

文章编号: 1001-3806(2004)04-0344-02

## 二维正方复式晶格的完全光子带隙

方云团<sup>1</sup>, 沈廷根<sup>2,3</sup>, 谭锡林<sup>3</sup>

(1. 镇江船艇学院 物理系, 镇江 212003; 2. 江苏大学 物理系, 镇江 212003; 3. 南京师范大学 江苏省光电中心实验室, 南京 210097)

**摘要:** 为产生光子晶体完全光子带隙, 在二维正方晶格的介质柱中心构造一个空气柱孔缺陷, 应用平面波展开的方法研究了光波在其中的传播规律, 发现在特定的结构参数条件下, 该结构产生了完全光子带隙, 从而找到了在简单晶格结构条件下实现完全光子带隙的方法。

**关键词:** 光子晶体; 平面波展开; 二维正方复式晶格; 光子带隙

**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A

### Absolute photonic band gaps of 2-D cubic compound lattice

FANG Yur-tuan<sup>1</sup>, SHEN Ting-gen<sup>2,3</sup>, TAN Xi-lin<sup>3</sup>

(1. Department of Physics, Zhenjiang Watercraft College, Zhenjiang 212003, China; 2. Department of Physics Jiangsu University, Zhenjiang 212003, China; 3. Photoelectricity Central Laboratory of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

**Abstract:** In order to obtain the absolute photonic band gaps, we design a two-dimension cubic compound lattices made of dielectric cylinders with an air hole in their centers and study its photonic band structures with the plane-wave method. An absolute photonic band gaps common to E and H polarized waves are created when given proper structure parameters, which tells us that absolute photonic band gaps can be created from a simple lattice.

**Key words:** photonic crystal; the plane-wave method; 2-D cubic compound lattice; photonic band gaps

## 引 言

光子晶体是一种介质折射率周期性变化的人造光学材料, 当光在这种介质中传播时, 某些频率范围内的光会受到抑制, 形成光子禁带, 类似于半导体材料中电子的能带结构<sup>[1~4]</sup>, 在带隙中光传播是禁止的, 辐射模构成导带。它的这些性质具有重要的实际应用价值, 如制作滤波器、频率稳定器、光子开关、光反射器等。与三维光子晶体相比, 二维光子晶体无论是理论研究还是实际制作方面都相对容易得多。电磁波可分为 E 极化和 H 极化。对于任何一种极化模式, 光子晶体如能使某些频段的电磁波在任何方向上都无法在光子晶体中传播, 则该频率就处于光子晶体的带隙之中。一个完全的光子带隙就是某一频段无论是 E 极化还是 H 极化都存在带隙, 即在该频段 E 极化和 H 极化的带隙重合。

光子晶体的实际用途中最重要的是如何有效地利用它的能带结构, 所以, 制作具有完全的、带隙宽度尽量大的光子晶体在光子晶体应用领域是一个很重要的研究课题。

众所周知, 二维正方晶格的光子晶体不论所取结构是空气中的介质柱还是介质中的空气柱, 都不存在完全的光子带隙。但是这种结构在所有的光子晶体中是最容易制作的, 所以, 如何利用这种简单的结构获得完全的光子带隙将是一个有意义的课题。一般情况下, E 极化的带隙容易出现在高介电常数的介质孤立分布的结构中(如空气中的介质柱), 而 H 极化容易出现在介质较为连续分布的结构中(如介质中的空气柱)<sup>[5]</sup>, 所以, 若能构造一种结构能具有上述两方面结构的特征, 则完全带隙出现的可能性将增加。为此作者设计了一种二维正方复式晶格, 并对其进行了结构优化和理论计算, 以期获得预期的结果。

## 1 模型和计算方法

作者设计的二维正方复式晶格的模型横截面如图 1a 所示: 在每个二维正方晶格的格点上放置一个

作者简介: 方云团(1965-), 男, 副教授, 硕士研究生, 现从事光学工程的研究工作。

E-mail: fang\_yt1965@sina.com

收稿日期: 2003-08-14; 收到修改稿日期: 2003-12-12

介电常数为  $\epsilon_a$ , 截面边长为  $b$  的正方介质柱; 格点周围空间均是空气, 介电常数为  $\epsilon_0$ ; 在每个介质柱的正中再挖去一个半径为  $r$  的圆柱空, 同样圆柱空内也充满空气。可以看出, 这既是一个空气中的介质柱, 又是一个介质中的空气柱的新型复式结构。图 1b 是正方晶格倒格子空间的第一布里渊区, 其中对称点  $M$  和  $X$  在倒格子空间的坐标分别为  $k_M = \pi/a(1, 1)$  和  $k_X = \pi/a(1, 0)$ 。

