

光子晶体材料在集成 光学和光伏中的应用

GUANGZI JINGTI CAILIAO ZAI JICHENG
GUANGXUE HE GUANGFUZHONG DE YINGYONG

陆晓东 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

光子晶体材料在集成光学和 光伏中的应用

陆晓东 著

北 京

冶金工业出版社

2014

内 容 提 要

本书主要内容包括光子晶体色散曲线的计算、光子晶体高阶带隙的性质、集成光子晶体窄带滤波器研究、超薄晶硅太阳能电池陷光结构设计等。书中各章的光子晶体色散曲线、瞬态光场分布、透射谱和反射谱数据,均为作者原创性成果。此外,为能比较全面地反映光子晶体研究的进展情况,本书还对光子晶体材料的发展趋势、设计方法、加工技术等进行了详细阐述。

本书可供高校研究生及高年级本科生、科研院所等相关专业的研究人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

光子晶体材料在集成光学和光伏中的应用/陆晓东著. —
北京:冶金工业出版社, 2014. 10

ISBN 978-7-5024-6745-6

I. ①光… II. ①陆… III. ①光学晶体—应用—集成
光学—研究 ②光学晶体—应用—太阳能发电—研究
IV. ①TN25 ②TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 220955 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6745-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京佳诚信缘彩印有限公司印刷

2014 年 10 月第 1 版, 2014 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 11.5 印张; 222 千字; 172 页

38.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

自从 1987 年 Yablonovitch 和 John 提出光子晶体概念以来,光子晶体材料已成为光学和光电子学领域的研究热点之一。光子晶体是一种内部介质呈周期性排列的新型人工材料。光子晶体材料的这种结构特点,使其光学性质与普通介质的光学性质产生很大的不同,如光子晶体材料存在光子禁带、负折射率和异常色散性质等等。借助于光子晶体材料的这些特有光学性质,人们可开发出新型光波导、光学滤波器、激光器、微透镜、光学二极管等各类集成光学器件,为利用现代加工技术制作高集成度、光流可控和具有多种光学信息处理功能的光集成器件或回路奠定了材料基础。目前,人们已开发出多种基于光子晶体材料的集成光学器件,且这些器件弥补了传统集成光学器件集成工艺复杂和系统稳定性差等的不足,展示出了巨大的集成潜力。目前,设计光学性质更为复杂的光子晶体结构、研发可大规模生产光子晶体的高精度加工技术和拓展光子晶体的应用领域等,都处于快速发展中。

色散曲线是光子晶体性质的最直接的描述,也是各类光子晶体器件设计的主要参考标准之一。谱信息(即反射谱和透射谱)是另一种描述光子晶体性质的常用方法,且在许多光子晶体器件设计过程中,谱信息已成为光子晶体材料设计的主要技术手段。目前,计算光子晶体的色散曲线、反射谱和透射谱主要采用三种数值计算方法,即平面波展开法、传递矩阵法和有限差分时域法。一般光子晶体色散曲线的优化计算主要以平面波展开法为主,而光子晶体的反射谱和透射谱信息的获得主要通过传递矩阵法和有限差分时域法实现。本书对这三种方法都进行了详细叙述,并且基于平面波展开法、传递矩阵法和时域有限差分法分析了光子晶体色散曲线的性质及光子晶体独特光学性质

产生的原因,设计了多种类型的光子晶体结构及集成光学用器件,深入探讨了波矢偏离周期方向对一维和二维光子晶体性质产生的影响。

理论上设计出具有各种光学特性的光子晶体结构固然重要,但更重要的是如何利用实验手段实现所设计的光子晶体结构,所以本书基于文献调研,综述了从光子晶体概念产生后直到现阶段出现的各类光子晶体结构加工技术。目前,光子晶体结构的加工技术主要分为两类,即“自上而下”的微纳加工技术和“自下而上”的自组装技术,本书对两类光子晶体加工技术都进行了详细叙述。由于光子晶体最重要的应用领域是集成光学领域,而“自上而下”微纳加工技术的水平将成为决定集成光学用光子晶体器件实用化的关键因素,且由于本书实验部分主要采用的是“自上而下”的加工技术,所以本书还重点介绍了作者利用“自上而下”微纳加工技术制作光子晶体器件的实验成果。

