

引用格式: ZHANG Xiaojian, ZHANG Quan, LAN Guilian, et al. Nearly Perfect Absorber in Borophene Based on Tamm Plasmon Polaritons (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(10):1052404

张晓健,张权,兰桂莲,等. 基于塔姆等离激元的硼烯近完美吸收器(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(10):1052404

基于塔姆等离激元的硼烯近完美吸收器(特邀)

张晓健¹,张权¹,兰桂莲¹,骆鹏¹,韦玮^{1,2}

(1 重庆大学 光电工程学院 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

(2 重庆大学 资源与安全学院 煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室, 重庆 400044)

摘要:针对单层硼烯吸光效率低的难题,提出了一种基于塔姆等离激元的硼烯近完美吸收器件,通过入射光直接激发高度局域的塔姆等离激元模式,深入研究了硼烯的近红外光学响应。仿真结果表明,所设计的硼烯/一维光子晶体结构能够有效提高硼烯的吸光效率,相比单层硼烯提升了一个数量级。同时器件在不同面内晶体方向上表现出强烈的各向异性。通过改变硼烯狄拉克电子密度,将器件在 x 和 y 偏振方向上的吸光效率提高至95.52%和96.63%,对应共振吸收波长为1 550 nm和1 607 nm。此外,通过改变一维光子晶体结构、氧化铝间隔层厚度及单层硼烯在间隔层中的位置等参数能够实现吸收效率及吸收波长的灵活调控。该器件具有吸收效率高、工作波段可调等显著优点,可为发展下一代片上集成光电器件提供机遇。

关键词:硼烯;塔姆等离激元;近完美吸收器;近红外波段;各向异性光学材料

中图分类号:O433.2

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235210.1052404

0 引言

近年来,二维材料由于具有原子尺度厚度和独特的能带结构,相比于传统体材料表现出新颖的物理化学特性,迅速发展成为光学调制、光电传感、光电探测等前沿领域的研究热点。硼烯作为一种新兴的二维材料^[1,2],具有本征金属特性和特殊的狄拉克能带结构,其非凡的电学、光学以及输运特性引起了研究人员的极大关注。相比于二维半金属材料(石墨烯^[3])和二维半导体材料(氮化硼^[4]、黑磷^[5]和二硫化钼^[6]),硼烯具有极高的狄拉克电子密度($\sim 10^{19} \text{ m}^{-2}$),能够在可见光和近红外波段支持高度局域的可调谐等离激元共振^[7-9],显著拓展了二维材料光电器件的工作波段。此外,由于硼烯沿两个晶轴的面内有效电子质量不同,其表现出强烈的光学各向异性^[10]。因此,兼具高载流子密度和强各向异性的硼烯被认为是一种极具潜力的二维材料,为发展基于二维材料的近红外光电器件提供了崭新机遇。然而,由于单层硼烯的厚度远小于其工作波长,导致其在近红外波段吸收效率极低^[11],极大地限制了硼烯近红外光电器件的性能,阻碍了其进一步发展。

研究表明通过激发二维材料的表面等离激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)共振^[12]能够有效改善二维材料与光的相互作用,提升二维材料的吸光效率。ZHANG Jun等^[13]从理论上提出了一种由单层硼烯与周期性金属光栅组成的等离激元共振结构,通过被动调节光栅狭缝高度或主动调节电子密度,将硼烯表面等离激元的固有吸收提高了3倍。该方法采用纳米级的衍射光栅作为外部辅助,以补偿SPPs与入射光之间的波矢量,实现硼烯等离激元共振的有效激发,但其工艺制备过程较为复杂,需要高精度的微纳加工技术,工艺挑战难度较大。此外,JIANG Ruda等^[14]提出了一种基于硼烯超表面的功能器件,设计了硼烯纳米图

基金项目:国家重点研发计划(No. 2022YFF0708000),国家自然科学基金(No. 62275037),重庆市杰出青年基金(No. cstc2020jcyj-jqX0015),煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主课题(面上)项目(No. 2011DA105287-MS202111)

第一作者:张晓健,20210801024@cqu.edu.cn

通讯作者:韦玮,wwei@cqu.edu.cn

收稿日期:2023-07-03;**录用日期:**2023-09-07

<http://www.photon.ac.cn>

形化结构并调节其电子密度实现了对多个波段的近完美吸收。然而在对硼烯进行纳米图形化加工过程中会引入大量杂质和缺陷,极大降低硼烯的质量,影响器件性能。塔姆等离子激元 (Tamm Plasmon Polaritons, TPPs) 是一种在金属薄膜和一维光子晶体 (Photonic Crystal, PC) 界面上形成的束缚电磁态^[15-16],其平面波矢量为零,能够由自由空间光直接激发而不需要额外的矢量补偿,这种高度局域的电磁特性和灵活的激发方式使得其已广泛应用于二维材料吸光效率的提升。LU Hua等^[17]通过设计基于石墨烯的多层光子结构,在理论上将单层石墨烯的吸光效率从2.3%提高至80%。次年,该课题组^[18]又提出了一种基于二硫化钼的多层光子结构,在可见光波长下提升了单层二硫化钼的吸光效率至96%。DONG Daxing等^[19]提出了一种基于一维光子晶体结构的黑磷红外吸收器件,实现了单层黑磷近乎完美吸收。然而,基于塔姆等离子激元提高硼烯吸光效率的研究尚未见相关文献报道。因此,深入研究一维光子晶体结构中的硼烯光学响应对提升硼烯近红外吸光效率和拓宽其在光电领域中的应用具有重要意义。

本文从理论上提出了一种基于TPPs的硼烯近完美吸收器,研究了一维光子晶体结构中的硼烯近红外光学响应。该器件由金属薄膜、单层硼烯、氧化铝间隔层以及一维光子晶体结构组成,通过激发在金属和一维光子晶体之间的TPPs极大增强硼烯与光波的相互作用,能够在近红外波段实现单层硼烯的近完美吸收,比单层硼烯的吸收效率高一个数量级。此外,面内各向异性使得该器件在不同面内晶体方向上表现出不同的光学响应,吸收效率均高于95%。通过改变间隔层厚度、硼烯在间隔层中的位置、硼烯的电子密度等参数,可以有效地调节吸收峰的工作波长及吸收强度。

1 结构和模型

提出的基于塔姆激元共振的硼烯近完美吸收器件结构示意图如图1所示,其结构从上至下依次为银层、单层硼烯、氧化铝间隔层、由氮化硅和氧化硅交替组成的一维光子晶体结构及衬底。光波入射到器件上直接激发高度局域的塔姆等离子激元共振。该电磁谐振模式能够提高光波与物质的相互作用,从而提高硼烯的吸光效率。

