DOI:10.19789/j.1004-9398.2019.05.007

一维光子晶体异质结的界面态研究

郭翊航 赵丽明*

(首都师范大学物理系,北京 100048)

摘要: 本文利用狄拉克点方法研究了一维光子晶体异质结 $(AB)_m(CD)_m$ 的界面态,通过调节体系的参数,探讨了存在界面态的极限条件. 研究了存在界面态的范围,给出了对称条件下异质结界面态的透射率随折射率的变化关系,发现对于每一组固定的 $(AB)_m$ 都能找到相应的最佳 $(CD)_m$ 结构,使得界面模透过率为1.

关键词: 一维光子晶体; 异质结构; 拓扑界面态

中图分类号: O431

0 引 言

光子晶体(又称光子禁带材料)是一种人工材料,由不同介电常数的介质周期排列而成的一种光学结构[1]. 类比于半导体晶体对电子输运行为的影响,光子晶体具有光子的带结构,原则上可以通过设计和制造光子晶体及其器件达到控制光子运动的目的[2-3]. 光子晶体的出现,使操纵和控制光子的梦想成为可能.

按照空间维数的划分,光子晶体可以分为一维光子晶体、二维光子晶体和三维光子晶体,其中一维光子晶体的色散关系可以得出确切的解析解,并且其结构简单,易于实现[4]. 在光子晶体的能带图中,如果两条能带交于一点,在该点附近,其色散关系呈线性关系时,该交点就称为光子晶体的狄拉克点. 狄拉克点的形成主要是由结构的对称性产生的,在电子晶体比如石墨烯的高对称点处就会由于结构存在必然简并狄拉克点,或者是由于能带特性存在偶然简并狄拉克点. 而电子狄拉克点所表现出的许多有趣的性质,比如赝散射、拓扑传输、界面态、震颤等现象在光子晶体中也被广泛地研究[5-11]. 和电子晶体狄拉克点不同的是,光子晶体的狄拉克点现象更易观察,因为光子不会和介质本身产生相互作用,还可以通过超材料技术对光子晶体做更细致地修改,比如折射率调节、形状调节、角度调节、缺陷制造等[12-15]. 这些都可以增进对于光子晶体狄拉克点的控制.

通过狄拉克点很容易找到界面态. 具体方法为: 分别从不同方向调节体系的参数,改变结构的介电常数和尺寸,可形成2个不同的光子晶体. 这2个光子晶体在狄拉克点附近具有共同的带隙,但具有不同的拓扑相位,当将这2个光子晶体拼接在一起时,会出现界面态,该方法被称为狄拉克点方法[16]. 研究发现: 界面模的能级满足简单的正弦函数关系[4]. 然而一些问题还未澄清: 利用狄拉克点方法,在什么样的范围内界面模一定存在; 是否有最佳的界面模匹配条件能够使得界面模的折射率达到完全透射等. 本文主要通过对一维光子晶体异质结折射率的调制,得到存在界面模的极限参数,并且得到界面模峰值的最佳匹配条件. 这一发现将对实际应用有潜在的指导意义.

1 数值模拟与讨论

假定体系由一维多层介质组成,介质的总层数为 N. 对于第 L 层,电场满足如下形式:

$$E_l^{(l)}(x) = A_l^{(l)}\exp\left[ik_{lx}^{(l)}(x-x_{l-1})\right] + B_l^{(l)}\exp\left[-ik_{lx}^{(l)}(x-x_{l-1})\right]. \quad (1)$$

这里 $A_l^{(l)}$,$B_l^{(l)}$ 分别为第 L 层电磁波入射波和反射波的振幅,由边值关系:

$$\begin{cases}\vec{n}\times(\overrightarrow{E_1}-\overrightarrow{E_2}) = 0\\ \vec{n}\times(\overrightarrow{H_1}-\overrightarrow{H_2}) = 0\end{cases}, \quad (2)$$

