

# 光子晶体 原理及应用

马锡英 编著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 光子晶体原理及应用

马锡英 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

光子晶体是不同折射率的电介质材料在空间呈周期性排列构成的晶体结构,它是材料科学、光学原理与集成技术以及微纳电子技术相结合的一门新兴学科,它代表了光集成电路的发展趋势,并将成为下一代新型的光电器件和光集成技术的基础。本书内容包含三个部分:第一部分系统地阐述了光子晶体的基本概念和理论,主要包括光子晶体的概念和性质(第1章),光子晶体的分析方法和电磁波理论(第2章);第二部分介绍了光子晶体的制备方法(第3章);第三部分给出了光子晶体的应用,介绍了新型的光子晶体光学器件,包括光子晶体光开关、滤波器、光波导(第4章),光子晶体光纤的工作原理与技术(第5章),胶体光子晶体(第6章),光子晶体发光(第7章)和负折射率光子晶体(第8章)。

本书适合于从事微纳光学和光通信、微纳电子科学与技术、微电子学、应用物理和材料科学等领域相关的教师、科技人员、研究生和本科生阅读,也可以作为高等院校光学、光通信、电子科学技术等专业高年级本科生及研究生的教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

光子晶体原理及应用/马锡英编著;—北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-027984-2

I. 光… II. 马… III. 光学晶体-高等学校-教材 IV. O7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 113640 号

责任编辑: 鄢德平 刘凤娟 / 责任校对: 赵桂芬

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

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>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2010年6月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010年6月第一次印刷 印张: 22 1/4

印数: 1—2 000 字数: 440 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

随着电子信息技术的飞速发展,集成电路芯片的特征尺寸已达到经典物理的极限,电子作为集成电路的主要载体,当芯片尺寸越来越小时,电子间因库仑力产生热效应,这将大大降低集成电路的性能,产生能量损耗大、信息传输慢等问题。光子作为信息的载体,传输信息快,传输带宽( $10^{15}\text{Hz}$ )远大于金属线传输带宽( $10^5\text{Hz}$ ),更重要的是光子间相互作用很弱,可极大地降低能量损耗,从而提高效率。光子晶体就是以光子为信息载体的新型材料,光子比电子具有更大的容量、更高的速度、更好的保密性、更强的抗干扰性能等,类似于集成电路,可用其制造集成光路,将其应用于全光通信、光子计算机等光子产业。

基于光子晶体的优异性能和广阔的应用前景,近年来,国内外研究人员掀起了光子晶体的研究热潮,光子晶体的理论分析方法、光子晶体的制备方法以及新型的光子晶体光电器件不断涌现出来。作者也进行了光子晶体制备与发光方面的研究,主持并参与了多项光子晶体方面的国家自然科学基金项目,参考了大量的资料,深为该领域近年来取得的成绩打动,为了促进该领域的研究进一步发展,编著了本书,供从事该方面科研工作的研究人员参考。

本书共分8章,各章的内容如下:第1章绪论,主要介绍了光子晶体的概念及其新现象;第2章光子晶体的电磁波理论和光学特性,论述了光子晶体的基本分析方法和一维、二维光子晶体的基本特性;第3章光子晶体的制备方法,简要概述了光子晶体的各种制备方法,包括光刻法、激光干涉法、胶体自组组织法等;第4章新型光子晶体光学器件,介绍了利用光子晶体的光子带隙原理制备的各种光子晶体光波导、光开关、光滤波器等;第5章光子晶体光纤,主要介绍了全内反射改进型和空气带隙型光子晶体光纤;第6章胶体光子晶体,介绍了各种典型的氧化物胶体光子晶体和半导体胶体光子晶体以及聚合物光子晶体;第7章光子晶体的发光特性,主要介绍了高效率的光子晶体发光二极管和光子晶体激光器;第8章负折射率光子晶体,概述了负折射率材料、光在负折射率材料中的传输特性和负折射率光子晶体及其应用。

光子晶体是一门正在发展的新兴学科,如何对这门学科进行分类,如何选材作为光子晶体学术著作的章节内容,都没有现成的范式可供参考。限于作者水平、学识和时间,本书还有很大的局限性,一些有意义的研究课题被较少涉及或没有涉及,如非线性光子晶体等,因此,书中内容难免有疏漏之处,诚恳欢迎广大读者批评指正。

在本书出版之际，感谢绍兴文理学院微电子专业教研室的各位老师及研究生为本书所做的工作。在本书的编写过程中，参考了大量的外科技文献，在此对这些著作的作者表示感谢。

作者还要感谢国家自然科学基金的资助。

本书可以作为高等院校光学、光集成技术、通信技术、光学工程、微电子科学、材料科学、应用物理等相关专业的高年级本科生及研究生教材，也可以作为以上研究领域科技研究人员的参考书。

