

21 世纪最具潜力的新型材料——光子晶体

周 静 王选章 谢文广

21 世纪是信息技术广泛普及的时代。在过去的 50 年里,对半导体技术的深入研究和广泛应用直接推动了信息产业的迅速发展。但当前半导体的发展遭遇瓶颈问题,半导体集成电路在速度、效率的提高上受到量子效应及电子自身之间相互作用的限制,半导体器件的能力已接近极限,而光子技术则是突破这些限制的有效手段之一。不过传统的光学器件与电子集成器件相比,要笨重成千上万倍。如果光学器件也能像电子器件一样集成化,那么光电集成线路就将使信息技术产业发生巨大变革。解决问题的关键,在于开发和研究一种新型的人工材料——光子晶体。它将成为 21 世纪最具潜力的新型材料,半导体的第三代突破很可能就在光子晶体这条路上。

一、什么是光子晶体

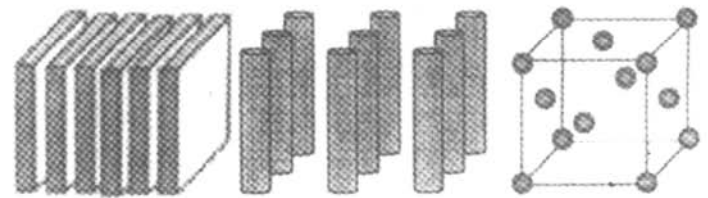
光子晶体的概念是由雅伯罗诺维奇(Yablonvitch)和 S. 约翰在 1987 年各自提出的,它是根据传统的晶体概念类比而来的。他们最初的想法是找到一种材料能够改变在其中传播的光的性质,就像我们利用半导体材料改变在其中通过的电子的性质一样。众所周知,在半导体材料中,原子排布的晶格结构产生的周期性电势场影响着在其中运动的电子的性质,电子将形成能带结构。将介电常数不同的介质材料在空间中周期性排列而形成的结构将改变在其中传播的光的性质。由于介电常数存在空间上的周期性,所以它对光的折射率同样有周期性分布,在其中传播的光波的色散曲线也会形成带状能带结构,

叫做光子能带(photonic band)。光子能带之间可能出现带隙,即光子带隙也叫光子禁带(photonic bandgap,简称 PBG)。频率落在光子禁带中的光子,在某些方向上是被严格禁止传播的。我们把具有光子带隙的周期性介电结构叫做光子晶体(photonic crystals)或光子带隙材料(photonic bandgap materials)。

二、光子晶体的结构和分类

按照光子禁带空间分布的特点,光子晶体一般可分为一维光子晶体、二维光子晶体和三维光子晶体三种类型。

一维光子晶体是指在一个方向上具有光子频率禁带的材料,它由两种或两种以上的介质叠层而成。图 1(a)给出了一种简单的一维光子晶体结构,它是由两种介质交替叠层而成的,其中的黑色部分为一种介质,黑色与黑色之间的空间为另一种介质所填充。这种结构在垂直于介质片的方向上介电常数是空间位置的周期性函数,而在平行于介质片平面的



(a)一维光子晶体 (b)二维光子晶体 (c)三维光子晶体

图 1

表 5 从事有关视频显示器工作的女性流产和胎儿畸形的流行病学调查结果

研究者	调查样本	调查项目	
		流产	胎儿畸形
瑞典的病例对照研究 1986	1447	无	无
瑞典辐射安全所的保险研究 1987	4347	无	无
芬兰的病例对照研究 1985	2950	未调查	无
蒙特利尔的 病例对照研 究 1988	1986 年前	3863	无
	1986 年事	3799	无
密西根的病例对照研究 817	817	无	未调查

上面提到的这些具体的电磁辐射的内容只是我们日常生活中比较常见的一部分,如果你生活

工作在比较特殊的环境,比如航空、药品辐射等行业,还会有各种各样的辐射防护方面的问题。有些环境辐射我们无法改变,比如太阳紫外线,我们只有通过一些防护措施来保护我们;有些环境辐射是我们可以避免的,比如说装修时氡气的放射性污染,对于这种情况完全可以消除辐射影响,净化生活环境,这对我们以及我们的后代都是大有裨益的。

(清华大学工程物理系摩托罗拉单片机 & DSP 应用研发中心工物馆 210B 100084)

