

磷烯 π 型结构中等离激元诱导透明现象

许鼎炀, 韩利*, 邢怀中*, 褚君浩
(东华大学理学院, 上海 201620)

摘要: 磷烯因其层数可调的带隙、高的载流子迁移率及面内各向异性等优点为构建基于二维材料的光电子器件提供了新的选择。用时域有限差分法数值模拟了磷烯 π 型级联和紧凑结构中的等离激元诱导透明现象, 通过改变结构分布及磷烯的费米能级等参数, 实现了中红外到远红外的宽范围可调谐等离激元诱导透明。其中, 透明窗口数目、强度以及位置均实现了灵活调制。此外, 研究了诱导透明窗口对偏振角敏感的特性。所得结果为开发基于磷烯等离激元的生物传感器、光电探测器及光开关等提供了参考。

关键词: 红外物理; 等离激元诱导透明; 时域有限差分法; 磷烯; 表面等离激元

中图分类号: O4 **文献标识码:** A

Plasmon-induced transparency in π -cascade structure of phosphorene

XU Ding-Yang, HAN Li*, XING Huai-Zhong*, CHU Jun-Hao
(College of Science, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Phosphorene provides a new choice for the construction of optoelectronic devices based on two-dimensional materials because of its adjustable band gap, high carrier mobility and in-plane anisotropy. Plasmon-induced transparency in the π -cascade and compact structure of phosphorene was numerically simulated by the finite difference time domain method. By changing the structure distribution and Fermi energy level of phosphorene and other parameters, a wide range of tunable plasmon-induced transparency from mid-infrared to far-infrared was realized. Among them, the number, intensity and position of transparent windows are flexibly modulated. In addition, the sensitivity of induced transparent window to the angle of polarization is studied. The results provide a reference for the development of biosensors, photo-detectors and optical switches based on the surface plasmon of phosphorene.

Key words: infrared physics, plasmon-induced transparency, finite-difference time-domain method, phosphorene, surface plasmon

PACS: 41. 20. Jb, 78. 20. Bh, 73. 20. Mf, 42. 25. Bs

引言

电磁感应透明 (Electromagnetically Induced Transparency, 简称 EIT) 是由原子光激发通道之间的量子相干效应而产生的, 它导致原子共振频率下的光吸收降低甚至完全透明^[1-2]。EIT 在慢光器件^[3]、增强非线性效应^[4]、无标签生物传感^[5]等方面的应用引起了广泛关注。然而, 由于 EIT 现象的实现受到制冷温度、高强度激光等限制^[6], 例如光子晶体波导^[7]、耦合微谐振器^[8]和超材料^[9]等不需要严苛

条件的 EIT 类似物已被提出用于各种光学结构。等离激元超材料具有类似 EIT 的特性, 在保持光学特性一致的前提下提供了构造各种尺寸和形状的器件的可能性。在室温下, 由于等离激元诱导透明 (PIT) 纳米结构的可操作性及宽的操作带宽, 其应用前景也更广泛。2014 年, 二维黑磷 (Black Phosphorus, BP) 纳米片成功问世^[10], 与其他现有的 2D 材料相比, 其具有高室温载流子迁移率^[11]、可广泛调谐的直接带隙^[12]、面内各向异性^[13]和出色的非线性光学

收稿日期: 2020-10-27, 修回日期: 2021-04-21

Received date: 2020-10-27, Revised date: 2021-04-21

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金, 东华大学研究生创新基金 (CUSF-DH-D-2020093), 上海市自然科学基金 (21ZR1402200)

Foundation items: Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, and Graduate Student Innovation Fund of Donghua University (CUSF-DH-D-2020093), Natural Science Foundation of Shanghai (21ZR1402200)

作者简介 (Biography): 许鼎炀 (1995-), 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 主要研究磷烯 π 型等离激元诱导透明现象

E-mail: xudingyang_rocky@sina.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: xinghz@dhu.edu.cn

响应^[14]等优异性能。并因此获得了相当大的关注,在各种应用中呈现出巨大的潜力。例如传感器^[15],超快光子学^[16],光电探测器^[17],场效应晶体管^[18],催化剂^[19]和生物医学^[20]等。

2011年,Arif E等人使用贵金属实现了 π 型结构的设计,通过纳米带之间的耦合实现类EIT的精细光谱调谐行为和控制近场增强的位置^[21]。2013年,Shi等^[22]利用石墨烯完善了明暗元素耦合纳米结构,设计了单 π 型结构,通过简单的调整费米能级实现了对透明窗口的灵活调谐。2017年Zhang等人设计了级联的 π 型石墨烯纳米结构,相比于Shi等^[10]单 π 型结构,明显实现了近场增强。此外,石墨烯电阻抗结构构造显示与原子电阻抗非常相似的电阻抗光谱,电阻抗光谱可以通过施加栅极电压进行电调谐,且石墨烯电阻抗结构可以提供极大的群延迟^[23]。2018年,Niu等人在中红外区域设计了周期性的T型石墨烯阵列,通过调整几何参数得到实现等离子体诱导透明现象的优化组合,并分析了其物理机理,还提出了单 π 形石墨烯结构在16~24 THz范围实现了双峰PIT效果,为开发可调谐石墨烯基光子器件提供了一种灵活的方法^[24]。2019年,Wang等人利用磷烯三聚体(单 π 型)实现了利用费米能级动态调整透明窗口位置,通过面内各向异性实现了宽范围调谐^[25]。2019~2020年,Liu C等人设计了“类H型”磷烯-石墨烯多层复合等离子体诱导透明结构,讨论了其可调的吸收效应与慢光效应。在生物传感器、慢光器件等有应用潜力^[26-27]。

