

基于FDTD算法的光子晶体等相位面频谱分析

马路明 胡金兵 蒋强 梁斌明 陈家璧 庄松林

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200092

摘要 从理论上分析设计了三角晶格的光子晶体,利用时域有限差分法模拟横电模(TE模)在二维光子晶体中的传播,并对模拟得到的电磁场数据作傅里叶变换得到其频谱。通过对各个频谱成分的相位作分析,计算出光子晶体的等效折射率。进一步发现不同的空间频率对应的相速度方向是不同的,正折射的频率对应的相速度方向与能量传播方向一致,负折射的频率对应的相速度方向与能量传播方向相反。对光子晶体内部电场的变化做了详细的分析,以期探究光子晶体与电磁波作用的物理机理提供扎实的理论依据。

关键词 材料;光子晶体;时域有限差分法;等相位面;等效折射率

中图分类号 O482.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.061602

Analysis of Equi-Phase Frequency Spectrum in Photonic Crystal Based on FDTD Method

Ma Luming Hu Jinbing Jiang Qiang Liang Binming Chen Jiabi Zhuang Songlin

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200092, China

Abstract A triangular photonic crystal is designed theoretically. An analysis on the transmission properties of the transverse electric mode (TE mode) in two dimensional (2D) photonic crystal with triangular lattice is presented based on the finite difference time domain technique. The frequency spectrum is extracted from the simulated electromagnetic field data by Fourier transform. By analyzing the phase of each spectral component, the equivalent refractive index of a photonic crystal is calculated. The results show the different relationship between the spatial frequency and phase velocity. For the frequency of positive refraction, the phase velocity and energy are in the same direction. On the contrary, For the frequency of negative refraction, the phase velocity and energy are in the opposite direction. The result might provide a solid theoretical basis in the inquisition of photonic crystal physical mechanism.

Key words materials; photonic crystal; finite difference time domain; equi-phase surface; effective refractive index

OCIS codes 160.5298; 070.2465; 260.2710; 350.5030

1 引言

光子晶体(PC)的概念是由Yablonovitch^[1]和John^[2]于1987年借鉴半导体晶体及其电子带隙的概念首次独立提出的。光子晶体是由不同介电常数的半导体材料在空间呈周期性排布组合而成的一种复合材料。相比于其他均匀介质,光子晶体具有很多奇特的性质。随着激光刻蚀工艺的不断进步,光子晶体理论上的特性也逐步在实验中得到了验证。近年来,国内外研究者相继设计光子晶体进行了诸如超棱镜效应^[3]、反常多普勒效应^[4]、慢光效应^[5]、自准直效应^[6]、逆切连科夫效应^[7]等方面的研究。光子晶体作为一种新型材料,在天文学、气象学、通讯和医药等一系列领域都有着广泛且不可替代的应用。利用光子晶体制作的新器件如平板透镜^[8]、光子晶体光波段谐振腔^[9-10]、光波导^[11-12]和反射镜^[13]等越来越多地应用到实践中。在未来,光子晶体将发挥更大的作用。因此对光子晶体机理的研究是一个有价值并且值得深入研究的课题。

收稿日期: 2015-01-05; 收到修改稿日期: 2015-01-18; 网络出版日期: 2015-05-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2011CB707504)、国家自然科学基金(61177043, 11104184)、国家青年科学基金(61308096)

作者简介: 马路明(1989—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: malumingusst@126.com

导师简介: 梁斌明(1977—),男,博士,副教授,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: bmliang78@aliyun.com

目前,研究人员采用理论分析和软件仿真相结合的方式探究光子晶体的机理,并取得了显著的成果。2007年,Sun等^[14]从理论上分析研究了光子晶体内部布洛赫模式与等效折射率的关系,认为等效折射率与主波有关,而且不为负。2010年,戴^[15]利用传输矩阵法(TMM)研究了高斯光束被二维(2D)光子晶体反射时所出现的古斯汉森(GH)位移。2012年,胡等^[16]用传输矩阵法和布洛赫定理分析了一维光子晶体的折射性质和透射率。2013年,周等^[17]通过平面波展开法(PWE)与时域有限差分法(FDTD)分析了基于光子晶体禁带特性设计的偏振光分束器。2014年,赵等^[18]用数值模拟的方法研究了二维正方晶格光子晶体点缺陷的透射谱。正是由于上面这些研究的开展,光子晶体的特性才逐渐为人们所了解,这些探索为光子晶体机理的研究打下了坚实的基础。

