

波状结构二维光子晶体的自准直特性 及亚波长成像的研究*

厉以宇[†] 顾培夫 李明宇 张锦龙 刘旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2005 年 9 月 15 日收到 2005 年 11 月 4 日收到修改稿)

利用平面波展开方法计算了波状结构二维光子晶体(2DPC)的等频面,对等频面内矩形轮廓的等频线进行研究,提出了波状结构 2DPC 的自准直特性,运用时域有限差分(FDTD)方法模拟了波状结构 2DPC 在不同入射角情况下对所入射高斯光束的自准直作用.将波状结构 2DPC 的自准直特性运用到近场亚波长成像,模拟了波状结构 2DPC 的自准直亚波长成像效果,单光源的成像分辨率达到 0.28λ ,且随着光源逐渐远离近场范围而降低.

关键词:光子晶体,自准直,等频面,亚波长成像

PACC: 7820, 0340K

1. 引 言

光子晶体(PC)具有强色散和各向异性等特异性质,这是由其复杂的能带结构所决定的.利用这些性质能够解释光子晶体超棱镜^[1]、超折射^[2]、负折射^[3]以及自准直^[4]等现象.假定以高斯光束入射 PC,自准直效应意味着原先在空间发散的光束到了 PC 内部成为平行光,发散角受到抑制. Chigrin 等^[5]研究了由圆形介质柱按方形栅格结构周期排布的二维光子晶体(2DPC)的自准直现象.随后 Chen 等^[6]提出了在 PC 内部对自准直光束进行 90° 偏折的方法.此外, Li 等^[7]指出利用 PC 的自准直特性和近场散射效应可以实现高质量的近场成像.这方面的实验首先由 Belov 等^[8]完成,但仅限于微波波段.2DPC 自准直成像是将光源发出的几乎所有的空间谱分量在 PC 内部转变成群速度相同的传播本征模,这些本征模将光源的近场电场分布(包含了亚波长的细节)完好地从 PC 的前端面传递到后端面,并在后端面的近场范围内重现光源的电场分布.

利用 PC 实现自准直的关键是获得平坦的等频线.在某些频率段,波状结构 2DPC 的等频线外轮廓

近似为矩形,与其第一布里渊区的几何外形相似,所以在很宽的波矢方向范围内,等频线上存在四段平坦的区域,即等频线的曲率趋近于零.利用等频线的这种特性,本文研究了波状结构 2DPC 在红外波段的自准直现象,并在此基础上分析了波状结构 2DPC 的自准直亚波长成像能力.

2. 等频面分析

波状结构 2DPC 由 Si($n_1 = 3.5$)和 SiO_2 ($n_2 = 1.5$)两种介质材料构成,可以用溅射技术在预先设计好的光栅基板上通过镀制多层膜来实现^[9].波状结构 2DPC 的结构图如图 1 所示,在 XZ 平面内呈周期排布,采用方形栅格结构,即 X 方向的光栅周期 L_x 和 Z 方向的膜层周期 L_z 与栅格常数 a 相等, a 取 $0.44\mu\text{m}$,单层 Si 的厚度 T 取 $0.14\mu\text{m}$, SiO_2 的单层厚度为 $0.3\mu\text{m}$,波状结构的倾角 θ 取 45° .

利用平面波展开方法^[10,11]计算的 TM 模(电场方向沿 Y 轴)的等频面如图 2 所示,布里渊区内的 ΓX 和 $\Gamma X'$ 两个波矢方向分别对应实空间的 Z 轴和 X 轴方向.随着频率的升高,第一布里渊区内的等频线以 Γ 点为中心逐渐收缩,并在 Γ 点达到极大值.

* 国家自然科学基金(批准号:60478038)资助的课题.

[†] E-mail: liiyiyuu@263.net

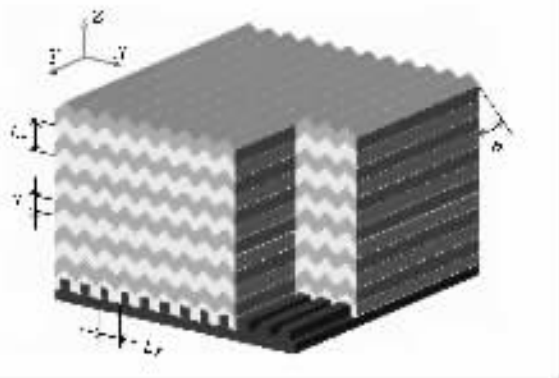


图1 波状结构2DPC的结构示意图

同时,等频线的外轮廓也在逐渐发生变化,从四边内凹的枕形逐渐演变到四边外凸的桶形结构.在整个变化过程中存在一段过渡频率 $\Omega = a/\lambda = 0.285\text{—}0.295$,该频率段内的等频线接近理想的矩形.

