

光子晶体波导传输特性研究

朱志宏 叶卫民 季家 袁晓东 曾淳 张晚云

(国防科技大学理学院光子声子研究中心 长沙 410073)

摘要 在完整二维光子晶体中引入线缺陷后,就形成了二维光子晶体波导。将时域有限差分方法(FDTD)用于光子晶体波导传输特性研究,计算了光子晶体波导的透射率频率分布,给出不同结构的光子晶体波导的光场分布及能流密度示意图。

关键词 光子晶体 时域有限差分 光子晶体波导 传输特性

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

1 引言

近年来,光子晶体(photonic crystals)^[1-2]因其具有控制光子的流动的能力而备受关注^[3-4]。它其实可以理解就是一种周期性电介质。在周期性电介质材料中,光的色散曲线明显地不同于均匀电介质中的光的色散曲线,其中存在类似于半导体禁带的"光子禁带"(photonic band gap)^[5-10];如果光的频率在禁带范围内,则它不能在介质中传播。光子晶体的非凡的本领正是由于这个禁带的存在。

当在光子晶体中引入线缺陷后,处于原来对完整光子晶体不透明的禁带中的光可以沿着线缺陷传播,这就形成了光子晶体波导,鉴于光子晶体波导具有传统介质波导所不具有的一些独特的性质:光子晶体波导的尺寸可以是波长的数量级,这使光子晶体波导被集成更为容易;光子晶体波导的拐弯角度可以很大,这使得光子晶体波导的形状可以更加多样化;光在光子晶体中可以无损耗传播等等,因此,研究光在光子晶体波导中的传输特性是一件很有意义的事情。

本文将时域有限差分方法(FDTD)^[11-12]作为研究的工具,以二维方型光子晶体 TM 模为研究对象,给出了一些计算结果;FDTD 方法能够很直观地给出光在光子晶体波导中的传输行为和光场分布情况,它能处理任意几何形状的光子晶体波导,它的另外一个优点是可以通过傅立叶变换,一次计算出包含很大频率范围的结果。

2 结果与分析

对于如图 1 所示的二维线缺陷方型光子晶体:晶

格常数为 a , 基质为空气, 介质柱半径为 r , 介电常数为 ϵ ; 取 $r=0.25a$, 介质柱的相对介电常数为 4.55。以 TM 模(电场方向平行于介质柱轴方向)为研究对象, 当 TM 模脉冲源(局域源)沿图中箭头位置和方向入射到光子晶体上时, 用 FDTD 方法可以得到 A 处的透射率频率分布如图 2 中的"data 1"。"data 3" 与"data 2"是去掉光子晶体后, 相同的局域源在空气中传播时, 在 A 处和整个出射面的透射率。从图中可以看出, 如果光的频率在光子晶体禁带范围之外, 则不管是在光子晶体波导中还是空气中, 散射(或衍射)都很厉害, 以至到达 A 处的能量只是很少的一部分; 当光的频率(归一化频率 0.36-0.46 之间)在光子晶体禁带范围之内时, 在光子晶体中, 光波只能沿着线缺陷传播, 能量集中到达 A 处。

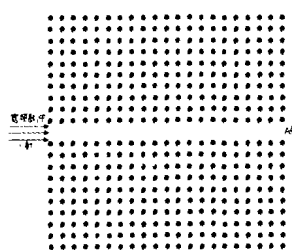


图 1 包含线缺陷的二维方型光

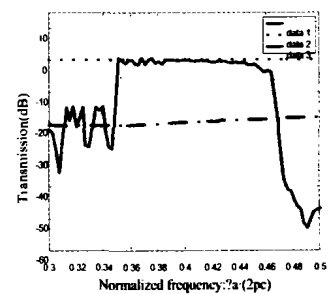


图 2 A 处 TM 模透射率频率分布

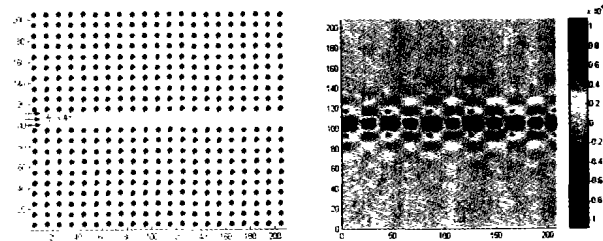


图 3 单色(归一化频率为 0.4)TM 模电场强度 E 矢量在有直线线缺陷的光子晶体中的分布(左图为直线线缺陷光子晶体俯视图, 右图为对应左图电场分布)

