

# 波状结构二维光子晶体负折射现象的研究\*

厉以宇<sup>†</sup> 顾培夫 张锦龙 李明宇 刘 旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2006 年 3 月 1 日收到, 2006 年 3 月 27 日收到修改稿)

结合波状结构二维(2D)光子晶体(PC)与入射介质两者的等频面结构分析了 PC 内部的负折射现象, 采用时域有限差分(FDTD)方法模拟了高斯光束在波状结构 2DPC 内的负折射, 分别得到了折射角/入射角以及折射角/入射波长之间的关系曲线, 当入射角为  $45^\circ$ , 入射波段在 1485—1530nm 区域时, 波状结构 2DPC 的负折射角与入射波长近似呈线性变化关系, 并带有明显的 PC 超棱镜效应, 采用端面投影方法对波状结构 2DPC 的入射端面和出射端面进行处理, 改善了负折射时的透过率.

关键词: 光子晶体, 负折射, 等频面

PACC: 7820, 0340K

## 1. 引 言

早在 1968 年, Veselago<sup>[1]</sup> 提出了左手旋(left handed)的概念, 讨论了可能存在的左手物质(left handed materials)的一些物理性质. 左手物质的特征就是介电常数和磁导率同为负数造成折射率亦为负, 由此引发负折射. 直到 2000 年 Pendry<sup>[2]</sup> 指出理想的左手物质可用来制作完美透镜实现超分辨后, 人们开始对左手物质及密切相关的负折射进行研究和广泛的研究<sup>[3]</sup>, 结果发现由介质材料构成的光子晶体(PC)结构也能实现类似的反常折射<sup>[4,5]</sup>. 与左手物质不同, PC 负折射是基于布拉格散射效应, 不需要引入负折射率材料就能实现负折射成像<sup>[6]</sup>. Cubukcu 等人<sup>[7]</sup> 利用二维(2D)PC 实现了射频波段的负折射以及负折射亚波长成像, 随后 Berrier 等人<sup>[8]</sup> 用实验验证了 2DPC 在红外波段的负折射能力.

本文主要研究波状结构 2DPC 在红外波段的负折射现象, 但不涉及负折射成像, 讨论了负折射与入射光波长以及入射角之间的关系, 针对波状结构 2DPC 在大角度负折射情况下透过率偏低的问题提出了较为可行的解决方法.

## 2. 结构分析

波状结构 2DPC 的特点是构成 PC 的介质材料在某一方向具有连续性, 见图 1, 而常见的 2DPC 一般由相互分离的散射体构成, 如由圆形介质柱按方形或三角形栅格结构排列而成的 PC<sup>[9]</sup>. 材料的连续性削弱了波状结构 2DPC 的对称性, 并将 PC 的入射端面限制在  $TX'$  和  $TX$  两个相互正交的方向, 即实空间的  $X$  轴和  $Z$  轴方向. 图 1 中的浅色和深色区域分别代表 Si 和  $SiO_2$  膜层,  $T$  代表 Si 的厚度,  $\theta$  是指波状结构的倾角. 采用方形栅格结构  $L_x = L_z = a$ ,  $a$  为栅格常数, 当  $a = 0.44\mu\text{m}$ ,  $T = 0.14\mu\text{m}$ ,  $\theta = 45^\circ$  时, 利用平面波展开算法计算得到的 TM 模(电场方向沿  $Y$  轴)的能带结构如图 2 所示. 第一条能带中  $M$  点的频率最高, 等频面将以  $M$  点为中心随频率升高而收缩, 具备了实现负折射的必要条件, 但并不充分, 因为它要求 PC 的入射端面偏离  $TX'$  和  $TX$  两个方向, 这对于波状结构 2DPC 是不可行的, 因而只能选用第二条能带.