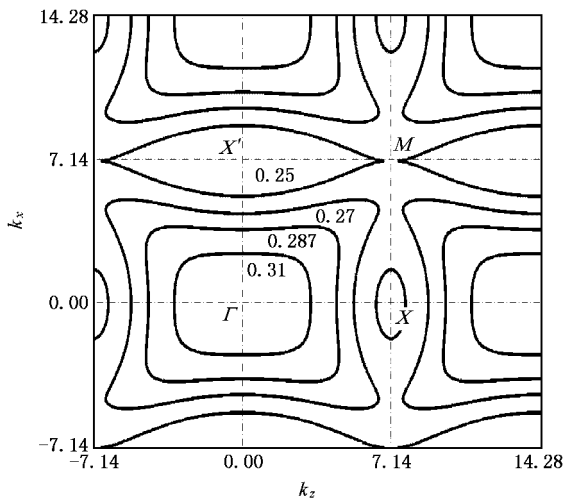


图2 波状结构2DPC的等频面图

波长 $\lambda_0 = 1533\text{nm}$ 对应于归一化频率为 $\Omega = a/\lambda = 0.287$.将该频率的等频线重绘于图3,同时绘出以 $|k_i| = 2\pi/\lambda_0$ 为半径以 Γ 点为圆心的空气中的圆形等频线.以图1中 YZ 平面内空气与PC的界面作为光波的入射界面,界面的法线沿 $\Gamma X'$ 方向.在该界面上依据波矢切向分量连续的原则,得到光波在PC内部传播时的波矢方向 k_j .波矢 k_j 所对应的群速度由等频线的梯度表示,即 $v_g = \nabla_{\mathbf{k}}[\omega(\mathbf{k})]$.由于归一化频率在0.287附近的等频线均为矩形,所以群速度的方向基本上与 $\Gamma X'$ 保持平行.此外,在 ΓX 方向上矩形等频线的尺寸超过了圆形等频线的半径,所以,即使在大角度入射的情况下,波状结

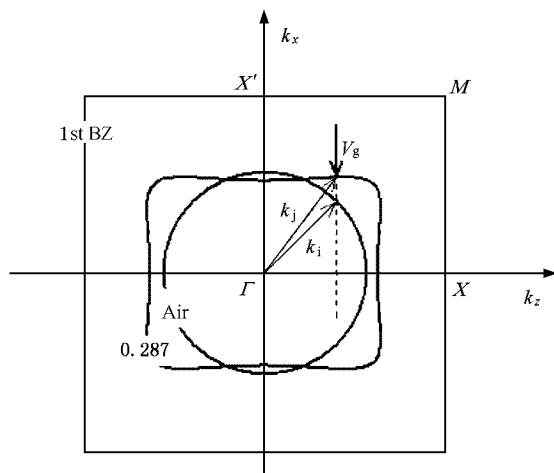


图3 波状结构2DPC的等频线与空气中等频线的对应关系,归一化频率 $\Omega = a/\lambda = 0.287$

构2DPC都能对波长1533nm的入射光起到自准直作用.

3. 自准直现象模拟

利用时域有限差分(FDTD)方法对有限周期的波状结构2DPC进行光束自准直传播的模拟.波状结构在 Z 轴方向取16个周期, X 轴方向取20个周期.入射光所采用的高斯光束包含了从负无穷到正无穷的所有角谱分量^[12],高斯光束束腰为 $0.9\lambda_0$.图4(b)给出了高斯光束在波状结构2DPC作用下的光强分布情况,光强由电场的模平方表示^[13],高斯光束束腰位于 $X/a = Z/a = 0$,自准直现象显而易见.而图4(a)所示在空气中传播的情况,高斯光束发散得相当严重.

