

文章编号: 1001-3806(2011)05-0622-04

1 维掺杂光子晶体中光的全反射贯穿特性

龙涛, 刘启能

(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 维掺杂光子晶体中光波的全反射贯穿特性, 利用传输矩阵法计算了 TE 波在大于全反射角入射 1 维掺杂光子晶体的透射率。结果表明, 在透射波中发现了全反射贯穿效应, 得出了 1 维掺杂光子晶体的全反射贯穿效应随入射角、杂质厚度、杂质折射率以及周期数的变化特性。这些特性可以用于设计光子晶体滤波器。

关键词: 光电子学; 光子晶体; 全反射; 贯穿效应; 杂质

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.013

Total reflection through characteristics of light in 1-D doping photonic crystal

LONG Tao, LIU Qi-neng

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

Abstract: In order to study the total reflection through characteristics of light in 1-D doping photonic crystal, the transmissivity of TE wave was calculated by means of the transition matrix method when the incident angle greater than full reflection angle. Total reflection through effect was found in the transmission wave. Response curves of total reflection through effect versus incident angle, impurity thickness, impurity index and period were obtained. These features can be used to design filter of photonic crystal.

Key words: optoelectronics; photonic crystal; total reflection; through effect; impurity

引言

光子晶体的概念是由 JOHN 和 YABLONVITCH 在 1987 年分别提出来的。所谓光子晶体就是其折射率呈周期性变化的人造带隙材料。光在光子晶体中传播时会与光子晶体的周期结构发生相互作用, 从而产生带隙。利用光子晶体的带隙可以十分方便地控制光波的传播, 因此, 光子晶体在现代科学技术上有着十分广泛的应用前景。这使得对光子晶体的研究成为目前光学的前沿领域内一个活跃的问题。

目前对 1 维光子晶体的研究中, 在研究方法、带隙特性、缺陷模特性以及滤波理论等方面都取得了丰富成果^[1-13]。近来 FANG 等人^[14]研究了光波在大于全反射角入射 1 维光子晶体时出现的渐逝波现象, 得到了 1 维光子晶体中渐逝波随入射角的变化特征和渐逝

波随周期数的变化特征。但参考文献[14]中没有涉及光在大于全反射角入射 1 维掺杂光子晶体的情况。由于掺杂是光子晶体研究中的一个重要内容, 因此, 对于光在大于全反射角入射 1 维掺杂光子晶体时的情况有待做进一步的研究。本文将利用传输矩阵法对光在大于全反射角入射 1 维掺杂光子晶体时的传输特性做研究。

1 模型与理论

1 维掺杂光子晶体是由氟化镁(其折射率为 $n_1 = 1.38$ 、厚度为 d_1) 和碲化铅(其折射率为 $n_2 = 4.1$ 、厚度为 d_2) 两种介质周期性地交替构成, 中间掺了一层硫化锌(其折射率为 $n_3 = 2.38$ 、厚度为 d_3) 的杂质。该 1 维掺杂光子晶体形成以杂质为中心的对称结构, 两边的周期数为 N , 见图 1。设入射空间和出射空间的介质折射率为 n_0 , 也选碲化铅, 即 $n_2 = n_0$ 。由于 $n_0 > n_1$, 所以当光大于全反射角入射该 1 维掺杂光子晶体

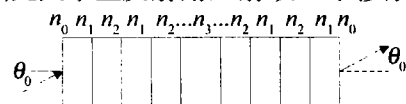


Fig. 1 The 1-D doping photonic crystal

基金项目: 重庆市教委科技研究基金资助项目 (KJ100717)

作者简介: 龙涛(1963-), 女, 副教授, 主要从事光学研究。

E-mail: longtao1963@163.com

收稿日期: 2010-12-15; 收到修改稿日期: 2011-01-24

时应该出现全反射现象。

为了研究光在大于全反射角入射该1维掺杂光子晶体时出现的全反射贯穿特性,利用参考文献[15]中推出的分层介质中光的传输矩阵,对于该1维掺杂光子晶体有:

$$M_1 = m_{21}m_1m_{12}m_2, \\ m = m_{23}m_3m_{32}, M_2 = m_2m_{21}m_1m_{12} \quad (1)$$