将 TM 模的第二条能带投影到第一布里渊区内得到波状结构 2DPC 的等频面结构, 如图 3 所示, 归一化频率选择从 0.25 到 0.316, 随着频率上升等频面以  $\Gamma$  点为中心逐渐收缩, 形状近似矩形. 在 PC

\* 国家基础研究基金(批准号 2004CB19803)和国家自然科学基金(批准号 60478038)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: liiyiyuu@263.net

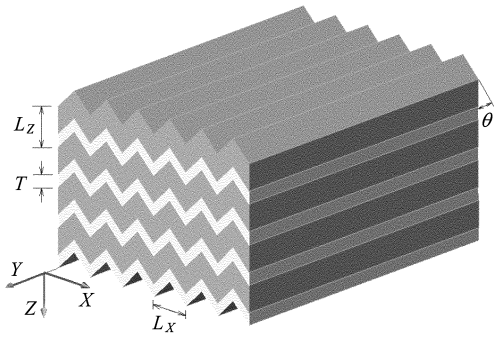


图1 波状结构 2DPC 的结构图

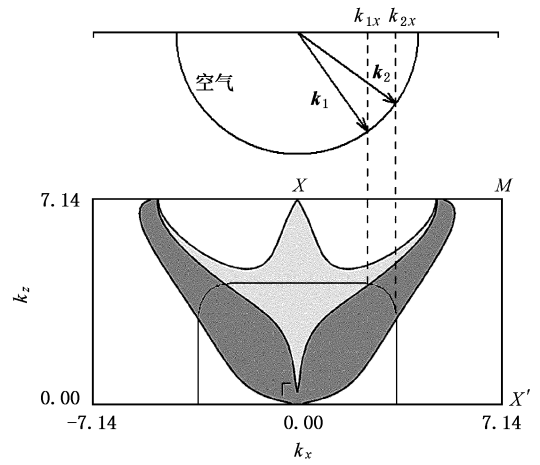


图4 波状结构 2DPC 与空气的等频线对应关系(归一化频率取  $\Omega = a/\lambda = 0.293$ )

内就能产生负折射,如果落在浅灰色区域则会出现自准直现象,自准直是指群速度的方向平行于入射界面的法线方向<sup>[10]</sup>。由图3可以看出,频率越高即波长越小,PC的等频面越小,越容易在小角度入射时产生负折射。

考虑到入射介质的等频面大小以及入射波矢的方向,图3的负折射区域很可能是部分有效。图4单独给出了归一化频率为  $\Omega = a/\lambda = 0.293$ ,对应波长  $\lambda = 1500\text{nm}$  的波状结构 2DPC 和入射介质空气的等频面。PC 矩形等频面的圆角边处在负折射区域。在入射界面上依据波矢切向分量连续的原则能够找到与该圆角边对应的入射波矢范围在  $k_1$  到  $k_2$  之间,相应的入射角变化范围约为  $34^\circ\text{--}53^\circ$ ,  $k_{1x}$  和  $k_{2x}$  分别表示  $k_1$  和  $k_2$  的切向分量。如果将归一化频率降到 0.272,PC 的等频面会明显增大,同时入射介质的圆形等频面将缩小,两者严重失配会造成 PC 的负折射区域超出入射介质圆形等频面的范围,负折射就无法实现。

### 3. 负折射模拟

利用时域有限差分(FDTD)方法模拟波状结构 2DPC 的负折射现象。图5(a)和(b)分别给出了高斯光束以  $35^\circ$  和  $50^\circ$  角入射波状结构 2DPC 的光强分布,入射面法线沿  $TX$  方向,高斯光束由 PC 下方入射,光源位于  $X/a = 21, Z/a = 56$ ,入射光波长为  $1500\text{nm}$ ,束腰设为波长的三倍。 $50^\circ$  入射时的负折射现象尤为明显。由于受界面反射以及表面散射和体

