

文章编号:1672-058X(2012)01-0049-04

一维三元光子晶体的偏振特性

唐裕霞

(重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院,重庆 400067)

摘要:利用特征矩阵法讨论了一维三元光子晶体的偏振特性。结果表明,在一级禁带内,光子晶体对 S 偏振光形成了全方位光子带隙;对 P 偏振光,禁带宽度随入射角的增大而减小,且只在禁带短波区域形成全方位光子带隙,而在禁带长波区域,随着入射角的变化将出现透射峰,存在明显的“广义布儒斯特角”,各波长对应的“广义布儒斯特角”随波长增大而减小,透射峰半角宽度增大,透射峰个数逐渐增加。

关键词:光子晶体;光子带隙;偏振特性;广义布儒斯特角

中图分类号:O436

文献标志码:A

1987 年 E. Yablonovitch 和 S. John 提出光子晶体概念以来^[1,2],人们对光子晶体进行了深入的研究。光子晶体是一种折射率在空间周期性变化的人造材料。它的一个显著特点就是存在光子频率禁带,简称光子禁带。如果光的频率落在禁带内,则光在光子晶体中的传播将被禁止。目前,研究一维光子晶体的方法最常用的是传输矩阵法,主要集中在对一维二元光子晶体的很多重要性质如禁带特性、掺杂后缺陷态特性和偏振特性的研究^[3-8],而对一维三元光子晶体的特性(尤其偏振特性)研究很少^[9,10],而偏振特性是光学元件的重要性能参数,光子晶体作为一种新型的光学元件材料,对其偏振特性的研究就显得非常必要。在此把计算一维二元光子晶体的传输矩阵法推广到一维三元光子晶体,研究了一维三元光子晶体对两种偏振光(S 偏振光和 P 偏振光)的偏振特性以及光子晶体的折射率对偏振特性的影响,为光子晶体设计成光学元件提供了一定的理论依据。

1 计算模型

在此计算所用的一维三元光子晶体结构如图 1 所示。它是由三层介质 a 、 b 、 c 一维周期性堆叠组成,结构为 $(abc)^N$,介质周期数为 N 。 a 、 b 、 c 的折射率分别为 n_1 、 n_2 、 n_3 ,厚度分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 。

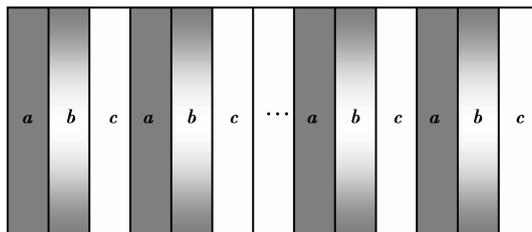


图 1 一维三元光子晶体结构

根据薄膜光学理论,光在每层介质中的传输特性,可用光在该层的特征矩阵表示^[11],对于介质 a ,其特征矩阵 M_a 可表示为:

$$M_a = \begin{bmatrix} \cos \delta_a & i \sin \delta_a / p_a \\ ip_a \sin \delta_a & \cos \delta_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中, $\delta_a = 2\pi n_a d_a \cos \theta_a / \lambda$, θ_a 是光线在 a 介质层中与界面法线方向的夹角, λ 为入射光的波长。

$$p_a = \begin{cases} n_a \cos \theta_a & \text{TE 波 (S 偏振光)} \\ \cos \theta_a / n_a & \text{TM 波 (P 偏振光)} \end{cases} \quad (2)$$

