

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0110-03

慢变晶格结构光子晶体的能带特性研究

欧阳征标, 安鹤男, 朱骏, 李景镇, 阮双琛

(深圳大学工程技术学院固态光子实验室, 广东 深圳 518060)

摘要 构造了三种慢变结构的光子晶体,利用光学传输矩阵方法对它们的光子能带特性进行了研究,发现所提出的结构能够十分有效地拓宽光子晶体的光子禁带宽度,与均匀结构相比光子禁带的拓宽率可以达到300%以上,另发现选择较小的慢变增量和较大的晶格数目是获得特宽光子禁带区的关键。

关键词 人工晶体; 慢变晶格结构; 光子晶体; 光子带隙; 宽禁带

中图分类号 O43; TN2

文献标识码 A

Photonic Bandgaps in Photonic Crystals with Tapered Lattices

OUYANG Zheng-biao, AN He-nan, ZHU Jun, LI Jing-zhen, RUAN Shuang-chen

(Solid State Photonics Laboratory, College of Engineering and Technology,
Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract Three kinds of photonic crystals with slowly varying lattices are investigated using optical transmission matrix method. It is found that the photonic bandgaps region are enlarged by 3 times as compared with that of ordinary photonic crystals with uniform lattices. The key to obtain large photonic bandgaps in such structures is to vary the lattices very slowly and to have large number of lattices in the structure.

Key words artificial crystals; tapered lattices; photonic crystals; photonic bandgaps; wide bandgaps

1 引言

光子晶体是在1987年分别由E.Yablonovitch和S.John^[1,2]提出来的,是一种具有“光子频率禁带”的特殊材料。利用这一“光子频率禁带”的特征,光子晶体有着广泛的应用前景,例如,利用光子晶体可以控制原子的自发辐射,可以制作宽频带、低损耗的光反射镜,零阈值的激光器,高效率的发光二极管,光滤波器、光开关、光混频器、光倍频器和光存储器等。

在光子晶体的许多应用研究当中,人们通常都希望获得更宽的光子带隙。为了获得更宽的光子带隙,人们尝试了各种结构,如三角形结构、钻石结构、蜂窝结构等^[3-5],但是效果都不理想,通常只能获得中心频率的20%~30%的光子带隙。因此探索新的光子晶体结构仍然是一个人们很感兴趣的课题。本文提出了三种慢变晶格结构的光子晶体,并利用光

学传输矩阵法对它们进行研究,结果发现这些结构能够十分有效地拓宽光子晶体的光子带隙,与均匀结构相比,其中光子能带带隙拓宽率最大的可以达到300%以上,与作者以前研究的两端带慢变结构的光子晶体^[6]具有同样的作用。

2 理论模型

几种“慢变晶格结构的光子晶体”如图1所示,它们都是由 N 个有差异的晶格构成,每个晶格由两个小单元构成。这两个小单元分别为高低折射率的介质层。在图1(a)中,各个晶格中低折射率介质层的厚度 h_2 从左到右按等差级数有规律地增加,相邻晶格之间的低折射率介质层的厚度差为 Δ ,而各个晶格中的高折射率介质层的厚度 h_1 保持不变。在图1(b)中,各个晶格中高折射率介质层的厚度 h_1 从左到右按等级数规律增加,相邻晶格之间的低折射率

基金项目: 国家自然科学基金(60177030)、广东省千百十工程、深圳市科技局资助课题。

作者简介: 欧阳征标(1963-),男,湖南洞口人,教授,博士,目前主要从事光子晶体理论及其应用研究。

E-mail: zhouyang@szu.edu.cn

介质层的厚度差为 Δ , 而各个晶格中的低射率介质层的厚度 h_2 保持不变。在图 1(c) 中, 各个晶格中高低折射率介质层的厚度 h_1 和 h_2 从左到右均按同样的等级数有规律地增加, 相邻晶格之间的同样折射率的介质层的厚度差为 Δ 。这些晶格厚度作缓慢变化的结构被称为慢变晶格结构光子晶体。

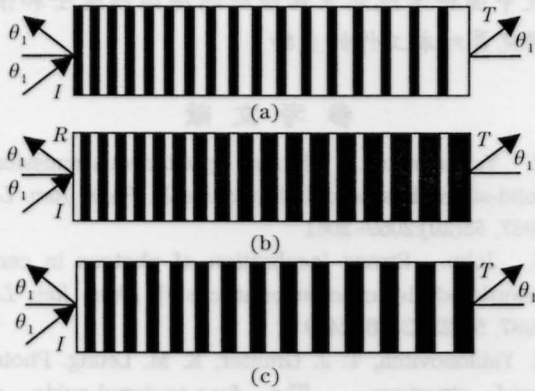


图 1 三种慢变晶格结构的示意图。(a) 只有灰色层厚度变化; (b) 有黑色层厚度变化; (c) 两种介质层的厚度都变化

Fig.1 Schematic of three kinds of lattice-slowly-varying photonic crystal (a) Only the width of gray layers change; (b) Only the width of black layers change; (c) The widths of both the gray and the black layers change