式中, $m_1 = \begin{bmatrix} e^{-ik_1d_1\cos\theta_1} & 0 \\ 0 & e^{ik_1d_1\cos\theta_1} \end{bmatrix}, m_2 = \begin{bmatrix} e^{-ik_2d_2\cos\theta_2} & 0 \\ 0 & e^{ik_2d_2\cos\theta_2} \end{bmatrix}, m_3 = \begin{bmatrix} e^{-ik_3d_3\cos\theta_3} & 0 \\ 0 & e^{ik_3d_3\cos\theta_3} \end{bmatrix}。$

对横电波(TE波)有:

$$m_{ij} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \frac{n_j \cos\theta_j}{n_i \cos\theta_i} & 1 - \frac{n_j \cos\theta_j}{n_i \cos\theta_i} \\ 1 - \frac{n_j \cos\theta_j}{n_i \cos\theta_i} & 1 + \frac{n_j \cos\theta_j}{n_i \cos\theta_i} \end{bmatrix}, \quad (i = 1, 2; j = 1, 2) \quad (2)$$

对横磁波(TM波)有:

$$m_{ij} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{n_j}{n_i} + \frac{\cos\theta_j}{\cos\theta_i} & \frac{n_j}{n_i} - \frac{\cos\theta_j}{\cos\theta_i} \\ \frac{n_j}{n_i} - \frac{\cos\theta_j}{\cos\theta_i} & \frac{n_j}{n_i} + \frac{\cos\theta_j}{\cos\theta_i} \end{bmatrix}, \quad (i = 1, 2; j = 1, 2) \quad (3)$$

上述各式中, θ 为传播角, n 为折射率, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数。整个光子晶体的传输矩阵 M 为:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = M_1^N m M_2^N \quad (4)$$

光通过该1维掺杂光子晶体的反射系数 r 分别为:

$$r = M_{21}/M_{11} \quad (5)$$

不计材料的吸收时,光通过该1维掺杂光子晶体的透射率 T 为:

$$T = 1 - r^2 \quad (6)$$

利用(1)式~(6)式可以研究光在大于全反射角入射该1维掺杂光子晶体时的全反射贯穿特性。下面的计算中取 $n_1d_1 = n_2d_2 = \lambda_0/4, n_3d_3 = \lambda_0/2$, 中心波长 $\lambda_0 = 600\text{nm}$ 和 $N = 5$, 令归一化频率 $g = f/f_0$ (f 为入射光的频率、 $f_0 = c/\lambda_0, c$ 为真空中的光速)。

2 全反射贯穿效应

由光的折射定律可知,当光从折射率大(n_0)的介质入射到折射率小(n_1)的介质的分界面时会出现全反射现象,其全反射角为 $\theta = \arcsin(n_1/n_0) = 0.34\text{rad}$ 。计算出TE波和TM波从碲化铅中射入到氟化镁单一界面上其透射率随入射角的响应曲线,见图2。图2

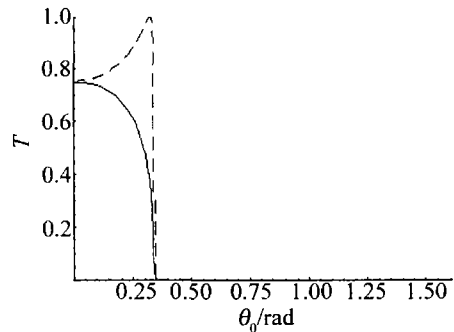


Fig. 2 Response curves of transmissivity of interface versus incident angle 中实线表示TE波,虚线表示TM波。由图2可以清楚地看出:(1)当TE波小于全反射角入射时,透射率随入射角的增加而减小;当入射角接近全反射角时,透射率迅速降低为0;当入射角大于全反射角时,透射率恒为0,TE波不能进入氟化镁内;(2)当TM波小于全反射角入射时,透射率随入射角的增加而增大;当入射角接近全反射角时,透射率迅速降低为0;当入射角大于全反射角时,透射率恒为0,TM波也不能进入氟化镁内。