作 者

2009年5月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言.....	1
1.2 光子晶体的新现象.....	6
参考文献.....	10
<b>第 2 章 光子晶体的电磁波理论和光学特性</b> .....	13
2.1 平面波法.....	13
2.2 传输矩阵法.....	35
2.3 时域有限差分法.....	40
2.4 多重散射法.....	44
2.5 一维光子晶体的光学特性.....	45
2.6 二维光子晶体的光学特性.....	51
参考文献.....	60
<b>第 3 章 光子晶体的制备方法</b> .....	63
3.1 自然生长法.....	63
3.2 机械制备法.....	67
3.3 光刻方法.....	70
3.4 光学方法.....	76
3.5 化学刻蚀方法.....	79
3.6 薄膜生长法.....	82
3.7 胶体自组织密堆积方法.....	84
3.8 反蛋白石光子晶体合成方法.....	93
3.9 典型的三维光子晶体制备方法.....	96
3.10 光子晶体的表征方法.....	101
参考文献.....	102
<b>第 4 章 光子晶体光波导和光学器件</b> .....	107
4.1 光子晶体光波导.....	107

4.2	光子晶体光分叉波导	119
4.3	发射方向可控性光子晶体光波导	128
4.4	光子晶体光交叉与光互连波导	134
4.5	光子晶体波分复用与解复用波导	139
4.6	SOI 光子晶体光波导	144
4.7	新型光子晶体光学器件	154
	参考文献	163
<b>第 5 章</b>	<b>光子晶体光纤</b>	<b>166</b>
5.1	光子晶体光纤简介	166
5.2	全内反射型光子晶体光纤	175
5.3	空气带隙型光纤(HC-PCFs)	194
5.4	其他光子晶体光纤	206
5.5	光子晶体光纤激光器	208
5.6	光子晶体光纤的其他应用	220
5.7	总结	231
	参考文献	233
<b>第 6 章</b>	<b>胶体光子晶体</b>	<b>236</b>
6.1	胶体蛋白光子晶体	236
6.2	氧化物胶体光子晶体	242
6.3	半导体胶体光子晶体的光学特性	255
6.4	聚合物光子晶体	265
6.5	聚合物光子晶体的应用	276
	参考文献	280
<b>第 7 章</b>	<b>光子晶体的发光特性</b>	<b>283</b>
7.1	自然光子晶体的发光特性	283
7.2	高效光子晶体光发射二极管	286
7.3	光子晶体激光器	300
	参考文献	314
<b>第 8 章</b>	<b>负折射率光子晶体</b>	<b>316</b>
8.1	负折射率材料简介	316
8.2	负折射率光子晶体	319
8.3	负折射率光子晶体的应用	332
	参考文献	348

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

随着半导体集成电路技术的不断进步,信息技术取得了飞速的发展,对人类生活和社会经济的发展产生了巨大的影响,人们充分享受着计算机、互联网、移动电话与卫星网络带来的高速度、高效率和高保真度所带来的便利生活。众所周知,集成电路技术的发展一直遵循摩尔定律(1965年摩尔提出)的规律,即芯片集成度每18个月翻一番,特征尺寸每三年缩小 $k$ 倍( $k \approx 2$ ),技术整体更新一代。40多年来,半导体信息技术的发展历史充分证明了这一点。然而,当芯片达到经典尺度的极限后<sup>[1]</sup>,进一步缩小特征尺寸、提高集成度已相当困难。另外,电子作为集成电路的主要载体,当集成度过高时,电子间会存在库仑力,电子间的相互影响所产生的热效应将大大降低集成电路的性能,并引起能量损耗大、信息传输慢等问题。这就是人们常说的“电子瓶颈”效应,它将制约信息技术的进一步发展。因此,寻找新一代的材料和技术已成为科技工作者们迫切的任务。由于光子具有传输信息快、传输带宽( $10^{15}$  Hz)大、光子间相互作用很弱等优点,因此,如果以光子作为信息的载体,可极大地提高信息传输速度,降低能量损耗,增强抗干扰性能和保密性<sup>[2]</sup>。光子晶体就是这样一种新型的材料,它以光子为信息的载体,光子在光子晶体中运动如同电子在电子晶体中运动,可以像半导体材料控制电子一样控制光子的运动行为。人们设想着也能像集成电路一样制造出集成光路,最终发展为全光通信、光子计算机等新型的光子产业。因此,“光”是最终解决人们对信息与日俱增的需求和目前光传输电处理与计算瓶颈效应之间矛盾的根本出路。

