



漏斗型完全光子带隙光波导单向传输

智文强 费宏明 韩雨辉 武敏 张明达 刘欣 曹斌照 杨毅彪

Unidirectional transmission of funnel-shaped waveguide with complete bandgap

Zhi Wen-Qiang Fei Hong-Ming Han Yu-Hui Wu Min Zhang Ming-Da Liu Xin Cao Bin-Zhao Yang Yi-Biao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 038501 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211299

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211299>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可实现偏振无关单向传输的二维硅基环形孔光子晶体

Two-dimensional silicon annular photonic crystals for realizing polarization-independent unidirectional transmission

物理学报. 2019, 68(2): 024206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181397>

新型二维三组元压电声子晶体板的缺陷态及振动能量回收

Defect states and vibration energy recovery of novel two-dimensional piezoelectric phononic crystal plate

物理学报. 2019, 68(23): 234206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190260>

离子辐照和氧化对IG-110核级石墨中的点缺陷的影响

Effects of ion irradiation and oxidation on point defects in IG-110 nuclear grade graphite

物理学报. 2019, 68(12): 128102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190371>

点缺陷调控: 宽禁带II族氧化物半导体的机遇与挑战

Point defects: key issues for II-oxides wide-bandgap semiconductors development

物理学报. 2019, 68(16): 167802 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191043>

基于环形微腔的多频段三角晶格光子晶体耦合腔波导光学传输特性

Optical transmission characteristics of multi-band triangular-lattice photonic crystal coupling cavity waveguide based on annular microcavity

物理学报. 2018, 67(23): 234201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181579>

金属材料界面与辐照缺陷的交互作用机理

Mechanism of interaction between interface and radiation defects in metal

物理学报. 2019, 68(13): 137901 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190128>

漏斗型完全光子带隙光波导单向传输*

智文强¹⁾²⁾ 费宏明^{1)2)†} 韩雨辉¹⁾²⁾ 武敏¹⁾²⁾ 张明达¹⁾²⁾
刘欣¹⁾²⁾ 曹斌照¹⁾²⁾ 杨毅彪¹⁾²⁾

1) (太原理工大学物理与光电工程学院, 太原 030024)

2) (太原理工大学, 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 太原 030024)

(2021年7月13日收到; 2021年10月14日收到修改稿)

光波单向传输器件在全光计算和信息处理方面具有重要应用. 本文提出一种具有完全光子带隙的硅基空气孔光子晶体漏斗型光波导结构, 在光通信波段可实现单向传输特性. 漏斗型光波导可打破光波对称传输, 引入点缺陷通过模式转换与失配进一步抑制反向透射, 并研究了不同的点缺陷类型与位置对反向透射的影响. 采用时域有限差分法进行数值计算, 优化选取了最佳的点缺陷模式. 结果显示, 单柱型点缺陷在向左移动 $5a$ (a 为光子晶体晶格常数, $a = 470$ nm) 时, 横电 (TE) 偏振光在工作波长 1550 nm 处正向透射率为 0.716, 透射对比度为 0.929, 工作带宽为 111 nm. 另外, 本文提出的光波单向传输器件结构简单、工艺要求低, 有望为集成光路中单向传输器件设计提供新的解决方案.

关键词: 漏斗型光波导, 光子带隙, 点缺陷, 单向传输, 模式转换

PACS: 85.60.Bt, 41.20.Jb, 42.70.Qs

DOI: 10.7498/aps.71.20211299

1 引言

当前集成电路的发展遇到诸多瓶颈, 随着器件尺寸不断缩小, 短沟道效应和量子隧穿效应显著, 以致漏功率增加^[1]. 在后摩尔时代与大数据信息时代背景下, 集成光路有望为当代信息处理开辟一条全新的道路^[2]. 电子二极管由于其正向导通反向截止的单向导电性, 成为集成电路的主要构成单元, 而具有光波单向传输能力的单向传输器件的设计就成了实现集成光路首要解决的问题^[3-5].

早期实现光波单向传输器件的主要原理是通过破坏时间反演对称性, 但是该原理所设计的器件不利于用于微纳尺度的光学芯片, 而后破坏空间反演对称性成为目前实现光波单向传输器件的主要

手段^[6]. 基于微纳光子结构的光波单向传输结构已经有了丰富的研究成果, 主要有手性超材料^[7]、超表面^[8,9]、亚波长金属光栅^[10,11]和光子晶体^[12-27]等. 其中光子晶体因具有光子带隙和光子局域特性, 且易微纳尺度集成、可用于控制波长与其周期相比拟的电磁波, 因此在制备微纳集成光学器件时光子晶体常被作为首选结构^[12]. 利用光子晶体实现光波单向传输为当前研究热点, 其中的实现方案有方向带隙失配型^[13,14]、不对称腔耦合型^[15-17]、奇偶模转换型^[18,19]、光栅光子晶体复合型^[20]和异构光子晶体全反射型^[21-24]等. 李志远课题组^[13]利用方向带隙失配原理提出的光波单向传输器件正向透射率较低为 0.23, 光信息传输效率低. 叶寒课题组^[18]利用腔耦合和奇偶模式转换原理大大提高了正向透射率, 工作带宽却较窄, 不利于波分复用.

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11904255, 11704275)、山西省重点研发计划 (国际科技合作) (批准号: 201903D421052) 和山西省应用基础研究计划 (青年基金) (批准号: 201901D211070) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: feihongming@tyut.edu.cn

费宏明等提出了一种基于全反射原理光子晶体单向传输异构结构,提高了正向透射率并拓宽了工作带宽,但是该结构需要两块不同折射率的背景材料,使得结构相对复杂^[21–27].因此实现高透射率、大带宽、结构简单且易集成的光波单向传输器件仍是当前亟待解决的问题.