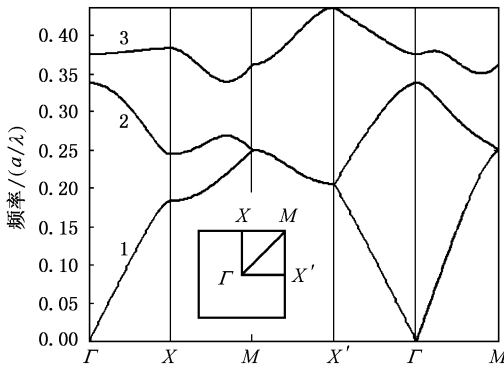


图2 波状结构 2DPC 的 TM 模能带结构

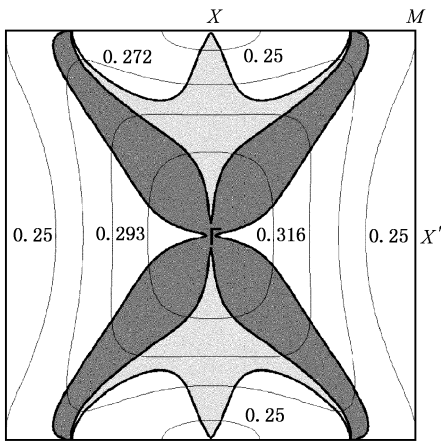


图3 波状结构 2DPC 的等频面图,  $\Gamma, X, X'$  和  $M$  分别表示第一布里渊区内的特征点

内部群速度  $V_g$  的方向由等频面梯度方向来确定,负折射由  $V_g \cdot k_{ix} < 0$  来判断,  $k_{ix}$  指入射波矢的切向分量,据此,在暂时不考虑入射介质等频面大小的情况下,图3绘出了波状结构 2DPC 等频面内的负折射区域(深灰色区域),此时入射端面的法线沿  $TX$  方向。在 PC 内部只要波矢的终点落在深灰色区域