### 1.1.1 · 光子晶体的基本概念

自 E. M. Purcell<sup>[3]</sup>于1946年首次提出镜像层可以改变电偶极子辐射特性的理论之后,人们对改变材料的自发辐射产生了极大兴趣,并进行了大量的理论计算与实验研究。直到1987年,E. Yablonovitch<sup>[4]</sup>和 S. John<sup>[5]</sup>借鉴了半导体晶体及其电子带隙的概念,首次分别独立提出了光子晶体(photonic crystal)的概念。光子晶体是由不同介电常数的介质材料在空间呈周期排布的结构,当电磁波在其中传播时,遵循折射、反射、透射原理,电子周期性的布拉格散射使电磁波受到调制而形成类似于电子的能带结构,这种能带结构称为光子能带(photonic energy band)。在合适的晶格常数和介电常数比的条件下,类似于电子能带隙,在光子晶体的光子能带间



可出现使某些频率的电磁波完全不能透过的频率区域，将此频率区域称为光子带隙 (photonic band gap, PBG) 或光子禁带 (见图 1.1)。人们又将光子晶体称为光子带隙材料 (photonic band gap material)。

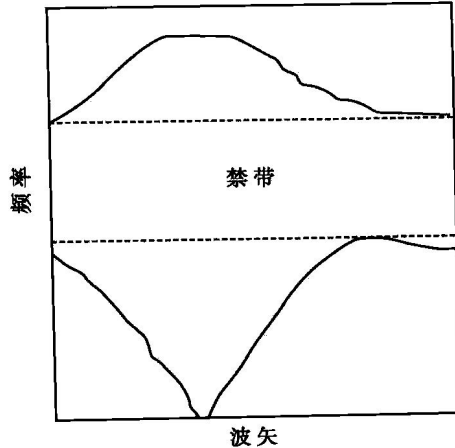


图 1.1 光子禁带示意图<sup>[4]</sup>

与一般的电子晶体类似，光子晶体也有一维、二维、三维之分。一维光子晶体是介电常数不同的两种介质块交替堆积形成的结构，见图 1.2(a)。实际上，一维光子晶体已被广泛应用，如法布里-珀罗腔光学多层的增反/透膜等。二维光子晶体是介电常数在二维空间呈周期性排列的结构。典型的二维光子晶体结构是由一些圆的或方的介质柱在空气背景中排列成六方晶系(三角形或者石墨结构)；或者由空气孔在介质背景中规则排列，见图 1.2(b)，其介电常数在垂直于介质柱的方向上是空间周期的函数，而在平行于介质的方向上是不随空间位置变化的。因此，二维光子晶体在  $X$ - $Y$  平面上具有周期性，而在  $Z$  方向上是连续不变的。三维光子晶体是由两种介质的方块所构成的空间周期性结构，见图 1.2(c)，在  $X$ - $Y$ - $Z$  平面上均具有周期

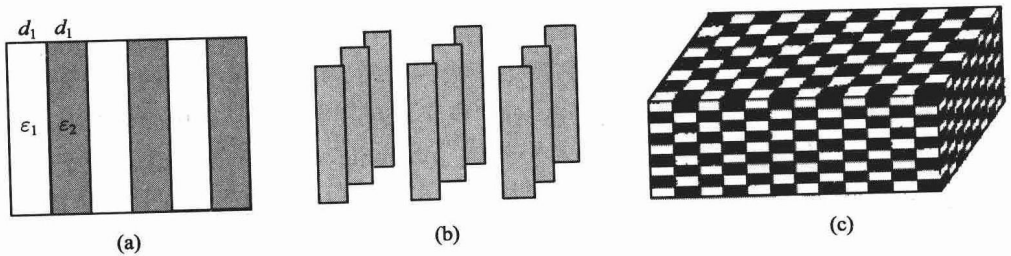


图 1.2

(a) 一维光子晶体；(b) 二维光子晶体；(c) 三维光子晶体

性,即在三个方向都具有频率截止带,而不是在某一个或两个方向具有光子带隙,因而称为全方位光子带隙。E. Yablonovitch<sup>[6]</sup>于1991年首次成功制备三维光子晶体。之后,与一维、二维和三维光子晶体有关的实验与理论方面的研究才逐渐开展起来<sup>[7-10]</sup>。一维和二维光子晶体比较容易生长,相关器件已广泛应用于光学范围,如布拉格光纤和光波导。显然,光子晶体是一种人工制造的新型光子材料。

光子晶体中存在光子禁带的物理机理是基于固体物理的布洛赫(Bloch)理论。在半导体中,电子的波函数遵循薛定谔方程。在无源区的情况下,满足哈密顿方程<sup>[11]</sup>:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\Psi(\mathbf{r})+V(\mathbf{r})\Psi(\mathbf{r})=E\Psi(\mathbf{r}) \quad (1.1)$$

由于势函数  $V(z)$  的周期性,根据布洛赫原理,在布里渊区的边缘将出现能隙,如图 1.3 所示。光在介电常数呈空间周期性分布的光子晶体中传播时服从麦克斯韦(Maxwell)方程:

$$\nabla\times\nabla\times\mathbf{E}(\mathbf{r},t)=\frac{\omega^2}{c^2}(\varepsilon_0+\varepsilon_r)\mathbf{E}(\mathbf{r},t) \quad (1.2)$$