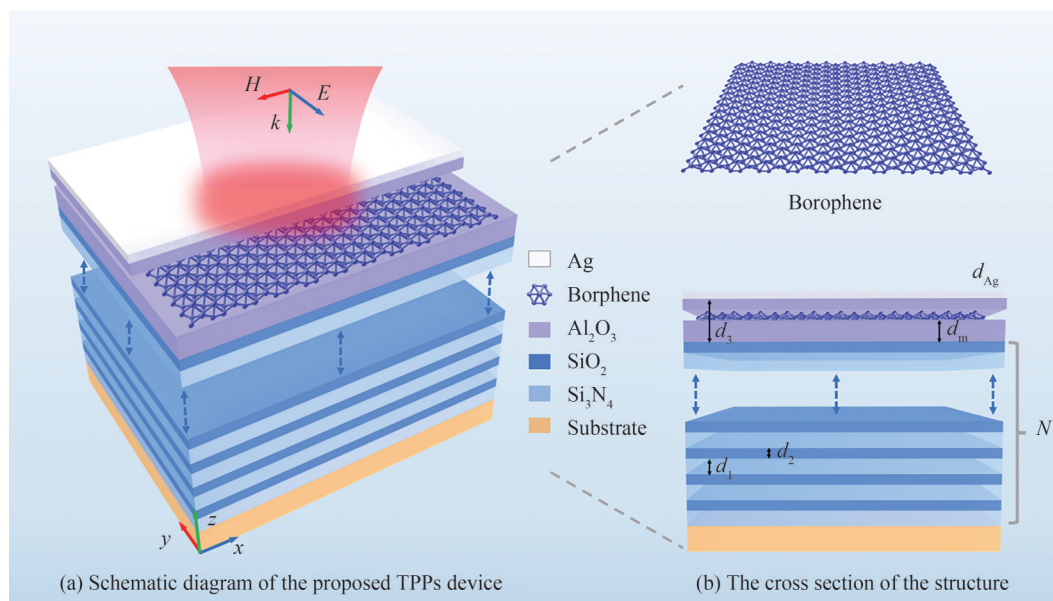


图1 基于塔姆激元的硼烯近完美吸收器结构示意图

Fig.1 The schematic diagram of borophene TPPs nearly perfect absorber

利用有限元仿真分析软件 COMSOL Multiphysics,建立硼烯塔姆等离子激元器件的物理模型,并对其光谱响应特性进行分析。器件中一维光子晶体结构是由 N 组氮化硅 (Si_3N_4) 和氧化硅 (SiO_2) 层交替组成,氮化硅折射率 $n_1=2.2$,氧化硅折射率 $n_2=1.45$ 。为确保共振吸收波长位于 $1\ 550\ \text{nm}$,将氮化硅和氧化硅厚度分别设置为 $d_1=176\ \text{nm}$ 和 $d_2=267\ \text{nm}$ 。将厚度为 $d_{\text{Ag}}=22\ \text{nm}$ 的薄层金属 (Ag) 放置在一维光子晶体上,银的介电常数用 Lorentz-Drude 模型来描述^[16]。金属层与一维光子晶体之间采用厚度为 d_3 的氧化铝间隔层分开,

单层硼烯位于氧化铝间隔层内。插入间隔层的目的是为了增强该区域内模式集中,从而有效提升单层硼烯与光的相互作用^[16]。仿真中,沿水平方向采用周期性边界条件,沿 z 方向上下两侧采用完美匹配层边界条件。仿真区域中采用非均匀网格,网格尺寸在硼烯位置设置为最小,并向外逐渐增大,以保证所有的仿真都达到适当的收敛,光源电场强度设为 1 V/m 。模型中,单层硼烯被定义为具有等效介电函数的薄介电层^[11],其介电常数 ϵ_{B} 可表示为

$$\epsilon_{\text{B}} = \epsilon_r + \frac{i\sigma_{jj}}{\omega\epsilon_0 t} \quad (1)$$

式中, $\epsilon_r=11$ 为硼烯的直流介电常数, ω 为入射光的角频率, ϵ_0 为真空介电常数, $t=1$ 为单层硼烯的厚度, σ_{jj} 为半经典 Drude 模型表征的各向异性电导率,定义为

$$\sigma_{jj}(\omega) = \frac{iD_j}{\pi(\omega + i\tau^{-1})}, D_j = \pi e^2 \frac{n}{m_j} \quad (2)$$

式中, $j=x$ 或 y 对应入射光的偏振方向, τ 为电子弛豫时间, $e=1.602\ 189\ 2\times 10^{-19}\text{ C}$ 为单位电荷, n 为硼烯的电子密度, D_j 和 m_j 分别为 Drude 质量和沿 x 方向及 y 方向的有效电子质量, $m_x\approx 1.4m_0$, $m_y\approx 5.2m_0$, $m_0=9.109\ 38\times 10^{-31}\text{ kg}$ 为标准电子静止质量。

2 结果和讨论

2.1 硼烯塔姆激元器件吸收特性分析

为了研究所提出结构的吸收特性,首先通过仿真得到器件的吸收光谱及一维光子晶体结构的反射光谱(不含单层硼烯),如图 2(a)所示。采用传递矩阵法(Transfer-Matrix Method, TMM)来计算多层一维光子晶体结构的光谱响应,以验证仿真结果。TMM 是理论计算多层光子结构中光传播特性的有效方法^[16, 17],假设 P_i 和 M_i 为表征入射光通过第 i 层和边界的传播矩阵,有

$$P_i = \begin{bmatrix} \exp(-i\varphi_i) & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi_i) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$M_i = \frac{1}{t_i} \begin{bmatrix} 1 & r_i \\ r_i & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\varphi_i = 2\pi n_i d_i \cos\theta_i/\lambda$ 是描述光在第 i 层传播相位的因子, n_i 和 θ_i 分别表示光在第 i 层的折射率及入射角度, d_i 表示第 i 层的厚度, λ 是真空中入射光波长。根据菲涅尔公式将反射系数和透射系数分别描述为

$$r_i = (n_{i-1} \cos\theta_i - n_i \cos\theta_{i-1}) / (n_{i-1} \cos\theta_i + n_i \cos\theta_{i-1}) \quad (5)$$

$$t_i = 2n_{i-1} \cos\theta_{i-1} / (n_{i-1} \cos\theta_i + n_i \cos\theta_{i-1}) \quad (6)$$

TMM 中总传输矩阵可描述^[20, 21]为

$$Q = M_1 P_1 M_2 P_2 \cdots P_{2N+3} M_{2N+4} \quad (7)$$

透射率 T 、反射率 R 和吸收率 A 可以分别由 $T = |1/Q_{11}|^2$ 、 $R = |Q_{21}/Q_{11}|^2$ 和 $A = 1 - T - R$ 进行理论计算。通过与仿真结果进行对比,可以发现仿真得到的结构反射谱与 TMM 理论计算结果基本吻合。由于单层硼烯具有各向异性的光学特性,导致该器件在不同面内晶体方向上具有不同的光谱响应。其在 x 方向和 y 方向产生塔姆等离激元共振吸收峰的中心波长分别位于 $1\ 550\text{ nm}$ 和 $1\ 607\text{ nm}$,吸收效率分别为 95.52% 和 96.63% 。如图 2(b)所示,相较于单层硼烯仅有 4% 的吸光效率,TPPs 能够分别将硼烯不同面内晶体方向的吸光效率提高近 23.9 倍和 24.2 倍,吸光效率提升了一个数量级。

其次,硼烯能够通过调整狄拉克电子密度,改变其表面电导率,直接影响材料的有效介电常数和吸收特性,故本小节将深入研究硼烯的狄拉克电子密度对器件吸收光谱的影响,仿真结果如图 2(c)所示。仿真中间隔层厚度设置为 $d_3=450\text{ nm}$,将单层硼烯放置在 225 nm 深度,一维光子晶体结构参数保持 $d_1=176\text{ nm}$, $d_2=267\text{ nm}$, $N=17$ 不变。当单层硼烯的电子密度从 $3\times 10^{19}\text{ m}^{-2}$ 增加到 $15\times 10^{19}\text{ m}^{-2}$ 时,沿 x 偏振方向的最大吸收效率从 90.69% 提升到 99.53% ,共振峰波长位置从 $1\ 577\text{ nm}$ 移动至 $1\ 540\text{ nm}$ 。吸收的增强是由于硼烯有效介电常数的虚部随电子密度的增加而增加^[18]。同时,硼烯有效介电常数实部也随电子密度的增大而