图5中的点线代表图4(a)中 $X/a = 25$ 的横截面上的光强分布,虚线和实线分别代表图4(b)中 $X/a = 4.7$ 对应于入射光束)和 $X/a = 25$ 对应于出射光束)的横截面上的光强分布情况.图5充分说明高斯光束在穿越PC之后,出射光束与入射光束在光强分布上基本保持一致,峰值能量的透过率约为85%,波状结构2DPC起到了良好的自准直作用.图6(a)和(b)分别给出了 20° 和 40° 入射角情况下的自准直效果,出射光束的方向与入射光束保持平行.倾斜入射的效果与垂直入射相比较,最大的差别是在入射界面上出现了较大的反射,并且,随着入射角的增大反射明显增强.如果采用Toshihiko等^[14]提出的端面投影方法对入射端面进行处理,能够极大地减

少反射并增强透射.

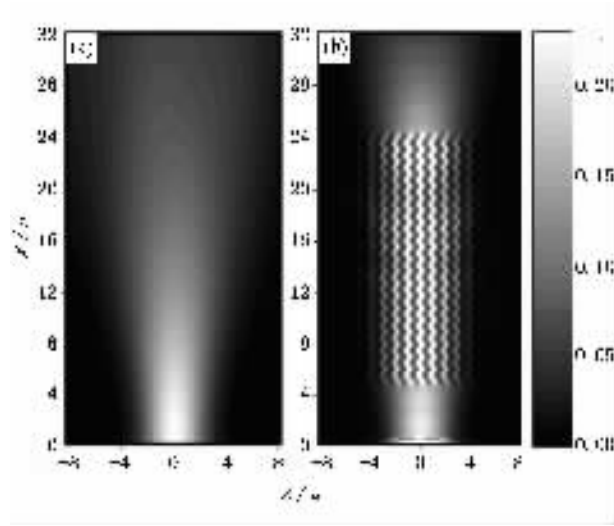


图 4 FDTD 方法模拟的光强分布情况.(a)空气中发散的高斯光束 (b)高斯光束 0°角入射波状结构 2DPC 的情况

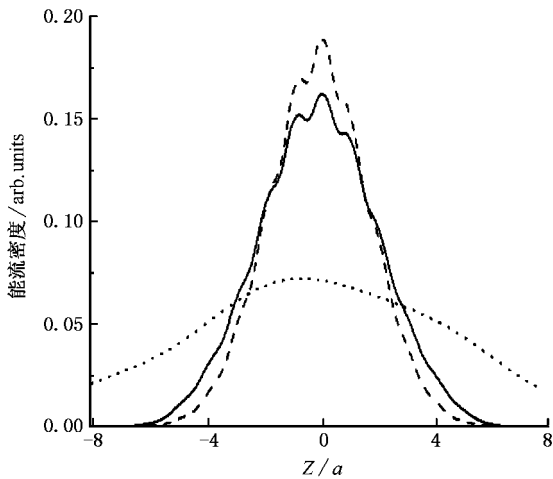


图 5 不同横截面上的光强分布

4. 成像模拟

不同于 Luo 等^[15]提出的 2DPC 负折射成像理论, 2DPC 的自准直成像是将入射光中所有的传播模和部分倏逝模分量转变为 PC 内部准直的传播模, 因而在像面上能够再现亚波长的细节. 采用 FDTD 方法模拟的波状结构 2DPC 自准直成像如图 7, 波长仍然选用 $\lambda_0 = 1533\text{nm}$. PC 在 X 轴方向的厚度取 $2a$ 相当于 $0.57\lambda_0$, Z 轴方向的长度取 $37a$, 网格划分的尺寸为 $20\text{nm} \times 20\text{nm}$. 点光源位于 $X/a = 8.41$, $Z/a = 18.45$, 距离 PC 前端面 $0.68a$, 属于近场范围.