再来研究光大于全反射角入射该1维掺杂光子晶体的情况,固定归一化频率 $g = 1$, 计算出TE波和TM波入射该1维掺杂光子晶体时其透射率随入射角的响应曲线,见图3。图3中实线表示TE波,虚线表示TM波。由图3可以清楚地看出它与图2有明显的不同:(1)当TE波小于全反射角入射时透射率都为0,即在入射角 $\theta_0 = (0 \sim 0.34)\text{rad}$ 范围内出现了禁带,这是光子晶体的基本特性;当TE波大于全反射角入射时,出现了新的现象,在入射角 $\theta_0 = (0.62 \sim 0.73)\text{rad}$ 范围内出现了多条明显的透射峰,其透射峰接近1,称这种现象为1维掺杂光子晶体全的反射贯穿效应;(2)当TM波小于全反射角入射时,在 $\theta_0 = (0 \sim 0.25)\text{rad}$ 范围内透射率为0是禁带,在 $\theta_0 = (0.25 \sim 0.34)\text{rad}$ 范围内透射率为1是导带;当TM波大于全反射角入射时,也出现了新的现象,在入射角 $\theta_0 = (0.34 \sim 0.42)\text{rad}$ 范围内出现了透射率为1的透射峰带。这表明TM波大于全反射角入射该1维掺杂光子晶体时也会产生全反射贯穿效应。

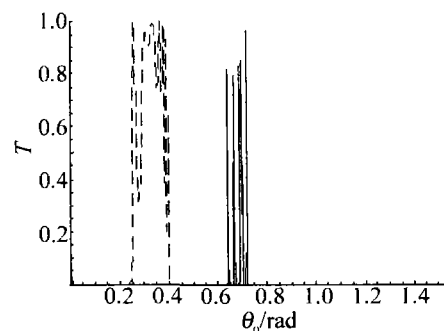


Fig. 3 Response curves of transmissivity of photonic crystal versus incident angle

比较图 3 中 TE 波和 TM 波的全反射贯穿现象发现:TE 波的全反射贯穿现象更有明显、更具有特点。因此,下面只研究 TE 波的全反射贯穿的特性。

3 掺杂光子晶体全反射贯穿的特性

下面分别从 4 个方面研究了 1 维掺杂光子晶体的全反射贯穿的特性,即全反射贯穿效应随入射角的变化特性、全反射贯穿效应随杂质厚度的变化特性、全反射贯穿效应随杂质折射率的变化特性、全反射贯穿效应随周期数的变化特性。

3.1 贯穿效应随入射角的变化

为了研究全反射贯穿效应随入射角的变化规律,计算 TE 波的全反射贯穿峰的频率随入射角的响应曲线,见图 4。在图 4 中横轴表示入射角,纵轴表示入

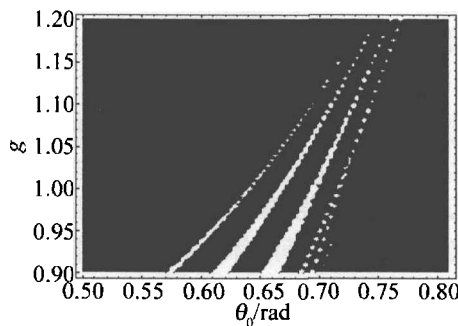


Fig. 4 Response curves of frequency versus incident angle

射波的归一化频率,白色为全反射贯穿带,黑色为透射率为 0 的区域。为了看清全反射贯穿峰的细致情况,在入射角 $\theta_0 = 0.71\text{rad}$ 和 $\theta_0 = 0.73\text{rad}$ 处计算出 TE 波的全反射贯穿峰随频率的响应曲线,见图 5。由图 4 和图 5 可知:(1) TE 波在入射角大于全反射角 $\theta = 0.34\text{rad}$ 的区域内出现了多条明显的透射峰带,即全反射贯穿效应;同一透射峰带的频率都随入射角的增加而增大,同一透射峰带对应的入射角宽度都随入射角的增加而减小;相邻两条透射峰的角间距随入射角的增加而减小;(2)当 TE 波分别以 $\theta_0 = 0.71\text{rad}$ 和 $\theta_0 = 0.73\text{rad}$ 入射时都会出现 5 条频率分离的透射峰,这 5 条透射峰中,中间 3 条的频率宽度较大,两边的 2 条频率宽度较小。

