

黑磷纳米盘-层等离激元系统中的各向异性 可调多阶强耦合

韩利, 邢怀中*

(东华大学 光电信息科学与工程系, 上海 201620)

摘要: 黑磷支持各向异性的表面等离激元, 可用于设计具备更多功能的原理性器件。用时域有限差分法数值模拟了中红外到远红外波段基于黑磷的层-盘-层系统中不同等离激元模式之间的杂交行为。通过动态调节黑磷中的载流子浓度, 可以实现两个晶格方向上强耦合现象的产生与控制。对不同模式间的耦合进行分析并计算, 得到吸收光谱中的拉比分裂能最高可达 42.9 meV。此外, 还计算了偏振角度对各向异性强耦合的影响, 其最高可以实现 6 个吸收频带。该模型可为构建未来在中远红外波段工作的基于二维材料紧凑型各向异性等离激元器件提供基础。

关键词: 光学; 表面等离激元; 时域有限差分法; 黑磷

中图分类号: O4 文献标识码: A

Anisotropic tunable multi-order strong coupling in black phosphorous nanodisk-sheet plasmonic system

HAN Li, XING Huai-Zhong*

(Department of Optoelectronic Information Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Black phosphorus supports anisotropic surface plasmons, which can be used to design principle devices with more functions. The hybridization behavior of different plasmon modes in the sheet-disk-sheet system based on black phosphorus in the mid-infrared to far-infrared waveband is numerically simulated by the finite-difference time-domain method. By dynamically adjusting the carrier concentration in the black phosphorus, the generation and control of the strong coupling phenomenon in the two lattice directions can be realized. Analyzing and calculating the coupling between different modes, the Rabi splitting energy in the absorption spectrum can be as high as 42.9 meV. In addition, the influence of the polarization angle on the strong anisotropic coupling is also calculated, which can achieve up to 6 absorption bands. The proposed model provides a basis for the construction of compact anisotropic plasmonic devices based on two-dimensional materials that will work in the mid-to-far infrared bands in the future.

Key words: optics, surface plasmon, finite-difference time-domain method, black phosphorus

PACS:

引言

自 2004 年石墨烯被英国曼彻斯特大学的 Andre Geim 和 Konstantin Novoselov 制备成功开始^[1], 二维材料由于具有许多卓越的物理性质而引起了众

多科研人员的广泛研究, 包括过渡金属硫化物 (Transition Metal Dichalcogenides, TMDCs)、黑磷 (Black Phosphorus, BP) 和过渡金属碳化物 (Transition Metal Carbides, MXenes) 等在内的多种二维材料被逐渐发现。在目前追求器件的微型化、集成化

收稿日期: 2021-09-22, 修回日期: 2022-03-08

Received date: 2021-09-22, Revised date: 2022-03-08

基金项目: 中央高校基础研究经费(2232022A-11), 上海市自然科学基金(21ZR1402200), 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)

Foundation items: Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2232022A-11), the Natural Science Foundation of Shanghai (21ZR1402200), the Fundamental Research Funds for the Central Universities and Graduate Student Innovation Fund of Donghua University (CUSF-DH-D-2020093)

作者简介 (Biography): 韩利 (1993-), 男, 山东济南人, 博士研究生, 主要研究二维材料的光电特性。E-mail: 2161505@mail.dhu.edu.cn

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

和多功能化的目标下,二维材料成为了替代传统材料的极佳候选者,其在光电信息、催化、电池和生物医学等领域具有极大的应用潜力^[2-4]。

近几年,在二维材料中发现了多种偶极子型极化子的激发,它们能够将能量局域在亚波长范围内从而显著增强光与物质的相互作用^[5-6]。其中,被研究最多的是石墨烯中的表面等离激元,其具有强的场束缚能力和低的传播损耗。此外,石墨烯的费米能级可通过施加栅压或掺杂进行灵活调控,这将彻底改变传统金属等离激元的不可操纵性。前所未有的特性使石墨烯能够实现具备新颖光学功能和优异性能的光电器件。目前为止,利用石墨烯等离激元所设计的器件覆盖了光电探测器^[7-8]、吸收器^[9]、超透镜^[10-11]、传感器^[12]等多个方面。然而,石墨烯零带隙的特点限制了其在逻辑器件等方面的有效应用。2014年,二维黑磷制备成功^[13]。与石墨烯相比,黑磷具有褶皱的六边形结构、层数相关的带隙(0.3~2 eV)和面内高度的各向异性^[14],这些性质为可调谐光电器件的设计和制造提供了更多的选择性。最近,关于黑磷等离激元的研究引起了广泛关注。2014年,Low等人^[15]理论证明了单层和多层黑磷中均存在各向异性的等离激元模式。2016年,Liu等人^[16]数值仿真了单层黑磷纳米带中的局域表面等离激元共振,吸收谱具有强的偏振相关性。2017年,Ni等人^[17]研究了黑磷纳米方阵从红外到太赫兹波段内的层数和偏振依赖性。2018年,Qing等人^[18]提出了一个黑磷-介质-金属光栅混合系统来研究黑磷表面等离激元和磁等离激元在远红外频率下的强耦合。Nong等人^[19]理论研究了石墨烯表面等离激元与各向异性黑磷局域表面等离激元在强耦合状态下的杂化。2019年,Cai等人^[20]提出了一种结合石墨烯-黑磷的三明治结构的吸收器,表现出好的宽带响应和强各向异性。

