



基于二维六方氮化硼材料的光子晶体非对称传输异质结构设计

武敏 费宏明 林瀚 赵晓丹 杨毅彪 陈智辉

Design of asymmetric transmission of photonic crystal heterostructure based on two-dimensional hexagonal boron nitride material

Wu Min Fei Hong-Ming Lin Han Zhao Xiao-Dan Yang Yi-Biao Chen Zhi-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 028501 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20200741

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200741>

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

可实现宽频带光波非对称传输的自准直效应光子晶体异质结构

Photonic crystal heterostructure with self-collimation effect for broad-band asymmetric optical transmission

物理学报. 2020, 69(18): 184214 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200538>

基于六角氮化硼二维薄膜的忆阻器

Two-dimensional hexagonal boron nitride based memristor

物理学报. 2017, 66(21): 217304 <https://doi.org/10.7498/aps.66.217304>

新型手性电磁超材料非对称传输性能设计分析

Analysis and design of new chiral metamaterials with asymmetric transmission characteristics

物理学报. 2020, 69(21): 214101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200728>

半氢化石墨烯与单层氮化硼复合体系的电子结构和磁性的调控

Tuning the electronic and magnetic property of semihydrogenated graphene and monolayer boron nitride heterostructure

物理学报. 2018, 67(16): 167101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180538>

基于结构反转二维光子晶体的拓扑相变及拓扑边界态的构建

Topological phase transition based on structure reversal of two-dimensional photonic crystals and construction of topological edge states

物理学报. 2020, 69(18): 184101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200415>

高温高压下立方氮化硼和六方氮化硼的结构、力学、热力学、电学以及光学性质的第一性原理研究

First-principles study of structural, elastic, thermodynamic, electronic and optical properties of cubic boron nitride and hexagonal boron nitride at high temperature and high pressure

物理学报. 2019, 68(7): 077102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182030>

基于二维六方氮化硼材料的光子晶体非对称传输异质结构设计*

武敏¹⁾²⁾ 费宏明^{1)2)†} 林瀚³⁾ 赵晓丹¹⁾²⁾ 杨毅彪^{1)2)‡} 陈智辉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)

3) (斯威本科技大学, 埃米材料转化科学中心, 维多利亚 3122)

(2020年5月18日收到; 2020年7月12日收到修改稿)

二维六方氮化硼 (hexagonal boron nitride, hBN) 材料在产生光学稳定的超亮量子单光子光源领域有着潜在应用, 有望用于量子计算和信息处理平台, 已成为研究热点. 而光学非对称传输设备是集成量子计算芯片中的关键器件之一. 本文从理论上提出了一种基于 hBN 材料光子晶体异质结构的纳米光子学非对称光传输器件. 运用平面波展开法研究了光子晶体的能带结构与等频特性, 从理论上分析了 hBN 异质结构中可见光波非对称传输的可行性. 同时, 采用时域有限差分方法研究了可见光波段异质结构的晶格常数和半径对透射光谱的影响. 研究结果显示, 该结构实现了在 610—684 nm 波长范围内 TE 偏振光的非对称传输, 在 652 nm 波长处正向透射率达到 0.65, 反向透射率为 0.006, 非对称传输透射对比度高达 0.98. 本文提出的结构模型为基于 hBN 的新型纳米光子器件设计提供了新的可能性, 可用于不同功能光学器件的集成设计.

关键词: 非对称传输, 二维六方氮化硼, 光子晶体, 异质结构

PACS: 85.60.Bt, 78.67.-n, 41.20.Jb, 42.70.Qs

DOI: 10.7498/aps.70.20200741

1 引言

自从发现石墨烯以来, 二维材料因其在微波到紫外波段宽光谱范围内具有特殊的电学和光学特性而备受关注^[1,2]. 其中, 二维六方氮化硼 (hexagonal boron nitride, hBN), 也称为“白色石墨烯”, 拥有许多独特的特性, 包括高的机械强度、良好的导热性、出色的化学和热稳定性^[3-7], 可用于固态热中子探测器^[8]、保护涂层^[9]和介电层^[10]等. 同时, hBN 由于带隙较宽, 在紫外区域, 成为了深紫外光发射器、激光器^[11,12]和新型纳米光子器件研究中具有

前景的材料平台. 此外, 二维 hBN 具有双曲线声子极化特性, 在制备光学稳定的超亮量子单光子光源^[13-16]领域具有潜在的应用, 有望进一步用于量子计算和信息处理的纳米光子学实验平台. 为了与工作可见光波段的 hBN 超亮量子单光子光源连接, 本文旨在设计基于 hBN 材料的光学非对称传输器件, 这项研究对不同功能的纳米光子器件的制备, 以及实现 hBN 集成光子芯片具有重要意义.

