

文章编号: 1001-3806(2010)03-0363-04

平板掺杂光子晶体中电磁波的缺陷模

刘启能, 龙涛, 林睿, 胡莉

(重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067)

摘要: 为了研究1维平板掺杂光子晶体中电磁波的模式及其缺陷模特性,推导出1维平板掺杂光子晶体中电磁波的模式满足的条件,利用特征矩阵法计算出TE波和TM波各模式的缺陷模随模式量子数和平板厚度的变化规律,得出了一些不同于1维非受限掺杂光子晶体缺陷模的新特征。结果表明,电磁波的模式由模式量子数确定,缺陷模与模式量子数和平板厚度有关。

关键词: 光电子学;光子晶体;受限;缺陷模;特征矩阵

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.022

Defect modes of electromagnetic wave in a flat-panel doping photonic crystal

LIU Qi-neng, LONG Tao, LIN Rui, HU Li

(School of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: In order to study the mode and defect mode of electromagnetic wave in a flat-panel doping photonic crystal, the conditions of each electromagnetic wave mode were deduced. The defect modes of TE wave and TM wave were calculated by means of the characteristic matrix method. The new defect mode structure of flat-panel doping photonic crystal was obtained. A conclusion was made that the mode of electromagnetic wave was determined by the quantum number of modes and the defect mode was determined by the quantum number of mode and the thickness of the flat-panel.

Key words: optoelectronics; photonic crystal; restrictions; defect mode; characteristic matrix

引言

光子晶体的概念自1987年分别由JOHN和YABLONOVITCH提出后,由于光子晶体在带隙方面的特殊性质,使它很快成为光学前沿领域中一个十分活跃的研究课题。近年来,人们已对光子晶体开展了广泛、深入的研究^[1-12],但在这些研究中都把1维光子晶体作为横向非受限来处理,而真实的光子晶体是有一定外形,它的横向受到一定的外形限制,这种限制必然会影响电磁波在其中的传输模式和带隙机构。因此,研究1维光子晶体的横向受限问题对弄清真实的1维光子晶体的特性有着十分重要的理论价值和应用价值。最近,SONG等人^[13]对1维光子晶体横向受限的问题作了一些研究,取得了一些成果,但仍有许多重要问题有待深入研究。本文将研究一种典型的1维横向受限掺杂光子晶体——1维平板掺杂光子晶体中电

磁波的模式和缺陷模。

1 模型和计算方法

1维平板掺杂光子晶体的结构如图1所示,沿z轴方向是由折射率为 $n_1 = 1.3$ (氟化钠)厚度为 d_1 和折射率为 $n_2 = 2.38$ (硫化锌)、厚度为 d_2 的两种介质周期性地交替构成,中间掺了1层厚度为 d_3 、折射率为 $n_3 = 1.8$ (氧化铝)的杂质。 y 轴垂直于纸面,平板的上下表面平行于 $y-O-z$ 面,平板的厚度 h 沿 x 轴方向。设该1维平板掺杂光子晶体的宽度远大于厚度,可以认为电磁波在该1维平板掺杂光子晶体中的 x 方向受限,而在 y 方向不受限。入射和出射空间的折射率为 n_0 。

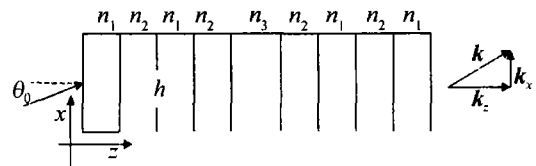


Fig. 1 The 1-D flat-panel doping photonic crystal

由于电磁波在 x 方向受限,所以,在该1维平板掺杂光子晶体中传播的电磁波其波矢 \mathbf{k} ($k = n\omega/(2\pi c)$, ω 为圆频率、 c 为光速、 n 为折射率)的 x 分量 k_x 必须满足驻波条件:

$$k_x = J/(2h), (J = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

基金项目: 重庆市教委科技项目基金资助项目 (KJ080720)

作者简介: 刘启能(1957-),男,教授,主要从事光学与原子分子物理的研究。

E-mail: liuqineng@yahoo.com.cn

收稿日期: 2009-03-31; 收到修改稿日期: 2009-05-11

J 取一个值,对应于电磁波的一个模式,因此把 J 称为模式量子数。其中 $J=0$ 对应正入射, $J>0$ 对应斜入射。由(1)式可知,在1维平板掺杂光子晶体的传播的电磁波存在多个 k_x 分离的模式,这个特征是非受限1维光子晶体中没有的。