本文提出了一种基于黑磷的层-盘-层系统,用于研究多个表面等离激元模式之间的耦合现象。使用基于时域有限差分法的软件FDTD solutions进行结构的建模与计算。连续整层黑磷与黑磷纳米盘中不同的等离激元模式之间产生强耦合相互作用,并在吸收光谱上体现为拉比分裂。黑磷中载流子浓度的变化对不同模式之间的耦合与解耦都起到关键作用,且可以改变对能量的局域位置,从而实现不同应用下的光谱定制。此外,通过改变入射平面波的偏振角度,可以在中远红外波段的多

频段光吸收。所设计的结构可用于构建基于二维材料表面等离激元的光子学与光电子学器件,包括光电探测器、传感器、吸收器等。

1 方法及模型

本文所仿真的结构如图1(a)所示。从图1(b)的剖面图可以看到,黑磷分为三层,连续整层黑磷分别置于上部和下部,中部为黑磷圆盘阵列,上部黑磷位于介质与空气交界面,中下部黑磷被折射率为1.7的无色散介质(如SiO₂)包围,平面波垂直照射在结构上。结构参数:纳米盘阵列的周期 $P = 200$ nm,半径 $r = 50$ nm,不同黑磷层之间的间距 $d_1 = d_2 = 40$ nm。为更好的研究所提出结构中各个等离激元模式之间的耦合,使用基于时域有限差分法(Finite Difference Time Domain method, FDTD)的商业软件FDTD solutions进行了模拟仿真计算。软件中横向和纵向均设置为周期性边界,竖直方向采用理想匹配层(PML),层数为12,以防止边界反射对结果产生影响。在结构的上部和下部(离开结构大于一个波长)位置放置了频域场和功率监视器,用于得到透射率(T)及反射率(R)。通过一个简单的公式 $A = 1 - R - T$ 可最终得到结构的吸收。实际单层黑磷的厚度约为0.6 nm^[21],这远远小于我们所考虑的波长,因此,在仿真中采用0厚度的二维电导率模型,其被精度0.25 nm、厚度1nm的细化网格所包围,外部采用自适应网格。

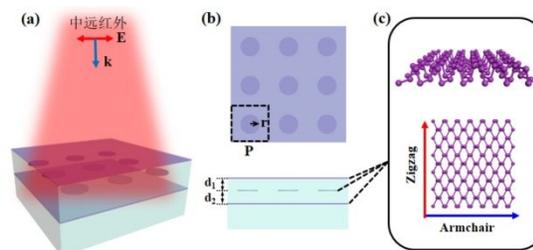


图1 黑磷等离激元强耦合系统的示意图注:(a)黑磷层-盘-层分布的模型;(b)结构的俯视图与侧视图;(c)黑磷结构图及其晶格方向

Fig. 1 The schematic diagram of black phosphorus plasmon strong coupling system: (a) layer-disk-layer distribution of black phosphorus plasmon coupling model, (b) top and side views of the structure, (c) black phosphorus structure and its two lattice directions

在中红外至太赫兹波段,光子能量较小,黑磷价带中的电子无法实现带间跃迁,此时带内跃迁占据主导地位,因此黑磷的光学性质可以用Drude模型来描述。电导率可以写为^[16]:

$$\sigma_{jj} = i \frac{ne^2}{m_j(\omega + i\eta/\hbar)} \quad , \quad (1)$$

其中, $j = x, y$ 代表了黑磷两个晶格方向, x 代表 Armchair, y 代表 Zigzag; n 为黑磷中载流子的浓度; $e = 1.6022 \times 10^{-19}$ C 为电子电荷量; m_j 为沿两个方向的载流子有效质量; η 代表弛豫率; $\hbar = 1.0546 \times 10^{-34}$ J·s 为约化普朗克常数。沿两个方向的有效质量表示为^[15, 22]:

$$m_x = \frac{\hbar^2}{\frac{2\gamma^2}{E_g} + \eta_c}, \quad m_y = \frac{\hbar^2}{2\nu_c} \quad , \quad (2)$$

