

文章编号: 1001-3806(2006)05-0476-03

# 光子晶体制作反射型相位补偿器的理论研究

袁纵横<sup>1</sup>, 卢向东<sup>2</sup>, 黄静<sup>1</sup>

(1. 贵州民族学院 物理与电子信息科学学院, 贵阳 550025; 2. 桂林电子工业学院, 桂林 541004)

**摘要:** 为了制作新的光子晶体器件, 采用传输矩阵法, 通过数值计算, 研究了 3 种一维光子晶体制作的反射型相位补偿器。引入反射振幅系数比的两个参数分别对这 3 种不同结构组成的补偿器进行讨论。分析结果表明, 这些反射型相位补偿器都具有反射率极高、相位补偿连续可调等优点。

**关键词:** 光学器件; 一维光子晶体; 光子禁带; 反射型相位补偿器

**中图分类号:** O431 **文献标识码:** A

## Theoretical study of reflective phase compensator made of photonic crystal

YUAN Zong-heng<sup>1</sup>, LU Xiang-dong<sup>2</sup>, HUANG Jing<sup>1</sup>

(1. College of Physics and Electronic Information Science, Guizhou University for Nationalities, Guiyang 550025, China; 2. Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to make new optical devices with photonic crystal, three reflective phase compensators made of 1-D photonic crystals are investigated with transfer matrix method and numerical value calculation. Three different compensators are discussed respectively by means of both parameters of reflective amplitude coefficient ratio. The results show that these reflective phase compensators own some advantages of high-reflectivity, continuous tunable phase compensation etc.

**Key words:** optical devices; 1-D photonic crystal; photonic band gap; reflective phase compensator

### 引 言

光子晶体又称为光子禁带材料, 对其研究的历史虽仅有十几年, 但是不管是相关的理论研究还是实验及应用研究都得到了迅猛的发展。连最具权威的《科学》杂志也把它评选为十大重大进展的领域之一。

在光子晶体材料中, 目前引人注目且研究得较为成熟的是一维光子晶体, 它不仅结构简单而且制造技术成熟, 同时还具备了二维或三维光子晶体的特性。时至今日, 人们根据一维光子晶体不同的光学特性研制出不同的光电产品。例如, 一维光子晶体具有全向能隙的特性<sup>[1~6]</sup>, 广泛用于高反射镜、低阈值激光谐振腔、透射光栅、高通滤波、光波导、微波天线等研究。再者, 在晶体中引入一定的缺陷态<sup>[7,8]</sup>可控制光的输出, 用于高 Q 值、低损耗的谐振微腔、高效发光二极管以及窄带滤波、波分复用、光开关等。利用光子晶体的超折射<sup>[9]</sup>特性可以制作具有高分光能力的棱镜。一维光子晶体还具有非线性, 用于双共振的二次谐波产生、

光学双稳态等。另外, 利用 TM 模和 TE 模在一维光子晶体中不同的能带结构可以得到一维光子晶体偏振片。与此同时, 对于 TM 模和 TE 模之间相位差的研究以及相应的应用研究同样值得关注。基于这个目的, 作者采用 3 种一维光子晶体模型设计出不同的反射型相位补偿器。理论分析得出, 这种材料做成的反射型相位补偿器具有调制方法简单且精确、损耗小、能适应一定的波长范围等特点。通过数值比较表明各向异性一维光子晶体材料较适合制成这种类型的相位补偿器。

### 1 模型的建立

根据传输矩阵<sup>[10]</sup>法的思想, 先算出各层介质的传输矩阵再把各矩阵按顺序相乘便能够求出总的传输矩阵, 最终分别得到 TM 模和 TE 模的反射振幅系数:

$$\vec{r} = \frac{m_{11} p_l + m_{12} p_l p_l - m_{21} - m_{22} p_l}{m_{11} p_l + m_{12} p_l p_l + m_{21} + m_{22} p_l} = |r| e^{i\delta} \quad (1)$$

