

## 基于黑磷的双频带超材料吸收体及其传感特性

郑盛梅, 江孝伟, 江达飞, 王琳

### Dual-band metamaterial absorber based on black phosphorus and its sensing characteristics

引用本文:

郑盛梅, 江孝伟, 江达飞, 王琳. 基于黑磷的双频带超材料吸收体及其传感特性[J]. *激光技术*, 2023, 47(6): 846–853.

ZHENG Shengmei, JIANG Xiaowei, JIANG Dafei, et al. Dual-band metamaterial absorber based on black phosphorus and its sensing characteristics[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(6): 846–853.

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. 光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响

引用本文: 陈强华, 丁锦红, 韩文远, 等. 光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 329–334.

### 2. 基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器

引用本文: 孙哲, 郭子龙, 李虎, 等. 基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 41–45.

### 3. 飞秒激光制备光纤U形微结构应用于折射率传感

引用本文: 宁贵毅, 傅贵, 史萌, 等. 飞秒激光制备光纤U形微结构应用于折射率传感[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 916–920.

### 4. 偏振正交双频DBR腐蚀声发射传感器研究

引用本文: 严雪莹, 曾周末, 封皓. 偏振正交双频DBR腐蚀声发射传感器研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 862–866.

### 5. GaN基微腔传感器悬空隔膜的力电转换的ANSYS研究

引用本文: 朱彦旭, 杜志娟, 刘飞飞, 等. GaN基微腔传感器悬空隔膜的力电转换的ANSYS研究[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 791–795.

文章编号: 1001-3806(2023)06-0846-08

## 基于黑磷的双频带超材料吸收体及其传感特性

郑盛梅, 江孝伟\*, 江达飞, 王琳  
(衢州职业技术学院 信息工程学院, 衢州 324002)

**摘要:** 为了实现红外波段的双频带完美吸收, 采用将不同电子掺杂浓度的单层带状黑磷在同一平面内交错排列的方法, 进行了理论分析和仿真模拟, 得到了此器件在红外波段的吸收光谱和传感性能。结果表明, 此吸收体可以在波长  $2\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$  的红外波段范围内实现双频带的完美吸收(吸收率大于 99.9%), 此高吸收率是由于入射光波与器件满足了临界耦合条件而形成了共振加强; 在共振波长处, 光波被限制在黑磷附近; 此超材料吸收体的双频带特性在其作为传感器使用时具有独特的优势, 可以提高传感器的可靠性和准确性; 吸收波峰的偏移量与覆盖在此器件上的未知物质的折射率基本呈线性关系, 用此器件测得的未知物质的折射率与实际折射率的误差在 1% 以内。该超材料吸收体结构简单, 对制作工艺的尺寸精确度要求不高, 在红外波段的多频带吸收和传感检测方面将会有广泛的应用。

**关键词:** 光谱学; 黑磷; 双频带; 超材料; 完美吸收; 传感

**中图分类号:** TN256 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.06.017

### Dual-band metamaterial absorber based on black phosphorus and its sensing characteristics

ZHENG Shengmei, JIANG Xiaowei, JIANG Dafei, WANG Lin

(College of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou 324002, China)

**Abstract:** In order to realize dual-band perfect absorption in the infrared wavelength range, single-layer black phosphorus ribbons were arranged in parallel with alternating carrier doping concentration. Theoretical analysis and optical simulation were performed to get absorption spectra and sensing characteristics of the device in the infrared wavelength range. The results show the proposed device can achieve dual-band perfect absorption ( $>99.9\%$  absorption efficiency) in the  $2\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$  infrared wavelength range. The high absorption is caused by the critical coupling of incident light to the device, and instructive resonance is formed; the on-resonance light is restricted around black phosphorus; the dual-band absorption characteristic of the metamaterial makes it an ideal sensor with high reliability and accuracy; shift of absorption peaks is almost in a linear relationship with change of refractive index of cladding material. The margin of error between the calculated and actual refractive index is within 1%. The simple structure and reasonable tolerance in dimension deviation make the proposed metamaterial a good candidate for applications such as multiple-band absorption and sensing in the infrared wavelength range.

**Key words:** spectroscopy; black phosphorus; dual-band; metamaterial; perfect absorption; sensing

## 引 言

利用光学原理和光学器件进行物质特性的检测具

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61575008; 61650404); 浙江省自然科学基金资助项目(LQ23F040001); 江西省自然科学基金资助项目(20171BAB202037); 衢州市科技计划资助项目(2022K104); 衢州市指导性科技攻关项目(2021054)

作者简介: 郑盛梅(1981-), 女, 讲师, 现主要从事集成光电器件和 LED 的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: JosephJiangquzhi@126.com

收稿日期: 2022-10-25; 收到修改稿日期: 2022-12-12

有许多优势, 例如非破坏性、灵敏度高、器件尺寸小巧、响应速度快, 以及抗干扰性强等<sup>[1-4]</sup>。要利用光学器件进行材料的检测, 需要光与光学器件发生强烈的相互作用, 例如在某一频段发生完美(接近 100%) 的吸收<sup>[5-6]</sup>。近年来, 由周期性阵列结构组成的一种复合人工材料(超材料) 由于其特殊的光学和电学特性而越来越引起人们的重视<sup>[7-9]</sup>。超材料通常由金属, 电介质, 以及 2 维材料组成, 常见的 2 维材料有石墨烯等。ALAE 等人利用带状结构的石墨烯实现了 THz 频段的高吸收率<sup>[10]</sup>。AKHAVAN 等人展示了基于石墨烯的超材料完美吸收体, 可以在光通信波段(1550 nm 附近) 实现接近 100% 的光吸收, 而且吸收波长可以通过

