光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024011505

基于多层石墨烯-黑磷结构可调谐各向异性吸收器

肖功利[1]，赖子凡[1]，杨宏艳[2*]，林志雄[1]，李海鸥[1]，陈赞辉[1]

（桂林电子科技大学 1. 广西高校微电子器件与集成电路重点实验室；2. 光电工程学院，广西 桂林 541004）

摘　要： 基于阻抗匹配理论(IMT)和多层局域表面等离子体共振(LSPR)耦合效应，设计了一种多层石墨烯-黑磷可调谐各向异性吸收器。通过采用时域有限差分法(FDTD)进行模拟仿真计算分析发现，TE偏振下，吸收器在波长20.8～45.34 μm范围内可实现94%的宽带平均吸收；TM偏振下，在波长16.6～44.6 μm范围内可以实现96.3%的宽带平均吸收，呈现出一定程度的各向异性吸收特性。此外，通过调整石墨烯-黑磷块的宽度，可以调节吸收带宽。同时，动态调节石墨烯的费米能级或黑磷的电子掺杂浓度也能够调节吸收带宽和平均吸收率。该研究成果对动态可调谐红外能量采集、偏振选择性吸收和红外伪装领域具有理论指导意义。

关键词： 超材料；超宽带；可调谐；各向异性；石墨烯；黑磷

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2024)03－0362－07

Tunable Anisotropic Absorber Based on Multilayer Graphene-Black Phosphorus Structure

XIAO Gongli[1], LAI Zifan[1], YANG Hongyan[2], LIN Zhixiong[1], LI Haiou[1], CHEN Zanhui[1]

(1. Key Laboratory of Microelectronic Devices and Integrated Circuits, Education Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region; 2. School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, CHN)

Abstract: Based on impedance matching theory and the multilayer local surface plasmon resonance coupling effect, we designed a multilayer graphene-black phosphorus tunable anisotropic absorber. We used the finite-difference time-domain method to simulate and analyze the results. Under TE polarization, we achieved an average broadband absorption of 94% in the wavelength range of 20.8～45.34 μm. Under TM polarization, we achieved an average broadband absorption of 96.3% in the wavelength range of 16.6～44.6 μm, thus indicating a certain degree of anisotropic absorption. In addition, the absorption bandwidth can be altered by adjusting the width of the graphene-black phosphorus block. Simultaneously, dynamically adjusting the Fermi level of graphene or the electron-doping concentration of black phosphorus can alter the absorption bandwidth and average absorption rate. The results of this study are theoretically significant in the fields of dynamic tunable infrared-energy acquisition, polarization-selective absorption, and infrared camouflage.

Key words: metamaterial; ultra-broadband; tunable; anisotropic; graphene; black phosphorus

收稿日期：2024－01－15.

基金项目：国家自然科学基金项目(62165004,61805053)；广西自然科学基金项目(2023GXNSFAA026108)；桂林电子科技大学研究生创新项目(2022YCXS047, 2021YCXS040)；广西精密导航技术与应用重点实验室主任基金项目(DH202313).

* **通信作者：**杨宏艳

0　引言

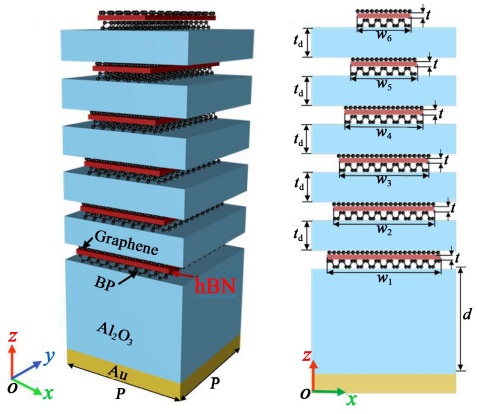
具有单层原子厚度的二维材料，如石墨烯、黑磷(BP)和六方氮化硼(hBN)，因其独特的光电性质受到了广泛的研究。许多理论和实验结果表明，这些二维材料可以激发和传播表面等离子体共振模式[1-2]。此外，研究人员还开发了一些便于控制表面等离子体共振的方法，例如施加静电门控电压和进行化学掺杂。2020 年 Yao 等[3]提出了一种基于石墨烯带和表面等离子体激元的光谱和空间可调谐太赫兹超透镜，通过调节石墨烯费米能量，石墨烯表面等离子体的光学性质可以被动态调制，导致反射光的定制的突变相移。同时，石墨烯的动态可调节吸收特性同样被广泛验证[4-5]。大量研究证实了在亚波长范围内光与二维材料之间的相互作用，这些现象已被应用于其他各种光子器件，如生物传感器[6]、偏振分束器[7]等。

