

# 二维光子晶体中与电磁波偏振态无关的自准直

沈晓鹏<sup>†</sup> 韩 奎 沈义峰 李海鹏 肖正伟 郑 健

(中国矿业大学理学院物理系, 徐州 221008)

(2005 年 8 月 5 日收到, 2005 年 11 月 13 日收到修改稿)

利用有限时域差分法(FDTD)进行数值模拟,在二维光子晶体中实现了电磁波两种偏振态的自准直——全光自准直(full-light-self-collimation).研究表明,通过对光子晶体的结构做适当的调整,可以在较宽频率范围内实现横电波(TE波)和横磁波(TM波)沿着相同方向传播,同时保持较强的能流强度.全光自准直可以显著提高光源利用率和光波导的传播效率,在高密度集成光路中有非常重要的用途.

关键词:光子晶体,偏振,自准直

PACC:4270,4210,4280

## 1. 引 言

光子晶体是 20 世纪 80 年代末提出的新概念和新材料<sup>[1,2]</sup>.这种材料有一个显著的特点,即人们可以利用这种材料来控制光子的运动.光子晶体不仅是与光电集成、光子集成、光通讯、微波通讯、空间光电技术以及国防科技等现代高新技术密切相关的一种新材料,也是为相关学科发展和高新技术突破带来新机遇的关键性基础材料<sup>[3-7]</sup>.近年来,光子晶体中的自准直效应引起了人们的广泛关注<sup>[8-12]</sup>.Kosaka 首先指出:不借助任何非线性效应,在光子晶体中就可以实现与初始光束发散特性无关的准直传播,无需引入光子晶体波导中常用的波导结构,自准直光束就可以克服光束的发散或衍射加宽效应而显示出几乎完全准直的传播特性<sup>[8]</sup>.自从光子晶体中的自准直效应被提出以来,由于可能在高密度的集成光路中发挥重要作用,吸引了大批研究人员进行理论和实验研究.文献[10]对二维光子晶体中 TM 偏振态的自准直效应进行了详细的论述,基于这种效应的光弯折、光分束器在理论和实验上也受到了广泛关注<sup>[11,12]</sup>.可以预言,在未来的高密度集成光路中基于自准直效应的光波导器件将会得到广泛的应用.

众所周知,在二维光子晶体中电磁波可以分解为 TM 波(磁场垂直于介质柱子轴线)和 TE 波(电场

垂直于介质柱子轴线)<sup>[13]</sup>.据我们所知,目前关于自准直的工作都是基于单一偏振模式,即 TE 波或者 TM 波,这无疑增加了光路设计的复杂性,降低了光波导的传递效率.那么能否在同一块光子晶体中同时实现两种偏振态的光束沿着相同的方向传播呢?我们按照这种想法,设计了一种带部分缺陷的二维光子晶体结构,首次实现了与偏振态无关的自准直传播.本文用有限时域差分法(FDTD)<sup>[14]</sup>研究了与偏振无关的自准直传播在二维光子晶体中的场分布,比较了 TE 和 TM 波被调制前后的传播情况,模拟结果表明我们的设计是非常可行而有效的.

## 2. 与偏振态无关的自准直

本文主要研究了二维正方格子排列的圆柱体系,圆柱半径为  $R = 0.5a$ ,折射率  $n = 3$ ,背景为空气.这里,  $a$  为晶格常数,整个结构由  $51 \times 51$  根密排的介质柱子构成,一个连续点源放置在正中间的一个圆柱内.我们用平面波展开法(PWEM)<sup>[15]</sup>计算了 TE 波和 TM 波的能带和等频图,如图 1(a)(b)所示,其中,实线代表 TE 波,虚线代表 TM 波.

图 1(a)中可以看出,两种偏振的第二能带曲线在频率  $f = 0.290(a/\lambda)$  附近基本上是平行的,它们的群速度  $v_g = \nabla_k \omega$  保持相同的传播方向.频率  $f = 0.290(a/\lambda)$  完全落在 TE 偏振的第二能带中,它的等频图是一个规则的圆角正方形,跟正方格子的第