器件的结构参数来进行调节<sup>[11]</sup>。但由于石墨烯的带隙为零,导致较低的开关比,不能够很好地实现半导体的逻辑开关,从而限制了其在半导体技术以及光电子器件等领域的应用<sup>[12]</sup>。

黑磷(black phosphorus, BP)具有独特的电学和光学特性,例如其是直接带隙半导体,而且带隙宽度可以通过改变层数来调节,面内各向异性,以及较高的载流子密度和迁移率等。自从 2014 年黑磷层状结构从块体黑磷剥离出来后,其被认为是在纳米电子技术领域最具应用前景的一种材料,在薄膜晶体管、光电探测、传感器等领域得到了广泛的应用<sup>[13]</sup>。目前对基于黑磷的超材料吸收体的研究主要是以下几个方向:(a)提高吸收率。TANG 等人设计了一种超材料结构,通过在单层黑磷上放置一个银环,可以实现接近 100% 的吸收率<sup>[14]</sup>;DONG 等人在分布式布拉喇反射器(distributed bragg reflector, DBR)和银(Ag)层之间插入一层黑磷,可以在波长 45  $\mu\text{m}$  左右实现完美吸收,而且吸收波长可以通过入射光的角度以及 DBR 的相关参数进行调节<sup>[15]</sup>;(b)多频带吸收。WANG 等人提出了一种基于黑磷的超材料,将不同平面内正交排布的带状黑磷作为一组,不同的组数可以实现不同的吸收频带<sup>[16]</sup>;DAI 等人将黑磷与全氟树脂交替层叠在一起,可以实现多频带的吸收,从而实现了超高灵敏度的传感性能<sup>[17]</sup>;(c)增大吸收带宽。CAI 等人将石墨烯与黑磷叠在一起,并且插入电介质层内部,形成三明治结构,通过优化三明治的层数以及石墨烯和黑磷的尺寸,可以在较大波长范围内的高吸收率<sup>[18]</sup>;ZHU 等人将黑磷与电介质层交替层叠在一起,当层数达到 5 层,且每一层的黑磷尺寸都优化设计之后,可以在 16  $\mu\text{m}$ ~28  $\mu\text{m}$  的波长范围实现高的吸收率<sup>[19]</sup>;KHALILZADEH 等人也通过黑磷与介质层的交替层叠结构实现了 5.24  $\mu\text{m}$  的吸收带宽<sup>[20]</sup>;(d)吸收波长可调谐。WANG 等人通过调节黑磷的化学势,可以在 THz 频段实现高达 95% 的调制深度<sup>[21]</sup>;XIAO 等人通过改变黑磷的电子掺杂浓度,以及黑磷/电介质层的对数和厚度,可以调谐超吸收体的吸收光谱<sup>[22]</sup>;(e)偏振无关。HE 等人通过将不同方向的黑磷层叠在一起,实现了吸收光谱与入射光的偏振方向无关<sup>[23]</sup>;WU 等人实现了单层黑磷结构的偏振无关的折射率传感器<sup>[24]</sup>。

由以上分析可知,要实现多频带或者宽频带的高吸收率,通常需要黑磷与其它介质的多层交替层叠结构,这无疑增加了器件的体积以及设计和制作的难度。本文作者提出了一种基于同一平面内的单层黑磷的双

频带超材料吸收体,其完美吸收特性体现了光与器件的强烈相互作用,是作为传感器的理想元器件。激光是最普遍使用的传感器的光源,而染料激光器是非常成熟的激光器,具有结构简单、价格便宜等优点,并且可以实现很大范围内的波长连续可调( $\mu\text{m}$  量级),因此是进行物质检测的理想光源<sup>[25]</sup>。本文作者提出的完美吸收体的吸收波段(2  $\mu\text{m}$ ~5  $\mu\text{m}$ )与染料激光器的可调谐波长范围重合,可以采用染料激光器作为检测光源,从而降低成本。模拟结果表明,该超材料吸收体可以实现双频带的完美吸收(吸收率大于 99.9%),而且可以通过吸收波峰的偏移检测覆盖在此器件上的未知物质的折射率,折射率的检测误差在 1% 的范围内。

## 1 黑磷的光学特性

黑磷是层状结构,如图 1a 所示<sup>[26]</sup>,图中标示出了 4 层黑磷,其中  $s=1$  代表第 1 层, $s=4$  代表第 4 层, $a_2$

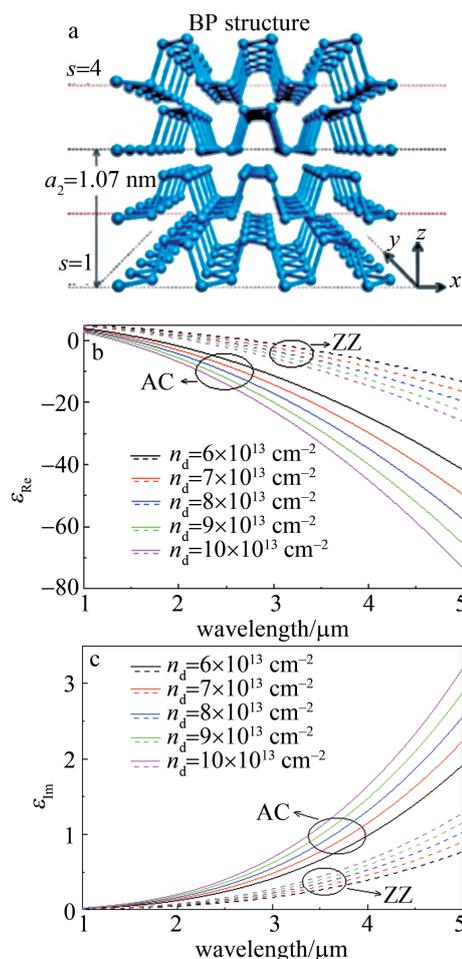


图 1 黑磷的原子结构图及介电常数与波长的关系

Fig. 1 Schematic diagram of BP structure and relationship between effective permittivity and wavelength

