

基于光子晶体塔姆态的带隙分裂

陈泽锋 韩 鹏 陈溢杭*

(华南师范大学物理与电信工程学院量子信息技术实验室, 广东 广州 510006)

摘要 将由两个一维介质层光子晶体组成的异质结拓展为超晶格结构, 分析了该结构的能带和透射谱。该超晶格结构可以产生多个界面隧穿态, 它们之间的耦合可产生新的通带。研究表明, 该通带的宽度随光子晶体的周期数变化, 而通带的中心位置保持不变。当光子晶体周期数取特定值时, 这个通带将发生分裂, 在带间产生零相位带隙或 π 相位带隙。

关键词 材料; 光子晶体; 一维光子晶体; 界面态; 塔姆态

中图分类号 O483 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0516002

Photonic Band Gap Splitting Based on Optical Tamm States of Photonic Crystal

Chen Zefeng Han Peng Chen Yihang

(Laboratory of Quantum Information Technology, School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract Two kinds of one-dimensional photonic crystals are repeated alternatively to construct the superlattice structure. The energy-band structures and transmission spectra of the superlattice are analyzed. Results show that multiple interface tunneling modes emerge and they couple each other to form a new pass band. As the periods of the one-dimensional photonic crystals vary, the width of the transmission band changes while the position of the band remains invariant. For specific periods of the photonic crystals, the pass band will split and a zero-phase or π -phase gap emerges.

Key words materials; photonic crystal; one-dimensional photonic crystal; interface states; Tamm state

OCIS codes 050.5298; 310.4165; 240.7040

1 引 言

光子晶体是指介质的折射率按一定周期发生变化的人工材料, 由于其独特的电磁性质, 近年来已引起人们的广泛关注^[1~4]。由于可以有效调控电磁波或传播光, 光子晶体已被广泛应用于各种光学器件^[5,6]。

近年来, 对特异材料^[7,8]的研究表明, 该材料构造的一维周期结构具有许多新奇的性质^[9~11]。由两种单负材料[负介电常量材料(ENG)和负磁导率材料(MNG)]组成的异质结可以在界面产生局部的共振隧穿效益; 两种单负材料交替堆叠形成的一维周期结构中存在一种新型的 $\text{zero-}\phi_{\text{eff}}$ 带隙, 这种带隙

不是基于布拉格散射机制, 而是界面模的局域共振隧穿效应; 它是指在布洛赫波矢为零(包括实部和虚部)的点被打开而形成的布洛赫波矢实部为零的带隙^[12]。

光学塔姆(Tamm)态是由 Vinogradov 等^[13]提出的一种由于光子晶体异质结的界面隧穿效应产生的光学局域态, 这种界面态在无腔化激光、光开关等方面^[14]有很大的应用前景。本文基于光学塔姆态的研究, 将光子晶体异质结拓展为超晶格结构, 研究了该结构的能带及其透射谱。研究发现该结构可以产生由界面隧穿效应引起的新的通带, 使光子晶体的带隙分裂, 产生新的带隙, 该带隙的产生机制类似

收稿日期: 2011-10-13; **收到修改稿日期**: 2011-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(10704027)和广东省自然科学基金(9151063101000040)资助课题。

作者简介: 陈泽锋(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: 369711364@qq.com

导师简介: 韩 鹏(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事光子晶体、颗粒散射等方面的研究。E-mail: hanp@scnu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: yhchen@scnu.edu.cn

