

干涉原理在光子晶体中的应用*

冯志芳 王义全 冯 帅 程丙英 张道中

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(2004 年 5 月 31 日收到, 2004 年 10 月 28 日收到修改稿)

从理论和实验上分析了光子晶体环形腔的能量传输. 在光子晶体中引入环形结构, 以干涉原理为基础, 改变其中的内部参数使之满足一定的条件, 从而实现了频率的选择传输. 用多重散射的方法计算了这种结构的透过谱, 并与实验测得的透过谱进行了比较, 两者相符较好.

关键词: 干涉原理, 光子晶体, 环形腔

PACC: 4230, 5110

1. 引 言

光子晶体的概念提出之后^[1,2], 立即引起了全世界的广泛关注. 光子晶体就是由两种或两种以上介质周期性排列组成的一种人造晶体. 它最重要的特征是存在光子带隙^[3-6], 光子带隙的存在可以有效地控制光子晶体中电磁波的传播^[7] (如抑制自发辐射). 利用光子晶体对光的可控性可以用来制作各种光学器件. 如利用光子禁带这一基本特征, 可以用来制作光子晶体反射镜、发光二极管的衬底和损耗极低的三维光子晶体天线; 利用禁带对原子自发辐射的抑制作用, 可以大大降低因自发辐射而导致复合的概率, 设计和制作出无阈值激光器^[8,9]和激光二极管. 通过在光子晶体中引入线缺陷可以制作各种类型的光波导^[10,11]和光纤; 同时引入点缺陷和线缺陷可以用来制作波分复用器^[12,13]、光开关^[14]和滤波器^[15]等, 从而可以实现光子晶体器件的集成化.

在光子晶体中通常以引入缺陷的方法来实现频率选择^[12,13]. 本文以干涉原理为基础, 在光子晶体中引入环形结构的波导腔, 通过改变环形腔中的某些参数, 使得沿不同路径到达同一输出端的某一频率的电磁波干涉相消, 输出端的输出功率为零, 而其他频率的输出光不受影响, 仍然可以输出. 这种结构的光子晶体可以起到频率选择的作用, 可应用于波分复用器、光开关等光学器件及集成化的光学元件, 并

且有结构简单、易于实现等特点.

2. 理论计算与实验结果

根据干涉原理, 当沿不同路径传输的光束, 两者的光程差满足 $n\lambda + \frac{1}{4}\lambda$ 时, 相位差为 $(2n+1)\pi$, 此时就可以实现干涉相消, 使输出端的输出功率为零. 根据这一原理, 我们设计了如图 1 所示的光子晶体环形腔. 图 1 中的 A 和 B 分别表示输入端和输出端. 通过在光子晶体中引入直波导来制作环形腔, 其中 A, B 两侧上下两个直波导的长度差为 d , 通过调节 d 的值来改变输出频率. 由于 d 值有可能不是晶格常数的整数倍, 故晶体是由两部分晶体组合而成, 两晶体的晶格常数、陶瓷柱半径、介电常数都是相同的. 图 1 中, 实心圆表示介电常数为 8.4、半径为 $0.16a$ (a 为光子晶体的晶格常数) 的陶瓷柱, 其余部分是介电常数为 1.04 的聚苯乙烯泡沫材料, 即背景介质. 当晶体的占空比为 9.6% 时, 方形结构的光子晶体的第一带隙的范围为 $0.32c/a - 0.47c/a$, 其中 c 是光速. 这一结构中的 d 值是按照频率为 $0.37c/a$ 而选择设计的. 我们用多重散射的方法^[16]模拟计算了这一输出端的透过谱. 多重散射方法主要应用于有限尺寸的二维光子晶体, 该理论认为有限尺寸的光子晶体是一个开放环境下许多散射体的组合, 这样边界条件是自动得到满足的.

我们用如图 2 所示的实验装置测得输出端 B

* 国家重点基础研究发展规划 (批准号 2001CB6104) 资助的课题.