是晶格常数,对于  $s$  层黑磷而言,总厚度为  $a_2s/2$ 。同一层内的黑磷原子并非处于同一个平面,而是表现为较为立体的蜂巢型结构,如图 1 所示,沿着  $x$  方向称为扶手椅 (armchair, AC) 方向,沿着  $y$  方向称为锯齿 (zigzag, ZZ) 方向。由于原子排列的各向异性,使得黑磷在入射偏振光沿 AC 方向和 ZZ 方向表现出高度的各向异性。

单层黑磷的光学特性可以用半经典的 Drude 模型来描述<sup>[14]</sup>。薄膜的介电常数  $\epsilon$  可以由下式计算:

$$\begin{cases} \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix} \\ \epsilon_j = \epsilon_r + \frac{i\sigma_j}{\epsilon_0\omega t}, (j = x, y, z) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\epsilon_0$  是自由空间的介电常数,  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m; 对于单层黑磷来说,其在高频时的相对介电常数  $\epsilon_r = 5.76$ ;  $\omega$  是入射光的角频率;  $t$  是单层黑磷的厚度,也即 1 nm;  $\sigma_j$  是表面电导率。  $\sigma_j$  可以由下式计算:

$$\begin{cases} \sigma_j = \frac{iD_j}{\pi\left(\omega + i\frac{\eta}{\hbar}\right)} \\ D_j = \frac{\pi e^2 n_d}{m_j} \end{cases} \quad (2)$$

式中,弛豫速率  $\eta = 1$  meV; 约化普朗克常数  $\hbar = 1.05457266 \times 10^{-34}$  J · s; 单个电子的电荷量  $e = 1.6022 \times 10^{-19}$  C;  $n_d$  为电子掺杂浓度,可以通过外加偏置电压来改变<sup>[13]</sup>;  $m_j$  为沿着不同方向 ( $x$  方向或者  $y$  方向) 的有效质量,可以由下式计算:

$$\begin{cases} m_x = \frac{\hbar^2}{\frac{2\gamma^2}{\Delta} + \eta_1} \\ m_y = \frac{\hbar^2}{2\nu} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\gamma = 4a/\pi$ ,  $\pi/a$  代表布里渊区的宽度,  $a$  是黑磷的特征尺寸,对于单层黑磷而言,  $a = 0.223$  nm;  $\Delta$  为黑磷的带隙宽度,对于单层黑磷而言,  $\Delta = 2$  eV;  $\eta_1 = \hbar^2/0.4m_0$ ,  $\nu = \hbar^2/1.4m_0$ ,  $m_0 = 9.10938 \times 10^{-31}$  kg, 是标准电子质量。

根据上述公式,可以计算得到在不同的电子掺杂浓度下,介电常数的实部  $\epsilon_{Re}$  和虚部  $\epsilon_{Im}$  与波长的关系,如图 1b 和图 1c 所示。由图可知,在相同的电子掺杂浓度下,介电常数的实部 (或者虚部) 在 AC ( $x$  方

向) 和 ZZ ( $y$  方向) 的数值相差很大,说明黑磷对不同方向的偏振光表现出强烈的偏振敏感性。

## 2 器件设计与参数优化

图 2 为本文作者所设计的基于黑磷的双频带超材料吸收体的单元结构。图 2a 为立体图;图 2b 为剖面图。最下面一层为厚度  $h_1 = 100$  nm 的 Ag,作为反射镜使用;上面是厚度  $h_2 = 1200$  nm 的透明介质层  $Al_2O_3$ ,其折射率为 1.7<sup>[22]</sup>;再上面为 2 条带状结构的单层黑磷,具有不同的电子掺杂浓度,用以实现不同的吸收波长。结构参数为:周期  $p = 500$  nm,黑磷的宽度  $w = 150$  nm,黑磷边缘到中心线的距离  $d = 20$  nm。