相比于贵金属和石墨烯,磷烯因其独特的各向异性使其在中红外波段宽范围可调谐能力方面拥有极大潜力。此外,相比于石墨烯零带隙问题所导致的在光电子逻辑器件方面应用的局限性^[28],磷烯材料的诞生极大程度弥补了这一不足。相比于其他模型, π 型结构具有近场增强、调控增强热点位置等优点,对于宽范围可调谐提供了更大可能性。目前只有Wang等人研究了磷烯单 π 型结构的等离子体诱导透明现象,还没有看到以磷烯 π 型级联结构下等离激元诱导透明现象相关研究,因此本文从热门的 π 型结构出发,将磷烯融入其中,尝试使用基于时域有限差分法的商业软件FDTD solutions建立两种不同物理结构模型,分别探索结构参数、费米能级以及面内各向异性对诱导透明现象的影响。通过对比分析各个变量对诱导透明现象的作用并总结归纳,将为基于磷烯等离激元的光开关、光电探

测器、传感器等现实器件应用提供重要的参考。

1 方法及模型

本文以磷烯为材料,针对两种 π 形结构模型进行分析讨论。图1为磷烯结构示意图,磷烯具有面内各向异性,图1(c-d)分别展示了armchair、zigzag两种晶格方向,以下简称“X方向、Y方向”。

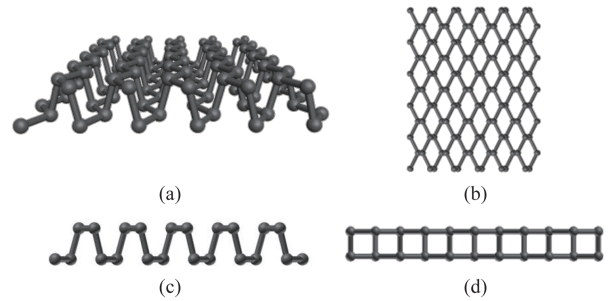


图1 磷烯结构示意图 (a)3D磷烯结构,(b) X - Y 平面2D磷烯结构,(c)armchair方向,(d)zigzag方向

Fig. 1 Schematic diagram of phosphorene structure (a) 3D phosphorene structure, (b) X - Y plane 2D phosphorene structure, (c) armchair direction, (d) zigzag direction

图2为两种模型示意图及参数。使用时域有限差分法(Finite difference time domain method)进行模拟仿真计算,具体模拟在FDTD solutions中进行。结构参数:图2两种模型中的各个磷烯纳米条带尺寸均一致,其中 $l_1 = l_2 = 50$ nm, $w_1 = w_2 = 10$ nm, $d_1 = 10$ nm, $d_2 = 30$ nm, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$,厚度均为10 nm,周期 $p = 220$ nm。软件中 x 和 y 方向设置为周期边界条件, z 方向设置为理想匹配(PML)边界条件,将电磁场全部吸收。在结构上下层放置了频域场监视器和功率监视器来得到反射率(R)和透射率(T)。

在中红外波段,由于光子能量远小于磷烯的带间跃迁阈值,磷烯的各向异性介电函数可通过简单的Drude模型表示^[29]:

$$\epsilon_{ij}(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_{pj}^2}{\omega^2 + i\omega_{ij}\omega} \quad , \quad (1)$$

式(1)中相关物理参量请见表1。

2 结果与讨论

图3(a)所示 X 方向下,BP纳米条结构只出现一个吸收峰,并没有出现透明窗口,而其他三种结构均在两个吸收峰之间出现透明窗口。反向级联 π 型结构比单 π 结构的吸收峰更加陡峭,透明窗口更大;同向级联的 π 型结构吸收峰之间宽度比反向级联的

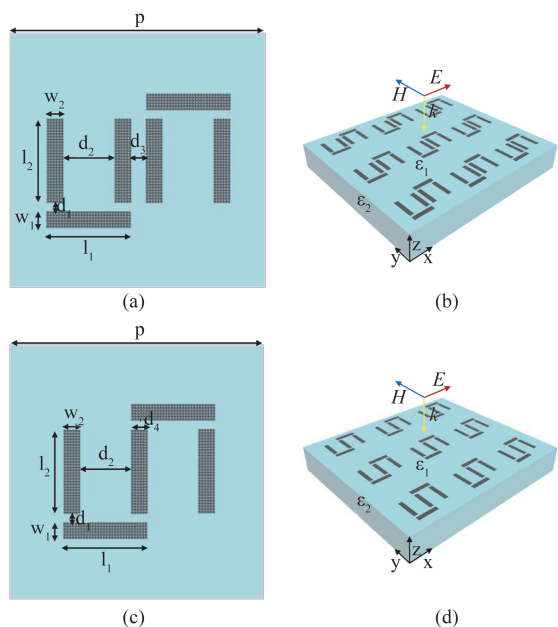


图2 结构示意图 (a) 级联的 π 型结构 2D 图, (b) 3D 阵列图, (c) 紧凑的 π 型结构 2D 图, (d) 3D 图

Fig. 2 Schematic diagram of structure (a) Cascaded π -structure 2D, (b) 3D array, (c) compact π -structure 2D, (d) 3D

