

硅基光子晶体异质结的单向传输特性

刘丹 胡森 肖明

Study on unidirectional transmission in silicon photonic crystal heterojunctions

Liu Dan Hu Sen Xiao Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 054209 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.054209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.054209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

宽绝对禁带的一维磁性光子晶体结构

One-dimensional magnetic photonic crystal structures with wide absolute bandgaps

物理学报.2017, 66(1): 014204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.014204>

新型 Fibonacci 准周期结构一维等离子体光子晶体的全方位带隙特性研究

Omnidirectional photonic bandgap of the one-dimensional plasma photonic crystal based on a novel Fibonacci quasiperiodic structure

物理学报.2016, 65(24): 244204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.244204>

基于 TPPs-SPPs 混合模式的激发以增强单纳米缝异常透射

Extraordinary transmission of light enhanced by exciting hybrid states of Tamm and surface plasmon polaritons in a single nano-slit

物理学报.2016, 65(20): 204207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204207>

LCR 分流电路下压电声子晶体智能材料的带隙

Band gaps of the phononic piezoelectric smart materials with LCR shunting circuits

物理学报.2016, 65(16): 164202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164202>

近零折射率材料的古斯汉欣位移的特性研究

Goos-Hänchen shift based on near-zero-refractive-index materials

物理学报.2016, 65(15): 154208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154208>

硅基光子晶体异质结的单向传输特性*

刘丹^{1)†} 胡森¹⁾²⁾ 肖明¹⁾

1)(湖北第二师范学院物理与机电工程学院, 武汉 430205)

2)(华中师范大学物理科学与技术学院, 武汉 430079)

(2016年7月24日收到; 2016年12月2日收到修改稿)

基于光子晶体异质结结构实现高效的单向传输特性的光二极管是光电集成及全光通信领域的研究热点. 根据光子晶体方向带隙差异构建了正交和非正交光子晶体异质结结构, 利用时域有限差分法计算透过谱及场分布图. 对比研究发现, 非正交光子晶体异质结结构能够实现光的单向传输. 通过界面结构的调整, 优化了单向传输性能, 构造了一种能够实现宽频带、高效率单向传输的异质结结构. 优化后的光子晶体异质结的单向传输效率高达54%, 且结构简单、尺寸小, 实用性强.

关键词: 光子晶体异质结, 单向传输, 时域有限差分法

PACS: 42.70.Qs, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.66.054209

1 引言

硅是一种性能优越的半导体材料, 在集成电路的发展过程中起到了重要作用. 硅材料还是一种被广泛运用的光子材料, 使得硅基集成光电子学研究备受青睐. 但是硅基光电集成器件的尺寸要求达到微纳米级别, 因此无法用经典的几何光学理论来研究, 需要研究操纵和利用光的新机理^[1,2]. 光子晶体是一种有效的方法, 其独特的光子禁带和光子局域特性被广泛研究, 应用的领域也不断扩大^[1,3-7]. 电子二极管是集成电路的基本结构单元, 与此类似, 如何实现光信号的单向传输, 即光二极管, 是光电集成及全光通信领域中需要解决的基本问题^[8].

光的单向传输通常要求满足时间反演对称破缺或空间反转对称破缺. 采用时间反演对称破缺的方案来实现光二极管的报道较多, 其中材料电光^[9]、磁光^[10,11]、非线性^[12]效应通常作为实现光二极管的有效途径^[2]. 这种方案均需外界条件(电场、磁场或光场)才能实现, 其应用受到限制. 采用空间反转对称破缺的方案可以弥补这个缺点, 因

此备受关注^[13-24]. 其中, 基于光子晶体结构的光二极管由于其独特的性能成为研究热点. Li等^[13]首先报道了基于空间反转对称破缺的声子二极管, 为设计光子晶体光二极管提供了参考. Kurt等^[14]设计了空气中非对称分布的硅柱型光子晶体波导, 破坏了结构的对称性, 通过数值计算和实验验证了光波的单向传输. Zhang等^[15]以光栅和正方排列的硅柱型光子晶体为单元设计了硅基光栅-光子晶体结构, 实现了光波在宽频带内高对比度的单向传输. 这些研究成果为硅基光子晶体光二极管的实现提供了重要的途径. 光子晶体异质结结构如同电子电路系统中的PN结, 能极大地改进光子晶体器件的性能, 高效单向传输的异质结结构连接合适参数的输入、输出波导将构造出高性能的光二极管^[2,25]. Wang等^[2]首次利用硅基平板光子晶体异质结结构实现了近红外波段的光子晶体全光二极管. 冯帅课题组也先后设计了多种二维硅基光子晶体正交异质结结构, 成功地获得了光的单向传输特性^[16-18]. 他们设计了二维硅基正方排列的空气孔型光子晶体异质结结构(含界面耦合区), 基于优化