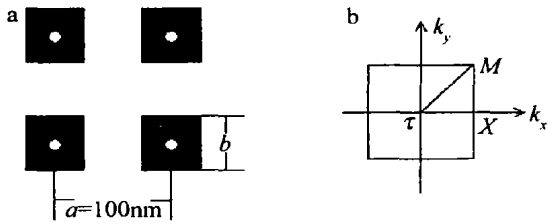


Fig. 1 a—two-dimension cubic compound lattice b—its first Brillouin zone

在光子晶体的理论计算中, 平面波展开是一种被广泛使用的方法<sup>[6]</sup>。假设介质柱沿  $z$  轴方向, 根据麦克斯韦方程, 可得描述  $E$  极化和  $H$  极化的电磁波方程如下:

$$\frac{1}{\epsilon(r)} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} E_z(r) + \frac{\omega^2}{c^2} E_z(r) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\epsilon(r)} \frac{H_z(r)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\epsilon(r)} \frac{H_z(r)}{\partial y} + \frac{\omega^2}{c^2} H_z(r) = 0 \quad (2)$$

式中,  $\epsilon(r)$  是周期分布的介电常数,  $E_z(r)$  和  $H_z(r)$  分别是  $z$  方向上的电场和磁场。由周期性结构可知,  $E_z(r)$  和  $H_z(r)$  可以按 Bloch 波展开, 即:

$$E_z(r) = \sum_G E_{k+G} \exp[i(k+G) \cdot r] \quad (3)$$

$$H_z(r) = \sum_G H_{k+G} \exp[i(k+G) \cdot r] \quad (4)$$

式中,  $k, G$  分别为二维波矢和晶格倒格矢, 同样,  $1/\epsilon(r)$  也可展开为  $G$  的傅里叶级数:

$$\frac{1}{\epsilon(r)} = \sum_G \epsilon^{-1}(G) \exp(iG \cdot r) \quad (5)$$

$$\epsilon^{-1}(G) = \frac{1}{A_u} \int_{\Omega} \frac{1}{\epsilon(r)} \exp(-iG \cdot r) dr \quad (6)$$

式中, 积分区间  $\Omega$  在一个原胞内,  $A_u$  表示一个原胞的面积, 最后把(3)式、(4)式、(5)式代入(1)式、(2)式得:

$$\sum_G [k+G']^2 \epsilon^{-1}(G-G') E_{k+G'} = \frac{\omega^2}{c^2} E_{k+G} \quad (7)$$

$$\sum_G [k+G](k+G') \epsilon^{-1}(G-G') H_{k+G'} = \frac{\omega^2}{c^2} H_{k+G} \quad (8)$$

(7)式、(8)式变成一个求解矩阵的本征函数和本征值问题, 对一给定的二维波矢  $k$ , 求出的本征值  $\omega$  就是在周期性介质结构中所允许传播的电磁波的频率。

求解(7)式、(8)式的关键是关于(6)式的计算, 为计算方便, 令:

$$\begin{aligned} \epsilon(r) &= \epsilon_0 + \theta(r)(\epsilon_a - \epsilon_0) \\ \theta(r) &= \begin{cases} 1 & r \in \text{介质} \\ 0 & r \notin \text{介质} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

从而  $\epsilon^{-1}(G) = \frac{1}{A_u} \int_{\Omega} \frac{1}{\epsilon_0} \exp(-iG \cdot r) dr + \frac{1}{A_u} \int_S (\epsilon_a^{-1} - \epsilon_0^{-1}) \exp(-iG \cdot r) dr$ , 其中积分区间  $S$  是一个介质柱挖去中间空气柱孔后剩下的面积。