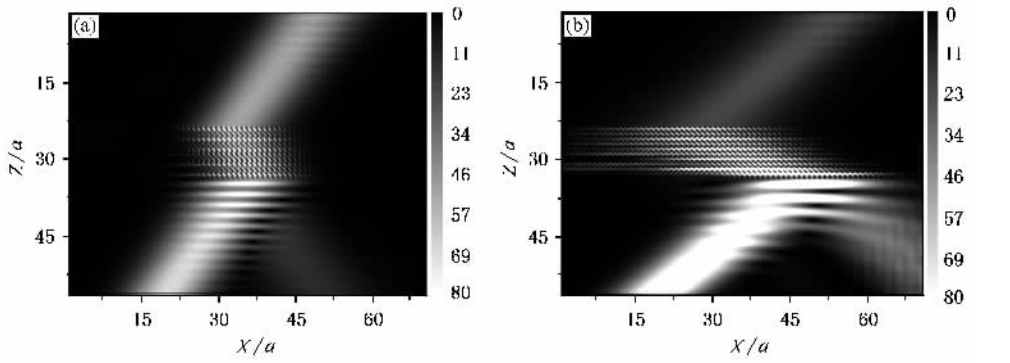


图5 FDTD方法模拟的波状结构2DPC的TM模负折射光强分布 (a)入射角为35°;(b)入射角为50°

内散射的影响,波状结构2DPC的透过率不会很高,特别是在大角度入射时透过率会更低,这一点可以从图5(a)和(b)的比较中明显看出来。

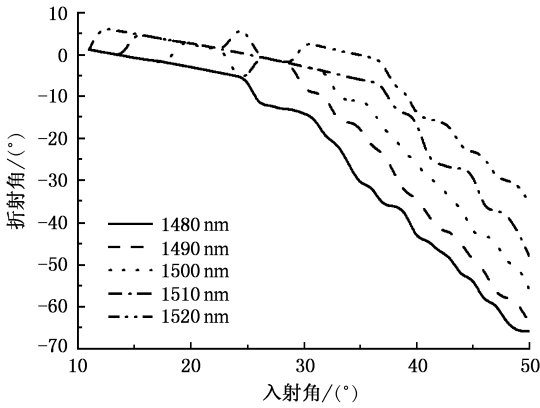


图6 波状结构2DPC的入射角与折射角对应关系

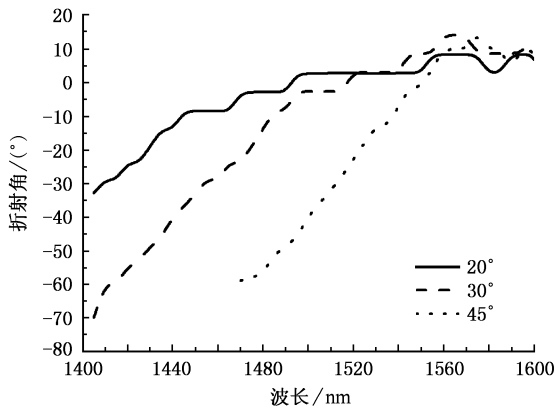


图7 波状结构2DPC的波长与折射角对应关系

图6给出经FDTD模拟计算得到的波状结构2DPC的入射角与折射角对应关系。1480nm的入射光以25°入射时就能出现明显的负折射,而1510nm

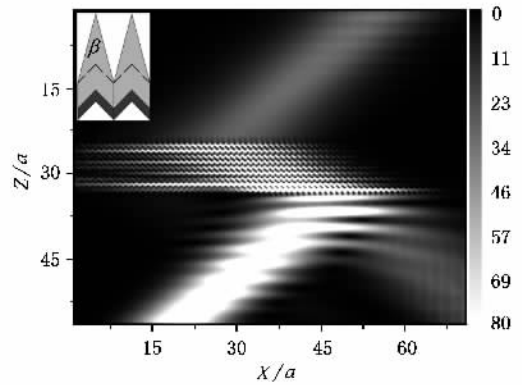


图8 端面顶角β为44°时,高斯光束50°角入射波状结构2DPC的光强分布

的入射光要求入射角达到35°以上,可见波长越短发生负折射的起始入射角就越小,这与图3的分析结果相符。1500nm的入射光在入射角超过32°时开始出现明显的负折射现象,这也与图4的结论相接近。所以,上文中利用PC的等频面来定性分析光波在PC内部的传播是可行的。当入射角小于20°时,受自准直作用的影响,同一入射角下各波长的折射角之间相差不大。图7则给出了在给定入射角情况下入射波长与折射角的关系曲线。20°角入射时,波长1405—1490nm处在负折射区域,1495—1550nm属于自准直区域。随着入射角的增大,负折射波段向长波延伸,自准直波段则在缩减。入射角为45°时,1485—1530nm波段的波长与负折射角近似成线性变化关系,角度色散达到0.88(°)/nm,优于Wu等人<sup>[11]</sup>的实验数据,可以实现负折射的超棱镜效应。由于很难通过改变波状结构2DPC的晶面来调节出射光的方向,所以在超棱镜效应的实际应用中为了增大不同波长的出射光在PC出射界面上的间距以利于外置的波导对其进行耦合,必须增加PC的

厚度.

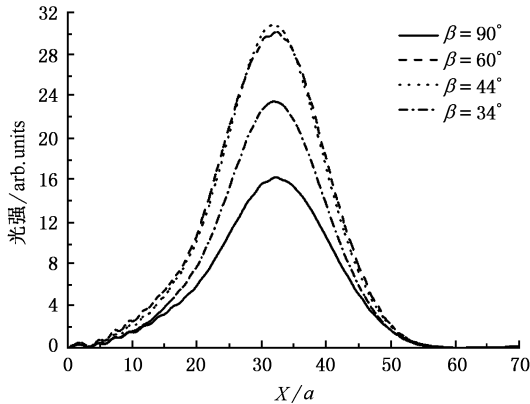


图9 高斯光束 50°角入射 PC 时出射端面的光强分布随  $\beta$  的变化

为了提高波状结构 2DPC 在大角度负折射情况下的透射率,需要对 PC 的入射端面进行处理.常见的端面处理方法有表面截断和改变界面处散射体尺寸<sup>[12,13]</sup>等,但它们不适用于波状结构 2DPC,较为可行的方法是端面投影.端面投影是将波状结构 2DPC 的端面顶角沿法线方向拉伸,增大入射介质与 PC 的接触面积,如图 8 中的插图所示,目的是要在入射介质和 PC 之间引入折射率渐变层,起到减少