* 国家自然科学基金(批准号: 11504100)和湖北省教育厅中青年人才项目(批准号: Q20153004)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liudanhu725@126.com

的界面耦合区结构实现了光的单向传输^[18]. 这些光二极管的设计一般采用正交或非正交光子晶体异质结结构, 针对这两类光子晶体异质结结构的对比分析还没有系统的研究. 因此, 本文构建了二维硅基光子晶体异质结结构, 对比分析了正交及非正交异质结界面情况下的传输特性, 发现正交异质结结构无法实现光的单向传输, 而非正交异质结结构能在较宽频率范围内实现单向传输. 与文献^[18]的结果相比, 该结构更简单、尺寸更小、实用性更强. 此外, 本文还探讨了非正交异质结结构中界面耦合区的结构对单向传输特性的影响, 通过优化异质结界面, 实现了宽频带、高效率的单向传输特性.

2 光子晶体模型及能带结构分析

光子晶体异质结结构由两个晶格常数相同、空气孔半径不同的二维正方晶格光子晶体(PC1和PC2)拼接而成. 光子晶体的结构如图1所示, PC1和PC2长度均为21列空气孔, 宽度均为21行空气孔, 且基底为硅材料(折射率为3.45). 设两光子晶体晶格常数为 a , 空气孔半径分别为 $r_1 = 0.15a$ 和 $r_2 = 0.4a$ (选用文献^[18]中提到的结构参数). 完整的正方晶格光子晶体有两个基本的对称方向: 沿 x 轴的 Γ - X 方向和与 x 轴成 45° 夹角的 Γ - M 方向(Γ, X, M 分别表示正方晶格对应的第一布里渊区的高对称点).

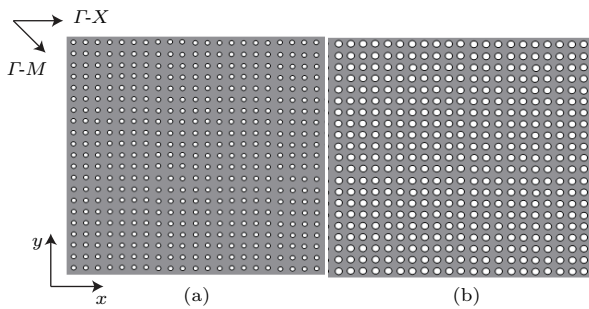


图1 光子晶体的结构示意图 (a) PC1; (b) PC2
Fig. 1. Schematic of photonic crystal structure: (a) PC1; (b) PC2.

采用平面波展开法分别计算PC1及PC2光子晶体的横电(TE)模式的能带结构, 结果如图2所示.

由图2(a)可知, PC2光子晶体在 $0.18-0.29a \cdot \lambda^{-1}$ 频率范围内沿着 Γ - X 方向是禁带, 处于该频率范围内的入射光将被禁止沿 Γ - X 方向穿过PC2区

域; 同时, PC2光子晶体在 $0.18-0.26a \cdot \lambda^{-1}$ 频率范围内沿着 Γ - M 方向是通带, 处于该频率范围内的入射光可沿 Γ - M 方向穿过PC2区域. 由图2(b)可知, 入射光频率为 $0.18-0.26a \cdot \lambda^{-1}$ 时, 既可沿 Γ - X 方向穿过PC1区域, 也可沿 Γ - M 方向穿过PC1区域. 以上分析说明, 在一定的频率范围内, PC1光子晶体为全方向导带, 而PC2光子晶体存在方向带隙, 这正是异质结结构能实现单向传输的必要条件^[2,18]. 因此, 以PC1和PC2光子晶体来构建异质结结构, 有望实现光的单向传输.

