

文章编号:1001-9014(2006)03-0179-04

四方晶格光子晶体波导的高通滤波特性

黄声野, 史俊锋, 王东生, 李伟

(清华大学精密仪器系, 精密测量技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:分析了四方晶格光子晶体波导的高通滤波特性及其与波导宽度的关系, 数值计算结果与微波段的实验结果相吻合. 当光子晶体波导宽度在大约 $1.5a \sim 2a$ (a 为晶格常数) 的范围时, 透过率频谱呈现高通滤波的特性. 下限截止频率随波导宽度的增加而减小. 分析了光子晶体晶胞的填充率和介电常数比对高通特性的影响. 利用高通特性与波导宽度的关系设计了波长-位移传感器, 计算表明测量波长的相对误差达到 $\Delta\lambda/\lambda < 0.0061$.

关键词:光子晶体; 微禁带; 高通滤波; 波长-位移传感器

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A

HIGH PASS PROPERTY OF SQUARE LATTICE PHOTONIC CRYSTAL WAVEGUIDES

HUANG Sheng-Ye, SHI Jun-Feng, WANG Dong-Sheng, LI Wei

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments

Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: High pass property and its dependence on waveguide width were investigated theoretically and experimentally for square lattice photonic crystal waveguides. Good correspondences between the numerical and experimental results were shown. The high pass property can be observed while the widths of the waveguides are about $1.5a \sim 2a$. The lower limiting frequencies decrease while the widths of waveguides increase. The effect of filling ratio and dielectric constant ratio of the photonic crystal cell on the high pass property was analyzed. A wavelength-displacement sensor was designed and $\Delta\lambda/\lambda < 0.0061$ was achieved according to our calculation.

Key words: photonic crystal; mini-forbidden band; high pass filter; wavelength-displacement sensor

引言

光子晶体 (photonic crystals) 是两种或两种以上的电介质呈周期排列的具有光子带隙的人工结构^[1,2]. 频率落在光子带隙内的光无法在光子晶体中传播. 光子晶体的出现提供了一个全新的控制光传播和构建光学芯片的方法. 光子晶体波导是基于光子晶体的光学芯片最重要也是最基础的器件. 它可以引导光以接近 100% 的效率通过转弯半径为波长量级的弯折^[3]. 以往的研究表明, 光子晶体波导存在微禁带^[4], 频率在微禁带范围内的光无法在该波导中传播. 通常, 这种微禁带的频率范围都很小^[5], 在透过率频谱上表现为窄带滤波的形式. 然而, 四方晶格介质柱光子晶体波导在一定宽度条件下却表现出高通滤波的特性.

本文探讨四方晶格光子晶体波导的高通特性与波导宽度的关系, 分析光子晶体结构参数对波导的高通特性的影响, 根据该特性设计波长-位移滤波器, 并进行误差分析.

1 数值计算方法和微波实验装置

二维光子晶体由 400mm 长的氧化铝陶瓷棒按四方晶格排列构成. 引入线缺陷后形成一个如图 1 所示的直波导. 介质柱的介电常数为 $\epsilon = 8.9$, 截面半径 $r = 1.4\text{mm}$, 晶格常数 $a = 6\text{mm}$. 该光子晶体具有 E 极化光子带隙 15GHz ~ 20GHz (相应的归一化频率范围为 $a/\lambda = 0.3 \sim 0.4$, 其中 λ 是自由空间的波长). 我们用平面波展开法^[6] 计算波导的色散关系, 所用超胞如图 1 中虚线框所示. 为了考察波导的透过率以及电磁波在波导中的场分布情况, 采用了

收稿日期: 2005-10-05, 修回日期: 2006-01-27

Received date: 2005-10-05, revised date: 2006-01-27

基金项目: 国家安全重大基础预研基金(51307) 资助项目 1.2 子专题; 光子晶体波导理论研究和结构设计

作者简介: 黄声野(1974-), 男, 浙江衢州人, 清华大学博士研究生, 研究方向: 光子晶体, 光学测量仪器.

时域有限差分法^[7]进行仿真计算. 仿真区域的四周用完全匹配层来吸收外向波以避免边界反射带来的影响. 如图 1 所示, 波导宽度为 w , 定义为波导两侧介质柱圆心的距离. 光源 S 提供高斯脉冲. 探测面 D 处的振幅被记录下来并进行傅里叶变换用于计算透过率频谱. 仿真计算中波导的透过率定义为探测面接收到的光强与光源出射光强的比值.

微波实验装置如图 2 所示. 实验中采用网络分析仪测量光子晶体波导的透过率频谱. 两个角锥喇叭天线设置在波导的两端分别发射和接收信号. 角锥喇叭天线所摆放的方向使出射的电磁波的电场方向平行于介质棒的方向.