方向上介电常数不随空间位置而变化。这样的光子晶体在光纤和半导体激光器中已得到了应用。所谓的布拉格光纤和半导体激光器的分布反馈式谐振腔实际上就是一维光子晶体。

二维光子晶体是指在二维空间各方向上具有光子频率禁带特性的材料，它是由许多介质杆排列而成。图 1(b)给出了一种典型的二维光子晶体结构，它是由许多介质杆平行而均匀地排列而成的。这种结构在垂直于介质柱的方向上介电常数是空间位置的周期性函数，而在平行于介质柱的方向上介电常数不随空间位置而变化。由介质杆阵列构成的二维光子晶体的截面存在许多种结构，如矩形、三角形和石墨的六边形结构。横截面的形状不同，获得的光子频率禁带宽窄也不一样，矩形的光子频率禁带范围较窄，三角形和石墨结构的光子频率禁带范围较宽。为了获得更宽的光子频率禁带范围，还可以采用同种材料但直径大小不同的两种介质圆柱杆来构造二维光子晶体。

三维光子晶体是指在三维空间各方向上具有光子频率禁带特性的材料，如图 1(c)所示。在三维光子晶体中，有可能出现全方位的光子带隙，即落在带隙中的光在任何方向都被禁止传播。这一特性具有极其广阔的应用前景。

三、光子晶体的特性

光子晶体的基本特征是具有光子禁带，频率落在禁带中的电磁波是禁止传播的，因为带隙中没有任何态存在，如图 2 所示。80 年代以前，人们一直认为自发辐射是一个随机的自然现象，是不能控制的。珀塞尔(Purcell)在 1946 年提出自发辐射可以人为改变，但没有受到任何重视。直到光子晶体的出现才彻底改变了人们的看法。我们知道，自发辐射的几率与光子态的数目成正比，而光子禁带中光子态的数

目为零，因此，频率落在光子禁带中的电磁波的自发辐射被完全抑制。

光子晶体的另一个重要特征是光子局域。约翰在 1987 年提出在一种精心设计的介电材料超晶格(相当于现在所称的光子晶体)中，光子呈现出很强的安德逊局域，如果在光子晶体中引入某种程度的缺陷，则在其禁带中会出现频率极窄的缺陷态，和缺陷态频率吻合的光子有可能被局域在缺陷位置，一旦其偏离缺陷光就将迅速衰减。这就为我们提供了一种控制或“俘获”光的方法。光子晶体中的缺陷有点缺陷和线缺陷。在垂直于线缺陷的平面上，光被局域在线缺陷位置，只能沿线缺陷方向传播。这种局域比波导或利用全反射原理制成的光纤更加彻底。点缺陷仿佛是光被全反射墙完全包裹起来，利用点缺陷可以将光“俘获”在某一个特定的位置，光就无法从任何一个方向向外传播，这相当于微腔。

四、光子晶体的应用

由于光子晶体能够控制光在其中的传播，所以它的应用十分广泛。其主导思想就是利用光子禁带或禁带结构中的缺陷态来改变光子晶体中某种电磁态的密度，以制作全新原理或以前所不能制作的高性能器件。

高性能反射镜 由于频率落在光子带隙中的光子或电磁波不能在光子晶体中传播，因此选择没有吸收的介电材料制成的光子晶体可以反射从任何方向的入射光，反射率几乎为 100%，这与传统的金属反射镜完全不同。传统的金属反射镜在很大的频率范围内可以反射光，但在红外和光学波段有较大的吸收。这种光子晶体反射镜有许多实际用途，如制作新型的平面天线。普通的平面天线由于衬底的透射等原因，发射向空间的能量有很多损失，如果用光子晶体做衬底，由于电磁波不能在衬底中传播，能量几乎全部发射向空间，这是一种性能非常高的天线。以前人们一直认为一维光子晶体不能作为全方位反射镜，因为随着入射光偏离正入射，总有光会透射出来，但最近麻省理工学院研究人员的理论和实验表明，选择适当的介电材料，即使是一维光子晶体也可以作为全方位反射镜。

宽带带阻滤波器和极窄带选频滤波器 利用光子晶体的光子频率禁带特性可以实现对光子的极优良的滤波功能。这是由于光子晶体的滤波带宽可以

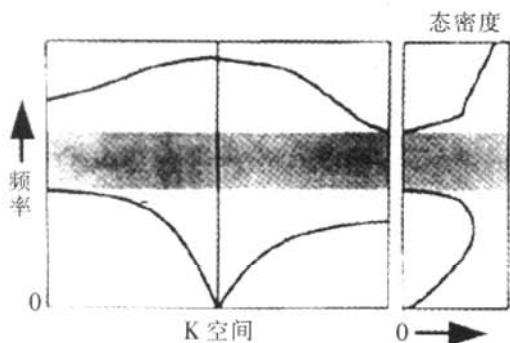


图 2

做得比较大, 钻石结构的光子晶体的滤波带宽可以做到中心频率 20%, 而由 S. 哥普塔等人所提出的金属-介质复合型光子晶体可以将低频(频率接近 0Hz)直到红外波段的电磁波完全滤掉。这种大范围的滤波作用是利用传统的滤波器难以实现的。

