

文章编号: 1005—8893 (2005) 01—0034—03

# 准周期结构一维光子晶体的透射谱<sup>\*</sup>

沈小明, 王旭东, 陈宪锋, 倪重文, 是度芳

(江苏工业学院 信息科学系, 江苏 常州 213016)

摘要: 提出了折射率和层厚分别递增或递减的准周期一维光子晶体结构, 并用传输矩阵计算了此类准周期光子晶体的透射谱, 其光子带隙均相对于周期性光子晶体带隙产生了移动。当折射率递变时, 移动方向与递变符号有关。当层厚递变时, 光子带隙均向长波方向移动。光子带隙移动量的大小随周期数的增加而增加。

关键词: 准周期结构; 一维光子晶体; 透射谱

中图分类号: O 437

文献标识码: A

Yablonovitch<sup>[1]</sup> 在讨论如何抑制自发辐射和 John<sup>[2]</sup> 在讨论光子局域时各自独立地提出了光子晶体的概念。他们所讨论问题的实质是周期性电介质结构材料中光传播的影响问题, 这种周期性电介质结构就是光子晶体。光子晶体具有许多独特性质: 如光子禁带、抑制自发辐射、光子局域化、偏振特性等, 自 1987 年提出光子晶体概念至今, 对光子晶体的研究取得了令人鼓舞的成果, 同时在应用方面也取得了很大进展。例如光子晶体波导<sup>[3]</sup>、光子晶体光纤<sup>[4]</sup>、光子晶体微腔<sup>[5]</sup> 和光子晶体偏振器<sup>[6]</sup> 等。由于一维光子晶体易于实现以及其独特的传输特性, 在光限幅器<sup>[7]</sup>、双稳特性<sup>[8,9]</sup> 和光开关<sup>[10]</sup> 等方面都取得了成功。以上研究及结果都是建立在周期性电介质分布基础上的。近年来已经开始对准周期性电介质分布进行了研究<sup>[11,12]</sup>。所谓准周期分布就是每个周期的各层光学厚度都作有规律的变化。准周期性光子晶体相对于周期性光子晶体, 其光波传输特性有一定的变化。而这些传输特性的变化对于拓展光子晶体的应用有很大价值。因此我们对准周期一维光子晶体中光波的传输特性进行研究, 以期取得新的应用。

## 1 准周期一维光子晶体的模型

一维光子晶体结构是由折射率为  $n_1$  和  $n_2$  的两种电介质交替组成, 其厚度分别为  $d_1$  和  $d_2$ , 每种介质层为  $\lambda/4$  片, 即有  $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda/4$ 。本文提出的准周期一维光子晶体的结构模型如图 1 所示。图 1 (a) 中每个周期的层厚不变, 每层折射率递增或递减一个  $\Delta n$ , 本结构之  $\Delta n = 0.01$ 。图 1 (b) 中每个周期的折射率不变, 每层的厚度递增或递减一个  $\Delta d$ , 本结构之  $\Delta d = 0.0005 \mu\text{m}$ 。

波长为  $\lambda_0$  的光波由空气 ( $n_0 = 1$ ) 正入射到光子晶体表面。在正入射的情况下, TE 模和 TM 模的传播特性是一致的。本文研究入射光为可见光到近红外波段的透射特性。光波在一维光子晶体中的传输特性可以用传输矩阵法<sup>[13]</sup> 计算得到。

## 2 数值模拟结果及分析

用文献 [13] 列出的传输矩阵公式对图 1 所示的两种结构共 4 种情况进行了数值模拟计算。每一个介质层的传输矩阵为:

$$T_j = \begin{bmatrix} \cos \hat{\vartheta} & \frac{i}{\eta_j} \sin \hat{\vartheta} \\ i \eta_j \sin \hat{\vartheta} & \cos \hat{\vartheta} \end{bmatrix}$$

式中  $\hat{\vartheta} = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ ,

\* 收稿日期: 2004—05—06

基金项目: 江苏工业学院科技基金资助

作者简介: 沈小明 (1963—), 男, 江苏宜兴人, 讲师, 在职研究生, 主要从事光学材料方面的研究。

$$\eta_j = \begin{cases} \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \cdot \cos \theta_j & \text{(TE)} \\ \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \cdot \frac{1}{\cos \theta_j} & \text{(TM)} \end{cases}$$

入射光中心波长  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ，介质 1 为  $\text{MgF}_2$ ，其折射率  $n_1 = 1.38$ ，层厚  $d_1 = 0.192 \mu\text{m}$ ，介质 2 为  $\text{ZnS}$ ， $n_2 = 2.35$ ， $d_2 = 0.113 \mu\text{m}$ ，递变量  $\Delta n = 0.01$ ， $\Delta d = 0.0005 \mu\text{m}$ ， $N = 10$  时周期性一维光子晶体的透射谱示于图 2 (a)。

