光学等领域中最活跃、发展速度最快的研究领域之一。

构成光子晶体的材料可以是多种多样的,这些材料的固有属性,例如光学增益、吸收、色散、各向异性、非线性以及空间分布的随机性都会影响晶体的光学特性,甚至导致一些新的光学现象。研究这些问题不但有重要的理论意义,也是实际应用中必须考虑的因素。基于这一思路,近十年来,作者一直专注于光子晶体的理论和应用研究,与导师、合作者、学生们一起在此领域做了许多具有自己特色的研究工作,其中大部分研究成果已经在国内外有关期刊公开发表。这本专著系统地总结了近年来我们在此领域的研究成果,其中大部分内容是作者和合作者以及指导研究生的共同成果,为了使得本书内容有较好的系统性,也引用了一些国内外学者的研究成果。

光子晶体是近十年以来激光和光电子领域中的热点问题,它在光通信、光信息处理及其光电子器件设计领域有重要的应用前景。本书系统的介绍了光子晶体中的各种光学现象和应用。基于激光物理中的光腔理论和波导中电磁波的传播特性理论,采用时域有限差分法、传输矩阵法,求解 Maxwell 方程组,详细探讨了材料的增益、色散、各向异性和介质结构的周期性、随机性等因素导致的光学特性,以及这些特性在电光调谐、磁性调谐器件方面的应用。

在理论研究方法上,我们主要采用时域有限差分法、传输矩阵法,数值求解 Maxwell 方程组,在一定初始和边界条件下,获得光子晶体各种响应特性。对比分析这些结果,我们得到了一些重要的结论。工欲善其事必先利其器,我们通过改进现有的数值方法,开展了光子晶体的研究工作。具体而言,我们拓展了现有的时域有限差分法描述具有四能级结构的增益介质,基于 2×2 传输矩阵法,推导了 4×4 传输矩阵法描述各向异性介质。

本书的研究工作,从光子晶体和物质相互作用这一角度开展工作,立意独特,主要的研究成果也是最近几年取得的。因此,内容比较新颖,代表着作者在此领域内最新的研究成果。

作者希望本书能够对物理电子学、激光物理学、集成光学以及光子晶体方面

的研究人员以及高等院校光学专业、光电专业以及电磁场理论与微波技术专业的师生们有所裨益。

本书共分 8 章。第一章是光子晶体概念及其应用概述；第二章介绍时域有限差分方法和传输矩阵法的基本原理和优缺点；第三章讨论在传输矩阵法中如何引入增益、色散、非线性、负折射率以及各向异性等材料特性；第四章研究了缺陷中含有各向异性、色散、非线性等材料后，缺陷模的响应特性；第五章探讨了随机介质中模式的形成机制以及它的放大、移动等特性；第六章探讨了负折射介质滤波器的形成机制和光学特性；第七章研究了各向异性光子晶体中的电光效应和能带裁剪；第八章分析了磁性光子晶体的磁光效应和模式分裂。

本书虽然酝酿时间较长，但由于作者水平有限，遗漏及错误之处恐难免，望批评指正。

王 宏 韩艳玲

2013 年 7 月于武汉南望山

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 光子晶体基本理论	(1)
1.1.1 光子晶体的概念	(1)
1.1.2 光子晶体的理论基础	(3)
1.2 光子晶体的应用	(5)
1.3 本书的主要内容和章节安排	(8)
参考文献	(9)
第二章 光子晶体理论计算方法介绍	(13)
2.1 引言	(13)
2.2 一维光子晶体计算方法—— 2×2 传输矩阵法	(13)
2.3 时域有限差分法	(16)
2.3.1 差分格式	(16)
2.3.2 准态模的测量方法和 Q 值的计算	(19)
2.3.3 Maxwell 方程中光学增益的引入	(21)
参考文献	(24)
第三章 一维色散、增益、非线性、各向异性介质的传输矩阵	(27)
3.1 引言	(27)
3.2 色散和增益介质中的传输矩阵	(27)
3.3 非线性介质的描述及特征矩阵	(29)
3.4 各向异性介质的特征矩阵 4×4 传输矩阵	(29)
3.4.1 光波正入射时的情况	(30)
3.4.2 光波斜入射时的情况	(32)
3.4.3 任意位置点的场强	(33)
参考文献	(35)
第四章 材料特性对光子晶体微腔中电磁波传播特性的影响	(36)
4.1 引言	(36)
4.2 光子晶体微腔中缺陷模的放大特性	(38)