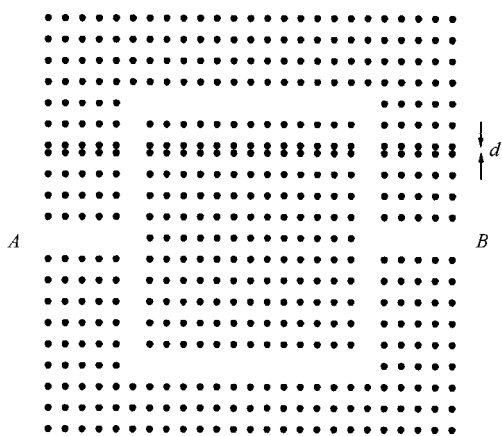


图1 环形腔结构 A 为输入端, B 为输出端. 实心圆是介电常数为 8.4、半径为 $0.16a$ 的陶瓷柱, 其余部分为介电常数为 1.04 的聚合型泡沫材料(背景介质). $d = 0.357a$

的透过谱. 光子晶体置于一长为 500 mm, 宽为 380 mm, 高为 10 mm 的波导散射室内, 波导散射室的所有内表面抛光以适应微波测量的要求, 波导前后开口均与 3 cm 波段的 H 型喇叭连接. H 型喇叭长为 350 mm, 宽为 250 mm; 喇叭再与 3 cm 标准微波波导相连接. 在以上微波测量单元中, 测试仪器采用的是型号为 HP8510C 的矢量网络分析仪. 实验所用的微波频率在 9—15 GHz 的波段.

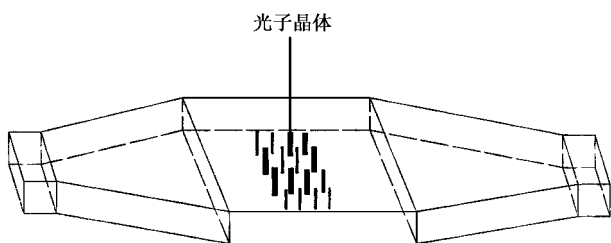


图2 实验装置示意图 中间部分是方形的波导腔, 光子晶体放在波导腔中, 两边是接收天线, 通过 3 cm SMA 接头与微波网络分析仪相接

图 3 是理论计算结果与实验结果的比较, 其中实线表示用多重散射方法计算得到透过谱, 虚线表示实验测得的透过谱. 由图 3 可见, 实验值比理论值大 $0.006c/a$, 这是由于理论计算中所用的陶瓷柱半径、介电常数与实验中使用的陶瓷柱半径、介电常数存在一定的误差所致. 理论结果与实验结果均表明, 环形腔输出端 B 的透过率很小(约为 -35 dB), 表明当频率为 $0.37c/a$ 时, 光子晶体环形腔已起到了频率选择的作用. 我们还计算了频率为 $0.37c/a$ 时环形腔的电场分布, 结果如图 4 所示. 从图 4 可以看

出, 在输出端 B 这一频率的电场非常小, 可以忽略, 电磁波基本上都沿原路返回. 这一结果与理论分析完全符合, 从而从理论和实验上证明了这种结构的光子晶体中, 只要选择合适的 d 值就可以选择输出频率.