π 型结构更为狭窄,透明窗口更窄;电场图 3(c) 和图中可以看出 BP 纳米条被入射光激发,并没有存在相互之间耦合。其他结构由于磷烯纳米带之间的耦合,电场均分布在沿 y 轴方向放置的磷烯纳米带周围,三种结构均在相应的位置形成透明窗口。图 3(b) 所示 Y 方向时情况与 X 方向类似, BP 纳米条结构仍然没有出现透明窗口。相比于单 π 结构,反向级联的 π 型结构吸收峰更陡峭,透明窗口更大;同向级联的 π 型结构吸收峰之间宽度仍然比其他两个结构更

窄,其透明窗口强度比反向 π 型结构略小,单高于单 π 结构。电场图 3(d) 中,电场均分布在沿 y 轴方向放置的磷烯纳米带周围,三者也都形成了透明窗口,实现了近场增强。 X 方向下三种结构形成的透明窗口波长范围为大致在 $5.12 \sim 5.81 \mu\text{m}$; Y 方向下的透明窗口波长范围大致在 $13.41 \sim 15.60 \mu\text{m}$ 。无论同向或者反向,级联的 π 型结构均能够实现近场增强,反向级联的 π 型结构形成的透明窗口略宽于同向级联的 π 型结构。上述三种结构在 Y 方向下,形成的透明窗口宽度(覆盖波长范围)远大于 X 方向时,在透明窗口峰值透射率方面也略高。在半宽度方面,结果如表 2 所示,图 3(a) 中 X 方向下 Dip 1 约为 $5.25 \mu\text{m}$ 的谷, Dip 2 约为 $5.75 \mu\text{m}$; 图 3(b) 中 Y 方向下 Dip 1 约为 $13.50 \mu\text{m}$ 的谷, Dip 2 约为 $15.50 \mu\text{m}$ 的谷。 X 方向下单 π 结构半宽度略大于其他两个结构; Y 方向单 π 结构半宽度略小于其他两个结构。基于以上分析,可以实现不同方向、不同结构对等离元诱导透明现象的调控。

图 4 为反映级联的 π 型结构中两个反对称单 π 之间距离对透明窗口位置的调谐,分别从两个晶格方向来探究。级联的 π 型结构下,通过改变 d_3 实现了对透明窗口位置的调谐。图 4(a) 可以看出 X 方向时随着距离(d_3) 的缩小, $5.20 \sim 5.78 \mu\text{m}$ 的耦合逐渐变弱,透明窗口逐渐变窄, $5.02 \mu\text{m}$ 附近耦合逐渐变强,透明窗口逐渐变宽。图 4(b) 可以发现在 Y 方向下, $13.90 \sim 15.50 \mu\text{m}$ 的透明窗口逐渐变窄, $13.15 \mu\text{m}$ 附近透明窗口逐渐变宽。这是由于电场原本集中分布在内侧磷烯纳米条带,伴随着距离不断减小,相邻的两个单 π 结构之耦合不断增强,电场分布

表 1 物理参量及其来源

Table 1 Physical parameters and their sources

物理参量	计算公式	参考文献
外加栅压	$V_{\text{gate}} = E_F + ent_{\text{ox}}$	30
等离子体共振频率	$\omega_{\text{pj}}^2 = ne^2 / (\epsilon_0 m_j t)$	31-32
等离子体碰撞频率	$\omega_{\text{cj}} = 1/\tau$	29
载流子浓度	$n = (\pi \hbar^2)^{-1} (m_x m_y)^{0.5} k_B \text{Tln} [1 + \exp(E_F / k_B T)]$	11
弛豫时间	$\tau_j = \mu m_j / e$	29
相对介电常数	$\epsilon_{\infty} = 5.76$	29
载流子迁移率	$\mu = 1000 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$	33
有效质量	$m_x = 0.17 m_0, m_y = 1.12 m_0$	11
电子质量	$m_0 = 9.1e - 13 \text{ kg}$	11
费米能级	E_F	30
基本电荷	$e = 1.6e - 19 \text{ C}$	30
介质间隔层厚度	t_{ox}	30