收稿日期:2003-07-02

作者简介:朱志宏 男,1978 年生,国防科技大学博士研究生。

研究方向:光子晶体

项目资助:本文受 973 国家安全重大基础研究项目资助。

20 光子晶体 2003 年第 12 期

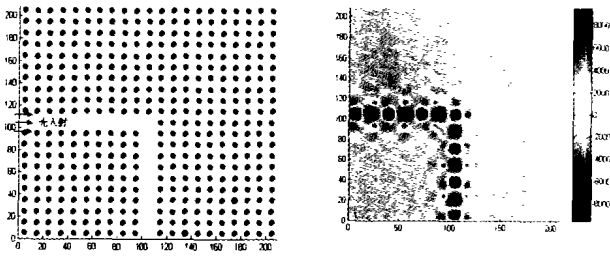


图4 单色(归一化频率为0.4)TM模电场强度E矢量在有折线缺陷的光子晶体中的分布

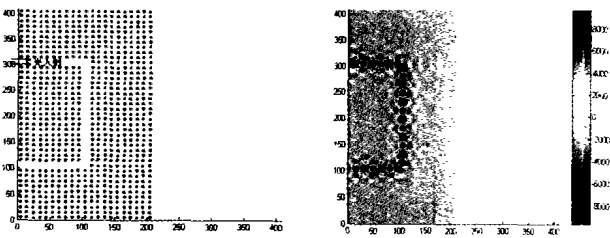


图5 单色(归一化频率为0.4)TM模电场强度E矢量在有弓型线缺陷的光子晶体中的分布

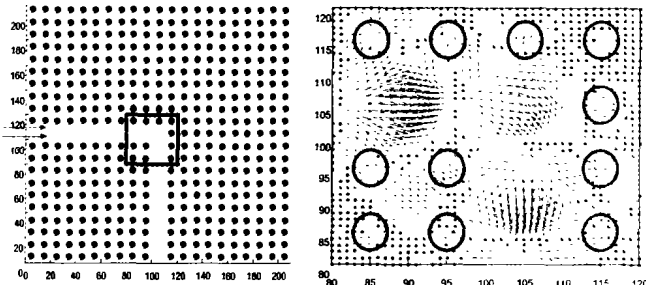


图6 二维方型光子晶体波导俯视图

图7 光子晶体中的能流密度矢量

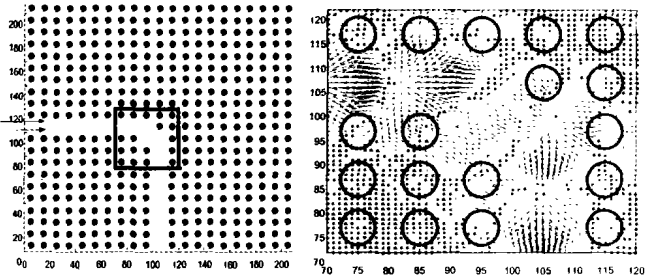


图8 二维方型光子晶体波导俯视图

图9 光子晶体中的能流密度矢量

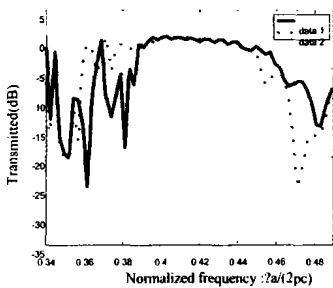


图10 拐弯处透过率频率分布

设计如图3、图4和图5所示三种不同的光子晶体波导结构,从其光场分布图可以直观地看出,当光子晶体中存在线缺陷时,频率处于禁带的光能够沿着线缺陷传播,而不管线缺陷有多大的拐弯角度。计算表明,当处于禁带频率范围的光在图3所示的直线缺陷中传

播时,能量没有损失,在弯波导中传播时能量损失也很小,如图10所示。

对于如图6所示的二维方型光子晶体直角波导,当频率为0.43的单频源沿图中箭头方向和位置入射到波导口时,可以得到场稳定后波导中某一时刻的能流密度矢量图如图7。从图7中可以看出,光的能量大部分集中在波导中,在拐角处,能流密度方向发生较大改变。当改变波导拐角为如图8所示,可以得到它的能量密度矢量图如图9,在拐角处,能流密度方向改变相对较平缓。当宽频源入射时,可以得到两种拐弯情况下的能量透过率如下图10所示(data 1对应图6,data 2对应图8),结果表明:在公共禁带范围内,两种情况的结果一样,几乎都没有能量损失;在公共禁带范围之外附近,两种情况下的能量损失相差较大。

3 结束语

本文将FDTD用于光子晶体传输特性理论研究,结果表明,光子晶体波导与普通介质波导相比具有转弯角度大、损耗小、容易集成等特点。鉴于光子晶体波导的这些优点,制作实际的硅基光子晶体波导来约束和传输光将是我们下一部分的工作。

参考文献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Phys. Rev. Lett.*,1987, 58(20):2059-2062
- 2 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys. Rev. Lett.*,1987, 58(20):2486-2489
- 3 Joannopoulos JD, Meade RD, and Winn JN. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*(Princeton University Press, Princeton, NJ, 1995)
- 4 Mekis A. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides. *Phys. Rev. Lett.* 1996,77(18):3787-3790
- 5 Joannopoulos JD, Villeneuve PR and Fan S. Photonic Crystals: Putting a New Twist on Light," *Nature*,1997,386(6621):143-149
- 6 Abram I. and Bourdon G. Photonic-well microcavities for spontaneous emission control. *Phys. Rev. (A)*,1996,54(8):3476-3479
- 7 Ho K.M., chen C.T., Soukoulis C.M. Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures. *Phys. rev. lett.*,1990 65(25):3152-3155
- 8 Sigalas M. M., Chan C. T., Ho K. M., et al. Metallic photonic band-gap materials. *Phys. Rev. (B)*,1995, 52(10):11744-11751
- 9 Jin Chongjun, Qin Bai, Yang Miao, et al. Two dimensional photonic band structure: Triangular non-bravais lattice. *Acta Optica Sinica*,1997, 17(4):409-413
- 10 Qin Bai, Yang Miao et al. Experimental study of photonic crystal-triangular lattices. *Acta Optica Sinica*,1999, 19(2):239-244
- 11 Bierwirth K., Schulz N., and F. Amdt. Finite-difference analysis of rectangular dielectric waveguide structures. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*,1986,34(11): 1104-1114
- 12 Yee K. S. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. *IEEE Trans. Antennas Propagation*, 1966,17(5):302-307

播时,能量没有损失,在弯波导中传播时能量损失也很小,如图10所示。