

光子晶体及其应用*

张友俊^{1,2}, 姬波², 王向前³, 李英¹

(1. 上海大学物理系, 上海 200072; 2. 郑州大学信息工程学院, 河南郑州 450052;
3. 焦作市凯拓科技有限公司, 河南焦作 454002)

摘要:光子晶体是一种具有光子带隙的新型功能材料, 它独特的物理性质使得光子晶体具有理论研究价值和广泛的应用前景。主要介绍了光子晶体的基本概念和三维光子晶体的制备技术, 并综述了光子晶体的一些物理特性及其在光学、通信、微波方面的应用。

关键词:光子晶体; 光子带隙; 电磁带隙

中图分类号:O73 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2004)03-0320-03

Photonic crystal and it's applications*

ZHANG You-jun^{1,2}, JI Bo², WANG Xiang-qian³, LI Ying¹

(1. Physics Department, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China;
3. Jiaozuo Kaituo Technology Ltd., Jiaozuo 454002, China)

Abstract: Photonic crystals are a new kind of materials with photonic bandgap, their unique physical features bring about a number of theory research and wide application prospect. The basic conception of photonic crystals and fabrication methods of three dimensional photonic crystals are introduced, and some characters and applications in optics, communications and micro-wave etc are summarized.

Key words: Photonic crystal; Photonic bandgap; Electromagnetic bandgap

0 引言

信息产业的梦想之一是由光子替代电子传递信息, 因为光子有着电子所不具备的优点, 一旦实现, 信息的传输速度将快得无法想象, 光纤在通信方面的应用, 使得我们朝实现光子替代电子方面迈出了可喜的一步。人们自然会提出一个问题: 是否能找到光子半导体材料来逐步部分替代现有的半导体材料。1987

年 Yablonovitch 和 John 在讨论周期性电介质结构对材料中光传播行为的影响时, 分别提出了“光子晶体”这一新概念^[1,2]。从此, 光子晶体的理论研究和相关实验及其应用研究得到了迅速的发展。

1 光子晶体

光子晶体实际上就是一种介质在另一种介质中周期排列组成的人造晶体, 该排列周期为波长量级。

收稿日期: 2003-08-18; 修订日期: 2003-10-26

* 基金项目: 河南省自然科学基金项目(0411013500)

作者简介: 张友俊(1961-), 男, 江苏扬州人, 副教授, 在读博士, 主要从事光纤传感器、微波技术、光子晶体方面的研究。

光子晶体中介质折射率的周期变化对光子的影响与半导体材料中周期性势场对电子的影响相类似。在半导体材料中,由于周期势场的作用,电子会形成能带结构,带与带之间有带隙(如价带与导带),电子的能量如果落在带隙中,就无法继续传播。在光子晶体中,由于介电常数在空间的周期性变化也存在类似于半导体晶体那样的周期性势场。当介电常数的变化幅度较大且变化周期与光的波长可比时,介质的布拉格散射也会产生带隙,即光子带隙。频率落在禁带中的光是被严格禁止传播的。光子晶体也叫电磁晶体或光子带隙材料,绝大多数光子晶体是由人工设计制造出来的,自然界中光子晶体很少,只有蛋白石和蝴蝶翅膀等。

由于光子晶体和半导体晶体某些特性相似,固体物理中的许多概念都可用于光子晶体,如倒格子、布里渊区、色散关系、布洛赫波等,很多用于研究半导体晶体的方法也可用于光子晶体。光子晶体与半导体晶体有相同的地方,但也有本质的不同。光子晶体与半导体晶体结构不同,光子晶体的结构是不同介电常数介质的周期分布而半导体的是周期性势场;光子晶体研究的对象是电磁波(光)在晶体中的传播,光子是自旋为1的玻色子,半导体研究的是电子的输运行为,电子是自旋为1/2的费米子;光服从的是Maxwell方程,电子服从的是薛定谔方程;光子波是向量波,而电子波是标量波;光子晶体中介质的周期尺度是电磁波(光)波长,而半导体周期性势场是原子尺寸;电子之间有很强的相互作用,而光子之间没有。