可以得到:

$$\begin{pmatrix}A_{l+1}^{(l)}\\ B_{l+1}^{(l)}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}t_{11}^{(l)} & t_{12}^{(l)}\\ t_{21}^{(l)} & t_{22}^{(l)}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}A_l^{(l)}\\ B_l^{(l)}\end{pmatrix} = \hat{T}_l\begin{pmatrix}A_l^{(l)}\\ B_l^{(l)}\end{pmatrix}, \quad (3)$$

收稿日期: 2018-11-09

* 通信作者: zlm-phy@cnu.edu.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中:

$$t_{11}^{(l)} = \frac{k_{l+1}^{(l)} + k_l^{(l)}}{2k_{l+1}^{(l)}} e^{ik_l^{(l)} d_l}, \quad t_{12}^{(l)} = \frac{k_{l+1}^{(l)} - k_l^{(l)}}{2k_{l+1}^{(l)}} e^{-ik_l^{(l)} d_l},$$

$$t_{21}^{(l)} = \frac{k_{l+1}^{(l)} - k_l^{(l)}}{2k_{l+1}^{(l)}} e^{ik_l^{(l)} d_l}, \quad t_{22}^{(l)} = \frac{k_{l+1}^{(l)} + k_l^{(l)}}{2k_{l+1}^{(l)}} e^{-ik_l^{(l)} d_l}. \tag{4}$$

$\hat{T}_l$ 为第 l 层的转换矩阵,由方程(2)可以得到最后一层振幅与第一层振幅之间的关系为:

$$\begin{pmatrix} A_{N+1} \\ B_{N+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix}. \tag{5}$$

由于 $B_N = 0$,因此

$$\begin{cases} B_1 = -\dfrac{T_{21}}{T_{22}} A \\ A_{N+1} = T_{11} A_1 - \dfrac{T_{21}}{T_{22}} A_1 \end{cases}. \tag{6}$$

相应的透射率为:

$$t = \frac{|A_N|^2}{|A_1|^2} = \left| T_{11} - \frac{T_{21}}{T_{22}} \right|^2. \tag{7}$$

反射率为:

$$r = \left| \frac{T_{22}}{T_{21}} \right|^2. \tag{8}$$

通过公式(5)、(7)和(8)可以计算出在一维介质层体系中电磁波的电场和磁场以及透过率,反射率等物理量.

假定一维光子晶体是由 2 种不同的材料(AB)组成,其中介质 A 的折射率和厚度分别用 n_a, d_a,介质 B 的折射率和厚度分别为 n_b, d_b. 光子晶体的层数为 m(本实验中 $m=8$). 对于完美的光子晶体,其色散关系满足如下关系:

$$\cos(q\Lambda) = \cos(k_a d_a)\cos(k_b d_b) - 1/2(n_b/n_a + n_a/n_b)\sin(k_a d_a)\sin(k_b d_b). \tag{9}$$

其中 q 为布洛赫波矢, Λ 为晶格常数,这里假定晶格常数为 1. 根据文献[6],当归一化频率满足如下关系: $\sin k_a d_a = 0$, $\sin k_b d_b = 0$, $\sin(k_a d_a + k_b d_b) = 0$,该频率为狄拉克点. 本文选择文献[5]的参数($n_a = 2$, $n_b = 1$, $d_a = 0.4$, $d_b = 1 - d_a = 0.6$). 图 1 给出了该结构下的色散关系,可以发现在 $\omega = 2.5$ 处出现狄拉克点. 对于该结构,周期单元的光程为 $L = n_a d_a + n_b d_b$,定义光程常数 L_0,使得 $L_0 = L$. 本文以下提到的光程常数均指 L_0.