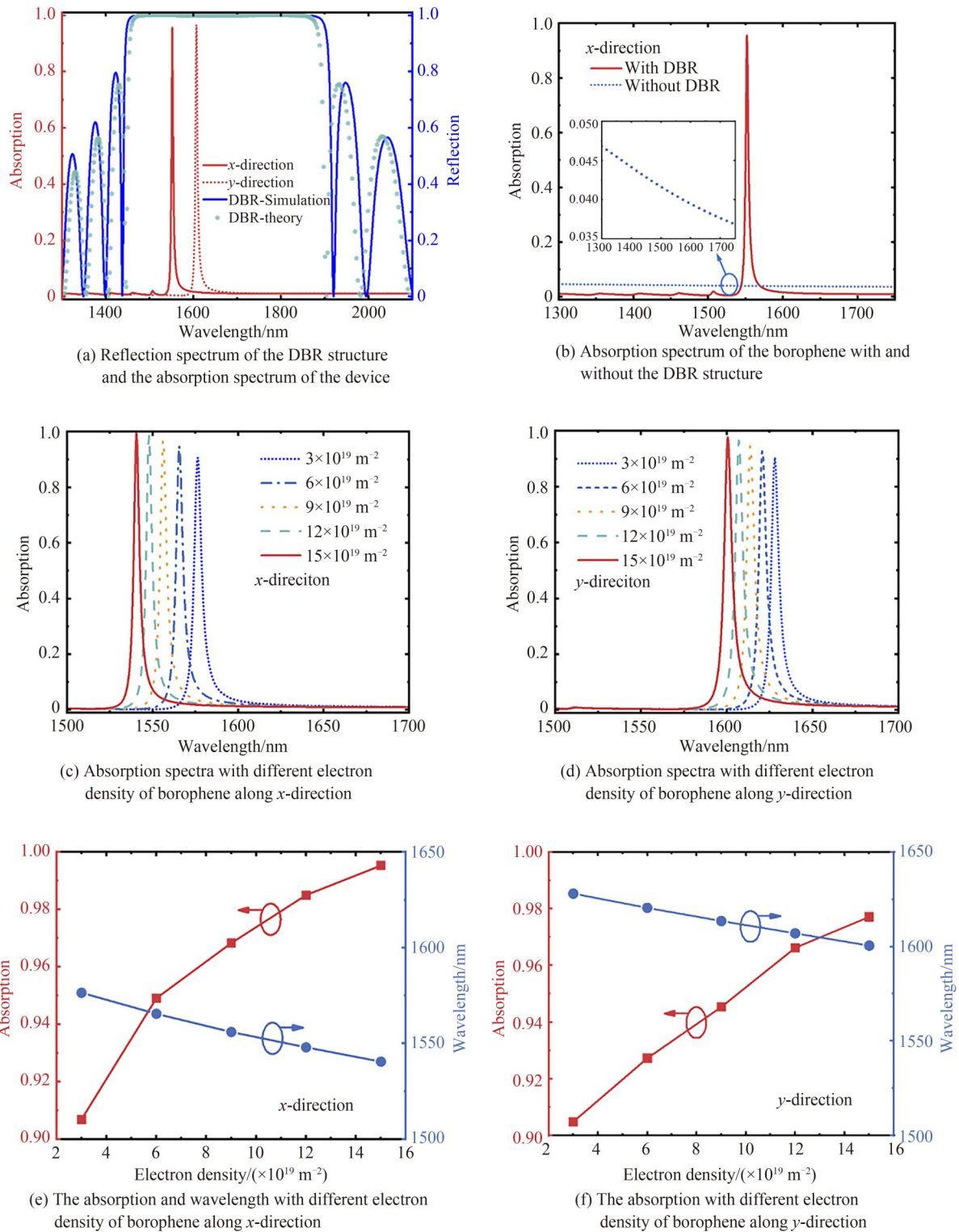


图2 基于塔姆激元的硼烯吸收器吸收特性曲线

Fig.2 The absorption characteristic of borophene TPPs perfect absorber

增大,导致共振峰位置出现了轻微的蓝移,如图2(e)所示。此外,沿y方向上单层硼烯的吸收效率随电子密度变化的特性如图2(d)、(f)所示。由图中可以看出,当单层硼烯的电子密度从 $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$ 增加到 $15 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$ 时,最大吸收效率从90.48%提升到97.71%,共振峰波长位置从1628 nm移动1600 nm,吸收效率的提升与共振峰波长位置的移动趋势与x方向相同。由此可以看出,相比于二维材料石墨烯^[22-23],硼烯表现出强烈的各向异性,因此所设计的硼烯完美吸收器在两个晶体方向上均表现出近完美吸收特性,其共振吸收峰位置

可以随电子密度改变从而进行动态调控,这种优异特性使得基于硼烯红外光电器件的设计具有更大的灵活性。

为了进一步研究所设计的近完美吸收器的物理机制,分别给出了沿硼烯 x 方向及沿 y 方向上1550 nm及1607 nm波长处的电场及场强分布。从图3(a)中可以看出,在1550 nm吸收峰值波长处,沿 x 方向上电场在间隔层内受到强烈的约束,这是由于电磁波在一维光子晶体表面发生布拉格反射,激发了高度局域的塔姆等离子激元共振,此时场强几乎完全约束在间隔层内,且电场强度在一维光子晶体内呈指数递减。当单层硼烯插入到间隔层中时,高度局域的TPPs模式增强了单层硼烯的吸收特性,进而实现了器件的近完美吸收。对比不同面内晶体方向条件下的电场分布,可以发现沿晶体 x 方向和 y 方向的电场模式分布相似,但电场强度明显不同,为了更好地理解硼烯不同面内方向的吸收特性,引入了光功率耗散密度,定义为^[24]

$$w(x, z) = 0.5\epsilon_0\omega \operatorname{Im}(\epsilon(x, z)) |E(x, z)|^2 \quad (8)$$