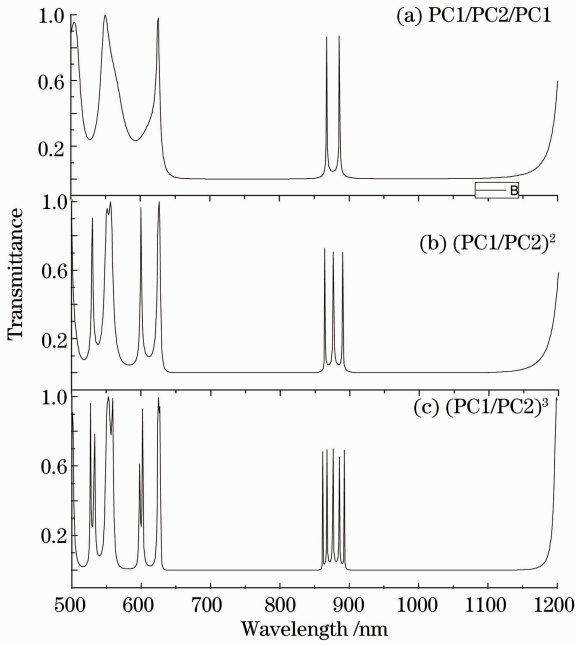


图 4 超晶格光子晶体 $(PC1/PC2)^k$ 在不同 k 值时的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of superlattice $(PC1/PC2)^k$ with different values of k

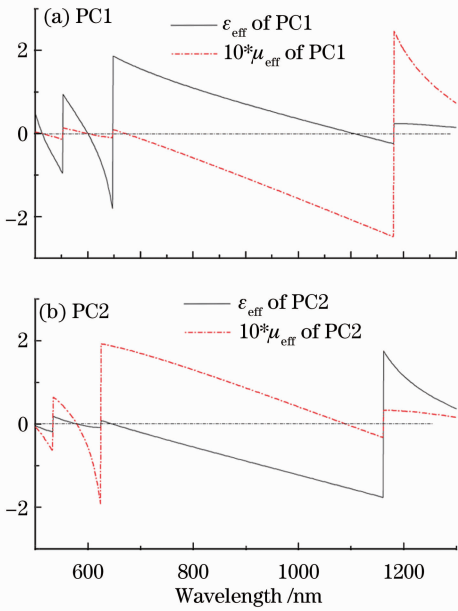


图 5 光子晶体 PC1 (a)、PC2 (b) 的等效介电常数与磁导率
Fig. 5 Effective permittivity and permeability of photonic crystal PC1 (a) and PC2 (b)

大于 0, 而磁导率 μ 小于 0; PC2 则相反。因此 $(PC1/PC2)^k$ 可以看作是由单负材料组成的光子晶体, PC1 等效为 MNG, PC2 可以等效为 ENG。ENG 与 MNG 满足阻抗匹配和相位匹配条件后可以在 ENG/MNG 异质结形成界面隧穿态; 当 ENG

与 MNG 周期性排列形成光子晶体后, 将会有新的能带出现。通过选择 ENG 与 MNG 的参数, 可以使这个新的能带分裂, 并产生零相位带隙。

把 $(PC1/PC2)^k$ 看作超晶格结构的光子晶体, PC1/PC2 是超晶格的单位周期, 计算出其能带结构, 如图 6 所示。可以看到光子带隙中, 在波长为 932 nm 附近处有两条简并的能带, 形成一个通带, 简并点的布洛赫波矢是零相位。随着光子晶体的周期数增加, 这个通带的变窄, 而位置不发生改变。这一点与由单负材料组成的光子晶体性质相一致。PC1、PC2 的周期数增加可以看作是 PC1、PC2 等效成的 ENG、MNG 的厚度增加, ENG、MNG 厚度的同比例缩放不会影响零相位点的位置, 但会改变通带的宽度。这是因为当厚度增加时, 可以产生更强的界面局域, 这样就使态密度增加, 布洛赫波矢函数的斜率绝对值减小, 所以通带的宽度也就变小。

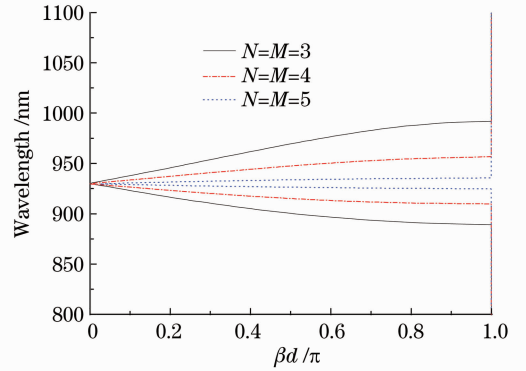


图 6 光子晶体 PC1 $[(ABBA)^N]$ 和 PC2 $[(CDDC)^M]$ 的周期数 $N/M=1$ 对应的 $(PC1/PC2)^k$ 能带结构, βd 为布洛赫波矢