本文基于光子晶体波导局域特性,提出了一种设计有点缺陷的漏斗型完全光子带隙光波导单向传输器件,通过模式转换与失配原理高效抑制反向光传输.该器件的设计主要分为两个步骤:1)漏斗型光波导设计;2)点缺陷设计与优化.在具有完全光子带隙的二维光子晶体中引入线缺陷,形成漏斗型光波导,波导局域特性可大大提高正向透射率.波导中引入点缺陷后,反向光波经过点缺陷时传输模式发生转换,无法反向通过漏斗型波导,降低反向透射率.对不同类型的点缺陷进行优化,选取单柱型点缺陷并向左移动 $5a$ (a 为光子晶体晶格常数, $a = 470$ nm)可取得最优传输特性,横电(TE)偏振光在工作波长 1550 nm处正向透射率达到 0.716 ,透射对比度为 0.929 ,工作带宽(透射对比度高于 0.8)为 111 nm.该单向传输器件由硅基空气孔光子晶体制成,硅基空气孔光子晶体制备工艺满足目前成熟的互补金属氧化物半导体(CMOS)实验加工的要求^[28],易于实现,可为现阶段集成光路更高要求的单向传输器件提供一个新的解决方案.

2 漏斗型光波导设计

本文提出的漏斗型光波导结构是在具有完全光子带隙的二维光子晶体结构中引入线缺陷形成的.初始光子晶体结构(photonic crystal, PC)为 $9.4 \mu\text{m} \times 9.4 \mu\text{m}$ 硅基三角晶格空气孔型光子晶体,晶格常数 $a = 470$ nm,空气孔半径 $r = 0.42a$,硅在 1550 nm处折射率取 3.48 ,空气孔排列为 21 行 \times 18 列阵列.三角晶格具有 C_{6V} 旋转对称性,在给定折射率对比度下相对容易出现完全光子带隙^[21],且三角排列的空气柱易于漏斗双壁的设计,漏斗双壁与水平方向夹角为 60° .将图1(a)中线性排列被标记为红色的空气孔移除,形成第一波导W1、第二波导W2和一个形似漏斗形的漏斗腔,漏斗腔位于W1和W2耦合处.利用平面波展开法(R-soft)计算PC的TE偏振光能带结构,如图1(b)所示.图中红色阴影部分为完全光子带隙部分,带

隙部分对应的归一化频率为 $0.26a/\lambda - 0.44a/\lambda$ (对应波长为 $1068 - 1807$ nm),该频率范围内的TE偏振光将被局域在线缺陷中传输,从而提高正向透射率.

波导宽度对正反向光波传输是一个重要的影响因素.W1为移除5行空气孔形成,由漏斗腔决定.W2的宽度通过支持的传输模式(补充材料图S5 (online))既影响经漏斗腔汇聚从漏斗口透射而出的正向光波传输,也影响反向光波漏过漏斗口与W1的耦合.保持W1宽度不变调节W2宽度,从W1与W2等宽为起始,W2波导宽度分别取移除5行、7行、9行、11行和13行空气孔,利用有限时域差分法(Lumerical FDTD)使用W1支持的模式光源(具体模式光源的设置请参阅补充材料第2节内容(online))逐次计算工作波长 1550 nm附近正反向透射谱,如图1(c)和图1(d)所示.本文中光波在结构中传输的数值模拟均利用时域有限差分法计算,包括场强分布与透射谱计算.如图1(d)所示,当W2宽度为移除5行空气孔时,此时反向透射率高达 0.6 左右,与正向透射率相当.W2波导逐渐变宽时 1550 nm附近反向透射率呈现下降趋势.因此W2宽度大于W1宽度时不对称传输特性较为显著,反向透射率低于正向透射率.由图1(c)可知,当W2宽度为移除13行空气孔时,相对于移除其他行数时正向透射率有明显下降.为保证高正向透射率、低反向透射率,选取W2宽度为移除11行空气孔作为漏斗型光波导结构,如图1(a)所示.在工作波长 1550 nm处正反向透射率分别为 0.75 与 0.41 ,实现了初步的非对称性传输.图1(e)为漏斗型光波导正反向光波入射时在 1550 nm处的场强分布.通过模式分析发现W2的高阶模式(补充材料图S5 (online))仍然可以耦合进入漏斗型波导实现反向透射.

3 点缺陷设计与优化

漏斗型光波导的设计初步实现了非对称性传输,但此时的反向透射率仍比较高,未达到良好的光波单向传输.进一步研究将在W2中引入I型、II型、III型和IV型点缺陷来抑制反向透射率,点缺陷类型与初始位置如图2(a)、图2(c)、图2(e)、图2(g)所示.点缺陷为保留一个或两个图1(a)中拟移除的空气孔(标为红色的空气孔).其中I型为