然而,光与光子晶体作用的物理机制仍不能确定。明确光子晶体的机理将进一步扩大光子晶体的应用范围,推动社会生产力的进步。本文基于FDTD算法研究横电(TE)模在光子晶体内的传播性质,讨论光子晶体的作用机理。相比其他文献所提及的程序和商业软件Rsoft,用Matlab编写的程序能更加直观地反映光子晶体内电场的变化,更容易获取光子晶体中某时刻的电场数据,而不用受到整个系统达到稳态这一条件的限制。本文首先利用Matlab编程实现电磁波的FDTD算法,并从理论上分析设计了三角晶格的光子晶体,进而对TE模在光子晶体中的传播进行仿真,根据所得到的电场数据,计算出晶体对应的等效折射率。分析仿真得到的频谱,通过对各个频谱成分的相位作分析,得到不同空间频率的波在光子晶体内的等效折射率和对应的相位传播方向。

2 光波段FDTD算法和光子晶体结构的设计

2.1 光波段FDTD算法

FDTD算法是Yee^[19]于1966年提出的,现在已经被广泛应用于解决如天线、电子电路等电磁学方面的诸多问题,在光子晶体理论相关的研究领域有着深刻的意义。

光频段的FDTD是以偏微分形式的麦克斯韦方程为基本理论,基于麦克斯韦方程的变形对空间和时间进行离散处理。用Yee元胞的方法对空间划分,如图1所示,所在的几何空间离散为空间网格点,在这些网格点上电场和磁场分量被分置于空间离散的位置上。在三维空间中,一个电场分量被4个磁场分量环绕,电场的变化会引起周围磁场的变化,变化量由麦克斯韦方程中的安培定律来计算;一个磁场分量的改变也会引起周围电场的变化,变化量由麦克斯韦方程中的法拉第定律来计算。将空间中的电磁场分别进行离散计算,以描述空间电磁波。

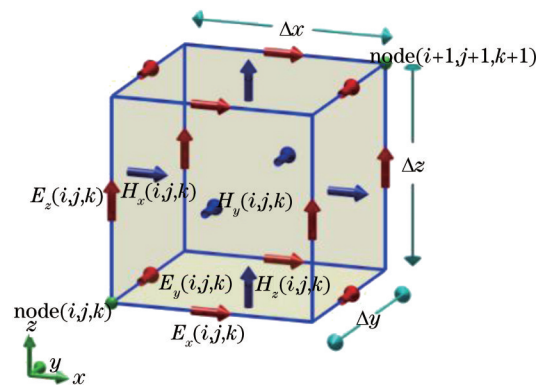


图1 Yee 网格单元及电磁场各分量在网格空间的分布

Fig.1 Yee grid cell and the distribution of EM field components in scattered space

2.2 光子晶体结构的设计

硅(Si)作为当下集成器件的基础性半导体材料,有着较强的稳定性,是目前制备工艺最成熟、研究最深入、了解最清楚的材料之一,其相对介电常数为11.9,与空气相比具有较大的折射率差。因此选择其作为构成光子晶体的介质材料,较容易实现负折射效应,同时在现实中也能够制作出仿真所用的结构,用Si作为介质材料将为理论和实验的结合提供便利。现将Si柱在空间XOY面内排列成六边形,在Z方向无限延伸,圆柱半径为1 μm,晶格周期为5 μm,如图2(a)所示。