光子晶体的基本特征是具有光子带隙,频率落在带隙中的电磁波是禁止传播的。如果光子晶体只在一个方向上具有周期结构,光子禁带只可能出现在这个方向上。如果存在三维的周期结构就有可能出现全方位的光子禁带,落在禁带中的光在任何方向都被禁止传播。据此光子晶体可分为一维光子晶体、二维光子晶体和三维光子晶体。

从应用的角度考虑,三维光子晶体的完全能隙具有重要的应用价值,相对而言,三维光子晶体的制备比较困难。一般,光子晶体介质的介电常数反差越大(一般要求大于2),得到光子带隙的可能性就越大,光子带隙的出现和调节与光子晶体结构、介质的连通性、介电常数反差和填充比有关,条件比较苛刻。制作具有完全光子带隙的光子晶体无疑是人们面临的

一项巨大挑战。

2 三维光子晶体的制备技术

第一个具有完全带隙的光子晶体是Yablono-vitch研究小组^[3]于1991年研制的。他们采用反应离子束刻蚀技术在一块介电材料的表面以偏离法线 35.26° 的角度从3个方向钻孔,各方向的夹角为 120° 。其他的精密加工法还有Özbay等人^[4]发展的逐层叠加结构等,这些方法实现的光子禁带波长范围差异很大,从微波到近红外区不等。此外,人们发现胶体晶体也可作为光子带隙材料。目前采用的主要方法有:准平衡蒸发法^[5]、毛细作用力组装机^[6]、胶体外延法、电泳沉积法、电(磁)流变技术法。无机(有机聚合)物反蛋白石结构也具有光子带隙效果。人们在光子晶体制备方面迈出了可喜的一步,但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。总体来说,光子晶体制造工艺相对于半导体制造工艺来说简单,工序少,掌握容易,生产设备数量少,成品率高。

3 光子晶体的特性及应用

光子晶体的最根本特征是具有光子禁带,光子禁带的存在可以抑制自发辐射^[1]。选择没有吸收的介电材料制成的光子晶体可以反射来自任何方向的入射光,反射率几乎为100%。利用此原理可以制成小型微波无线反射器^[7],同理可以做成手机天线微波防护罩。

光子晶体的另一个重要特性是“光子局域”,当光子晶体中原有的周期性或对称性受到破坏时,其光子禁带中就有可能出现频率极窄的缺陷态,与缺陷态频率吻合的光子会被局域在出现缺陷的位置,一旦偏离缺陷位置,光就将迅速衰减^[2]。

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,利用光子晶体可以控制原子的自发辐射,可以制作宽频带、低损耗的光反射镜;高效率的发光二极管^[8];光滤波器、光开关、光混频器、光倍频器和光存储器等^[9-10]。

如果在光子晶体中引入点缺陷,则可以制作高品质因子的光子晶体微腔^[11]、高效率的太阳能电池^[12]。

利用禁带内的光子不能在晶体内传播的性质可以制成光子晶体光波导^[13]、高增益光学参量放大器^[14]、光子晶体光纤等。传统的介电波导在拐角处会有能量损失,光子晶体波导可以改变这种情况,在拐角处有很高的传输效率。与传统的光纤完全不同,光子晶体光纤是靠空气孔而非氧化硅传播光,可导波的范围很大,从而增加了数据的带宽。

光子晶体可制成超棱镜^[15],常规的棱镜对波长相近的光几乎不能分开,但用光子晶体做成的超棱镜的分开能力比常规的要强 100~1000 倍,而体积只有常规的百分之一。这使光子晶体可用于光通讯中的信息处理。

二维光子晶体可用于制作偏振器^[16],该偏振器具有传统偏振器所没有的优点,可以在很大的频率范围内工作,体积很小,很容易在 Si 片上集成或直接在 Si 基上制成。