可见,方程(1.1)与方程(1.2)对称。光在介电常数呈空间周期性分布的介质中传播时,其  $\varepsilon=\varepsilon_0+\varepsilon(\mathbf{r})$ ,相当于方程(1.1)中的势函数  $V(\mathbf{r})$ 。在光垂直入射的情况下,  $\nabla\cdot(\nabla\cdot\mathbf{E}(\mathbf{r}))=0$ ,方程(1.2)变成与方程(1.1)完全相同的标量。考虑到周期性的边界条件,方程(1.2)无解的频率区域为频率被禁止的区间,类似于电子带隙,将此区间称为“光子频率禁带”,简称为“光子带隙”。

在光子晶体中还可借用许多固体物理中的概念<sup>[12]</sup>,如倒格子、布里渊区、色散关系、布洛赫函数、van Hove 奇点,甚至还可以定义光子的有效质量。不过需要指出的是,光子晶体与常规的晶体(从某种意义上可以称为电子晶体)有本质的不同,如光子在光子晶体中传输服从的是 Maxwell 方程,电子服从的是薛定谔方程;光波是矢量波,而电子波是标量波;电子是自旋为 1/2 的费米子,光子是自旋为 1 的玻色子;电子之间有很强的相互作用,而光子之间没有。

### 1.1.2 光子带隙

光子在光子晶体中的行为类似于电子在半导体晶体中的行为,通过独特的光子

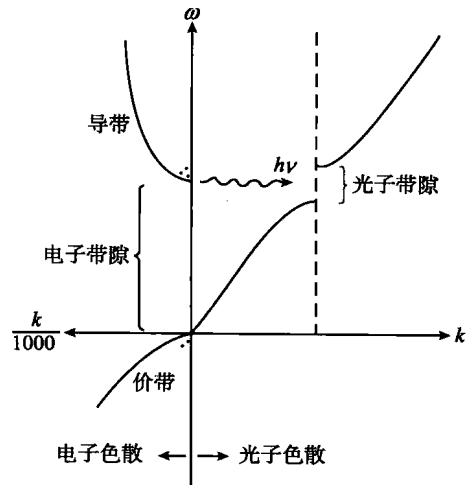


图 1.3 电子带隙(左边)和光子带隙(右边)示意图<sup>[6]</sup>

禁带可改变光的行为。研究表明,光子带隙有完全光子带隙 (a complete and absolute photonic band gap)与不完全光子带隙<sup>[5]</sup>的区分。所谓完全光子带隙,是指在一定频率范围内,无论其偏振方向及传播方向如何,光都禁止传播,或者说光在整个空间的所有传播方向上都有能隙,且每个方向上的能隙能相互重叠。所谓不完全光子带隙则是相应于空间各个方向上的能隙并不能完全重叠,或只在特定的方向上有能隙。决定光子晶体特性的主要因素有组成光子晶体的介质之间的折射率差别、高和低折射率的介质在晶格中所占的比率以及它们在空间的排列结构。总的来说,折射率差别越大,带隙越大,能够达到的效率也就越高。

图 1.3 左边为直接带隙的半导体晶体的电子色散曲线,右边为光子的色散曲线。由于原子间距只为光波波长的 1/1000,为了在同一图中与光子波矢匹配,将电子波矢除以 1000<sup>[12,13]</sup>。导带和价带中的黑点分别代表电子和空穴。如果导带中的一个电子与价带中的一个空穴复合,将在电子能带产生一个光子。如果光子带隙正好对应电子能带边,由于在光子晶体的频率截止带中,光子态密度趋近于零,那么电子-空穴复合产生的光子将无法传播,即电子-空穴的自发辐射复合被禁止,从而改变了材料的自发辐射特性,可以想象,这将对半导体光子器件产生非常深远的意义。

在半导体中,掺杂具有非常重要的作用,它完全改变了半导体的导电特性。比如在半导体掺入磷原子,其外壳层比硅原子多 1 个电子而容易失去,形成 n 型半导体;而掺入少 1 个电子的硼杂质则形成 p 型半导体。p、n 型半导体可用于制造半导体二极管、三极管、发光二极管、半导体激光器等光电器件。通常,将容易失去电子的杂质称为施主杂质,而将容易得到电子的杂质称为受主杂质。杂质原子在半导体禁带中引入杂质能级,施主能级一般靠近导带底,而受主能级一般靠近价带顶。根据杂质能级在禁带中的位置,可将其分为浅杂质能级和深杂质能级。当杂质能级相比较更接近于导带底或价带顶时,则称之为浅杂质能级;当杂质能级更接近禁带中央时,可称之为深杂质能级。最近又有新的分类方法产生,即电子激活能由长距离库仑势决定时,是浅杂质能级;当电子激活能由短距离库仑势决定时,是深杂质能级<sup>[6]</sup>。