4.2.1	基本模型	(38)
4.2.2	结果和讨论	(40)
4.3	光子晶体微腔中带边模的放大特性	(45)
4.3.1	基本模型	(45)
4.3.2	结果和讨论	(46)
4.4	光子晶体微腔中的模场分布以及对放大特性的影响	(51)
4.4.1	基本模型	(51)
4.4.2	结果和讨论	(53)
4.5	色散对光子晶体光波传播特性的影响	(57)
4.5.1	理论模型	(57)
4.5.2	结果和讨论	(59)
4.6	结论	(63)
	参考文献	(64)
第五章	材料特性对随机介质中电磁波传播特性的影响	(68)
5.1	引言	(68)
5.2	随机性对部分随机介质激光器阈值的影响	(70)
5.2.1	基本模型	(70)
5.2.2	模拟结果和讨论	(71)
5.2.3	结论	(76)
5.3	随机增益介质中局域模的模面积和放大特性	(76)
5.3.1	基本模型	(76)
5.3.2	结果和讨论	(79)
5.3.3	结论	(82)
5.4	色散随机介质中局域模的特性	(83)
5.4.1	数值模型和理论	(83)
5.4.2	结果和讨论	(84)
5.4.3	结论	(86)
	参考文献	(87)
第六章	左手材料周期结构的多通道窄带滤波特性	(90)
6.1	引言	(90)
6.2	基本模型和理论	(91)
6.3	结果和讨论	(92)
6.4	结论	(97)
	参考文献	(97)

第七章 各向异性光子晶体中的电光效应和能带裁剪	(99)
7.1 引言	(99)
7.2 理论模型	(100)
7.3 结果与讨论	(101)
7.4 结语	(105)
参考文献	(105)
第八章 磁性光子晶体的磁光效应和模式分裂	(107)
8.1 引言	(107)
8.2 理论模型与计算方法	(107)
8.3 模式的分裂	(109)
8.4 禁带结构的偏振化	(115)
参考文献	(119)

第一章 绪 论

1.1 光子晶体基本理论

1.1.1 光子晶体的概念

光子晶体是由不同介电材料或金属材料周期排列构成的一种人工晶体,包括一维、二维和三维等类别(图 1.1)。这一概念分别由 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 在 1987 年独立提出。光子晶体中存在光子禁带,即光或电磁波在该频域内被禁止传播。这种光子禁带的特征和形成机制类似于传统晶体中的能带结构。正如我们所知,半导体材料中原子周期性排列导致的周期性电势场对电子有一种特殊的约束作用,在这样的空间周期性电势场中电子运动是由薛定谔方程来决定,求解薛定谔方程就可以发现,电子的能量只能取某些特殊值,在某些能量区间内该方程无解,也就是说电子的能量不可能落在这样的能量区间,通常称之为能量禁带。研究结果表明,电子在这样周期性结构中的德布罗意波长与晶体的晶格常数具有大致相同的数量级。与之类似,在介电常数呈空间周期性分布的介质中,电磁场所服从的规律是 Maxwell 方程,通过对 Maxwell 方程的求解不难发现,该方程在某些特定的频率下有解,而在某些频率取值区间无解。换句话说,电磁波的某些频率在介电常数呈周期性排布的介质结构中被禁止了,我们通常称这些被禁止的频率区间为“光子禁带”(Photonic Band Gap),而将这种具有“光子禁带”或者具有特殊色散特性的周期性人工材料称为光子晶体。