利用光学传输矩阵法^[7]对所提出的结构进行了研究。根据该方法可以对整个结构的反射系数和透射系数进行模拟计算。

选取所研究的波段主要在 500~3500 nm 之间。将研究平面波垂直入射的情况。另外在以下研究中, 假设所有的介质均是非磁性的, 高折射率介质均选为碲化铅(取 $n_1=4.1$), 低折射率介质均选为冰晶石(取 $n_2=1.35$), 并设整个光子晶体处于空气之中。

3 计算结果和分析

图 2 给出了典型的计算结果, 其中为了对比的方便, 在图 2(a) 中给出了普通的均匀结构光子晶体的光子能带计算曲线。图 2 对应的均匀周期结构内每层介质的厚度值、各慢变晶格结构内厚度不变的介质层的厚度值以及各慢变晶格结构内厚度变化的介质层的平均厚度值均为 137.6147 nm。图 2(b), (c) 和 (d) 所给出光子能带特性曲线分别对应图 1(a), (b) 和 (c) 所示的慢变晶格结构光子晶体的光子能带特性。对于图 2(b) 和 (c), 相邻晶格中的同种介质层的厚度变化增量均为 $\Delta=10$ nm, 所对应的结构均取

15 个晶格。对于图 2(d), 相邻晶格中的同种介质层的厚度变化增量均为 $\Delta=6$ nm, 这时为了保持与图 2(b) 和 (c) 所对应的介质层的最大厚度变化量, 所对应的结构取 25 个晶格。

由图 2(a) 和 (b) 可看出, 保持高折射率介质层的厚度不变而使低折射率介质层厚度作慢变化的图 1(a) 所示结构的光子禁带区(范围为 1255.0~2215.0 nm) 比均匀周期结构光子晶体的光子禁带(其范围为 1265.0~2087.5 nm) 拓宽约 16.7%。

由图 2(a) 和 (c) 可以看出保持低折射率介质层的厚度不变而使高折射率介质层的厚度作慢变化的图 1(b) 所示结构的光子禁带区(范围为 490.0~2345.0 nm) 比均匀周期结构光子晶体的光子禁带拓宽约 126%, 即这种慢变结构光子晶体的光子禁带区达到了均匀周期结构光子晶体的光子禁带宽度的 2.2 倍以上。由此可见, 使高折射率介质层的厚度作

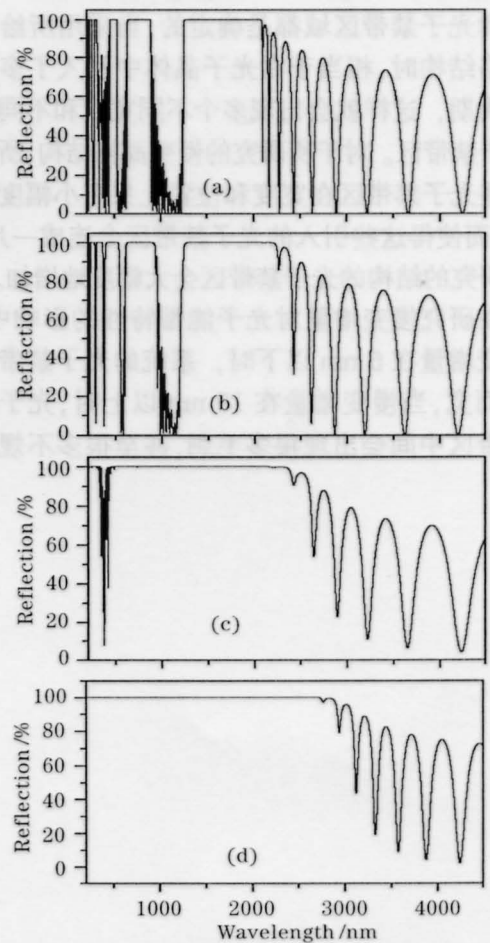


图 2 不同结构的光子能带特性。(a) 对应普通光子晶体; (b)~(d) 分别对应图 1(a)~(c) 所示的慢变晶格结构光子晶体

Fig.2 The photonic bandgap properties of different structures. (a) for an ordinary photonic crystal; (b)~(d) for the structures shown in Fig.1(a)~(c), respectively