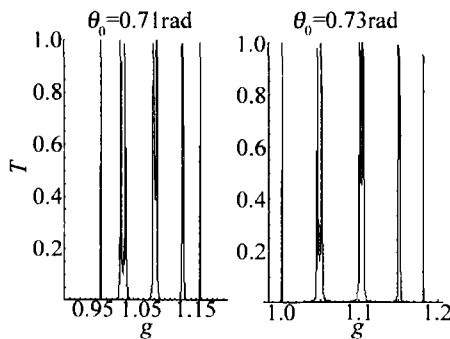


Fig. 5 Response curves of transmissivity versus frequency with different incident angle

3.2 贯穿效应随杂质厚度的变化

为了便于分析杂质厚度 d_3 对贯穿效应的影响,固定入射角 $\theta_0 = 0.72\text{rad}$,计算出 TE 波全反射贯穿峰的频率随杂质光学厚度 $n_3 d_3$ 的响应曲线(其中固定 $n_3 = 2.38$ 不变,让 d_3 变化),见图 6。图 6 中白色细带表示全反射贯穿峰,由图 6 可以看出:(1)当 TE 波以入射角 $\theta_0 = 0.72\text{rad}$ 入射、杂质的光学厚度在 $0.4\lambda_0 \sim 0.09\lambda_0$ 范围内变化时,5 条全反射贯穿峰中频率较高的 4 条,其全反射贯穿峰的频率都不随杂质厚度的变化而变化;频率最低的那条贯穿峰的频率随杂质厚度的增加而减小;(2)当 TE 波以入射角 $\theta_0 = 0.72\text{rad}$ 入射、杂质的光学厚度在 $0.4\lambda_0 \sim 0.9\lambda_0$ 范围内变化时,5 条全反射贯穿峰的频率宽度都随杂质厚度的增加而减小。

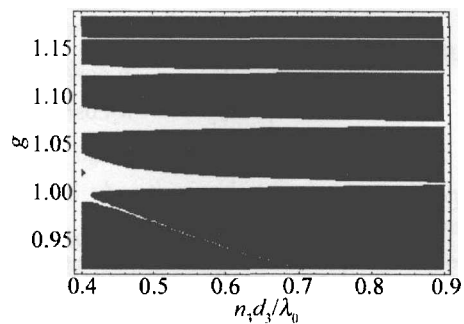


Fig. 6 Response curves of frequency versus thickness

3.3 贯穿效应随杂质折射率的变化

固定入射角 $\theta_0 = 0.72\text{rad}$ 、杂质厚度 $d_3 = 126\text{nm}$,计算出 TE 波全反射贯穿峰的频率随杂质折射率 n_3 的响应曲线,见图 7。由图 7 可以看出:(1)杂质折射率 n_3 的变化会对 TE 波的全反射贯穿峰会产生复杂的影响,当 n_3 从 1 增大到 1.5 的过程中 5 条全反射贯穿峰都随着 n_3 的增加而各自分裂为 2 条贯穿峰;随着 n_3 的继续增大,分裂的 2 条贯穿峰又会合并为 1 条;(2)合并后的 5 条全反射贯穿峰的频率宽度都随杂质折射率的增加而减小。

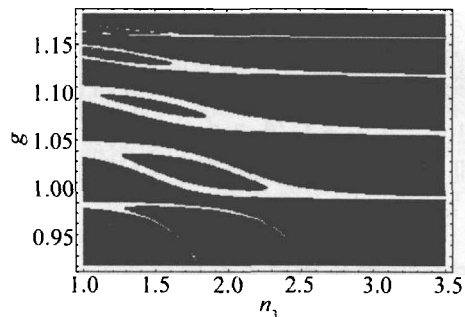


Fig. 7 Response curves of frequency versus refractive index

3.4 贯穿效应随周期数的变化

为了研究全反射贯穿效应随周期数的变化规律,固定入射角 $\theta_0 = 0.72\text{rad}$,计算出 $N = 4, N = 5, N = 6$ 时 TE 波的透射率随频率的响应曲线,见图 8。由图 8 可