在介质 n_1 中有:

$$k_{1x} = \frac{n_1\omega}{2\pi c} \sin\theta_1 = \frac{J_1}{2h}, (J_1 = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

在介质 n_2 中有:

$$k_{2x} = \frac{n_2\omega}{2\pi c} \sin\theta_2 = \frac{J_2}{2h}, (J_2 = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

在介质 n_3 中有:

$$k_{3x} = \frac{n_3\omega}{2\pi c} \sin\theta_3 = \frac{J_3}{2h}, (J_3 = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

式中, θ 为波矢 \mathbf{k} 与 z 轴的夹角,利用折射定率 $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 = n_3 \sin\theta_3$,可以得到:

$$J_1 = J_2 = J_3 = J, (J = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

(5)式表明,在介质 n_1 、介质 n_2 和介质 n_3 中电磁波的模式是相同的,可以用同一个模式量子数 J 来表示。

介质 n_1 、介质 n_2 和介质 n_3 中波矢 \mathbf{k} 的 z 分量 k_z 可以分别表示为:

$$\begin{cases} k_{1z}^2 = \left(\frac{n_1\omega}{2\pi c} \cos\theta_1\right)^2 = \left(\frac{n_1\omega}{2\pi c}\right)^2 - \left(\frac{J}{2h}\right)^2 \\ k_{2z}^2 = \left(\frac{n_2\omega}{2\pi c} \cos\theta_2\right)^2 = \left(\frac{n_2\omega}{2\pi c}\right)^2 - \left(\frac{J}{2h}\right)^2, (J = 0, 1, 2, 3, \dots) \\ k_{3z}^2 = \left(\frac{n_3\omega}{2\pi c} \cos\theta_3\right)^2 = \left(\frac{n_3\omega}{2\pi c}\right)^2 - \left(\frac{J}{2h}\right)^2 \end{cases} \quad (6)$$

由上式可以解出 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 与模式量子数 J 的关系:

$$\begin{cases} \cos\theta_1^2 = 1 - \left(\frac{\pi c J}{n_1 \omega h}\right)^2 \\ \cos\theta_2^2 = 1 - \left(\frac{\pi c J}{n_2 \omega h}\right)^2, (J = 0, 1, 2, 3, \dots) \\ \cos\theta_3^2 = 1 - \left(\frac{\pi c J}{n_3 \omega h}\right)^2 \end{cases} \quad (7)$$

有了(7)式,就可以利用特征矩阵法计算该1维平板掺杂光子晶体中各个模式电磁波的缺陷模了。

由薄膜光学理论,电磁波在薄层介质 n_j 中的特征矩阵 M_j 为:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos\delta_j & -\frac{i}{p_j} \sin\delta_j \\ -ip_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix}, (j = 1, 2, 3) \quad (8)$$

式中,

$$\delta_j = (2\pi/\lambda) n_j d_j \cos\theta_j, (j = 1, 2, 3) \quad (9)$$

$$p_j = \begin{cases} n_j \cos\theta_j, (\text{TE 波}) \\ \cos\theta_j/n_j, (\text{TM 波}) \end{cases}, (j = 1, 2, 3) \quad (10)$$

(9)式和(10)式中的 $\cos\theta_j$ 由(7)式给出。

1维平板掺杂光子晶体的整体特征矩阵 M 为:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = (M_1 M_2)^N M_3 (M_2 M_1)^N \quad (11)$$

式中, N 为周期数,1维平板掺杂光子晶体对电磁波的透射系数 t 为:

$$t = \frac{2n_0}{(M_{11} + M_{12}n_0)n_0 + (M_{21} + M_{22}n_0)} \quad (12)$$

其透射率 T 为:

$$T = |t|^2 \quad (13)$$

利用(7)式~(9)式可以计算该1维平板掺杂光子晶体中电磁波各个模式的缺陷模。

2 缺陷模的特征

从前面的分析可知:由于电磁波在该1维平板掺杂光子晶体中的 x 方向受限,使得其缺陷模与非受限光子晶体中电磁波的缺陷模相比有了新的特征。这些新特征最主要表现为:1维平板掺杂光子晶体中电磁波的缺陷模会受模式量子数和平板厚度的影响。下面就研究模式量子数和平板厚度对该1维平板掺杂光子晶体中电磁波的缺陷模的影响。计算中,周期数取 $N=5$,中心波长取 $\lambda_0 = 1500\text{nm}$, $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0/4$, $n_3 d_3 = \lambda_0/2$,中心圆频率 $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$,设归一化频率 $g = \omega/\omega_0$ 。