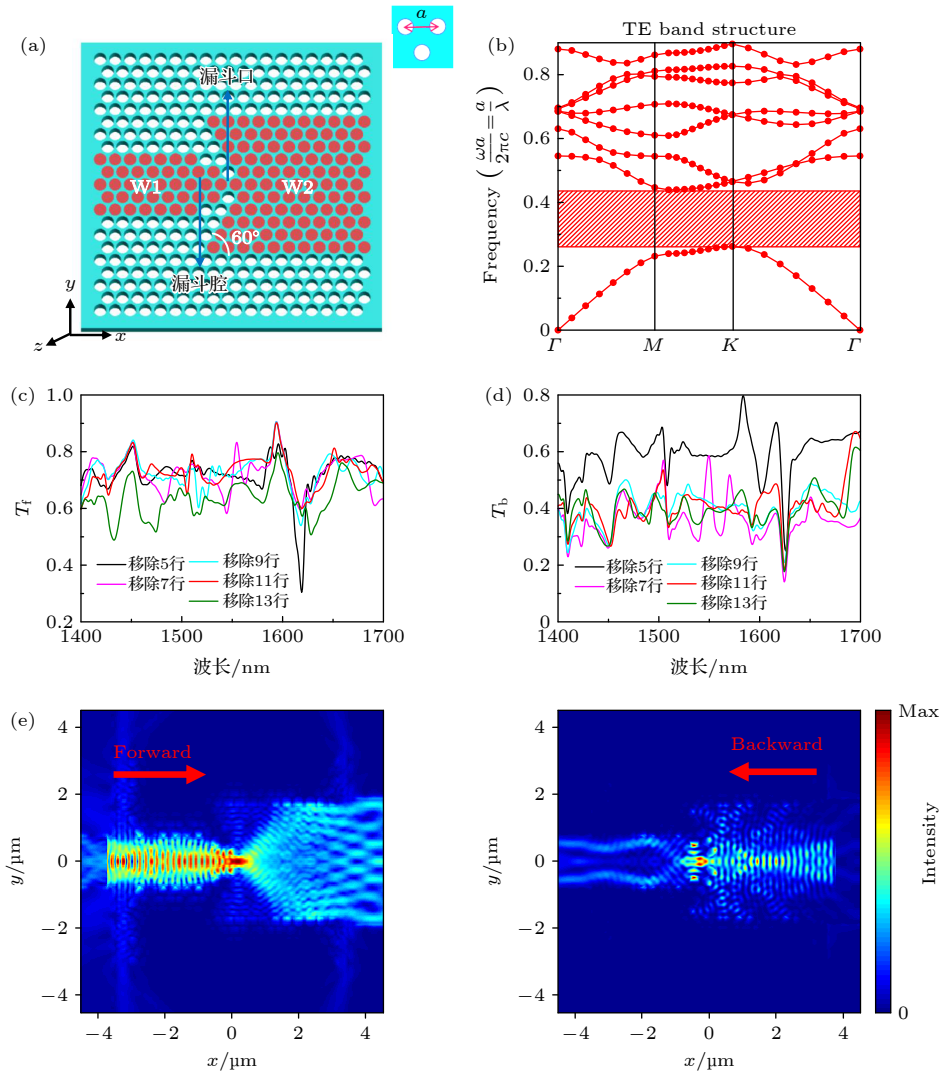


图 1 漏斗型光波导及其传输特性 (a) 漏斗型光波导结构, $a = 470 \text{ nm}$ 为晶格常数, 标为红色的空气孔为线缺陷位置, 移除红色空气孔后形成漏斗型光波导; (b) 光子晶体 TE 模能带结构图, 其中红色阴影部分为完全禁带部分; W2 宽度变化时的正向光波 (c) 与反向光波 (d) 传输透射谱, W2 宽度分别取移除 5 行、7 行、9 行、11 行和 13 行空气孔; (e) 正反向光波入射时漏斗型光波导在 1550 nm 处的场强分布

Fig. 1. Funnel waveguide and transmission characteristics. (a) The structure of funnel waveguide. $a = 470 \text{ nm}$ is the lattice constant. The air hole marked red is the location of line defect. Remove the red air hole to form a funnel-shaped waveguide. (b) The band structure of the PC. The red shaded area represents the fully photonic bandgap. The transmittance spectra of light waves forward (c) and backward (d) transmit with W2 width-varying. For varying the width of W2, air holes in rows 5, 7, 9, 11 and 13 are removed respectively. (e) The electric field intensity distribution diagrams at 1550 nm in funnel-shaped waveguide.

单柱型, II 型、III 型和 IV 型为双柱型. I 型和 II 型点缺陷使结构上下仍具有对称性, III 型和 IV 型点缺陷为保留波导中轴线上—排空气孔中一个, 另一个空气孔分别为相邻晶格右斜上方和左斜上方一个空气孔, 此时打破了波导的上下对称结构. 点缺陷的初始位置位于 W2 最右端.

漏斗型光波导结构中未引入点缺陷时, 反向光波经 W2 传输至漏斗口处, 部分光波透过漏斗口传输至 W1 中, 反向透射率较高, 未实现较好的单向传输特性, 由图 1(e) 所示. 漏斗型光波导结构中引

入图 2(a)、图 2(c)、图 2(e)、图 2(g) 中四种点缺陷时, 分别计算四种点缺陷初始位置下正反向光波入射时在 1550 nm 处的场强分布, 如图 2(b)、图 2(d)、图 2(f)、图 2(h) 所示. 漏斗型光波导结构中引入点缺陷后, 反向光波入射至 W2, W2 中位于中心线附近的点缺陷使得光波向 W2 的两侧发散, 阻碍了光波通过漏斗腔的漏斗口, 反向透射相较于未引入点缺陷时有了明显的下降, W1 中电场强度分布明显减弱, 而正向光波传输的场强分布相较于未引入点缺陷时电场强度未有较明显改变. 因此, 在漏斗

