

无规结构全角高反一维光子晶体的场强分布^{*}

温燮文 董建文 汪河洲[†]

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

(2005 年 9 月 14 日收到, 2005 年 11 月 2 日收到修改稿)

因一维光子晶体的许多应用由其场强分布特性所决定, 本文研究了无规全角高反一维光子晶体场强分布的性质, 结果表明在带隙内, 两者的场强分布无明显差别, 但在研究各种应用和器件关系最密切的带隙边缘, 周期结构的场强分布只有对称性的一种, 无规结构光子晶体的谱带边缘电场分布特性则完全可按应用要求进行设计和控制, 为光子晶体器件设计提供了全新的思路.

关键词: 光子晶体, 无规结构, 光子能隙, 全角高反, 场强分布

PACC: 4270Q, 7820P

1. 引言

光子晶体这一概念分别由 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 提出, 因为它具有奇特的光学特性和潜在的广泛应用价值, 对它的研究已成为热门研究课题之一. 光子晶体是人工制造的以一、二或三维周期结构的某种周期性排列所构成的物质. 光子晶体关键的特性是与电子晶体一样具有“带隙”, 带隙即是存在某段频率, 在这段频率之中, 无论什么波矢 k 构成的模式, 都不允许在光子晶体中存在或传播.

有广泛的应用前景的全角高反一维光子晶体的全新概念在 1998 年被提出^[3] 并受到广泛关注, 起初人们主要研究了周期结构全角高反一维光子晶体的物理性质、规律和组合结构等的应用^[3-5], 后来, 人们用准周期^[6-9] 实现并获得宽全角高反谱带. 渐变结构可以数倍增宽全角高反谱带也已被报道^[10]. 一种无规结构和一种类似渐变结构的无规结构正入射时的带宽增宽已被报道^[11], 然而, 无规结构的全角高反一维光子晶体至今还未见报道. 而且一维光子晶体的许多应用是由其场强分布特性所决定的, 研究其场强分布特性是很重要的内容. 周期结构的电场分布为人们所熟知, 一种双周期厚度调制的一维光子晶体电场分布特性近来被报道^[12]. 但无规结

构的全角高反一维光子晶体电场分布特性至今还未见报道.

本文的研究获得与周期结构相同全角高反带宽的无规结构全角高反带, 而且可以获得在一定范围内任意制定宽度的全角高反无规结构. 我们研究了无规一维光子晶体的场强分布, 发现这种晶体具有许多有利应用的重要性质.

2. 无规一维光子晶体的全角高反带

无规一维光子晶体是指每层介质的光学厚度(几何厚度 \times 折射率)不等. 产生无规结构可通过多种结构形式, 如各层介质的几何尺寸不一或介质的折射率不同等. 为方便起见, 在本数值模拟中, 设各层介质的几何尺寸不一和结构中的介质的折射率相同. 取低折射率介质的折射率 n_L 为 1.4, 取高折射率介质的折射率 n_H 为 4, 基底折射率 $n_{sub} = 1.52$, 外界为空气折射率 $n_0 = 1$. 本研究中全角高反谱带及其反射率和电场分布的模拟是采用传输矩阵法完成.

为利于比较, 我们设计了 3 种无规结构全角高反一维光子晶体结构, 且这 3 种无规结构全角高反一维光子晶体结构和与其相比较的周期结构都是由 10 层介质组成. 10 层介质折射率皆为交替结构^[1] n_L

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10274108)、国家重点基础研究发展规划(973)项目(批准号: 2004CB719804)、国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号: 2003AA311022)和广东省自然科学基金资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: stswzh@zsu.edu.cn

$n_H n_L n_H \dots n_L n_H$]. 对周期结构各层介质的光学厚度都是 0.25λ , 为简便起见, 下边的表示中省略 λ , 即周期结构表示为

A [0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25].

3 种无规结构的各层厚度为

B [0.282 0.240 0.263 0.187 0.217 0.256 0.305 0.241 0.240 0.217];

C [0.26 0.28 0.23 0.18 0.25 0.29 0.33 0.21 0.21 0.27];

D [0.25 0.63 0.25 0.30 0.25 0.25 0.25 0.28 0.25 0.22].