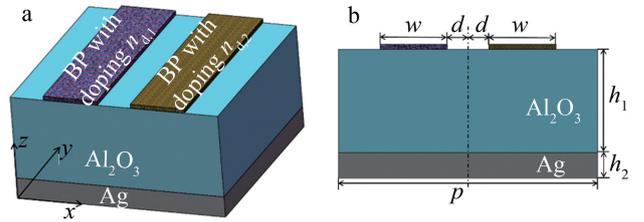


图 2 基于黑磷的双频带超材料吸收体的单元结构

Fig. 2 Unit cell of the designed BP based dual-band metamaterial

本文中利用仿真软件模拟此超材料吸收体的光谱特性。这是一款基于时域有限差分法 (finite difference time-domain, FDTD) 的光学模拟软件,被广泛应用于光电器件的模拟中。由于本文作者提出的超材料吸收体具有周期性排列的结构,因此将图 2 的单元结构的  $x$  和  $y$  方向的边界条件设为周期性结构,  $z$  方向设为完美匹配层即可。入射光的偏振方向为  $x$  方向,即沿着黑磷的 AC 方向。首先研究电子掺杂浓度对器件性能的影响。已有的研究表明,黑磷的电子掺杂浓度  $n_d$  在  $10^{13}$   $cm^{-2}$  这个量级<sup>[27]</sup>,因此在模拟时将  $n_d$  限制在这个数量级。当将右边黑磷的电子掺杂浓度  $n_{d,2}$  固定为  $9 \times 10^{13}$   $cm^{-2}$ ,左边黑磷的电子掺杂浓度  $n_{d,1}$  从  $6 \times 10^{13}$   $cm^{-2}$  变化到  $9 \times 10^{13}$   $cm^{-2}$  时,此器件的吸收光谱如图 3 所示。由图可知,在光谱范围内有 2 个吸收峰,当  $n_{d,1}$  变大时,2 个吸收峰都出现了蓝移,而且吸收率都是先变大后变小。当左边黑磷的电子掺杂浓度为  $n_{d,1} = 7 \times 10^{13}$   $cm^{-2}$ 、右边黑磷的电子掺杂浓度为  $n_{d,2} = 9 \times 10^{13}$   $cm^{-2}$  时,2 个峰都实现了完美吸收,分别在波长 2863.55 nm 和 3566.05 nm 处,吸收率分别为 99.96% 和 99.94%,实现了双频带的完美吸收。

为了解释完美吸收的形成机制,采用了耦合模理论 (coupled-mode theory, CMT)<sup>[28-29]</sup>。根据 CMT,此超材料吸收体可以用下式表示:

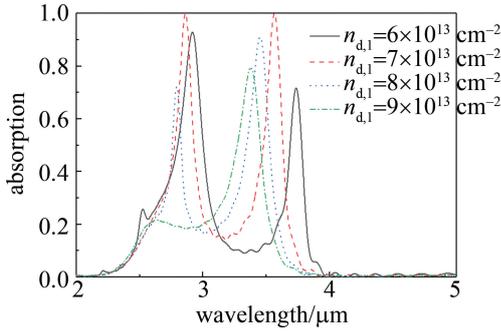


图 3 模拟得到的吸收光谱与电子掺杂浓度的关系

Fig. 3 The simulated absorption spectra as a function of doping concentration

$$\begin{cases} \frac{da_1}{dt} = (i\omega_0 - \delta - \gamma_1)a_1 + \sqrt{2\gamma_1}S_+ \\ S_- = -S_+ + \sqrt{2\gamma_1}a_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $a_1$  是共振幅度,  $t$  是时间,  $S_+$  和  $S_-$  代表入射光和出射光的幅度,  $\delta$  和  $\gamma_1$  分别代表内部本征损耗和外部漏率,  $\omega_0$  是共振频率。

对于角频率  $\omega$  不同的入射光, 此系统的反射系数  $r$  可以用下式表示:

$$r = \frac{S_-}{S_+} = \frac{i(\omega - \omega_0) + \delta - \gamma_1}{i(\omega - \omega_0) + \delta + \gamma_1} \quad (5)$$

由于银层足够厚, 可以认为此系统的透过率为 0, 则吸收率为:

$$A = 1 - |r|^2 = \frac{4\delta\gamma_1}{(\omega - \omega_0)^2 + (\delta + \gamma_1)^2} \quad (6)$$

由上式可知, 当  $\delta = \gamma_1$  时, 在共振频率  $\omega_0$  处, 临界耦合 (critical coupling, CC) 条件被满足,  $A = 1$ , 即实现了完美吸收。

共振峰处的  $Q$  值由下式计算:

$$Q_{\text{CMT}} = \frac{Q_\delta \cdot Q_{\gamma_1}}{Q_\delta + Q_{\gamma_1}} \quad (7)$$

式中,  $Q_{\text{CMT}}$  是指根据 CMT 理论计算得到的  $Q$  值,  $Q_\delta$  是指由内部本征损耗  $\delta$  计算得到的  $Q$  值,  $Q_\delta = \omega_0 / (2\delta)$ ;  $Q_{\gamma_1}$  是指由外部漏率  $\gamma_1$  计算得到的  $Q$  值,  $Q_{\gamma_1} = \omega_0 / (2\gamma_1)$ 。

图 4 为利用 FDTD 相关软件模拟得到的双频带完美吸收体的光谱图。为了与 CMT 理论的公式相匹配, 横坐标为  $\omega$  (rad/s), 纵坐标为吸收率。由光谱图可以测得根据 FDTD 算法得到的 2 个吸收峰的  $Q$  值  $Q_{\text{FDTD}}$ , 其中左边峰的  $Q_{\text{FDTD}}$  值为 23.11, 右边峰的  $Q_{\text{FDTD}}$  值为 18.60。图中红色虚线为用洛伦兹曲线拟合这两个峰所得到的曲线。由拟合结果可知, 左边峰的  $\delta = \gamma_1 = 5.66 \times 10^{12}$  Hz, 根据 CMT 理论, 由 (7) 式可以计算得到  $Q_{\text{CMT}} = 23.42$ , 与 FDTD 模拟得到的  $Q_{\text{FDTD}}$  非常接近; 右