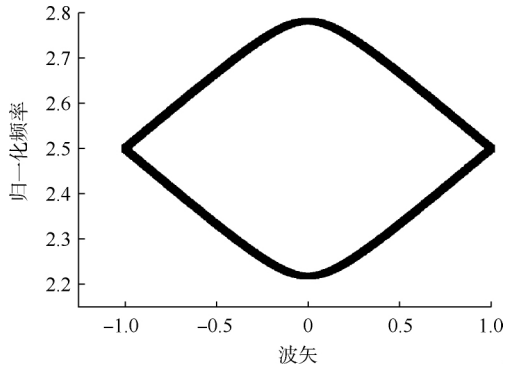


图 1　一维光子晶体 $(AB)_m$ 在狄拉克点处的能带关系

现在可以分别沿不同方向调节体系的参数,可形成 2 个不同的光子晶体 $(AB)_m$ 和 $(CD)_m$,并且要求这 2 个光子晶体的周期单元光程均等于 L_0. PC1 使用如下参数, $d_a = 0.42$, $d_b = 0.58$. $\varepsilon_a = 3.8$, $\varepsilon_b = 1$. PC2 的参数则为 $d_c = 0.38$, $d_d = 0.62$. $\varepsilon_c = 4.2$, $\varepsilon_d = 1$. 图 2 分别给出了 PC1 和 PC2 的色散关系,结果表明当这 2 个光子晶体的周期单元光程相等时,发现狄拉克点张开,且在狄拉克点附近具有共同的带隙,但具有不同的拓扑相位. 如果将这 2 个光子晶体拼接在一起时,只要带隙中存在某一个频率能够与结构发生共振,则会产生界面模. 界面模的消失主要由 2 种原因:(1)界面模的归一化频率超出了带隙范围;(2)光子晶体参数的改变使得拓扑相位发生了反转.

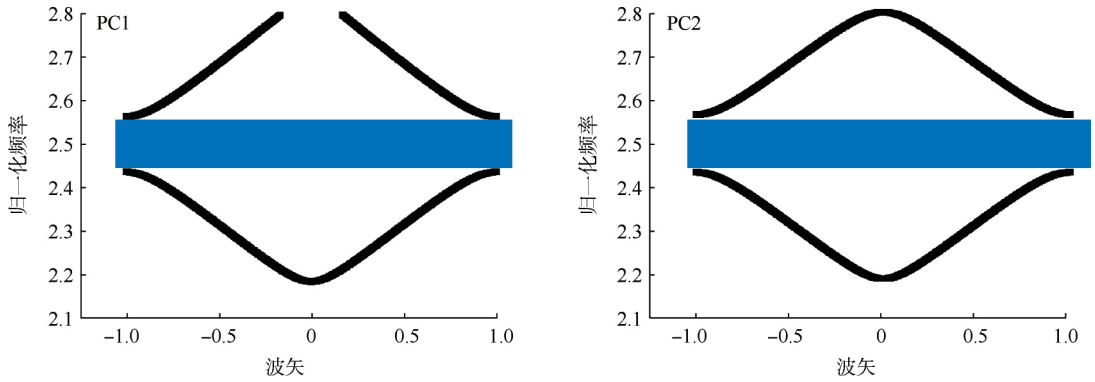


图 2　PC1 和 PC2 的能带图

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

下面将这 2 个不同的光子晶体拼成异质结结构: $(AB)_m(CD)_m$, 如图 3 所示. 图 4 给出了 $(AB)_m(CD)_m$ 的透过率曲线,可以发现在归一化频率 $\omega = 2.45$ 处出现界面态,其透过率为 0.8. 现在想了解的问题是: (1) 结构参数变化到何种程度,界面态消失? (2) 是否所有界面模都有高的透过率,若不是,是否存在最优的界面模匹配条件?