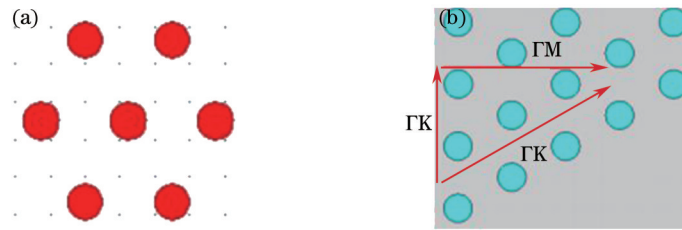


图2 (a) 二维光子晶体的结构; (b) 二维光子晶体在空间中的排布

Fig.2 (a) Structure of 2D photonic crystal; (b) positions of 2D photonic crystal in space

理论和实验表明,描述光在光子晶体中的传播行为,可通过分析光子晶体的能带图和等频率曲线来完成。用电场方向垂直于 XOY 面的偏振光(TE模)沿图2(b)的 ΓM 方向入射,用Rsoft中的Bandsolve工具计算得到如图3(a)所示的能带图,其中 $\Gamma - M$ 及 $\Gamma - K$ 是倒晶格的对称方向,其横坐标代表波数 k ,其纵坐标的物理意义为入射波长的标准化频率 a/λ 。能带图中画出的点表示在此横坐标值对应的方向上可以有能量传播,电磁波的频率为该点对应的纵坐标值。可以在光子晶体中传播的频率范围称为导带;不能够在光子晶体中传播的频率范围称为光子晶体的禁带。图3(a)中给出了5条能带,其中蓝色阴影区表示的是禁带。

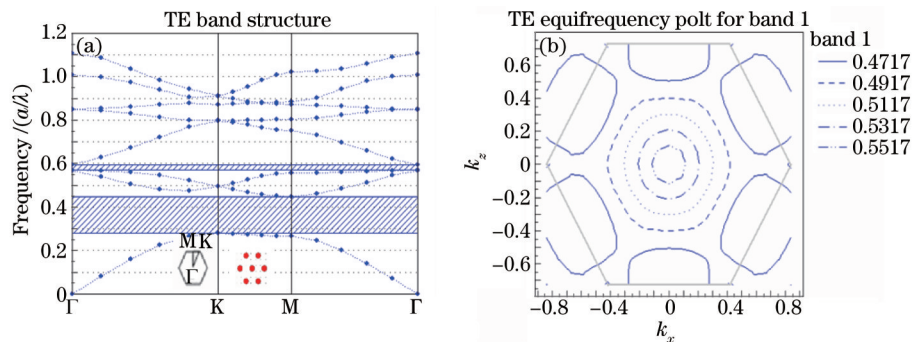


图3 二维光子晶体的(a)能带图和(b)等频图

Fig.3 2D photonic (a)band structure and (b) the isofrequency (IF) curves

分析在两条禁带之间的一阶导带的等频图3(b),以等频线的概念来分析三角晶格光子晶体平板中电磁波的负折射现象。空气中的等频率线是越靠近内圈,频率越小;而光子晶体以第一布里渊区中心点 Γ 为中心,等频线是由外向内,频率增大,离开这个中心布洛赫波矢增大而频率减小。此时,光子晶体内的等频率线与空气中的等频率线增大的方向相反。说明此时光子晶体内的群速度与相速度相反,等效折射率为负。也就是说归一化频率处于第一能带区域的波段(标准化频率在0.4717~0.5517范围内)将会出现负折射现象。图4表示两个软件在近似条件下进行的仿真,其中光波均是自左向右传播,在运行一段时间达到稳定后,对光场分布进行截图。图4(a)是Matlab得到的光场分布,图4(b)是软件Rsoft得到的光场分布。对比两个软件模拟得到的光场分布,可以发现光在经过光子晶体后都发生了明显的负折射,而且出射后偏折的角度大小相等。说明用Matlab编写的FDTD算法是准确的。