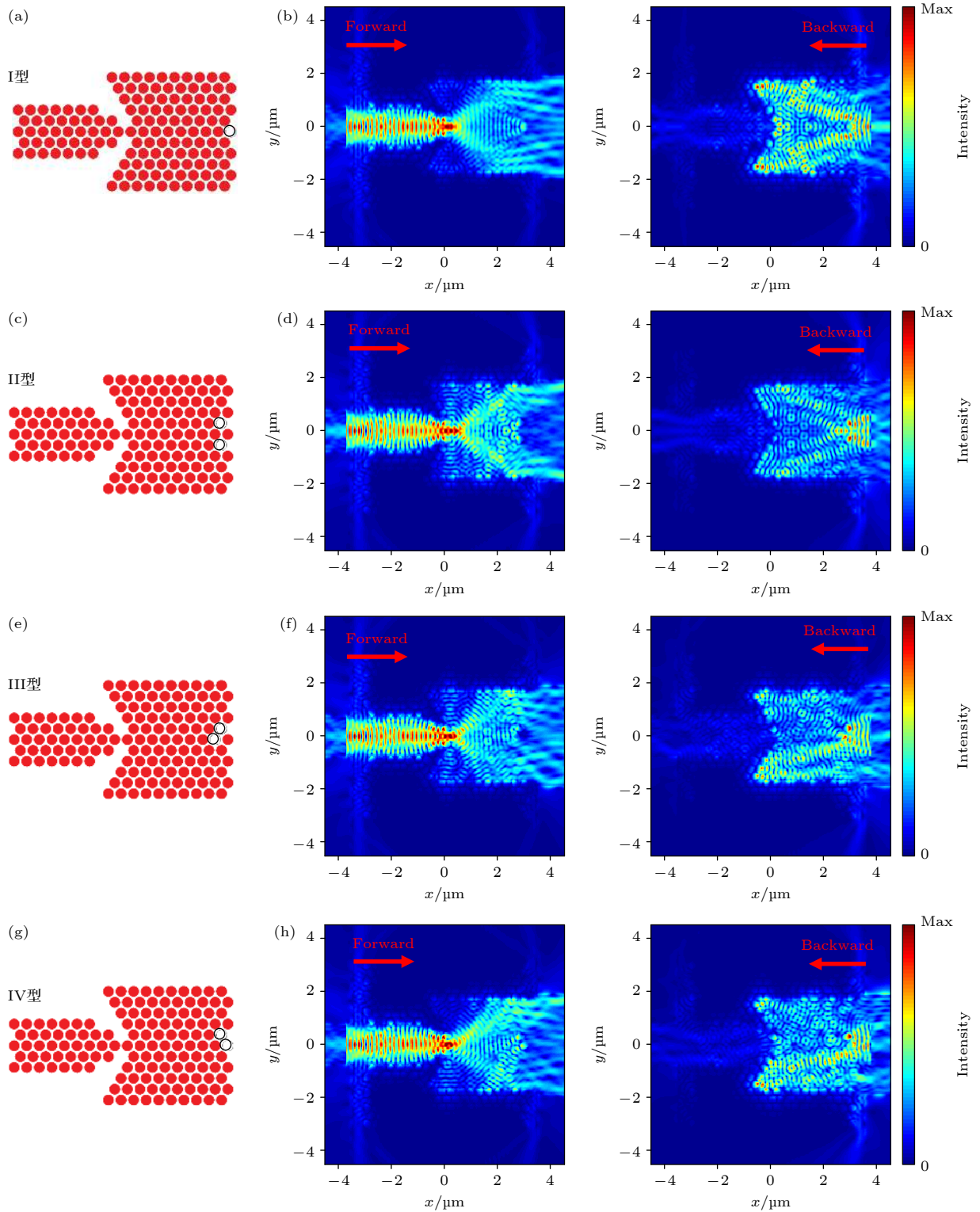


图 2 点缺陷类型及初始位置与场强图, I 型 (a)、II 型 (c)、III 型 (e) 和 IV 型 (g) 点缺陷及初始位置. 红色圆形表示拟移除空气孔, 白色圆形表示保留的空气孔所形成的点缺陷; 漏斗型光波导中引入 I 型 (b)、II 型 (d)、III 型 (f) 和 IV 型 (h) 点缺陷后正反向光波入射时在 1550 nm 处的场强分布

Fig. 2. Type and initial position of point defects and the electric field intensity distribution diagrams: The diagrams of type I (a), type II (c), type III (e), type IV (g) of point defects with initial location. The red circle represents the air holes to be removed, and the white circle represents the point defect formed by the retained air holes. The electric field intensity distribution diagrams at 1550 nm in funnel-shaped waveguide with a type I (b), type II (d), type III (f), type IV (h) point defect.

型光波导结构初步实现光波的非对称性传输时, 点缺陷的引入, 可降低反向光波的透射率, 实现单向传输特性. 光波单向传输器件的性能一般用如下参数进行表征^[3]: 正向透射率 T_f 、反向透射率 T_b 、透射对比度 C 和工作带宽 B (取透射对比度 0.8 以上). 其中透射对比度定义为

$$C = \frac{T_f - T_b}{T_f + T_b}. \quad (1)$$

为了降低反向透射率提高结构的整体性能, 接下来对抑制反向光波传输的点缺陷进行优化. 不同的点缺陷位置会使光波发生散射的位置发生变化, 经过波导对散射后光束的局域作用后, 不同点缺陷位置下反向光波的透射率不同. 现将四种点缺陷从起始位置逐次向左侧移动, 每次移动的距离为 d , 步长为一个晶格常数 a , 计算当点缺陷处于不同位置时的透射谱. 这里图 3(a)、图 3(c)、图 3(e)、图 3(g) 分别表示 I 型、II 型、III 型和 IV 型不同类型点缺陷位置移动时反向透射率值的变化.

从图 3(a) 可以看出, I 型点缺陷随着向左移动距离的增大色调由暖色调转为冷色调, 即随着 I 型点缺陷向左移动, 1550 nm 光波附近反向透射率为下降趋势. 光波在单柱点缺陷处发生散射经 W2 上下柱子多次反射后仍有少量光波继续向左传输, 其中有部分光波经漏斗口耦合到 W1. 当点缺陷向左移动时发生散射的位置左移, 由于散射后的光波靠近漏斗壁, 经漏斗壁反射后向右传输, 此时 W2 经漏斗口耦合到 W1 的光波减少. 由图 3(b) 所示, 当 I 型点缺陷移动距离 $d = 5a$ 时效果最好, 在 1550 nm 处正向透射率、反向透射率和透射对比度分别为 0.716, 0.026 和 0.929, 工作带宽为 111 nm.

