

光子晶体及其应用

高

过去的 50 年中,人们通过对半导体的深入研究及其广泛应用,极大地推动了电子工业和信息产业的发展。在电子信息领域,较小体积的电路和更高的信息交换速度是当今科学家不断追求的目标。我们知道线路越细,电阻就越大、能量散失就越多,而更高的速度则提高了信号同步的准确性要求。在电子线路已经发展到极限的今天,科学家们把注意力转向了光。这是因为光子有着电子所不具备的优势:速度快,彼此间不存在相互作用。如果能实现这一点,信息的传输速度将快得无法想象。我们虽然已经朝这个方向迈出了可喜的一步——光纤的使用,但是对于信息的输入和输出,光纤依靠的仍然是传统的电子器件,这大大限制了信息的传输效率。光子晶体可能将扭转这一局面。光子晶体做成的器件可以人为控制光子的流动,就像半导体中的电子一样。光子晶体的研究不仅仅是光通信领域内的问题,同时对其他相关产业也将产生巨大的影响,这就是光子晶体越来越引起人们广泛关注的原因。

一、什么是光子晶体

早在半个世纪之前,物理学家就已经知道晶体中电子的色散关系呈带状分布,也就是大家所熟悉的电子能带结构。能带理论的出发点是固体中的电子不再束缚于个别的原子,而是在整个固体内运动,称之为共有化电子。对于理想晶体,原子规则排列成晶格,晶格具有周期性,等效势场也应具有周期性。晶体中电子的波函数是按晶格周期调幅的平面波,波的运动产生色散。这种色散关系在周期性的晶格势场中会形成带状结构,带隙之间的波禁止通过,称为禁带。

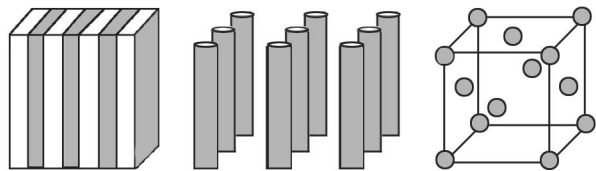


图 1 光子晶体空间结构示意图

然而直到 1987 年,亚伯诺维奇(E. Yablono-vitch)和约翰(S. John)在各自研究周期性电介质结构对材料中光传播行为的影响时,分别独立地提出“光子晶体”这一新概念。这是一种让材料的折射率

或介电常数呈周期性变化的结构。而这种周期性的空间分布可以是一维的、二维的,甚至是三维的(如图 1)。其尺寸约为光信号在材料内波长的 $1/4$,所以在大部分光电应用波段内其尺寸在 25 ~ 100 纳米之间。其基本原理便是利用了光在上述周期性结构中的散射和多次干涉,形成一个光子禁带。使得该频段的光不能通过周期结构,其现象类似于电子在晶体中运动产生的禁带。我们称之为“光子禁带”(photonic band gap, PBG),频率处于禁带中的光是被严格禁止传播的。科学家们将具有光子禁带的周期性电介质结构称为光子晶体(Photonic Crystal)。

亚伯诺维奇于 1991 年在实验室中制造了第一块当时被认为具有完整禁带的三维光子晶体,是一种面心立方结构。但后来的研究表明,这种结构并不存在绝对禁带。自然界中,具有完整禁带的天然三维光子晶体非常少(如蛋白石、蝴蝶翅膀等就是这样的特例),绝大多数光子晶体都是人工设计制造出来的。

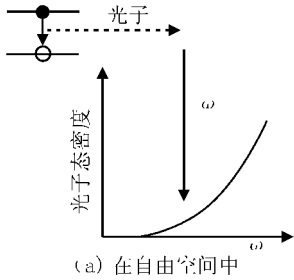
二、光子晶体的性质

光子晶体最根本的特征是具有光子禁带,频率处于禁带中的光是被禁止传播的。根据光子晶体的这一特点,我们可以通过控制其中的光子来达到控制其特性的目的。

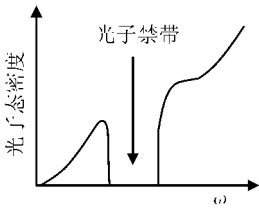
光子局域是光子晶体的一个主要特征,由约翰于 1987 年提出。由量子力学可知,自发辐射的几率与光子所在频率的态密度成正比。当原子被放在一个光子晶体里面,如果它自发辐射的光频率正好落在光子禁带中,由于该频率光子的态密度为零,因此自发辐射几率为零,自发辐射也就被抑制了。另一方面,光子晶体也可以增强自发辐射。如在光子晶体中加入杂质,光子禁带中会出现品质因子非常高的杂质态,具有很大的态密度,这样便可以实现自发辐射的增强(如图 2)。

根据这一特性,如果在光子晶体中引入某种程度的缺陷,和缺陷态频率吻合的光子有可能被局域在缺陷处。一旦其偏离缺陷位置,光就将迅速衰减,这样在光子晶体的禁带中央出现带宽极窄的缺陷态。光子晶体的缺陷有点缺陷和线缺陷两种。在垂