## 2 结果与讨论

采用 225 个平面波计算(7)式、(8)式的本征值。计算结果表明, 在晶格常数  $a = 100\text{nm}$  的情况下,  $E$  极化和  $H$  极化的电磁波各自的带隙结构都对晶格结构参数  $r, b, \epsilon_a$  的变化非常敏感。在大多数情况下, 尽管  $E$  极化和  $H$  极化的电磁波各自都存在带隙, 但它们很少重合。通过仔细调节  $r, b, \epsilon_a$  的大小, 结果发现在  $b = 0.5a, r = 0.1b, \epsilon_a = 15$  时, 频率  $\omega$  在  $0.66 \sim 0.68$  (以  $2\pi c/a \approx 1.888 \times 10^{16} \text{Hz}$  为单位) 之间出现了一条完全带隙, 如图 2a 所示, 横坐标是

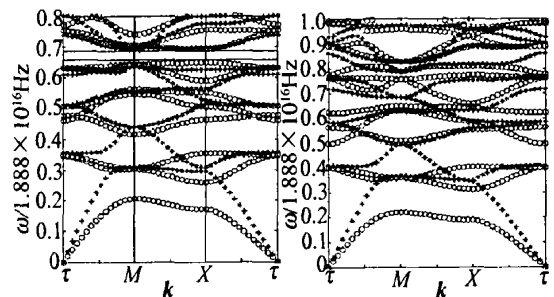


Fig. 2 a—photonic band structure of two-dimensional cubic compound lattice b—photonic band structure of two-dimensional cubic lattice

标度化的 Bloch 波矢的大小, 纵坐标是频率且以  $2\pi c/a$  为单位。在此基础上改变  $r, \epsilon_a$  的取值, 发现  $\epsilon_a$  变小时完全带隙宽度也变小, 而  $\epsilon_a$  变大时, 完全带隙的位置下移, 但宽度几乎不再变化, 说明在上述结构中,  $\epsilon_a = 15$  时完全带隙宽度达到饱和; 而  $r$  无论是变大还是变小完全带隙宽度都只有变小的趋势。作为比较, 还对上述结构去除介质中空气柱孔的情况进行了计算, 图 2b 是计算结果。可以看出, 无空

(下转第 351 页)

- 6444946, 2002-09-03.
- [7] KATA YAMA I, KAWAI H. Composite laser and punch processing device [P]. U S Patent :5880429, 1999-03-09.
- [8] WARREN J V Jr, STANLEY C E. Laser-plasma arc metal cutting apparatus [P]. U S Patent :5635086, 1997-06-03.
- [9] REAM S L, BEESON R J, ISAACS J P. Combination laser cutting and blank welding apparatus and method [P]. U S Patent :6031199, 2000-02-29.
- [10] YAMAZAKI S, ZHANG H Y, ISHIHARA H. Laser processing apparatus [P]. U S Patent :5897799, 1999-04-27.
- [11] TANAKA K. Laser processing method [P]. U S Patent :5893990, 1999-04-13.
- [12] JUNG Y H. Laser annealing apparatus [P]. U S Patent :6323457, 2001-11-27.
- [13] KHELLEY J G, ROCKSTROH T J. Gas turbine engine component with compound cooling holes and method for making the same [P]. U S Patent :5683600, 1997-11-04.
- [14] MOORE J R, WHEAT G E. Beam blocking material and method for beam drilling and inspecting cooling holes [P]. U S Patent :5773790, 1998-06-30.
- [15] NALBANDIAN V, LEE C S. Double layer circularly polarized antenna with single feed [P]. U S Patent :5703601, 1997-12-30.
- [16] GOTO A, INABA M, KOIZUMI Y. Laser process for making a filter for an ink jet [P]. U S Patent :5940957, 1999-08-24.
- [17] WAKKER K R, GRANZOW D B. Process of making an orifice plate for a page-wide ink jet printhead [P]. U S Patent :5955022, 1999-09-21.
- [18] TEMPLE S, RUMSBY P T. Method of and apparatus for forming nozzles [P]. U S Patent :6228311, 2001-05-08.
- [19] IMAI K, FUKUCHI J, TAKATSU M. Laser piercing apparatus for a web material [P]. U S Patent :6025572, 2000-02-15.
- [20] DULANEY J L, CLAUSER A H. Laser peening hollow core gas turbine engine blades [P]. U S Patent :6078022, 2000-06-20.
- [21] DULANEY J L, TOLLER S M, CLAUSER A H. Mobile laser peening system [P]. U S Patent :6288358, 2001-09-11.
- [22] BEYER E, WISSENBAACH K, KRAUSE V. Process for treatment of materials with diode radiation [P]. U S Patent :5705788, 1998-01-06.
- [23] FINDLAN S J, CHILDS W J. Method and apparatus for repairing damaged tubes by interior laser clad welding [P]. U S Patent :5656185, 1997-08-12.
- [24] BADY T, BOHLING M, LENSCH G. Process and device for laser treatment of inside surfaces [P]. U S Patent :6303897, 1999-04-19.
- [25] HACKEL L A, DANE C B, DIXIT S N *et al.* Laser illuminator and optical system for disk patterning [P]. U S Patent :6037565, 2000-03-14.
- [26] MIYAKAWA T, YONEKAWA M. Laser texture processing apparatus and method [P]. U S Patent :6091047, 2000-07-18.
- [27] SUN Y L, SWENSON E J. Laser system and method for selectively trimming films [P]. U S Patent :5569398, 1996-10-29.
- [28] SUN Y L, SWENSON E J. Laser system for functional trimming of films and devices [P]. U S Patent :580827, 1998-09-15.
- [29] FURUTA I. Cleaning device and method for cleaning resin sealing metal mold [P]. U S Patent :6410883, 2002-06-25.
- [30] BENE A P, MANCOSO F. Method and apparatus for cleaning vulcanization molds for elastomer material articles [P]. U S Patent :5928533, 1999-07-27.
- [31] LU Y F, CHAN D, SIU H L *et al.* Pulse laser induced removal of mold flash on integrated circuit packages [P]. U S Patent :5961860, 1999-10-05.
- [32] MASHBURN D N. Dual beam optical system for pulsed laser ablation film deposition [P]. U S Patent :5558788, 1996-09-24.
- [33] HARUTA K, ONO K, TSUDA M *et al.* Thin film forming apparatus using laser and magnetic field [P]. U S Patent :5760366, 1998-06-02.
- [34] TATAH A. Laser ablation forward metal deposition with electrostatic assisted bonding [P]. U S Patent :5567336, 1996-10-22.