图 3(c) 展示的是 II 型点缺陷处于不同位置时, 1550 nm 光波附近反向透射率的光谱图. 随着向左移动距离增大色调由冷色调转为暖色调, 说明随着 II 型点缺陷向左移动, 1550 nm 光波附近反向透射率为上升趋势. II 型点缺陷包含两个空气孔, 空气孔距离为 $\sqrt{3}a$, 反向光波遇到两个空气孔会在两柱上下发生散射, 并在两柱之间发生衍射, 当双柱左移靠近漏斗口时, 散射与衍射距离会变短, 传输到漏斗口的光波相对增多. II 型点缺陷左移至漏斗口附近、在 1550 nm 附近波段内的反向透射率接近 0.5, 在四种点缺陷模式中最高. 由图 3(d) 所示, 当 II 型点缺陷移动距离 $d = 0$ 时, 1550 nm 处正向透射率、反向透射率和透射对

比度分别为 0.702, 0.057 和 0.851, 工作带宽为 95 nm.

图 3(e) 和图 3(g) 为 III 型和 IV 型点缺陷处于不同位置时, 1550 nm 附近反向透射率的光谱图. 随着 III 型和 IV 型点缺陷位置向左移动, 冷色调区域集中在右半区域, III 型和 IV 型点缺陷在 1600 nm 附近反向透射率较低. 1550 nm 处反向透射率值在移动距离 $d < 2a$ 时有小区域冷色调区, 反向透射率较低的区域较小. III 型和 IV 型具有对称性, 对光束的散射作用相似, 具有相似的透射谱. 如图 3(f) 和图 3(h) 所示, 当 III 型点缺陷移动距离 $d = 1a$ 时效果最好, 1550 nm 处正向透射率、反向透射率和透射对比度分别为 0.657, 0.051 和 0.856, 工作带宽为 116 nm. 当 IV 型点缺陷移动距离 $d = 2a$ 时效果最好, 1550 nm 处正向透射率、反向透射率和透射对比度分别为 0.67, 0.043 和 0.878, 工作带宽为 110 nm.

综合以上四种点缺陷位置移动的传输特性, 四种类型点缺陷的移动距离分别取 $d = 5a$, $d = 0$, $d = 1a$, $d = 2a$ 时分别达到最佳传输特性. 为了实现工作波段 1550 nm 附近的高透射光波单向传输, 不仅需要较高的正向透射率和透射对比度, 还需要较宽的工作带宽. 综合表 1 的各项参数, 发现当点缺陷为 I 型、 $d = 5a$ 时工作波长 1550 nm 处正向透射率可高于 0.7 以上, 反向透射率可低于 0.03 以下, 透射对比度高于 0.9 以上, 单向传输带宽可达 111 nm, 可以较好地实现 TE 模式下宽波段内的光波单向传输.

表 1 在 1550 nm 处四种类型点缺陷最优位置单向传输性能

Table 1. Optimal location unidirectional transmission performance of four types of point defects at 1550 nm.

点缺陷类型	T_f	T_b	C	B/nm
I型, $d = 5a$	0.716	0.026	0.929	111
II型, $d = 0$	0.702	0.057	0.851	95
III型, $d = 1a$	0.657	0.051	0.856	116
IV型, $d = 2a$	0.670	0.043	0.878	110

