

文章编号: 1001-3806(2012)01-0016-03

入射角对光子量子阱束缚态影响的研究

陈海波¹ 胡素梅¹ 高英俊²

(1. 广东石油化工学院 物理系, 茂名 525000; 2. 广西大学 物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

摘要: 为了探讨入射角对光子量子阱传输特性的影响, 用传输矩阵法计算了不同入射角对光子量子阱结构的传输特性, 得到了光子量子阱能应用于多通道滤波和光开关的结论。结果表明, 光子的束缚效应将导致频率的量子化, 通过微小地改变入射角可改变束缚态的频率, 且入射角的变化与束缚态频率的变化呈3次多项式关系。此结果为该结构实现多通道滤波和方位开关提供了理论依据, 也为得到所需要的束缚态频率提供了理论基础。

关键词: 物理光学; 光子量子阱; 入射角; 多通道滤波; 方位开关

中图分类号: O431 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.005

Study on effect of incident angles on the confined state for PQW structure

CHEN Hai-bo¹, HU Su-mei¹, GAO Ying-jun²

(1. Department of Physics, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China; 2. College of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to study effect of incident angles on the optical transmission properties of photonic quantum well (PQW) structure, the optical transmission properties at different incident angles were studied based on the optical transfer matrix. A conclusion can be drawn that PQW structure can be applied to multi-channelled filters and orientation switching. The calculation results show that the frequency is quantized by confined effect. The frequency of confined state can be changed by changing the incident angles. The dependence of the change of confined frequency for PQW structure on each incident angle is third-order relationship. The results might be used to multi-channelled filters and orientation switching. It provides theoretical basis for obtaining the desired frequency of confined state.

Key words: physical optics; photonic quantum well; incident angles; multi-channelled filters; orientation switching

引言

光子晶体是介电常数(或折射率)周期性变化的材料,“光子禁带”和“光子局域”是光子晶体的两个主要特征。频率落在禁带中的光被禁止传播^[1-2]。利用这些特性,光子晶体可制作光开关、光学延迟线、光滤波器等^[3-6]。将不同光子带隙的光子晶体组合在一起可形成光子量子阱结构。如阱的光子带隙出现在垒中,可观察到局域的束缚态,这些量子化的束缚态可形成多通道滤波^[7]。在光子晶体量子阱中,可以通过改变组成光子晶体材料的折射率来控制光子量子阱中束缚态的位置,进而形成光开关^[8-9]。入射角很明显会影响光子量子阱结构束缚态的位置,如要得到所需要的束缚态,系统地讨论入射角对光子量子阱结构束缚态影响非常必要。且光子晶体制成后结构很难调节,人们还是希望通过改变外部条

件来调节光子晶体的光传输特性。作者通过数值模拟入射角对光子量子阱结构的带隙特性的影响,得出了入射角的变化与光子晶体束缚态位置变化的关系,进而为光子量子阱结构实现方位开关提供了理论依据。

1 结构模型

研究的光子量子阱结构由两个不同的1维光子晶体组成。第1个光子晶体结构包含了两个交替排列的介电层A和B。这两个介电层的介电常数和厚度如下: $\epsilon_A = 8.7616$, $\epsilon_B = 1$, $d_A = 0.95a$, $d_B = 0.5a$, 这里的参量 a 为晶格常数。第2个光子晶体的介电常数和厚度分别为 $\epsilon_C = 5.5225$, $\epsilon_D = 1$, $d_C = 0.95a$, $d_D = 0.5a$ 。组成光子量子阱结构的光子晶体组分的堆积方式类似于半导体量子阱,也就是 $(AB)_m(CD)_n(AB)_m$ 结构,这里 m 和 n 分别是AB层和CD层的周期数。