借鉴半导体掺杂的概念,在光子晶体结构中加入和去掉某种物质,分别称为“施主”和“受主”型掺杂<sup>[14]</sup>。理论研究表明,对光子晶体进行掺杂,光子带隙附近的光子模式发生重新分布,会极大提高或完全抑制光子晶体中活性介质的自发发射率,显著改变其发射光谱。如图 1.4 所示,光子晶体掺杂后,在其禁带中引入缺陷态,这使其自发辐射显著增强。

### 1.1.3 光子晶体材料

在电磁波的高频区,金属性波导的损失越来越大,甚至使某个频域的电磁波完

全被禁止<sup>[12]</sup>，因此，以光子为信息载体的光子晶体，必须考虑应用正介电常数的材料，如玻璃、半导体材料(Si、Ge、GaAs等半导体材料)、绝缘体等，这些材料甚至对所有的光学频率都具有比较低的损耗。如光在光纤中传播几千千米后所产生的损耗仍可忽略不计。由于正介电常数的材料具有低阻损耗的正介电响应，构成三维周期性电介质的光子晶体结构，可形成一个完全的光子带隙。

光子晶体为不同的电介质在一维、二维或三维上形成周期性排列，光在此周期性介质中传播时发生布拉格散射，由布拉格定律

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1.3)$$

其中， $d$ 为晶格常数； $\theta$ 为入射角； $\lambda$ 为入射电磁波波长。通常要求光子晶体的周期或者晶格常数与所传输的电磁波的波长相当。因此，光子带隙在红外或可见光的光子晶体中，晶格常数应在微米或亚微米量级。光子带隙的大小受介质折射率比(refractive index contrast, RIC)或介电常数比、填充率以及晶格结构的影响。一般地，全向光子带隙要求两种介质的折射率比大于2<sup>[6]</sup>。当折射率比小于2时，在某些特定的传播方向或一定的偏振方向的光也会出现不完全光子带隙。

#### 1.1.4 光子晶体结构的形成

光子晶体是介质周期性排列的结构，在自然界中这样的结构很少，如宝石、蝴蝶彩色翅膀、活鱼鳞等纳米结构。光子晶体要在科学技术上得到应用，需要人为地将介电物质组装成周期性结构，这种物质的介电常数与它周围介质(如空气)的介电常数差别较大。除此之外，还要求其周期长度与光波长相差不大，而且材料的辐射吸收较低。目前，已实现了微波、毫米波、亚微米甚至光波的一维、二维、三维光子晶体。美国Iowa州立大学的Chan和Soukoulis等首先从理论上提出了第一个真正意义上实际可行性的光子晶体结构(金刚石结构)。美国通信研究所的Yablonovitch利用纤维制造技术，首次制造出具有全光子频率禁带、金刚石

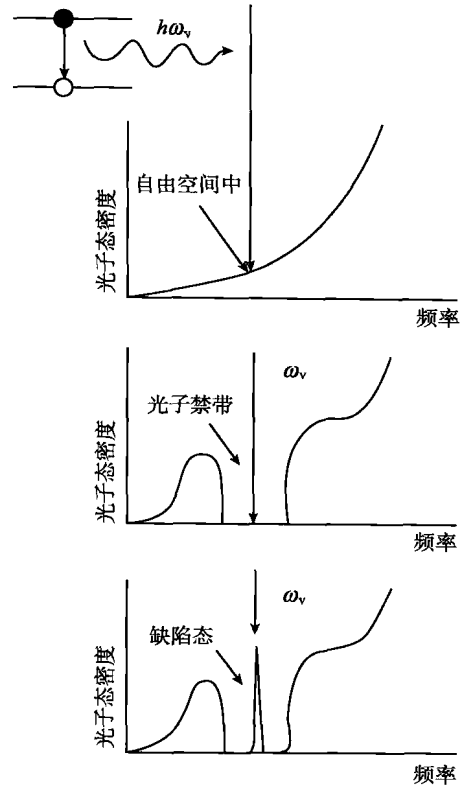


图 1.4 掺杂光子带隙态密度示意图<sup>[11]</sup>

结构的三维光子晶体。之后,一些研究机构相继制造出了毫米波、微波甚至红外波段的三维光子晶体。这些显微技术包括:同步辐射深度 X 射线平版印刷术、蚀刻以及纤维机械加工等。由于波长越短,加工空间立体结构就越困难。特别是制备短波长、工作于可见光波段的金刚石结构光子晶体尤为困难。