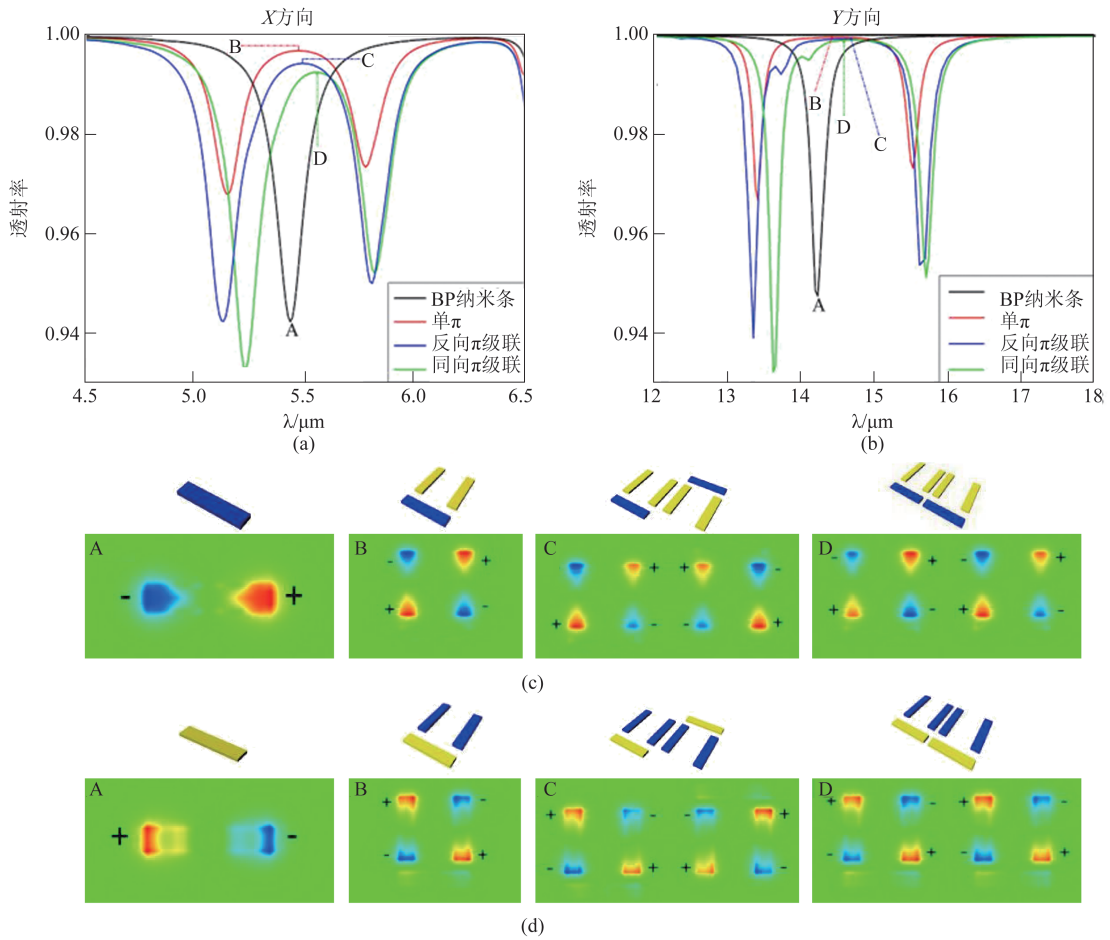


图3 不同结构下的透射谱

注：该系统由x方向偏振平面波照射，其几何参数为： $l_1 = l_2 = 50 \text{ nm}$ ， $w_1 = w_2 = 10 \text{ nm}$ ， $d_1 = 10 \text{ nm}$ ， $d_2 = 30 \text{ nm}$ ，磷烯厚度均为 10 nm ， $p = 220 \text{ nm}$ ， $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$ ；(a)、(b)分别为在X方向和Y方向下的透射谱；(c)表示图3(a)中A($5.42 \mu\text{m}$)、B($5.47 \mu\text{m}$)、C($5.48 \mu\text{m}$)、D($5.56 \mu\text{m}$)的电场分布；(d)表示图3(b)中A($14.20 \mu\text{m}$)、B($14.50 \mu\text{m}$)、C($14.96 \mu\text{m}$)、D($14.56 \mu\text{m}$)的电场分布；电场分布图是在x-y平面下观察到的，单位为V/m。

Fig. 3 Transmission spectra under different structures

Note: The system is illuminated normally by x-polarization plane wave and the geometric parameters are chosen as: $l_1 = l_2 = 50 \text{ nm}$ ， $w_1 = w_2 = 10 \text{ nm}$ ， $d_1 = 10 \text{ nm}$ ， $d_2 = 30 \text{ nm}$ ，the thickness of phosphorene is 10 nm ， $p = 220 \text{ nm}$ ， $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$ ；(a) and (b) are transmission spectra in x direction and y direction respectively；(c) shows the electric field distribution of A($5.42 \mu\text{m}$)，B($5.47 \mu\text{m}$)，C($5.48 \mu\text{m}$) and D($5.56 \mu\text{m}$) in fig. 3(a)；(d) shows the electric field distribution of A($14.20 \mu\text{m}$)，B($14.50 \mu\text{m}$)，C($14.96 \mu\text{m}$) and D($14.56 \mu\text{m}$) in Figure 3(b)；The electric field distribution diagram is observed in the x-y plane, and the unit is V/m.

表2 不同结构下的半宽度

Table 2 Half width under different structures

结构	X方向		Y方向	
	Dip 1	Dip 2	Dip 1	Dip 2
单π结构	$0.189 \mu\text{m}$	$0.165 \mu\text{m}$	$0.135 \mu\text{m}$	$0.219 \mu\text{m}$
反向级联的π型结构	$0.167 \mu\text{m}$	$0.165 \mu\text{m}$	$0.175 \mu\text{m}$	$0.226 \mu\text{m}$
同向级联的π型结构	$0.165 \mu\text{m}$	$0.148 \mu\text{m}$	$0.168 \mu\text{m}$	$0.218 \mu\text{m}$

逐渐向外侧磷烯纳米条带靠拢，从而透明窗口的位置发生了转移，如图4(c-d)所示。

图5为反映在紧凑的π型结构中间磷烯纳米条带的宽度对透明空间位置的调谐，分别两个不同的晶格方向来探究。可以看出随着宽度的改变会引起透明空间位置的变化，对于X方向时，宽度为5 nm时， $5.88 \mu\text{m}$ 附近的透明窗口最大；宽度为10 nm时， $5.51 \mu\text{m}$ 附近的透明窗口更大；宽度为20 nm时， $4.85 \mu\text{m}$ 附近的透明窗口更大。Y方向时，当宽度为5 nm， $15.68 \mu\text{m}$ 附近的透明窗口更大；宽度为10 nm时， $14.52 \mu\text{m}$ 附近的透明窗口更大；宽度为