光子晶体的这种激动人心的特性为人们展示了一个全新的领域,受到了材料学家、电子工程师和物理学家的广泛关注,为光和电磁波控制带来了一场革命,是目前理论和实验研究的热点,《Science》杂志在 1999 年将其评为年度十大科技成就之一。至今《Nature》、《Science》、《Physical Review Letters》等权威杂志上相关文章多有发表,其他相关刊物发表数量更是不胜枚举,且数量呈现几何级数上升的趋势,不少成功的实验结果已被报道。

第一个具有实际可行性的光子晶体结构是由爱荷华州立大学的 Ho 和

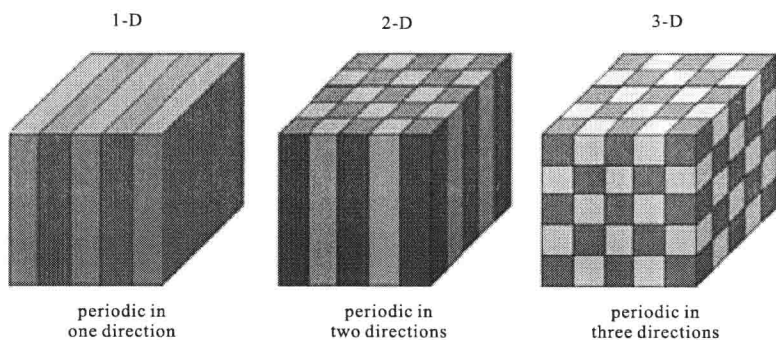


图 1.1 一维、二维、三维光子晶体结构

Chan 等人^[3]首先从理论上提出来的,而美国贝尔通讯研究所的 Yablonovitch 等人^[4]则制造出了世界上第一个具有完全光子频率禁带的三维光子晶体。第一块三维光子晶体的结构是用活性离子束依次从三个相差 120° 的方向在介质上穿孔而制成,形成的禁带宽度约为中心工作频率的 20%。早期这种光子晶体的工作频率多位于微波波段,近年逐步靠近红外波段^[5]。一般来说,工作波长越短,光子晶体的制备越困难,例如可见光波段的光子晶体面临巨大的技术和工艺挑战。为了获得短波长光子晶体,人们近年来提出了一些新的光子晶体构造方案^[6-8]。其中一个具有实用价值的方案就是所谓的“逐层叠加(layer-by-layer)”方法,即用许多片二维周期性结构叠加在一起而构成三维光子晶体(图 1.2),这种想法是由 Ozbay 等人^[6]提出来的,目前已被人们广泛采用。原则上讲,这种方法为短波长三维光子晶体的制备提供了一个可行的途径,但在短波长区域其制造工艺仍相当繁琐。

光子晶体虽然是一种纯粹人工合成的新材料,不过人们也在自然界中发现了类似的天然结构。蛋白石 Opal 就是一种天然的光子晶体材料。在生物界,最近也发现了光子晶体的踪迹,例如在一种帝王蝴蝶的翅膀

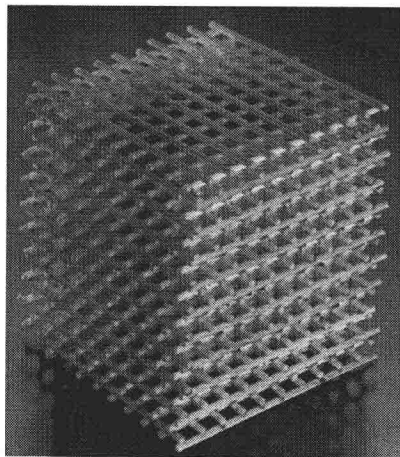


图 1.2 Ozbay 等人采用逐层叠加的方法制作出的三维光子晶体结构

上发现了天然的三维光子晶体结构。图 1.3 显示了用 SEM、TEM 和电脑技术相结合的方法获取的帝王蝴蝶翅膀的显微结构。研究发现构筑这种光子晶体的材料是一种类似于纤维素的角质蛋白质,其原胞内结构为一四面体,晶格结构则属于三斜晶系。尽管光子晶体的提出已有十几年了,但是光子晶体在实验上仍然发展很慢,困难重重。最近人们研究发现,在生物界的 DNA 的帮助下,可以在微米尺度下制造出各种各样复杂的结构。这预示着未来的研究中,生物技术也许可以为光子晶体的合成开创一条新的道路。