本研究所用的研究方法主要是遗传算法, 遗传算法是一种基于达尔文进化理论的全局优化算法^[13], 在光子晶体的领域已有不少的应用^[14,15], 利用遗传算法, 我们可设计具体的结构, 以实现预期的目的. 此方法的过程是先设定一个预期的值, 对每一层的光学厚度进行浮点数编码, 则每个个体的结构信息由 10 个浮点数表示, 先随机产生初始的个体群, 遗传算法将会对初始的个体群进行优胜劣汰, 最后剩下最接近于所求值的个体, 这就达到了我们的设计目标, 同时, 最终结构是无规的.

例如我们设计全角高反谱带宽度, 全角高反谱带宽度用带隙的宽度/中心频率表示. 图 1 给出设计的谱带结果, 图 1(a) 是 10 层介质组成周期结构的全角高反谱带图, 图 1(b) 是所设计的 10 层介质组成无规结构的全角高反谱带图, 此无规结构的各层介质的光学厚度即是上述的 B 结构参数.

从图 1 看出, 10 层介质组成周期结构的全角高反谱带宽度与 10 层介质组成无规结构的全角高反谱带宽度几乎相等, 它们的最高反射率也相等, 这表明, 除过去已报道的周期结构、准周期、递变结构可以实现全角高反谱带外, 无规结构也能实现全角高反谱带.

3. 无规一维光子晶体中的场强分布

一维光子晶体的许多应用是由其场强分布特性所决定的. 所以一维光子晶体的场强分布是光子晶体的非常重要的性质. 我们研究了无规一维光子晶体的场强分布, 发现许多有利应用的重要性质.

3.1. 全角高反带隙内的场强分布

图 2 展示了结构 A, B, C, D 的全角高反带隙内

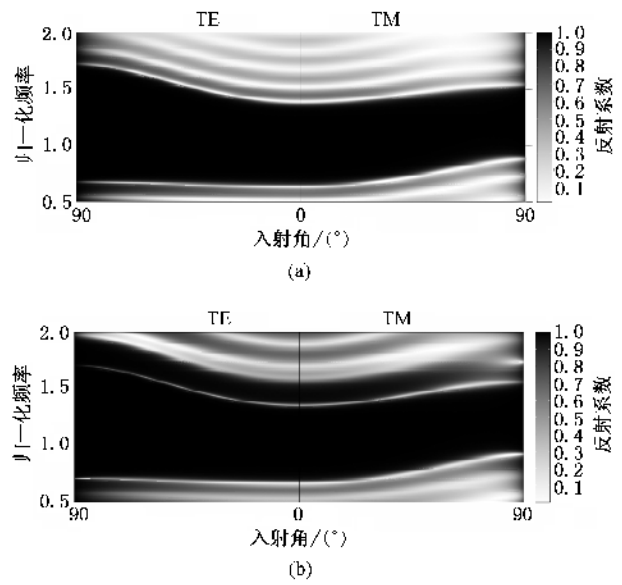


图 1 结构 A (a) 和 B (b) 的角度依赖反射谱带. 左半: s-偏振, 右半: p-偏振.

的场强分布, 从中看出, 不管周期结构还是无规结构, 只要实现了全角高反带隙, 他们的场强分布规律就相差不大.