与电二极管对于集成电路的重要性一样, 光学非对称传输设备 (asymmetric transmission device, ATD) 在量子信息处理和可扩展量子纳米光子网络中起着重要的作用^[17,18]. 根据光学非对称传输设

* 国家自然科学基金 (批准号: 61575138)、国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11904255)、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

‡ 通信作者. E-mail: yangyibiao_tyut@sohu.com

备的工作原理,可以分为非互易光学非对称传输设备和互易光学非对称传输设备两种类型.非互易的光学非对称传输设备通过破坏时间反对称性(破坏洛伦兹互易性)来工作,这需要光学非线性或磁光效应^[17,19,20].相比之下,互易的光学非对称传输设备破坏了空间反对称性^[21–30],通过光的衍射进行非对称传输.互易光学非对称传输设备的优点是不需要外部磁场或强入射光.此外,光子晶体(photonic crystal, PhC)^[24–26]、波导^[27,28]、表面等离子体激元^[29]和共振效应^[30]等均已实现非对称光传输.最新的研究表明,使用周期性结构可以实现零折射率超材料,改变结构在光传输方向上的对称性,在数值上和实验上可实现线偏振光的宽带非对称传输,在短波红外区域带宽高达 50 THz^[23].hBN 是一种介电材料,基于此材料的 PhC 结构可以与其他光子器件进行片上集成,也是实现光波非对称传输最合适的方案之一.

最近,有实验报道,独立式二维 hBN PhC 腔能够实现超过 2000 的品质因子^[16],并提出基于 hBN 的 PhC 腔,可用于在室温下超亮且可见光稳定的量子单光子光源,这证实了实验制造在可见光至近红外波段工作的 hBN PhC 结构的可行性.为了与 hBN 本身的量子单光子光源配合连接,本文将工作波段设置到相同的可见光波段.此外,由于二维 hBN 是一种具有相对较低折射率(<2.4)的介电材料^[16],因此使用任何衬底(例如 SiO₂)都会影响 hBN 材料中的光束束缚,并最终降低整个设备的性能.但是,与其他类型的二维材料不同,hBN 具有很高的机械强度,无需衬底即可自主支撑.因此,应用独立式 hBN 结构是一种可行的解决方案,便于光子芯片的集成.同时,由于 hBN 具有各向异性的材料特性,使得基于 hBN 材料实现非对称光传输成为一个需要突破的领域.

此前李志远课题组^[24,31]基于硅材料异质结构带隙失配原理实现了 1550 nm 光通讯波段光波非对称传输,证实了理论与实验结果一致,在国际上都具有引领意义.本文将这种结构带隙失配原理应用于理论设计 hBN 材料 PhC 异质结构,实现在可见光波段的非对称传输.主要的新颖之处是通过使用 hBN 材料能够在可见光波段实现非对称光传输,同时基于 PhC 的结构设计有利于实现光子芯片集成.目前,已经有文献报道,通过电子束光刻及离子束刻蚀的方法实验制作 hBN 的 PhC 结构^[16],

相同的实验技术可以用于加工制作本文中设计的结构(具体加工制作流程见补充材料).

文中通过分析能带图与等频图,控制正向入射光波在 PhC 异质结构中的传输路径;通过改变 PhC 的晶格常数和介质柱半径,提高结构的正向透射率,优化结构的性能.同时,利用 hBN PhC 的带隙特性,以及结构界面的全反射特性,抑制反向入射光波的透射率低于 0.04. TE 偏振光波(transverse electric wave, TE)在优化后的二维 hBN PhC 异质结构中,在 610–684 nm 的波长范围内实现非对称传输.在 652 nm 处正向透射率达到 0.65,反向透射率为 0.006,设备的工作带宽为 74 nm(带宽内透射率高于 0.5).

2 结构与分析

本文的设计思想是基于二维 hBN 材料构建两种具备不同导光特性的 PhC 结构(PhC 1 和 PhC 2),并采用倾斜界面改变光波传输路径,达到非对称传输的目的.可见光波在 PhC 1 中沿水平方向高效传输,到达异质界面处光波发生折射,而对于特定频率光波,PhC 2 具有与水平方向偏折小角度的准直作用,使得光可以在 PhC 2 中传输,直至耦合到出射光波导.可见光波反向入射到 PhC 2 中由于禁带效应和异质结构的倾斜界面被禁止传输,从而实现基于二维 hBN 材料独立式异质结构的非对称光传输.

基于 hBN 材料的异质结构设计以及 hBN 的分子结构如图 1 所示,hBN 材料面内的硼原子和氮原子以六边形共价键结合,在不同的 hBN 层间通过范德瓦耳斯力结合.因此,这里 hBN 材料是一种各向异性材料,其在 x 和 y 方向折射率 $n_x = n_y = 2.04$, z 方向 $n_z = 1.84$ ^[16,32].同时,根据 hBN 机械强度高的优势,本文提出采用薄壁连接 PhC 1 和 PhC 2 来实现独立式(桥式)结构设计,薄壁的厚度 $t = 50$ nm,远小于设计的工作光波长,因此对结构性能的影响可以忽略不计. PhC 1 和 PhC 2 组成的异质结构几何尺寸为 $11 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$ (26 行 26 列)(具体尺寸优化见补充材料);入射光波导宽度为 $3 \mu\text{m}$,出射光波导宽度为 $4.5 \mu\text{m}$ (具体结构优化见补充材料),图 1 中左侧 PhC 1 的晶格常数为 $a_1 = 400$ nm, hBN 圆柱体半径 $r_1 = 90$ nm,右侧 PhC 2 的晶格常数 $a_2 = 420$ nm,空气柱半径