式中, $\epsilon(x, z)$ 为结构中组成材料的介电常数, $E(x, z)$ 为电场强度。单层硼烯的吸收效率可用单位体积硼烯

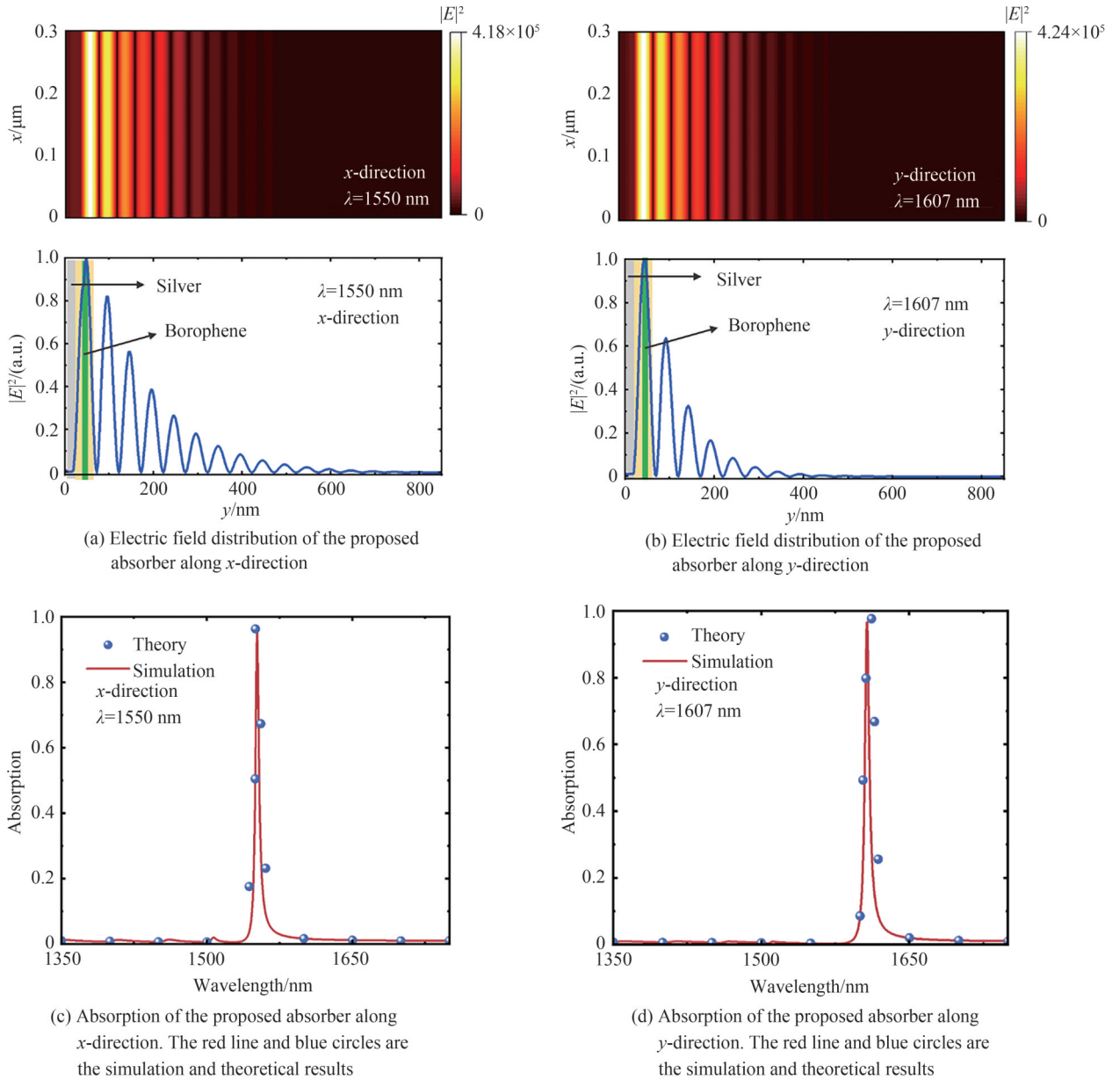


图3 沿硼烯不同面内晶体方向上的电场强度分布及吸光效率
Fig.3 The electric field distribution and absorption along the x -direction and y -direction

的吸收功率与通过硼烯表面积 S 的输入功率之比来计算,定义为^[18]

$$a = \frac{\iiint_V w(x, z) dV}{0.5c\epsilon_0 |E(x, z)|^2 S \cos \theta} \quad (9)$$

式中, V 为硼烯体积, θ 为光波的入射角度。由于硼烯沿 x 方向及 y 方向的有效电子质量不同, 所以沿不同面内晶体方向光功率耗散密度不同, 因此, 在 x 方向及 y 方向获得的吸光效率不同。在图 3(b) 中可以看出, 沿 y 方向在 1 607 nm 波长处, 间隔层内具有明显的场增强。由此可知硼烯的吸收效率与电场增强呈正相关^[15, 25-26], 根据式(8)、(9)理论计算得到硼烯的吸光效率与仿真结果基本一致, 如图 3(c)、(d) 所示。

2.2 一维光子晶体结构对吸收特性的影响

研究了构成一维光子晶体结构的氮化硅和氧化硅厚度对器件吸收特性的影响。图 4(a)、(b) 所示为氧化硅厚度为 267 nm, 间隔层厚度为 450 nm, 单层硼烯位于间隔层中心位置, 单层硼烯电子密度为 $1.2 \times 10^{20} \text{ m}^{-2}$ 时, 不同氮化硅厚度下器件的吸收光谱及氮化硅厚度与光谱特性关系曲线。由图中可以看出, 沿硼烯面内 x 偏振方向, 氮化硅厚度在 100~180 nm 范围内, 吸收效率均保持在 90% 以上, 吸收峰位置随氮化硅厚度增大而向长波方向移动。当氮化硅厚度大于 180 nm 后, 由于一维光子晶体的结构参数变化, 无法满足塔姆等离激元模式共振条件, 导致其吸收效率逐渐降低。提取了氮化硅厚度 d_1 分别为 100 nm、120 nm、140 nm、160 nm、180 nm、200 nm 时器件的吸收光谱, 可以看到共振吸收峰波长产生了近 250 nm 范围的红移。通过参数化扫描氮化硅厚度, 可以得到 $d_1=176$ nm 时, 在 1 550 nm 波长处获得最高 95.52% 的近完美吸收效率。此外,