其他介质层的特征矩阵和式(1)完全一致,只需把上述表达式中所有下标作相应的替换即可。对于上述一维三元光子晶体的总特征矩阵为:

$$M = (M_a M_b M_c)^N = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

若此一维三元光子晶体处于折射率为 n_0 的空气中,则当光入射到光子晶体上时,其对入射光的反射系数^[11]、反射率、透射率分别为:

$$r = \frac{(M_{11} + M_{12}p_0)p_0 - (M_{21} + M_{22}p_0)}{(M_{11} + M_{12}p_0)p_0 + (M_{21} + M_{22}p_0)} \quad (4)$$

$$R = |r|^2 \quad (5)$$

$$T = 1 - R \quad (6)$$

2 计算结果及分析

计算中 3 种介质分别取 GaAs、AlAs 和 SiO₂,其折射率分别为 3.6、2.95 和 1.48,各介质层的几何厚度分别取为 40 nm、50 nm 和 90 nm, N 取 10。

2.1 S 偏振光和 P 偏振光的能带结构

当光垂直入射到光子晶体上时,S 偏振光和 P 偏振光的反射率 R 随入射波长 λ 的响应曲线(即光子晶体的能带结构)如图 2 所示。由图可见,当光垂直入射时,S 偏振光和 P 偏振光的能带结构几乎完全相同。两偏振光能带中有两个明显的禁带,一级禁带很宽,在 700 ~ 1 126 nm,禁带宽度为 $\Delta\lambda = 426$ nm;二级禁带位于 378 ~ 480 nm,宽度为 $\Delta\lambda = 102$ nm。后面只讨论光子晶体一级禁带中的偏振特性。

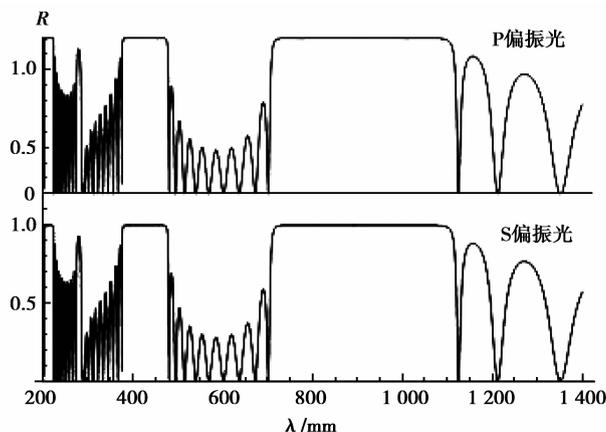


图 2 反射率随波长的响应曲线

2.2 S 偏振光禁带结构对入射角的响应

对于 S 偏振光,改变光波的入射波长或改变入射角角度,研究不同波长光的反射率随入射角 θ_0 的变化特征。图 3 为不同波长的 S 偏振光入射时光子晶体的透射率随入射角变化的立体图。由图可看出,S 偏振光以不同入射角入射时,光子晶体都有一个较宽的一级禁带,只是随着入射角的增大,一级禁带整体向短波方向约有移动,但禁带宽度却几乎没有变化。而且一级禁带内,波长处于 730 ~ 1 050 nm 的 S 偏振光,当波长不变时,不管入射角在 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 内如何变化,光子晶体对该 S 偏振光的透射率均为 0,反射率均为 1,即光子晶体对于该波段 S 偏振光形成了不受入射角影响的全方位光子带隙。

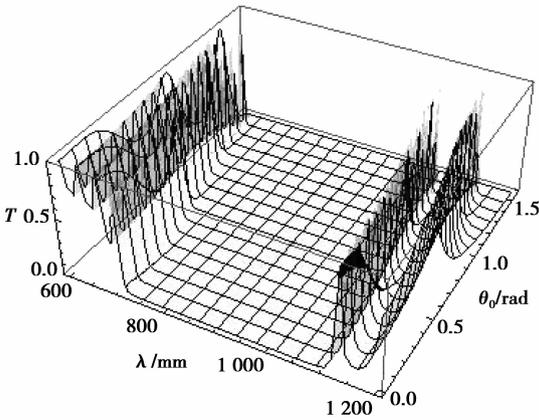


图 3 透射率随入射角变化的立体图(S 偏振光)