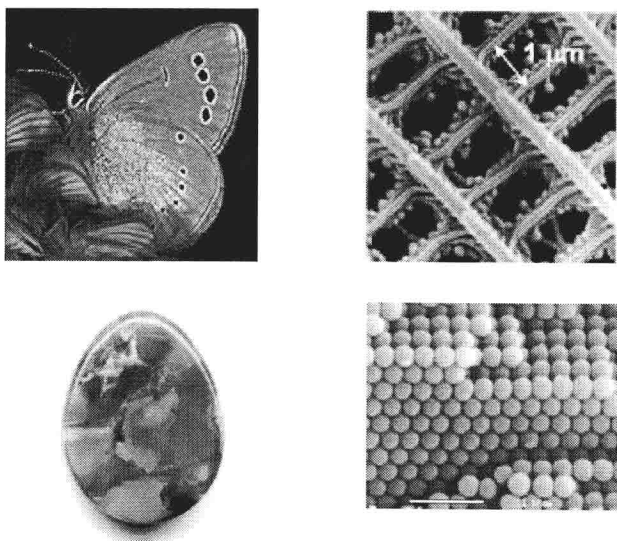


图 1.3 Adonis 蓝蝴蝶和蛋白石以及它们的 SEM 照片

1.1.2 光子晶体的理论基础

光子晶体的理论分析可以归结为求解 Maxwell 方程时谐电磁场分量的本征值问题。通过求解本征值,可以清楚地看到光子晶体的带隙结构。这里只对相关的物理概念和理论基础作简要介绍,更详细的内容可以参阅相关文献^[9-20]。

在线性、各向同性、无损耗的无源介质中,由 Maxwell 方程出发,在旋度方程中消去磁场和电场分量,Maxwell 方程演变为如下两个主方程,即

$$\Theta_E E(r) = \frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times [\nabla \times E(r)] = \frac{\omega^2}{c^2} E(r) \quad (1-1)$$

$$\Theta_H H(r) = \nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times H(r) \right] = \frac{\omega^2}{c^2} H(r) \quad (1-2)$$

其中, $c = 1/\mu_0 \epsilon_0$ 是自由空间中光速。

形式上, 以上等式类似于量子力学中的薛定谔方程, 其中, 等式(1-2)左边的 $\Theta = \nabla \times (1/\epsilon) \nabla \times$ 类似于薛定谔方程中的哈密顿算子 $-\nabla^2 + V$, 方程右边的 ω^2/c^2 类似于薛定谔方程中的能量本征值 E , 而 $1/\epsilon$ 类似于薛定谔方程中的势场。

以上方程为一个本征值问题, 在无限大均匀空间中, 方程的本征频率 ω 是连续的。但是, 对于光子晶体等具有空间周期的介质结构, 其本征频率 ω 是分离的, 这是我们下面主要探讨和最感兴趣的问题。

理想光子晶体是由相同的结构单元在空间无限重复而构成的, 类似于固体物理中晶体的结构, 故可以用固体物理中的空间点阵等概念来描述光子晶体的周期性。称光子晶体的最小重复单元为基元, 理想光子晶体是由排列在三个基本平移矢量 $\{a_1, a_2, a_3\}$ 所确定的空间点阵上的基元构成的, 空间点阵的格矢为 $R = m_1 a_1 + m_2 a_2 + m_3 a_3$, 其中 m_1, m_2, m_3 为整数。光子晶体的周期性是通过介质材料介电函数 $\epsilon(r)$ 的周期性体现的, 即