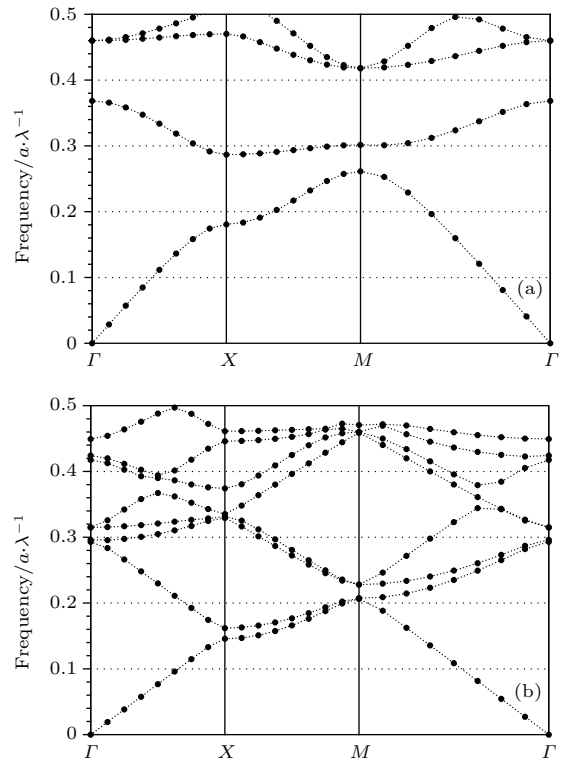


图2 光子晶体TE模的能带结构 (a) PC2; (b) PC1
Fig. 2. TE band structure of photonic crystal: (a) PC2; (b) PC1.

3 异质结结构的构建与透过谱分析

基于PC1和PC2光子晶体构建了两种光子晶体异质结结构, 一种具有正交异质结界面, 另一种具有非正交异质结界面, 结构如图3所示. 正交光子晶体异质结结构指的是交界面与入射光方向(沿 x 轴方向)正交, 而非正交则是指交界面与入射光方向非正交. 由于交界面与入射光方向夹角为 45° 时, 结构的单向传输性能最佳且更容易制备^[2,25], 因此本文提到的非正交异质结结构特指交界面与入射光方向成 45° 角.

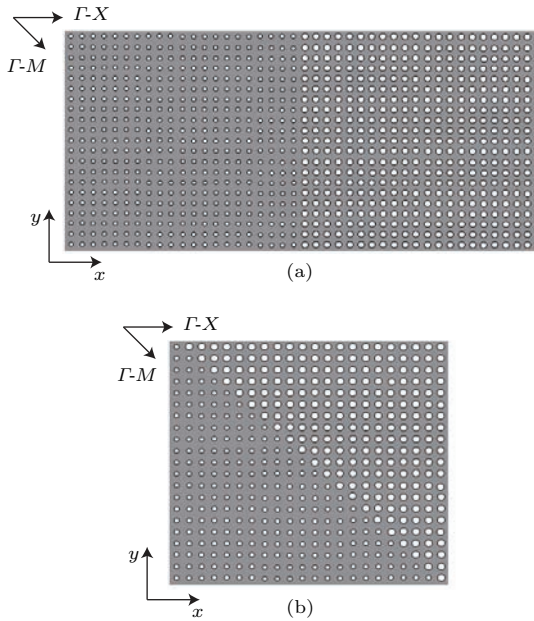


图3 光子晶体异质结构示意图 (a) 二维正交异质结; (b) 二维非正交异质结
 Fig. 3. Schematic of photonic crystal heterojunction structures: (a) 2D orthogonal heterojunction; (b) 2D non-orthogonal heterojunction.

利用时域有限差分法计算异质结构的透过谱. 将每个晶格常数 a 分为 40 个网格, 并将整个结构包裹在理想匹配层吸收边界条件下以保证计算的准确性. 所使用的光源为类 TE 模式高斯波形电磁波 (包含 E_x, E_y, H_z 分量), 脉冲的频谱宽度为 $0.10-0.36a \cdot \lambda^{-1}$, 覆盖了所需要的频率范围. 在异质结构的输入端设置光源, 并在输出端设置接收屏, 记录能流强度随时间演化的数据, 再通过傅里叶变换得到频率强度谱, 将光源的频率强度谱归一化即可得到异质结构在不同频率上的透过率 [2]. 定义由 PC1 射向 PC2 的光, 即从左至右的入射光为正向光, 由 PC2 射向 PC1 的光, 即从右至左的入射光为反向光. 两种异质结构的透过谱如图 4 所示.