2 数值结果模拟与分析

2.1 光子量子阱结构的透射谱

用传输矩阵法计算出的 $(AB)_5(CD)_n(AB)_5$ ($n =$

作者简介: 陈海波(1977-),男,硕士,高级实验师,主要从事光信息材料的研究。

E-mail: chbnihao0923@163.com

收稿日期: 2011-05-03; 收到修改稿日期: 2011-06-21

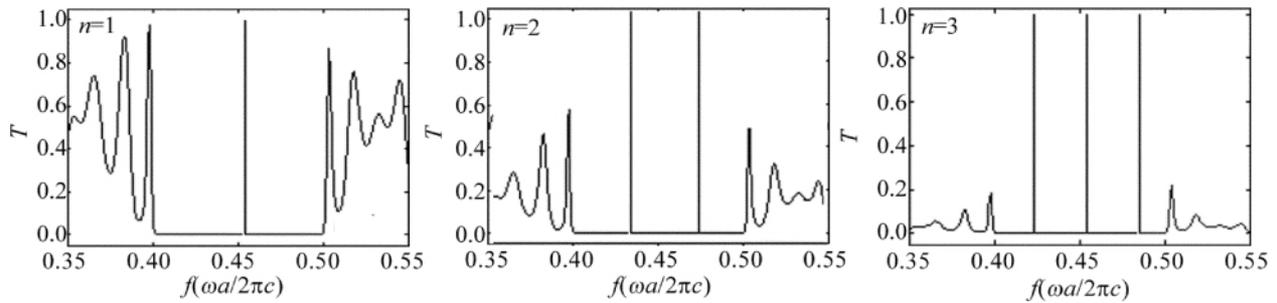


Fig. 1 Transmittance spectrum for PQW structure $(AB)_5(CD)_n(AB)_5$ ($n=1 \sim 3$)

1~3) 光子量子阱结构的透射谱如图 1 所示。由图可知 在光子量子阱结构的带隙内出现了透射率都为 1 的尖锐的透射峰 这些锐峰在很多方面类似于掺入缺陷的常规光子晶体的缺陷态。但是由于光子的束缚效应 在光子量子阱结构中它们代表的是束缚态。而这些束缚态通过光子量子阱结构时,不是一种常规方式而是通过隧道贯穿,所以这些束缚态能完全透过光子量子阱结构。同时发现透射峰的个数恰好等于 CD 层的周期数,故对于光子量子阱结构,可以通过简单地调整

CD 层的数目来得到所需要的缺陷态的数目。由于束缚态可以应用到滤波器中,因此这种特性具有重要的技术应用,光子量子阱结构可以应用于多通道频率滤波器,这一点在通信设备中非常重要。入射光的方向很明显会影响束缚态的位置。

2.2 束缚态对入射光方向的响应

为讨论方便,作为例子,以下讨论入射角对 $(AB)_5(CD)(AB)_5$ 光子量子阱结构中束缚态的影响。图 2 中绘出了 TE 光入射角 θ 分别为 0rad, 0.15rad 和 0.3rad

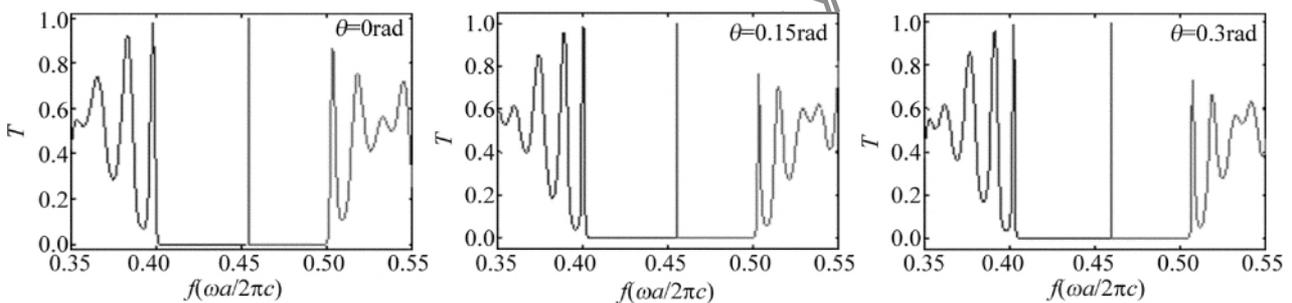


Fig. 2 Transmittance spectrum for PQW structure $(AB)_5(CD)(AB)_5$ at different incident angles

时光子量子阱结构 $(AB)_5(CD)(AB)_5$ 的透射谱。由图 2 可知 随着入射角增大,光子晶体的带隙逐渐变宽。当入射角 θ 分别为 0rad, 0.15rad 和 0.3rad 时,该结构的完全共振透射峰的归一化频率分别为 0.4539, 0.4592 和 0.4752,说明随着入射角的增大,束缚态向高频方向移动。