反射的作用.图 8 是在图 5(b)的基础上将 PC 上下端面的顶角  $\beta$  由原先的 90°拉伸到 44°后得到的光强分布,出射光强与图 5(b)相比有明显提高.图 9 给出了高斯光束 50°角入射 PC 时在出射端面得到的光强分布随端面顶角  $\beta$  的变化,当  $\beta$  拉伸到 60°时,透射光强基本达到极值,直到 44°都能保持稳定,继续减小到 34°时,透射光强反而下降,说明端面顶角  $\beta$  存在一个中间最优值.

## 4. 结 论

波状结构 2DPC 可以实现红外波段的负折射,这种负折射需要由入射介质和 PC 的等频面大小以及入射光的入射角度三者共同决定.利用等频面可以定性分析光波在 PC 内部的负折射现象,而且分析的结果能与 FDTD 的模拟结果相符合.波状结构 2DPC 在展现其负折射能力的同时也表现出了在 PC 超棱镜方面的潜力,这将是今后的研究方向之一.利用端面投影方法虽然可以提高波状结构 2DPC 在大角度负折射下的透射率,但提升的幅度却很有限,而且该方法并不适用于传统的薄膜制备工艺,所以更加实用的方法还有待进一步研究.

[1] Veselago V G 1964 *Usp. Fiz. Nauk* **92** 517  
 [2] Pendry J P 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966  
 [3] Chen L, He S L, Shen L F 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2386 (in Chinese)[陈龙、何赛灵、沈林放 2003 *物理学报* **52** 2386]  
 [4] Notomi M 2000 *Phys. Rev. B* **62** 10696  
 [5] Luo C Y, Johnson S G, Joannopoulos J D, Pendry J B 2002 *Phys. Rev. B* **65** 201104-1  
 [6] Fend S, Feng Z F, Ren K *et al* 2006 *Chin. Phys.* **15** 552  
 [7] Cubukcu E, Aydin K, Ozbay E *et al* 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 207401-1

[8] Berrier A, Mulot M, Swillo M *et al* 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 073902-1  
 [9] Cai X H, Zheng W H, Mao X T, Ren G, Xia J B 2005 *Chin. Phys.* **14** 2507  
 [10] Chigrin D N, Enoch S, Tayeb G *et al* 2003 *Opt. Express* **11** 1203  
 [11] Wu L J, Mazilu M, Krauss T F 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 561  
 [12] Toshihiko B, Daisuke O 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** 5920  
 [13] Moreno E, Garcia-Vidal F J, Martin-Moreno L 2004 *Phys. Rev. B* **69** 121402



# Analysis of the negative refraction in two-dimensional photonic crystals with wavy structure<sup>\*</sup>

Li Yi-Yu<sup>†</sup> Gu Pei-Fu Zhang Jin-Long Li Ming-Yu Liu Xu

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

(Received 1 March 2006; revised manuscript received 27 March 2006)

## Abstract

The negative refraction phenomenon in wavy two-dimensional (2D) photonic crystals (PC) is investigated with the iso-frequency surfaces of PC and incident medium. The finite-difference time-domain method is used to simulate the negative refraction of incident Gaussian beam with different wavelengths and incident angles. When the incident angle is set at 45 degrees, the linear relation exists between the negative refraction angle and the wavelength within the range from 1485 to 1530nm, which is suitable for the superprism effect. In order to increase the transmission when negative refraction happened at large incident angles, interface projection method is employed.

**Keywords** : photonic crystal, negative refraction, iso-frequency surface

**PACC** : 7820, 0340K

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2004CB19803) and the National Nature Science Foundation of China (Grant No. 60478038).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: liyiyuu@263.net