由图 4(a) 可知, 二维正交光子晶体异质结构的正向和反向透过率在频率为 $0.16-0.30a \cdot \lambda^{-1}$ 的区域内几乎重合, 在频率为 $0.18-0.28a \cdot \lambda^{-1}$ 的区域内, 正、反向透过率几乎为 0, 说明不管入射光从左入射还是从右入射都无法穿透此异质结构, 此结构不具有单向传输特性, 因此直接利用图 3(a) 所示正交光子晶体异质结构 (不包含界面耦合区) 无法实现光二极管的功能 [18].

图 4(b) 是二维非正交光子晶体异质结构的正、反向透过谱. 该图显示了完全不同于图 4(a)

的特性, 正向和反向透过率有很大的差异. 当频率为 $0.18-0.28a \cdot \lambda^{-1}$ 时, 反向透过率为 0, 说明入射光无法从右至左穿透异质结构; 当频率在 $0.18-0.23a \cdot \lambda^{-1}$ 区域时, 正向透过率在 10%—45% 之间变化, 且当频率为 $0.22a \cdot \lambda^{-1}$ 时, 正向透过率约为 45%. 由此可见, 图 3(b) 所示非正交异质结构能够实现单向传输, 基于此结构可以构造光子晶体光二极管, 与文献 [18] 中的正交光子晶体异质结构 (含界面耦合区) 相比, 该结构更简单, 尺寸更小, 实用性更强.

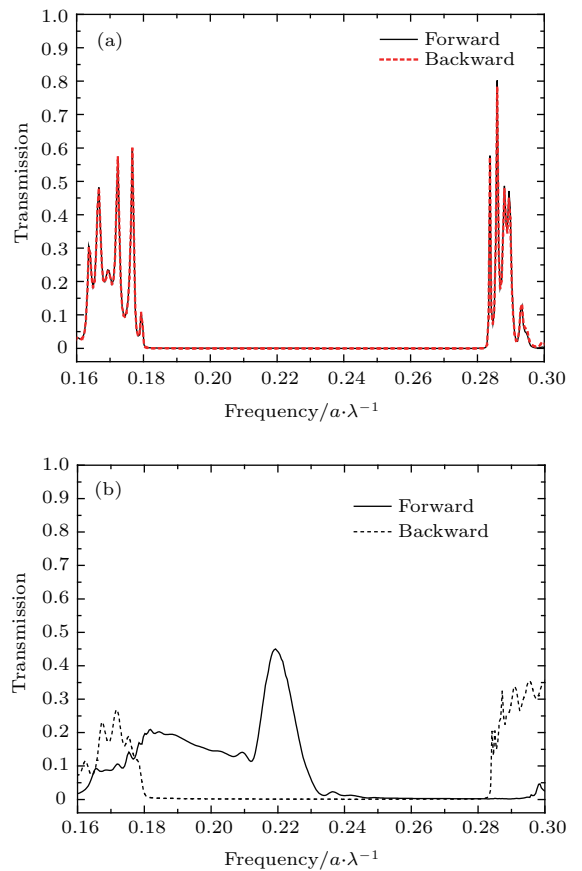


图4 (网刊彩色) 光子晶体异质结构的透过谱 (a) 二维正交异质结; (b) 二维非正交异质结

Fig. 4. (color online) Transmission spectra of photonic crystal heterojunction structures: (a) 2D orthogonal heterojunction; (b) 2D non-orthogonal heterojunction.

为了更直观地观察和比较异质结构的传输特性, 利用时域有限差分法模拟了类 TE 模式电磁波 E_y 分量在频率为 $0.22a \cdot \lambda^{-1}$ 时的场分布情况, 结果如图 5 所示.

由图 5(a) 可知, 当光正向入射时, 能直接穿透 PC1 区域到达界面, 但无法继续穿透 PC2 区域, 在结构的右侧观测不到出射场. 因为该频率虽然位于

PC1光子晶体 Γ - X 方向导带区域,但却位于PC2光子晶体 Γ - X 方向带隙区域,所以光无法穿透此异质结结构.由图5(b)可知,光反向入射时,由于无法沿 Γ - X 方向穿过PC2区域,因此在结构的左侧无出射场存在.即正交光子晶体异质结结构在频率为 $0.22a \cdot \lambda^{-1}$ 时,正、反向透过率均为0.由图5(c)和图5(d)可知,当光正向入射时,可直接透过PC1区域到达交界面,同时由于此频率位于PC2

光子晶体 Γ - M 方向导带区域,因此部分光沿着异质结交界面衍射进入PC2区域,在结构的右侧明显地观测到出射场;当光反向入射时,不能沿 Γ - X 方向穿过PC2区域,因此在PC1的左侧几乎观测不到出射场.即非正交光子晶体异质结结构在频率为 $0.22a \cdot \lambda^{-1}$ 时,显现出良好的单向传输特性.以上由场分布图观察的现象与透过谱的计算结果保持一致.