2 计算和实验结果

图 3 给出了光子晶体波导在 3 种不同宽度条件下的色散曲线和透过率频谱. 色散曲线和透过率频谱表现出很好的一致性. 对于所示的 3 个宽度, 色散曲线中带隙内都有一个低频范围内没有任何模式, 相应的透过率也非常低. 透过率曲线中同时给出了 FDTD 仿真的结果(细实线)和微波实验(标记点)的结果. 其中实验结果用接收到的功率的最大值进行了归一化处理. 从图 3 可以看出, 导带的下限截止频率随着波导宽度的逐渐减小而增大. 这是因为, 对于

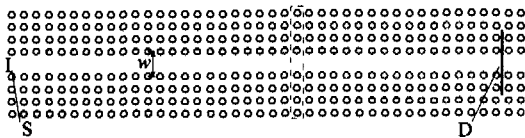


图 1 光子晶体波导仿真区结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the PC waveguide for simulation

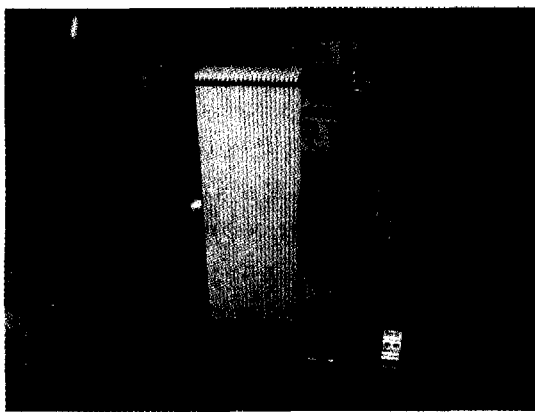


图 2 微波实验装置
Fig. 2 Setup for the microwave experiment

导波模而言, 在波导横向上(垂直于波导的传播方向)传播一个来回所经历的位相差应当等于 2π 的整数倍, 当波导的宽度减小时, 能够满足上述位相差条件的波长也相应减小了. 图 4 是归一化中心频率分别为 $a/\lambda = 0.325$ 和 0.305 的频宽很窄的两个高斯脉冲入射到宽度为 $w = 2a$ 的光子晶体波导在时刻 $t = 140fs$ 的电场分布. 此时光源刚好发出脉冲的最大值. 这两个脉冲中前者的频率在导带范围内, 所以几乎没有损耗地在波导中传播. 而后的频率处于微禁带内, 所以这个频率的光进入波导后很快衰减, 仿真结果显示, 进入波导约 1.5λ 深处, 脉冲的振幅即衰减为原来的 0.1 以下. 进一步计算的结果表明, 对于其它宽度的波导, 频率处于微禁带内的高斯脉冲入射时衰减为入射振幅的 0.1 倍所经历的长度基本上为 $1 \sim 2\lambda$. 可见只需要几个晶格常数的长度的波导即可实现高通低阻的效果. 这对于制作适于集成的光子晶体高通滤波器很有意义.

3 填充率和介电常数比的影响

填充率和介电常数比是光子晶体的两个重要参

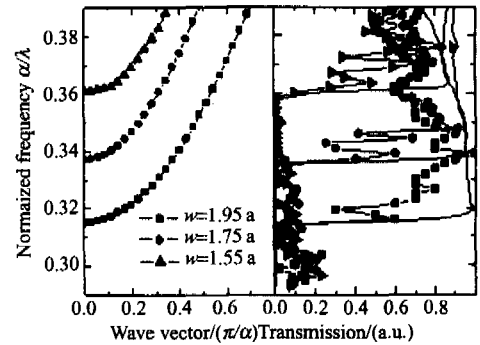


图 3 3 个不同宽度的光子晶体波导的色散曲线(左)和透过率频谱(右).
Fig. 3 Disperse curves (left) and transmissions (right) for three PC waveguides with different widths

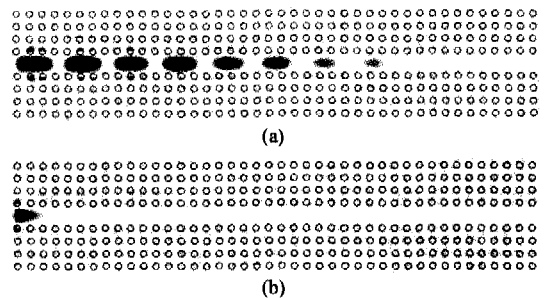


图 4 电场分布. 入射脉冲的归一化中心频率为 (a) 0.325 和 (b) 0.305.
Fig. 4 Electric field patterns. The normalized center frequencies are (a) 0.325 and (b) 0.305