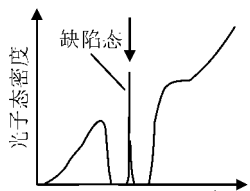
直于线缺陷的平面上,光被局限在线缺陷位置,只能沿线缺陷方向传播。点缺陷则仿佛是被全反射墙完全包裹起来。利用点缺陷可以将光“俘获”在某一特定位置,使其无法从任何一个方向向外传播,这就相当于微腔*。



(a) 在自由空间中



(b) 在光子晶体中



(c) 在有缺陷的光子晶体中

图2 光子禁带对自发辐射的影响

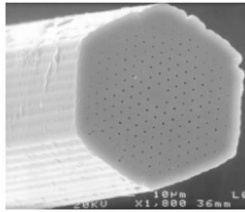


图3 光子晶体光纤的SEM图像

图4 光子晶体光纤截面示意图

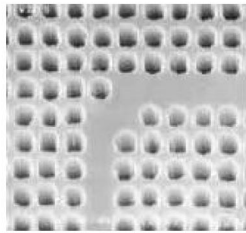


图5 光子晶体波导的弯曲

三、光子晶体的应用

在现实生活中,光子晶体有着非常广泛的应用。其原理便是基于上述几点光子晶体本身的重要特性。光子晶体可以控制光子的运动,是光电集成、光子集成、光通信的一种关键性基础材料。下面就简单介绍它的一些应用。

光子晶体光纤 光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)是一种新颖光纤,由晶格常数为波长数量级的二维光子晶体构成。图3是在扫描电子显微镜(SEM)下观察到的英国巴斯大学(University of Bath)研究人员制作的光子晶体光纤实物图。它是由几百个传统的氧化硅棒和氧化硅毛细管依次绑在一起组成六角阵列,然后在2000℃下烧结形成直径约40微米的蜂窝结构亚微米空气孔。为了导光,在光纤中人为引入额外空气孔,这种额外的空气孔就是导光通道,与传统的光纤完全不同,这里的传播光是在空气孔中而非氧化硅中,可导波的范围很大,从

而增加数据传输量。影响光子晶体光纤性质的特征参数主要有三个:空气孔的直径大小 d 、空气孔间距以及中间纤芯的半径大小 a ,如图4所示。

用光子晶体制作的新型光纤较传统光纤具有显著的优势。在传统的光纤中,不同波长的光穿过光纤纤芯的速度不同。用于长距离传输时,信号将出现时间延迟,所以不同波长的信号就需要各自编码。而且光纤纤芯越粗,延迟越长,通过光纤的光脉冲也会变宽,这必将限制接收到的数据准确度,因为光是沿不同路径或“模式”经过纤维的。这样可以考虑采用单模光纤,即尽量减少光纤纤芯的直径,从而只允许一个模式的光路通过以避免上述问题,但成本会因此大大提高。此外,传统光纤的损耗也是个问题。而光子晶体弯曲波导利用的是不同方向缺陷模共振匹配原理,原则上只要达到模式匹配,不论转多大弯,都能达到很高的传输效率。这种弯曲效应在全光集成系统中很有应用价值。图5为光子晶体波导的低损耗传输示意图。光子晶体带隙特性不但保证了能量传输中的基本无损失,而且不会出现延迟等影响数据传输率的现象。另外,光子晶体光纤还具有极宽的传输频带,可以全波段传输等。

目前,世界上一些著名的公司已经在光子晶体光纤的应用研究方面取得了很大的突破和进展。例如,最近丹麦一家专门从事光子晶体光纤产业化的Crystal Fiber A/S公司,在原有产品的基础上又推出两类最新的产品:一种是中空的“空气波导光子带隙晶体光纤”(Air-guiding Photonic Bandgap Fiber),其纤芯是中空的,利用空气作为波导,使光可以在特殊的能带隙中传输;另一种是“双包层高数值孔径掺镱晶体光纤”(Double Clad High NA Yb Fiber),该光纤可以用在光纤激光器或光纤放大器中,另外由于该光纤具有光敏性,还可以在其上刻写光纤光栅。

光子晶体激光器 光子晶体还可用于制造各种性能优良的光通讯器件,如光子晶体激光器。传统激光器的一些缺陷似乎很难克服。例如,激光器发射波长的变化会改变传输损耗;随功率的增加线宽趋于饱和,并重新展宽;辐射角比较大,耦合效率不高,只能达到30%~50%等。但如果在一块三维光子晶体的光子禁带中引入缺陷,然后在其中放置工作物质,缺陷态将构成一个波导,激光发出的方向将沿此方向,同样自发辐射也只能沿此方向,即自发辐射与激光出射方向角几乎为零。这样几乎所有的自