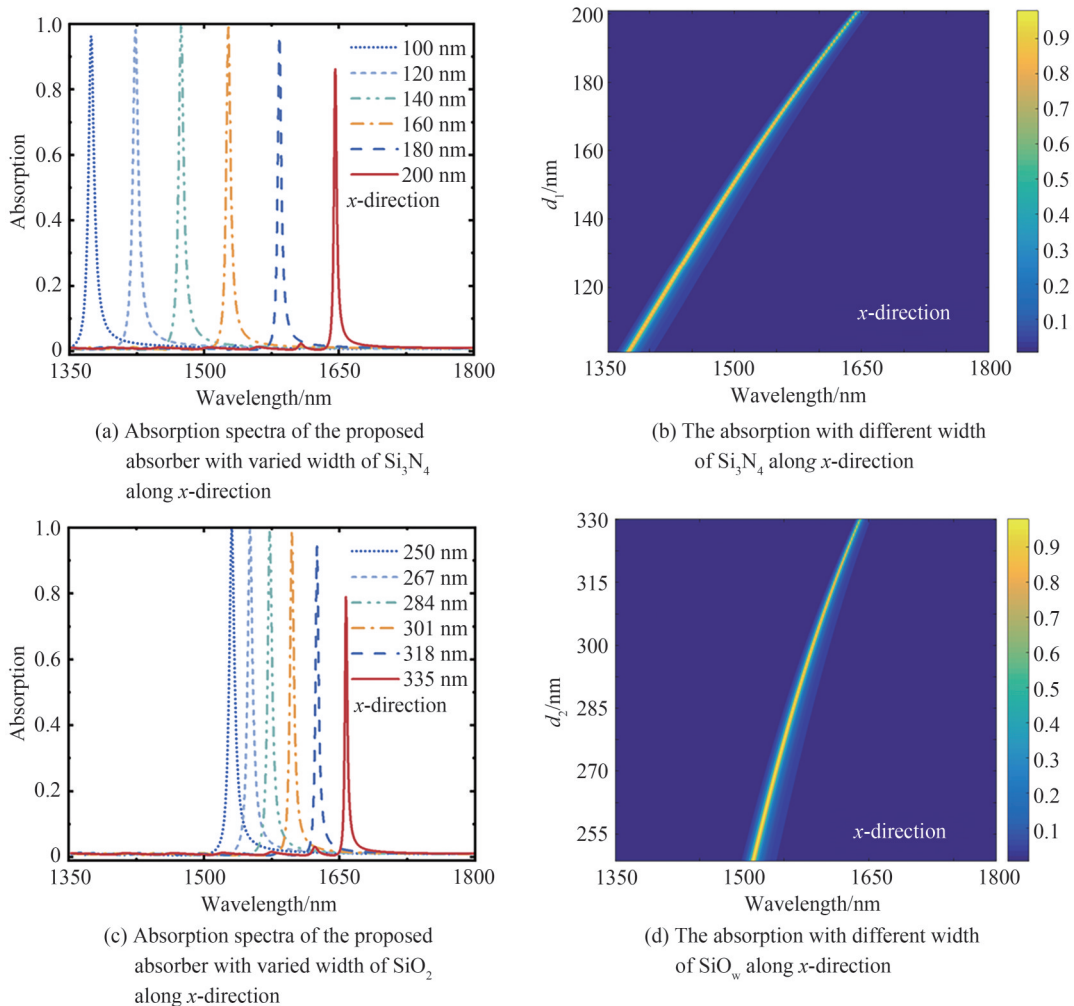


图 4 沿硼烯面内 x 方向不同氮化硅及氧化硅厚度对器件吸收光谱的影响

Fig.4 The absorption spectra of proposed device with varied widths of Si_3N_4 and SiO_2 along x -direction

图4(c)、(d)给出了当其他参数不变,氮化硅厚度固定为176 nm时,不同氧化硅厚度下器件的吸收光谱及氧化硅厚度与光谱特性关系曲线。由图中可以看出,氧化硅厚度在250~300 nm范围内,吸收效率几乎保持不变。当氧化硅厚度大于300 nm后,TPPs模式共振条件改变,吸收效率逐渐降低,吸收峰位置也随之发生红移。由此可以表明,塔姆激元共振激发条件与一维光子结构参数密切相关,通过改变氮化硅及氮化硅的厚度设计不同结构的一维光子晶体结构,能够有效实现对器件吸光效率及共振吸收峰位置的灵活调控。

通过仿真模拟了不同厚度氧化铝间隔层对器件吸收特性的影响,结果如图5(a)所示。该结构中一维光子晶体结构参数均保持不变,且仅讨论沿硼烯面内 x 方向的吸收特性。由图中可以看出,当氧化铝间隔层厚度大于350 nm时,电场模式能量被高度局域在间隔层内,吸收效率随间隔层厚度提高而逐渐升高。此外,由于间隔层厚度改变,导致器件传输矩阵变化,共振吸收峰的位置发生了红移。由图5(b)可以看出,当氧化铝间隔层厚度从350 nm增加至500 nm时,共振吸收峰的强度由31%提高至96.63%,吸收峰的位置由1537 nm移动至1604 nm。图5(c)给出不同氧化铝间隔层厚度下的场强分布,由图中可以看出,在间隔层厚度450 nm时,电场能量局域在间隔层内,此时对应的吸收峰在1550 nm波长处可以达到最大吸收。间隔层厚度增加到475 nm时,能量几乎全部局域在间隔层内,吸收效率达到最大值,但此时吸收峰位置移动至1575 nm。该结果表明氧化铝间隔层厚度会对塔姆激元电场强度及局域特性造成影响,进而影响单层硼烯的吸光效率。通过控制间隔层厚度同样可以有效调控器件的吸收效率及吸收峰波长位置,吸收效率大小与电场模式能量分布密切相关。

同时,由图5(c)场强分布可以看出,电场在间隔层内高度局域,而电场强度在不同间隔层位置处差异较大。因此,通过仿真分析单层硼烯在间隔层中的不同位置,研究其对吸收效率及共振吸收峰位置的调控作用。图6(a)所示为间隔层厚度设置为450 nm时,单层硼烯放置在间隔层不同位置时吸收器的光谱曲线。