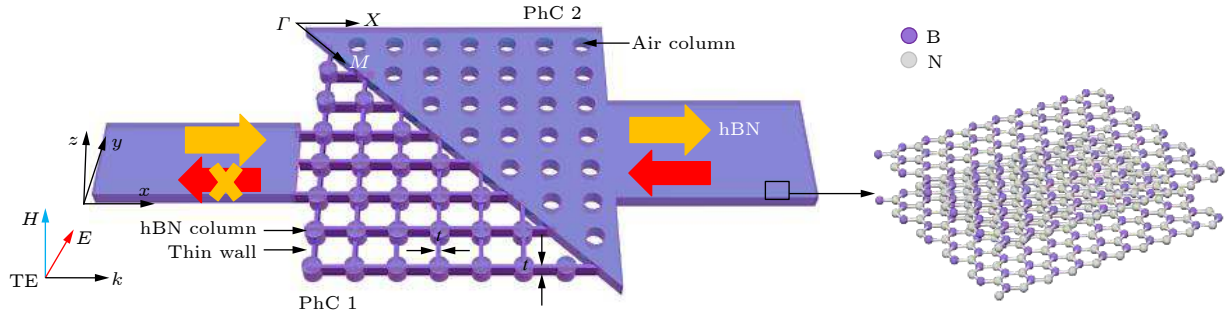


图 1 基于二维 hBN PhC 异质结构的光波非对称传输示意图, 右图为二维 hBN 材料的分子结构图

Fig. 1. Schematic diagram of the two-dimensional hBN PhC heterostructure for asymmetric transmission of light. The right picture is the molecular structure of two-dimensional hBN material.

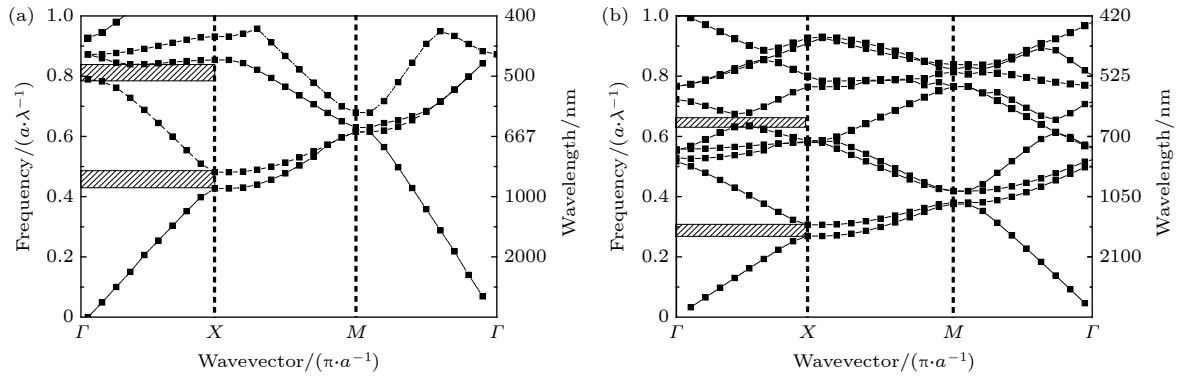


图 2 (a) PhC 1 的能带图; (b) PhC 2 的能带图, 阴影部分代表 Γ - X 方向禁止光波传输的频带

Fig. 2. (a) The band diagrams of the PhC 1; (b) the band diagrams of the PhC 2. The shaded area represents the frequency band in which light transmission is prohibited at the Γ - X direction.

$r_2 = 80 \text{ nm}$, 光入射沿异质结构的水平方向 (Γ - X 方向), 由两边波导输入到结构当中。

首先采用平面波展开法计算 TE 偏振模式下 PhC 1 和 PhC 2 的能带图^[33,34] (具体的方法说明见补充材料), 结果如图 2 所示。图 2(b) 中阴影部分为禁带区域, 结构采用了定向带隙来阻挡反向入射光。研究发现, hBN 与空气的折射率差较小, 使得 PhC 2 的带隙宽度在可见光波段内随晶格常数 a 和半径 r 变化不大。从图 2(a) 中可以看出, 异质结构中 PhC 1 在归一化频率 $0.79a/\lambda - 0.84a/\lambda$ (对应 476—506 nm) 范围内存在水平方向 (Γ - X 方向) 的定向带隙。PhC 2 在归一化频率 $0.62a/\lambda - 0.65a/\lambda$ (对应 646—677 nm) 范围内存在水平方向 (Γ - X 方向) 的定向带隙。因此, 对于正向光波从左侧入射到 PhC 1 中, 除了 476—506 nm 波段的光, 其余可见光均可以到达异质结构的界面处, 进而折射进入 PhC 2 中。而对于反向入射的可见光波从结构右侧入射, 会在 PhC 2 的禁带 646—677 nm 波段内, 实现反向抑制, 无法传输到 PhC 1 中。

为了进一步研究 TE 偏振光波在异质结构中的传输机制, 对于正向光波在 PhC 中的传播路径, 需要绘制 PhC 1 和 PhC 2 相应的等频率图 (equal frequency contours, EFCs)。采用平面波展开法计算可见光波段对应 TE 偏振模式下的 PhC 1 第二能带相应的等频图和 PhC 2 第五能带相应的等频图, 如图 3 所示。光波在 PhC 中的传播方向取决于群速度 v_g 的方向^[34], 群速度 v_g 是第 n 个能带的角频率 ω_n 和波矢量 \mathbf{k} 的函数:

$$\mathbf{v}_g(\mathbf{k}) = \frac{\partial \omega_n}{\partial k_x} \hat{\mathbf{x}} + \frac{\partial \omega_n}{\partial k_y} \hat{\mathbf{y}} + \frac{\partial \omega_n}{\partial k_z} \hat{\mathbf{z}}, \quad (1)$$