<sup>†</sup> E-mail: xiaopengshen@sohu.com

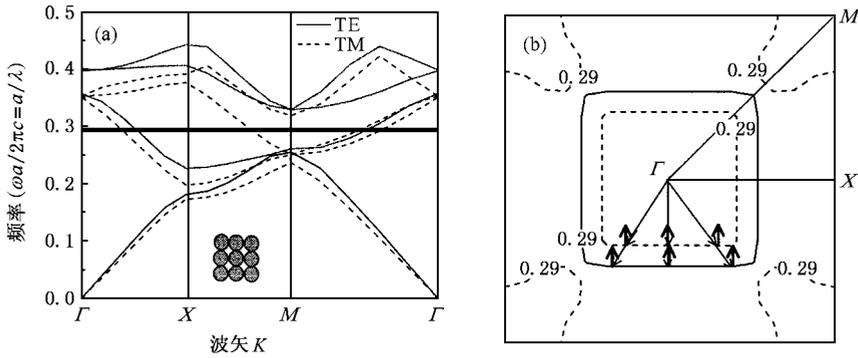


图1 (a)为半径  $R=0.5a$  ,折射率  $n=3$  的介质圆柱构成的二维正方格子光子晶体的能带图.实线代表 TE 波,虚线代表 TM 波,黑线指示为自准直频率区域.(b)为 TE, TM 波在频率  $f=0.290(a/\lambda)$  的等频图.图中向上箭头表示了群速度的方向

一布里渊区有相似的形状.对于波源发出的不同波矢  $\kappa$  的波(除  $\Gamma M$  方向附近外)都具有相同的群速度方向.入射过来的 TE 波的群速度都垂直于等频图曲线,因此波的能量沿着相同的  $[10]$  方向传播,TE 波能保持很好的自准直(self-guiding)特性<sup>[10]</sup>.如图 2(b)所示.但是,对于 TM 波,情况就比较复杂,它的第三能带比较低,频率  $f=0.290(a/\lambda)$  一部分处在第三能带,还有一部分处在第二能带.第二能带中频率为  $f=0.290(a/\lambda)$  的部分在等频图中对应着内部的虚线圆角正方形,保持与 TE 波等频图(外部实线圆角正方形)相同的形状.这是同时实现 TE 波、TM 波的自准直传播的前提.第三能带中频率为  $f=0.290(a/\lambda)$  部分则对应第一布里渊区等频图中四角的弯曲虚线部分.正是由于第三能带的影响,使得能量在  $[10]$  方向传播时逐渐发散,我们可以清晰的从图 2(a)中观察到,在距离波源  $10a$  的地方, TM 波分成了三束:一部分沿着  $[10]$  方向传播,其余的则

偏离了该方向,向两侧传播.显然,这不能实现 TM 波的自准直传播.

在不影响 TE 波自准直的情况下,为了实现与偏振态无关的自准直,应当设法改善 TM 波传播的单向性.为此,我们采取以下两个措施:

- (1)挖掉  $[11]$  方向上邻近点源的四根介质柱子;
- (2)把  $[10]$  方向上与点源最邻近的四根柱子的半径减为  $r=0.3R$ ,其余的部分保持不变.

措施 1 是为了减少能量在  $[11]$  方向的耦合,从而限制波沿此方向的传播;措施 2 选择此半径参数则是经过计算发现,在此条件下沿  $[10]$  方向的耦合效率最高.我们将在第三部分对此予以验证.经过调制之后,我们用 FDTD 模拟了  $f=0.290(a/\lambda)$  下 TE 波和 TM 波在这个带有缺陷的二维光子晶体中的传播.结果如图 3(a)(b)所示.图 3(a)中显示的是 TM 偏振态,图 3(b)中显示的是 TE 偏振态.可以看出,

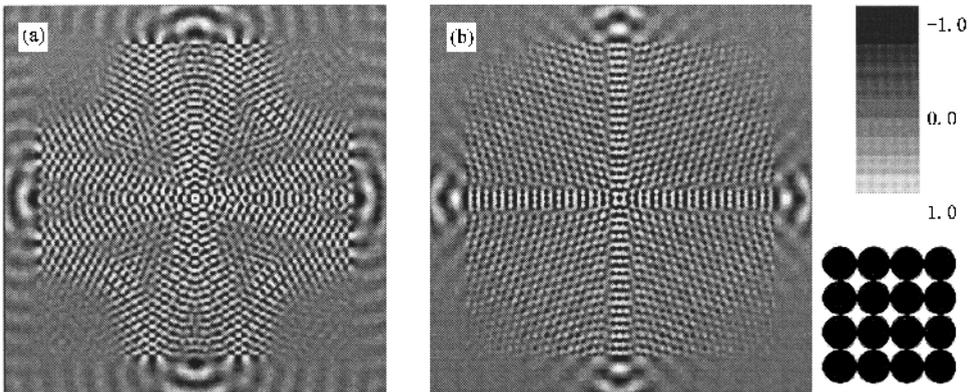


图2 调制前(a)TM波和(b)TE波在晶体中传播时的场分布( $f=0.290(a/\lambda)$ )