对于单原子层的黑磷, 式(2)中的各个符号取值为 $\gamma = 4a/\pi$ eVm (a/π 为布里渊区宽度), 带隙 $E_g = 2$ eV, $\eta_c = \hbar^2/0.4m_0$, $\nu_c = \hbar^2/1.4m_0$, $m_0 = 9.1094 \times 10^{-31}$ kg 为静止电子质量。本文的模拟中, 弛豫率 $\eta = 0.01$ eV。

2 结果与讨论

首先, 模拟了如图2(a)所示被基底所包围的周期性黑磷纳米盘阵列中的各向异性黑磷局域表面等离子激元 (Black Phosphorus Localized Surface Plasmons, BPLSP), 相关参数已在第一部分给出。图2(b)中得到了黑磷载流子浓度 $n = 2.0 \times 10^{14}$ cm⁻²、偏振分别沿 x 和 y 方向的吸收曲线。对于 x 方向, 共振频率在 43.67 THz, 吸收率为 0.28; 而对于 y 方向, 共振频率明显红移, 处于 28.16 THz, 吸收率为 0.16。共振频率出现这一差别的原因主要是因为黑磷沿 y 方向的载流子有效质量大于 x 方向^[13]。此外, 根据耦合模理论, 吸收率可由以下公式描述^[23]:

$$A = \frac{4\delta\gamma}{(\omega - \omega_0)^2 + (\delta + \gamma)^2} \quad , \quad (3)$$

其中 ω_0 为共振频率, δ 和 γ 分别代表固有损耗和泄露辐射率。依据这个公式所拟合的结果与仿真结果基本吻合。图2(c)展示了偏振沿两个方向时吸收峰处的电场分布。如图所示, 电场强烈局域在黑磷纳米盘边缘, 电荷呈现典型的对偶极子分布。基于此, 通过将黑磷的载流子浓度 n 从 0.5×10^{14} cm⁻² 变化到 2.0×10^{14} cm⁻², 分别得到沿 x 和 y 方向的吸收谱图, 如图2(d)和2(e)所示。随着载流子浓度升高, 沿 x 方向的 BPLSP 共振频率由 21.90 THz 蓝移至 43.67 THz, 沿 y 方向的 BPLSP 共振频率由 14.09 THz 移至 28.16 THz。由文献[19]可知, 共振频率随载流子浓度的变化遵循 $f_{\text{res}} \propto n^{1/2}$, 其拟合曲线与计算所得趋势吻合。图2(g-h)为沿两个晶格方向不同载流子浓

度下电导率的实部与虚部, 实部和虚部的值随着浓度的增大而增大, 这为在不同栅压下以非接触方式调节黑磷中的等离激元共振提供了一种有效的方法。最后, 仿真了不同偏振角度下结构的各向异性吸收谱。随着偏振角度 θ 从 0° 逐渐增大, 沿 x 和 y 方向的共振可以被同时激发, 出现两个峰, 然而吸收值随电场分量大小而变化。

接下来, 将连续整层黑磷置于基底表面, 组成层-盘上下双层结构。保持黑磷纳米盘的载流子为 2.0×10^{14} cm⁻² 不变, 将连续层黑磷的载流子浓度由 0.5×10^{14} cm⁻² 逐渐变化到 1.5×10^{14} cm⁻², 分别得到沿两个方向的吸收谱, 如图3(a)和3(b)所示。可以看到, 吸收谱出现了明显的分裂, 这主要是由上部连续黑磷层中的黑磷表面等离激元 (Black Phosphorus Surface Plasmons, BPSP) 与纳米盘中的 BPLSP 之间的强耦合产生。对于整层黑磷中的 BPSP, 由于其波矢大于入射光波矢, 所以无法直接被激发。然而, 当黑磷层下部存在周期性纳米盘时, 其衍射光栅效应提供了波矢补偿, BPSP 被激发。对于一个二维黑磷系统, 等离激元波矢可写为^[15]:

$$q_j(\omega) = \varepsilon_0(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \frac{i\omega}{\sigma_{jj}(\omega)} \quad , \quad (4)$$

其中 ε_1 和 ε_2 分别为黑磷结构上部和下部的介电常数。将公式(1)电导率代入得到:

$$q_j(\omega) = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)m_j\omega^2}{ne^2} \left(1 + \frac{\eta}{\hbar\omega}i\right) \quad , \quad (5)$$

对于微纳结构或光栅激发表面等离激元, 可以用光栅匹配方程表示[24]:

$$q_{\text{Rej}}(\omega) = \frac{\omega}{c} \sin\alpha + \frac{2\pi}{P} \quad , \quad (6)$$

$q_{\text{Re}}(\omega)$ 为 BPSP 的实部, α 为入射角度, 本论文中保持垂直入射, 取值为 0。基于此, 得到 BPSP 和 BPLSP 的共振频率为:

$$f_j = \sqrt{\frac{ne^2}{2\pi\varepsilon_0(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)m_jP}} \quad , \quad (7)$$