近年来,除了基于光子晶体材料的集成光学用器件获得快速发展外,光子晶体材料还在光伏发电领域受到普遍的重视。由于太阳电池是光伏发电系统的核心器件,而光学损失是制约提高太阳电池效率的两大关键因素之一,所以目前利用光子晶体结构制作太阳电池的陷光结构已成为各类太阳电池研究的热点。本书结合晶硅太阳电池的发展趋势,设计了一维光子晶体结构的超薄晶硅电池陷光结构,并对电池的光学性能进行了评估。

本书共分七章,其中第一章是光子晶体材料基本介绍,主要讲述光子晶体的基本概念、光子晶体材料的基本性质、能带工程和光子晶体发展现状和面临的主要问题;第二章主要给出了较系统的光子晶体材料的设计理论,特别是详细介绍了平面波展开法、传递矩阵法和时域有限差分法的基本理论,并借助色散曲线对光子晶体的能带结构进行了深入分析;第三章主要是基于传递矩阵法对一维光子晶体结构和性质进行综合的设计,给出了多种有用的一维光子晶体结构形式;第四章主要剖析了光波传输方向与二维光子晶体能带间的关系,并针对二维正方晶格不易出现完全光子禁带的特点,深入研究了格点形状

和取向对正方晶格能带结构的影响,给出了多种具有完全 TE 模和 TM 模光子禁带的正方晶格结构形式;第五章主要概述了从光子晶体概念提出后出现的一些制备光子晶体方法,包括机械加工法、光刻法、自组装法等;第六章给出了作者利用光刻技术和 ICP(诱导耦合等离子体刻蚀技术)刻蚀技术制作一维光子晶体高阶禁带滤波器的实验结果;第七章给出了作者利用一维光子晶体结构制作晶硅太阳能电池陷光结构的一些最新研究成果。

本书主要内容均源自本人博士学习期间的研究成果和近年来利用光子晶体制作晶硅电池陷光结构的研究成果。此外,为使内容充实,还增加了该领域的一些典型成果的总结。本书的出版得到辽宁省微电子工艺控制重点实验室、渤海大学理论物理(光伏方向)重点学科的大力支持。

作 者
2014 年 8 月

目 录

第一章 光子晶体材料基础	1
第一节 光子晶体材料介绍	1
一、光子晶体的概念	1
二、光子晶体中特殊的光传输现象	3
三、光子晶体材料的应用	4
第二节 光子晶体材料的能带工程	4
一、光子晶体的禁带工程	5
二、光子晶体带边 (band - edge) 工程	9
三、光子晶体的允带工程	9
四、能带工程展望	13
第三节 基于光子晶体的光集成发展现状和存在的主要问题	13
第二章 光子晶体的设计理论	15
第一节 平面波展开法	16
一、本征值方程	16
二、Bloch 理论	18
三、本征值求解	18
四、算法举例	20
五、色散曲线分析	22
六、光子晶体中电磁场传输性质	23
第二节 传递矩阵法	27
一、一维光子晶体结构	27
二、传递矩阵的推导	28
三、计算实例	31
第三节 时域有限差分法 (FDTD)	32
一、Maxwell 方程	33
二、差分方程	33

