

介质矩形柱二维光子晶体中狄拉克点的实现

曾维友 陈杰

湖北汽车工业学院理学院, 湖北 十堰 442002

摘要 用平面波展开法研究了介质矩形柱二维正格子光子晶体的能带结构, 正方晶格的晶格常数为 a , 当介质矩形柱边长为 $0.3633a$, 相对介电常数为 11.56 时, 光子晶体的能带在布里渊区的中心点获得一个三重简并态, 包括在同一频率接触构成狄拉克锥的两个线性能带, 一个穿过狄拉克点的平的能带, 光子晶体等效为介电常数和磁导率都为零的零折射率材料。用有限元法仿真电磁波在光子晶体中的传输特性, 仿真结果表明, 狄拉克点频率的电磁波通过光子晶体时相位不发生变化, 传输特性与零折射率材料相同, 用这种光子晶体设计的凹透镜可以实现焦点的半峰全宽为波长 λ 的 0.63 倍, 焦距为 λ 的 4.12 倍的亚波长聚焦。

关键词 材料; 光子晶体; 狄拉克点; 零折射率; 亚波长聚焦

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.072302

Realization of Dirac Point in Two Dimensional Photonic Crystals with Rectangular Dielectric Rods

Zeng Weiyu Chen Jie

School of Science, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan, Hubei 442002, China

Abstract Based on the plane wave expansion method, the band structure of a square lattice two dimensional (2D) photonic crystal (PC) with rectangular dielectric rods in the air background is studied. When the length and relative permittivity of the rectangular rods are set as $0.3633a$ and 11.56, respectively, a triply degenerate state is found at the center of the Brillion zone in the band structure. The triply degenerate state consists of two linear bands that generate Dirac cones and an additional flat band intersecting at the Dirac point. This 2D PC can be related to a zero index material with effective permittivity and permeability equal to zero simultaneously. The finite element method is used to simulate the transmission characteristics of electromagnetic waves in photonic crystals. The simulation results show that the phase of the electromagnetic waves at the Dirac point frequency does not change, and their transmission characteristics are the same as those in zero refractive index material. With a concave lens made of such kind of PC, a sub-wavelength focusing with 0.63λ half-peak width of focus and a 4.12λ focal length is realized.

Key words materials; photonic crystal; Dirac point; zero index; sub-wavelength focusing

OCIS codes 230.5298; 160.5298; 130.5296

1 引言

自从 Novoselov 等^[1]通过实验获得单层石墨烯晶体后, 石墨烯就由于其奇特的物理性质而备受关注。与其他材料不同, 石墨烯的电子性质是利用描述相对论粒子特性的狄拉克方程来进行研究的^[2-3], 在它的能带结构中, 布里渊区的 K 和 K' 点由两个具有线性色散关系的锥形能带构成, 锥形能带的中心交点被称为狄拉克点。光子晶体微结构与电子晶体微结构相似, 在类石墨烯光子晶体能带结构中, 也存在类似的中心奇异点^[4], 具有赝散射等奇特物理性质^[5]。2011 年, Huang 等^[6]利用偶然简并方法在正方格子光子晶体的布里渊区中心对称点 Γ 处实现了狄拉克点, 利用等效媒质理论进行分析, 发现该结构在狄拉克点的等效介电常

收稿日期: 2016-03-02; **收到修改稿日期:** 2016-03-13; **网络出版日期:** 2016-06-09

基金项目: 湖北省教育厅科研基金(B2013079)、光电子技术湖北省协同创新中心基金(2015XTZX02-08)

作者简介: 曾维友(1975—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事集成光学和微纳光子晶体器件方面的研究。

E-mail: zengweiyu@aliyun.com

数和等效磁导率都为零,这种正方格子结构的光子晶体可以用来实现双零折射率材料。零折射率材料包括单零折射率材料和双零折射率材料,电磁波在零折射率材料中传播时相位不发生变化,同时“双零”折射率材料的本征阻抗为 1,与自由空间阻抗匹配,可利用双零折射率材料实现很多有趣的物理现象,如电磁波波前调控,让物体隐身等^[7-8]。