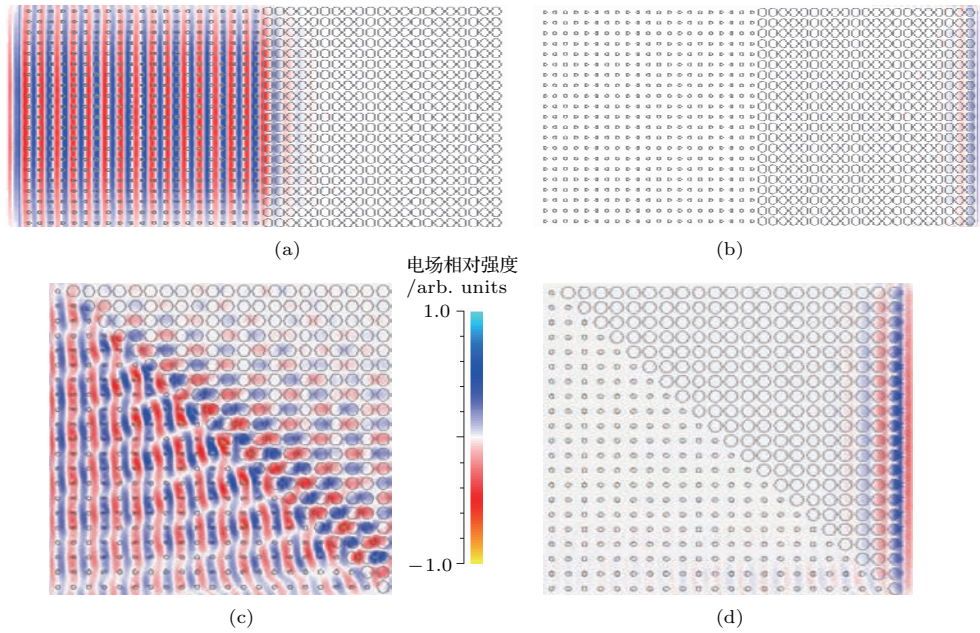


图5 (网刊彩色) 频率为 $0.22a \cdot \lambda^{-1}$ 时电场分量 E_y 的场分布图 (a), (b) 正交异质结结构正、反向场分布; (c), (d) 非正交异质结结构正、反向场分布
 Fig. 5. (color online) E_y field distribution at $0.22a \cdot \lambda^{-1}$: (a), (b) The forward and backward field distributions of orthogonal heterojunction structure; (c), (d) the forward and backward field distributions of non-orthogonal heterojunction structure.

分析结果表明,能带结构显示基于PC1与PC2光子晶体的异质结结构具有实现光单向传输的必要条件,但透过谱和场分布图的对比分析说明能否实现光的单向传输还与异质结界面的方位有关.

4 光子晶体异质结结构的优化设计

第3节的分析表明,非正交异质结结构能实现光的单向传输,且单向传输效率达到45%.为了进一步提高单向传输效率,构造高性能的光二极管,对非正交异质结结构实行了界面优化设计.

将PC2结构中靠近交界面的一组空气孔的半径减小至 $0.15a$,形成第一种优化结构,如图6(a)所示.采用时域有限差分法计算该异质结结构的正、反向透过谱和场分布,结果如图6(b)—(d)所示.

由图6(b)可知,当入射光频率为 $0.22a \cdot \lambda^{-1}$ 时,该结构显示出单向传输特性.由图6(c)和图6(d)可知,优化后的结构对应的反向透过谱与未优化结构的反向透过谱差异很小,都处在 $0.18—0.28a \cdot \lambda^{-1}$ 频率区域内,反向透过率为0;优化后与未优化结构的正向透过谱的变化趋势几乎相同,当频率为 $0.18—0.26a \cdot \lambda^{-1}$ 时仍表现出单向传输特性,但最大正向透过率有所提高,达到了50%.