三、FDTD 算例	38
第三章 一维光子晶体性质研究	41
第一节 一维光子晶体的能带性质	41
一、一维光子晶体的禁带宽度	41
二、一维光子晶体禁带简并分析	43
三、一维光子晶体全方向反射镜	45
第二节 一维光子晶体高阶禁带的特点	46
一、通讯波段禁带边缘的收敛特性	47
二、一维光子晶体高阶禁带的宽度和分布特点	47
三、一维光子晶体高阶禁带的容差特点	48
第三节 一维光子晶体缺陷态分析	49
一、单缺陷层的透射谱性质	49
二、多缺陷层的透射谱性质	51
三、缺陷能级的简并性质	53
第四章 二维光子晶体性质研究	58
第一节 二维光子晶体能带结构优化	58
一、通过改变格点形状获得完全禁带	58
二、格点形状改变对二维光子晶体能带结构的影响	61
三、复式格点的色散曲线特点	65
第二节 电磁场传输方向与二维光子晶体能带间的关系	73
一、波矢在周期性平面内二维光子晶体的色散性质	74
二、波矢偏离周期性平面对二维光子晶体色散曲线的影响	75
三、波矢偏离周期性平面对不同填充比二维光子晶体的禁带影响	78
四、色散曲线对光在光子晶体中传输方向的影响	80
第五章 光子晶体制作方法	84
第一节 精密加工法	84
一、机械加工法	84
二、层层叠加技术 (Layer - by - layer)	85
三、光刻技术	86
四、纳米压印技术	89

五、光学方法	91
六、其他方法	93
第二节 自组装法	93
一、常用自组装方法	93
二、自组装方法的一般过程	95
三、自组装的主要特点	95
四、三维光子晶体中人工缺陷的制作	96
五、自组装方法的展望	98
第六章 集成光学用光子晶体器件	100
第一节 集成光学简介	100
一、集成光学的基本技术途径	100
二、集成光学对材料的要求	101
三、光集成的发展方向	102
第二节 高阶禁带的性质研究	103
一、实验方法	104
二、高阶禁带性质	106
第三节 高阶禁带宽带滤波器设计	108
一、高阶禁带设计	108
二、实验方法	109
三、结果和分析	110
第四节 反射式窄带滤波器设计	114
一、正弦振荡以微扰的形式叠加在多层结构中各层的光学厚度上	116
二、正弦振荡对多层结构中各层的光学厚度进行调制	117
第五节 光子晶体带阻滤波器	120
一、理论设计	120
二、试验过程	121
三、结果和分析	121
第七章 光子晶体在晶硅电池陷光结构中的应用	126
第一节 晶硅太阳能电池发展状况及趋势	126
一、晶体硅太阳能产业发展现状	127
二、晶硅太阳能电池发电成本分析	128

三、晶硅电池技术的未来发展趋势	133
第二节 超薄晶硅太阳能电池上表面陷光结构研究	139
一、一维光子晶体结构研究现状	140
二、超薄晶硅电池的上表面陷光结构要求	141
三、基于一维光子晶体材料的超薄晶硅太阳能电池上表面陷光 结构设计	143
四、上表面陷光效果评估	147
第三节 基于一维光子晶体陷光的超薄晶硅太阳能电池研究	149
一、结构模型和陷光效果评估方法	149
二、不同厚度晶硅电池的光吸收情况	150
三、一维光子晶体表面织构优化	152
四、电池性能评估	153
参考文献	155

第一章 光子晶体材料基础

第一节 光子晶体材料介绍

自然界中存在许多天然的晶体，如冰晶体（雪花）、石英晶体（水晶）、碳晶体（钻石）、氧化铝晶体（宝石）等。这些晶体可分为单晶和多晶两类。单晶是指原子（原子、离子、原子团或离子团）在三维空间无限周期排列而成的固体结构。晶体结构中原子排列的这种长程有序的特点，使其外形往往呈现出特定的几何形状。晶体结构中的这种原子排列特点也是其区别于气体、液体以及非晶态固体的物理本质。多晶是取向各异的单晶晶粒的集合体，所以多晶只是在一定尺度范围内（每个晶粒内），原子排列呈现出长程有序的特点，所以宏观上多晶往往不呈现特定的几何形状。