$\Delta \omega_n$ 代表角频率梯度, 是相对于 \mathbf{k} 的梯度, 能量流取决于频率导数上的波矢。TE 偏振光的传播方向可以用等频图呈现出来 (图 3(a),(b)), 图中沿箭头所标记的方向即群速度 v_g 方向^[34]。从图 3(a) 中可以看出, 归一化频率 $0.60a/\lambda$ (即 670 nm, 红色虚线) 的正向入射光在 PhC 1 中的传输, 如 Γ - X 方向的黑色箭头指示, 其中第一个黑色箭头代表入射方向, 第二个黑色箭头代表群速度 v_g 的方向 (沿等

频线梯度方向), 即光波在 PhC 1 中的实际传输路径. 接着光波沿水平方向到达界面处, 由于倾斜界

面两侧材料的折射率不同, 会发生折射, 折射光进入 PhC 2 中, 图 3(b) 中第一个黑色箭头代表折射

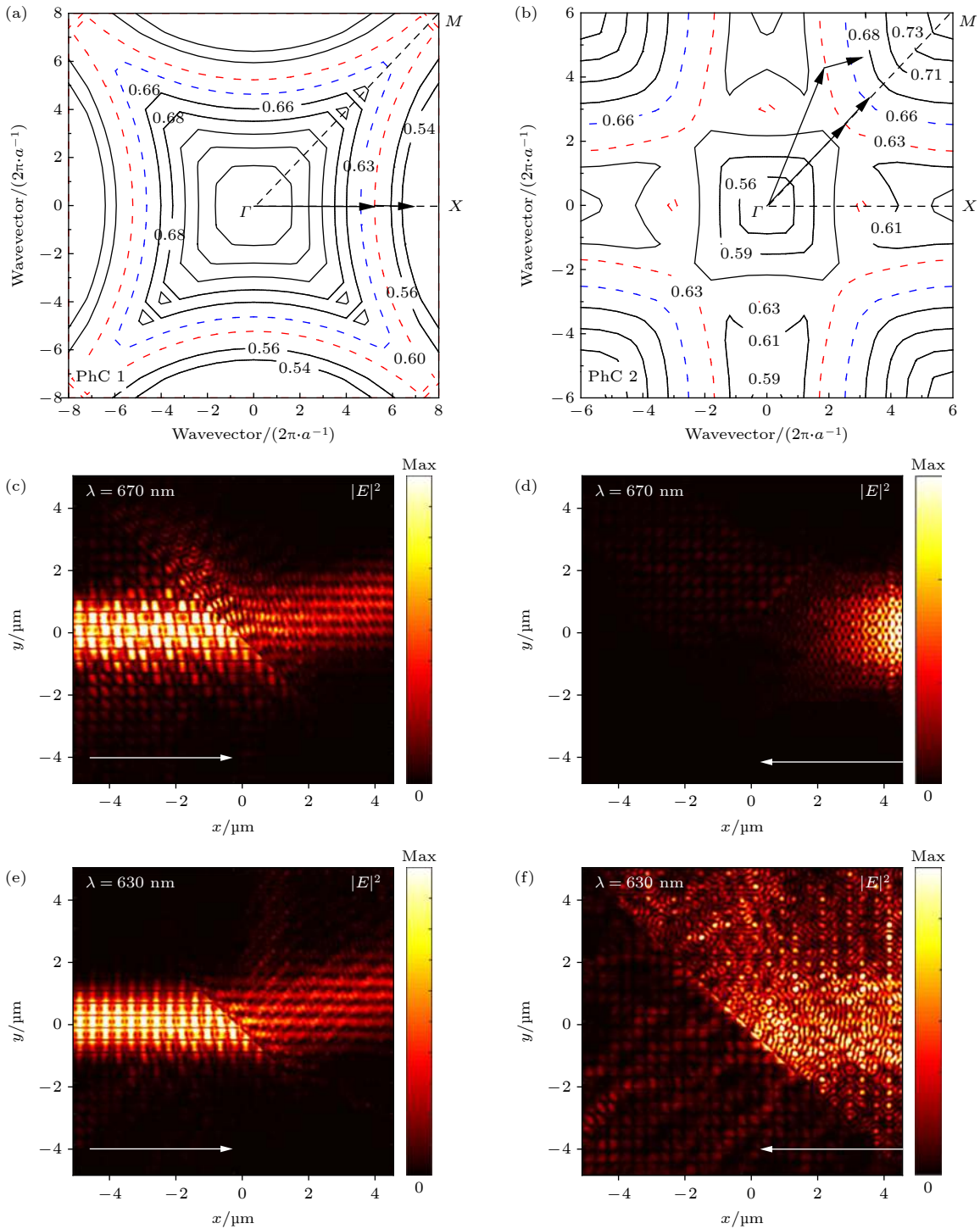


图 3 (a) PhC 1 中 TE 偏振模式下第二条能带对应的等频图; (b) PhC 2 中 TE 偏振模式下第五条能带对应的等频图 (红色和蓝色虚线表示 670 和 630 nm 对应的等频线). TE 偏振的正向入射光 (c) 和反向入射光 (d) 在 670 nm 波长处的电场强度分布图; 正向入射光 (e) 和反向入射光 (f) 在 630 nm 波长处的电场强度分布图