在图6(a)结构的基础之上,直接将PC2结构中靠近交界面的一组空气孔去掉,形成第二种优化结构,如图7(a)所示.采用时域有限差分法来计算该异质结结构的正、反向透过谱和场分布,结果如图7(b)—图7(d)所示.场分布图显示,当入射光频率为 $0.22a \cdot \lambda^{-1}$ 时,该结构能实现单向传输.透过谱计算结果说明,与未优化结构相比,反向透过

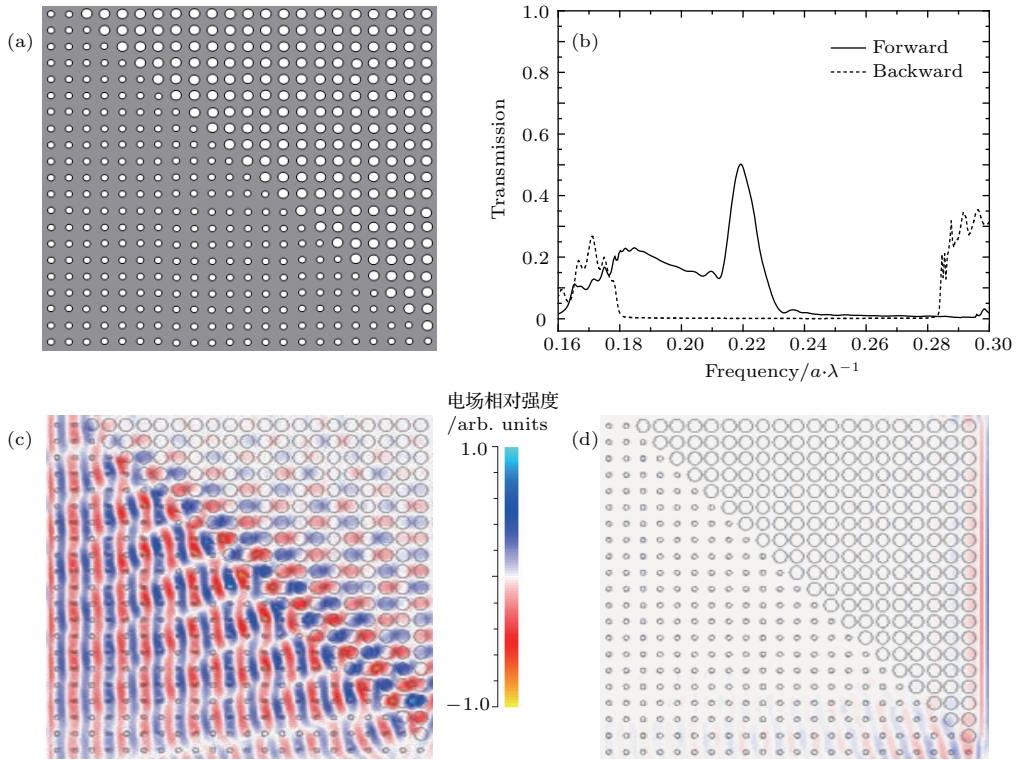


图6 (网刊彩色) (a) 二维非正交光子晶体异质结结构的优化设计; (b) 透过谱; (c), (d) 频率为 $0.22a \cdot \lambda^{-1}$ 时电场分量 E_y 的正、反向场分布

Fig. 6. (color online) (a) Optimized 2D non-orthogonal photonic crystal heterojunction structure; (b) transmission spectra; (c), (d) the forward and backward field distributions of E_y at $0.22a \cdot \lambda^{-1}$.