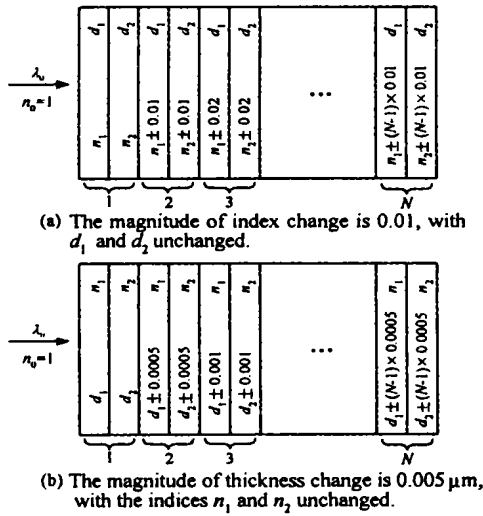


图 1 准周期一维光子晶体结构

Fig. 1 The structure of a quasi-periodic 1D photonic crystal

2.1 d 不变, n 渐变

图 2 (b) 表示周期数  $N = 10$  时,  $d$  不变、 $n$  渐变时的透射谱。图中实线(虚线)代表  $n$  递增(递减)时的透射谱。图 2 (c) 表示周期数  $N = 20$  时,  $d$  不变、 $n$  渐变时的透射谱。将图 2 (a) (b) (c) 3 图相比较, 我们可以得到如下几点结论: ①  $n$  渐变时,  $n$  递增的曲线向长波方向移动,  $n$  递减的曲线向短波方向移动。其原因在于相对于周期性介质,  $n$  递增时的折射率对比度 ( $n_2/n_1$ ) 减小,  $n$  递减时的折射率对比度 ( $n_2/n_1$ ) 增大。②  $n$  递增时向长波方向的移动量小于  $n$  递减时向短波方向的移动量。其原因在于  $n$  递增时折射率对比度随着层数的增加进一步减小, 而  $n$  递减时折射率对比度随着层数的增加进一步增加。③随着  $N$  的增加, 边带震荡加剧, 震荡峰增多, 而且带隙边缘变陡。且  $n$  递增与递减引起的上述变化的速度也不一致, 从而引起了带隙宽度变化的不一致。对于  $n$  递增, 边带峰的变化使实线中的带隙随  $N$  的增加而变窄; 对于  $n$  的递减, 使虚线的带隙随  $N$  的增

加而变宽。这都是由于折射率对比度变化规律引起的。

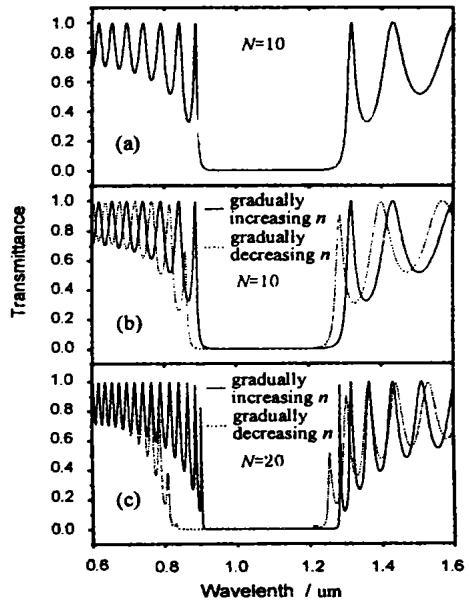


图 2 d 不变 n 渐变时的透射谱

Fig. 2 The transmission spectra when  $n$  changes gradually, with  $d$  unchanged

2.2 n 不变, d 渐变

图 3 表示  $n$  不变、 $d$  渐变周期数分别为  $N =$

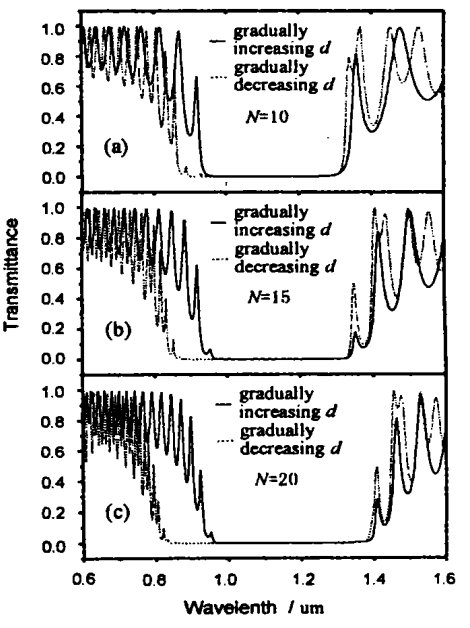


图 3 n 不变 d 渐变时的透射谱

Fig. 3 The transmission spectra when  $d$  changes gradually, with  $n$  unchanged