需要注意的是, 连续黑磷层与纳米盘上部的介电常数是不同的。对于两个等离激元模式之间的杂交, 可以用耦合谐振子模型来进行解释[19, 25]。基于此, 混合模式的色散关系可表示为:

$$f_{j\pm} = \frac{f_{\text{BPSP}j} + f_{\text{BPLSP}j}}{2} \pm \frac{\sqrt{(f_{\text{BPSP}j} - f_{\text{BPLSP}j})^2 + \Omega_j^2}}{2} \quad , \quad (8)$$

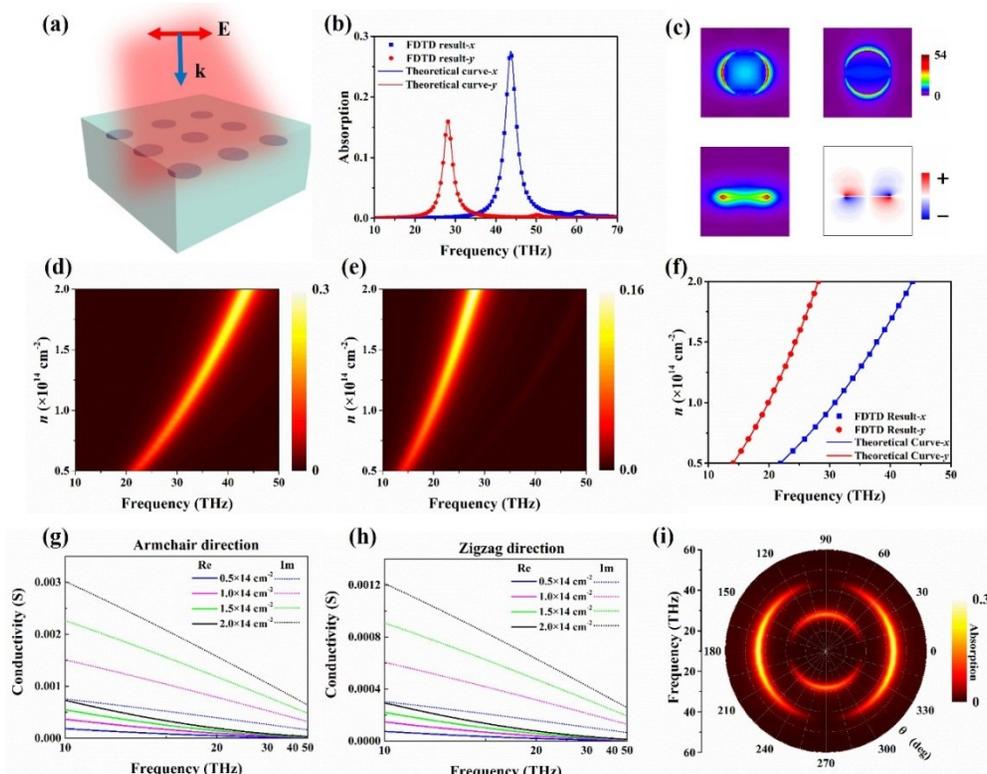


图2 黑磷圆盘阵列的吸收特性注: (a)圆盘阵列结构示意图,平面波垂直照射在结构上, (b)偏振 0° (沿 Armchair方向)和 90° (Zigzag方向)时的吸收曲线, (c)相应吸收峰处的电场分布, (d)、(e)为偏振角 0° 和 90° 时不同载流子浓度下的吸收谱图, (f)吸收峰随载流子浓度变化的拟合曲线, (g)、(h)沿黑磷两个晶格方向的电导率实部与虚部, (i)不同偏振角下黑磷圆盘的各向异性吸收谱

Fig. 2 Absorption of black phosphorous disk array: (a) The schematic diagram of the structure of the disk array, the plane wave is irradiated vertically on the structure, (b) the absorption curve when the polarization is 0° (along the Armchair direction) and 90° (Zigzag direction), (c) the electric field distribution at the corresponding absorption peak, (d-e) the absorption spectra at different carrier concentrations when the polarization angle is 0° and 90° , (f) fitting curve of absorption peak changing with carrier concentration, (g-h) the real and imaginary parts of the conductivity along the two lattice directions of the black phosphorus, (i) the anisotropic absorption spectrum of the black phosphorus disk under different polarization angles

Ω 为耦合频率,代表了两个模式间的耦合强度。基于以上公式,在图3(c)和3(d)中作出了BPSP和BPLSP两个模式强耦合产生杂交模式的分析图。星形散点为各个吸收峰的值,黑色线表示根据公式(8)得到的拟合曲线,红线为连续黑磷层中BPSP未耦合时共振峰随 n 的变化,绿线为未耦合时黑磷纳米盘中的BPLSP共振频率,由于其 n 未改变,所以一直保持在 43.67 THz (x 方向)和 28.16 THz (y 方向)。当两个模式耦合时,沿两个方向的吸收均出现反交叉,强度分别为 $\Omega_x = 10.1\text{ THz}$ 和 $\Omega_y = 5.75\text{ THz}$ 。这种反交叉现象称之为拉比分裂,相应的拉比分裂能分别为 $2\pi\hbar\Omega_x = 41.8\text{ meV}$ 和 $2\pi\hbar\Omega_y = 23.8\text{ meV}$ 。