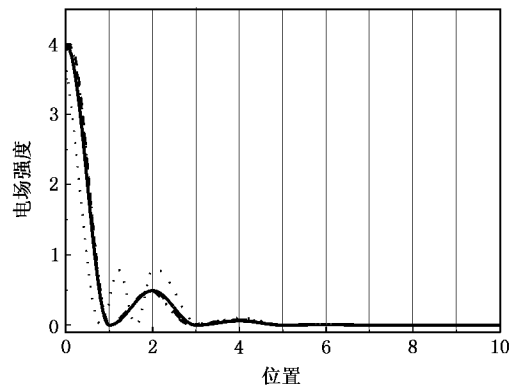


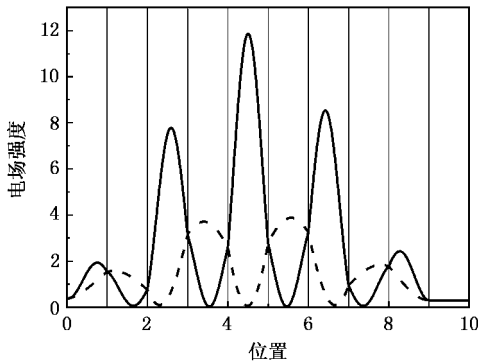
图 2 结构 A (实线) B (虚线) C (点划线) D (点线) 的全角高反带隙内(在归一化频率为 1 处)的场强分布

3.2. 全角高反带隙边缘的场强分布

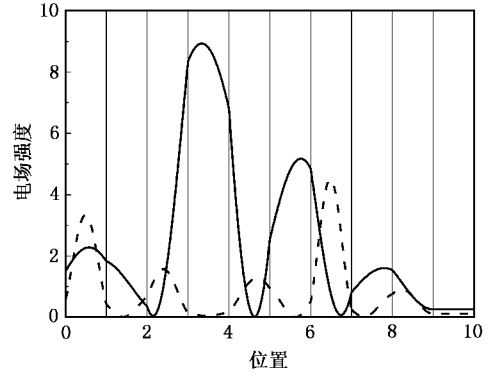
图 3 (a—d) 展示了正入射情况下的结构 A, B, C, D 的全角高反带隙边缘的场强分布, 其中, 实线表示高反带隙的低频边缘的场强分布, 虚线表示高反带隙的高频边缘的场强分布. 从中可以看出, 存在两种基本规律: (1) 频率处于带隙的上边缘时, 电场集中在低折射率区; 频率处于带隙的下边缘时, 电场集中在高折射率区. (2) 周期结构带隙的边缘的场强分

布是中间强,两边弱的基本对称性分布,见图 3 所示,然而无规结构的场强分布则完全可按应用要求进行设计和控制,它可设计成与周期结构带隙的边

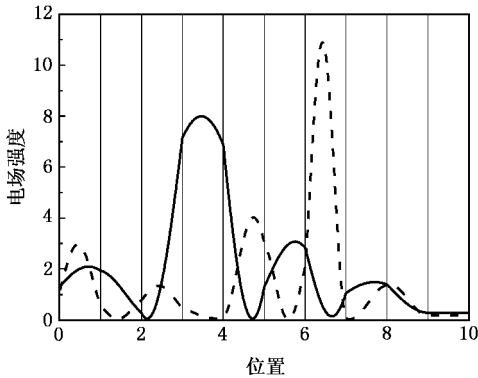
缘的场强分布相似,见图 3(d)所示,它也可设计成某一层场强特别强,其他较弱,见图 3(b)和(c)所示.



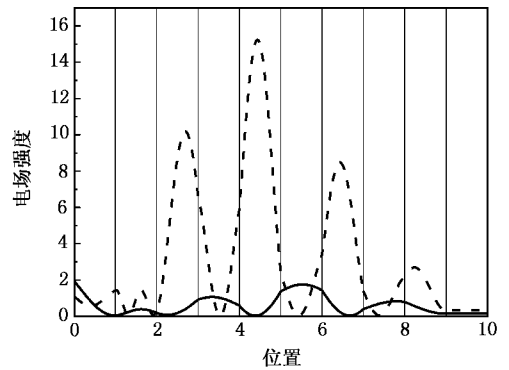
(a)



(b)



(c)



(d)