Fig. 3. (a) The EFCs of the second band in PhC 1 for TE polarization; (b) the EFCs of the fifth band in PhC 2 for TE polarization (The red and blue dotted lines represent the EFCs corresponding to 670 and 630 nm). The electric field intensity distribution diagrams of forward incident light (c) and backward incident light (d) of TE polarization at the wavelength of 670 nm. The electric field intensity distribution diagrams of forward incident light (e) and backward incident light (f) of TE polarization at the wavelength of 630 nm.

光方向, 其群速度方向为第二个黑色箭头所示, 即归一化频率 $0.63a/\lambda$ (670 nm, 红色虚线) 所在等频线的梯度方向, 也就是光在 PhC 2 中的传播方向. 由此可得, 包括 670 nm 波长在内的可见光波可以在异质结构中正向传输, 而此波长附近的反向光波由于禁带作用不能沿着反方向传输. 同理, 由等频图可知, 归一化频率为 $0.63a/\lambda$ (630 nm, 蓝色虚线) 的入射光波在 PhC 1 中可以沿着水平方向传输. 之后, 此波长 (蓝色虚线) 在 PhC 2 中沿着与水平方向呈小角度偏折的群速度方向传输并可以被耦合到出射光波导. 对于反向入射, 630 nm 光波处于非禁带中, 此时, 利用结构的倾斜界面可以抑制光波传输到 PhC 1. 由此, 在理论上, TE 偏振光在异质结构中能够实现非对称传输.

运用时域有限差分法 (finite difference time domain, FDTD), Lumerical FDTD Solutions 软件计算 TE 偏振光波入射异质结构的正向、反向电场强度分布图 [35] (具体的方法说明见补充材料), 可以直观地观察光波的传输状态, 结果如图 3(c)—图 3(f) 所示. 可以看出, 670 nm 正向入射光波沿着水平方向传输, 到异质界面后发生折射, 并能够沿着与水平方向有小角度偏折, 继续向右传输, 直至耦合到出射光波导, 与等频图的分析一致. 而

670 nm 反向入射光处于方向带隙无法进入 PhC 2 中, 与能带图分析一致. 对于 630 nm 的光波, 在正向入射时, 光波能够沿着异质结构传输, 部分光在 PhC 2 中发生散射, 但很大一部分光可以被接收. 而反向入射时 630 nm 光波处于 PhC 2 的非禁带范围, 光波可以到达异质结构界面处, 尽管有一部分光被衍射到 PhC 1 中, 但大部分的光都被界面阻挡以及散射到 PhC 2 中的各个方向.

3 优化结构分析

为了提高结构的整体性能, 必须对 PhC 异质结构正向透射率进行优化. 通过控制变量法分别改变 PhC 1 和 PhC 2 的晶格常数 (a_1 和 a_2) 以及柱子半径大小 (r_1 和 r_2), 可以进一步提高 TE 偏振光在 hBN 异质结构中的正向透射率, 研究分为以下两个步骤来进行: 1) 在不考虑 PhC 2 的情况下优化 PhC 1 的透射率; 2) 通过改变 PhC 2 的结构参数进一步优化整个结构的正向透射率 (T_F). 通过 FDTD 法模拟不同 a_1 , r_1 和 a_2 , r_2 的透射光谱 (图 4(a)—图 4(d)). 可以看到, 在可见光波段内, TE 偏振下, 当 PhC 1 的晶格常数 $a_1 = 400$ nm 且半径 $r_1 = 90$ nm 时, PhC 1 的透射率可高于 0.8. 此外, 在不同