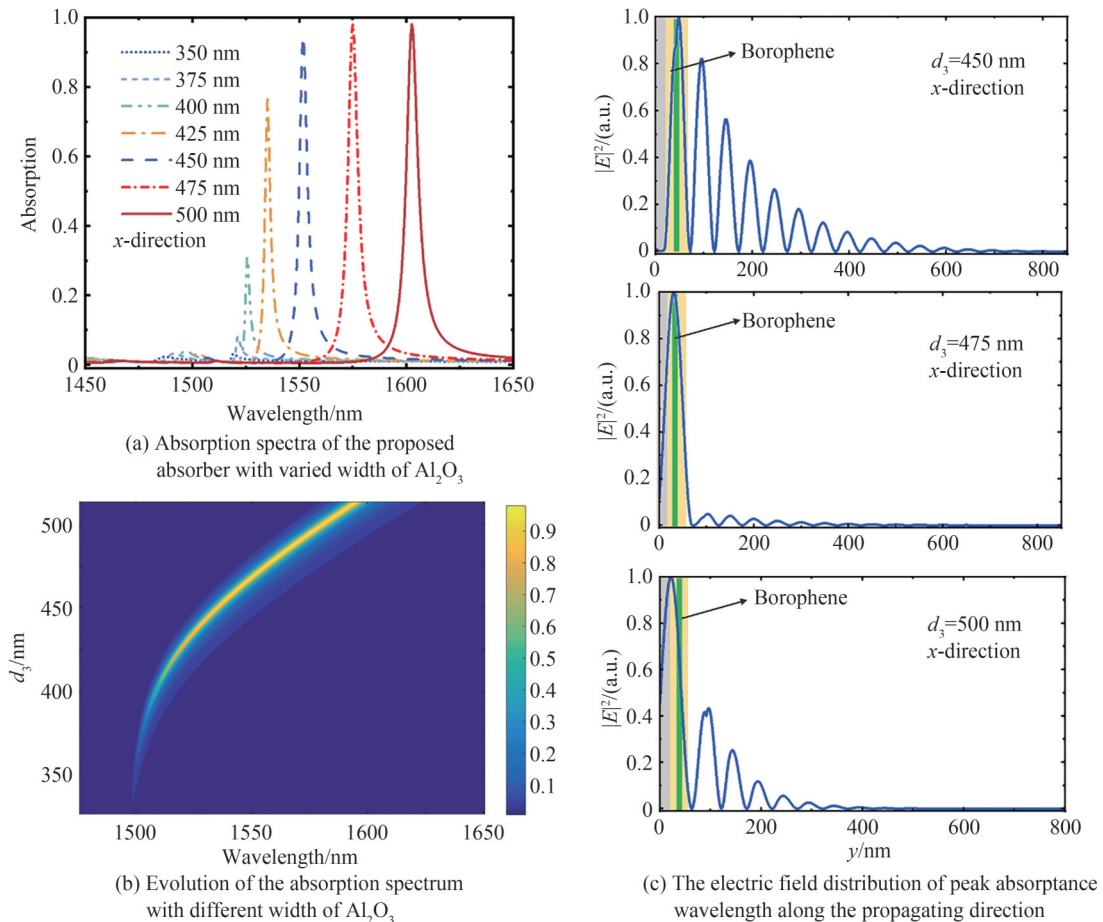


图5 氧化铝间隔层厚度对器件吸收光谱的影响

Fig.5 The absorption spectra of proposed device with varied widths of Al_2O_3

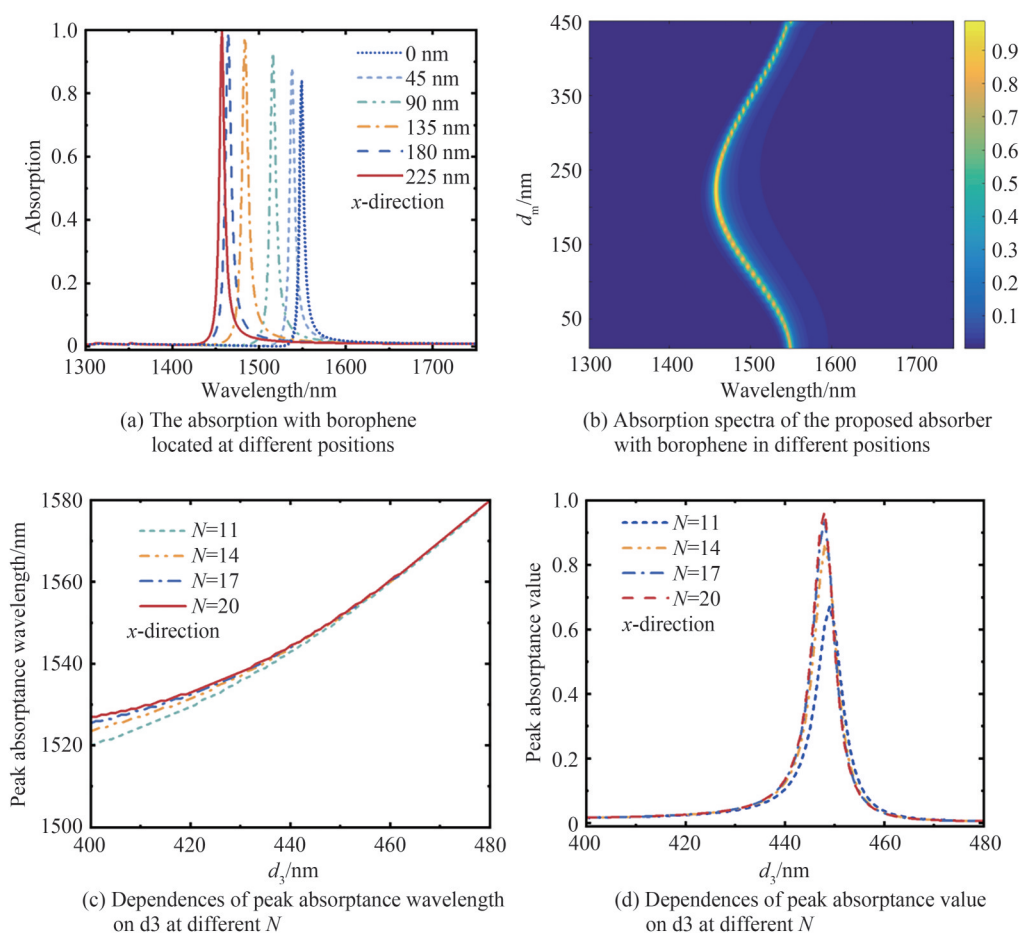


图6 不同一维光子晶体结构对器件吸收光谱的影响

Fig.6 The absorption spectra of proposed device with varied structures of one-dimensional PC

图中分别给出了 0 nm、45 nm、90 nm、135 nm、180 nm 及 225 nm 六个不同深度的吸收光谱。结果表明,其在间隔层中心前后深度 90 nm 宽范围内吸收率均大于 95%,而在间隔层底部处 ($d_m=0$ nm),吸收效率降低至 80%。当单层硼烯放置位置从间隔层顶部向底部移动时,结构的吸收效率先增大后减小,如图 6(b) 所示。这是由于理想的硼烯位置对应于电场最强处,当单层硼烯放置于间隔层中间位置时,其吸收率接近最理想值,具有更强的电场局域能力,吸收效率可以达到最大。由图 6(c) 中电场分布可知,间隔层顶部及底部电场强度接近于零,该吸收是由金属薄膜对光的吸收导致。显然,共振吸收峰的位置受单层硼烯所在氧化铝间隔层中位置的影响,该结果与石墨烯及黑磷的相关文献报道一致^[17,19]。

进一步研究了氮化硅和氧化硅厚度及单层硼烯位置不变情况下,不同一维光子晶体周期数 N 对吸收光谱的影响。由以上结果可知,吸收峰波长随间隔层厚度的增加非线性红移,在合适的间隔层厚度下可以实现器件的近完美吸收。分别设计了 $N=11, 14, 17, 20$ 四种情况下的一维光子晶体结构,其共振吸收峰波长位置随氧化铝间隔层厚度影响如图 6(c) 所示。由图中可以看出,周期数 N 几乎不影响共振峰的位置,随着 N 的增加,塔姆激元共振峰位置随间隔层厚度改变的偏移逐渐减小。间隔层厚度对不同周期层数下峰值吸收效率的影响如图 6(d) 所示,可以看出,周期数的增强进一步提高了器件的吸光效率,且不同周期数下,峰值吸光效率分别为 65.43%、88.05%、95.52%、95.26%,吸收效率的提升是由于增加一维光子晶体结构的周期数可以有效抑制光的透射,进一步增强单层硼烯中的场强。当 $N \geq 17$ 时,周期数几乎不影响单层硼烯中 TPPs 模式的电场,吸光效率不再进一步增加。

此外,研究了不同的光入射角对器件吸光效率及共振波长的影响。一维光子晶体的具体参数设置为氧化硅厚度为 267 nm,氮化硅厚度为 176 nm,间隔层厚度为 450 nm,单层硼烯位于间隔层中心位置,单层硼烯电子密度为 $1.2 \times 10^{20} \text{ m}^{-2}$,周期数 $N=17$ 。当沿硼烯面内 x 方向时,光束分别以 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 的角度入

射到器件上,得到的器件吸收光谱及不同入射角度与吸收特性的关系曲线如图7(a)、(b)所示。从图中可以看出,随着入射角的增大,吸收峰出现明显的蓝移。当入射角 θ 从 0° 增大至 60° 时,共振中心波长从1550 nm移动至1385 nm,吸收效率从95.52%降低至73.02%。根据式(5)、式(6)可知,不同入射光角度对光学传输矩阵有直接影响,入射角度变化会直接造成器件反射系数与透射系数的变化,进而影响器件的吸收效率与共振波长,且随入射角增大峰值响应波长发生蓝移,该结果与文献报道一致^[27-28]。同理可得,当沿硼烯面内 y 方向时,光束以不同角度入射到器件上,同样会改变器件的光谱特性。当光束分别以 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 的角度入射到器件上,得到的器件吸收光谱及不同入射角度与吸收特性的关系曲线如图7(c)、(d)所示。从图中可以看出,当入射角 θ 从 0° 增大至 60° 时,共振中心波长从1607 nm移动至1418 nm,吸收效率从96.63%降低至63.4%。通过改变光入射角能够有效调节器件的共振吸收峰波长及吸光效率,为灵活调控硼烯近完美吸收器件的共振波长及吸光效率提供了一种简单有效的方法。