为更具体地对两个模式之间的耦合行为进行分析,分别提取了载流子浓度 n 为 $0.6\times 10^{14}\text{ cm}^{-2}$ 、

$0.8\times 10^{14}\text{ cm}^{-2}$ 和 $1.0\times 10^{14}\text{ cm}^{-2}$ 时的吸收曲线,如图4(a)所示。随着载流浓度逐渐增大,两个吸收峰整体蓝移,左侧峰值变小,而右侧峰值增大。结合图4(b)中的电场分布,当 $n = 0.6\times 10^{14}\text{ cm}^{-2}$ 时,左侧峰由连续黑磷层中的BPSP主导,而右侧峰由纳米盘中的BPLSP决定; $n = 0.8\times 10^{14}\text{ cm}^{-2}$ 时,左侧和右侧峰由两个模式共同参与,电场分布呈现“半BPSP”和“半BPLSP”模式;最后,当 $n = 1.0\times 10^{14}\text{ cm}^{-2}$ 时,电场分布恰好与 $n = 0.6\times 10^{14}\text{ cm}^{-2}$ 时相反,左侧峰由BPLSP产生,而右侧峰由BPSP所产生。

基于黑磷的各向异性,将黑磷层和纳米盘的载流子浓度设置为 $0.8\times 10^{14}\text{ cm}^{-2}$ 和 $2.0\times 10^{14}\text{ cm}^{-2}$,通过改变平面波的偏振角度,得到了图5(a)所示的各向异性吸收谱。如图所示,随着偏振角从 0° 变化为 90° ,由于电场分量的减小,沿 x 方向的双频吸收峰

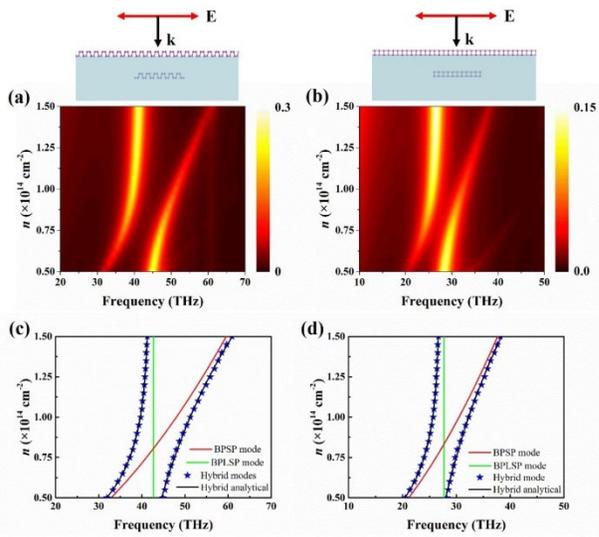


图3 连续整层黑磷中的BPSP与黑磷纳米盘中BPLSP的杂交注:(a)、(b)为连续黑磷层的载流子浓度由 $0.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 变化至 $2.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 所得到的吸收谱,偏振分别沿两个黑磷晶格方向,(c)、(d)为上面对应杂交模式仿真结果及其拟合曲线,此外,绿线表示单独的BPLSP模式,红线表示单独的BPSP模式

Fig. 3 Hybridization of BPSP in continuous black phosphorus layer with BPLSP in black phosphorus nanodisks: (a) and (b) are the absorption spectra obtained by changing the carrier concentration of the continuous black phosphorus layer from $0.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ to $2.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, and the polarization is along the two lattice directions of black phosphorus, (c) and (d) are the simulation results of the above corresponding hybridization mode and its fitting curve, in addition, the green line represents the individual BPLSP mode, and the red line represents the individual BPSP mode

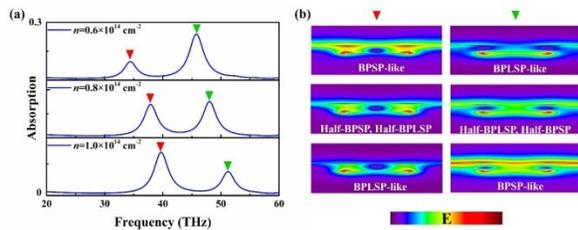


图4 不同载流子浓度下的吸收曲线及峰值处电场分布:(a)载流子浓度分别为 $0.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 、 $0.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 和 $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时的吸收曲线,(b)三种情况下两个吸收峰处的电场分布