2.1 缺陷模随模式量子数的变化

固定平板厚度 $h = 4\lambda_0$,取模式量子数 J 为0,3,6,计算出TE波和TM波的透射率 T 随归一化频率 g 的响应曲线,分别见图2和图3。图2b和图3b分别是

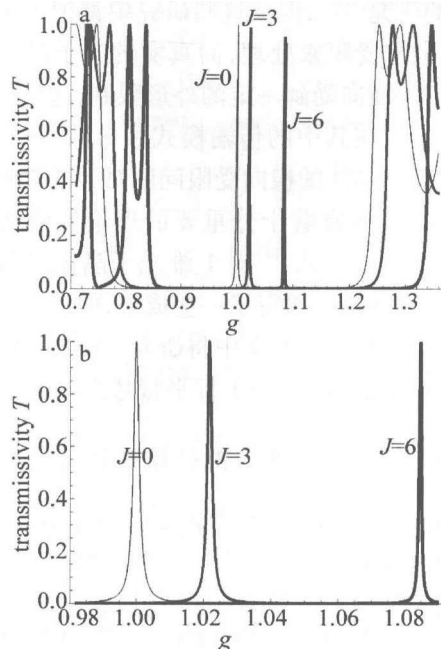


Fig. 2 Response curves of the transmissivity versus g (TE wave)

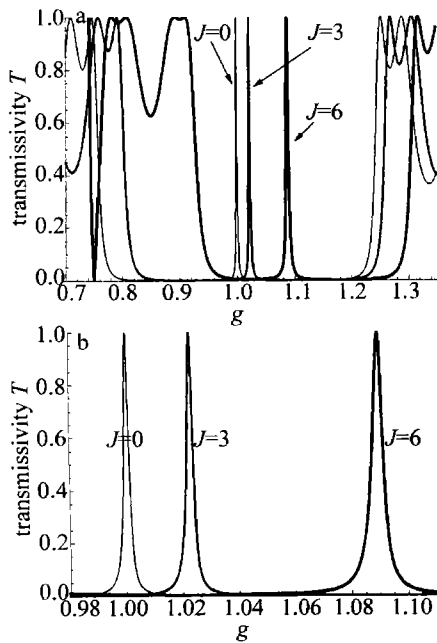


Fig. 3 Response curves of the transmissivity versus g (TM wave)

图2a和图3a中0.98~1.10部分的放大图。在图2和图3中,细线、中粗线、粗线分别表示 J 为0,3,6的情况。由图2和图3可知:(1)对于TE波和TM波,模式量子数 J 为0,3,6时,在禁带的中间都出现了一个缺陷模,这表明TE波和TM波的各个模式都会出现缺陷模;(2)对于TE波, $J=0$ 的模式的缺陷模的频率中心在 $g=1.00$ 处, $J=3$ 的模式的缺陷模的频率中心在 $g=1.021$ 处, $J=6$ 的模式的缺陷模的频率中心在 $g=1.084$ 处,即各模式的缺陷模的频率中心随模式量子数的增加而增大;对于TM波,各模式的缺陷模的频率中心也随模式量子数的增加而增大;(3)对于TE波: $J=0$ 的模式的缺陷模的半峰全宽 $\Delta g=0.0025$, $J=3$ 的模式的缺陷模的半峰全宽 $\Delta g=0.0020$, $J=6$ 的模式的缺陷模的半峰全宽 $\Delta g=0.0010$,即各模式的缺陷模的半峰全宽随模式量子数的增加而减小;对于TM波, $J=0$ 的模式的缺陷模的半峰全宽 $\Delta g=0.0025$, $J=3$ 的模式的缺陷模的半峰全宽 $\Delta g=0.0035$, $J=6$ 的模式的缺陷模的半峰全宽 $\Delta g=0.0040$,即各模式的缺陷模的半峰全宽随模式量子数的增加而增大,这与TE波相反。