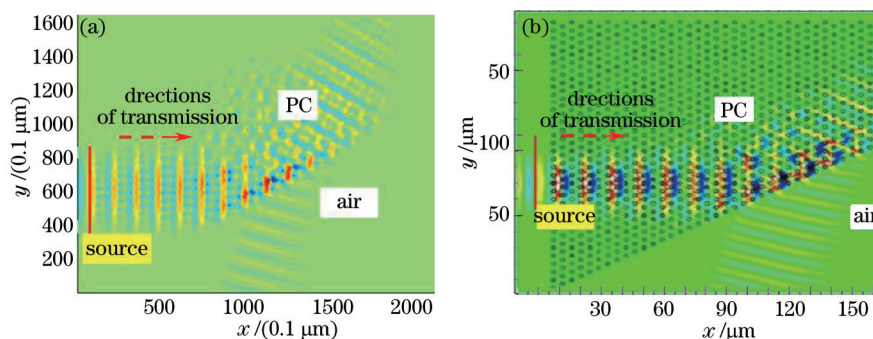


图4 模拟的电磁波分布。(a) Matlab; (b) Rsoft

Fig.4 Electric and magnetic fields simulated. (a) Matbab; (b) Rsoft

3 二维光子晶体等效折射率的计算

对于均匀介质,其折射率大都由实验测定,不同介质测量方法也不尽相同。测量液体的折射率,常用临界角法(阿贝折射仪);测量气体的折射率,则用精密度更高的干涉法,如瑞利干涉仪;测量固体介质的折射率,常用最小偏向角法或自准直法,或通过迈克尔孙干涉仪利用等厚干涉的原理测出。光子晶体不同于均匀介质,实验中一般是通过测量其入射角和出射角,用斯涅耳定律($n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$)计算其整体的折射率。但是对于光子晶体内部的折射率分布,无法通过实验检测。通过在光子晶体内部菱形单元中设置探测器,对通过位置固定的相邻探测点间能量传输的时间与空气中相应的时间作商,计算得到光子晶体内部的等效折射率分布。

取空间网格间隔 $dx = 0.1 \mu\text{m}$, Si柱直径为 $2 \mu\text{m}$,空间一个完整的波长需要 106 个网格表示。在光子晶体中设置探测器,传播方向上每个空间网格对应一个探测器,探测空间点的电场变化。

假设光在介质中传播的速度为 v_1 , Δt 为光在空气中运行 dx 距离所用的时间, Δt_1 为光在介质中运行 dx 距离所用的时间。则可计算介质的折射率:

$$n_1 = \frac{c}{v_1} = \frac{dx/\Delta t}{dx/\Delta t_1} = \frac{\Delta t_1}{\Delta t}, \quad (1)$$

式中 c 为空气中光速,即可以用时间 Δt 和 Δt_1 计算介质相对于空气的折射率 n_1 。

在空气中,光传播 dx 所用的时间为

$$\Delta t = \frac{dx}{c} = \frac{dx}{\lambda} \cdot T. \quad (2)$$

在光子晶体中,若相距 dx 的两个探测器相位延迟为 $S_1 - S_2 = \Delta S$ 步长,时间差应为 $\Delta S \cdot dt$,其中 dt 为循环一次所用的时间。所以 $\Delta t_1 = \Delta S \cdot dt$,相对折射率 n_1 为:

$$n_1 = \frac{\Delta t_1}{\Delta t} = \frac{\Delta S \cdot dt}{T} \cdot \frac{\lambda}{dx} = \frac{\Delta S \cdot dt \cdot \lambda}{dx \cdot T} = \frac{\Delta S \cdot dt \cdot c}{dx}, \quad (3)$$

即: $n_1 = \frac{\Delta S}{2}$

因此可以用步长的差值计算相对折射率。

空间网格单元 dx , dy 取 $0.025 \mu\text{m}$ 时,用在 $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ 的矩形 Si 中相距 $0.025 \mu\text{m}$ 的 600 个探测器论证上述结论的正确性。选用 TE 模的高斯光束作为光源,其束腰半径为 $3.5 \mu\text{m}$,探测器在高斯光束中心传播方向所确定的直线上,探测器通过描绘电场的变化来反应其所在位置的相位变化,探测器和矩形 Si 位置如图 5 所示。对探测器探测到的电场数据进行处理,相邻两探测器的相位延迟可以取电场稳定后某一时间,时间长度为光源所发光的一个时间周期,取其峰值的时间步长的差值,即两个探测器的相位延时的时间步长差 ΔS ,从而求得介质的折射率。用上述方法计算的折射率空间分布如图 6 所示。由于空间网格点的划分的精度有限,计算所得的折射率在 3.5 上下波动,均值 $n_1 = 3.446$,与理论值 $n_1 = \sqrt{11.9} = 3.4496$ 误差为 0.1%。说明算法是正确的,可以用来计算光子晶体内的等效折射率分布。