边峰的  $\delta = \gamma_1 = 9.15 \times 10^{12}$  Hz, 根据 CMT 理论, 由 (7) 式可以计算得到  $Q_{\text{CMT}} = 18.04$ , 与 FDTD 模拟得到的  $Q_{\text{FDTD}}$  非常接近。2 个峰的由软件模拟得到的  $Q_{\text{FDTD}}$  值与计算得到的  $Q_{\text{CMT}}$  值都是非常接近的, 说明在这两个频率处的完美吸收是由共振频率处的临界耦合引起的。图 4 还显示了在共振波长及非共振波长处的  $x$ - $z$  平面内的电场强度的分布图, 由图可知, 在高吸收率的波长处, 入射光波主要被限制在单层黑磷的附近, 形成了共振加强; 在低吸收率的波长处, 入射光波没有与器件产生共振, 大部分都被反射回了自由空间。

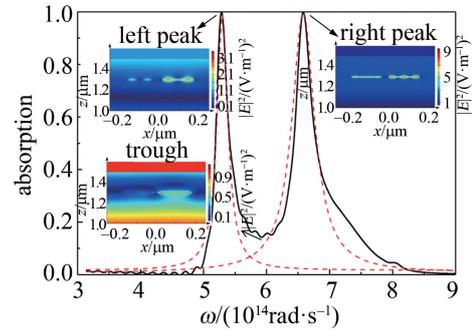


图 4 双频带超材料吸收体的吸收光谱及洛伦兹拟合曲线

Fig. 4 Absorption spectrum of BP based dual-band metamaterial and Lorentz fitting curves

下面将探索器件结构参数对吸收光谱 (吸收波长、吸收率、半波宽等) 的影响。图 5 为带状黑磷的宽度  $w$  从 120 nm 增加到 180 nm 时, 吸收光谱的变化。由图可知, 当  $w$  增大时, 2 个吸收峰都发生了红移, 这是因为谐振波长  $\lambda \propto \sqrt{w/n_d}$ <sup>[19]</sup>, 因此当带状黑磷的宽度  $w$  变大时, 谐振波长也会变大。

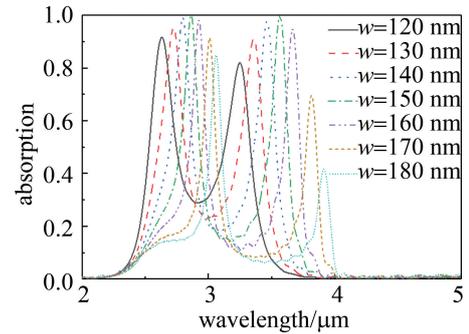


图 5 带状黑磷的宽度  $w$  从 120 nm 变化到 180 nm 时, 双频带超材料吸收体的吸收特性仿真曲线

Fig. 5 The simulated absorption spectra as a function of wave length when BP ribbon with  $w$  changed from 120 nm to 180 nm

图 6 为带状黑磷的边缘到中心线的距离  $d$  从 20 nm 增加到 40 nm 时, 吸收光谱的变化。内嵌小图为吸收波峰处的放大图。由图 6 可知, 除了吸收波长有微小的偏移之外, 吸收率和半波宽几乎没有变化。

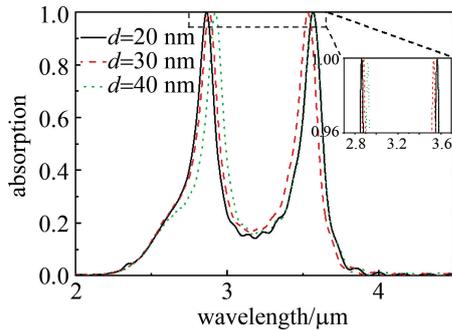


图 6 带状黑磷的边缘到单元结构中心线的距离  $d$  从 20 nm 变化到 40 nm 时,双频带超材料吸收体的吸收特性仿真曲线

Fig. 6 The simulated absorption spectra as a function of wavelength when distance from BP edge to the center of unit cell changed from 20 nm to 40 nm

这是因为本文中提出的双频带吸收体是周期性重复的结构,虽然在一个单元格内,带状黑磷偏离了中心位置,但是相邻单元格之间,同样电子掺杂浓度的带状黑磷的距离是没有变化的,因此不会造成吸收率的改变。吸收率和半波宽对  $d$  不敏感的这一特性,是所提出的双频带完美吸收体的一个优势,说明在实际的器件制作过程中,即使由于工艺等问题造成带状黑磷与单元格中心线之间的间距偏离设计尺寸,也不会影响完美吸收体对红外光的吸收性能。

### 3 器件的传感性能

由于此超材料吸收体具有完美的吸收特性,可以与物质发生强烈的相互作用,因此可以作为传感器使用。当不同折射率的待测物覆盖在此传感器上时,吸收光谱(吸收波长、吸收率、半波宽等)会发生变化,从而可以推测出待测物的折射率。本文中提出的双频带超材料吸收体作为传感器,具有独特的优势,因为它有 2 个吸收峰,可以与待测物质的特征频率实现多点匹配,减少由于实验条件的改变、人员的误操作等带来的附加误差,从而提高传感器的可靠性和准确性<sup>[30]</sup>。图 7 是待测物的折射率  $n$  从 1 增加到 1.6 时,吸收光谱的变化。可以看出,当待测物的折射率增加时,2 个吸收峰都出现了红移,而且红移的幅度是不一样的。

图 8 为吸收波长的变化量  $\Delta\lambda$  与折射率的变化量  $\Delta n$  的关系。方点是在不同的折射率的情况下,较小的吸收波长  $\lambda_1$  的偏移量  $\Delta\lambda_1$  的模拟结果;圆点是在不同的折射率的情况下,较大的吸收波长  $\lambda_2$  的偏移量  $\Delta\lambda_2$  的模拟结果。黑线和红线分别对应的是它们的线性拟合。由直线的斜率可知,在吸收波长  $\lambda_1$  处的折射率灵敏度  $S(\lambda_1) = 629.1 \text{ nm/RIU}$ ,在吸收波长  $\lambda_2$  处的