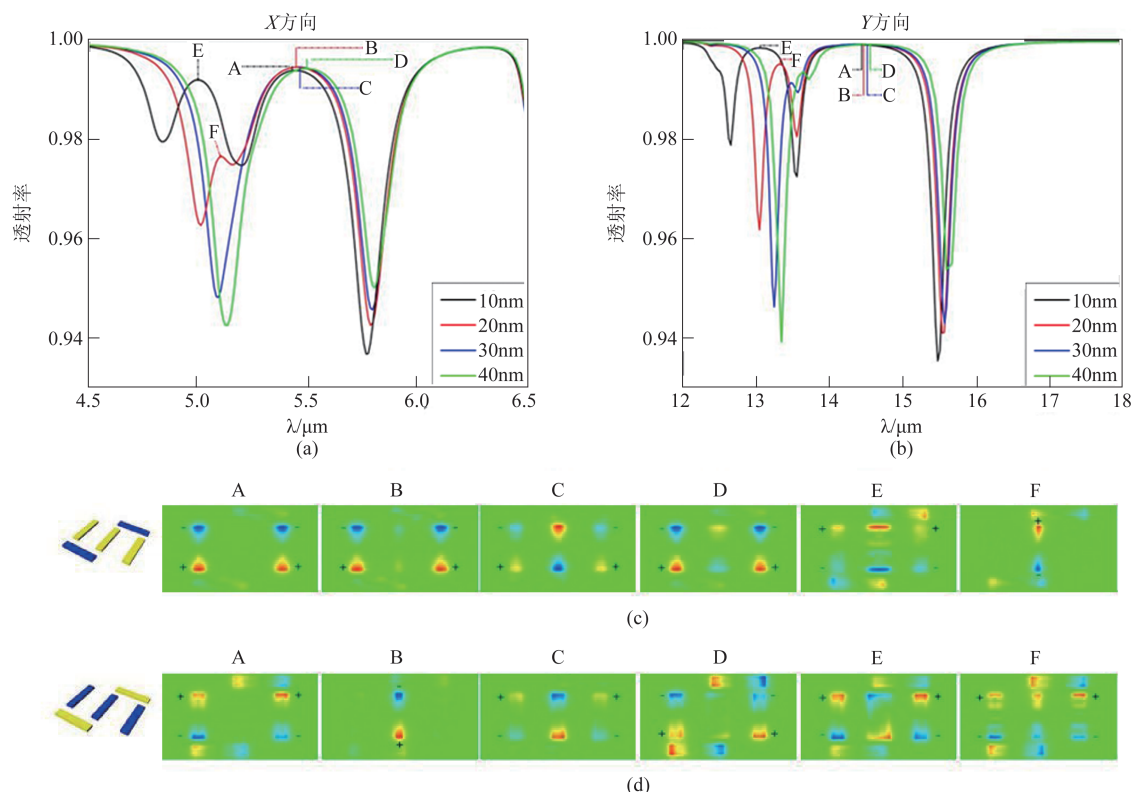


图4 磷烯 π 型级联结构下透射谱

注: (a)、(b)表示 d_3 分别为 10 nm、20 nm、30nm、40 nm 时的透射谱。该系统由 x 方向偏振平面波照射,其几何参数为: $l_1 = l_2 = 50$ nm, $w_1 = w_2 = 10$ nm, $d_1 = 10$ nm, $d_2 = 30$ nm, 磷烯厚度均为 10 nm, $p = 220$ nm, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$; (a)、(b)分别为在 X 方向和 Y 方向下的透射谱; (c)表示图 4(a)中 A(5.44 μm)、B(5.46 μm)、C(5.47 μm)、D(5.48 μm)、E(5.00 μm)、F(5.10 μm) 的电场分布; (d)表示图 4(b)中 A(14.44 μm)、B(14.47 μm)、C(14.51 μm)、D(14.56 μm)、E(13.06 μm)、F(13.33 μm) 的电场分布; 电场分布图是在 x - y 平面下观察到的,单位为 V/m

Fig. 4 Transmission spectra under π -cascade structure of phosphorene,

Note: (a) and (b) indicate the transmission spectra when d_3 is 10 nm, 20 nm, 30nm and 40 nm, respectively. The system is illuminated normally by x -polarization plane wave and the geometric parameters are chosen as: $l_1 = l_2 = 50$ nm, $w_1 = w_2 = 10$ nm, $d_1 = 10$ nm, $d_2 = 30$ nm, the thickness of phosphorene is 10 nm, $p = 220$ nm, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$; (a) and (b) are transmission spectra in x direction and y direction respectively; (c) shows the electric field distribution of A(5.44 μm), B(5.46 μm), C(5.47 μm), D(5.48 μm), E(5.00 μm) and F(5.10 μm) in Fig. 4(a); (d) shows the electric field distribution of A(14.44 μm), B(14.47 μm), C(14.51 μm), D(14.56 μm), E(13.06 μm) and F(13.33 μm) in Fig. 4(b); The electric field distribution diagram is observed in the x - y plane, and the unit is V/m.