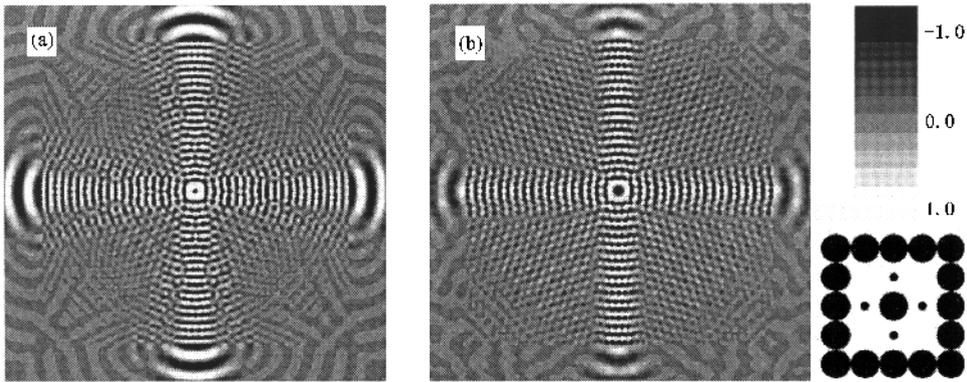


图3 调制后(a)TM波和(b)TE波在晶体中传播时的场分布( $f = 0.29(a/\lambda)$ )

调制后 TM 波发生了很大的变化,能量都被约束在  $[10]$  方向  $4a$  左右的宽度范围内,表现出较好的自准直特性,而 TE 波的自准直特性基本没有受到调制的影响,光束依然沿着  $[10]$  方向自准直传播. FDTD 模拟表明,在  $0.285-0.295(a/\lambda)$  的频率范围内,TE 波和 TM 波也表现出较好的自准直特性.这样我们就在二维光子晶体中同时实现了 TE 波和 TM 波的自准直传播,我们称之为全光自准直(full-light-self-collimation).

### 3. 无偏振依赖性自准直的数值分析

通过分析能带图和等频图我们可以知道,第二能带中  $f = 0.29(a/\lambda)$  附近 TE 波和 TM 波具有相似的等频图,这是它们在光子晶体中能够同时实现自准直传播的主要原因.由于第三能带的影响,使得 TM 波在传播过程中会发生分裂.因此,为了实现与偏振无关的自准直,必须解决的关键问题就是尽量消除第三能带的影响.我们对点源附近的结构作了调整,对于调整后的效果我们可以从下面的数值分

析中得到清晰的认识.

首先我们在  $[10]$  方向上距点源足够远的地方 ( $L = 20a$ ) 放置了一个能量探测器 I,其宽度略大于自准直光束宽度.在  $[11]$  方向 ( $14.14a, 14.14a$ ) 处放置了一个同样的探测器 II.我们检测了调制前后 TE 波和 TM 波在该位置处的能量变化情况,如图 4(a)(b)所示(图中显示强度为同一标准下的约化值).图 4(a)显示的是 TM 波的情况,虚线表示调制前的情况,实线表示调制后的情况,较高的两条表示沿  $[10]$  方向的检测值,较低的两条则分别表示沿  $[11]$  方向的检测值.图 4(b)显示的是 TE 波的情况.对于 TM 波,经过调制后不仅在  $[10]$  方向实现了自准直(图 3(a)中可以清晰的看到这一点),强度也比以前增强了  $[11]$  方向的强度则有稍微的降低,这表明大部分的能量经调制后都约束到  $[10]$  方向上来,从而保证了较好的自准直.对于 TE 波,在  $[11]$  方向强度下降的同时  $[10]$  方向略微减小,这表明调制后 TE 波的耦合强度受到了影响.这种影响主要来自于挖去了  $[11]$  方向四根柱子  $[10]$  方向柱子的变化对 TE 波的影响不是十分明显.

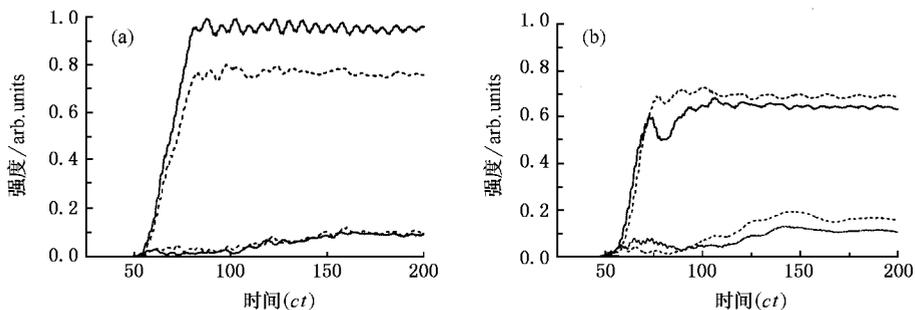


图4 (a)和(b)分别表示 TM 波和 TE 波在介质中传播时距源点  $20a$  处场强随时间的变化.虚线和实线分别为调制前、后的情况.较高的两条沿  $[10]$  方向,较低的两条沿  $[11]$  方向