折射率灵敏度  $S(\lambda_2) = 666.2 \text{ nm/RIU}$ ,RIU 为单位折射率(refractive index unit)。由于折射率传感器的灵敏度与谐振波长有很强的相关性,因此通常用归一化灵敏度系数  $S'$  来比较不同传感器之间的性能。 $S'$  由下式计算: $S' = S/\lambda_{\text{resonant}}$ ,其中  $\lambda_{\text{resonant}}$  是谐振波长<sup>[31]</sup>。计算可知,本文中的传感器在 2 个谐振波长处的归一化灵敏度系数  $S'$  分别为  $0.219/\text{RIU}$  和  $0.187/\text{RIU}$ 。另外一个评价折射率传感器性能的重要参数为品质因数 (figure of merit, FOM),FOM 是折射率灵敏度与谐振峰的半峰全宽<sup>[31]</sup> (full width at half maximum, FWHM) 的比值。计算可知,传感器在 2 个谐振波长处的品质因数 FOM 分别为  $3.12/\text{RIU}$  和  $4.34/\text{RIU}$ 。

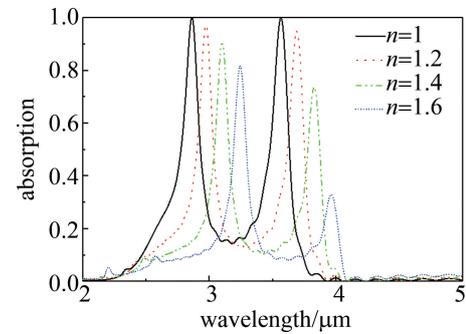


图 7 待测覆盖物折射率  $n$  从 1 变化到 1.6 时,双频带超材料吸收体的吸收特性仿真曲线

Fig. 7 The simulated absorption spectra as a function of wavelength when refractive index of the cladding  $n$  changed from 1 to 1.6

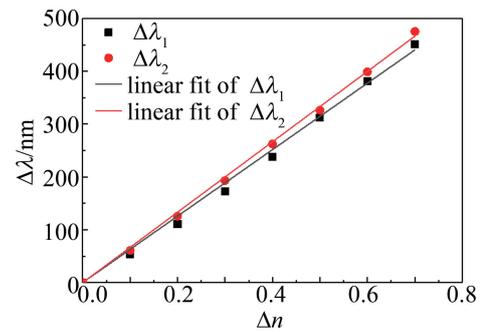


图 8 谐振波长的偏移量  $\Delta\lambda$  与折射率的变化量  $\Delta n$  的关系

Fig. 8 Resonant wavelength shift  $\Delta\lambda$  as a function of refractive index variation  $\Delta n$

表 1 中列出了近期文献中报道的采用不同材料或者不同结构制成的折射率传感器的谐振波长、灵敏度  $S$ 、归一化灵敏度系数  $S'$  和品质因数 FOM<sup>[24]</sup>。由表 1 可知,本文中设计的传感器在性能方面与其它传感器的具有可比性,并且其谐振波长正好在染料激光器的频谱范围内,在检测仪器的可靠性和价格方面有一定的优势。本文中传感器还有结构简单、对制作工艺要求不高等优势,是实用的折射率传感器。

表 1 折射率传感器在性能方面的对比

Table 1 Comparison between our refractive index sensor and other reported refractive index sensors

sensor material	resonant wavelength/frequency	S	S'/RIU <sup>-1</sup>	FOM/RIU <sup>-1</sup>	reference
black phosphorus	4.16 μm	1.4 μm/RIU	0.34	4	[24]
borophene	1.585 μm	560 nm/RIU	0.35	5.5	[31]
black phosphorus left peak	8.802 μm	140 nm/RIU	—	125	[32]
black phosphorus right peak	8.807 μm	180 nm/RIU	—	261	[32]
black phosphorus	7.7 μm	2 μm/RIU	0.26	0.29	[33]
black phosphorus	19.06 THz	7.62 THz/RIU	0.38	—	[34]
black phosphorus peak 1	7.6 μm	2.4 μm/RIU	0.32	4.8	[35]
black phosphorus peak 2	8.3 μm	3.0 μm/RIU	0.36	4.2	[35]
graphene peak 1	23.5 μm	3.98 μm/RIU	0.17	16.6	[36]
graphene peak 2	24.3 μm	4.13 μm/RIU	0.17	20.7	[36]
graphene peak 3	27.8 μm	5.06 μm/RIU	0.18	18.1	[36]
graphene	31.11 μm	13.67 μm/RIU	0.44	6	[37]
MoS <sub>2</sub> , peak 1	583 nm	500 μm/RIU	0.86	—	[38]
MoS <sub>2</sub> , peak 2	770 nm	200 nm/RIU	0.26	—	[38]
black phosphorus left peak	2.863 μm	629.1 nm/RIU	0.219	3.12	our work
black phosphorus right peak	3.566 μm	666.2 nm/RIU	0.187	4.34	our work

由上述的分析可知,当某种未知的待测物覆盖在本文中的传感器的表面时,只要测得吸收峰相比于空气的折射率。n<sub>0</sub> = 1 时的偏移量 Δλ,就可以由下述公式计算得到该待测物的折射率 n:

$$n = \frac{\Delta\lambda_j}{S(\lambda_j)} + n_0 \quad (8)$$

式中,Δλ<sub>j</sub> 是有覆盖物时的吸收峰相比于没有覆盖物时的吸收峰的偏移量(j=1 或者 2,对应的是双吸收峰中的较小波长或者较大波长),S(λ<sub>j</sub>)是在 λ<sub>j</sub> 处的折射率灵敏度。