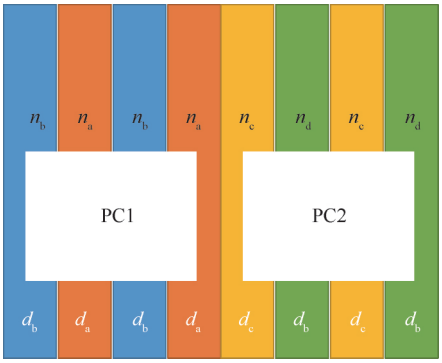


图 3 一维光子晶体异质结 $(AB)_m(CD)_m$ 的结构示意图

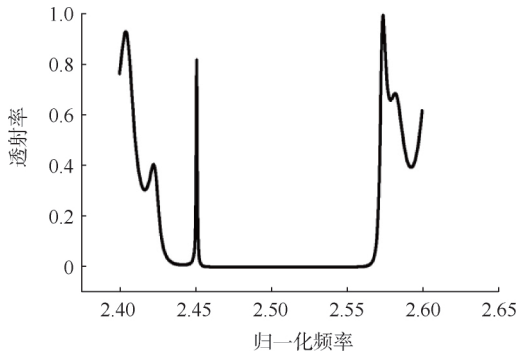


图 4 $(AB)_m(CD)_m$ 透射率随频率的变化关系

为了使得 2 个不同的光子晶体在狄拉克点附近具有共同的带隙,让这 2 个光子晶体的周期单元为恒定的 L. 并且 n_b、n_d 的折射率始终为 1. (本文中所有 n_b、n_d 折射率均假定为 1) 当 n_a 固定时相应的 $d_a = \dfrac{L_0 - n_b d_b}{n_a}$ 且 $d_b = 1 - d_a$. 同理, n_c 固定时,也可以求出相应的 $d_c = \dfrac{L_0 - n_d d_d}{n_c}$. 定义狄拉克点偏移率 $\delta_a = \dfrac{n_a - n_0}{n_0}$, $n_0 = 2$,在该结构下,光子晶体具有狄拉克点. 令 $\delta_a = -\delta_c$ 即 $n_a - n_0 = n_0 - n_c$.

图 5 给出了不同 δ_a 下透过率随频率的变化关系. 可以发现,峰值对应的频率为相应的界面模频率. 当 δ_a 较小时,界面模的透过率很高,随着 δ_a 增大,界面模的透过率显著降低,而 δ_a 为 14% 时,界面模的透射完全消失. 本文计算了其他偏移率的透过率曲线,发现 δ_a 在小于 14% 的范围内均可以发现界面模,而超过 14% 界面模消失. 因此在狄拉克点附近存在界面态有一定的范围限制.

下面讨论 $\delta_a \neq -\delta_c$ 的情况. 假定 PC1 的结构固定,其参数为 $n_a = 1.85$, $d_a = 0.4706$,通过改变 PC2 的折射率 n_c, 根据公式(2) 得到相应的 d_c, 因此仅通过改变 n_c, PC2 的结构就可以固定. 图 6 描述了界面模的透过率随 n_c 的变化,发现当 $n_c = 2.17$ 时界面模的透过率为 1,偏离 2.17 时界面模的透过率减小. 这说明 $n_a = 1.85$ 时,其最佳匹配结构相应于 $n_c = 2.17$. 图 7 给出了不同的 n_a 下界面模透过率随 n_c 的变化曲线. 发现他们曲线形状基本类似. 不同的 PC1 都有相应最佳匹配的 PC2.

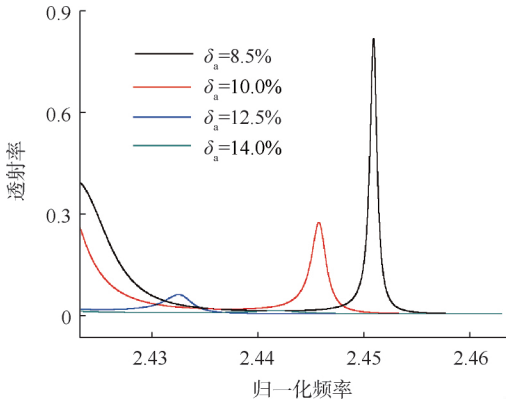


图 5 界面模透射率随归一化频率变化图像

固定 PC1 参数 $n_a d_a$, $n_b d_b$, 随着 PC2 折射率的改变,整体异质结构的界面模透射率和界面模位置都有不断的变化. 可以基本掌握每一组 PC1 的偏移率参数所对应的完全透射的界面模位置,总结为表 1.