2008 年，Landy 等[8]首次提出了超材料电磁吸收器的概念。人们对利用超材料进行电磁波吸收产生了浓厚兴趣，并不断进行深入研究。宽带吸收器在能量收集、光电探测和红外伪装等领域的应用开始受到关注，许多研究人员已经通过各种方式来拓宽吸收带宽。例如，2022 年，Huang 等[9]提出了一种基于多尺寸谐振腔的超宽带中红外超材料吸收器，利用其谐振耦合效应，通过多个随机尺寸谐振器来拓宽吸收带。2021 年，Qin 等[10]设计了一种基于 Ti-Si-Ti 结构的宽带吸收器，在中红外波段中工作。然而，这些方法只能通过改变结构参数来实现吸收光谱的调谐，无法进行动态调谐。此外，这些方法的吸收带宽还不够宽广，这限制了其更为灵活且广泛的应用。针对这些问题，Feng 等[11]利用石墨烯设计了一种偏振无关的宽带太赫兹吸收体，在 1.23～1.68 THz 的频率范围内实现了 99%以上的吸收率，并且具有 60°入射角的角度不敏感特性。另外，Zhang 等[12]基于 VO_2 的相变特性提出了一种能够在宽带和窄带之间切换的太赫兹吸收器。这些研究扩大了吸收带宽并且具备优秀的可调谐特性。然而，以上研究都没有探究偏振特性或者偏振无关，这限制了偏振选择性吸收器的发展。Liu 等[13]提出了一种基于 a-MoS_3 的中红外宽带各向异性吸收体。在 TM 偏振下，在 10.6～12.2 μm 波长范围内实现了 99.99%的平均吸收，而在 TE 偏振下，在 12.5～18 μm 范围内同样表现出了优秀的宽带吸收性能，但该吸收体缺乏动态可调性。目前大多数吸收体的研究集中在太赫兹和近红外波段，但对于中远红外波段的吸收体研究同样重要。中远红到远红外波段被科学界称为“生命光波”，在生物和化学领域应用广泛[14-15]，因为它的波长与人体发出的远红外线相似，可以与生物体细胞中的水分子“共振”。因此，远红外吸收体被认为在医学等领域应用中具有潜力。

本文提出了一种基于多层石墨烯-hBN-黑磷(GHB)结构的可调谐各向异性超宽带吸收器。将 GHB 层数调整为六层，并利用时域有限差分(FDTD)法对该吸收器进行了仿真。在 TE 偏振下，在 20.8～45.34 μm 波长范围内可实现 94%的宽带平均吸收性；在 TM 偏振下，吸收器在 16.6～44.6 μm 波长范围内可以实现 96.3%的宽带平均吸收，呈现出一定程度的各向异性吸收特性，吸收谱跨越了中红外和远红外波段，且具有一定程度的各向异性。结果表明，改变石墨烯-黑磷块的宽度会影响吸收带宽。同时，通过调节 GHB 层的宽度、石墨烯的费米能级(E_F)和黑磷的电子掺杂浓度(n_s)，可以动态调节吸收率和吸收带宽。该研究在可调谐红外能量收集、偏振选择性吸收和红外伪装方面具有良好的应用前景。

1　结果与讨论

图 1(a)为六层石墨烯-黑磷块吸收器的三维结构示意图。石墨烯和黑磷用 hBN 隔开后组成 GHB 层，hBN 的折射率选自 Ishii 等[16]的研究数据，两个相邻 GHB 层的介质材料是 Al_2O_3。衬底材料为 Au，其折射率数据取自 Palik 的实验[17]。图 1(b)为吸收器 xOy 平面和具体尺寸参数的示意图，衬底层