Fig. 6 Energy-band structure of $(PC1/PC2)^k$ when the $N/M=1$, βd is Bloch wavevector

图 7 是光子晶体 PC1 和 PC2 的周期数 N 、 M 取不同值时能带结构, 可以看出, N 与 M 比值取 1:2 时, 这个通带将在布洛赫波矢为零的点发生分裂, 从而使原来的光子带隙分裂为 3 个带隙。其中当 $N=2, M=4$ 时, 新能带中间的带隙是 zero- ϕ_{eff} 带隙; 当 $N=3, M=6$ 时, 新能带中间的带隙的布洛赫波矢是 π , 称之为 $\pi-\phi_{\text{eff}}$ 带隙; 当 $N=4, M=8$ 时, 新能带中间的带隙是 zero- ϕ_{eff} 带隙。 $\pi-\phi_{\text{eff}}$ 带隙与 zero- ϕ_{eff} 带隙的区别只是在带隙出现的位置上布洛赫波矢的实部为 π 或零, 它们具有相同的物理意义, 都表示该频段的波为消逝波。布洛赫波矢的实部在 π 值或零值的转换只是数学运算的结果。

图 8 是当 $N=2, M=4, k=5$ 时超晶格 $(PC1/$

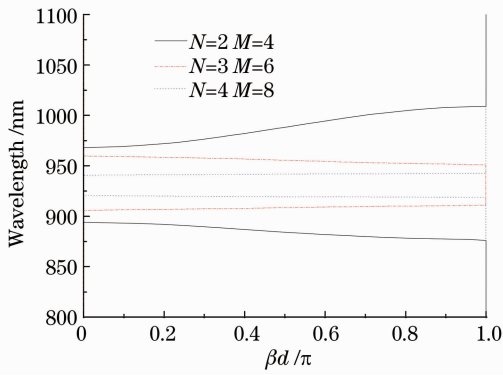


图7 光子晶体 PC1 [(ABBA)^N]和 PC2 [(CDDC)^M]的周期数 $N/M=0.5$ 对应的 $(PC1/PC2)^k$ 能带结构, βd 为布洛赫波矢

Fig. 7 Energy-band structure of $(PC1/PC2)^k$ when the $N/M=0.5$, βd is Bloch wavevector

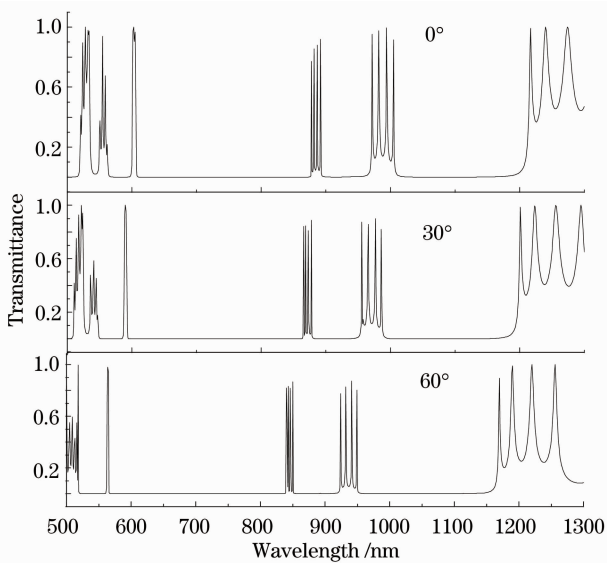


图8 超晶格 $(PC1/PC2)^5$ 在不同入射角时的透射谱

Fig. 8 Transmission spectra of superlattice $(PC1/PC2)^5$ with different incident angles