为了验证本文中设计的传感器在检测待测物折射率方面的性能,模拟了待测物折射率分别为 1.45 和 1.55 的吸收谱,如图 9 所示。由图可知,n = 1.45 时,对应的 Δλ<sub>1</sub> 和 Δλ<sub>2</sub> 分别为 276.81 nm 和 297.37 nm,由(8)式可以计算得到 n = 1.4400 和 n = 1.4464;n =

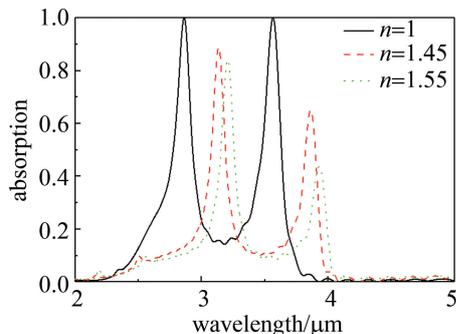


图 9 覆盖物折射率分别为 1, 1.45 和 1.55 时的吸收光谱

Fig. 9 Absorption spectra as a function of wavelength when refractive index of the cladding n is 1, 1.45 and 1.55 respectively

1.55 时,对应的 Δλ<sub>1</sub> 和 Δλ<sub>2</sub> 分别为 344.07 nm 和 365.09 nm,由(8)式可以计算得到 n = 1.5469 和 n = 1.5480。该传感器计算的折射率与实际折射率的偏差如表 2 所示。误差都在 1% 以内,可见该传感器可以较为精确地测量待测物的折射率。

表 2 传感器计算的折射率与实际折射率的对比

Table 2 Comparison of the calculated refractive index and actual refractive index

actual n	the calculated n from λ <sub>1</sub>	error/%	the calculated n from λ <sub>2</sub>	error/%
1.45	1.4400	-0.69	1.4464	-0.25
1.55	1.5469	-0.20	1.5480	-0.13

## 4 结 论

提出了一种基于黑磷的双频带超材料吸收体,由覆盖在介电材料 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 上的 2 条带状黑磷构成,由于黑磷的电子掺杂浓度不同,可以实现多频带的完美吸收。通过优化器件参数,可以在 2 μm ~ 5 μm 的红外波段范围内实现双频带的完美吸收(吸收率大于是 99.9%)。还研究了此超材料吸收体作为折射率传感器的检测性能,模拟结果表明,吸收波峰的偏移量与覆盖在此器件上的未知物质的折射率基本呈线性关系,用此器件计算的未知物质的折射率与实际折射率的误差在 1% 的范围内。所提出的超材料吸收体结构简单,对由于制作工艺的不完善而引起的结构尺寸的偏差也有较好的容忍度,在红外波段的多频带吸收和传