图 3 是缩小频率范围绘出的束缚态随 TE 光和 TM 光入射角变化的关系曲线。从图 3 可以看出,束缚态的位置对入射角的变化非常敏感,只要入射角增加了一个很小的量,束缚态的透射峰就向高频方向有一个较大的偏移,从而使得原来的局域束缚态的透射率急剧下降。当束缚态的透射率减为原来的 0.09% 时,便可形成方向开关。从图 3 还可看出,对于光子量子阱结构,TE 光和 TM 光入射时,束缚态随入射角变化的关系相同,说明束缚态的偏振现象不明显。

为了更清晰地体现入射角连续变化时与束缚态的变化关系,图 4 中绘出了 TE 光和 TM 光入射角的变化与束缚态变化的立体图。从图 4 可以看出,光子量子阱结构透射谱中,入射角变化与透射峰频率的变化呈多项式曲线关系,说明入射角变化越大,束缚态的频率偏

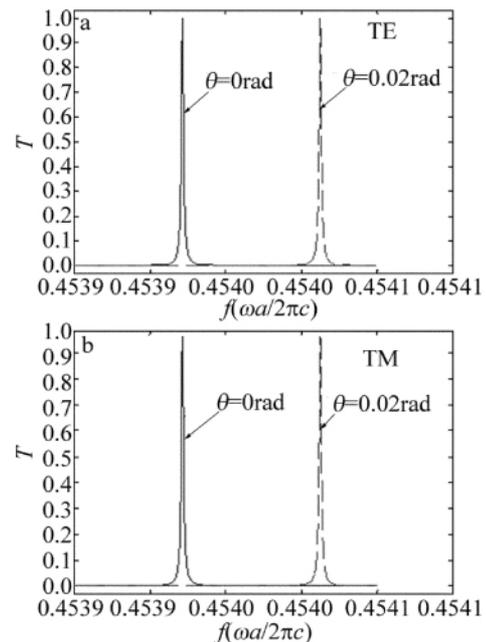


Fig. 3 Dependence of the confined state for $(AB)_5(CD)(AB)$ PQW structure on incident angles change

移越大。这是因为改变入射光的入射角,也就改变了光通过各介质的位相和导纳,引起光子晶体导通带移

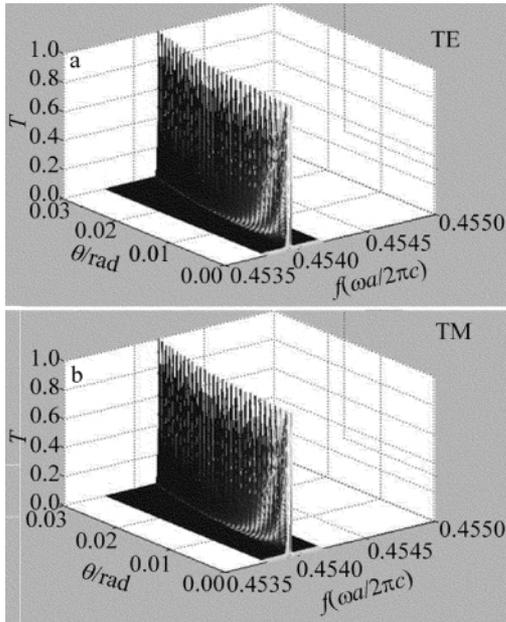


Fig. 4 The 3-D drawing of the confined state for $(AB)_5(CD)_n(AB)_5$ PQW structure on incident angles

光子晶体导通带可以位于垒光子晶体禁带的不同波段。束缚态可伴随阱光子晶体导通带在垒光子晶体禁带中移动,从而可实现对束缚态频率的调整。从图4a和图4b可知,TE光与TM光入射时对束缚态的影响相同。从图3及图4也可以看出,可通过改变入射角来改变光通过各介质的位相和导纳,进而得到所需要的束缚态的频率。因为在一个全光网络系统中,通道位置和品质因子 Q 对滤波器都是很重要的,这在光通信系统中对设计双通道滤波器具有很重要的意义。并且光子晶体一旦形成后,结构参量很难改变,通过改变外部条件来实现对光子晶体束缚态的调整是一种有效的方法。