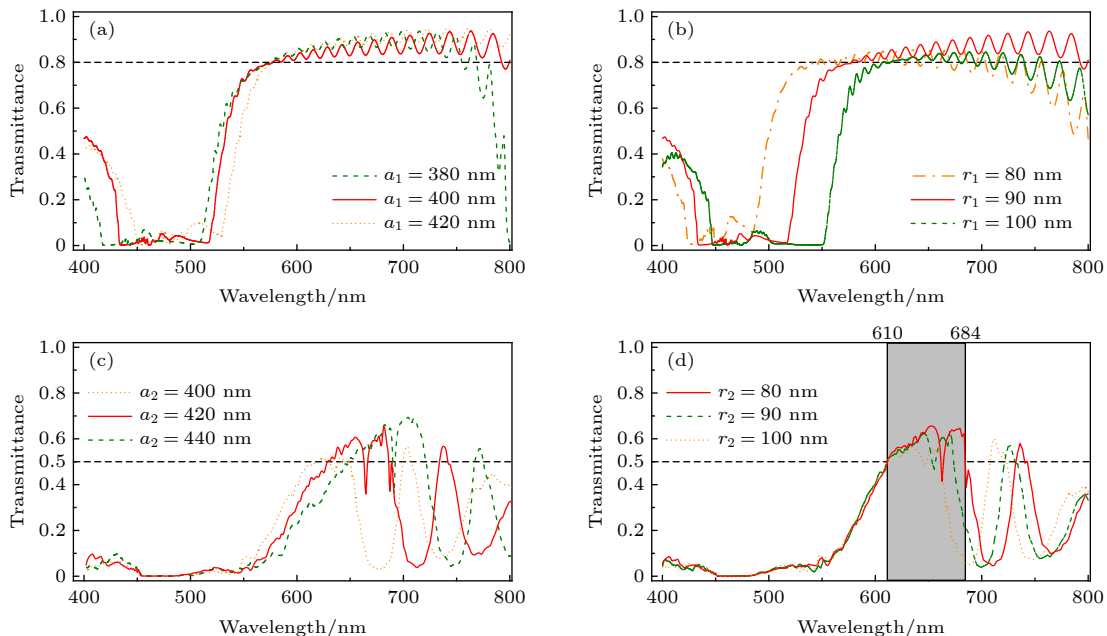


图 4 PhC 1 取不同晶格常数 (a) 与不同柱子半径 (b) 的透射率; 异质结构中 PhC 2 取不同的晶格常数 (c) 与柱子半径 (d) 的透射率

Fig. 4. The transmittance spectra of PhC 1 on the different lattice constants of PhC 1 (a) and the different radii of the columns (b). The transmittance spectra of the heterostructure on the different lattice constants of PhC 2 (c) and the different radii of the columns (d).

的 a_1 和 r_1 值中, 当 a_1 和 r_1 分别为 400 和 90 nm 时, 在不同波长下的透射率是最高的 (图 4(a),(b)). 与图 2(a) 中的能带图计算相符合, 位于禁带 476—506 nm 波段光波在 PhC 1 中传输的透射率很低. 根据 PhC 1 的结构优化参数, 对 PhC 2 的晶格常数 a_2 和半径 r_2 进行优化, 当 $a_2 = 420$ nm 和 $r_2 = 80$ nm 时, 得到了整体结构较宽带宽内的最佳正向透射率. 从 610—684 nm, 正向透射率高于 0.5, 在 652 nm 波长处的正向透射率为 0.65. 因此, 通过优化主要参数晶格常数和半径, 选择了 PhC 1 和 PhC 2 的结构参数.

非对称光传输器件的性能是用以下参数进行表征的: 正向透射率 (T_F)、反向透射率 (T_B) 和透射对比度 (C), 其中透射对比度 (C) 定义为

$$C = (T_F - T_B) / (T_F + T_B). \quad (2)$$

二维 hBN PhC 异质结构的透射光谱如图 5(a) 所示, 入射光为 TE 基模模式光源, 当 PhC 1 和 PhC 2 距离为 a_1 时 (具体优化过程的计算细节见

补充材料), 在 610—684 nm (74 nm) 波长范围内 (除在 663 nm 附近透射率降低为 0.41), 异质结构实现了 $T_F > 0.5$ 和 $T_B < 0.04$ 的非对称光传输. 此外, 在 637—670 nm (33 nm) 波段内, 对比度 C 高于 0.95, 最大值达 0.98, 并且在此带宽中的 T_B 几乎为零, 可对应于能带图 2(b) 中的带隙波段. 尽管其他波段不在带隙当中, 但由于异质结构全反射界面的阻挡, 反向光波在界面处发生反射和散射, 使得 $T_B < 0.05$, 进而拓宽了反向截止带宽. 进一步, 本研究设计了材料厚度为 2 μm (6000 层左右) 的独立式 (悬挂式) 二维 hBN PhC 平板异质结构 (上下包层均为空气), 来最大限度地减小传输损耗, 继续计算有限厚度二维 PhC 平板异质结构的透射谱, 结果如图 5(b) 所示. 有限厚度二维 PhC 平板, 较二维结构 (厚度为无穷大) 的正向透射率有所降低, 在 632—692 nm (60 nm) 波长范围内 (除在 668 nm 附近透射率降低为 0.37), 实现了 $T_F > 0.5$ 和 $T_B < 0.03$, $C > 0.9$ 的非对称传输. 同时, 该结构可用微纳加工技术包括反应离子刻蚀 (RIE)、电子束诱导刻蚀 (EBIE) 和聚焦离子束刻蚀 (FIB) 的方法进行加工 [16] (建议的加工制作流程见补充材料).

4 结 论

综上所述, 本文从理论上证明了基于 hBN 材料的 PhC 异质结构在可见光波段的非对称传输, 结构性能如下: 在 652 nm 处正向透射率达到 0.65, 反向透射率低于 0.006, 设备的工作带宽为 74 nm (带宽内透射率高于 0.5). 尽管 hBN 具有相对较低的折射率和各向异性的光学特性, 但可以利用其高机械强度, 设计独立式 hBN 结构并将整个周期性结构互连来实现高性能的设备, 本文的研究为实验提供了该结构的可行性方案. 结合当前的技术, 将单光子光源直接连接到 hBN 光学平台中, 将有可能实现基于 hBN 器件的集成光子芯片, 用于量子计算和信息处理. 此外, 该设计原理可广泛应用于基于二维 hBN 材料设计不同类型的片上集成光子器件.