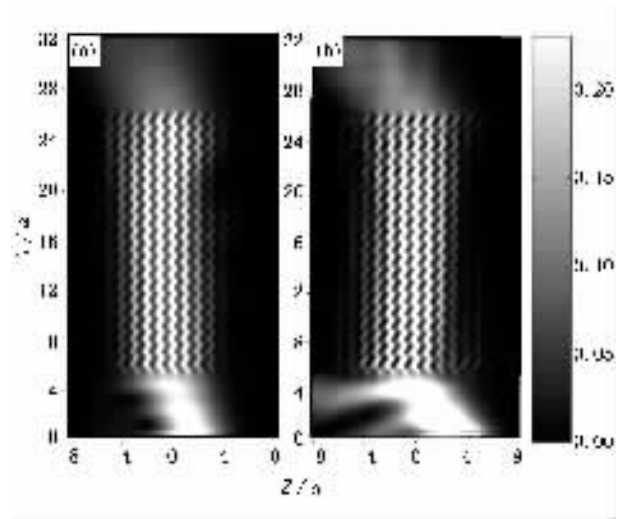


图 6 FDTD 方法模拟的光强分布.(a)高斯光束 20°角入射波状结构 2DPC (b)高斯光束 40°角入射

图 7 展示的是电场实部的数值, 电场基本上以 PC 为中心线上下对称分布, 说明在自准直作用下在 PC 的出射端面形成了一个较为完善的点像. 为了更加细致地说明 PC 的自准直成像效果, 将 PC 在 Z 轴方向的长度减小到 $10a$, 厚度保持不变, 同时将网格划分的尺寸缩小到 $5\text{nm} \times 5\text{nm}$. 模拟结构如图 8, 光源到 PC 前端面的距离与图 7 相同, 像点到出射端面的距离约为 $0.61a$, 所以光源和像点均处于近场范围内.

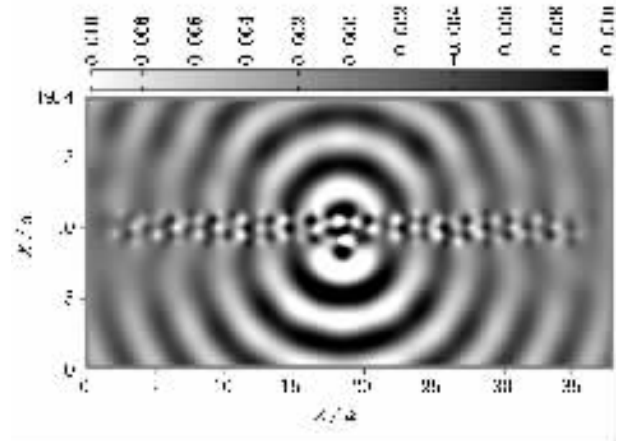


图 7 点光源的自准直成像

事实上, 利用 2DPC 的自准直特性只能实现近场的亚波长成像, 当光源逐渐远离近场向远场移动时, 像点会逐渐模糊, 最终无法分辨, 这是 PC 自准直成像与 PC 负折射成像的主要区别之一^[16]. 图 9 给出了当点光源距离 PC 前端面分别为 $0.68a$, $0.79a$ 和 $0.90a$ 时沿 Z 方向的像面上的归一化光强