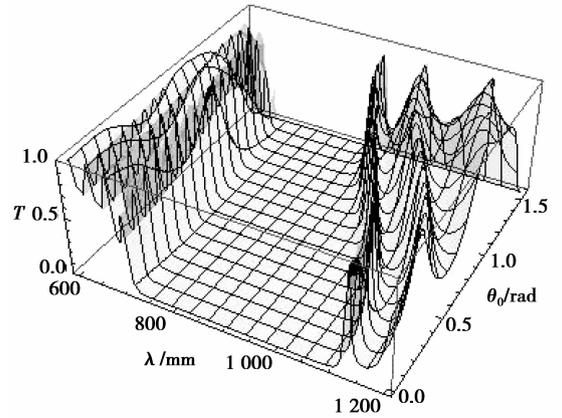


图 4 透射率随入射角变化的立体图(P 偏振光)

2.3 P 偏振光禁带结构对入射角的响应

图 4 为不同波长的 P 偏振光入射时光子晶体的透射率随入射角变化的立体图。由图中可看出,P 偏振光以不同角度入射时,光子晶体的一级禁带宽度变化较大。随着入射角的增大,一级禁带短波边缘位置变化很小,但是其长波边缘位置发生明显的蓝移,禁带宽度减小。波长在一级禁带的短波区域(730 ~ 855 nm)的 P 偏振光,不管入射角在 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 内如何变化,透射率都为 0,形成光子全方位带隙。由上所述,这一波段的 S 偏振光也是全部被反射,说明光子晶体对于波长在 730 ~ 855 nm 的入射光形成了全方位光子带隙。在禁带的长波区域(波长大于 855 nm),随着入射角的变化出现了透射峰。

为具体讨论光子晶体的这种偏振特性,不改变各介质的几何厚度和折射率情况下,在此重点讨论在 860 ~ 1 100 nm 波段内不同入射波长下光子晶体的透射率随入射角的变化规律。

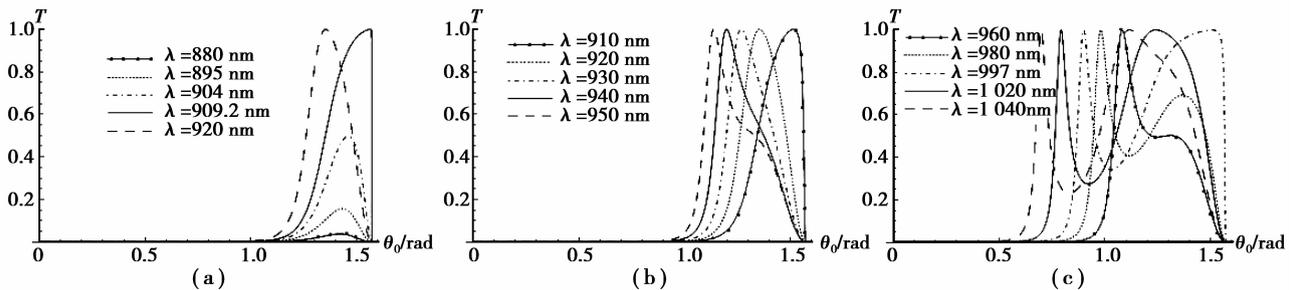


图 5 不同入射波长下透射率随入射角的响应曲线

图 5 为不同波长下透射率随入射角的变化曲线。如图 5(a) 所示,尽管每一波长出现透射峰的入射角不同,但总体来看,随着 P 偏振光入射波长的增大,光子晶体的透射率也在迅速增大。当波长为 904 nm 时,光子晶体透射率最大达到 0.5,当波长为 909.2 nm,入射角 $\theta_0 = 1.559 \text{ rad}$ (掠入射状态)时,透射率达到 1。计

算发现,当波长大于 909.2 nm 时,对应每个入射波长,都存在一个峰值为 1 的透射峰。若光以透射峰值为 1 所对应的入射角入射到光子晶体上时,在反射光中就没有 P 偏振光,只有 S 偏振光,反射光成为线偏振光,达到起偏的效果。这个角就是“广义布儒斯特角”^[11]。