图 3 周期结构 A-D 的高反带隙边缘的场强分布 (a) 结构 A, 实线表示高反带隙的低频边缘(归一化频率为 0.625)的场强分布, 虚线表示高反带隙的高频边缘(归一化频率为 1.375)的场强分布 (b) 结构 B, 实线表示高反带隙的低频边缘(归一化频率为 0.652)的场强分布, 虚线表示高反带隙的高频边缘(归一化频率为 1.343)的场强分布 (c) 结构 C, 实线表示高反带隙的低频边缘(归一化频率为 0.633)的场强分布, 虚线表示高反带隙的高频边缘(归一化频率为 1.274)的场强分布 (d) 结构 D, 实线表示高反带隙的低频边缘(归一化频率为 0.590)的场强分布, 虚线表示高反带隙的高频边缘(归一化频率为 1.314)的场强分布

综上所述, 无规一维结构也能出现全角高反谱带. 其全角高反谱带宽度可与周期结构相当. 无规一维结构中的场强分布可归纳为 3 点: (1) 只要实现了全角高反带隙, 在带隙内, 周期结构和无规结构的场强分布规律相差不大; (2) 周期结构和无规结构都一样, 频率处于带隙的上边缘时, 电场集中在低折

射率区, 频率处于带隙的下边缘时, 电场集中在高折射率区; (3) 周期结构带隙的边缘的场强分布是中间强, 两边弱的基本对称性分布, 然而无规结构的场强分布则完全可按应用要求进行设计和控制, 这将为光子晶体的应用器件设计提供了全新的思路.

[1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059

[2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486

[3] Fink Y, Winn J N, Fan S, Chen C, Michel J, Joannopoulos J D, Thomas E L 1998 *Science* **282** 1679

[4] Winn J N, Fink Y, Fan S H, Joannopoulos J D 1998 *Opt. Lett.* **23** 1573

[5] Liang G Q, Han P, Wang H Z, 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2197 (in Chinese) [梁冠全、韩鹏、汪河洲 2004 物理学报 **53** 2197]

- [6] Maciá E 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 3330
- [7] Peng R W , Huang X Q , Qiu F , Wang M , Hu A , Jiang S S , Mazzer M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3063
- [8] Lusk D , Abdulhalim I , Placido F 2001 *Opt. Commun.* **198** 273
- [9] Dong J W , Han P , Wang H Z 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1963
- [10] Han P , Wang H Z 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 1996
- [11] Zhang D Z , Li Z L , Hu W , Cheng B Y 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 2431
- [12] Zhou J G , Du G Q , Zhang Y W , Liu N H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3703 (in Chinese) [周金苟、杜桂强、张亚文、刘念华 2005 物理学报 **54** 3703]
- [13] Holland J H 1975 *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (The University of Michigan Press Ann Arbor 1975)
- [14] Drupp R P , Bossard J A , Werner D H , Mayer T S 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 081102
- [15] Shen L F , Ye Z , He S L 2003 *Phys. Rev. B* **68** 035109

Electric field intensity distribution in disordered one-dimensional photonic crystal with omnidirectional reflection band^{*}

Wen Xie-Wen Dong Jian-Wen Wang He-Zhou[†]

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies , Zhongshan (Sun Yat-Sen) University , Guangzhou 510275)

(Received 14 September 2005 ; revised manuscript received 2 November 2005)

Abstract

It is theoretically demonstrated that the omnidirectional reflection band in one-dimensional disordered photonic crystals (1D DPCs) can have a width as broad as that in one-dimensional periodic photonic crystals (1D PPCs) with the same layer number. In the band gap , the electric field intensity distributions in a 1D DPC are almost the same as in 1D PPCs. However , near the band edges , the electric field intensity distribution in the 1D PPC is symmetric , remarkably different from the asymmetric field patterns in the 1D DPCs that are designable and controllable. This characteristic in the 1D DPCs should open a new way to design photonic-crystal-based devices.

Keywords : disordered photonic crystal , photonic band gap , electric field intensity distribution , omnidirectional reflection

PACC : 4270Q , 7820P

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10274108) , National 973 Project of China (Grant No. 2004CB719804) , National 863 Project of China (Grant No. 2003AA311022) , and the Natural Science Foundation of Guangdong Province.

[†] Corresponding author. E-mail : stswzhz@zsu.edu.cn