(a) 三维结构示意图　(b) xOz 平面二维结构示意图

图 1　基于多层石墨烯-黑磷结构可调谐各向异性吸收器的结构

的厚度 $d=3\ \mu m$，相邻石墨烯-黑磷块的夹层 Al_2O_3 的厚度为 $t_d=0.2\ \mu m$。每个 GHB 层的宽度从底部到顶部按降序递减，每层递减 $0.04\ \mu m$。当最底部 GHB 层宽度 $w_1=0.38\ \mu m$ 时，顶部 GHB 层宽度 $w_6=0.18\ \mu m$，采用 FDTD 进行模拟。

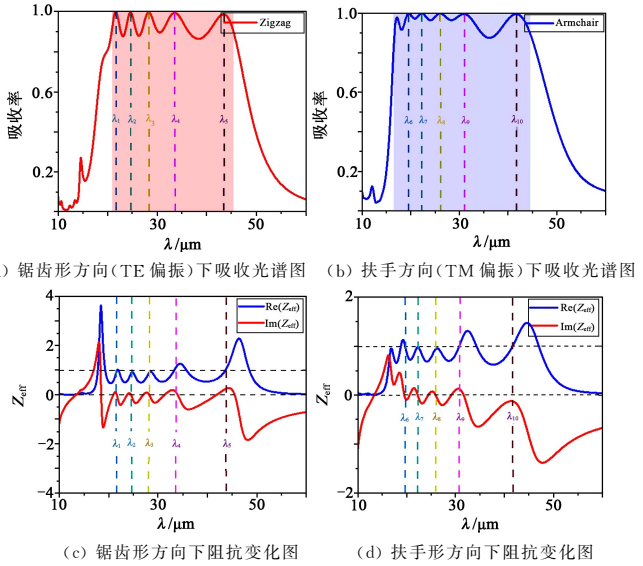
使用 Lumerical FDTD Solution 软件对吸收器结构进行模拟。在该结构上方放置了一个 3～60 μm 的平面光源，在平面光源上方和结构下方放置了监视器以收集透射和反射数据，设置每层 GHB 块的网格精度为 $\Delta x=\Delta y=\Delta z=50\ nm$。hBN 层被设置为折射率为 1.28，$Al_2O_3$ 层的折射率设置成为 1.7。

BP 在锯齿形方向(TE 偏振)和扶手椅方向(TM 偏振)吸收光谱分别如图 2(a)和(b)所示。结果显示，在 TE 偏振下，吸收器波长在 20.8～45.34 μm 范围内可实现 94%的宽带平均吸收性；在 TM 偏振下，波长在 16.6～44.6 μm 范围内可以实现 96%的宽带平均吸收。在两种极化(TE 和 TM 极化)下，吸收器在中远红外波段都展现了超宽带吸收现象，但宽带吸收的波长范围不同，也展现了一定程度的各向异性。由于在单层黑磷中 x 轴方向的电子有效质量 m_{cx} 与 y 轴方向的 m_{cy} 不同，导致两方向表面电导率并不相同，有效介电常数也不相同，其表面等离子激元模式表现出高度的各向异性，导致 Zigzag 和 Armchair 情况下吸收率会有差异。

阻抗匹配理论(IMT)可以成功解释吸收器的完美吸收现象。当吸收器的有效阻抗(Z_{eff})与自由空间(Z_0)相匹配时，吸收器可以达到最大吸收。吸收器的有效阻抗是根据 S 参数演算得到的，S 参数的计算依赖于等效介质理论。S_{11} 是与反射有关的电磁参数，反射率可以表示为：$R=1-|S_{11}|^2$；S_{21} 是与透射有关的电磁参数，S_{11} 和 S_{21} 可以通过计算反射光和透射光的相位和振幅获取，则透射率可表示为：$T=1-|S_{21}|^2$，吸收可表示为 $A=1-T-R$。由于基板是足够厚度的金属板，透射电磁波基本上被阻挡，$|S_{21}|$等于零，最终的吸收 $A=1-|S_{11}|^2$。MA 的有效阻抗可以表示为：

$$Z_{eff}=\sqrt{\frac{(1+S_{11})^2-S_{21}^2}{(1-S_{11})^2-S_{21}^2}} \tag{1}$$

图 2(c)和(d)分别显示了在 TE 和 TM 偏振中 MA 的有效阻抗随波长的曲线。在 TE 偏振下，产生了五个完美的吸收峰，分别是 λ_1，λ_2，λ_3，λ_4，λ_5。在 TM 偏振下，还产生了五个完美的吸收峰，分别是 λ_6，λ_7，λ_8，λ_9，λ_{10}。由图可知，在这些谐振波长下吸收器刚好达到或接近阻抗匹配条件。这表明了 IMT 对本文提出的吸收器的适用性。