20 nm 时, 13.84 μm 与 14.62 μm 附近的透明窗口大。通过改变中间磷烯纳米条带的宽度, 可以在两个晶格方向均有不同波段的透明窗口产生。当磷烯纳米条带宽度为 5 nm 和 20 nm 时, 在 4.50~6.50 μm 与 12~18 μm 波段内均有两个不同位置的透明窗口; 然而当磷烯纳米条带宽度为 0 nm 和 10 nm 时, 在 4.50~6.50 μm 与 12~18 μm 波段内却均只有一个透明窗口, 表明在相同的波段范围内, 中间磷烯纳米条带宽度不同时透明窗口数量也不同。

磷烯费米能级的变化可通过调节栅压及掺杂来实现^[10,24]。图 6 可以看出透明窗口位置随费米能

级的变化趋势(黑色虚线)。如图, 透明窗口随着费米能级的增大而发生蓝移, 其规律大致遵循 $\lambda \propto 1/\sqrt{E_F}$ 。可以根据器件对波段的需求来选择材料的特性, 也可根据器件对材料的特性需求来选择可应用的波段。由于磷烯独特的各向异性使得其应用更加灵活, 由已知数据可得: 该结构下可以在整个中红外波段通过调控得到相应的透明窗口。并且随着数据的累积与验证, 可以尝试预测未知波段的透明窗口所在的位置, 减少了一定的工作量。

垂直入射平面波的电场方向与 x 轴夹角为偏振角, 图 7(a) 中展示 X 方向时, 在 5.25 μm 处波谷的数

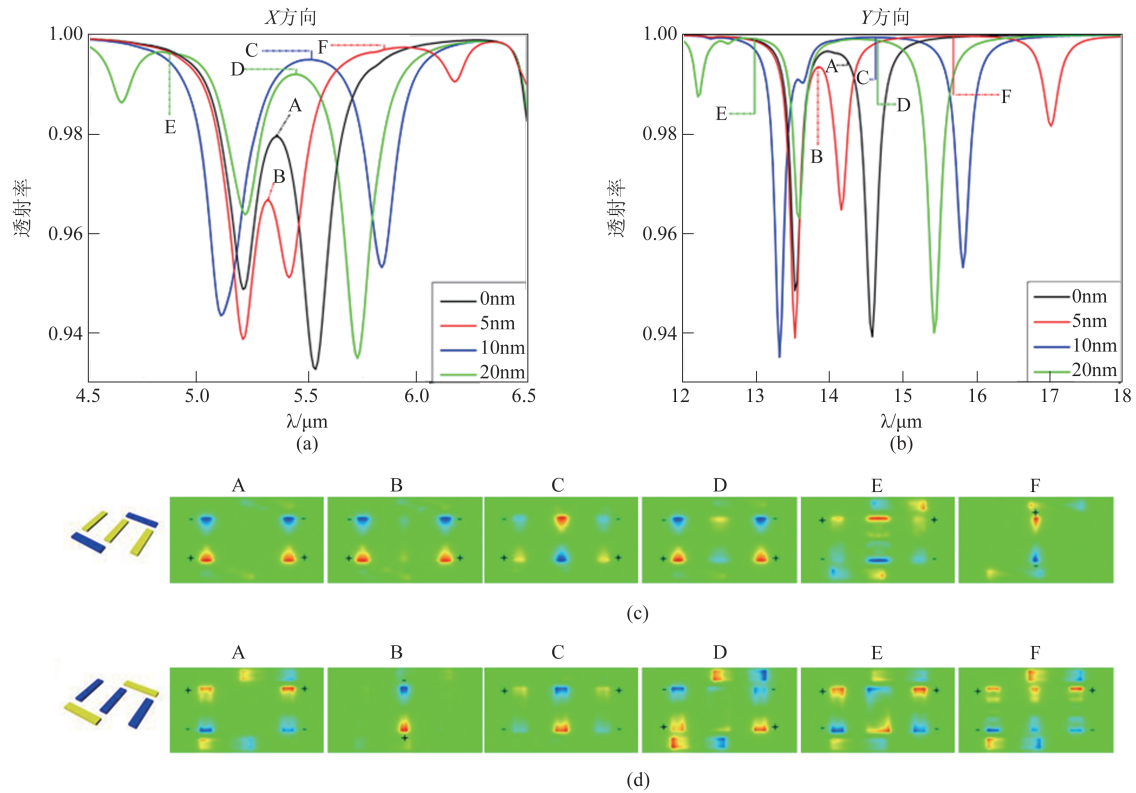


图5 磷烯紧凑 π 型结构下透射谱

注:(a)、(b)表示 d_4 分别为0 nm、5 nm、10 nm、20 nm时的透射谱。该系统由 x 方向偏振平面波照射,其几何参数为: $l_1 = l_2 = 50$ nm, $w_1 = w_2 = 10$ nm, $d_1 = 10$ nm, $d_2 = 30$ nm, 磷烯厚度均为10 nm, $p = 220$ nm, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$; (a)、(b)分别为在 X 方向和 Y 方向下的透射谱;(c)表示图5(a)中A(5.35 μm)、B(5.31 μm)、C(5.44 μm)、D(5.51 μm)、E(4.85 μm)、F(5.88 μm)的电场分布;(d)表示图5(b)中A(14.23 μm)、B(13.84 μm)、C(14.62 μm)、D(14.68 μm)、E(12.96 μm)、F(15.68 μm)的电场分布;电场分布图是在 x - y 平面下观察到的,单位为V/m。

Fig. 5 Transmission spectra under compact π -structure of phosphorene

Note: (a) and (b) indicate the transmission spectra when d_4 is 0 nm, 5 nm, 10 nm and 20 nm, respectively. The system is illuminated normally by x -polarization plane wave and the geometric parameters are chosen as: $l_1 = l_2 = 50$ nm, $w_1 = w_2 = 10$ nm, $d_1 = 10$ nm, $d_2 = 30$ nm, the thickness of phosphorene is 10 nm, $p = 220$ nm, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$; (a) and (b) are transmission spectra in x direction and y direction respectively; (c) shows the electric field distribution of A(5.35 μm), B(5.31 μm), C(5.44 μm), D(5.51 μm), E(4.85 μm) and F(5.88 μm) in fig. 5(a); (d) shows the electric field distribution of A(14.23 μm), B(13.84 μm), C(14.62 μm), D(14.68 μm), E(12.96 μm) and F(15.68 μm) in Figure 5(b); The electric field distribution diagram is observed in the x - y plane, and the unit is V/m.