$$T_R \epsilon(r) = \epsilon(r+R) = \epsilon(r) \quad (1-3)$$

其中, T_R 代表位矢 r 到 $r+R$ 的点阵平移算子。

具有(1-3)式所示的周期性函数可以在傅立叶空间展开, 即

$$\epsilon(r) = \sum_G \bar{\epsilon}(G) e^{iG \cdot r} \quad (1-4)$$

其中, 傅立叶系数 $\bar{\epsilon}(G)$ 是定义在傅立叶空间(波矢空间)中的函数。由(1-3)式可知: $G \cdot R = 2n\pi$, 其中 n 为整数, 这表明 G 为傅立叶空间中的周期点阵。傅立叶空间中的周期点阵为晶体的倒易点阵(记为 B), 其基矢和倒格矢的关系为

$$\begin{cases} \hat{b}_i = 2\pi \frac{\hat{a}_j \times \hat{a}_k}{\hat{a}_i \cdot \hat{a}_j \times \hat{a}_k} \\ G = l_1 \hat{b}_1 + l_2 \hat{b}_2 + l_3 \hat{b}_3 \end{cases} \quad (1-5)$$

与自由空间中的电磁波相比, 周期性结构中电磁波不能表示为平面波的形式。Bloch-Floquet 原理告诉我们, 周期性介质中电磁波具有布洛赫波的形式, 可以表示为 $e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}} \cdot f(\mathbf{x})$, 其中, $f(\mathbf{x})$ 是周期函数, 满足 $f(\mathbf{x}+R) = f(\mathbf{x})$ 。容易看出, 电磁波的这种周期性直接来源于晶体结构的周期性, Bloch-Floquet 原理揭示了这种依赖关系。

应用 Bloch-Floquet 原理到 Maxwell 方程的求解中, 电磁波的形式表示如下, 即

$$\hat{H} = e^{i(\hat{k} \cdot \hat{x} - \omega t)} \hat{H}_k \quad (1-6)$$

这里, $\hat{H}_k$ 是空间周期行数, 将(1-6)式代入(1-2)式, 我们得到关于 $\hat{H}_k$ 的本征方程, 即

$$(\nabla + i\hat{k}) \times \frac{1}{\epsilon} (\nabla + i\hat{k}) \times \hat{H}_k = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \hat{H}_k \quad (1-7)$$

以上方程精确描述了光在周期性介质的传播特性, 但难以给出解析解, 更多的采用数值方法求解方程。目前, 人们已经发展了很多计算光子晶体的方法, 包括平面波方法^[9-11]、转移矩阵方法^[12-14]、时域有限差分法^[15-17]、多重散射方法^[18-19]等。这些方法都是光子晶体研究中的有效途径, 但其运算速度、运算效率仍有待提高。因此, 研究快速、高效的计算方法是光子晶体理论研究和工程应用中的一项重要工作。

1.2 光子晶体的应用

光子晶体的许多应用都是基于光子晶体禁带效应。理论分析、模拟分析、寻求最大禁带光子晶体结构等, 一直是光子晶体理论研究的重点, 尤其在二维的情况下, 目前已提出了多种二维光子晶体结构。通过优化结构参数, 这些二维结构都显示了可观的绝对禁带宽度^[20]。为了获得较大的绝对禁带宽度, 这些结构大多采用在高介电常数材料上制作周期排列的空气孔。研究表明, 通过不断优化光子晶体的周期性是产生大禁带的有效手段, 例如具有两套晶格常数的光子晶体具有更宽的绝对禁带^[21], 此外, 采用各向异性材料同样能增加绝对禁带的宽度^[22]。

运用对称性分析和量子理论, Fan 等人^[23,24]提出了由两个光子晶体单极谐振腔构成信道过滤器的设想。进一步拓展这一思路, 他们提出了由 $2n$ (n 是任意整数) 个单极谐振腔或单个多极谐振腔构成信道过滤器的设想。考虑到光子晶体信道过滤器具有极高的品质因子, 例如单极谐振腔构成的信道过滤器的品质因子达到 1 000, 而由多极谐振腔构成的过滤器更是高达 6 000, 这一设想为开发新一代 DWDM 器件展示了光明的前景。