式中,  $m_{11}$ ,  $m_{12}$ ,  $m_{21}$ ,  $m_{22}$  是总的传输矩阵元,  $p_l$  和  $p_l$  分别是第 1 层和第 l 层的有关参数, 对 TM 模和 TE 模取不同的值。为研究方便, 引入了两个参数 P (反射振幅系数比绝对值) 和  $\delta$  (TM 模和 TE 模的相位差), 其定义如下:

$$P \cdot e^{i\delta} = \left| \frac{r_{TM}}{r_{TE}} \right| \cdot e^{i(\delta_{r, TM} - \delta_{r, TE})} \quad (2)$$

作者简介: 袁纵横 (1957-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学测量、激光及光电技术的理论和应用研究。

E-mail: yuanzongheng@sina.com

收稿日期: 2005-09-27; 收到修改稿日期: 2005-10-24

对 (2) 式展开,则有:

$$\begin{cases} P = \left| \frac{r_{TM}}{r_{TE}} \right| \\ \delta = \delta_{r, TM} - \delta_{r, TE} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\delta_{r, TM}$  和  $\delta_{r, TE}$  分别是 TM 模与 TE 模反射的相位,  $r_{TM}$  和  $r_{TE}$  分别是 TM 模与 TE 模反射的振幅。利用 (1) 式和 (3) 式可以把 TM 模和 TE 模的反射振幅系数转化成 TM 模与 TE 模的相位差  $\delta$  以及振幅系数比的绝对值  $P$ 。

为便于分析比较,建立了 3 种不同结构组成的一维光子晶体模型,如图 1 所示。其中图 1a 是由两种各向同性介质 A 和 B 组合而成,图 1b 是在 A, B 介质中掺杂了一层各向同性的杂质层 C,图 1c 是由各向异性介质层 D 和各项同性介质层 B 组合而成。

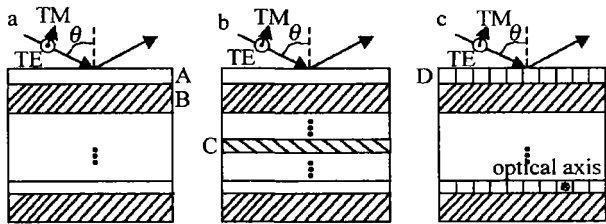


Fig 1 Three modes of one-dimension photonic crystal  
a—not defect b—defect c—anisotropy

利用传输矩阵法,联合分析反射振幅系数比绝对值  $P$ 、相位差  $\delta$  以及两种偏振态下的反射率与入射角的关系图可以知道,在一定条件之下可以用这 3 种结构制作成角度调制的反射型相位补偿器。

## 2 结果与讨论

经过一系列的数值比较,设置了如下的结构参数: A 介质,  $n_A = 1.35$ ; B 介质,  $n_B = 4.00$ ; C 介质,  $n_C = 2.50$ ; D 介质,  $n_{D0} = 1.68134$  和  $n_{Dc} = 1.49694$  (方解石晶体)。A, B, C 介质的光学厚度均为  $\lambda_0/4$ , D 介质厚度满足:  $n_{D0} h_D = \lambda_0/4$ 。取中心波长  $\lambda_0 = 400\text{nm}$ 。无缺陷一维光子晶体模型为  $(AB)^9$ , 缺陷一维光子晶体模型为  $(AB)^4 C (AB)^4$ , 各向异性一维光子晶体模型为  $(AC)^9$ 。为了研究方便,选取各向异性一维光子晶体的入射面正好垂直于各向异性 D 介质的光轴方向 (如图 1c 所示)。

跟以往的透射型相位补偿器不同,一维光子晶体制相位补偿器的相位补偿原理是利用光子晶体的禁带区间反射光相位差随入射角的变化而改变的特性来实现的。图 2~图 4 分别是无缺陷,有缺陷和各向异性一维光子晶体  $\delta$  和  $P$  与入射角的关系图。这 3 种补偿器的相位调制区间均设置在  $0^\circ \sim 180^\circ$ 。图中各条曲线表示在不同波长入射时所对应的曲线图,具体表示的波长如下:点划线为  $400\text{nm}$ ,虚线为  $410\text{nm}$ ,实线为  $420\text{nm}$ 。以上各种情形中,由于在入射角大于  $20^\circ$  以后