值随着偏振角度的增大越来越低,从 A_1 依次降低到 E_1 ;而5.80 μm 处波谷的数值随着偏振角度的增大越来越高,从 A_2 依次升高到 E_2 ,随着偏振角度的增加,透明窗口逐渐消失。图7(b)中展示 Y 方向时,13.62 μm 处波谷的数值随着偏振角度的增大越来越低,从 A_1 依次降低到 E_1 ;而15.85 μm 处波谷的数值随着偏振角度的增大越来越高,从 A_2 依次升高到 E_2 ,透明窗口逐渐消失。以上结果主要归因于沿横向的电场矢量强度减小,进而导致横向排布的纳米条中的偶极子模式逐渐减弱造成。当偏振角为 90° 时,横向偶极子完全消失,竖直方向的局域表面等

离激元被完全激发。因此,通过控制入射光的偏振角度,可以实现对透明窗口强度的调节。以上结果暗示了此结构可以在光开关等器件中得到很好的应用。

3 结论

本文对磷烯的两种 π 型组合结构中的等离激元诱导透明现象进行探究,使得基于磷烯各向异性的等离激元诱导透明得到了显著提升。通过改变两种结构的参数,可以对透明行为实现在不同波长的灵活调谐。此外,通过改变磷烯的费米能级,透明

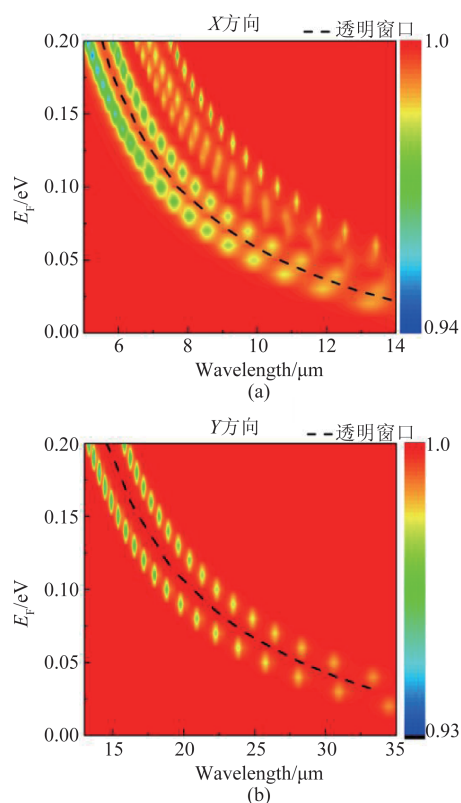


图6 磷烯紧凑 π 型结构下费米能级与透明窗口位置的关系 (a)X方向, (b)Y方向

Fig. 6 Relationship between Fermi level and the position of transparent window under compact compact π -structure of phosphorene (a) the X direction, (b) the Y direction

窗口表现出优异的宽波段可调谐性,其中,分别可以在X方向和Y方向进行5~12 μm 、15~30 μm 的超宽动态控制。相比石墨烯和金属,磷烯能更好地实现中、远红外波段的宽范围、低损耗、强色散的可调谐透明。相比单 π 结构,本文中所列举的结构能更好地实现近场增强功能以及透明窗口数量的调谐。

References

- [1] Kocharovskaya O A, Khanin Y I. Coherent amplification of an ultrashort pulse in a three-level medium without a population inversion[J]. *JETP Letters*, 1988, **48**(11): 630-640.
- [2] Harris S E. Lasers without inversion: interference of lifetime-broadened resonances [J], *Physical Review Letters*, 1989, **62**(9): 1033-1036.
- [3] Hau L V, Harris S E, Utton Z D, et al. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold Atomic gas[J]. *Nature*, 1999, **397**(6720): 594-598.
- [4] Zhang Y, Brown A W, Xiao M. Opening four-wave mixing and six-wave mixing channels via dual electromagnetically induced transparency windows[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **99**(12): 123603.

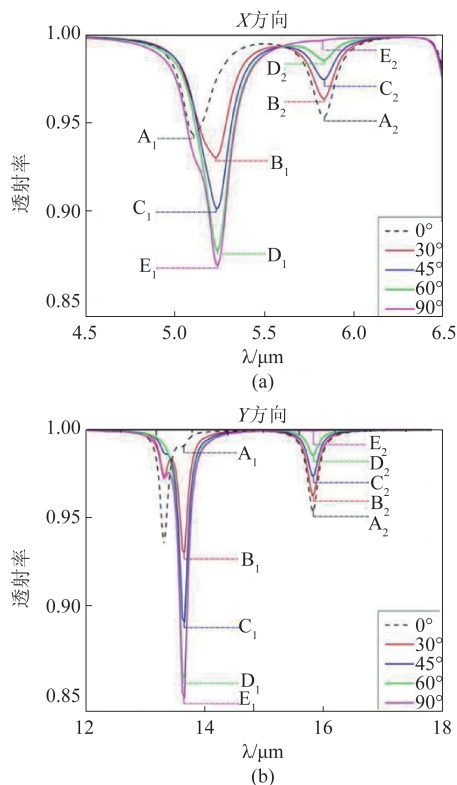


图7 磷烯紧凑 π 型结构下不同偏振角入射光与透射率的关系 (a)X方向, (b)Y方向

Fig. 7 Relationship between incident light with different polarization angles and transmission under compact π -structure of phosphorene (a) is in the X direction, (b) is in the Y direction