4 单向传输器件模型与性能

对四种类型的点缺陷位置优化分析后选取 I 型点缺陷向左移动 $d = 5a$ 为最终模型. 结构为硅基底中心沿光入射方向设置有第一波导 W1 和第

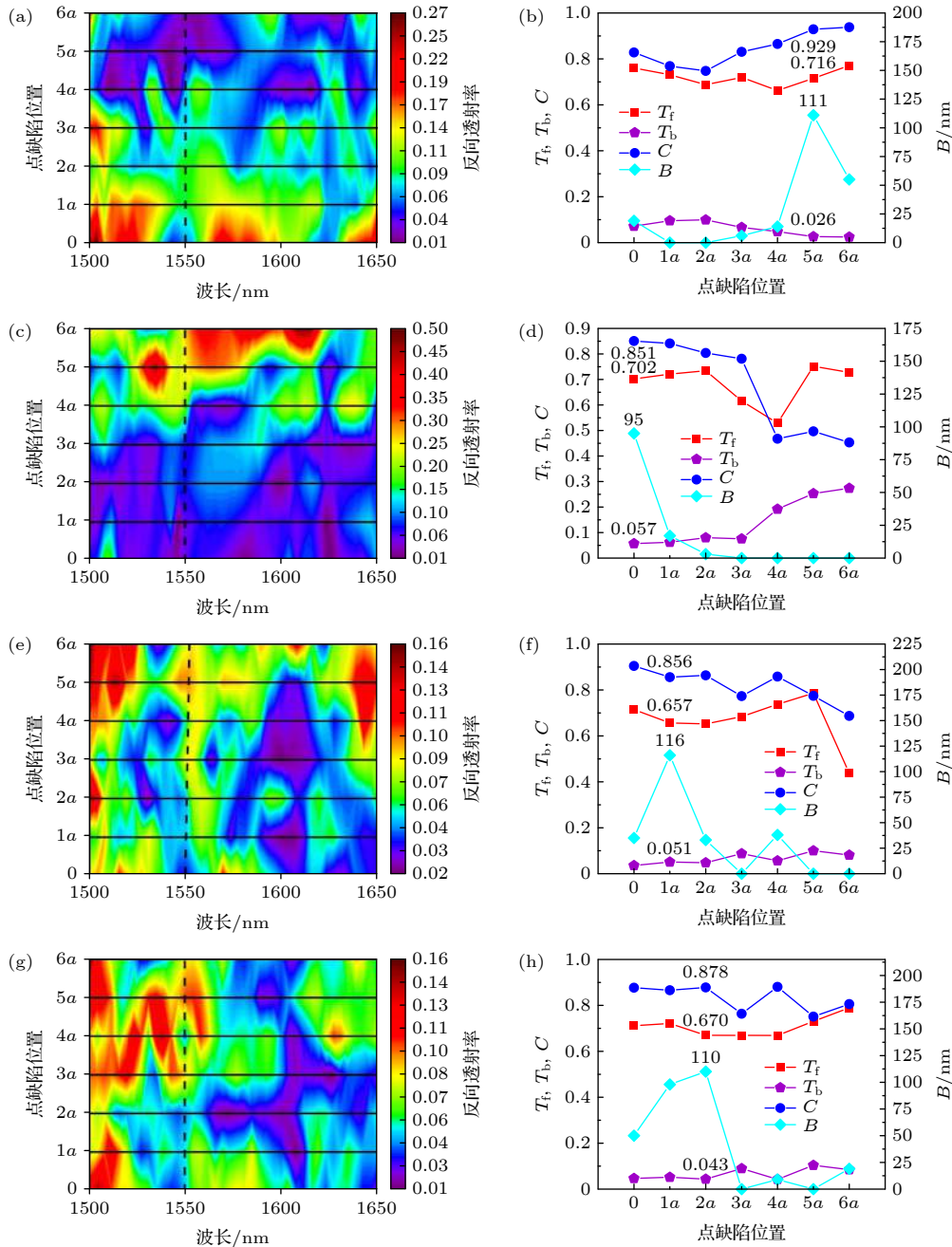


图 3 I 型 (a)、II 型 (c)、III 型 (e) 和 IV (g) 型点缺陷位置移动时的反向光波入射透射谱, 虚线与实线交汇处为点缺陷移动至各位置在 1550 nm 处的反向透射率值; I 型 (b)、II 型 (d)、III 型 (f) 和 IV (h) 型点缺陷移动至各位置在 1550 nm 处的 T_f (红色线)、 T_b (紫色线)、 C (蓝色线) 和 B (青色线) 点线图

Fig. 3. Transmittance spectra of light waves backward transmit with type I (a), type II (c), type III (e), type IV (g) defect position movement. The intersection of the dotted line and the solid line is the backward transmittance value at 1550 nm with the point defect movement. The point plot of T_f (red line), T_b (purple line), C (cyan line) and B (orange line) at 1550 nm with type I (b), type II (d), type III (f), type IV (h) point defect position movement.

二波导 W2, 两侧分布有多个沿三角晶格排列的圆形的空气孔. W1 与 W2 耦合处设置有漏斗腔, 漏斗口位于硅基底中心线上. W2 中心线位置设计有点缺陷, 为保留第二波导上中心线自右起第六个空气孔形成. 为了模拟实际使用该设计的情况, 我们在左边和右边分别加上了与 W1 和 W2 匹配的矩

形光波导如图 4(a) 所示.

结构在工作波长 1550 nm 处正向透射率、反向透射率和透射对比度分别达到 0.716, 0.026 和 0.929, 工作带宽可达 111 nm (1501—1612 nm). 单向传输器件结构模型如图 4(a) 所示, 图 4(b) 为结构 TE 偏振光入射的透射谱, 图 4(c)、图 4(d) 为

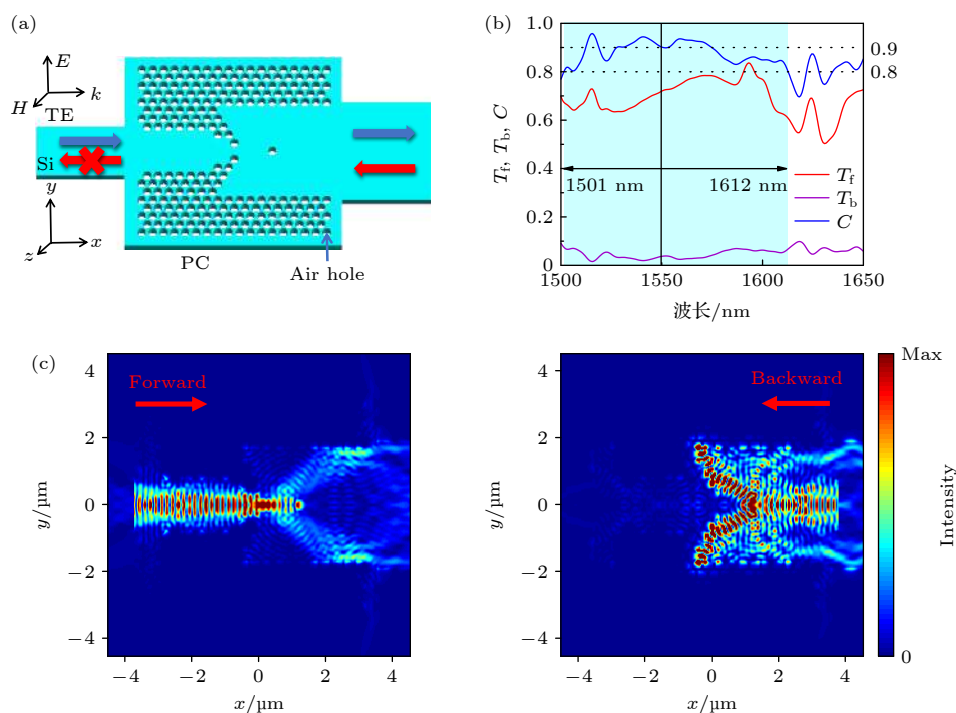


图4 结构与性能 (a) 本文设计的可实现单向传输的结构示意图, W2 宽度为移除 11 行空气孔, 点缺陷为保留 I 型第六个空气孔; (b) 单向传输器件透射光谱图 (红色线为 T_f , 紫色线为 T_b , 蓝色线为 C); (c) TE 偏振的正反向入射光在 1550 nm 处的电场强度分布