如果在一个完美的、存在禁带的光子晶体中引入一条线缺陷, 则此线缺陷能引导频率在禁带内的光在光子晶体中传播, 有时人们把这种光子晶体线缺陷称为光子晶体波导(图 1.4)。理论上, 光子晶体波导的导光机制不同于传统的波导(传统的波导主要是靠全反射原理导光), 它是基于禁带导光。应用中, 光子晶体波导也具有不同于传统波导的特性。大量的理论和实验研究表明^[25-27], 即使对于直角转弯的情况, 光子晶体波导都能有效地传输电磁波, 这一特性引起人们

极大的关注,这是传统波导不具有的特性(图 1.5)。

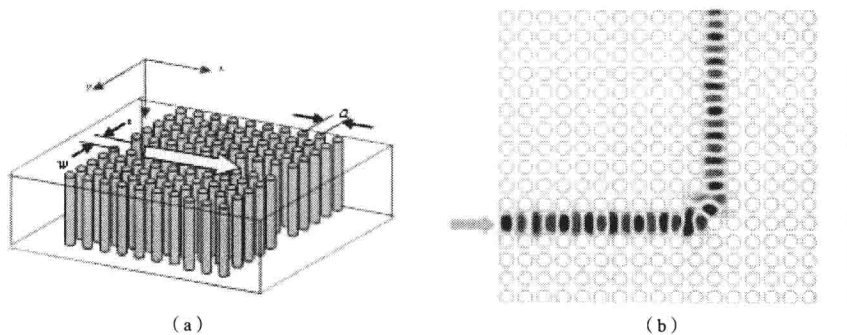


图 1.4 光子晶体波导和导光特性

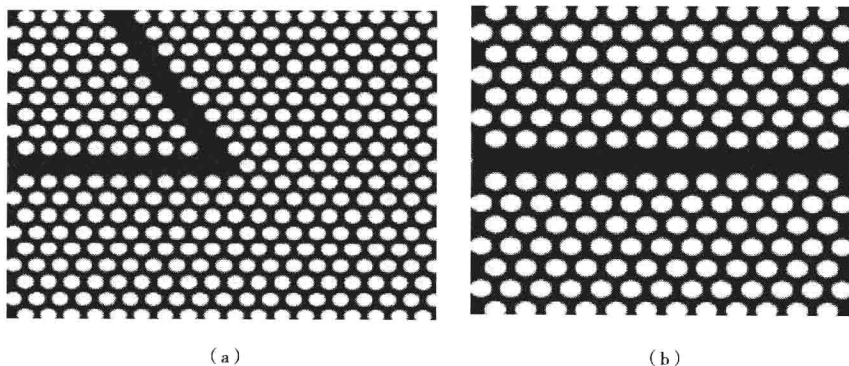


图 1.5 不同形状的光子晶体波导

微谐振腔的制作对光集成有着重要的意义,近年来受到广泛的关注。但由于其尺寸特别小,用传统的金属谐振腔制作方法来制造微谐振腔是相当困难的,而且在光波段,传统的光波谐振腔的损耗相当大,品质因素值很小。而对于光子晶体微谐振腔(图 1.6),它的品质因素可以做得很高,是采用其他材料制作的谐振腔无法达到的。

作为一种新型光学材料,光子晶体可以应用于各种光学集成器件的制造中。这包括高品质反射镜、高效发光二极管、低阈值、高品质因数微谐振腔、宽带带阻滤波器、窄带选频滤波器、光子开关、光子存储器、光子限幅器以及光子频率变换器等诸多方面。除禁带效应之外,另外一类同样重要、不同寻常的超强色散效应存在于某些频率范围内的特殊光子晶体中,例如超棱镜、自聚焦现象等。这类现