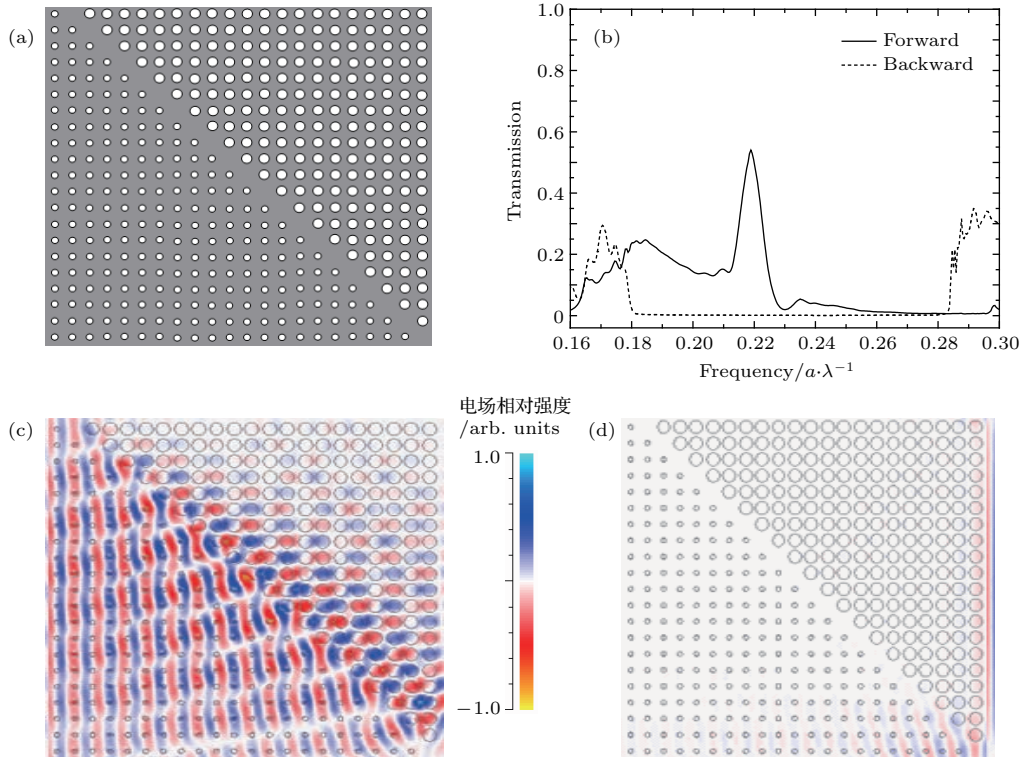


图7 (网刊彩色) (a) 二维非正交光子晶体异质结结构的优化设计图; (b) 透过谱; (c), (d) 频率为 $0.22a \cdot \lambda^{-1}$ 时电场分量 E_y 的正、反向场分布图

Fig. 7. (color online) (a) Optimized 2D non-orthogonal photonic crystal heterojunction structure; (b) transmission spectra; (c), (d) the forward and backward field distributions of E_y at $0.22a \cdot \lambda^{-1}$.

谱基本保持不变, 而正向透过谱峰值明显增大, 最大透过率超过 54%, 透过率提高了 10%, 此结构能在 $0.18-0.26a \cdot \lambda^{-1}$ 的频率区域内实现高效的单向传输.

综上可知, 通过优化异质结界面, 光子晶体异质结结构的单向传输效率有了明显的提高.

5 结 论

本文基于光子晶体方向带隙差异构建了二维硅基光子晶体异质结结构, 对比分析了正交和非正交异质结界面情况下的传输特性, 发现正交异质结结构无法实现光的单向传输, 而非正交异质结结构能在较宽频率范围内实现光的单向传输. 由此得出, 能否实现光的单向传输与异质结界面的方位紧密相关. 此外, 针对非正交光子晶体异质结结构提出了两种改变界面耦合区结构的设计方案, 使得单向传输效率提高了 10% 左右. 基于该光子晶体异质结结构, 连接合适参数的输入、输出波导将构造出高性能的光二极管, 从而为光二极管的设计提供重要的参考.