上述缺陷模随模式量子数的变化特征是1维非受限掺杂光子晶体中电磁波的缺陷模不具有的。

2.2 缺陷模随平板厚度的变化

固定模式量子数 $J=5$,平板厚度取 $3\lambda_0, 6\lambda_0, 9\lambda_0$ 计算出TE波和TM波的透射率 T 随归一化频率 g 的响应曲线,分别见图4和图5。在图4和图5中,细线、中粗线、粗线分别表示平板厚度取 $3\lambda_0, 6\lambda_0, 9\lambda_0$ 的情况。由图4和图5可知:(1)对于TE波:当平板厚度

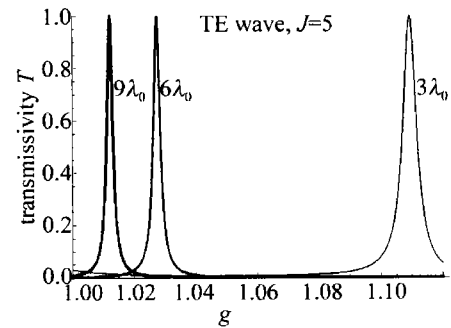


Fig. 4 Response curves of the transmissivity versus g

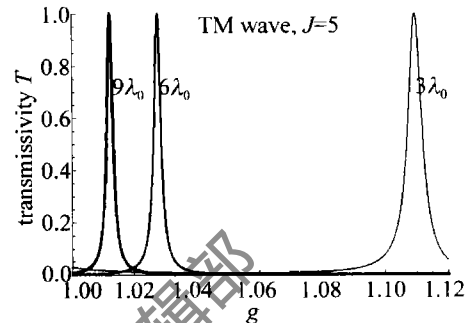


Fig. 5 Response curves of the transmissivity versus g

为 $3\lambda_0$ 时, $J=5$ 的模式的缺陷模的频率中心在 $g=1.104$ 处;当平板厚度为 $6\lambda_0$ 时, $J=5$ 的模式的缺陷模的频率中心在 $g=1.027$ 处;当平板厚度为 $9\lambda_0$ 时, $J=5$ 的模式的缺陷模的频率中心在 $g=1.013$ 处,即各模式的缺陷模的频率中心随平板厚度的增加而减小;对于TM波,各模式的缺陷模的频率中心也随平板厚度的增加而减小,这与TE波相同;(2)对于TE波,当平板厚度为 $3\lambda_0$ 时, $J=5$ 的模式的缺陷模的半峰全宽 $\Delta g=0.001$;当平板厚度为 $6\lambda_0$ 时, $J=5$ 的模式的缺陷模的半峰全宽 $\Delta g=0.002$;当平板厚度为 $9\lambda_0$ 时, $J=5$ 的模式的缺陷模的半峰全宽 $\Delta g=0.003$,即各模式的缺陷模的半峰全宽随平板厚度的增加而增大;对于TM波,当平板厚度为 $3\lambda_0$ 时, $J=5$ 的模式的缺陷模的半峰全宽 $\Delta g=0.005$;当平板厚度为 $6\lambda_0$ 时, $J=5$ 的模式的缺陷模的半峰全宽 $\Delta g=0.003$;当平板厚度为 $9\lambda_0$ 时, $J=5$ 的模式的缺陷模的半峰全宽 $\Delta g=0.0025$,即各模式的半峰全宽随平板厚度的增加而减小,这与波TE相反。

上述缺陷模随平板厚度的变化特征也是1维非受限掺杂光子晶体中电磁波的缺陷模不具有的。

3 结论

利用特征矩阵法研究了1维平板掺杂光子晶体中电磁波的模式及其缺陷模特征。推导出1维平板掺杂光子晶体中电磁波各个模式满足的条件,利用这个条件并结合特征矩阵法计算出TE波和TM波各模式的缺陷模随模式量子数和平板厚度的变化规律。得出了

一些不同于1维非受限掺杂光子晶体缺陷模的新特征。对于TE波有:缺陷模的频率中心随模式量子数的增加而增大,但随平板厚度的增加而减小;缺陷模的半峰全宽随模式量子数的增加而减小,但随平板厚度的增加而增大。对于TM波有:缺陷模的频率中心随模式量子数的增加而增大,但随平板厚度的增加而减小;缺陷模的半峰全宽随模式量子数的增加而增大,但随平板厚度的增加而减小。

参 考 文 献

- [1] CHEN W Z, SHEN Y, HU M L, *et al.* Structure of basic period of one-dimensional photonic crystal and the characters of forbidden bands [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(12): 1453-1456 (in Chinese).
- [2] DUAN X F, NIU Y X, ZHANG C, *et al.* Light propagation characteristics of 1-D photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9): 1086-1089 (in Chinese).
- [3] FANG Y T, SHEN T G, TAN X L. Study on one dimensional photonic crystal with impurity defect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(11): 1557-1560 (in Chinese).
- [4] ZHOU J G, DU G Q, ZHANG Y W, *et al.* Electromagnetic modes of thickness modulated dual periodic one dimensional photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(8): 3703-3707 (in Chinese).