由图 5(b) 可看出,每个波长的“广义布儒斯特角”随着入射波长的增大而减小。波长为 910 nm、920 nm、930 nm、940 nm 和 950 nm 的 P 偏振光入射光子晶体时,透射峰的半角宽度分别为 0.214 rad、0.225 rad、0.230 rad、0.235 rad 和 0.251 rad,透射峰的半角宽度虽变化不大,但仍将随着入射波长的增加而增大。当波长为 950 nm 时,半角宽度变得很宽,透射峰右侧呈阶梯状。

对应波长更长的 P 偏振光,随着波长的进一步增大,光子晶体的透射峰开始分裂,出现两个透射峰,如图 5(c) 所示。当波长为 997 nm 时,两个透射峰的峰值均达到 1,第一个透射峰位置在 0.903 rad,半角宽度 0.089 rad,第二个透射峰位置在 1.515 rad,半角宽度 0.423 rad,比第一个透射峰的半角宽度大得多。随波长增大,两透射峰峰值所对应的“广义布儒斯特角”均随着波长的增大而逐渐减小,各峰的半角宽度变化不大,另外,第二个透射峰随波长增大又会逐渐分成两个透射峰。可见,随着波长增大,透射峰的个数也在逐渐增加,已计算出,此处没有列出,但可由图 4 看出变化趋势。

3 结 论

利用传输矩阵法,研究了一维三元光子晶体的偏振特性。研究表明,一维三元光子晶体具有较宽的一级禁带。在一级禁带内,光子晶体对于波长落在 730 ~ 1 050 nm 内的 S 偏振光形成了不受入射角影响的全方位光子带隙。而对于 P 偏振光,随入射角的增大,一级禁带边缘(尤其时长波边缘)位置发生蓝移,带隙变窄,且光子晶体在禁带的短波区域(即 730 ~ 855 nm 波段)形成全方位光子带隙,因此,这种结构的光子晶体存在一个 730 ~ 855 nm 波段的全方位带隙;在禁带的长波区域(波长大于 855 nm),随着入射角的变化出现了透射峰。进一步研究表明,不改变各介质的几何厚度和折射率情况下,当波长大于 909.2 nm 的 P 偏振光入射光子晶体时存在明显的“广义布儒斯特角”,各波长对应的“广义布儒斯特角”随波长增大而减小,透射峰半角宽度增大,透射峰个数逐渐增加。一维三元光子晶体的上述偏振特性,对于设计光子晶体反射镜、近红外波段的光子晶体偏振器件等提供了重要的理论依据。

参考文献:

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission solid - state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett,1987,58(2):2059-2061
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys Rev Lett,1987,58(2):2486-2489
- [3] 张铃,梁良,张琳丽,等. 一维光子晶体带隙结构研究[J]. 光子学报,2008,37(9):1815-1818
- [4] 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
- [5] 李蓉,任坤,任晓斌,等. 一维光子晶体带隙结构对不同偏振态的角度和波长响应[J]. 物理学报,2004,53(8):2520-2524
- [6] 陈征,王涛. 一维光子晶体缺陷膜的偏振特性研究[J]. 光子学报,2007,36(12):4421-4425
- [7] 刘启能. 一维光子晶体的偏振特性[J]. 半导体光电,2006,27(6):729-732
- [8] 刘启能. 一维掺杂光子晶体的缺陷膜和偏振特性研究[J]. 激光杂志,2007,28(1):37-38
- [9] 李文胜,付艳华,是度芳. 一维三元光子晶体缺陷膜的特性研究[J]. 量子光学学报,2010,16(2):134-139
- [10] 陈海波,高英俊,韩军婷. 光学厚度对一维三元光子晶体禁带特性的影响[J]. 光子学报,2008,37(11):2210-2212
- [11] 马科斯·波恩,埃米尔·沃耳夫. 光学原理(第七版)[M]. 北京:电子工业出版社,2005