正是由于晶体内部原子的周期排列结构，形成了周期性势场，才使得晶体内运动的电子受到周期势场的散射，并形成能带结构，在能带与能带之间产生了不存在电子态的能量禁带，而电子波的能量如果落在禁带中将无法在晶体内传输。光子晶体的概念正是受到电子波在晶体中的这种传输特性启发而提出。1987年，Yablonovitch 和 John 分别提出了光子晶体概念，即假设光子也可以具有类似于电子在普通晶体中的传输规律，当光波受到周期性介质势场（周期性介质结构）调制时，也会出现类似的光子允带和光子禁带，光波的能量如果落在光子禁带内，同样也会无法在晶体内传输。基于这一设想，有关光子晶体材料的研究迅速兴起。目前，光子晶体的理论设计和实验研究均获得了长足的进展，且仍处于快速发展过程中。

目前，研究人员已利用光子晶体材料成功制作出了多种有源和无源光学器件，如无阈值激光器、光子晶体滤波器、全方向反射镜、光子晶体偏振片、波导结构和超棱镜等。由于光子晶体材料具有非常卓越的控光性能，因此人们已将其视为未来集成光学和光电子学领域的基础材料。随着制作这种材料技术手段的逐步成熟，其在国民经济中的重要地位将逐渐显现，且其制作水平将成为衡量一个国家半导体工艺技术水平的重要标志。

一、光子晶体的概念

光子晶体是一种人造的新型材料，是一种由介电常数不同的介质材料在空间

周期性排列而成，排列的周期长度为波长量级。根据构成光子晶体材料的周期性特点，可将其分为一维光子晶体（1DPCs）、二维光子晶体（2DPCs）和三维光子晶体（3DPCs）。如图 1.1 所示，图中不同颜色表示不同介电常数的材料。当光进入光子晶体后，将在不同介质材料的界面上发生折射和反射。根据光波长、光在光子晶体中的传输方向、材料折射率差和分布方式的不同，光波在光子晶体中传输时，会在光子晶体的不同方向和不同位置处，形成光波相长和相消的干涉现象。一定条件下，某些特定波长区域会使各方向传输的光产生完全相消的干涉现象，这样就形成了光子晶体的光子禁带。光子禁带的基本性质是使频率处在禁带范围内的光波不能在光子晶体中传输。

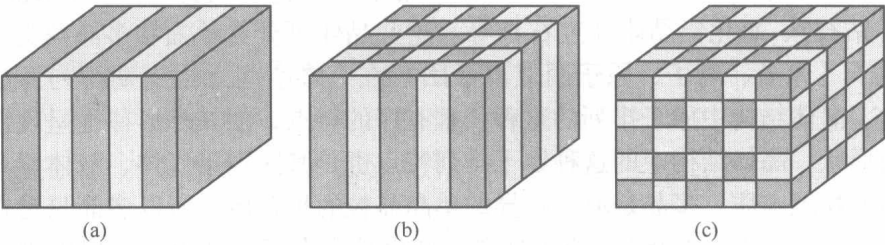


图 1.1 光子晶体结构示意图

(a) 一维光子晶体；(b) 二维光子晶体；(c) 三维光子晶体

把仅在一个方向上介质周期排列的材料称为一维光子晶体，图 1.1 (a) 中给出了一种由两种介质交替堆叠而成的简单一维光子晶体结构，其中的深色部分为一种介质，浅色部分为另一种介质。显然，在垂直于介质层的方向上，介电常数是空间位置的周期函数，而在平行于介质层平面的方向上，介电常数不随空间位置而变化。这种光子晶体的特点是结构简单，易于制备，可产生全方向的三维禁带结构，因而用一维光子晶体材料能制备出部分由二、三维光子晶体材料才能制作的器件。二维光子晶体是介质在两个方向上呈周期性排列的介质结构，如图 1.1 (b) 所示。二维光子晶体的制作比三维光子晶体容易，且其可呈现出三维光子晶体的部分特性，这也是二维光子晶体成为很多光子晶体材料应用的首选结构的原因。三维光子晶体是介质在三个方向上均为具有周期性排列的结构，它可形成三维的全方向光子禁带，使频率落在禁带中的光在任何方向上都被禁止传输。三维光子晶体具有极其重要的应用前景，但其制作相对来说比较复杂，对材料的设计和加工都有很高的要求。