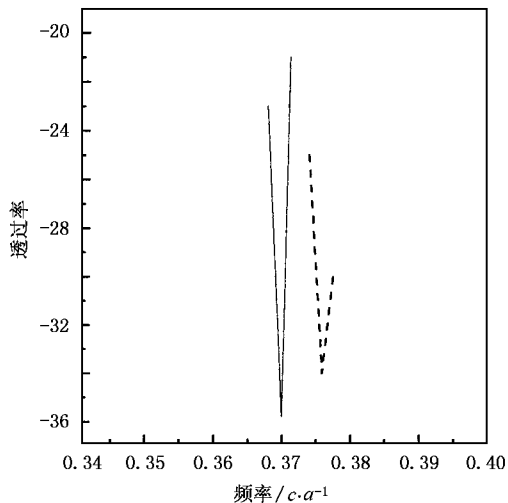


图3 理论结果与实验结果的比较 实线表示理论计算得到的透过谱, 虚线表示实验中测量得到的透过谱

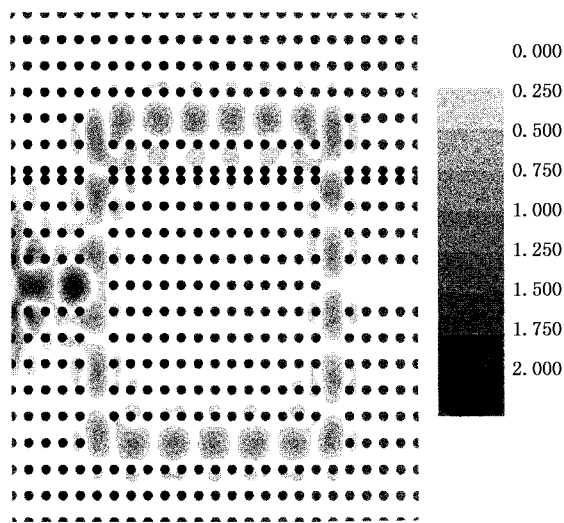


图4 频率为 $0.37c/a$ 时的电场分布图

这种结构的光子晶体可以用来制作光子晶体光开关. 即用非线性材料做背景介质, 在其表面打孔. 当没有抽运光作用时, 光开关处于关闭状态. 当有抽运光作用于这一晶体时, 材料的三级非线性效应引起材料折射率的变化, 使得晶体的带隙发生移动, 这时在某一频率下原本不能输出的电磁波由于带隙的移动实现输出, 光开关处于开启状态. 也可以用这种结构来制作波分复用器. 图5为波分复用器的结构

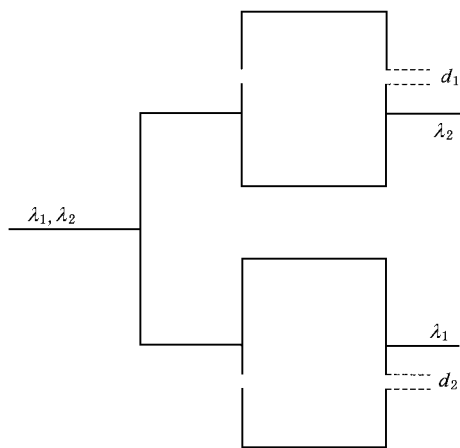


图 5 波分复用器结构原理图 d_1, d_2 表示不同的距离差

原理图,通过选择不同的 d_1, d_2 值,可以控制各个输出端的输出波长.

3. 结 论

本文从理论和实验上阐明了只要适当的调节光子晶体环形腔的内部参数 d 的值,使其满足某一波长的 $n\lambda + \frac{1}{4}\lambda$,就可以在光子晶体的环形腔中实现输出端频率的选择.这种光子晶体环形腔可以用来制作光开关、波分复用器、滤波器等光学器件,在集成光路等领域也具有重要的应用价值.

感谢香港科技大学张肇庆教授提供多重散射方法程序,同时感谢 CSTNET 为本工作提供的计算机时.

-
- [1] Yablonovich E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Li Z Y, Xia Y N 2001 *Phys. Rev. B* **64** 153108
- [4] Agio M, Andreani L C 2000 *Phys. Rev. B* **61** 15519
- [5] Kee C S, Lim H 2001 *Phys. Rev. B* **64** 12110
- [6] Qiu M, He S 1999 *Phys. Rev. B* **60** 10610
- [7] Brown E R, Parker C D, Yablonovich E 1993 *J. Opt. Soc. Am. B* **10** 404
- [8] Akahane Y, Asano T, Song B S *et al* 2003 *Nature* **425** 944
- [9] Noda S, Chutinan A, Imada M 2000 *Nature* **407** 608
- [10] Lin S Y, Chow E, Bur J *et al* 2000 *Opt. Lett.* **27** 1400
- [11] Sugimoto Y, Ikeda N, Carlsson N *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 388
- [12] Kawy A S, Shi S Y, Prather D W 2001 *Opt. Soc. Amer.* **40** 2247
- [13] Jin C J, Fan S H, Zhang D Z 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 160
- [14] Ziolkowski R W, Tanaka M 1999 *Opt. Quantum Electron.* **31** 843
- [15] Feng Z F, Wang Y Q, Xu X S *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 62 (in Chinese) 冯志芳、王义全、许兴胜等 2004 物理学报 **53** 62
- [16] Li L M, Zhang Z Q 1998 *Phys. Rev. B* **58** 9587

Application of interference theory in photonic crystals^{*}

Feng Zhi-Fang Wang Yi-Quan Feng Shuai Cheng Bing-Ying Zhang Dao-Zhong

(*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

(Received 31 May 2004 ; revised manuscript received 28 October 2004)

Abstract

In this letter the propagation of electromagnetic wave in a round cavity of photonic crystals is analysed both theoretically and experimentally. Frequency selected propagation has been realized by changing the parameters of the photonic crystal. We have computed theoretically the transmission spectrum. In the experiment, we have also measured the transmission spectrum.

Keywords : interference, photonic crystals, round cavity

PACC : 4230, 5110

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2001CB6104).