参考文献

- [1] Xu M, Liang T, Shi M, Chen H 2013 *Chem. Rev.* **113** 3766
- [2] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Katsnelson

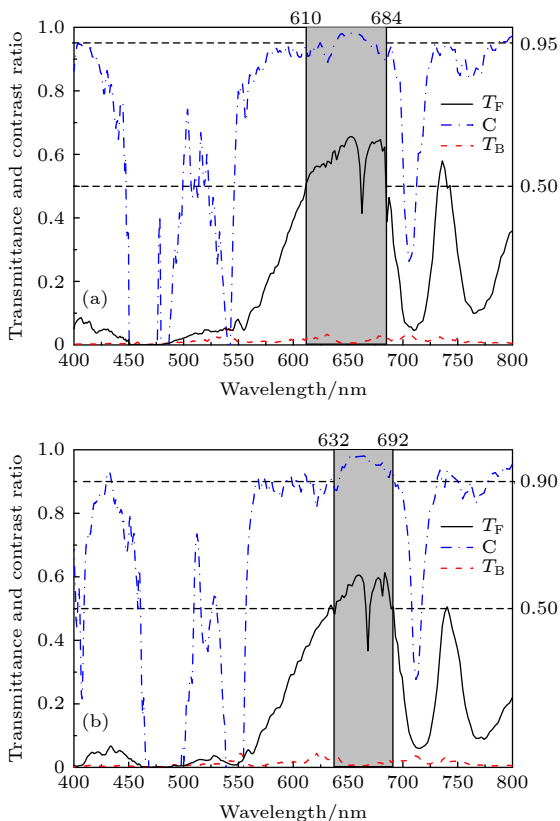


图 5 (a) 二维 hBN PhC 异质结构的透射光谱图; (b) 有限厚度为 2000 nm 时, 二维 hBN PhC 平板异质结构的透射光谱图

Fig. 5. The transmittance spectra of the two dimensional hBN photonic crystal heterostructure (a) and a slab with thickness of 2000 nm (b).

- M I, Grigorieva I V, Dubonos S V, Firsov A A 2005 *Nature* **438** 197
- [3] Kubota Y, Watanabe K, Tsuda O, Taniguchi T 2007 *Science* **317** 932
- [4] Song L, Ci L, Lu H, Sorokin P B, Jin C, Ni J, Kvashnin A G, Kvashnin D G, Lou J, Yakobson B I, Ajayan P M 2010 *Nano Lett.* **10** 3209
- [5] Nersisyan H H, Lee T H, Lee K H, An Y S, Lee J S, Lee J H 2015 *RSC Adv.* **5** 8579
- [6] Glavin N R, Jespersen M L, Check M H, Hu J, Hilton A M, Fisher T S, Voevodin A A 2014 *Thin Solid Films* **572** 245
- [7] Zhi C, Bando Y, Tang C, Kuwahara H, Golberg D 2009 *Adv. Mater.* **21** 2889
- [8] Doan T C, Majety S, Grenadier S, Li J, Lin J Y, Jiang H X 2015 *Nucl. Instrum. Methods* **783** 121
- [9] Barboza A P M, Chacham H, Oliveira C K, Fernandes T F D, Ferreira E H M, Archanjo B S, Batista R J C, De Oliveira A B, Neves B R A 2012 *Nano Lett.* **12** 2313
- [10] Barcelos I D, Cadore A R, Campos L C, Malachias A, Watanabe K, Taniguchi T, Maia F C, Freitas R, Deneke C 2015 *Nanoscale* **7** 11620
- [11] Watanabe K, Taniguchi T, Kanda H 2004 *Nat. Mater.* **3** 404
- [12] Nebel C E 2009 *Nat. Photonics* **3** 564
- [13] Shotan Z, Jayakumar H, Considine C R, Mackoit M, Fedder H, Wrachtrup J R, Alkauskas A, Doherty M W, Menon V M, Meriles C A 2016 *ACS Photonics* **3** 2490
- [14] Chejanovsky N, Rezai M, Paolucci F, Kim Y, Rendler T, Rouabeh W, Fávoro d O F, Herlinger P, Denisenko A, Yang S 2016 *Nano Lett.* **16** 7037
- [15] Bourrellier R, Meuret S, Tararan A, StăPhan O, Kociak M, Tizei L H, Zobelli A 2016 *Nano Lett.* **16** 4317
- [16] Kim S, Fröch J E, Christian J, Straw M, Bishop J, Totonjian D, Watanabe K, Taniguchi T, Toth M, Aharonovich I 2018 *Nat. Commun.* **9** 2623
- [17] J alas D, Petrov A, Eich M, Freude W, Fan S, Yu Z, Baets R, Popović M, Melloni A, Joannopoulos J D 2013 *Nat. Photonics* **7** 579
- [18] Qiang X, Zhou X, Wang J, Wilkes C M, Loke T, O'Gara S, Kling L, Marshall G D, Santagati R, Ralph T C 2018 *Nat. Photonics* **12** 534
- [19] Fei H M, Wu J J, Yang Y B, Liu X, Chen Z H 2015 *Photonics Nanostruct.* **17** 15
- [20] Yu G X, Fu J J, Du W W, Lu Y H, Luo M 2019 *Chin. Phys. B* **28** 024101
- [21] Liu D Y, Yao L F, Zhai X M, Li M H, Dong J F 2014 *Appl. Phys. A* **116** 9
- [22] Feng S, Wang Y Q 2013 *Opt. Express* **21** 220
- [23] Kim M, Yao K, Yoon G, Kim I, Liu Y, Rho J 2017 *Adv. Opt. Mater.* **5** 1700600
- [24] Wang C, Zhou C, Li Z Y 2011 *Opt. Express* **19** 26948
- [25] Fei H M, Wu M, Lin H, Liu X, Yang Y B, Zhang M D, Cao B Z 2019 *Superlattices Microstruct.* **132** 106155
- [26] 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]
- [27] Li J, Ye H, Yu Z, Liu Y 2017 *Opt. Express* **25** 19129
- [28] Fei H M, Zhang Q, Wu M, Lin H, Liu X, Yang Y B, Zhang M D, Guo R, Han X T 2020 *Appl. Opt.* **59** 4416
- [29] Kim J, Lee S Y, Park H, Lee K, Lee B 2015 *Opt. Express* **23** 9004
- [30] Gao H, Zheng Z, Dong J, Feng J, Zhou J 2015 *Opt. Commun.* **355** 137
- [31] Wang C, Zhong X L, Li Z Y 2012 *Sci. Rep.* **2** 674
- [32] Kim S, Toth M, Aharonovich I 2018 *Beilstein J. Nanotechnol.* **9** 102
- [33] Plihal M, Maradudin A A 1991 *Phys. Rev. B* **44** 8565
- [34] Feng S, Wang Y Q 2013 *Opt. Mater.* **36** 546
- [35] Chan C T, Yu Q L, Ho K M 1995 *Phys. Rev. B* **51** 16635