慢变化比起使低折射率介质层的厚度作慢变化的情况更能有效地拓宽光子禁带区的宽度。从物理概念上来说,高折射率介质对应比较大的光程,因此对光的传播的影响应该比较大,对应同样的物理厚度的改变,前者对应更大范围的光学厚度的变化,因而就更能够有效地拓宽光子禁带区的范围。

此外由图 2(a)和(d)可以看出使高低折射率介质层的厚度同时作慢变化的图 1(c)所示结构的光子禁带区(忽略 200 nm 以下的区域,其范围为 200~2732.5 nm)比均匀周期结构光子晶体的光子禁带拓宽了约 208%,即这种慢变结构光子晶体的光子禁带区达到了均匀周期结构光子晶体的光子禁带宽度的 3 倍以上。由于这时两种介质层都在作慢变化,使得光学厚度的变化范围更宽了,因而进一步加大了光子禁带区。

如何从物理上来解释所获得的这么宽的禁带区的增宽呢?一定周期的普通光子晶体的光子禁带宽度和光子禁带区域都是确定的,当采用所给出的变晶格结构时,相当于在光子晶体中引入了多种不同的周期,这样就会出现多个不同宽度和不同位置的光子禁带区。对于所研究的慢变晶格结构,所引入的这些光子禁带区在宽度和位置上只有小幅度的改变,从而使得这些引入的光子禁带区会连成一片,使得所研究的结构的光子禁带区会大幅度地增加。

在研究慢变增量对光子能带特性的影响中,发现慢变增量在 5 nm 以下时,系统的光子禁带区域很平而宽,当慢变增量在 15 nm 以上时,光子晶体的禁带区中间会出现很多毛刺,甚至很多不规则的

透过区,使得光子禁带区变小。

需要指出的是,在以上计算过程中,虽然所研究的频率范围很宽,但是并没有考虑材料的色散和吸收的影响,因此计算所得到的结果只是一个理想结果。在实际应用过程中必须考虑这些因素的影响。

致谢 感谢中国科学院半导体所的王启明院士以及中国科学院北京物理所的杨国桢院士和张道中研究员对本工作的支持。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20):2059~2061
- 2 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23):2486~2489
- 3 E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, K. M. Leung. Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **67**(17): 2259~2262
- 4 P. R. Villeneuve and M. Piche. Photonic band gaps in two-dimensional square and hexagonal lattices [J]. *Phys. Rev. (B)*, 1992, **46**(8): 4969~4972
- 5 F. Gadot, A. Ammouche, A. de Lustrac, et al.. Experimental demonstration of complete photonic band gap in graphite structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(13): 1780~1782
- 6 Z. Ouyang, J. Zhu, J. Li. Photonic Bandgaps in Photonic Crystals with Tapered Periods at Both Ends. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **22**(5), 612~615 (in Chinese)
- 7 M. 波恩, E. 沃耳夫. 光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1978

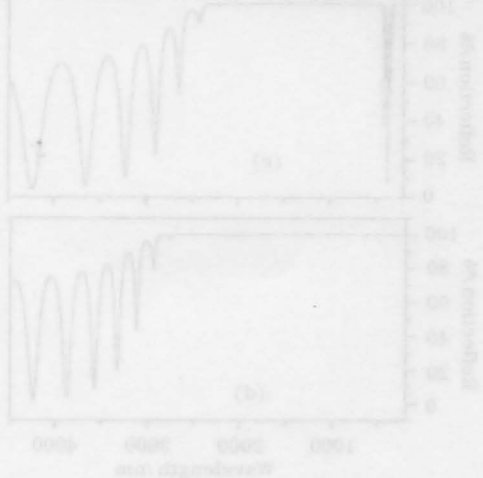


图 1 不同慢变增量对光子禁带特性的影响 (a)慢变增量为 5 nm, (b)慢变增量为 10 nm, (c)慢变增量为 15 nm, (d)慢变增量为 20 nm. 图中展示了光子晶体的光子禁带区随着慢变增量的增加而发生的显著变化,特别是禁带区宽度和内部结构的演变。

随着慢变增量的增加,光子晶体的光子禁带区会发生显著的变化。当慢变增量为 5 nm 时,禁带区呈现出较宽且平坦的特征。随着慢变增量增加到 10 nm、15 nm 和 20 nm,禁带区的宽度有所增加,但其内部结构变得更为复杂,出现了更多的毛刺和不规则特征。这种变化反映了慢变结构对光子禁带特性的深刻影响。