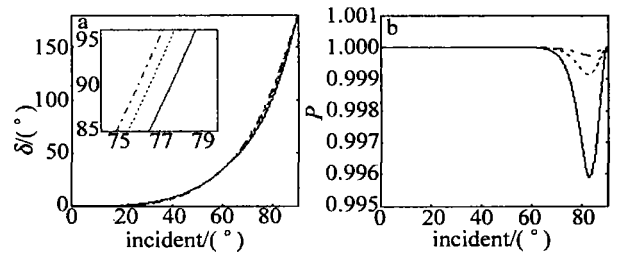


Fig 2 Relation between  $P, \delta$  of 1-D not defect photonic crystal and incident

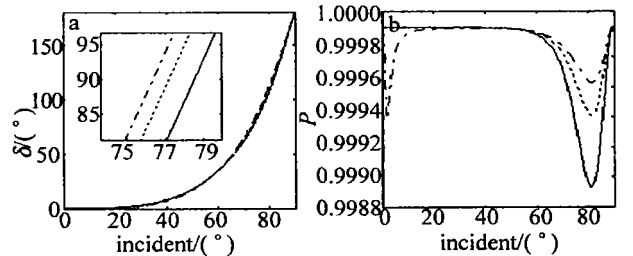
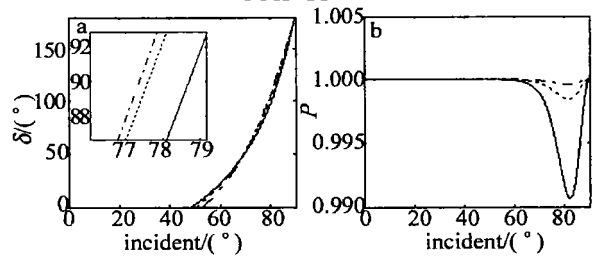


Fig 3 Relation between  $P, \delta$  of 1-D defect photonic crystal and incident



的调制区域内除了各向异性一维光子晶体在  $420\text{nm}$  中 TM 模的反射率仅为  $98.2\%$  以外,其它情形下的 TM 模的反射率均高于  $99\%$ ,而 TE 模则高于  $99.99\%$ ,所以均未在这里画出 TM 模和 TE 模的反射率图。

从图 2~图 4 的相位差  $\delta$  与入射角的关系图知道,用有缺陷的一维光子晶体与无缺陷的一维光子晶体制成的相位补偿器两者的调制曲线非常相近,表明光子禁带中的缺陷模对相位补偿的影响非常小。再者,在同一种结构中,3 种波长入射下的相位差图彼此之间也非常接近。在同一个调制相位下 (例如调制相位为  $90^\circ$ ),最大的入射角差 (从  $400\text{nm}$  所对应的入射角到  $420\text{nm}$  所对应的入射角之差)不到  $2^\circ$ ,而最小的入射角差则在  $1^\circ$  以内。这在实际应用中大大降低了相位补偿器对适用波长的限制性。此外,比较 3 个相位差图明显可以看出,各向异性一维光子晶体制成的相位补偿器具有较好的线性调制相位特性,几乎能够在  $50^\circ \sim 90^\circ$  完成相位  $0^\circ \sim 180^\circ$  的线性调节,而另外两种反射型补偿器在小角度入射时其相位调节则不能看成是线性调制。

同时,根据以上 3 图的  $P$  与入射角的关系图看出, TM 模和 TE 模的振幅系数比的绝对值  $P$  均约等于 1,说明两偏振光的反射振幅在同一个入射角下相差无几,再加上相应的反射率均约等于 1,综合这两个特点得出如下结论:一维光子晶体制反射型相位补偿器的

最大优点是其反射率高,损耗很小且 TM 模和 TE 模的反射振幅几乎相等。而传统的透射型补偿器由于入射光或多或少都有部分被反射以致损失掉一部分能量,所以补偿器的能量转换效率很难达到如此之高。从图中还可以看出,如果入射光波长偏离中心波长  $\lambda_0$  越远,其  $P$  比值在大角度内 ( $70^\circ \sim 90^\circ$ ) 也变得越大。这是因为 TM 模在大角度入射时的禁带宽度要比 TE 模的禁带宽度窄,所以随着入射波长的增加其缓慢偏离了光子禁带区从而使得  $P$  比值随之下降。无缺陷一维光子晶体和有缺陷的一维光子晶体在  $\delta$  图中的调制曲线相差不大,不过在  $P$  图中,在同一种波长入射时,有缺陷的要比无缺陷的更接近于 1。综合以上的结论比较得出:这 3 种光子晶体制成的反射型相位补偿器最佳的是各向异性一维光子晶体,其次是有缺陷的一维光子晶体,再下是无缺陷一维光子晶体。