与通常的半导体晶体相比，光子晶体具有一个显著的、很吸引人的优势，那就是光子晶体性质具有内在的完全可调性，即可通过人工设计，来改变晶格的排列方式、晶格缺陷的引入方式、晶格格点的大小和组成等，从而能使材料对光的控制完全处于材料制作者的掌控之中。正因为如此，光子晶体材料已被认为是可

取代现有的电子半导体材料，而成为下一代信息处理芯片的基础材料。在长距离光通讯中，光纤已经发挥了主导作用，而在短距离光通讯中——甚至芯片内部的光子传输，有望通过光子晶体材料基础，进而可以制造出全新架构、具有更高信息处理能力的光子计算机。利用光子晶体材料可以制造能承载更高信息量的光纤，纳米级尺寸的零阈值激光器，高效率、低损耗的光无源器件和集成光路。这些芯片的成功研制将成为新信息技术革命的基础，并会极大推进信息技术进入全光化传输和处理时代的进程。

二、光子晶体中特殊的光传输现象

光在光子晶体中传输与光在普通介质中传输的性质有显著的不同。图 1.2 所示为普通介质和某二维三角晶格结构光子晶体的色散曲线，其中图 1.2(a) 所示为光在普通介质中传输的色散曲线，图 1.2(b) 所示为光在二维三角晶格中传输的色散曲线。图 1.2 所示的横坐标为波矢量 k ($k = \pi/\lambda$)，其中图 1.2(b) 所示的横坐标波矢量是用当布里渊区的特殊点对应的波矢量表示。图 1.2(a) 所示的纵坐标为光波角频率 ω ，图 1.2(b) 所示的纵坐标为归一化频率 (ω 为光波角频率、 a 为晶格常数、 c 为真空中的光速)。从图 1.2 可见，在普通介质中，频率和波矢呈线性关系，光波传输过程为各向同性性质，色散曲线表现为直线形式；在周期性介质结构中，光传输的色散曲线产生了明显的变化，其中最重要的变化就是光子禁带的出现和光传输过程出现了各向异性的性质。光子晶体色散曲线的这种变化具有十分重要的应用，概括如下：

- (1) 光子禁带：禁止频率处于禁带范围内的光在光子晶体内传输；抑制原子和分子自发辐射频率处于禁带内的光发射，延长高阶电子能带上的电子寿命。
- (2) 光子频带：对于频率处于允带内的光波，光子晶体是光的良导体；光

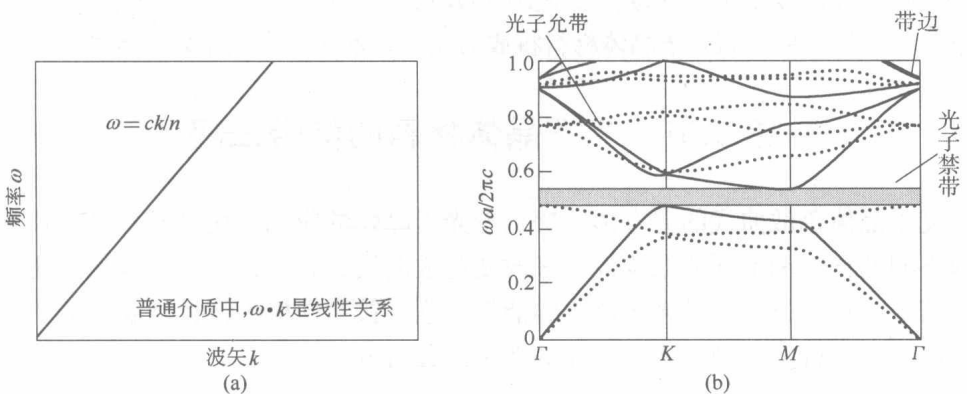


图 1.2 普通介质和二维三角晶格光子晶体的色散曲线
(a) 普通介质的色散曲线；(b) 光子晶体的色散曲线

在光子晶体内的群速度（即 $v_g = \nabla_k \omega(k)$ ）可以变得非常慢，从而有助于延长光与物质相互作用的时间和增强光子晶体的非线性光学效应；光子晶体内光波具有各向异性的传输性质，可利用光子晶体制作起偏器获得偏振光；不同入射角或波长的入射光，在光子晶体内会产生性质不同的衍射现象。