利用圆形介质柱^[6]、环形介质柱结构^[9]光子晶体实现狄拉克点的研究已有报道,本文通过研究,发现介质矩形柱结构光子晶体也可以实现狄拉克点。通过调整参数,介质矩形柱光子晶体的能带在 Γ 点发生三重简并,形成狄拉克点,频率在狄拉克点的电磁波通过这种光子晶体时相位不发生变化,可利用这种光子晶体实现亚波长聚焦。亚波长聚焦在亚波长光刻、生物显微镜、高密度数据存储等方面具有潜在的应用价值^[10]。

2 光子晶体的能带结构

所研究的二维光子晶体结构如图 1 中的插图所示,边长为 d 的介质矩形柱以正方晶格的形式周期性排列在空气背景中,正方晶格的晶格常数为 a ,介质矩形柱的相对介电常数 ϵ 为 11.56。利用平面波展开法(PWM)计算光子晶体 TM 模(电场方向平行于柱子的轴向)的能带, $d=0.3633a$ 时的能带结构如图 1 所示,其中 M 、 X 为布里渊区边缘的两个高对称点。从图中可以看出,在布里渊区的中心 Γ 点,能带具有一个三重简并态,第 2 条和第 4 条光子能带在 Γ 点处几乎是线性的,第 3 条光子能带几乎是水平的,因此光子晶体在 Γ 点附近存在线性色散关系,这表明该光子晶体在归一化频率 $f=0.55c/a$ 处存在一个狄拉克点,其中 c 为真空中的光速。

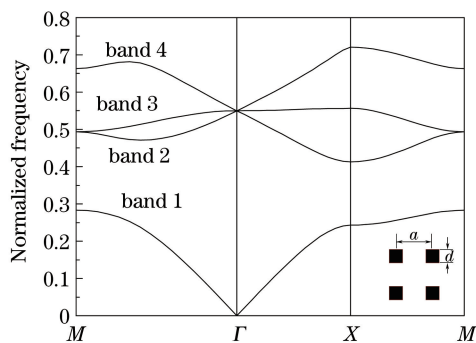


图 1 矩形柱光子晶体的能带结构

Fig. 1 Band structure of photonic crystal with rectangular rods

Γ 点处的三重简并态是偶然简并形成的,保持介质矩形柱的 ϵ 不变,改变边长 d ,使它偏离 $0.3633a$,三重简并态分裂成一个两重简并态和一个单态。当 $d=0.353a$ 时,两重简并态的频率高于单态的频率,如图 2(a)所示;当 $d=0.373a$ 时,两重简并态的频率低于单态的频率,如图 2(b)所示;当 $d=0.3633a$ 时,两重简并态与单态在 Γ 点处对应不同的 d 能带具有反转现象,因此在能带反转的两个不同 d 之间必然存在一个 d 使得三个能带简并,如图 2(c)所示。对于二维电介质光子晶体,当波矢 $k=0$ 处存在狄拉克点时,如果狄拉克点是由单极子和偶极子形成,那么在狄拉克点频率的光子晶体可以等效为介电常数和磁导率都为零的材料^[11]。

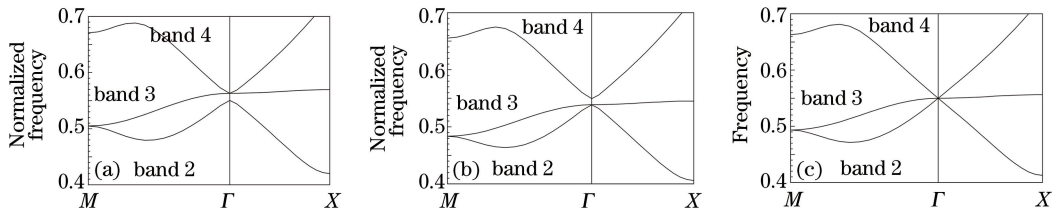


图 2 不同矩形柱边长的光子晶体的能带。(a) $d=0.353a$; (b) $d=0.373a$; (c) $d=0.3633a$

Fig. 2 Band structures of photonic crystals with different length of rectangular rods. (a) $d=0.353a$; (b) $d=0.373a$; (c) $d=0.3633a$