目前,光子晶体的制备方法主要是借鉴硅电子工业的一些生长方法,如刻蚀、电化学刻蚀和胶体自组织密堆积方法<sup>[15-17]</sup>。一维光子晶体结构由两种介质交替相叠而成,多采用层层生长法;二维光子晶体一般为介质柱或空气柱在空间呈周期性排列,所以多采用刻蚀或电化学刻蚀法。这两种光子晶体比较容易生长,相关器件已广泛应用于光学领域,如布拉格光纤和光波导实际上分别就是一维和二维光子晶体。三维光子晶体是由两种及以上介质所构成的空间周期性结构,在三个方向而不是在某一个或两个方向具有频率截止带,因而称为全方位光子带隙,其制备难度较大,技术要求高,也是目前的研究热点。刻蚀和自组织密堆积方法是目前制备三维光子晶体的主要方法。

## 1.2 光子晶体的新现象

光子晶体是将不同折射率的介质按周期排列,利用折射和反射原理,使光在其中传播并由内部顺利射出,从而解决光的出射问题。研究发现,如果应用光子带隙原理,不仅可以提高半导体材料的发光效率,而且能改变光产生的基本过程或发光波长<sup>[18-21]</sup>。有意义的是,一方面,光子晶体还具有控制光流、集中光源、提高光-物质相互作用的能力,它不仅使发光二极管 LED 的外量子效率超过 50%<sup>[22, 23]</sup>,使激光二极管的工作特性大幅提高,而且还可应用于高效率、低损耗的反射镜、微谐振腔、低阈值激光振荡、宽带带阻滤波器、极窄带选频滤波器和非线性光子晶体器件等领域<sup>[24-26]</sup>。另一方面,随着信息技术的发展,光子驱动的功能材料及器件将在光存储、光计算机和光学信息处理等光子学领域得到广泛应用。显然,与光通信、信息显示相关的光子晶体具有非常广阔的应用前景。

### 1.2.1 光子晶体对自发发射的控制

光子的自发发射是一个很重要的自然现象。根据黄金跃迁规则,原子的自发发射中满态向空态向下自发发射跃迁的概率为<sup>[12]</sup>

$$\omega = \frac{2\pi}{\hbar} |V|^2 \rho(E) \quad (1.4)$$

其中,  $|V|$  为零点 Rabi 晶胞;  $\rho(E)$  为单位能量间隔内的末态密度。在自发发射中,末态密度是指可产生光发射的光学模式密度。如果无相应的光学模式,将无自发发射产生。

在 1980 年之前,人们通常认为自发发射是自发产生的、不可避免的现象,在 1946 年关于原子和自旋能级的概论中就已经指出自发发射谱是可控制的。20 世纪 70 年代初期, K. H. Drexhage<sup>[26]</sup>在关于表面吸收的染料分子荧光研究中也认识到这一现象; V. P. Bykov<sup>[27]</sup>在 70 年代中期又报道了共轴的一维周期性结构可能会影响自发发射。控制自发发射的里程碑实验为 Kleppner 的理德伯原子实验,即应用一对金属板作为波导,在两个偏振方向中有一个具有截止频率。理德伯原子是高位的主量子数态,可自发发射波长在微波波段的电磁波。R. G. Hulet<sup>[28]</sup>指出,金属波导中理德伯原子的自发辐射衰减被禁止,在截止频率以下将无电磁波模式存在(见图 1.5)。

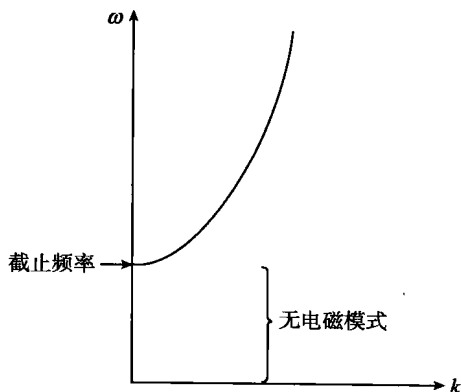


图 1.5 理德伯实验金属性波导截止带<sup>[29]</sup>

在半导体激光器中,为了得到初始激射,必须提高其阈值电流。在双异质结双极晶体管中(电子器件),自发发射也是相当复杂的。在晶体管电流-电压特性的某些特定区域,电子和空穴的自发辐射复合决定了双异质结双极晶体管的电流增益。另外,在太阳能电池中,自发辐射也基本决定了最大输出电压。同时,自发发射还决定了半导体激光器中量子光学中的一个新现象——光子数态密度被压缩的程度。可见,控制光的自发辐射已成为光发射技术中的一个主要环节。由于光子晶体能够控制光在其中的传播,可以利用光子禁带来改变光子晶体中某种电磁态的密度,达到控制其自发辐射特性,从而极大地提高自发辐射效率的目的。