Fig. 4 Absorption curve under different carrier concentration and the electric field distribution at the peak: (a) absorption curves when the carrier concentration is $0.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, $0.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ and $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, respectively, (b) electric field distribution at the two absorption peaks in the three cases

值变得越来越大,而沿 y 方向的双频峰值逐渐增大。在图5(b)中,提取了偏振角 $\theta = 45^\circ$ 时的吸收曲线,此时 24.45 THz 、 30.20 THz 、 37.92 THz 和 48.02

THz处的四频带吸收峰可被清楚观察到。较高频率的两个峰为沿Armchair方向两个模式的强耦合产生,较低频率的两个峰为沿Zigzag方向的强耦合所导致。通过调节偏振角的大小,可以实现吸收频带数量及大小的控制。

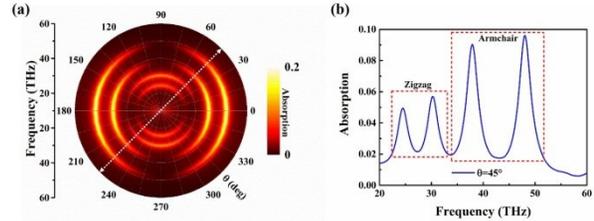


图5 不同偏振角下层-盘系统的各向异性吸收:(a)连续黑磷层和黑磷纳米盘的载流子浓度设置为 $0.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 和 $2.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 不变时,改变平面波的偏振角度得到的吸收谱,(b)偏振角为 45° 时的吸收曲线

Fig. 5 Anisotropic absorption of the sheet-disk system with different polarization angles: (a) when the carrier concentration of the continuous black phosphorous layer and the black phosphorous nanodisk is set to $0.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ and $2.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ unchanged, the absorption spectrum obtained by changing the polarization angle of the plane wave, (b) the absorption curve when the polarization angle is 45°

在层-盘系统的基础上,继续在距离黑磷纳米盘 40 nm 的下部再放入一层连续黑磷薄膜,从而构建出纳米层-盘-层的三明治结构。偏振沿两个晶格方向时,保持中部黑磷纳米盘的载流子浓度 $2.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 不变,上部和下部黑磷层的载流子浓度同时从 $0.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 变化至 $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$,得到了如图6(a)和6(b)所示的三频带吸收谱。在上部黑磷层中的BPSP(Upper-layer BPSP)与纳米盘中BPLSP杂交的基础上,将底部黑磷层中的BPLSP(Low-layer BPSP)加入其中,形成黑磷中表面等离子激元的多阶耦合。三个模式可被局域在结构的不同部分,上部和下部模式无法直接相互耦合,但是中部黑磷纳米盘中的BPLSP可与两个模式分别耦合。在吸收谱中,可以看到有三个分支,从左至右分别为低能分支、中间分支和高能分支。在图6(c)和6(d)中作出了混合模式的散点图和三个模式单独存在时的曲线图,随着载流子浓度的增大,Upper-layer BPSP和Low-layer BPSP分别与BPLSP耦合,在单独模式重合的点处呈现出反交叉。对于偏振沿 x 方向时,从左至右两个耦合强度分别是 $\Omega_{x1} = 6.31 \text{ THz}$ 和 $\Omega_{x2} = 10.38 \text{ THz}$;对于 y 方向,耦合强度相对较弱,分别为 $\Omega_{y1} = 3.09 \text{ THz}$ 、 $\Omega_{y2} = 5.75 \text{ THz}$ 。与两个模式间的耦

合类似,通过计算我们得到偏振沿两个晶格方向时 Upper-layer BPS、BPLSP 和 Low-layer BPS 三个模式耦合所导致的拉比分裂能分别为 $2\pi\hbar\Omega_{x1} = 26.1$ meV、 $2\pi\hbar\Omega_{x2} = 42.9$ meV、 $2\pi\hbar\Omega_{y1} = 12.8$ meV 和 $2\pi\hbar\Omega_{y2} = 23.8$ meV。

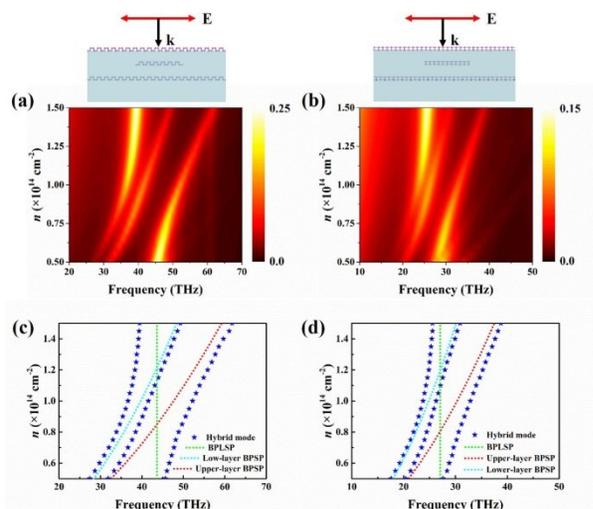


图6 黑磷层-盘-层系统中三模式耦合所得到的吸收谱及其曲线分析:(a)、(b)为偏振沿两个晶格方向时数值仿真得到的多阶吸收谱,其由 Upper-layer BPS、Low-layer BPS、BPLSP 模式间耦合所产生,(c)、(d)为杂交模式吸收峰的位置及各个模式单独存在时的色散关系