图5中进一步地给出了入射角的变化量与束缚态偏移量的关系。图中假设入射光为TE波,从图5可以看出,通过多项式拟合,光子晶体束缚态的归一化频率与入射角的变化关系为 $f = 0.45385 + 0.00843\theta + 0.1605\theta^2 + 0.15373\theta^3$,说明各介质的入射角变化越大,束缚态的频率偏移越大。因此,可以微小地调节入射角的方向来微小地改变束缚态的频率,即通过改变入射角的方向来得到所需要的束缚态。同时也可以由束缚态的归一化频率来计算入射角。

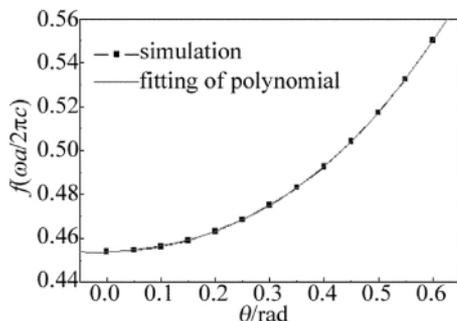


Fig. 5 Dependence of the frequency of confined state on incident angles

3 结论

用传输矩阵法计算了光子晶体结构的光传输特性。计算结果表明:光子晶体结构 $(AB)_5(CD)_n(AB)_5$ 的禁带出现 $n-1$ 个完全共振透射峰。此现象为该结构实现多通道滤波器提供了理论基础。

光子晶体结构中入射角很明显会影响共振透射峰的位置。通过控制入射角来微小改变入射光的位相和导纳,使得完全共振透射峰移动。且入射角的变化与透射峰归一化频率的变化呈多项式曲线关系。经计算,光子晶体结构束缚态的归一化频率与入射角的变化关系为 $f = 0.45385 + 0.00843\theta + 0.1605\theta^2 + 0.15373\theta^3$,说明各介质的入射角变化越大,束缚态的频率偏移越大。因此,可以微小地调节入射角的方向来微小地改变束缚态的频率,即通过改变入射角的方向来得到所需要的束缚态。同时也可以由束缚态的归一化频率来计算入射角。此结果为该结构实现方位开关提供了理论基础,也为设计所需要的共振透射峰波长的多通道滤波器提供了理论依据。这在光通信系统中具有重要的意义,因为光子晶体一旦形成后,结构参量很难改变,通过改变外部条件来实现对光子晶体束缚态的调整是一种有效的方法。

参考文献

- [1] NODA S, CHUTINAN A, IMADA M. Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure [J]. *Nature*, 2000, 407(6804): 608-610.
- [2] MASSAOUD I S, de LUSTRAC A, HUYNEN I. Properties of metallic photonic band gap material with defect at micro-wave frequencies: calculation and experimental verification [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applied* 2006, 20(14): 1967-1980.
- [3] AKAHANE Y, MOCHIZUKI M, ASNNO T, et al. Design of a channel drop filter by using a donor-type cavity with high-quality factor in a two-dimensional photonic crystal slab [J]. *Applied Physics Letters* 2003, 82(9): 1341-1343.
- [4] AKAHANE Y, ASNNO T, SONG B S, et al. Investigation of high-Q channel drop filter by using a donor-type defects in two-dimensional photonic crystal slabs [J]. *Applied Physics Letters* 2003, 83(8): 1512-1514.
- [5] YANIKM F, FAN S. All-optical transistor action with bistable switching in a photonic crystal cross-waveguide geometry [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(24): 2506-2508.
- [6] CHOW E, LIU S Y, JOHNSON S G, et al. Three-dimensional control of light in a two-dimensional photonic crystal slab [J]. *Nature*, 2000, 407(6807): 983-986.
- [7] QIAO F, ZHANG C, WANG J, et al. Photonic quantum-well structures: multiple channeled filtering phenomena [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(23): 3698-3702.
- [8] HU Sh L, XU X M, YU T B. The single filtering and multiple channeled switches in photonic quantum-well structures [J]. *Acta Photonica Sinica* 2004, 33(8): 1004-1006 (in Chinese).
- [9] CHEN H B, HU S M, GAO Y J. Effect of dielectric constant and thickness on the confined state in a photonic quantum well structure [J]. *Laser Technology* 2010, 34(1): 37-40 (in Chinese).