另外研究发现, 当光子晶体中的某些单元被取消而造成缺陷时, 就会使得光子晶体的光子频率禁带出现一些“可穿透窗口”, 即光子频率禁带内的某些频率会毫无损失地穿过光子晶体。光子晶体的这一特性可以用来制作高品质的极窄带选频滤波器。

光子晶体波导 光波导是光电集成回路中光子器件间的“导线”。传统的介电波导可以支持直线传播的光, 但在拐角处会损失能量。理论计算表明, 光子晶体波导可以改变这种情况。光子晶体波导不仅对直线路径而且对转角都有很高的效率, 如图 3 所示。最近的实验证实了理论预言。

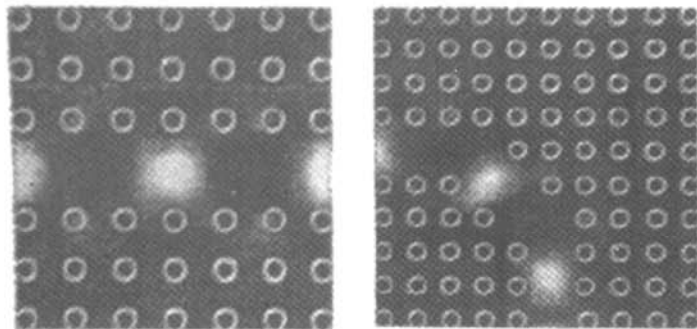


图 3

如果在光子晶体中引入一缺陷, 频率落在缺陷态中的光波将呈现很强的局域态, 其传播方向是受到严格控制的。如果我们引入的是一个线缺陷, 这种缺陷态就可以作为一种电磁波波导, 因此, 我们可以通过光子晶体的组合设计制造出多种符合要求的光波。如图 4 所示, 从一块排布完好的二维光子晶体中, 移去一些介质棒或将一排空腔充以原介质都可以制成一个具有线缺陷的光子晶体。由于它并不依赖全反射, 所以在转角处可以有效地减少能量损失。在转角为 90 度的情况下, 这种波导也仅有 2% 的损失, 98% 的能量都传输到另一端, 而在相同条件下, 传统波导的能量损失高达 30%。我们可在光纤的曲率半径较小处以光子晶体波导取代光纤, 这样既可有效减小损失, 又易于实现。

光子晶体光纤 在传统的光纤中, 光在中心的氧化硅芯传播。通常, 为了提高其折射系数采取掺杂的办法以增加传输效率, 但不同的掺杂物只能对一种频率的光有效。英国 Bath 大学的研究人员用二维光子晶体成功制成新型光纤: 由几百个传的

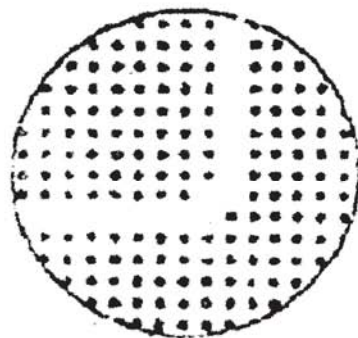


图 4

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℃ 下烧结而形成。直径约 40 微米, 蜂窝结构的亚微米空气孔就形成了。为了导光, 在光纤中引入额外空气孔, 这种额外的空气孔就是导光通道, 如图 5 所示。与传统的光纤完全不同, 在这里传播光是在空气孔中而非氧化硅中, 可导波的范围很大。

光子晶体还有许多其他应用前景, 如光开关、光

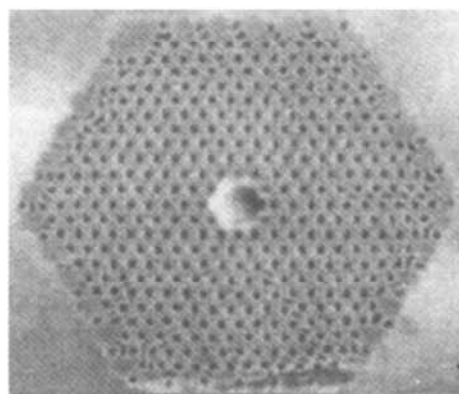


图 5

放大、光存储器、光限幅器及光子频率变换器等新型器件。相信到 21 世纪末, 人们对光子晶体这一名词耳熟能详, 因为, 到那时从人们书桌上摆着的高速个人电脑(上百甚至上千 GHz 的运算速度), 到快速而便捷的网络设施, 甚至家中能够根据室内实际温度自动开关调节的空调系统, 都可能要得益于这种前途光明的新型材料。

(周静 王选章 黑龙江哈尔滨师范大学物理系 150025; 谢文广 黑龙江大学物理学院 150080)