参考文献

- [1] Hou J 2011 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [侯金 2011 博士学位论文(武汉: 华中科技大学)]
- [2] Wang C, Zhou C Z, Li Z Y 2011 *Opt. Express* **19** 26948
- [3] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [4] Joannopoulos D J, Mead D R, Winn N J 2008 *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* Second Edition (Princeton: Princeton University Press) pp190–206
- [5] Wu H, Jiang L Y, Jia W, *et al.* 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 034203
- [6] Zhu Q Y, Fu Y Q, Hu D Q, *et al.* 2012 *Chin. Phys. B* **21** 064220
- [7] Zhou Y, Yin L Q 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 064213
- [8] Zhang X Z, Feng M, Zhang X Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024201 (in Chinese) [张学智, 冯鸣, 张心正 2013 物理学报 **62** 024201]
- [9] Ibrahim S K, Bhandare S, Sandel D, *et al.* 2004 *Electron. Lett.* **40** 1293
- [10] Zaman T R, Guo X, Ram R 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 023514
- [11] Bi L, Hu J, Jiang P, *et al.* 2011 *Nat. Photonics* **5** 758
- [12] Fan L, Wang J, Varghese L T 2012 *Science* **335** 447
- [13] Li X F, Ni X, Feng L, *et al.* 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 084301
- [14] Kurt H, Yilmaz D, Akosman A E, *et al.* 2012 *Opt. Express* **20** 20635
- [15] Zhang Y Y, Kan Q, Wang G P 2014 *Opt. Lett.* **39** 4934
- [16] Feng S, Wang Y Q 2013 *Opt. Express* **21** 220
- [17] Feng S, Wang Y Q 2013 *Opt. Mater.* **36** 546
- [18] Cheng L F, Ren C, Wang P, Feng S 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 154213 (in Chinese) [程立锋, 任承, 王萍, 冯帅 2014 物理学报 **63** 154213]
- [19] Lu C C, Hu X Y, Zhang Y B, *et al.* 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 051107
- [20] Cicek A, Yucel M B, Kaya O A, *et al.* 2012 *Opt. Lett.* **37** 2937
- [21] Feng L, Ayache M, Huang J, *et al.* 2011 *Science* **333** 729
- [22] Colak E, Serebryannikov A E, Cakmak A O, *et al.* 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 151105
- [23] Wang L H, Yang X L, Meng X F, *et al.* 2014 *Chin. Phys. B* **23** 034215
- [24] Cao Z, Qi X Y, Zhang G Q, *et al.* 2013 *Opt. Lett.* **38** 3212
- [25] Li L 2015 *M. S. Dissertation* (Taiyuan: Taiyuan University of Technology) (in Chinese) [李琳 2015 硕士学位论文(太原: 太原理工大学)]

Study on unidirectional transmission in silicon photonic crystal heterojunctions*

Liu Dan^{1)†} Hu Sen¹⁾²⁾ Xiao Ming¹⁾

1) (School of Physics and Mechanical and Electrical Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430205, China)

2) (College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

(Received 24 July 2016; revised manuscript received 2 December 2016)

Abstract

Electronic diode plays an important role in electronic circuits owing to its capability of unidirectional movement of the current flux. An optical diode offers unidirectional propagation of light beams, which plays key roles in the all-optical integrated circuits. Unidirectional wave propagation requires either time-reversal or spatial inversion symmetry breaking. The former can be achieved with the help of nonlinear materials, magnetic-optical materials and so on. The realization of these schemes all needs the external conditions (electric field, magnetic field or light field), and thus their applications are limited. In contrast, spatial inversion symmetry breaking can make up for this shortcoming and has been widely studied.

Through breaking the structure's spatial inversion symmetry, much research demonstrated that the unidirectional light propagation could be achieved in a photonic crystal structure. Specially, the optical diode based on the photonic crystal heterojunction has been drawing much attention. Though relevant studies have been reported, how to find a more simple structure to realize high-efficiency optical diodes is always pursued by people. The previous design of optical diode is generally based on the orthogonal or non-orthogonal photonic crystal heterojunctions. However, the comparative analysis of the two types of heterojunctions has not been systematically carried out. The transmission characteristics of two-dimensional orthogonal and non-orthogonal silicon photonic crystal heterojunctions are obtained and compared. Firstly, the directional band gap mismatch of two-dimensional square-lattice silicon photonic crystals with the same lattice constant but different air hole radii is calculated by the plane wave expansion method. The band structure indicates that in a certain frequency range, one photonic crystal is the omni-directional pass band, while the other has directional band gap. This is just the necessary condition for the unidirectional light transmission through the photonic crystal heterojunctions. Therefore, the heterojunction constructed by the two photonic crystals is expected to achieve optical diode. Based on this, the orthogonal and the non-orthogonal heterojunctions are proposed. Their transmission spectra and field distributions are calculated by the finite-difference time-domain method. The results show that the unidirectional light transmission can be realized by the non-orthogonal heterojunction structure (unidirectional transmission efficiency reaches 45%) but not the orthogonal heterojunction structure. That is to say, the realization of unidirectional transmission is closely related to the orientation of the hetero-interface. Moreover, the non-orthogonal photonic crystal hetero-interface is optimized. It is found that the unidirectional transmission efficiency increases to 54% and the overall increases by 10%. More importantly, it greatly improves the performance of optical diode for its simple structure and small size, and provides another more effective design method.

Keywords: photonic crystal heterojunction, unidirectional transmission, finite-difference time-domain method

PACS: 42.70.Qs, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.66.054209

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11504100) and the Fund for Excellent Youths of the Hubei Provincial Department of Education, China (Grant No. Q20153004).

† Corresponding author. E-mail: liudanhu725@126.com