### 1.2.2 单模发光二极管和激光器

发光二极管具有工作可靠、寿命长和无阈值等特性,是一种常用光源,但其相干性差,因此,使用范围受到限制。如果在二极管中制作一种特殊的光子晶体,利用光子晶体在能级跃迁发射单一模式的光,同时利用光子禁带对原子自发辐射的抑制作用,可大大降低因自发跃迁而导致复合的概率,其只允许某单一电磁模式通过。发光二极管只发射能通过光子晶体频率的光,这种光具有极好的单色性及方向性,这种二极管称为单模二极管。还可以设计制作高效、零阈值的激光器。这种“光电子器件”能耗极低,发光效率远高于目前所使用的电子器件。研究人员预测,其转换效率可以达到 90%, 远高于一般电子器件 30% 的效率(见图 1.6)。

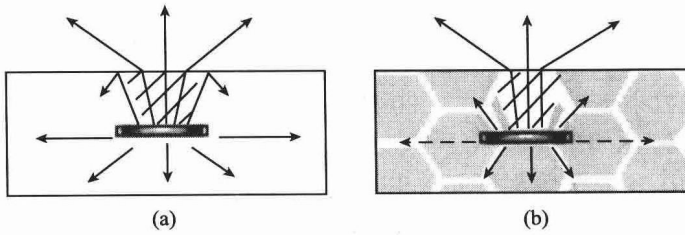


图 1.6

(a) 传统的 LED 结构中，发光单元产生的光被多次反射，只有很小一部分射出；(b) 光子晶体结构可将自发射导入有用的模式，使器件发光效率提高到 90% 以上

### 1.2.3 高效率、低损耗反射镜

由于光子晶体光子频率禁带范围内不允许光子存在，当一束在此光子频率禁带范围内的光入射到光子晶体中时将被全反射。利用这一原理可以制备高品质的反射镜。特别是在短波长区域，金属对光波的损耗很大，而介质对光波的吸收损耗非常小，因此，介质材料光子晶体反射镜具有极小的损耗。另外，由于金属反射镜对光波的吸收集中于极薄的表层内，这使表层温度很高，容易造成金属反射镜表层变形，使其质量严重下降。光子晶体反射镜对光波的吸收分布在几个波长的范围内，吸收光产生的热量分布在较大的体积内，光子晶体反射面的温度比金属反射面的温度要低得多，这使光子晶体反射镜的表面不容易烧坏<sup>[29]</sup>。

### 1.2.4 光子晶体光纤

光纤在光通信中起着重要的作用。传统光纤通过全内反射机制传导光波，要求光纤纤芯的折射率必须高于周围包层折射率；另外，传统光纤还有弯曲损耗、色散及输入功率不高等问题，造成较大的传输损耗。由于光子晶体的光子带隙保证了能量的无损失传输，而且不会出现延迟等影响数据传输率的现象，因此，利用光子晶体制作的新型光纤——光子晶体光纤 (photonic crystal fibers, PCF) 在这方面就有显著的优势。第一个真正利用二维 PBG 传

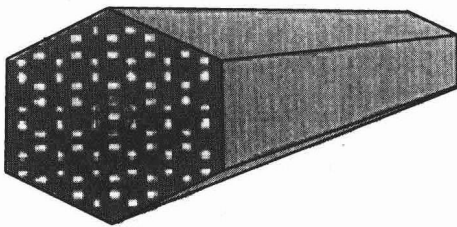


图 1.7 二维 PBG 传导的光纤<sup>[7]</sup>

导的光纤报道出现于 1998 年<sup>[7]</sup>，如图 1.7 所示。

### 1.2.5 光子晶体波导

光波导为光通信、光电子器件及集成光学中的基本元件而具有广泛的用途，可以很方便地改变光的传播方向，从而实现光分叉、光耦合等功能。传统的光学波导

利用全内反射导光机制,在波导核芯制造一个较高折射率区域,包层则为低折射率区,利用光在高、低折射率介质间形成全内反射将光局限在高折射率介质中传导。因此,光的能量传播、色散效应等都受到限制,损耗很大。同时,光波难以弯曲,使光学元件集成化变得困难。与一般的光波导相比,光子晶体波导的损耗很低,传输效率高。其既可以在折射率低如空气的环境下传播,又可以在 $90^\circ$ 大转弯的波导中传导,且具有非常小的能量损失<sup>[8]</sup>。这些特性使其在光学集成光路中具有非常重要的应用。

### 1.2.6 光子晶体超棱镜

光子晶体超棱镜的体积只有常规棱镜的1%左右,但其色散能力比常规棱镜强100~1000倍。对波长相近的光,常规棱镜几乎无法分辨,但光子晶体棱镜却很容易实现。例如,对波长为 $1.0\mu\text{m}$ 和 $0.9\mu\text{m}$ 的两束光,常规棱镜无法将它们分开,但光子晶体超棱镜可将它们分开到 $60^\circ$ 左右。该特性在光通信信息处理中具有重要的意义。