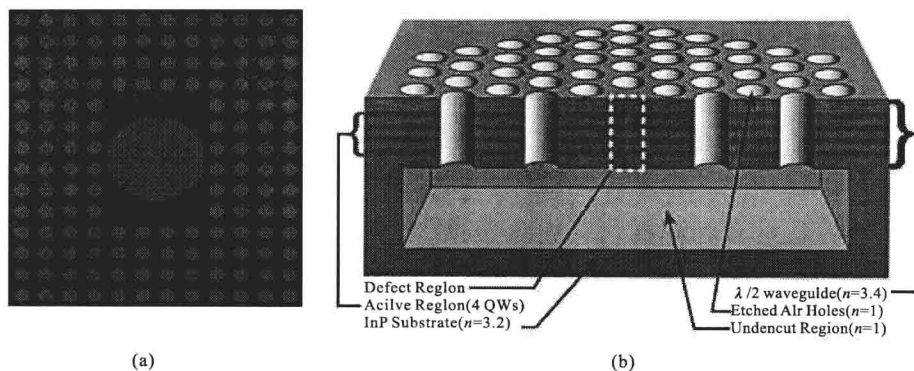


图 1.6 光子晶体微谐振腔

象首先是由 Lin 和 Kosaka 等人^[28-29]提出并在特殊设计的光子晶体结构中实现的。这种结构对波长很敏感,如果波长相差很小的两种光波以相同角度射入这种晶体,由于光子晶体对两种波长的折射率不同,将发生不同角度的折射,实验证实波长相差 1% 的两种光在这种特殊的光子晶体中将彻底地分开,分开的角度达到 50° 。这类不同寻常的色散特性具有很多潜在的应用,例如自聚焦、成像等^[30-33]。

负折射效应是系统等效折射率为负时所表现出的光学现象,它在光学成像、光学隐身等方面具有潜在的应用价值。研究表明,光子晶体在特殊情况下具有负折射特性,这一特性不仅存在于三维的光子晶体中,在二维的光子晶体中也同样存在,这个结果非常令人激动。由于二维光子晶体的实验制备手段已相对成熟,光子晶体成为观察负折射现象的理想材料,例如,麻省理工学院的科研人员采用光子晶体负折射特性实现平板成像。研究表明,光子晶体平板成像比传统的透镜成像具备更多优点。这表现在相对于球形透镜,光子晶体平板较容易制作,没有光轴概念,能够实现三维成像等。此外,日本的 Notami 教授^[34]最近基于光子晶体负折射现象提出了 Open Cavity 概念,这对于新一代的谐振腔具有重要的意义。有关光子晶体中负折射现象的实验结果,已在《Nature》相继报道,受到人们的广泛关注^[35-37]。

目前基于光子晶体概念最成功的产品是光子晶体光纤。光子晶体光纤概念是由英国 Bath 大学 Russell 在 1992 年提出的,近年来,光子晶体光纤的重要研究成果多次在国际最高学术期刊《Science》和《Nature》上发表,2000 年, Russell 也因这项发明荣获美国光学学会的 Fraunhofer 奖。

光子晶体光纤是一种微结构光纤,它是低折射率材料在高折射率背景材料中的二维周期排列结构(第三维即为光纤导光方向),光纤的芯层由周期结构的缺陷引入(图 1.7)。高折射率材料通常是纯 SiO_2 ,而低折射率材料是空气,因此光子晶体光纤可以说是单一材料制成的光纤。Knight 等人^[38]在 1998 年制成第一根光子晶体光纤结构,空气孔在 SiO_2 材料上按三角周期结构排列,光纤的芯层是通过遗漏其中一个空气孔,即实心缺陷构成。