10、15、20 时的透射谱。实线代表  $d$  递增, 虚线代表  $d$  递减。将图 2 (a) 与图 3 相比较, 可以得

到如下规律: ①  $d$  递增时带隙中心向长波方向移动,  $d$  递减时带隙中心向短波方向移动, 这一规律与  $n$  递变时的规律相同。②随着  $N$  的增加, 无论是  $d$  递增还是递减, 左右变化的速度均使得带隙宽度增加, 这是与  $n$  递变时的规律不同。而且随着  $N$  的增加, 带隙宽度的增加速度也加快。将表示  $n$  递变的图 2 与表示  $d$  递变的图 3 相比较, 可以发现  $d$  递变产生的带隙变化比  $n$  递变产生的带隙变化明显。

### 3 结 论

本文提出的准周期性结构一维光子晶体所具有的透射特性(带隙特性), 相对于周期性一维光子晶体的透射特性有了较大变化, 其变化规律并不遵循周期性结构的变化规律, 因此, 研究准周期结构一维光子晶体的带隙规律, 对于拓展其应用是极其重要的。研究发现每层光学厚度的递变即使相同,  $n$  固定  $d$  递变与  $d$  固定  $n$  递变所引起的带隙特性变化规律也是不同的, 应该分别给予研究。这些变化规律对于滤波技术, 反射器等都是极有价值的。

#### 参考文献:

- [1] Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid—state Physics and Electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58: 2 059—2 062.
- [2] John S. Strong Localization of Photonics in Certain Disordered Di-

electric Superlattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58: 2 486—2 489.

- [3] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, et al. Single—Mode Photonic Band Gap Guidance of Light in Air [J]. Science, 1999, 285: 1 537—1 539.
- [4] Knight J C, Birks T A, Russell P St J, et al. All—Silica Single—Mode Optical Fiber with Photonic Crystal Cladding [J]. Opt Lett, 1996, 21: 1 547—1 549.
- [5] Villeneuve P R, Fan S, Joannopoulos J D. Microcavities in Photonic Crystals: Mode Symmetry, Tenability, and Coupling Efficiency [J]. Phys Rev, 1996, B54: 7 837—7 842.
- [6] 张翔, 李承芳, 钟家桢. 一维光子晶体偏振特性研究 [J]. 武汉大学学报, 2003, 49: 365—368.
- [7] Wang R, Dong J, Xing D Y. Dispersive Optical Bistability in One—Dimensional Doped Photonic Band Gap Structures [J]. Phys Rev, 1997, E55: 6 301.
- [8] Jiang Meiping, Shen Xiaoming, Jiang Xingfang, et al. Analysis of Bistable Switching Threshold in One—Dimensional Photonic Crystals [J]. SPIE, 2005.
- [9] Tran P. Optical Limiting and Switching of Short Pulses by Use of a Nonlinear Photonic Band Gap Structure with a Defect [J]. J Opt Soc Am, 1997, B14: 2 589.
- [10] Tran P. Optical Switching with a Nonlinear Photonic Crystal: A Numerical Study [J]. Opt Lett, 1996, 21: 1 138.
- [11] 汤亮, 袁长胜, 陈延峰 等. 连续渐变周期的一维光子晶体带隙结构全能反射器 [J]. 光子学报, 2004, 33: 573—576.
- [12] Michael D T, Mark J B, Michael S, et al. Thin—Film Nonlinear Optical Diode [J]. Appl Phys Lett, 1995, 66: 2 324—2 326.
- [13] Born M, Wolf E. Principles of Optics [M]. 6th Ed. Oxford: Pergamon Press, 1980. 67—90.

## Transmission Spectra of One—Dimensional Photonic Crystal with Quasi—Periodic Structure

SHEN Xiao—ming, WANG Xu—dong, CHEN Xian—feng, NI Zhong—wen, SHI Du—fang

(Department of Information Science, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** A quasi—periodic one—dimensional photonic crystal structure was proposed, in which the refractive index and the layer thickness respectively increased or decreased. By using the Transfer Matrix Method the transmission spectra of such a quasi—periodic photonic crystal was calculated numerically, of which the photonic band—gap moved away from the position of periodical photonic crystal band—gap. When the refractive index changed the moving direction, it relied on the sign of change. When the thickness changed the photonic band—gap always moved in the direction of long—wavelength. The magnitude of photonic band—gap shifting increased with the number of periods increasing.

**Key words:** quasi—periodic structure; one—dimensional photonic crystal; transmission spectrum