为了确定  $[10]$  方向的柱子对 TE 波和 TM 波的影响,以便更好的实现 TE 和 TM 无偏振自准直,我们定量测量了  $L = 20a$  处自准直光束强度跟柱子半径的关系.结果如图 5 所示,实线和虚线分别代表 TM 波和 TE 波测量值随半径的变化曲线.从图中可以明显看出, TM 波对半径有很强的依赖性,在  $r = 0.30R$  时自准直光束最强,在  $0.30R$  两侧则迅速

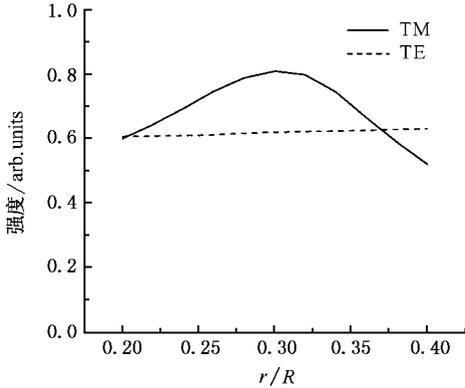


图 5 强度随邻近点源  $[10]$  方向上介质圆柱半径的变化曲线. TE(虚线)模式基本不受半径变化的影响;TM(实线)模式在  $r = 0.3R$  时强度最大,表明在此半径下耦合最强

下降.这正是我们选取  $r = 0.3R$  原因.而 TE 波基本不受半径变化的影响.

通过以上分析,我们就找到了调整光子晶体结构来实现无偏振依赖的自准直的依据,也为今后同时实现 TE 波和 TM 波的全光自准直传播提供了一种思路.

## 4. 结 论

通过理论分析和 FDTD 数值模拟,我们详细地研究了二维光子晶体中 TE 和 TM 两种偏振模式的自准直行为.通过适当调整点源附近的晶格结构,可以实现晶体中与偏振无依赖性的自准直,此种现象可以有效提高光源的利用率和光波导的传播效率.通过引入某种缺陷,可以实现全光自准直这样一种思路,也可以用在光弯折、光分束器设计中,以实现全光弯折和全光分束器.这在高密度集成光路中可能发挥很大的作用.

感谢复旦大学表面物理国家重点实验室光子晶体课题组刘教授提供良好学习条件及指导.感谢韩德专、卢志华博士的有益讨论.

- [1] Yablonovich E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 259
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Cheng B Y, Hu W, Yang J H *et al* 1994 *Chin. Phys.* **3** 61
- [4] Liu J T, Zhou Y S, Wang F H *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3336 (in Chinese)[刘江涛、周云松、王福合等 2004 物理学报 **53** 3336]
- [5] Gu P F, Chen H X, Qin X Y *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 773 (in Chinese)[顾培夫、陈海星、秦小芸等 2005 物理学报 **54** 773]
- [6] Li Y Y, Gu P F, Li M Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3889 (in Chinese)[厉以宇、顾培夫、李明宇 2005 物理学报 **54** 3889]
- [7] Ma B Q, Wang T, Sheng Y *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3670 (in Chinese)[马博琴、王 霆、盛 艳等 2005 物理学报 **54** 3670]
- [8] Kosaka H *et al* 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1212
- [9] Witzens J *et al* 2002 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **8** 1246
- [10] Chigrin D N *et al* 2003 *Opt. Express* **11** 1203
- [11] Chen C *et al* 2003 *Opt. Express* **11** 3153
- [12] Yu X *et al* 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3251
- [13] Joannopoulos J D *et al* 1995 *Photonic crystals: Molding the flow of light* (Princeton university Press)
- [14] Taflove A 1995 *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* (Boston: Artech House)
- [15] Johnson S G, Joannopoulos J D 2001 *Opt. Express* **8** 173

# Self-collimation of unpolarized electromagnetic waves in 2D photonic crystals

Shen Xiao-Peng<sup>†</sup> Han Kui Shen Yi-Feng Li Hai-Peng Xiao Zheng-Wei Zheng Jian

( *Department of Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China* )

( Received 5 August 2005 ; revised manuscript received 13 November 2005 )

## Abstract

The self-collimation of two polarization states of electromagnetic waves in two dimensional photonic crystals is studied by using finite-difference-time-domain ( FDTD ) method. It is proved that self-collimation can be realized in both transverse electric ( TE ) field and transverse magnetic ( TM ) field simultaneously by modification of the appropriate photonic crystal structures. Analysis and numerical simulation were carried out. This effect may be important for creating integrated optical circuits, and for improving the efficiency of light source.

**Keywords** : photonic crystals , un-polarization , self-collimation

**PACC** : 4270 , 4210 , 4280

---

<sup>†</sup> E-mail : xiaopengshen@sohu.com