数. 对于不同的填充率或者介电常数比, 波导导带的截止频率也会发生变化. 介电常数比是指介质棒的介电常数与背景介电常数(这里是空气)的比值. 图 5 给出了 3 个不同填充率 f 的光子晶体波导导带的下限截止频率随波导宽度 w 变化的情况及其相应的光子带隙范围. 光子晶体其它参数与第一节所述相同. 图中垂直方向的箭头标出的范围是各填充率光子晶体的光子带隙. 尽管对于不同的填充率的光子晶体, 光子带隙的范围不同, 但当波导的宽度在 $1.5a \sim 2a$ 之间时都会出现高通的特性, 而且导带的下限截止频率随着宽度 w 增大以近似于线性的关系下降. 平面波展开法的计算结果表明, 当 $w < 1.5a$ 时, 在原本是微禁带的低频区域出现多个模式, 使得微禁带消失, 高通滤波特性也随之消失. 而当 $w > 2a$ 时, 导带的下限截止频率下降到接近或小于光子带隙的下限了, 高通低阻的性质也就不存在了. 对于四方晶格介质柱的光子晶体而言, 随着晶胞的填充率增大, 其光子带隙逐渐变窄并向低频方向移动. 此时波导的透过率频谱的下限截止频率在下降的同时对波导宽度的变化也变得越来越不敏感. 从图 5 中的下限截止频率与波导宽度的关系曲线上看, 较大的填充率对应的曲线也较平缓一些.

图 6 是其它参数不变的情况下介质柱的介电常数取 3 个不同值的光子晶体波导导带下限截止频率与波导宽度的关系曲线. 波导导带的下限截止频率随波导宽度增加基本上呈线性下降, 而且高通特性也只存在于一定的波导宽度范围里. 当介质棒的介电常数 ε 逐渐增大时, 光子带隙的范围逐渐向低频方向移动, 导带下限截止频率也向低频方向移动, 但是移动速度比光子带隙移动的速度慢. 这就使得 ε 较大时, 导带的下限截止频率在带隙中的相对位置较高, 在较大的波导宽度范围里表现出高通的特性. 比如 $\varepsilon = 7$, 则当 $w = 1.5a \sim 1.9a$ 时有高通特性, 如果 $\varepsilon = 9$, 则当 $w = 1.5a \sim 2.3a$ 时都有高通特性.

4 波长-位移传感器

利用波导高通滤波特性, 可以设计波长-位移传感器. 图 7 中的两个相同的四方晶格介质棒阵列一个是固定的, 另一个则可以沿导轨滑动. 初始状态下, 这两个光子晶体互相靠拢形成一整个大的光子晶体. 当其中的活动光子晶体沿导轨移动一个距离后, 这两个光子晶体之间形成宽度可调的光子晶体波导. 在波导的一侧设置有探测器用于接收从波导透射过来的信号. 当一个单色波入射时, 随着活动光

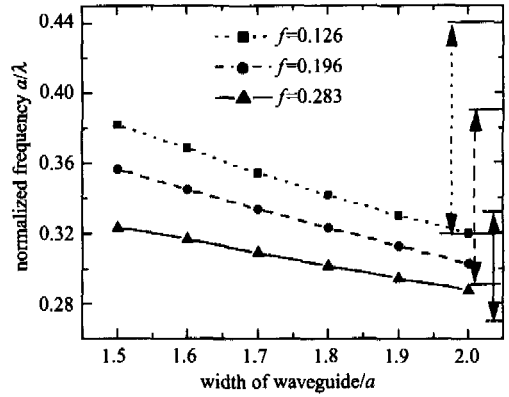


图 5 3 个不同填充率光子晶体波导的导带下限截止频率随波导宽度变化曲线.

Fig. 5 Dependences of lower limiting frequencies on the widths of PC waveguides for PCs with three different filling ratios

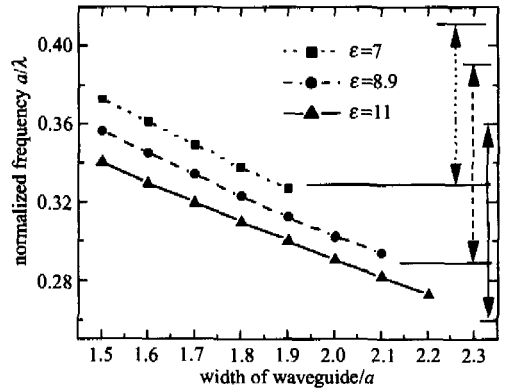


图 6 介质棒介电常数取 3 个不同值的光子晶体波导的导带下限截止频率随波导宽度变化曲线.