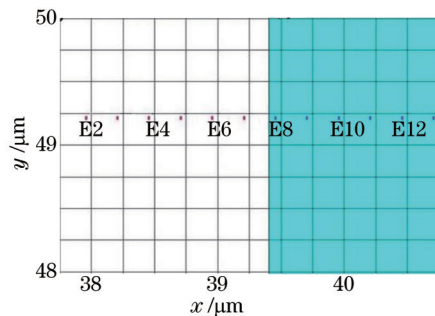


图5 矩形 Si 晶体探测器位置

Fig.5 Locations of the detectors in Si

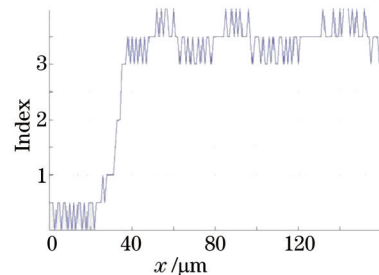


图6 矩形 Si 晶体中折射率分布图

Fig.6 Refractive-index distribution in Si

对于二维三角晶格负折射光子晶体,如图 4(a)所示,光自左向右传播,在光子晶体内部的一个菱形单元内等效折射率分布如图 7 所示。在菱形对角线方向折射率变化为:光由 Si 柱中心向空气传播一段距离,折射

率绝对值减小到0;在两个Si柱中间传播时,折射率由0增大到某一值,再减小到0,折射率为负值;光继续传播,由空气到Si中心的过程,折射率增大到最大值,折射率为正值。

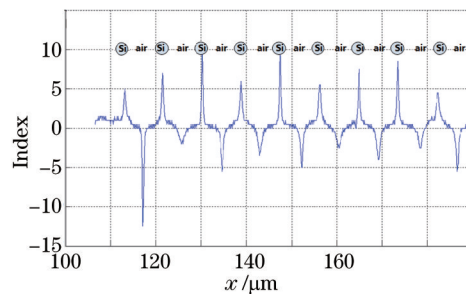


图7 光子晶体中折射率分布图

Fig.7 Refractive-index distribution in PC

通过对正负折射的光子晶体内部折射率作计算,可以总结出以下结论:对于光子晶体,无论其是否有负折射现象,通过此方法求得的整体的等效折射率恒为正。

4 二维光子晶体内相位传播的仿真

能量传播是正向传播的,类似于平常所说的“群速度”是正向传播的。在一般电磁介质中, ϵ 和 μ 同时为正数,若选取能量传播方向为正方向,则波矢 \mathbf{k} 为正代表前向波, \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 和 \mathbf{k} 满足如图8(a)的右手正交系,坡印廷矢量 \mathbf{S} 的方向和波矢 \mathbf{k} 的方向相同。

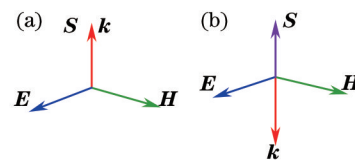
图8 (a) 正常均匀介质中(b) 左手介质中的电场 \mathbf{E} 、磁场 \mathbf{H} 、波矢 \mathbf{k} 和坡印廷矢量 \mathbf{S} 之间的关系

Fig.8 Relationship of electric field, magnetic field, the wave vector and the Poynting vector in (a) homogeneous medium and in (b) left hand medium

在左手介质中(不同于光子晶体), ϵ 和 μ 同时为负数,选择能量流动方向为正,波矢 \mathbf{k} 为负数,亦即 \mathbf{k} 指向 $-(\mathbf{E} \times \mathbf{H})$ 的方向,代表后向波,电场 \mathbf{E} 、磁场 \mathbf{H} 和波矢 \mathbf{k} 满足左手正交系,坡印廷矢量 \mathbf{S} 的方向和波矢 \mathbf{k} 的方向相反。