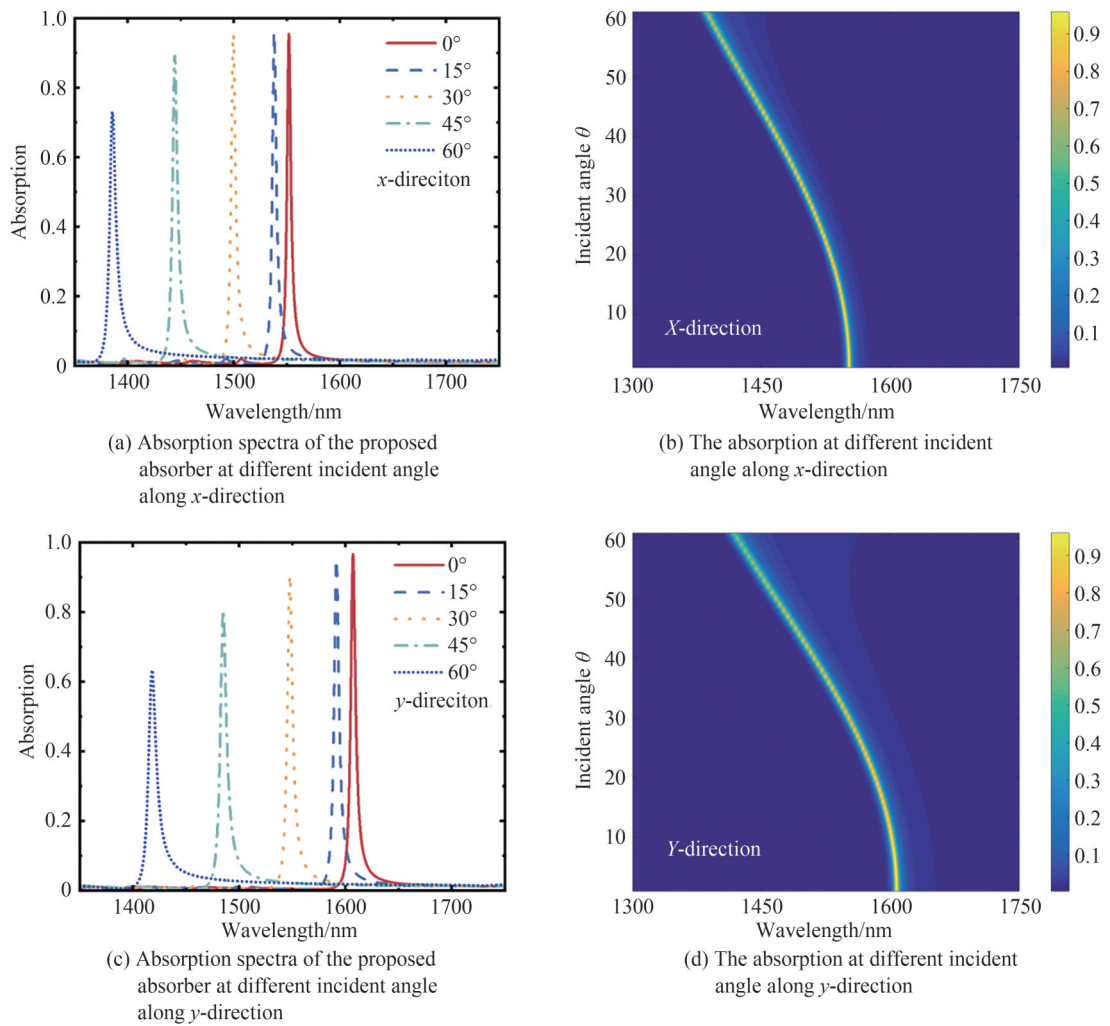


图7 不同入射角度对器件吸收光谱的影响

Fig.7 The absorption spectra of proposed device at different incident angle

3 结论

本文提出了一种基于塔姆激元的硼烯近完美吸收器件,该器件由金属薄层、单层硼烯、氧化铝间隔层以及一维光子晶体结构组成。通过设计硼烯/一维光子晶体结构激发塔姆等离子激元共振,提高了TPPs模式能量,显著增强了光与硼烯之间的相互作用,从而提高了硼烯的吸光效率。仿真结果表明,设计的器件能够直接激发塔姆等离子激元。同时通过改变一维光子晶体结构、氧化铝间隔层厚度、单层硼烯在间隔层中的位置、

硼烯的电子密度等参数,可以有效地调节共振吸收峰的工作波长及吸收效率。并且由于硼烯在不同面内晶体方向表现出强烈的各向异性,沿 x 和 y 方向可实现在1 550 nm及1 607 nm处吸光效率最高可达95.52%和96.63%,相比于单层硼烯吸光效率提高了一个数量级。所设计的硼烯完美吸收器具有高吸光效率、各向异性、吸收波段可调等优异特性,可为下一代片上集成光通信、传感、探测器件提供崭新思路。