Design of asymmetric transmission of photonic crystal heterostructure based on two-dimensional hexagonal boron nitride material*

Wu Min¹⁾²⁾ Fei Hong-Ming^{1)2)†} Lin Han³⁾ Zhao Xiao-Dan¹⁾²⁾
 Yang Yi-Biao^{1)2)‡} Chen Zhi-Hui¹⁾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*)

3) (*Centre for Translational Atomaterials, Swinburne University of Technology, Victoria 3122, Australia*)

(Received 18 May 2020; revised manuscript received 12 July 2020)

Abstract

Two-dimensional (2D) hexagonal boron nitride (hBN) possesses many unique properties such as high mechanical strength and excellent chemical and thermal stability. The 2D hBN exhibits a wide bandgap in the UV region and optically-stable ultra-bright quantum emitters that make hBN a promising nanophotonic platform for quantum computing and information processing, especially in the visible wavelength range. Therefore, it is greatly important to build up different nanophotonic devices with different functionalities based on this material platform to achieve the integrated photonic chips. Among the devices, the integratable optical asymmetric transmission devices are important elements for functional quantum computing chips. Since hBN is a dielectric material, photonic crystal (PhC) structure is the most suitable in principle and allows on-chip integration with other photonic devices. In this study, we theoretically design an asymmetric transmission device based on 2D hBN PhC heterostructures in the visible wavelength range for the first time. Due to the relatively low refractive index of 2D hBN material ($n < 2.4$), we design a free-standing hBN PhC heterostructure to maximize the light trapping in the structure and minimize the propagation loss. The asymmetric transmission device is composed of two square-lattice 2D PhC structures, namely PhC 1 and PhC 2. We use the plane wave expansion method (PWM) to calculate the iso-frequency contours (EFCs) of the PhC structures to study the light propagation inside of the PhCs, which will propagate along the gradient of direction of the EFCs. We design the PhC structure in the way that the incident light beams from different angles can be self-collimated along the Γ - X direction of the PhC 2 and coupled out. On the other hand, the backward incident light is blocked by the bandgaps of PhC 2. In this way, asymmetric optical transmission is achieved with high forward transmittance and contrast ratio. In addition, we further finely tune the structural parameters, including the lattice constant and column radius of the PhCs to optimize the performance by using the finite difference time domain (FDTD) method. The resulting 2D hBN PhC heterostructure achieves an asymmetric transmission in a wavelength range of 610–684 nm with a peak forward transmittance of 0.65 at a wavelength of 652 nm. Meanwhile, the backward transmittance is controlled to be 0.04. As a result, the contrast

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61575138), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11904255), the Key R & D Program of Shanxi Province, China (International Cooperation) (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

‡ Corresponding author. E-mail: yangyibiao_tyut@sohu.com

ratio can reach up to 0.95. The working bandwidth of the hBN PhC is 74 nm ($T_F > 0.5$). In addition, the designed asymmetric transmission device has a small size of $11\ \mu\text{m} \times 11\ \mu\text{m}$, thus it is suitable for on-chip integration. Our results open up possibilities for designing new nanophotonic devices based on 2D hBN material for quantum computing and information processing. The design principle can be generally used to design other photonic devices based on 2D hBN material.

Keywords: asymmetric transmission, two-dimensional hexagonal boron nitride, photonic crystal, heterostructure

PACS: 85.60.Bt, 78.67.-n, 41.20.Jb, 42.70.Qs

DOI: [10.7498/aps.70.20200741](https://doi.org/10.7498/aps.70.20200741)