表 1 透射率最佳时的一维光子晶体异质结构参数

n_a	n_c
1.75	2.14
1.80	2.175
1.85	2.17
1.90	2.12
1.95	2.075

表 1 给出了 PC1 所对应的最佳匹配的 PC2,特别强调的是 PC1 的结构仅由 n_a 决定,PC2 的折射率

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

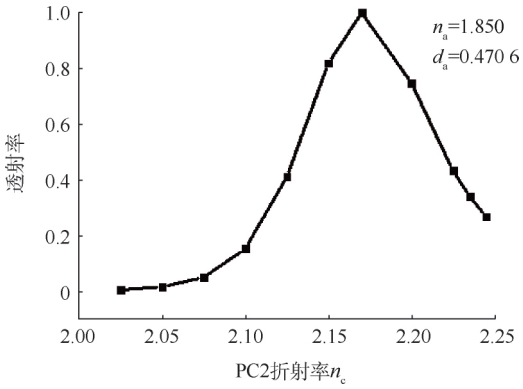


图 6 不同的异质结构下,界面模的透射率随 PC2 折射率 n_c 的变化曲线

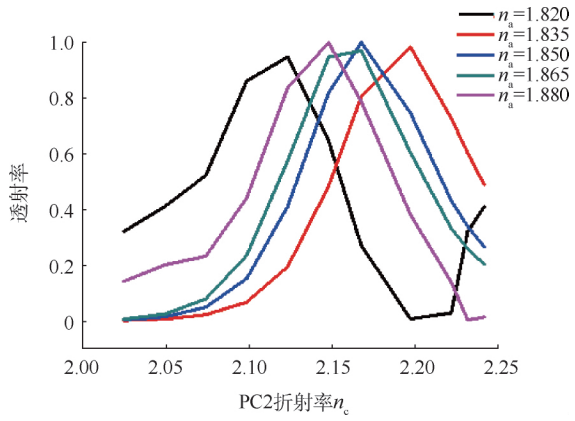


图 7 PC1 介质折射率参数 n_a 取不同值时透射率随 PC2 折射率 n_c 的变化曲线

仅由 n_c 决定. 还可以给出很多这样的匹配的光子晶体异质结结构,使得界面模的透过率为 1.

2 总 结

本文采用狄拉克点方法研究光子晶体异质结的界面态. 通过调节体系的参数, 研究了偏移率对光子晶体异质结构界面态的透过率影响,并且进一步探讨了存在界面态的极限条件. 研究了存在界面态的范围内满足对称条件下的异质结界面态的透射率随光子晶体折射率的变化关系,发现每一个 PC1 都有最佳的 PC2 与之匹配,使得界面模透过率为 1.

参 考 文 献

[1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett,1987,58(20):2059 – 2062.

[2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys Rev Lett,1987,58(23):2486 – 2489.

[3] ZAK J. Berry´s phase for energy bands in solids [J]. Phys Rev Lett,1989,62(23):2747 – 2750.

[4] XIAO M,ZHANG Z Q,CHAN C T. Surface impedance and bulk band geometric phases in one-dimensional systems [J]. Phys Rev X,2014,4(2):021017.

[5] ZHAO L M,ZHOU Y S,WANG A H. Facile way to obtain multiple interface modes in a photonic crystal heterostructure [J]. Optics Letters,2018,43(14):3216 – 3219.

[6] YARIV A, YEH P. Optical waves in crystals: propagation and control of laser radiation [M]. New York: Wiley-Interscience,1984.

[7] MAGNUSSON R,WANG S S. New principle for optical filters [J]. Appl Phys Lett,1992,61(9):1022 – 1024.

[8] XU T,FANG A A,JIA Z Y,et al. Realization of a complementary medium using dielectric photonic crystals [J]. Optics Letters,2017,42(23):4909 – 4912.

[9] 寇东辉,马威,张淑芬,等. 一维光子晶体结构色材料的应用研究进展 [J]. 化工进展,2018,37(4):1468 – 1479.