通过对光子晶体区域电磁场分布的观察分析,可以发现,光子晶体内部电场能形成稳定的包络,通过观察软件对电磁场分布的动态截图发现:整个包络在光子晶体中的传输速度不同于其在空气中的传输速度。包络的传播可以看成是能量向前传输的表现,如果能明确其对应的相位传播方向,与能量的传播方向相比较,将会对明确光子晶体的机理有极大的帮助。

为了提取光子晶体中电场的相位传输,首先对光束传播方向上的电场进行采样,采样范围由光子晶体入射端沿着光传播方向到出射端,对采集到的电场进行快速傅里叶变换(FFT),得到其空间频率分布。再将得到的主频率作逆傅里叶变换得到其在空间对应的电场分布,将变换得到的电场数据各自按照时间顺序进行还原,从而获得空间中的相位传播方向。

4.1 光在二维光子晶体中正常折射现象的研究

用前一节设计的光子晶体做仿真,用TE模的高斯光束作为光源,光波长为 $25 \mu\text{m}$ 时,标准化频率为0.2,在图3(a)的导带内,因而可以在光子晶体内传播,且发生正折射。首先按照前一小节的方法在光子晶体菱形晶格内设置一系列探测器,计算出菱形单元的等效折射率为1.9。对入射端到出射端的电场进行采集,将得到的电场傅里叶变换得到其频谱,如图9(a)所示。该波长的光在空气中的空间频率为 f_0 ,若在光子晶体中的空间频率为 f_1 ,通过式 $n' = f_1/f_0$ 计算的“折射率”与空间频谱相关,暂称为“空间相位折射率”。取频谱中的峰值点与自由空间中频率相比,算出对应的等效折射率为1.96,与用设置探测器的方法探测到的频率基本一致。对主频率 $f = 2.269 \times 10^{13}$ Hz做逆傅里叶变换,还原其电场,如图9(b)所示。图中红线表示的是某一

时刻高斯光束在传播方向上的电场分布,蓝线和绿线分别为红线之后 1/8 时间周期和 1/4 时间周期后电场的分布,可见等相位面是正向传播的。等效折射率为正。

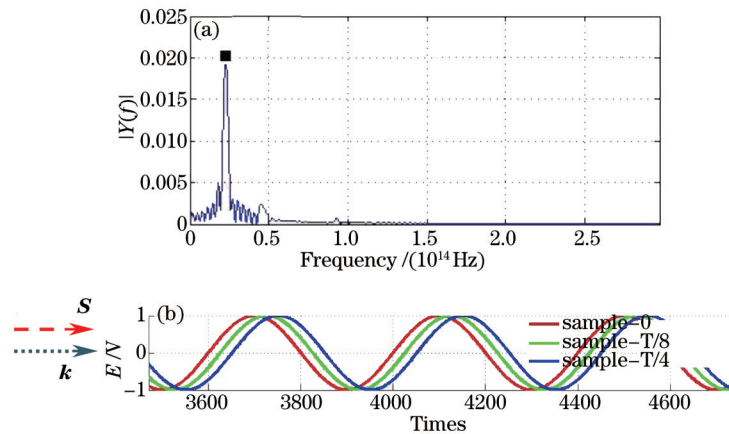


图9 光子晶体内(a)空间频谱(b) 2.269×10^{13} Hz 不同时刻的光场相位分布

Fig.9 (a) Spatial frequency spectrum and (b) phase distributions at different moments of 2.269×10^{13} Hz

通过对不同结构的二维光子晶体进行模拟发现,发生正折射的光子晶体内部只存在一个主峰值,对应的等效折射率恒为正数。且在正常折射的光子晶体中,能量和波矢量都是向前传播的, E 、 H 和 k 满足的右手正交系,坡印廷矢量 S 的方向和波矢 k 的方向相同。