Fig. 6 The absorption spectrum and curve analysis of the three-mode coupling in the black phosphorus sheet-disk-sheet hybrid system: (a) and (b) are the multi-order absorption spectra obtained by numerical simulation when the polarization is along the two lattice directions, which are generated by the coupling between Upper-layer BPS, Low-layer BPS, and BPLSP modes, (c) and (d) are the position of the absorption peak of the hybridization mode and the dispersion relationship when each mode exists alone

最后,通过改变偏振角大小,得到了层-盘-层结构的各向异性吸收谱图,如图7(a)所示。上部和下部连续整层黑磷的载流子浓度同时保持在 $0.95 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$,黑磷纳米盘保持在 $2.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 。随着偏振角从 0° 变化到 90° ,沿 x 方向的电场分量逐渐减小导致吸收变弱,而 y 方向的吸收逐渐增强,最终 90° 时吸收达到最大值。此外,提取了偏振角 45° 时的吸收曲线,可以同时观察到 6 个吸收峰。较低能量波段的三个峰为沿 y 方向的三个等离激元模式之间耦合所产生,更高能量的三个峰源于 x 方向相应的模式杂交。基于此,所提出结构实现了六个频带的吸收,最大值分别在 23.33 THz、25.85 THz、32.30 THz、36.09 THz、40.86 THz 和 51.38 THz。与两个

模式之间的耦合类似,通过调节偏振角,可以实现对吸收值大小及吸收带数目的有效控制。

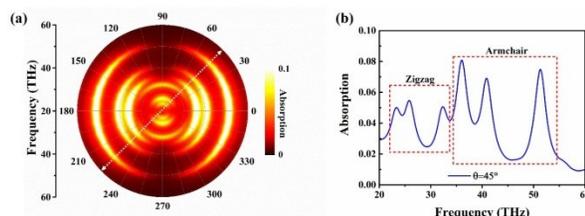


图7 不同偏振角度下黑磷层-盘-层结构的吸收谱:(a)连续黑磷层和黑磷纳米盘的载流子浓度设置为 $0.95 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 和 $2.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 不变时,改变平面波的偏振角度得到的吸收谱,(b)偏振角为 45° 时的吸收曲线

Fig. 7 Relationship between incident light with different polarization angles and transmission under compact π -structure of phosphorene: (a) when the carrier concentration of the continuous black phosphorous layer and the black phosphorous nanodisk is set to $0.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ and $2.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ unchanged, the absorption spectrum obtained by changing the polarization angle of the plane wave, (b) the absorption curve when the polarization angle is 45°

3 结论

本文对黑磷纳米盘阵列、层-盘及层-盘-层结构中的表面等离激元模式及它们之间的强耦合进行了研究。对于纳米盘阵列,得到了明显的各向异性吸收峰,这主要是由于两个方向上 BPLSP 的激发所引起。此外,通过改变黑磷的载流子浓度,可以实现对共振波长的调谐。对于层-盘结构,在 BPS 与 BPLSP 两个模式的强耦合下,吸收峰产生劈裂,产生两个反交叉的吸收频带,沿两个方向的拉比分裂能为 $2\pi\hbar\Omega_x = 41.8$ meV 和 $2\pi\hbar\Omega_y = 23.8$ meV。通过改变偏振角度,可以实现四频带吸收。对于层-盘-层结构,其中支持三种不同的等离激元模式,Upper-layer BPS、BPLSP 和 Low-layer BPS。在这三种模式的强耦合相互作用下,产生三个反交叉的吸收频带。计算了偏振沿两个晶格方向时光谱所表现出来的拉比分裂能,分别为 $2\pi\hbar\Omega_{x1} = 26.1$ meV、 $2\pi\hbar\Omega_{x2} = 42.9$ meV、 $2\pi\hbar\Omega_{y1} = 12.8$ meV、 $2\pi\hbar\Omega_{y2} = 23.8$ meV。通过改变偏振角的大小,最多可实现六频带的吸收,波段覆盖中远红外区域。以上结果表明,随着黑磷载流子浓度的变化,模式间杂化、多频带吸收和能量局域位置均可以实现动态调谐。所提出结构可被用于开发黑磷相关的各向异性有源等离激元器件,例如光电探测器、光开关、传感器等。