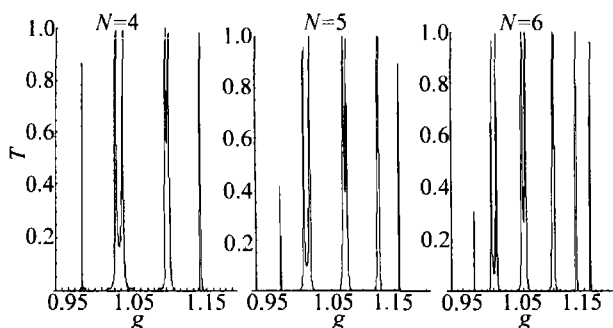


Fig. 8 Response curves of transmissivity versus frequency with different period

知:(1)周期数的变化对TE波的全反射贯穿透射峰数产生明显的影响,当周期数分别为 $N=4$, $N=5$ 和 $N=6$ 时对应的透射峰数分别为4,5,6,即峰数与周期数相等;(2)周期数的变化对TE波全反射贯穿透射峰的频率宽度也会产生明显的影响,贯穿透射峰的频率宽度也随周期数的增加而减小;(3)周期数的变化对TE波全反射贯穿的相邻透射峰的频率间距也会产生影响,相邻透射峰的频率间距随周期数的增加而减小。

4 结论

利用传输矩阵法研究了光波在大于全反射角入射1维掺杂光子晶体时所出现的全反射贯穿效应的特性。得出了1维掺杂光子晶体的全反射贯穿效应随入射角的变化特性、全反射贯穿效应随杂质厚度的变化特性、全反射贯穿效应随杂质折射率的变化特性、全反射贯穿效应随周期数的变化特性。

1维光子晶体中光的全反射贯穿效应是1维光子晶体研究中发现的新现象,值得进一步研究。特别是从理论上对该现象进行定量的解释还有待做深入地研究,今后将继续对这一问题进行深入地研究。

参 考 文 献

[1] 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).

[2] 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).

[3] 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).

[4] 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).

[5] WANG R, ZHANG C X, NIE Y H. Band structure and propagation properties of one-dimension anisotropy photonic crystals[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 35(1): 89-92 (in Chinese).

[6] 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).

[7] LIU Q N. Transmission characteristics of electromagnetic wave in 1-D rectangle photonic crystal[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(5): 847-850 (in Chinese).

[8] LIU Q N. Filtering feature of 1-D rectangle doping photonic crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2041-2044 (in Chinese).

[9] LIU Q N. A new simple and convenient method for study of properties forbidden band of one-dimensional photonic crystal[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(6): 1031-1034 (in Chinese).

[10] LIU Q N. Defect mode and mode of electromagnetic wave in cylindrical doping photonic crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(4): 991-994 (in Chinese).

[11] LIU Q N. The mode and defect mode of electromagnetic wave in rectangular doped photonic crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(4): 2551-2555 (in Chinese).

[12] LIU Q N. The design of double channel polarization tunable filter of photonic crystal[J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 24-27 (in Chinese).

[13] LIU Q N, LONG T. The defect mode of electromagnetic wave in flat-panel doping photonic crystal[J]. Laser Technology, 2010, 34(3): 363-367 (in Chinese).

[14] FANG Y T, LIANG Zh Ch. Unusual transmission through usual one-dimensional photonic crystal in the presence of evanescent wave[J]. Optics Communications, 2010, 283(4): 2102-2106.

[15] LIU Q N. A new method that study electromagnetic waves transfer in stratified medium[J]. Laser Journal, 2009, 30(3): 14-15 (in Chinese).

(上接第621页)

[7] ISEKI T. A portable remote methane detector using an InGaAsP DFB laser[J]. Environmental Geology, 2004, 46(8): 1064-1069.

[8] UPSCHULTE B L, SONNENFROH D M, ALLEN M G. Measurements of CO, CO₂, and H₂O in room-temperature and combustion gases by use of a broadly current-tuned multisection InGaAsP diode laser[J]. Applied Optics, 1999, 38(9): 1506-1512.

[9] ZHOU X J, TAO Sh Ch, YAO K Y. Atmospheric physics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991: 252-346 (in Chinese).

[10] CHOU S I, BAER D S, HANSON R K. Diode laser absorption measurements of CH₃Cl and CH₄ near 1.65 μm[J]. Applied Optics, 1997, 36(15): 3288-3293.