- [5] Harris S E, Field J E, Imamoğlu A. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency [J]. *Physical Review Letters*, 1990, **64**(10): 1107-1110.
- [6] ZHU Lei, WU Qun, MENG Fan-Yi, et al. *Electromagnetically induced transparency metamaterial — theory, design and application* [M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House(朱磊, 吴群, 孟繁义, 等。电磁感应透明超介质—理论、设计及应用), 北京: 清华大学出版社, 2019: 1-174.
- [7] Mingaleev S F, Miroshnichenko A E, Kivshar Y S. Coupled-resonator-induced Reflection in Photoniccrystal Waveguide Structures[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(15): 11647-11659.
- [8] Maleki L, Matsko A B, Savchenkov A A, et al. Tunable delay line with interacting whispering-gallery-mode resonators[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(6): 626-628.
- [9] Zhang J, Xiao S, Jeppesen C, et al. Electromagnetically induced transparency in metamaterials at near-infrared frequency[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(16): 17187-17192.
- [10] Li L, Yu Y, Ye G J, et al. Black phosphorus field-effect transistors [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, **9**(5): 372-377.
- [11] Qiao J, Kong X, Hu Z X, et al. High-mobility transport anisotropy and linear dichroism in few-layer black phosphorus[J]. *Nature Communications*, 2014, **5**: 4475.

- [12] Peng X, Wei Q, Copple A. Strain-engineered direct-indirect band gap transition and its mechanism in two-dimensional phosphorene[J]. *Physical Review B*, 2014, **90**(8): 085402.
- [13] Wang X, Jones A M, Seyler K L, *et al.* Highly anisotropic and robust excitons in monolayer black phosphorus[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, **10**(6): 517-521.
- [14] Mu H, Lin S, Wang Z, *et al.* Black phosphorus - polymer composites for pulsed lasers[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, **3**(10): 1447-1453.
- [15] Abbas A N, Liu B, Chen L, *et al.* Black phosphorus gas sensors[J]. *ACS Nano*, 2015, **9**(5): 5618 - 5624.
- [16] Zhang M, Wu Q, Zhang F, *et al.* 2D black phosphorus saturable absorbers for ultrafast photonics [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, **7**(1): 1800224.
- [17] Youngblood N, Chen C, Koester S J, *et al.* Waveguide-integrated black phosphorus photodetector with high responsivity and low dark current [J]. *Nature Photonics*, 2015, **9**(4): 247-252.
- [18] Jiang B, Zou X, Su J, *et al.* Impact of thickness on contact issues for pinning effect in black phosphorus field-effect transistors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, **28**(26): 1801398.
- [19] Zhao G, Wang T, Shao Y, *et al.* A novel mild phase-transition to prepare black phosphorus nanosheets with excellent energy applications [J]. *Small*, 2017, **13** (7) : 1602243.
- [20] Ge X, Xia Z, Guo S. Recent advances on black phosphorus for biomedicine and biosensing [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, **29**(29): 1900318.
- [21] Çetin A E, Artar A, Turkmen M, *et al.* Plasmon induced transparency in cascaded π -shaped metamaterials[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(23): 22607-22618.
- [22] Shi X, Han D, Dai Y, *et al.* Plasmonic analog of electromagnetically induced transparency in nanostructure graphene[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(23): 28438-28443 .
- [23] Zhang S, Genov D A, Wang Y, *et al.* Plasmon-induced transparency in metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2008, **101**(4): 047401.
- [24] Niu Y Y, Wang J C, Hu Z D, *et al.* Tunable plasmon-induced transparency with graphene-based t-shaped array metasurfaces [J]. *Optics Communications*, 2018, **416**: 77-83.
- [25] Han L, Wang L, Xing H Z. Anisotropic plasmon induced transparency in black phosphorus nanostrip trimer[J]. *Optical Materials Express*, 2019, **9**(2): 352-361.
- [26] Liu C, Li H J, Xu H, *et al.* Plasmonic biosensor based on excellently absorbable adjustable plasmon-induced transparency in black phosphorus and graphene metamaterials [J]. *New Journal of Physics*, 2020, **22**(7): 073049.
- [27] Liu C, Li H J, Xu H, *et al.* Tunable plasmon-induced transparency absorbers based on few-layer black phosphorus ribbon metamaterials[J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 2019, **36**(11): 3060-3065.
- [28] Shi Z, Ren X H, Qiao H, *et al.* Recent insights into the robustness of two-dimensional black phosphorus in optoelectronic applications [J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology, C: Photochemistry Reviews*, 2020, **43**: 1389-5567.
- [29] Maier S. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*[M]. US: Springer, 2007: 1-223.
- [30] Lin C, Grassi R, Low T. Multilayer black phosphorus as a versatile mid-infrared electro-optic material [J]. *Nano Letters*, 2016, **16**(3): 1683-1689.
- [31] Low T, Roldán R, Wang H, *et al.* Plasmons and screening in monolayer and multilayer black phosphorus [J]. *Physical Review Letters*, 2014, **113**(10): 106802.
- [32] Berger L I. *Semiconductor Materials*[M]. US: CRC Press, 1996:1-496.