PC2)⁵ 不同入射角光波的透射光谱。与图7相对应,光子带隙已被分裂为3个带隙。随着入射角的增大,带隙中心位置向短波移动,这一点与单负材料的光子晶体不同。由单负材料做成的光子晶体中的零相位带隙是不随入射角变化而改变的。这是因为单负材料光子晶体的能带是由处于两种单负材料衰减频段的电磁波在界面的共振隧穿效益产生的,不随入射角变化而变化^[10];超晶格 $(PC1/PC2)^5$ 在920 nm附近的带隙是由多个异质结 PC1/PC2 的界面共振隧穿态——塔姆态耦合形成的,而光子晶体塔姆随入射角的增大向短波方向移动^[13],因此超晶格 $(PC1/PC2)^5$ 随不同入射角的增大,带隙位置向

短波移动。其根本原因是多层膜干涉引起的,其中中心位置随入射角的增大向短波方向移动只是因为入射角改变光程相应变化引起的而已。

4 结 论

由2个介质层光子晶体交替排列成的超晶格结构可以在禁带交叠频段产生多个光学塔姆态,这些塔姆态将耦合形成新的通带;这个通带的宽度随光子晶体的周期数增加而变窄,而位置保持不变;当光子晶体周期数取特定的比值时可以使这个通带分裂为2个,并产生零相位或 π 相位带隙,该带隙随入射角度增大向短波方向移动。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission insolidstate physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 E. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 Huang Biqin, Gu Peifu. Numerical study about the abnormal refractone-dimensional photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1222~1225
黄弼勤, 顾培夫. 一维光子晶体反常折射的数值分析[J]. *光子学报*, 2004, **33**(10): 1222~1225
- 4 Chen Jian, Wang Qingkang, Li Haihua. Effect of random perturbation of structural parameters on the light extraction efficiency of light emitting diode with photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 233~236
陈 健, 王庆康, 李海华. 光子晶体结构参数的随机扰动对光子晶体 LED 出光效率的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 233~236
- 5 Xinhua Hu, C. T. Chan. Photonic crystals with silver nanowires as a near-infrared superlens [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(9): 1520~1522
- 6 Y. H. Chen. Broadband one-dimensional photonic crystal wave plate containing single-negative materials [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(19): 19920~19929
- 7 J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins *et al.*. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory & Technol.*, 1999, **47**(11): 2075~2084
- 8 C. Enkrich, M. Wegener, S. Linden *et al.*. Magnetic metamaterials at telecommunication and visible frequencies [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(20): 203901
- 9 Y. H. Chen, J. W. Dong, H. Z. Wang. Omnidirectional resonance modes in photonic crystal heterostructures containing single-negative materials [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(10): 2237~2240
- 10 H. T. Jiang, H. Chen, H. Q. Li *et al.*. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals containing negative-index materials [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(26): 5386~5389
- 11 J. Li, L. Zhou, C. T. Chan *et al.*. Photonic band gap from a stack of positive and negative index materials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(8): 083901
- 12 H. T. Jiang, H. Chen, H. Q. Li *et al.*. Properties of one-dimensional photonic crystals containing single-negative materials

- [J]. *Phy. Rev. E*, 2004, **69**(6): 066607
- 13 A. V. Kavokin, I. A. Shelykh, G. Malpuech. Lossless interface modes at the boundary between two periodic dielectric structures [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **72**(23): 233102
- 14 W. L. Zhang, S. F. Yu. Bistable switching using an optical Tamm cavity with a Kerr medium [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(12): 2622~2626
- 15 Guo Jiyong, Chen Hong, Li Hongqing *et al.*. Effective permittivity and permeability of one-dimensional dielectric photonic crystal within a band gap [J]. *Chin. Phys. B*, 2008, **17**(7): 2544~2552
- 16 Xudong Chen, M. Grzegorzczuk Tomasz, Wu Bae-Ian *et al.*. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **70**(1): 016608

栏目编辑：韩 峰