Fig. 4. Structure and performance. (a) Schematic drawing of funnel-shaped wave-guide of the realizable unidirectional transmission in this paper. The width of W2 is gained after removing 11 rows of air holes, and the point defect is to retain the sixth air hole of Type I. (b) The transmittance spectra of the unidirectional transmission device (The red line is T_f , the purple line is T_b , and the blue line is C). (c) The electric field intensity distribution diagrams of forward incident light and backward incident light of TE polarization at the wavelength of 1550 nm.

1550 nm 处光波入射场强图. 根据模式分析 (参见补充材料第 1 节内容 (online)) 发现, 点缺陷改变了 W2 中的光传输模式, 使其无法耦合到漏斗型光波导的基模, 从而完全截止了反向光传输, 实现了高透射对比度.

5 结论

综上所述, 基于光子晶体完全带隙特性构建了一种可实现高透射单向光传输的漏斗型光波导结构, 本文首次将漏斗形腔引入光子晶体波导结构中, 并利用漏斗效应实现光波单向传输. 该设计在漏斗型光波导的设计中初步实现在光通信波段的单向传输, 之后引入点缺陷到漏斗型光波导结构中通过模式转换与失配降低反向透射. 通过优化点缺陷的类型与位置, 发现 I 型点缺陷向左移动 $d = 5a$ 时达到最优的传输特性, 在工作波长 1550 nm 处 TE 偏振光正向透射率、反向透射率和透射对比度分别为 0.716, 0.026 和 0.929, 工作带宽可达 111 nm. 传统的硅基光子学芯片是基于单

模设计的, 但基于模式转换的工作原理可能带来较高的能量损失. 而高阶模式的引入使得在模分复用系统中增加数据传输的通道数量以及提高器件设计的灵活性成为可能, 因此多模硅光子学正受到越来越多的关注^[29,30]. 多模硅光子芯片需要能够支持不同模式的单向光传输器件, 本文结构是在完整的硅基板上移除空气孔而得的光子晶体, 具有形式简单、制备工艺要求低、单向传输特性高的优点, 可为多模单向光传输器件实际制备提供参考, 在集成光路设计中也具有重要前景.

参考文献

- [1] Li M 2012 *Sci. China Phys. Mech.* **55** 2316
- [2] Lars T, Qiu M, Srinivasan A 2004 *Chem. Phys. Chem.* **5** 1268
- [3] Wu M, Fei H M, Lin H, Zhao X D, Yang Y B, Chen Z H 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 028501 (in Chinese) [武敏, 费宏明, 林瀚, 赵晓丹, 杨毅彪, 陈智辉 2021 物理学报 **70** 028501]
- [4] Bulgakov E N, Sadreev A F 2014 *Opt. Lett.* **39** 1787
- [5] Soltani A, Ouerghi F, AbdelMalek F 2017 *Opt. Commun.* **392** 147
- [6] Li J, Ye H, Yu Z Y, Liu Y M 2017 *Opt. Express* **25** 19129
- [7] Liu D Y, Yao L F, Zhai X M, Li M H, Dong J F 2014 *Appl.*

Phys. A 116 9

- [8] Ahmet O, Hasan K, Hamza K 2018 *J. Opt. Soc. Am. B* **35** 2111
- [9] Ahmet O, Nazmi Y, Hasan K, Hamza K 2019 *J. Opt.* **21** 055104
- [10] Li S, Huang L R, Ling Y H, Liu W B, Ba C F, Li H H 2019 *Sci. Rep.* **9** 17117
- [11] Liu H, Zhang Y Z, Chen C, Bai B B, Zhang X, Zhang H C, Shao Q Y, Wu B, Zhao B L 2021 *Opt. Laser Technol.* **140** 107033
- [12] Hadi R, Mohammad S, Yousef S K 2018 *J. Opt. Commun.* **39** 375
- [13] Wang C, Zhou C Z, Li Z Y 2011 *Opt. Express* **19** 26948
- [14] Liu D, Hu S 2019 *Acta Phys. Sin.* 024206 (in Chinese) [刘丹, 胡森 2019 物理学报 024206]
- [15] Xie J Y, Hu X Y, Wang F F, Ao Y T, Gao W, Yang H, Gong Q H 2018 *J. Opt.* **20** 034004
- [16] Liu B, Liu Y F, Li S J, He X D 2016 *Opt. Commun.* **368** 7
- [17] Liu B, Liu Y F, Jia C, He X D 2016 *Aip. Adv.* **6** 065316
- [18] Ye H, Zhang J Q N, Yu Z Y, Wang D L, Chen Z H 2015 *Chin. Phys. B* **24** 094214
- [19] Ye H, Wang D L, Yu Z Y, Zhang J Q N, Chen Z H 2015 *Opt. Express* **23** 9673
- [20] Chen J J, Huo S Y 2017 *Opt. Mater. Express* **7** 1716
- [21] Fei H M, Zhang Q, Wu M, Lin H, Liu X, Yang Y B, Zhang M D, Guo R, Han X T 2020 *Appl. Optics* **59** 4416
- [22] Fei H M, Yan S, Xu Y C, Lin H, Wu M, Yang Y B, Chen Z H, Tian Y, Zhang Y M 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 184214 (in Chinese) [费宏明, 严帅, 徐瑜成, 林瀚, 武敏, 杨毅彪, 陈智辉, 田媛, 张娅敏 2020 物理学报 **69** 184214]
- [23] Fei H M, Wu M, Lin H, Liu X, Yang Y B, Zhang M D, Cao B Z 2019 *Superlatt. Microstruct.* **132** 106155
- [24] Fei H M, Xu T, Liu X, Lin H, Chen Z H, Yang Y B, Zhang M D, Cao B Z, Liang J Q 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 204103 (in Chinese) [费宏明, 徐婷, 刘欣, 林瀚, 陈智辉, 杨毅彪, 张明达, 曹斌照, 梁九卿 2017 物理学报 **66** 204103]
- [25] Fei H M, Wu M, Lin H, Yang Y B, Liu X, Zhang M D, Cao B Z 2020 *Photonic Nanostruct* **41** 100829
- [26] Fei H M, Yan S, Lin H, Liu X, Yang Y B, Zhang M D, Cao B Z 2020 *Opt. Commun.* **477** 126346
- [27] Fei H M, Wu M, Xu T, Lin H, Yang Y B, Liu X, Zhang M D, Cao B Z 2018 *J. Opt.* **20** 095004
- [28] Ye H, Yu Z Y, Liu Y M, Chen Z H 2016 *Opt. Express* **24** 24592
- [29] Dai D, Wang J, He S 2013 *Prog. Electromagn. Res.* **143** 773
- [30] Li C, Liu D, Dai D 2018 *Nanophotonics* **8** 227