参考文献

- [1] XIE Zhongjian, MENG Xiangying, LI Xiangnan, et al. Two-dimensional borophene: properties, fabrication, and promising applications[J]. *Research*, 2020, 2020: 2624617.
- [2] XIE Shengyi, WANG Yeliang, LI Xianbin. Flat boron: a new cousin of graphene[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(36): e1900392.
- [3] NONG Jinpeng, TANG Linlong, LAN Guilian, et al. Enhanced graphene plasmonic mode energy for highly sensitive molecular fingerprint retrieval[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 15(1): 2000300.
- [4] CHEN T A, CHUU C P, TSENG C C, et al. Wafer-scale single-crystal hexagonal boron nitride monolayers on Cu (111)[J]. *Nature*, 2020, 579 (7798): 219-223.
- [5] LUO Peng, WEI Wei, LAN Guilian, et al. Anisotropic surface plasmon resonance spectroscopy and infrared sensing properties employing graphene-black phosphorus heterostructure (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(10): 1024001.
骆鹏, 韦玮, 兰桂莲, 等. 基于石墨烯/黑磷异质结构的各向异性表面等离子共振光谱及红外传感特性(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(10): 1024001.
- [6] LI Hongju, REN Yongze, HU Jigang, et al. Wavelength-selective wide-angle light absorption enhancement in monolayers of transition-metal dichalcogenides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3236-3241.
- [7] FENG Baojie, SUGINO O, LIU R Y, et al. Dirac fermions in borophene[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(9): 096401.
- [8] HUANG Yuefei, SHIRODKA S N, YAKOBSON B I. Two-dimensional boron polymorphs for visible range plasmonics: a first-principles exploration[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, 139(47): 17181-17185.
- [9] JALALI-MOLA Z, JAFARI S A. Kinked plasmon dispersion in borophene-borophene and borophene-graphene double layers[J]. *Physical Review B*, 2018, 98(23): 235430.
- [10] DERESHGI S A, LIU Z, AYDIN K. Anisotropic localized surface plasmons in borophene[J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 16725-16739.
- [11] NONG Jinpeng, FENG Fu, MIN Changjun, et al. Effective transmission modulation at telecommunication wavelengths through continuous metal films using coupling between borophene plasmons and magnetic polaritons[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(7): 2001809.
- [12] NONG Jinpeng, WEI Wei, WANG Wei, et al. Strong coherent coupling between graphene surface plasmons and anisotropic black phosphorus localized surface plasmons[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1633-1644.
- [13] ZHANG Jun, NONG Jinpeng, FENG Fu, et al. Magnetic polaritons assisted effective excitation of multi-order anisotropic borophene surface plasmons in the infrared region[J]. *Results in Physics*, 2021, 29: 104780.
- [14] JIAN Ruda, WU Shiwen, ZHAO Bo, et al. Tunable multi-peak perfect absorbers based on borophene for high-performance near-infrared refractive index sensing[J]. *Optical Materials*, 2022, 131: 112751.
- [15] LUO Guoping, CHEN Xingyuan, HU Sumei, et al. Near infrared hot electrons photodetectors based on Tamm plasmons[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(4): 0404002.
罗国平, 陈星源, 胡素梅, 等. 基于塔姆等离激元的近红外热电子光电探测器[J]. *光子学报*, 2022, 51(4): 0404002.
- [16] LU Hua, LI Yangwu, YUE Zengji, et al. Topological insulator based Tamm plasmon polaritons[J]. *APL Photonics*, 2019, 4(4): 040801.
- [17] LU Hua, GAN Xuetao, JIA Baohua, et al. Tunable high-efficiency light absorption of monolayer graphene via Tamm plasmon polaritons[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4743-4746.
- [18] LU Hua, GAN Xuetao, MAO Dong, et al. Nearly perfect absorption of light in monolayer molybdenum disulfide supported by multilayer structures[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21630-21636.
- [19] DONG Daxing, LIU Youwen, FEI Yue, et al. Designing a nearly perfect infrared absorber in monolayer black phosphorus[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(14): 3862-3869.
- [20] MAJI P S, DAS R. Absorption enhancement in monolayer graphene using Tamm plasmon polaritons [J]. *OSA Continuum*, 2018, 1(2): 392.
- [21] LU Hua, LI Yangwu, JIAO Han, et al. Induced reflection in Tamm plasmon systems[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5383-5392.
- [22] LIU Xiaoshan, LIU Guiqiang, TANG Peng, et al. Quantitatively optical and electrical-adjusting high-performance switch by graphene plasmonic perfect absorbers[J]. *Carbon*, 2018, 140: 362-367.

- [23] FENG Yue, LIU Hai, CHEN Cong, et al. Broadband terahertz metamaterial absorber based on patterned graphene [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 51(9): 0923001.
冯越, 刘海, 陈聪, 等. 基于图案化石墨烯的宽带太赫兹超材料吸收器[J]. *光子学报*, 2022, 51(9): 0923001.
- [24] ALI A, SAEED A, HASSAN G, et al. Narrow band total absorber at near-infrared wavelengths using monolayer graphene and sub-wavelength grating based on critical coupling [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36, 5593-5599.
- [25] LI Liang, ZHAO Hua, ZHANG Jingwen, et al. Tunable Tamm plasmon polaritons and perfect absorption in a metal-PC cavity [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52 (25): 255105.
- [26] LIU Zhengqi, LIU Guiqiang, LIU Xiaoshan, et al. Spatial and frequency-selective optical field coupling absorption in an ultra-thin random metasurface [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(7): 1586-1589.
- [27] YU Tong, ZHANG Cheng, LIU Huimin, et al. Planar, narrowband, and tunable photodetection in the near-infrared with Au/TiO₂ nanodiodes based on Tamm plasmons [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(48): 23182-23187.
- [28] LEE C, LEE Y K, PARK Y, et al. Polarization effect of hot electrons in tandem-structured plasmonic nanodiode [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(9): 3499-3506.

Nearly Perfect Absorber in Borophene Based on Tamm Plasmon Polaritons (Invited)

ZHANG Xiaojian¹, ZHANG Quan¹, LAN Guilian¹, LUO Peng¹, WEI Wei^{1,2}

(1 *Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education of China, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

(2 *State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

Abstract: Borophene is one of the few 2D materials that is intrinsically metallic with high carrier densities and strong anisotropy, thus offering the unprecedented potential for new generation optoelectronic devices based on 2D materials. Unfortunately, as an unavoidable consequence of the atomic-scale thickness of borophene that is much smaller than the wavelength of operation, the low absorption of monolayer borophene extremely limits the performance of the borophene-based devices and restricts their relevant applications. It is highly desirable to improve the light absorption of borophene to enhance the light-matter interaction, especially in the commercially important telecommunications waveband. A simple and plausible route is offered by optical Tamm Plasmon Polaritons (TPPs) mode, which is an optical state formed between the metal film and one-dimensional photonic crystal. Besides, TPPs are polarization independent and can be generated without the external compensation of wavevector. In general, TPPs could be excited through direct incidence of electromagnetic waves at normal as well as oblique incidence. To this end, we theoretically present a prototype of nearly perfect absorber in borophene enabled by the Tamm plasmon polaritons mode, which achieved by a novel multilayer photonic configuration consisting of a metal film, a spacer, and one-dimensional photonic crystal, and investigated the enhancement of light absorption of monolayer borophene which is positioned within the spacer layer. The monolayer borophene position is optimized based on the nature of field localization in the photonic crystal region. Benefiting from the strong interaction of borophene with the confined field at metal-dielectric interface generating by the Tamm plasmon polaritons mode, the absorption can be enhanced up to 95.53% and 96.62% at the wavelength of 1 550 nm and 1 607 nm along x -direction and y -direction respectively. Then, the transfer-matrix method, an effective approach for the theoretical calculations of light propagation characteristics in the multilayer photonic configurations, is employed to achieve the spectral response in the multilayer structures. The simulated results agree well with the analytical calculations. The proposed absorber shows achieved nearly perfect light absorption is an order of magnitude in optical absorption higher than that of free-standing monolayer borophene, which contributes to the significant enhancement of light-matter interaction. It is also found that the operating resonant wavelength and height of sharp absorption peak could be effectively adjusted by altering the electron density of borophene, the period numbers of dielectric grating and the position of borophene in the resonator. The maximum absorption increases accompanying

with the wavelength shift of the corresponding absorption peak when the electron density increases increasingly. The enhancement of the absorption is caused by the increasing imaginary part of the effective permittivity and the slight blueshift of the peak wavelength is caused by the real part of the effective permittivity. Meanwhile, we find that the thicknesses of Si_3N_4 and SiO_2 layers in the one-dimensional photonic crystal also play crucial role in the absorption for the borophene layer. The absorption peak possesses a nearly linear redshift with an increasing of the Si_3N_4 thickness and SiO_2 thickness. In addition, we investigate the dependence of the light absorption in monolayer borophene on the light incident angle. The maximum absorption can be dynamically tuned by adjusting the incident angle and the wavelength of the absorption peak exhibits a blueshift with the increase of the incident angle. These results can offer a promising way for the tunability and selectivity of the enhancement of light-matter interaction in 2D materials. The proposed infrared borophene absorber based on Tamm plasmon polaritons exhibits excellent performance including flexible tunability and high absorption, which is expected to be utilized in a wide range of potential applications in optical communication, photodetection and imaging system.

Key words: Borophene; Tamm plasmon polaritons; Nearly perfect absorber; Near-infrared band; Anisotropic optical materials

OCIS Codes: 240.6680; 240.5440; 160.1190; 300.6340; 300.1030