为进一步了解各向异性一维光子晶体制反射型相位补偿器,画出当调制相位差等于  $90^\circ$  时  $\delta$  和两偏振光反射率  $R$  与入射角的关系图。如果允许误差在  $90^\circ \pm 1^\circ$ , 则允许的入射光波长范围为  $390\text{nm} \sim 412\text{nm}$ , 如图 5 所示。在此波长范围内, TM 模和 TE 模的反射

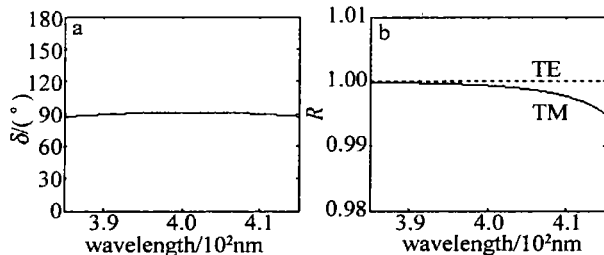


Fig 5 Relation between wave and  $\delta, R$

率均高于 99%。故利用各向异性一维光子晶体制成的反射型相位补偿器具有高反射率,能在一定波长范围内适用的优点。同时也应该清楚地知道,由于各向异性一维光子晶体是用各向同性介质层和各向异性介质层交替叠加而成,其制作工艺远比一般的一维光子

晶体复杂的多,所以这种相位补偿器也有不足的一面。

### 3 结论

设计了 3 种类型的一维光子晶体制反射型相位补偿器。通过各种数据图比较表明,光子晶体制反射型相位补偿器具有高反射率,能适应一定波长范围等优点。此外,各向异性一维光子晶体制相位补偿器相对另外两种较为理想,但是其制作工艺较其它类型要复杂。随着光子晶体研究的深入,用光子晶体材料做成的光电器件也必将越来越多。

### 参考文献

- [1] W NN J N, FAN S, CHEN C *et al* A dielectric omnidirectional reflector [J]. *Science*, 1998, 282 (5394): 1679~1682.
- [2] W NN J N, FAN S, CHEN C *et al* Omnidirectional reflection from a one-dimensional photonic crystal [J]. *Opt Lett*, 1998, 23 (20): 1573~1575.
- [3] DOWLING J P. Mirror on the wall: you're omnidirectional after all [J]. *Science*, 1998, 282 (5395): 1841~1842.
- [4] CHIKRIN D N, LAVR NENKO A V, YAROTSKY D A *et al* Observation of total omnidirectional reflection from a one-dimensional dielectric lattice [J]. *Appl Phys*, 1999, A68 (1): 25~28.
- [5] CHEN KM, SPARKS A W, LUAN H *et al*  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  omnidirectional reflector and microcavity resonator via the sol-gel method [J]. *A P L*, 1999, 75 (24): 3805~3807.
- [6] FANG Y T, SHEN T G, LIN G H. Photo wave propagation in one dimension random photonic crystal [J]. *Laser Technology*, 2004, 28 (2): 153~155 (in Chinese).
- [7] PRADHAN R D, WATSON G H. Impurity effect in coaxial-connector photonic crystals: a quasi-one-dimensional periodic system [J]. *Phys Rev*, 1999, B60 (4): 2410~2415.
- [8] YU I Ch, LIL M, ZHAO Q *et al* Resonant energy transfer between two defects in a photonic-band-gap system [J]. *Phys Rev*, 1999, B60 (11): 8050~8054.
- [9] FELBACGD, GUZAL B, ZOLLA F. Ultra-refraction phenomena in Bragg mirrors [J]. *J Optics*, 2000, A2 (5): 30~32.
- [10] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. Beijing: Science Press, 1978. 82~101 (in Chinese).

· 简 讯 ·

请向邮局订阅 2007年度《激光技术》

国内统一刊号: CN51-1125/TN, 邮发代号: 62-74