（3）带端（即布里渊区边界点）：由于这些位置是满足 Bragg 反射条件的特殊点，光波在这些位置以驻波的形式存在，具有最强的光与物质的相互作用，所以这些点也是设计和制作光子晶体激光器的理想激射点。

三、光子晶体材料的应用

光子晶体材料是一个具有广阔应用前景并充满挑战的新兴研究领域，其发展速度和取得的成就都令人瞩目。一方面人们不断地扩展合成各种复合材料、不同结构和性能的光子晶体，以便给基础研究，特别是固体物理和光衍射传输理论的研究，提供丰富的研究平台；另一方面不懈地拓展光子晶体的应用领域。迄今为止，人们已研制出许多基于光子晶体材料的全新光子学器件，如无阈值激光器，无损反射镜、弯曲波导、滤波器、高品质因子的光学微腔、偏振片、低驱动能量的非线性开关、放大器、波长分辨率极高而体积极小的超棱镜、具有色散补偿作用的光子晶体光纤及高效率的发光二极管等。光子晶体的出现使信息处理技术的“全光子化”和光子技术的微型化与集成化成为可能，其影响可与当年半导体技术产生的影响相提并论。

近年来，光子晶体的应用领域得到进一步扩展，具体表现在：与纳米技术相结合，用于制造微米级的激光器，如硅基激光器；与量子点结合，利用原子和光子的相互作用影响材料的性质，从而达到减小光速、增强吸收的作用；光子晶体光纤的应用。随着社会的发展，显赫一时的半导体器件已经不能满足信息技术发展的需要，必须寻找传输速率更高、效率更高的新材料。目前普遍认为，光子技术将续写电子技术的辉煌，而光子晶体材料将成为光子技术未来发展主要依赖的材料。

第二节 光子晶体材料的能带工程

光子晶体色散曲线的分布形式决定着光子晶体的应用，而光子晶体可以通过选择不同的材料和不同的结构设计来改变色散曲线的分布，使光子晶体满足各种实际需要，这一过程就是光子晶体的能带工程。按不同应用设计波长在光子晶体色散曲线上位置的不同，光子晶体的能带工程可分为：

- （1）禁带工程。
- （2）带边工程。
- （3）允带工程。

下面结合具体的应用分别加以介绍。

一、光子晶体的禁带工程

光子禁带 (Photonic band gap) 可分为完全禁带 (Complete band gap) 和不完全禁带 (Incomplete band gap) 两种。所谓完全禁带, 是指光在整个空间的所有传输方向上都有能隙, 并且每个方向上的禁带相互重叠; 不完全禁带, 相应于空间各个方向上的禁带并不完全重叠, 即只在特定方向上有禁带。要使光子晶体沿空间各个方向上的禁带相互重叠, 那么它们的禁带宽度必须足够大, 所以为了设计具有完全禁带的光子晶体结构, 考虑的重点包括两方面因素, 即周期性介电函数的变化幅度要足够大, 即要有高的折射率差; 从结构上消除对称性引起的光子能带简并。

根据禁带波长和晶格常数间的比例关系, 如图 1.2(b) 所示, 可将光子晶体的禁带分为两种, 即禁带波长和晶格常数在同一数量级的布拉格散射型和禁带波长远大于晶格常数的谐振型。对于布拉格散射型的禁带, 其形成的能带较宽且禁带位置在归一化色散曲线上多属于低阶禁带, 而谐振型的禁带对应的能带相对较窄, 在归一化色散曲线上多属于高阶禁带, 这也是多数光子晶体应用都是以设计布拉格散射型光子晶体为目标的原因。

下面以布拉格散射型光子晶体为例, 分析禁带形成的条件和机理:

(1) 周期性结构对介质中光子的态密度进行了调制和分配。与自由空间中光子态密度均匀分布不同, 光波在介电常数周期性调制的介质中传输时, 其态密度也受到调制, 表现为在相空间中某些光子态的态密度为零, 而另一些光子态的态密度却成倍增长, 其结果是导致了禁带的出现, 即与禁带对应光子态在介质中不存在, 所以要获得光子禁带, 首先要能有效调制和改变光子态密度的分布情况。如果入射到光子晶体表面的光波频率落在光子态密度为零的频率范围内, 光波更易存在于光子晶体外侧高光子态密度的区域, 此时表现为光子晶体的全反射; 如果发生全反射的区域由微腔引起, 那么这些电磁场会在传输过程中通过频率接近的光波间的耦合作用, 将能量转移到光子晶体内可传输的频率上, 宏观表现就是光子晶体可对自发辐射起到有效的抑制作用。

(2) 散射体的形状、分布和与背景介质间的介电常数差, 决定了不同频率间耦合系数的大小。

(3) 光场传输过程中的损耗必须足够小, 以便使频率处于禁带内的光场在出现明显衰减前, 便已经将能量传递给了可传输的模式。由此可见, 光子晶体的光子禁带的性质可通过控制折射率对比、周期点阵形式和不同介质材料的填充比等参数来调节。

如果在光子晶体中引入缺陷, 那么在禁带中便可产生一个频宽极窄的光子附

加能带，它的形状和属性由缺陷的性质来决定。不难理解，由于缺陷位置处的光子态密度远大于禁带频率范围内的光子态密度，所以这一缺陷会将光场严格地限制在缺陷位置附近。理论上，缺陷能级可以根据光子晶体的设计被调节到任何频率范围内，光子晶体中的缺陷既可以通过改变缺陷的形状和大小实现，又可以通过选择具有不同介电常数的其他材料来实现。

（一）缺陷为点状

处于该缺陷位置处的光，一旦偏离该缺陷，将会遇到一种完美的光子晶格，然后被完整晶格反射回到缺陷位置处，光子晶体的这种性质适合制作激光器和二极管，这是一种新的集成光源形式。图 1.3 所示为光子晶体激光器的结构示意图，其通过在光子晶体完美的晶格中引入点缺陷，利用缺陷处光场的局域模形成谐振模式，控制工作物质的自发辐射特性，并利用三维光子晶体的线缺陷或二维平板型光子晶体的多层结构产生的波导作用，获得单一振荡的激光波长。为了得到良好的器件性能和最佳的器件设计，设计点缺陷时应考虑以下几点：

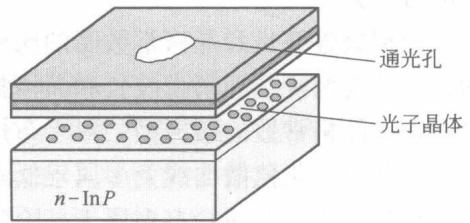


图 1.3 光子晶体激光器

（1）由于三维光子禁带具有最强的光场限制能力，所以构造具有三维完全禁带，且禁带位置处于光学激射波长范围内的光子晶体结构是设计零阈值激光器所必需的。近年来，研究人员已提出了多种不同的设计方案来构造具有三维禁带的三维光子晶体结构，如用 Woodpile 结构、3D wire mesh 及 Stack - of - logs 结构。

（2）在光子晶体的缺陷处引入工作物质和构建传输光场的波导，要求可方便地在光子晶体内部的任意位置处引入任意形状缺陷态。

（3）在光子晶体内引入有效的光激发元（Light - emitting element）。只有引入的工作物质易于实现粒子数反转条件，才能为受激发射提供条件。

（4）在光子晶体内引入导电的晶体，这是制作电极的必要条件。要让三维光子晶体同时满足上述条件是非常困难的。相对而言，二维光子晶体结构更容易满足这些条件。因此，目前，许多研究工作集中在二维光子晶体以及由二维光子晶体延伸出的准三维光子晶体结构方面。