3 数值仿真分析

在零折射率材料中,电磁波传播的波长为无穷大,相位变化为零,从零折射率材料中出射时波前平行于界面,利用零折射率材料的这些特性可以实现光束的准直与分光^[12]。在这种材料中电磁波经过的每个点都具有一致的相位,因此在集成光子回路中零折射率材料用作光链接时不会引入相位变化,从而降低了频率色散。介电常数和磁导率都为零的双零折射率材料,其本征阻抗为 1,与自由空间阻抗相匹配,可以避免在弯曲或连接点处的反射损耗^[13]。

图 3 所示是用有限元法仿真光子晶体作为连接波导时电场分量 E_z 在其中的传播情况,仿真时所用的激励源强度为归一化强度,边界条件为理想磁导体(PMC),入射波频率 $f = 0.55c/a$,矩形柱的边长 $d = 0.3633a$ 。电磁波从下端输入,从上端输出,输入与输出端口均为空气介质。图 3(a)所示是光子晶体连接直波导的仿真结果,图 3(b)所示是光子晶体连接 180° 转折波导的仿真结果。从图 3 可以看出电磁波在光子晶体内部几乎是均匀的,相位几乎不发生任何变化。虽然在两种情况下光子晶体连接的波导不同,但电磁波经过光子晶体时相位都不变,因此两种情况下出射界面上的相位与入射界面上的相位相同,这正是零折射材料无相位延迟的传输特性。出射电磁波的强度与入射电磁波是相当的,说明电磁波的耦合效率很高,表明光子晶体的阻抗与空气阻抗是匹配的。此外,当入射平面波的频率在狄拉克频点附近时,其相位也同样保持不变。因此,在狄拉克频点及其附近,设计的矩形柱光子晶体可以等效为一种介电常数和磁导率都为零的双零折射率材料。

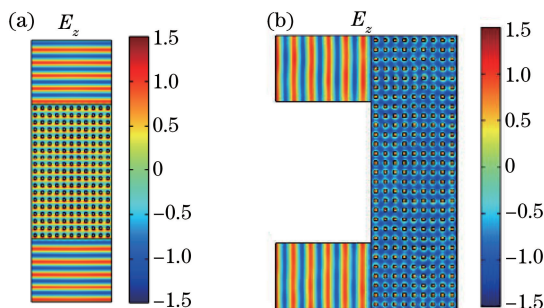


图 3 平面波通过光子晶体的电场分布。(a) 直线传输; (b) 转过 180° 传输

Fig. 3 Field distribution of plane wave passing through a photonic crystal.

(a) Straight-line propagation; (b) 180° -turn propagation

平面波通过零折射率材料时相位不发生改变,因此可以利用零折射率材料制作凹透镜来实现聚焦。从前面的分析与仿真结果可知,所研究的矩形柱光子晶体在狄拉克频点附近可以等效为零折射率材料,因此可以用其代替零折射率材料来实现凹透镜。图 4 所示是利用有限元法仿真平面波通过矩形柱光子晶体凹透镜的光强分布,仿真过程使用了完美匹配层边界,当入射波频率位于狄拉克频点 $f = 0.55c/a$ 及其附近时,凹透镜的另一侧就会出现一个入射波的焦点。取晶格大小 $a = 1 \mu\text{m}$,则对应的工作波长 $\lambda = 1.82 \mu\text{m}$,定义凹透镜最外侧边沿与焦点的轴向距离为焦距,则从仿真结果可以得出焦距为 4.12λ 。图 5 所示是焦点处光强沿