4.2 光在二维光子晶体中负折射现象的研究

通过第2节的分析可知,当选用TE模的高斯光束作为光源,光波长 $10.6 \mu\text{m}$ 时,标准化频率为 0.4717,光在光子晶体内将发生负折射。在 $dx = 0.1 \mu\text{m}$ 的条件下,测出菱形单元的等效折射率为 0.5。采集入射端到出射端的空间电场并对其做傅里叶变换。在得到的空间频谱中可以发现有两个主峰值分别为 1.446×10^{13} Hz 和 5.471×10^{13} Hz,如图 10(a)所示。计算得两个主峰值对应等效折射率的绝对值分别为 0.51 和 1.94,画出两者的传播曲线图 10(b)、10(c)。

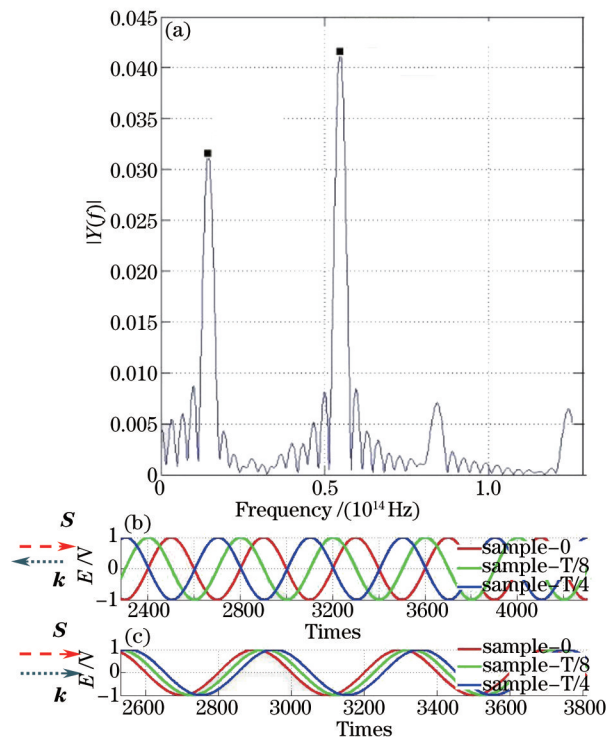


图 10 (a) 空间频谱,(b) 频率为 1.446×10^{13} Hz 不同时刻的光场的相位分布以及(c) 5.471×10^{13} Hz 不同时刻的光场的相位分布

Fig.10 (a) Spatial frequency spectra, (b) phase distributions at different moments of 1.446×10^{13} Hz and

(c) phase distributions at different moments of 5.471×10^{13} Hz

图 10(b)画出了频率 1.446×10^{13} Hz 滤波后的电场分布。图中红线表示的是某一时刻高斯光束在传播方向上的电场分布,蓝线和绿线分别为红线之后 1/8 时间周期和 1/4 时间周期后电场的分布,可见等相位面是反向传播的,该频率对应的等效折射率为负数,应为 -0.51 ;图 10(c)则是频率 5.471×10^{13} Hz 滤波后的电场分布,根据图 10(c)可知等相位面是正向传播的,该频率对应的等效折射率为正数,为 1.94 。

通过对负折射光子晶体内部相位传播方向的研究,可以发现:在负折射的光子晶体中,能量传播是正向的,但光子晶体内部可能存在多个不同频率的波,不发生负折射的频率的波其波矢 \mathbf{k} 的方向是正向的,发生负折射的频率的波, \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 和 \mathbf{k} 成左手正交系,坡印廷矢量 \mathbf{S} 的方向和波矢 \mathbf{k} 的方向相反。

5 结 论

本次模拟研究了 TE 模在二维光子晶体中的传播特性,对模拟得到的光场作傅里叶频谱分析。通过相邻网格的时间步长求得等效折射率,对于光子晶体,无论其是否有负折射现象,通过此方法求得的整体等效折射率恒为正。对时域电场数据做 FFT 得到其空间频谱,对应各个主空间频率的折射率的绝对值可以由频率间关系求得。通过分析电场空间各个频谱成分的相位,得到等效折射率与光场的空间频谱和相位之间的规律:在二维光子晶体中,正折射光子晶体只存在一个主空间频率,对应的相速度与传播方向相同,等效折射率恒为正;负折射光子晶体存在两个主空间频率,空间频率小的波对应的相速度与传播方向相反,即此波长对应的等效折射率为负数,空间频率大的波对应的相速度与传播方向相同,对应的等效折射率为正。该发现将为探究光与物质相互作用的机理提供新的思路。