(上接第 345 页)

气柱孔时 H 极化波没有任何带隙,验证了前面所说的高介电常数的介质孤立分布的结构只对 E 极化波容易产生带隙。空气柱孔一方面使光带下移,如 E 极化的 4, 5, 6 条频带和 H 极化的 4, 5 条频带原处在频率范围 0.5~0.65, 后来降至 0.45~0.5。另一方面压缩了相邻频带的间距,且使频带结构变得平坦,从而 H 极化波在 0.65~0.68 频率范围出现带隙,和 E 极化波在 0.66~0.68 频率范围的带隙相交叠,产生了一条完全带隙。对于上述计算结果,可作出定性的解释:空气柱孔相当于正方介质柱上的线缺陷。对于 H 极化波,它的 E 矢量处于  $x-y$  平面上,而介质面上 E 矢量的  $x-y$  的切向分量要求连续,线缺陷将改变波的传播方向,成为散射体。因此,某些频率的电磁波由于受到散射体的多重散射而局域在晶体内部,从而产生了带隙。对 E 极化波,它的

E 矢量沿介质柱长度方向即  $z$  轴,和线缺陷长度方向一致,因而不会改变波的传播方向,从这一点上看,它对 E 极化波影响较小。

### 参 考 文 献

- [1] 顾国昌,李宏强,陈洪涛 *et al.* 一维光子晶体材料中的光学传输特性 [J]. 光学学报, 2000, 20(6): 728~733.
- [2] 王 辉,李永平. 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构 [J]. 物理学报, 2001, 50(11): 2172~2178.
- [3] KRAUSS T F, de LA RUE R M. Photonic crystals in the optical regime: past, present and future [J]. Progress in Quantum Electronics, 1999, 23: 51~96.
- [4] 欧阳征标,李景镇,张道中 *et al.* 多层光子晶体滤波器研究 [J]. 光学学报, 2002, 22(1): 80~84.
- [5] 仇高新,林芳蕾,李永平. 利用复式晶胞实现二维正方形布拉菲格子光子晶体的完全带隙 [J]. 物理学报, 2003, 52(3): 600~603.
- [6] 金崇君,秦 柏,杨 森 *et al.* 三角形复式晶格的光子带结构研究 [J]. 光学学报, 1997, 17(4): 409~412.