发辐射都用来激发已实现反转分布的激活介质而无其他损失。泵浦的能量几乎全部用来产生激光,这使激光器阈值降低,并且提高了能量转换效率。

这种小体积、低阈值,甚至零阈值,高功率、易于光纤耦合,且可在小区域密集分布的激光器,也正是通常我们在设计光纤传感器选择光源时所追求的;另外,光子晶体激光器本身还可以延伸到高灵敏的化学探测器设计中,并为探索许多基本的物理现象开辟新的方向。图6为美国麻省理工学院(MIT)的研究人员利用一维光子晶体制作出的一种低阈值微腔激光器。这种激光器包括一个InGaP/InGaAs量子阱,其下为一低折射率的氧化铝间隔层和高折射率的砷化镓层。在量子阱活跃区顶部的波导层刻蚀出周期排列的小孔,构成一维光子晶体;并在光子晶体中引入缺陷形成共振腔,使得量子阱的发射波长正好位于一维光子晶体的禁带中的缺陷模式,光就能耦合到波导中输出。

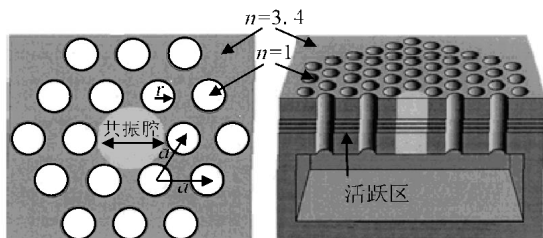


图6 光子晶体激光器顶部和剖面示意图
(其中 n 表示介质的折射率)

1999年,美国加州理工学院谢勒(A. Scherer)领导的研究组首次报道了可在室温下工作且运转在1550纳米的光子晶体激光器。目前,贝尔实验室、英国巴斯大学、丹麦Crystal Fiber A/S公司等都在大力研究这种新型激光器。丹纳(A. J. Danner)等人提出的双缺陷光子晶体垂直腔面发射激光器更是集以上两种激光器的优势于一体。在我国,深圳市激光工程重点实验室也已经开发出功率达15瓦的光子晶体激光器。预计在未来5年,高效光子晶体激光发射器将逐步实用化,继而成为激光器的主流。

光子晶体微波天线 微波天线在军事及民用方面的应用都很广泛,如卫星电视、雷达探测等等。然而传统的微波天线制备方法是天线直接制备在介质基底上,这就导致大量能量被天线基底所吸收,因而效率很低。例如,对一般用钙化砷介质作基底的天线反射器,98%的能量完全损耗在基底中,只有2%的能量被发射出去,同时造成基底发热。但是,如针对某微波频段设计出需要的光子晶体,并将其

作为天线的基片,这一问题即可迎刃而解。由于该微波波段处于光子晶体的禁带中,因此基底不会吸收微波,从而实现无损耗全反射,把能量全部发射到空中,大大提高了天线的发射效率。第一个以光子晶体为基底的偶极平面微波天线于1993年在美国研制成功。

以上介绍了光子晶体在信息通讯、光电器件、微波辐射等领域的应用。当然光子晶体在其他方面的应用还有很多,比如利用二维光子晶体对入射的TE、TM两种偏振模式的光具有不同带隙结构的性质,设计的二维光子晶体偏振片,可获得单一模式的出射光,而且这种偏振光具有很高的偏振度和透射率。又如,日本科学家应用光子晶体已经减慢了1550纳米波长光波的速度,在实现光子集成电路的研究中迈出了具有决定意义的一步。综合运用光子晶体的各种性质,还可制成光子晶体谐振腔、光子晶体激光二极管、高效率低损耗反射镜等。

操纵光波的流动是人类多年的梦想和追求,全球高新技术领域的科学家与企业家都期待着新的带隙材料对光波的操纵。从科学技术角度可以预言,这一目标的实现,将对人类产生不亚于微电子革命的深刻影响。因此,光子晶体也被科学界和产业界称为“光半导体”或“未来的半导体”。

但是,目前人们对光子晶体的认识还远远不如半导体材料那么深入。无论理论还是实验上,对光子晶体性质及其光子带隙调节的研究还需要深化与完善,并进一步开发光子晶体的应用潜力。目前,还不能大规模地制造尤其是可见光及近红外波段的光子晶体;光子晶体的部分应用也仅限于实验室。所以,研究并开发技术上易于制造的、具有宽带隙的光子晶体并实现其商业化应用,仍是世界众多科技人员努力的目标。

(安徽省合肥市中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室 230026)

*微腔即微谐振腔,这种腔有一个内表面能够反射一种频率的波,并利用共振原理将其增强。当一种能和腔体发生共振的波进入时,会在其内部来回反射而且几乎不损失能量,并形成驻波。随着进入腔体的波的能量的增加,驻波便会增强。本文中的微波即指在光子晶体中引入点缺陷,这种点缺陷能够限制一定波长的光波向外传播,恰好类似于一个微谐振腔所起的作用,所以说相当于一个微腔,而非真实的微腔。