- [5] DU G Q, LIU N H. Optical transmission spectra of one dimensional photonic crystals with a mirror symmetry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(4): 1095-1097 (in Chinese).
- [6] ZHANG D G, NI N, AN H N. Electromagnetic field analysis and numerical calculation of one-dimensional magneto-photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(8): 1007-1010 (in Chinese).
- [7] WANG R, ZHANG C X, NIE Y G. Band structure and propagation properties of one-dimension anisotropy photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 35(1): 89-92 (in Chinese).
- [8] LI R, REN K, REN X B. Angular and wavelength selectivity of band gaps of holographic photonic crystals for different polarizations [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(8): 2520-2523 (in Chinese).
- [9] LIU Q N. A new method for bandgap study of one-dimensional photonic crystal [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29(4): 531-534 (in Chinese).
- [10] LIU Q N. Effect of impurity absorption on one-dimensional photonic crystal defect mode [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(6): 777-780 (in Chinese).
- [11] LIU Q N. Effect of absorption of dopant on design of photonic crystal filters [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(3): 237-240 (in Chinese).
- [12] LIU Q N. The design of double channel polarization tunable filter of photonic crystal [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 84-87 (in Chinese).
- [13] SONG Y L, WANG X ZH. Properties of a one-dimensional confined antiferromagnetic photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12): 2404-2407 (in Chinese).

(上接第362页)

2 结 论

根据图4~图6以及表1可知,所设计的“母子”式电容充电电源在150V条件下可以实现2.16kW的充电电功率,随着“母电容”两端电压的升高,充电电功率也将进一步提高,并且电路工作稳定可靠,电路中脉冲电流的峰值始终处于元件可承受的范围,纹波较小。实验同时证明了采用“母子”式电容充电电源,可以使得脉冲氙灯的放电电流更加平稳,输出光脉冲强度的衰减较传统单一储能电源供电的方式小很多,能够满足强脉冲光治疗机需求,并可以作为长脉冲治疗机中脉冲氙灯的电源系统。

参 考 文 献

- [1] ZANE C, CAPEZZERA R, SALA R, *et al.* Clinical and echo graphic analysis of photodynamic therapy using methylamino levulinate as sensitizer in the treatment of photo damaged facial skin [J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2007, 39(3): 203-209.
- [2] XU S L. My opinion and advice for the development of laser biology and medicine [J]. *Applied Laser*, 2001, 21(1): 49-50 (in Chinese).

- [3] XIA X Sh. Development of diagnosis in laser medicine [J]. *Modern Medicine Sanitation*, 2002, 8(9): 761-762.
- [4] SHEN R E, XUE P D. The design and production of LC filter circuit [M]. Beijing: Science Press, 2006: 11-28 (in Chinese).
- [5] QIU Y, WANG Z L, TIAN J, *et al.* Research on new LC filter in harmonic suppression of equipment [J]. *Power Electronics*, 2006, 40(1): 50-52 (in Chinese).
- [6] HU Q L, ZUO D L, CHENG Z H. Resonant period tracking for high frequency switch mode capacitor charging power supply of TEA CO₂ laser [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(5): 522-525 (in Chinese).
- [7] NIU Z Q, PENG W D, NIU H B. A fixed output power laser supply with improved power factor [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(2): 147-150 (in Chinese).
- [8] HAGINO H, YAMASHITA J, UENISHI A. An experiment an numerical study on the forward biased SOA of IGBT [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1996, 43(1): 490-500.
- [9] LI M, ZHAI L H, WAN K Y, *et al.* Design of IGBT driver and protection circuit for laser power supply [J]. *Electronic Component & Device Applications*, 2003, 5(5): 31-33 (in Chinese).
- [10] SHANG L, TAN H, CONG X Y, *et al.* Application of IGBT in high power solid state modular [J]. *Power Electronics*, 2007, 41(4): 56-57 (in Chinese).