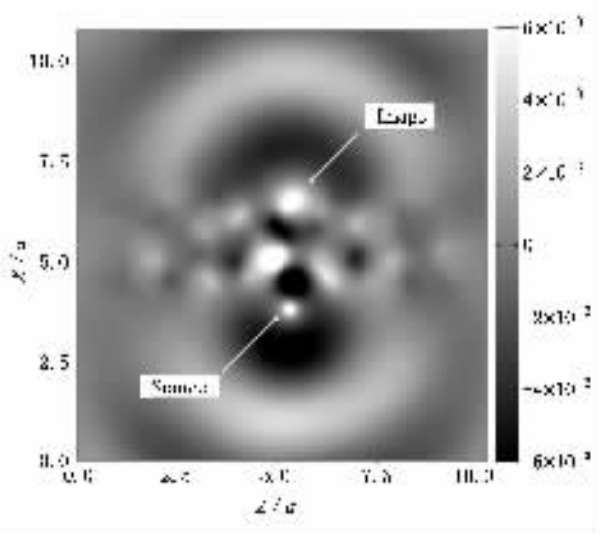


图8 点光源自准直成像的放大显示

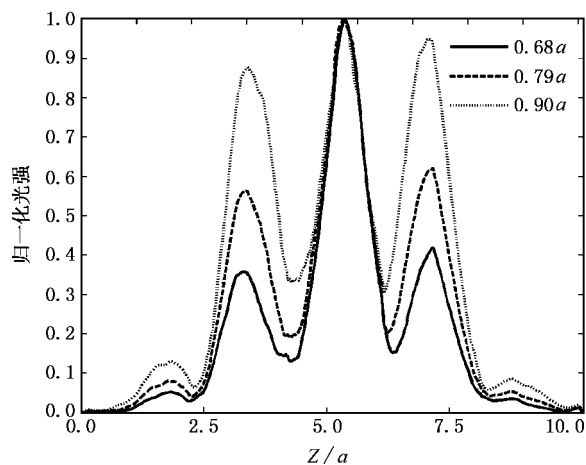


图9 改变光源的距离在像面上得到的光强分布

分布.当距离为 $0.68a$ 时,像点最为清晰,半峰全宽(FWHM)为 $0.98a$,即 $0.28\lambda_0$,达到亚波长成像分辨率.随着光源距离的增大,PC 前端面接收到的是一个面积逐渐扩大的亮斑,因而次峰的峰值随之上升,最终像点将会淹没在周围的次峰当中,所以必须将光源放置在近场范围内.同时我们发现当光源距离改变时自准直成像的像点到 PC 出射端面的距离基本保持不变,而在 PC 负折射成像中像点的距离是随光源距离的变化而改变的.

5. 结 论

利用波状结构 2DPC 可以实现宽光束大角度的自准直效应.这种新的自准直效应在光子集成器件中具有诱人的应用前景.严格地讲,等频面分析的前提是要求 PC 依照栅格周期无限排布,但文中用于 FDTD 模拟的模型都是采用有限周期的 PC 结构,同样取得了较为理想的效果,说明当周期数达到一定程度时,有限周期结构也能体现出无限周期结构所具有的特性.利用波状结构 2DPC 的自准直特性可以实现自准直亚波长成像,但要求光源尽可能地靠近 PC,在远场情况下自准直亚波长成像是无法实现的.此外,自准直成像中光源距离的变化不会对像距产生影响,像点的位置总是被限制在与光源异侧的近场范围内.

[1] Kosaka H , Kawashima T , Tomita A *et al* 1998 *Phys. Rev. B* **58** 10096
 [2] Gralak B , Enoch S , Tayeb G 2000 *J. Opt. Soc. Am. A* **17** 1012
 [3] Luo C Y , Johnson S G , Joannopoulos J D , Pendry J B 2002 *Phys. Rev. B* **65** 201104
 [4] Kosaka H , Kawashima T , Tomita A *et al* 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1212
 [5] Chigrin D N , Enoch S , Tayeb G 2003 *Opt. Express* **11** 1203
 [6] Chen C H , Sharkawy A , Pustai D M *et al* 2003 *Opt. Express* **11** 3153
 [7] Li Z Y , Lin L L 2003 *Phys. Rev. B* **68** 245110
 [8] Belov P A , Simovski C R , Ikonen P 2005 *Phys. Rev. B* **71** 193105
 [9] Kawakami S , Kawashima T , Sato T 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 463

[10] Dong H Y , Liu M , Wu Z H *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3194 (in Chinese) [董慧媛、刘 楣、吴宗汉等 2005 物理学报 **54** 3194]
 [11] Che M , Zhou Y S , Wand F H , Gu B Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4770 (in Chinese) [车 明、周云松、王福合、顾本源 2005 物理学报 **54** 4770]
 [12] Kong J A , Wu B L , Zhang Y 2002 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **33** 136
 [13] Kuo C H , Ye Z 2004 *Phys. Rev. E* **70** 056608
 [14] Toshihiko B , Daisuke O 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** 5920
 [15] Luo C Y , Johnson S G , Joannopoulos J D , Pendry J B 2003 *Opt. Express* **11** 746
 [16] Zhang X D 2005 *Phys. Rev. E* **71** 037601

Self-collimation and subwavelength lensing in wavy two-dimensional photonic crystals^{*}

Li Yi-Yu[†] Gu Pei-Fu Li Ming-Yu Zhang Jin-Long Liu Xu

(*State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

(Received 15 September 2005; revised manuscript received 4 November 2005)

Abstract

The equal-frequency surface of wavy two-dimensional (2D) photonic crystals (PC) is obtained by virtue of plane wave expansion method. From the equal-frequency surface, we find a iso-frequency contour of rectangular form. A flat dispersion relation exists at this frequency, which is suitable for the self-collimation. The finite-difference time-domain (FDTD) method is used to simulate the self-collimation in wavy 2DPC on which a Gaussian beam is incident at different angles. Subwavelength lensing by self-collimation is also available in wavy 2DPC. The resolution of 0.28λ is achieved when single source is employed in simulation. The resolution will gradually degrade as the source moves beyond the near-field domain.

Keywords : photonic crystal, self-collimation, equal frequency surface, subwavelength lensing

PACC : 7820, 0340K

^{*} Project supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant No. 60478038).

[†] E-mail : liiyiyuu@263.net