参 考 文 献

- 1 Yablonovitch 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 superlattices[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 3 Kosaka H, Kawashima T, Tomita A, *et al.*. Superprism phenomena in photonic crystals[J]. Phys Rev B, 1998, 58(16): 10096-10099.
- 4 Chen J B, Wang Y, Jia B H, *et al.*. Observation of the inverse Doppler effect in negative-index materials at optical frequencies[J]. Nature Photonics, 2011, 5(4): 239-245.
- 5 Vlasov Y A, O'Boyle M, Hamann H F, *et al.*. Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides[J]. Nature, 2005, 438(7064): 65-69.
- 6 Kosaka H, Kawashima T, Tomita A, *et al.*. Self-collimating phenomena in photonic crystals[J]. Appl Phys Lett, 1999, 74(9): 1212-1214.
- 7 Luo C, Ibanescu M, Johnson S G, *et al.*. Cerenkov radiation in photonic crystal[J]. Science, 2003, 299(5605): 368-371.
- 8 Luo C, Johnson S G, Joannopoulos J D, *et al.*. All-angle negative refraction without negative effective index[J]. Phys Rev B, 2002, 65(20): 201104.
- 9 Qiu M, Xiao S H. Optical microcavity based on zero-group-velocity surface modes in photonic crystals[C]. SPIE, 2005, 6020: 602019.
- 10 Ao Ling, Feng Shuai, Wang Yiquan. Adjusting guiding mode region of elliptical dielectric cylinder photonic crystals[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(3): 032301.
敖玲,冯帅,王义全.椭圆介质柱光子晶体导模区域的调控[J].激光与光电子学进展,2011,48(3):032301.
- 11 Wang Xianwang, Zhang Wei, Zhang Liang, *et al.*. Research progress of fabrication of chalcogenide glass photonic crystal waveguide[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 120001.
王贤旺,张巍,章亮,等.硫系玻璃光子晶体光波导的制备研究进展[J].激光与光电子学进展,2013,50(12):120001.
- 12 Zhang Liang, Zhang Wei, Nie Qihua, *et al.*. Research progress of two-dimensional photonic crystal waveguides[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030008.
章亮,张巍,聂秋华,等.二维光子晶体波导研究进展[J].激光与光电子学进展,2013,50(3):030008.
- 13 Fan S H, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, *et al.*. High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals[J]. Phys Rev Lett, 1997, 78(17): 3294-3297.
- 14 Sun G L, Kirk A G. On the relationship between Bloch modes and phase-related refractive index of photonic crystals[J].

- Opt Express, 2007, 15(20): 13149–13154.
- 15 Dai Qiaofeng. Negative Goos-Hnchen shifts of two-dimensional photonic crystal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(7): 071301.
戴峭峰. 二维光子晶体的负古斯汉森位移[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(7): 071301.
- 16 Hu Jinbing, Chen Jiabi, Liang Binming, *et al.*. One-dimensional negative-index photonic crystal based on positive-index materials[J]. Applied Laser, 2012, 32(1): 65–69.
胡金兵, 陈家璧, 梁斌明, 等. 基于正折射率材料的一维负折射率光子晶体[J]. 应用激光, 2012, 32(1): 65–69.
- 17 Zhou Fei, Fei Hongming, Chen Zhihui, *et al.*. A high efficiency photonic crystal polarization beam splitter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 062304.
周 飞, 费宏明, 陈智辉, 等. 一种高效光子晶体偏振光分束器[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 062304.
- 18 Zhao Nianshun, Guan Junming. Analysis of transmission characteristics in photonic crystal point defects based on numerical simulation technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 042302.
赵年顺, 官骏鸣. 基于数值模拟技术的光子晶体点缺陷透射特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 042302.
- 19 Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1966, 14(3): 302–307.

栏目编辑: 张浩佳