[10] 张茂婷,郑改革,吴红艳,等. 含石墨烯缺陷的一维光子晶体吸收特性研究 [J]. 量子电子学报,2018,35(3):326 – 331.

[11] MULKEY T, DILLIES J, DURACH M. Inverse problem of quartic photonics [J]. Optics Letters, 2018, 43(6):1226 – 1229.

[12] XIE K,BOARDMAN A D,LI Q,et al. Spatial algebraic solitons at the Dirac point in optically induced nonlinear photonic lattices [J]. Optics Express,2017,25(24):30349 – 30364.

[13] CHAN C T,HUANG X,LIU F,et al. Dirac dispersion and zero-index in two dimensional and three dimensional photonic and phononic systems [J]. Progress In Electromagnetics Research B,2012,44:163 – 190.

[14] KIM D K,DUAN C H,CHEN Y F,et al. Power generation from concentration gradient by reverse electrodialysis in ion-selective nanochannels [J]. Microfluidics and Nanofluidics,2010,9(6):1215 – 1224.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[15] ZHAO J M,HUO S Y,HUANG H B,et al. Topological interface states of shear horizontal guided wave in one-dimensional phononic quasicrystal slabs [J]. Physica Status Solidi-Rapid Research Letters,2018,12(10):1800322.
[16] CARMICINO C, DI MARTINO G D. Analytical modeling of the one-dimensional acoustic field in hybrid rocket combustion chamber [J]. Journal of Sound and Vibration,2018,437:180 - 197.

Interface State in One Dimensional Photonic Crystal Heterostructures

GUO Yihang ZHAO Liming

(Department of Physics,Capital Normal University,Beijing 100048)

Abstract: The interface state of one-dimensional photonic crystal heterostructures $(AB)_m(CD)_m$ is studied by Dirac point method. The limit conditions of the existence of the interface state are discussed by adjusting the parameters of the system. The range of existing interface states is studied, and the relationship between the transmission of heterostructures states with refractive index under symmetric conditions is given. It is found that the corresponding optimal $(CD)_m$ structure can be found for each set of fixed $(AB)_m$ and the corresponding transmission can reach 1.

Keywords: one dimensional photonic crystal; heterostructures; topological interface state

---

(上接第 18 页)

在今后预测模型的优化上,还有很多的改进之处,如调整决策树的参数,特征的精细化筛选,或采用随机森林、遗传算法多算法相结合的方式进行模型评估,并分析用户分类、生命周期以及各变量之间的交叉性和相关性等等,以达到更好的预测效果.

参 考 文 献

[1] 李爱民. 基于逻辑回归和聚类分析的广电客户流失预警 [J]. 信息与电脑(理论版),2016(9):29 - 30 + 35.
[2] 周静,周小宇,王汉生. 自我网络特征对电信客户流失的影响 [J]. 管理科学,2017,30(5):28 - 37.
[3] 陈纪铭. 基于朴素贝叶斯分类算法的学员流失预警应用研究 [J]. 福建电脑,2017,33(8):105 - 106.
[4] 林明辉. 基于 BP 网络的通讯行业客户流失预警模型研究 [J]. 陕西学前师范学院学报,2016,32(3):146 - 149.
[5] HUANG J F, HE L L. Application of improved PSO-BP neural network in customer churn warning [J]. Procedia Computer Science,2018,131:1238 - 1246.
[6] 唐立,李六杏. 基于改进 CART 算法的 M-learning 过程中知识掌握程度预测 [J]. 韶关学院学报,2018(9):26 - 31.

Early Warning Model of Stock Customer Churn Based on Random Forest

YANG Rong ZHAO Juanjuan JIA Guojun

(Shanxi Normal University,School of Mathematics and Computer Science and Technology,Computer Science and Technology, Linfen Shanxi 044600)

Abstract: This study established a decision tree model based on the user package tariffs, and used the cross-validation method to select the optimal decision tree, further explored the lost user attributes, and provided decision support for operators to accurately initiate early warning retention and maintenance strategies, and got better experimental results.

Keywords: stock customer; decision tree; CART algorithm; early warning retentio

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net