Fig. 6 Dependences of lower limiting frequencies on the widths of PC waveguides for PCs with three different dielectric constants of dielectric rods

子晶体的位移增大, 探测器接收到的功率曲线将出现一个上升沿, 记相应的位移为 d . 标定 d 和入射波长的关系后, 可根据活动光子晶体的位移来确定入射波的波长. 图 7 是波长和位移的关系曲线. 波长测量范围为 $16.3 \sim 19.5$ mm. 对 FDTD 得到的结果(实心圆点)进行的多项式拟合方程为: $f(x) = 13.73143 + 0.805x + 0.02579x^2$. 图中的空心三角标记是微波实验的结果. 测量波长的误差来自两个方面: 一是位移的读数误差 $\Delta d = 0.01$ mm, 由此引起的波长误差 $\Delta_1 \approx 0.008$ mm, 二是上升沿判断误差引起的 Δ_2 , 大约为 0.1 mm. 因此总的误差为 $\Delta\lambda = (\Delta_1^2 + \Delta_2^2)^{1/2} \approx 0.1$ mm, 计算的相对误差为: $\Delta\lambda/\lambda < 0.0061$. 这两个误差中后者是主导的. 造成这个误差的主要原因是介质棒的直径误差和介质棒中心位置的定位误

差. 减小介质棒的加工误差和装配误差可以提高波长-传感器的精度. 另外, 根据第二节分析, 选用较小的填充率和较大的介电常数比有利于增大工作范围和提高精度.

5 结论

当四方晶格光子晶体波导的宽度大约在 $1.5a \sim 2a$

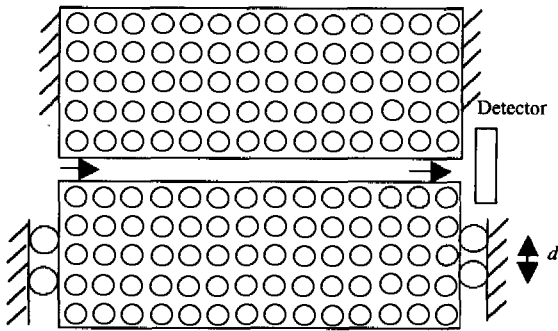


图 7 波长-位移传感器结构示意图.
Fig. 7 Setup of the wavelength-displacement sensor

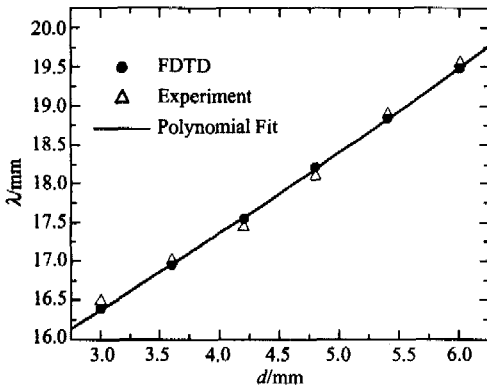


图 8 波长和位移的关系曲线.
Fig. 8 Dependence of wavelength on displacement

左右的范围内时, 由于微带隙的存在, 波导的透过率频谱呈现出高通滤波的性质, 其下限截止频率随波导宽度增大而减小. 较小的填充率和较大的介电常数比可以使波导在较大的频率范围内呈现高通特性, 并且对波导宽度的变化更为敏感. 我们利用这种高通滤波的性质设计了波长-位移传感器, 计算结果表明测量波长时相对误差可以小于 0.0061. 如果有多个波长的波同时入射, 探测器接收到的功率随位移变化的曲线将出现几个台阶, 每个台阶就对应一个波长.

REFERENCES

- [1] Joannopoulos J D, Meade R D, Winn J N. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* [M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1995.
- [2] XU Jing, CHEN Xiao-Shuang, ZHOU Mei, et al. Numerical study on photonic properties in two-dimensional complex photonic crystals of square lattice [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐靖, 陈效双, 周梅, 等. 二维正方复式晶胞光子晶体的光子特性研究. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(4):241—244.
- [3] Attila Mekis, Chen J C, Kurland I, et al. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 77(18):3787—3790.
- [4] Olivier S, Rattier M, Benisty H, et al. Coupled-mode theory and propagation losses in photonic crystal waveguides [J]. *Opt. Express*, 2003, 11(13):1490—1496.
- [5] Mario Agio, Costas M Soukoulis. Ministop bands in single-defect photonic crystal waveguides [J]. *Phy. Rev. E*, 2001, 64(5):055603.
- [6] Ho K M, Chan C T, Soukoulis C M. Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 65(25):3152—3155.
- [7] YEE Kane S. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equation in isotropic media [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1966, AP-14(3):302—307.