References

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films [J]. *Science*, 2004, **306**(5696): 666–669.
- [2] Liu Y, Xu K, Wang S, *et al.* Arbitrarily routed mode-division multiplexed photonic circuits for dense integration [J]. *Nature communications*, 2019, **10**(1): 1–7.
- [3] Deng W, Bao L, Gao H, *et al.* Ocular conjunctival inoculation of SARS-CoV-2 can cause mild COVID-19 in rhesus macaques [J]. *Nature communications*, 2020, **11**(1): 1–7.
- [4] Rohaizad N, Mayorga-Martinez C C, Fojtů M, *et al.* Two-dimensional materials in biomedical, biosensing and sensing applications [J]. *Chemical Society Reviews*, 2021, **50**, 619–657.
- [5] Low T, Chaves A, Caldwell J D, *et al.* Polaritons in layered two-dimensional materials [J]. *Nature materials*, 2017, **16**(2): 182–194.
- [6] Basov D N, Fogler M M, De Abajo F J G. Polaritons in van der Waals materials [J]. *Science*, 2016, **354**(6309).
- [7] Zhang J, Zhu Z, Liu W, *et al.* Towards photodetection with high efficiency and tunable spectral selectivity: graphene plasmonics for light trapping and absorption engineering [J]. *Nanoscale*, 2015, **7**(32): 13530–13536.
- [8] Lundberg M B, Gao Y, Woessner A, *et al.* Thermoelectric detection and imaging of propagating graphene plasmons [J]. *Nature materials*, 2017, **16**(2): 204–207.
- [9] Cai Y, Zhu J, Liu Q H. Tunable enhanced optical absorption of graphene using plasmonic perfect absorbers [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **106**(4): 043105.
- [10] Wang C, Liu W, Li Z, *et al.* Dynamically Tunable Deep Subwavelength High-Order Anomalous Reflection Using Graphene Metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, **6**(3): 1701047.
- [11] Bai X, Tang L, Yao W, *et al.* High efficiency active wavefront manipulation of spin photonics based on a graphene metasurface [J]. *Optics express*, 2019, **27**(16): 22475–22484.
- [12] Verma R, Gupta B D, Jha R. Sensitivity enhancement of a surface plasmon resonance based biomolecules sensor using graphene and silicon layers [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, **160**(1): 623–631.
- [13] Li L, Yu Y, Ye G J, *et al.* Black phosphorus field-effect transistors [J]. *Nature nanotechnology*, 2014, **9**(5): 372–377.
- [14] Wang X, Lan S. Optical properties of black phosphorus [J]. *Advances in Optics and photonics*, 2016, **8**(4): 618–655.
- [15] 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.
- [16] Liu Z, Aydin K. Localized surface plasmons in nanostructured monolayer black phosphorus [J]. *Nano letters*, 2016, **16**(6): 3457–3462.
- [17] Ni X, Wang L, Zhu J, *et al.* Surface plasmons in a nanostructured black phosphorus flake [J]. *Optics letters*, 2017, **42**(13): 2659–2662.
- [18] Qing Y M, Ma H F, Cui T J. Strong coupling between magnetic plasmons and surface plasmons in a black phosphorus-spacer-metallic grating hybrid system [J]. *Optics letters*, 2018, **43**(20): 4985–4988.
- [19] Nong J, Wei W, Wang W, *et al.* Strong coherent coupling between graphene surface plasmons and anisotropic black phosphorus localized surface plasmons [J]. *Optics express*, 2018, **26**(2): 1633–1644.
- [20] Cai Y, Xu K D, Feng N, *et al.* Anisotropic infrared plasmonic broadband absorber based on graphene-black phosphorus multilayers [J]. *Optics express*, 2019, **27**(3): 3101–3112.
- [21] Chen Y, Wang Y, Wang Z, *et al.* Unipolar barrier photodetectors based on van der Waals heterostructures [J]. *Nature Electronics*, 2021, **4**(5): 357–363.
- [22] Rodin A S, Carvalho A, Neto A H C. Strain-induced gap modification in black phosphorus [J]. *Physical review letters*, 2014, **112**(17): 176801.
- [23] Qing Y M, Ma H F, Cui T J. Tailoring anisotropic perfect absorption in monolayer black phosphorus by critical coupling at terahertz frequencies [J]. *Optics express*, 2018, **26**(25): 32442–32450.
- [24] Gao W, Shu J, Qiu C, *et al.* Excitation of plasmonic waves in graphene by guided-mode resonances [J]. *ACS nano*, 2012, **6**(9): 7806–7813.
- [25] Vasa P, Wang W, Pomraenke R, *et al.* Optical Stark effects in J-aggregate-metal hybrid nanostructures exhibiting a strong exciton-surface-plasmon-polariton interaction [J]. *Physical review letters*, 2015, **114**(3): 036802.