光子晶体产生了许多新的物理性质和现象,如光的超棱镜效应^[17]、负折射效应、双折射现象、能量转移^[18]、光子压缩态^[19]、光双稳、多稳态及光学限制等特性。随着对这些新现象的深入了解和光子晶体制作技术的改进,光子晶体的应用将更广。

4 展 望

光子晶体是一门正在蓬勃发展、很有前途的新学科,它吸引了包括经典电磁学、固体能带论、半导体器件物理、光学、量子光学、纳米结构和材料学科等领域的科学家从事研究。光子晶体从 20 世纪 80 年代末提出至今,已取得了很大的成就。虽然人们对光子晶体的认识还远不如对半导体材料的认识那么成熟,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,同时,光子晶体的部分应用也仅在实验室中得以实现。但人们有理由相信,在不久的将来,光子晶体将极大地推动光子学和光子产业的发展。

参考文献:

- [1] Yablonvitch E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super-lattices[J]. *Phy Rev Lett*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] Yablonvitch E, Gmitter T J, Leung K M. Photonic band structure; the face-centered-cubic case employing nonspherical atoms [J]. *Phys Rev Lett*, 1991, 67(17): 2295-2298.
- [4] Özbay E, Michel E, Tuttle G, et al. Micromachined millimeter wave photonic band-gap crystals[J]. *Appl Phys Lett*, 1994, 64(16): 2059-2061.
- [5] Schilling J, Muller F, Nattias S, et al. Three-dimensional photonic crystals based on macroporous silicon with modulated pore diameter[J]. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 1180-1182.
- [6] Bladeren A V, Ruel R, Wiltzius P. Template-directed colloidal crystallization[J]. *Nature*, 1997, 6614(385): 321-323.
- [7] Brown E R, Parker C D, Yablonovitch E. Radiation properties of a planar antenna on a photonic crystal substrate[J]. *J Opt Soc Am(B)*, 1993, 10: 404-407.
- [8] Joannopoulos J D, Villeneuve P R, Fan S. Photonic crystals [J]. *Solid State Commun*, 1997, 102(2): 165-173.
- [9] Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D. High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals [J]. *Phys Rev Lett*, 1997, 78(17): 3294-3297.
- [10] Tran P. Optical limiting and switching of short pulses by use of a nonlinear photonic bandgap structure with a defect[J]. *J Opt Soc Am(B)*, 1997, 14(10): 2589-2595.
- [11] Painter O, Lee R K, Scherer A, et al. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser [J]. *Science*, 1999, 5421(284): 1819-1821.
- [12] Yablonovitch E. Photonic band gaps structure[M]. *C M Photonic Band Structure Soukoulis*. New York: Plenum Press, 1993. 207-234.
- [13] Shawnyu L, Edmund C, Vince H, et al. Experimental demonstration of guiding and bending of electromagnetic waves in a photonic crystal[J]. *Science*, 1998, 282(5387): 274-276.
- [14] Konotop V, Kuzmiak V. Simultaneous second and third-harmonic generation in one-dimensional photonic crystals[J]. *J Opt Soc Am(B)*, 1999, 16(9): 1370-1376.
- [15] Kosaka H, Kawashima T. Superprism phenomena in photonic crystals[J]. *Phys Rev*, 1998, B58: R10096-R10099.
- [16] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [17] Yablonovitch E, Gmitter T J. Photonic band structure; the face-centered-cubic case[J]. *Phys Rev Lett*, 1989, 63(18): 1950-1953.
- [18] Michael S, Jonathan P Dowling. Photonic limiting and switching of ultrashort pulses in nonlinear photonic band gap materials[J]. *Phys Rev Lett*, 1994, 73(10): 1368-1371.
- [19] Liu N H, Zhu S Y, Chen H. Localized electromagnetic modes of one-dimensional modulated photonic band-gap structures [J]. *Phys Rev (B)*, 2001, 64(16): 165105-1~165105-10.