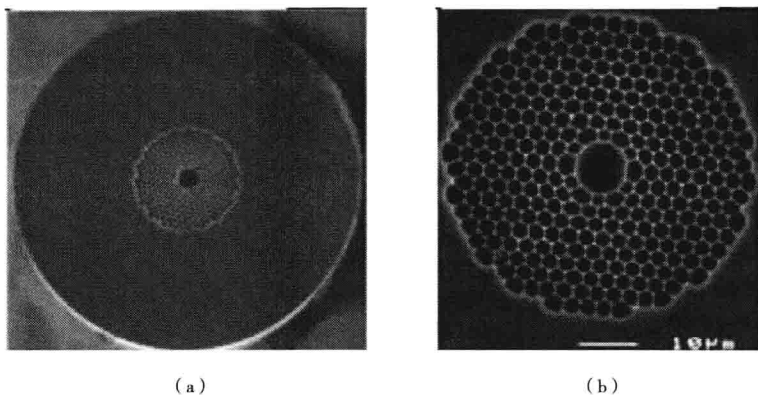


图 1.7 光子晶体光纤结构图

1999 年,Cregan 等人^[39]报道了三角周期结构(SiO_2 /空气)光子晶体光纤的导光实验。理论研究工作也相继报道,这些工作阐明了光子晶体光纤的导光机制^[40—43]。研究表明,与传统光纤相比,由于敷层的等效折射率强烈地依赖于光的频率,光子晶体光纤表现出了许多独特的性质:①传输模式数目主要取决于光纤结构,可制作无限宽频带单模光子晶体光纤;②在单模传输条件下,基模的模斑可大于传统光纤 1 个量级;③在短波长区,基模存在反常色散等。这些独特性质预示着光子晶体光纤潜在的应用前景,人们已在诸如色散补偿应用、光孤子传输以及高功率光纤激光器等方面展开了许多有益的研究工作。

1.3 本书的主要内容和章节安排

根据介质结构的空间分布,我们可以区分出两类截然不同的介质结构。第一类的介电常数是空间周期分布的,被称为光子晶体;另一类的介质常数是随机分布的,被称为随机介质。这两种结构由于其独特的光学特性和潜在的应用价值,例如光子禁带、电磁波局域化等现象,都受到了人们的广泛关注。最近几年,

随着制备工艺和应用的发展,各种材料制备的光子晶体,例如半导体材料、金属材料、液晶已经被提出并在实验中完成。在这些结构中,材料的色散、非线性、各向异性和介质结构的周期性、随机性共同作用,这必将导致一些独特的光学特性,例如可调谐、宽禁带等。虽然这些结构所具有的特性受到人们的关注,但很多现象还不能为人们完全理解。现有的光子晶体理论和随机激光理论,基于介质的空间分布分析、解释电磁波的传播特性,往往忽略了介质的这些特性,显然不能解释以上现象。

在本书中,称这种含有光折变、负折射率、各向异性、色散、非线性等功能材料系统为复杂光子晶体。本书认为,理解这种晶体光学特性的关键问题是理解晶体的空间分布(包括周期性和随机性)与组成材料内在特性之间的相互关系。基于这一思路,我们开展了光子晶体和随机介质的理论研究,力图解释其中的光学特性。这一工作进一步完善和丰富了现有的相关理论,为预言新现象和实际应用提供依据。本书主要内容如下。

首先,从 Maxwell 方程出发,介绍和探讨了时域有限差分方法及传输矩阵法的基本原理和方法。重点研究如何将光学增益、负折射率、各向异性、色散、非线性等材料特性引入到传输矩阵法和时域有限差分方法中,并进行了算法实现。其次,采用以上方法探讨了光子晶体微腔激光器的光学特性,主要探讨增益、各向异性、色散、非线性等材料对缺陷波特性的影响,详细分析了一维光子晶体微腔中缺陷模的阈值、模式移动等特性以及和结构参数的依赖关系。对于随机介质中的随机激光现象,主要探讨了一维、二维随机介质中准态模的阈值特性以及空间随机性、模面积对它的影响,另外色散导致的模式移动也作了详细探讨。最后,提出了采用负折射介质实现滤波器的思路,研究了这种滤波器的机制和优越性。

本书共分八章。第一章是光子晶体概念及其应用概述;第二章介绍时域有限差分方法和传输矩阵法的基本原理和优缺点;第三章讨论在传输矩阵法中如何引入增益、色散、非线性、负折射率以及各向异性等材料特性;第四章研究了缺陷中含有各向异性、色散、非线性等材料后,缺陷模的响应特性;第五章探讨了随机介质中模式的形成机制以及它的放大、移动等特性;第六章探讨了左手材料周期结构的多通道窄带滤波特性;第七章研究了各向异性光子晶体中的电光效应和能带裁剪;第八章分析了磁性光子晶体的磁光效应和模式分裂。

参考文献

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid — state physics and electronics. Phys. Rev. Lett., 1987(58):2 059.