感检测方面将会有广泛的应用。

### 参 考 文 献

- [1] DRISCOLL T, ANDREEV G O, BASOV D N, *et al.* Tuned permeability in terahertz split-ring resonators for devices and sensors[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(6):062511.
- [2] DENG H C, JIANG X W, HUANG X X, *et al.* A temperature sensor based on composite optical waveguide[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(8):2663-2669.
- [3] TIAN X Y, LI L W, CHEW S X, *et al.* Cascaded optical microring resonator based auto-correction assisted high resolution microwave photonic sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(24):7646-7655.
- [4] ZHANG Y Y, ZHANG J H, LI Y N, *et al.* An optical intense 2D electric field sensor using a single LiNO<sub>3</sub> crystal[J]. *Current Optics and Photonics*, 2022, 6(2):183-190.
- [5] WOO B H, SEO I C, LEE E, *et al.* Angle-dependent optical perfect absorption and enhanced photoluminescence in excitonic thin films[J]. *Optics Express*, 2017, 25(23):28619-28629.
- [6] YILDIRIM D U, GHOBADI A, SOYOAN M C, *et al.* One-way and near-absolute polarization insensitive near perfect absorption by using an all dielectric metasurface[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7):2010-2013.
- [7] YU H H. Study on structure and properties of polarization-sensitive metamaterial absorber[D]. Changchun: Jilin University, 2021:23-34 (in Chinese).  
于海洪. 偏振敏感超材料吸波体结构与性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021:23-34.
- [8] WANG R. Research on fabrication and characterization of subwavelength metallic grating-based polarimetric sensor [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences, 2016:21-28 (in Chinese).  
王瑞. 亚波长微偏振光栅探测器的研制方法及其偏振特性研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016:21-28.
- [9] WANG P F, HE F Y, LIU J J, *et al.* High-Q terahertz all-dielectric metasurface based on bound states in the continuum[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(5):630-635 (in Chinese).  
王鹏飞, 贺风艳, 刘建军, 等. 基于连续谱束缚态的高 Q 太赫兹全介质超表面[J]. *激光技术*, 2022, 46(5):630-635.
- [10] ALAEE R, FARHAT M, ROCKSTUHL C, *et al.* A perfect absorber made of a graphene micro-ribbon metamaterial[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27):28017-28024.
- [11] AKHAVAN A, ABDOLHOSSEINI S, GHAFORIFARD H, *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(23):5593-5599.
- [12] SHAO Y B. Investigation on optical nonlinear absorption and carrier dynamics of several 2D materials[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2021:11-14 (in Chinese).  
邵雅斌. 几种二维材料的光学非线性吸收及载流子动力学研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2021:11-14.
- [13] LI Sh L. Research on the novel tunable terahertz modulator of black phosphorus[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021:10-12 (in Chinese).  
李双鑫. 新型黑磷可调谐太赫兹调制器研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021:10-12.
- [14] TANG B, YANG N G, HUANG L, *et al.* Tunable anisotropic perfect enhancement absorption in black phosphorus-based metasurfaces[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3):4500209.
- [15] DONG D X, LIU Y W, FEI Y, *et al.* Designing a nearly perfect infrared absorber in monolayer black phosphorus[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(14):3862-3869.
- [16] WANG J, JIANG Y N, HU Zh R. Dual-band and polarization-independent infrared absorber based on two-dimensional black phosphorus metamaterials[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18):22149-22157.
- [17] DAI X Y, CHEN H, QIU Ch Y, *et al.* Ultrasensitive multiple guided-mode biosensor with few-layer black phosphorus[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(6):1564-1571.
- [18] CAI Y J, XU K D, FENG N X, *et al.* Anisotropic infrared plasmonic broadband absorber based on graphene-black phosphorus multilayers[J]. *Optics Express*, 2020, 27(3):3101-3112.
- [19] ZHU Y Q, TANG B, JIANG Ch. Tunable ultra-broadband anisotropic absorbers based on multi-layer black phosphorus ribbons[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(3):032009.
- [20] KHALILZADEH H, SHARIF A H, ANVARHAGHIGAI N. Design of a broadband infrared absorber based on multiple layers of black phosphorus nanoribbons[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2021, B38(12):3920-3928.
- [21] WANG Sh Q, LI Sh L, ZHOU Y G, *et al.* Enhanced terahertz modulation using a plasmonic perfect absorber based on black phosphorus[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(29):9279-9283.
- [22] XIAO Sh Y, LIU T T, CHENG L, *et al.* Tunable anisotropic absorption in hyperbolic metamaterials based on black phosphorus/dielectric multilayer structures[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13):3290-3297.
- [23] HE Zh H, LU H, ZHAO J L. Polarization independent and non-reciprocal absorption in multi-layer anisotropic black phosphorus metamaterials[J]. *Optics Express*, 2021, 29(14):21336-21347.
- [24] WU Sh W, JIAN R D, XIONG G P. High-performance polarization-independent black phosphorus refractive index sensors enabled by a single-layer pattern design[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(3):517-520.
- [25] FANG Y W. Study on new liquid dye laser[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021:3-10 (in Chinese).  
方昱玮. 新型液体染料激光器的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021:3-10.
- [26] LIN C, GRASSI R, LOW T, *et al.* Multilayer black phosphorus as a versatile mid-infrared electro-optic material[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(3):1683-1689.
- [27] CAI Y J, LI Sh L, ZHOU Y G, *et al.* Investigation of multi-resonant and anisotropic plasmonic resonances in the stacked graphene-black phosphorus bilayers[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(2):025107.
- [28] FAN Sh H, SUH W J, JOANNOPOULOS J D. Temporal coupled-mode theory for the Fano resonance in optical resonators[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2003, A20(3):569-572.
- [29] LIU T T, JIANG X J, ZHOU Ch B, *et al.* Black phosphorus-based anisotropic absorption structure in the mid-infrared[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20):27618-27627.
- [30] PANG H Zh, WANG X, WANG J L, *et al.* Sensing characteristics of dual band terahertz metamaterial absorber sensor[J]. *Acta Physi-*

- ca Sinica, 2021, 70(16):168101 (in Chinese).  
庞慧中, 王鑫, 王俊林, 等. 双频带太赫兹超材料吸波体传感器传感特性[J]. 物理学报, 2021, 70(16):168101.
- [31] ZHANG J J, ZHANG Zh J, SONG X X, *et al.* Infrared plasmonic sensing with anisotropic two-dimensional material borophene [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(5):1165.
- [32] ZHANG J A, LI G M, ZHOU Y G, *et al.* Research on multi-resonant refractive index sensor based on black phosphorus [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2022, 23(1):43-48 (in Chinese).  
张俊傲, 李国民, 周远国, 等. 基于黑磷的多共振折射率传感器研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2022, 23(1):43-48.
- [33] ZHOU R L, PENG J, YANG S, *et al.* Lifetime and nonlinearity of modulated surface plasmon for black phosphorus sensing application [J]. *Nanoscale*, 2018, 10:18878-18891.
- [34] CHEN H, XIONG L, HU F R, *et al.* Ultrasensitive and tunable sensor based on plasmon-induced transparency in a black phosphorus metasurface [J]. *Plasmonics*, 2021, 16(4):1071-1077.
- [35] LIU Ch, 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, 22:073049.
- [36] SHEN H Y, LIU Ch Y, LIU F X, *et al.* Multi-band plasmonic absorber based on hybrid metal-graphene metasurface for refractive index sensing application [J]. *Results in Physics*, 2021, 23:104020.
- [37] JIANG X P, CHEN D B, ZHANG Zh J, *et al.* Dual-channel optical switch, refractive index sensor and slow light device based on a graphene metasurface [J]. *Optics Express*, 2020, 28(23):34079-34092.
- [38] QIU C Y, WU J H, ZHU R R, *et al.* Dual-band near-perfect metamaterial absorber based on cylinder MoS<sub>2</sub>-dielectric arrays for sensors [J]. *Optics Communications*, 2019, 451:226-230.