### 1.2.7 光子晶体微波天线

微波天线在军事及民用方面都有很多的用途,如卫星电视、雷达探测等都可广泛利用。传统微波天线是将天线直接制备在介质基底上,使大量能量被天线基底所吸收,效率很低。光子晶体具有很高的抽出效率,可有效提高微波天线信号的发射和接收效果。

利用光子晶体抑制某种频率的微波传播原理,可以在手机的天线部位制造微波保护罩,从而避免对人体有害的微波辐射直接照射手机用户的头部。目前这种技术还正在研发中。除了以上应用以外,利用光频率在能隙的边缘处光能量传输速度接近于零的特性,来制作高效的光延迟。光子能隙不仅与频率有关,而且还与偏振方向有关,可用来制作偏振器。利用反相蛋白石除了可以制成高效的激光器外,还可以制成滤波器、频率稳定器、温度传感器、光子开关、电压稳定器等。

### 1.2.8 光子晶体展望

从上面光子晶体的特性可以预见,光子晶体具有广泛的应用前景。但就目前而言,大部分三维光子晶体仍工作于微波领域,如大多数Ⅲ-V族化合物构成的光子晶体<sup>[29,30]</sup>;只有少数易形成纳米晶粒的Ⅵ族化合物、团簇碳、纳米硅、 $\text{TiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等物质构成的三维光子晶体有希望工作于可见光和红外光波范围<sup>[31,32]</sup>。Ⅱ-VI族化合物因其制备方法相对简单、折射率较高(1.5),容易形成较宽全方位光子带隙,同时可工作于可见光范围,其三维光子晶体已引起研究人员的极大兴趣<sup>[33]</sup>。通过调制对基质材料(硅蛋白石或有机体)的填隙率,可调节光子带隙的宽度,进而提高发光效率,不仅使LED的外量子效率超过50%,而且能够极大降低激光二极管的阈



值电流<sup>[34, 35]</sup>。另外, 通过调节粒度和排列周期, 还可得到不同波长的光<sup>[36]</sup>。因此, 无论对激光还是对 LED, 光子晶体都能极大提高发光效率并改良工作特性, 它在非线性光子晶体器件和极窄带选频滤波器等领域都具有非常广泛的应用前景。

有人曾预言, 20 世纪是电子的时代, 21 世纪将是光子的时代。光子晶体这种新型的人工带隙材料, 凭借其独特而有效的操纵光子的能力让人们看到了光子时代早日到来的曙光。高速度、大容量、高密集度的全光通信网络是人们不懈追求的目标, 光子晶体很有可能在此领域取得突破性成果。像集成电路一样的集成光路, 实现光子系统的芯片化 (optical system on chip), 更进一步实现主频高达数百上千 G 的超高速光子计算机。随着光子晶体的问世, 这一梦想似乎已不再遥远。

### 参 考 文 献

- [1] Gargini P, Glaze J, Williams O. The SIA's 1997 National technology roadmap for semiconductors: SIA road map preview. *Solid State Tech.*, 1998, 41(1): 73-76.
- [2] 徐少辉, 丁训民, 资剑, 等. 电子体系与光子体系. *物理*, 2002, 31(9): 558-566.
- [3] Purcell E M. Spontaneous transition probabilities in radio-frequency spectroscopy. *Phys. Rev.*, 1946, 69: 681-684.
- [4] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58: 2059-2062.
- [5] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [6] Yablonovitch E, Gmitter T J, Meade R D. Donor and acceptor modes in photonic band structure. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 67: 3380-3383.
- [7] Meade R D, Brommer K D, Rappe A M, et al. Existence of a photonic band gap in two dimensions. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, 5(28): 495-497.
- [8] Cassagne D, Jouanin C, Bertho D. Hexagonal photonic-band-gap structures. *Phys. Rev. B-Condensed Matter*, 1996, 53(11): 7134-7142.
- [9] GruKning U, Lehmann V, Engelhardt C M. Two-dimensional infrared photonic band gap structure based on porous silicon. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 66 : 3254-3256.
- [10] Lin H B, Tonucci R J, Campillo A J. Observation of two-dimensional photonic band behavior in the visible. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68 : 2927-2929.
- [11] 石建平, 陈旭南, 张小玉, 等. 光子晶体——一种新型人工带隙材料. *材料导报*, 2003, 17(9): 164-165.
- [12] Yablonovitch E. Photonic band-gap structures. *J. Opt. Soc. Am.*, 1993, 10(2): 283-295.
- [13] Yablonovitch E, Leung K M. Hope for photonic band gaps. *Nature*, 1991, 351 (23): 278.
- [14] Romanov S G, Johnson N P, Fokin A V, et al. Enhancement of the photonic gap of opal-based three-dimensional gratings. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, (70): 2091-2093.
- [15] Charlton M D B, Roberts S W, Parker G J. Guided mode analysis, and fabrication of a 2-dimensional visible photonic band structure confined within a planar semiconductor