Unidirectional transmission of funnel-shaped waveguide with complete bandgap*

Zhi Wen-Qiang¹⁾²⁾ Fei Hong-Ming^{1)2)†} Han Yu-Hui¹⁾²⁾ Wu Min¹⁾²⁾
 Zhang Ming-Da¹⁾²⁾ Liu Xin¹⁾²⁾ Cao Bin-Zhao¹⁾²⁾ Yang Yi-Biao¹⁾²⁾

1) (Department of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

2) (Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(Received 13 July 2021; revised manuscript received 14 October 2021)

Abstract

It will be a future trend to apply quantum photonic technology to communication technology and information processing. One of major developing directions of quantum photonic technology is the miniaturization and on-chip integration. Like the diodes in integrated electric circuitry, optical unidirectional transmitter devices (UTDs) play an important role in processing the quantum information and also represent the main components of integrated optical devices. Thus, the design of UTDs has become one of the research hotspots. With photonic bandgap and localization characteristics, as well as easy micro-nano scaled integration, the photonic crystals (PCs) are often preferred when used to develop micro-nano integrated optical devices. At present, the common methods of achieving UTD with photonic crystals include directional bandgap mismatch, asymmetrical coupling by a micro-cavity, odd-even mode conversion, total reflection of photonic crystals with grating and photonic crystal heterostructure, etc. However, these optical unidirectional transmitters gained

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11904255, 11704275), the Key R&D Program of Shanxi Province (International Cooperation), China (Grant No. 201903D421052), and the Applied Based Research Program of Shanxi Province (Youth Fund), China (Grant No. 201901D211070).

† Corresponding author. E-mail: feihongming@tyut.edu.cn

through the above methods generally have a low forward transmission, narrow working band, complex structure, etc. In the paper a novel method of UTD is put forward based on photonic crystal and a UTD of funnel-shaped waveguide is designed. The design of the device is divided into two parts: optimal funnel waveguide design and optimal point defect design. The band structure of TE polarized photonic crystal is calculated by R-soft. A triangular lattice circular air hole photonic crystal with complete photonic band gap is used as the initial structure and line defects are introduced to form a funnel-shaped waveguide structure (FSWS). The FSWS consists of the first waveguide W1, the second waveguide W2 and a funnel cavity. The funnel cavity is shaped like a funnel and located at the coupling between W1 and W2. Owing to the unique characteristics of the waveguide, the light wave transmission will be localized in the waveguide, which is conducive to improving the forward transmission. The influence of width variation of W2 with forward and backward incident light are analyzed by the finite difference time domain (FDTD) method, and W2 is selected as a waveguide formed by removing 11 rows of air holes. The FSWS achieves the initial asymmetric transmission, while the backward transmission remains high. Further studies are conducted to introduce four types of point defects to suppress the backward transmittance. The point defects refer to moving one or two air holes. In the work the FDTD is also used to calculate four kinds of point defect backward transmittance spectra and optimize the positions of point defects. Finally, it is found that when the optimal point defect mode is type I and $d = 5a$, the forward transmission (T_f) and transmission contrast (C) at 1550 nm are 0.716 and 0.929, respectively. Working bandwidth (B) can be increased up to 111 nm (1501–1612 nm). By mode analysis, it is found that the point defect introduces mode mismatch between W1 and W2, by converting the fundamental mode in W2 into high-order modes. Thus, the back-propagating light waves in W2 cannot effectively couple into W1, resulting in complete blockage of backward propagation. In addition, the structure is made of silicon based air hole photonic crystal. The 2D air-hole PC slab is mature and even compatible with conventional complementary metal oxide semiconductor (CMOS) processing. The designed UTD is easy to implement, and has the advantages of simplicity and high unidirectional transmission characteristics. Therefore, it can provide a new solution for UTDs with higher requirements for integrated optical path at present.

Keywords: funnel waveguide, complete photonic bandgap, point defect, unidirectional transmission, mode analysis

PACS: 85.60.Bt, 41.20.Jb, 42.70.Qs

DOI: [10.7498/aps.71.20211299](https://doi.org/10.7498/aps.71.20211299)