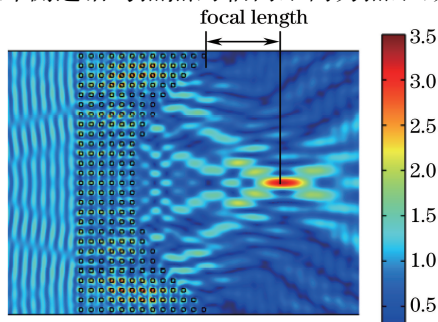


图 4 光子晶体凹透镜的聚焦特性

Fig. 4 Focusing characteristic of concave lens made by photonic crystals

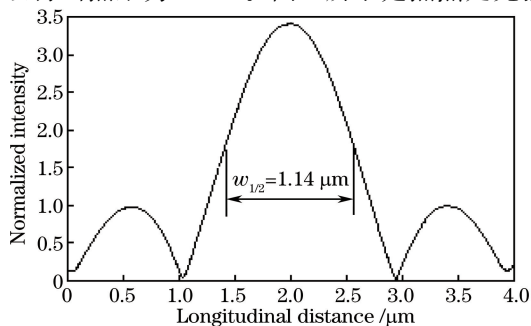


图 5 焦点光强的纵向分布

Fig. 5 Longitudinal intensity distribution of light at focal point

纵向分布的结果,从图中可以得出焦点的半峰全宽 $w_{1/2}$ 为 $1.14 \mu\text{m}$,即 0.63λ ,因此利用该光子晶体制作的凹透镜可以实现亚波长聚焦。改变光子晶体出射界面的弯曲程度还可以用来调节透镜的焦距和半峰全宽,使其在亚波长成像方面有一定的应用潜力。

4 结 论

运用平面波展开法研究了介质矩形柱光子晶体的能带结构,通过调整参数,在光子晶体能带结构布里渊区的中心找到了狄拉克点。研究表明频率在狄拉克点的电磁波通过该光子晶体时无相位延迟,该光子晶体表现出的特性与等效介电常数、等效磁导率同时为零的材料相同,可以等效为双零折射率材料。利用该光子晶体设计的凹透镜,可以实现亚波长聚焦。研究结果在集成光子回路、亚波长成像等方面有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, *et al.*. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- 2 Zhang Y B, Tan Y W, Stormer H L, *et al.*. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene[J]. *Nature*, 2005, 438(7065): 201-204.
- 3 Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene[J]. *Nat Mater*, 2007, 6(3): 183-191.
- 4 Raghu S, Haldane F D M. Analogs of quantum-Hall-effect edge states in photonic crystals[J]. *Phys Rev A*, 2008, 78(3): 033834.
- 5 Sepkhanov R A, Beenakker C W J. Numerical test of the theory of pseudo-diffusive transmission at the Dirac point of a photonic band structure[J]. *Opt Commun*, 2008, 281(20): 5267-5270.
- 6 Huang X Q, Lai Y, Hang Z H, *et al.*. Dirac cones induced by accidental degeneracy in photonic crystals and zero-refractive-index materials[J]. *Nat Mater*, 2011, 10(8): 582-586.
- 7 Alu A, Silveirinha M G, Salandrino A, *et al.*. Epsilon-near-zero metamaterials and electromagnetic sources: Tailoring the radiation phase pattern[J]. *Phys Rev B*, 2007, 75(15): 155410.
- 8 Xu Y, Chen H. Total reflection and transmission by epsilon-near-zero metamaterials with defects[J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 98(11): 113501.
- 9 Zhang Zhongjie, Shen Yifeng, Zhao Hao. Photonic Dirac point realized in two dimensional annular photonic crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(14): 147802.
张中杰, 沈义峰, 赵浩. 基于介质环形柱结构的二维光子晶体中 Dirac 点的实现[J]. *物理学报*, 2015, 64(14): 147802.
- 10 Yu Muxin, Zhou Wenchao, Wu Yihui. Mode analysis of unit cell superlens and study on its sub-wavelength imaging performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1210001.
余慕欣, 周文超, 吴一辉. 单元超透镜模式分析及其亚波长成像特性研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1210001.
- 11 Huang Xueqin, Chen Ziting. Dirac-like cones at $k=0$ [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(18): 184208.
黄学勤, 陈子亭. $k=0$ 处的类狄拉克锥[J]. *物理学报*, 2015, 64(18): 184208.
- 12 Zhu Yuguang, Fang Yuntuan, Hu Weili. Design of collimator and optical splitter based on near-zero-index materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 012205.
朱宇光, 方云团, 胡维礼. 基于近零折射率材料准直和分光器件的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 012205.
- 13 Dong Guoyan, Bi Ke, Zhou Ji. Zero phase delay in metamaterials [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2014, 44(4): 406-416.
董国艳, 毕科, 周济. 具有零相移传输性质的超材料研究[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44(4): 406-416.