（二）缺陷为线状

如果缺陷为一条线，那么频率处于光子禁带内的光波将被限制在这一线缺陷内部传输，如图 1.4 和图 1.5 所示。图 1.4 是三种光子晶体光纤结构示意图，其中图 1.4(a) 所示为折射率导引型光子晶体光纤，其结构特点是：纤芯是高折射

率介质，包层是低等效折射率介质的光子晶体结构。这一结构的导光机制和模式特性是：纤芯与包层全反射导光，在次高阶模截止带宽内单模传输。图 1.4(b) 所示为空气导引型光子晶体光纤，其结构特点是：纤芯是光子晶体结构缺陷，包层是结构完美的光子晶体。这一结构的导光机制是：通过光子晶体缺陷限制的局域缺陷模，获得单模传输。图 1.4(c) 所示为 Bragg 光纤，其结构特点是：纤芯周围是不同折射率材料的层状介质。这一结构的导光机制是：通过一维光子晶体的三维光子禁带的全反射导光。图 1.5 所示为光子晶体波导及其稳态光场分布示意图。图 1.5(a) 所示为光子晶体波导的物理结构。这种波导结构的导光机制是：垂直于周期方向上利用不同折射率介质层间的全反射过程限制光波传输，在二维周期平面内通过光子禁带限制光波传输。图 1.5(b) 所示为光场在光子晶体内部的传输状态。与传统的介质波导相比，光子晶体波导具有的特性包括：可形成无色散的光波导、可实现光波的 90° 弯折传输、可实现光场的无损传输、波导的尺度为波长量级、可与其他光子晶体器件进行集成。

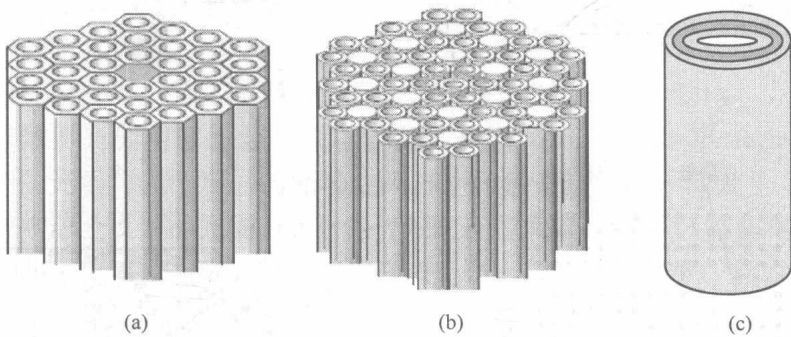


图 1.4 三种光子晶体光纤的结构示意图

(a) 折射率导引型光子晶体光纤；(b) 空气导引型光子晶体光纤；(c) Bragg 光纤

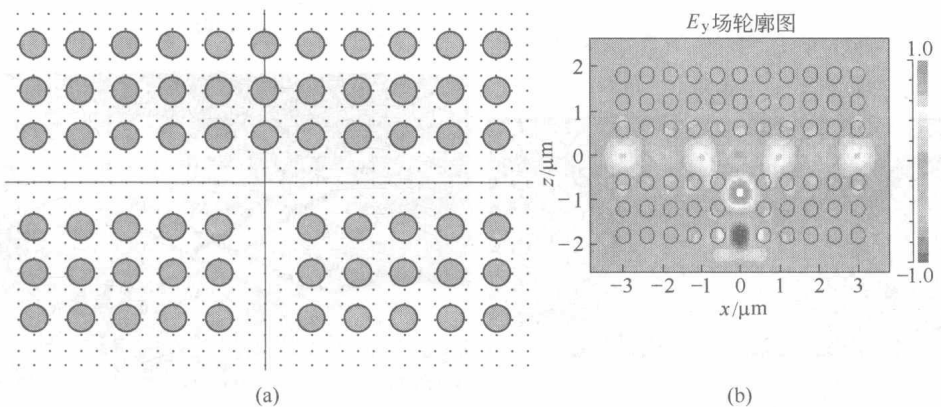


图 1.5 光子晶体波导结构和稳态光场分布示意图

(a) 光子晶体波导结构；(b) 稳态光场分布