(a) 锯齿形方向(TE 偏振)下吸收光谱图 (b) 扶手方向(TM 偏振)下吸收光谱图

(c) 锯齿形方向下阻抗变化图 (d) 扶手形方向下阻抗变化图

图 2 吸收器在黑磷锯齿形方向(TE 偏振)和扶手形(TM 偏振)吸收光谱图和阻抗示意图

为了进一步研究吸收器的共振机制，对这 10 个共振波长进行了电场分析。图 3(a)显示了 TM 极化下吸收器的每个共振波长的 xOz 平面电场分布。在 $\lambda=19.65\ \mu m$ 处，电场的增强发生在顶部第二层 GHB 块的边缘，这表明激发了局域表面等离子体共振(LSPR)；在 $\lambda=22.28\ \mu m$ 处，LSPR 主要发生在顶部第三层 GHB 块的边缘，在 $\lambda=25.95\ \mu m$ 处 LSPR 主要出现在顶部第四层 GHB 的边缘，在 $\lambda=31.05\ \mu m$ 处 LSPR 主要发生在顶部第五层 GHB 的边缘，当 $\lambda=41.74\ \mu m$ 时 LSPR 主要发生在顶部第六层 GHB 块的边缘。

图 3(b)显示了 TE 极化下吸收器的每个谐振波长的 xOz 平面电场分布。与 TM 偏振情况一致，每个谐振波长对应于 GHB 块的不同 LSPR 谐振。在 $\lambda=20.62\ \mu m$ 处，LSPR 发生在第 2 个 GHB 区块的边缘，在 $\lambda=43.46\ \mu m$ 处发生在第 5 个 GHB 块的边缘。与 TE 极化不同，电场的增加不仅在一个 GHB 块上，还分别在顶部第 2 和第 3 个 GHB 块、第 3 和第 4 个 GHB 块以及第 4 和第 5 个 GHB 块之间形成 LSPR 耦合效应。因此，宽带吸收由不同谐振波长下 GHB 不同层的 LSPR 耦合形成。

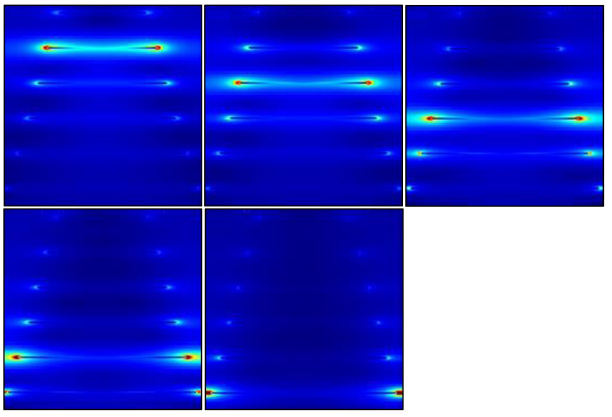
2 材料和结构

2.1 材料选择

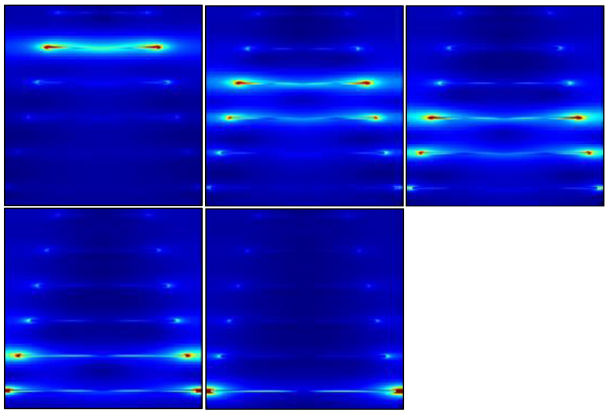
石墨烯是一种零带隙二维材料，具有反常的半

整数量子霍尔效应，显著的光学性能和热导率，以及高电子迁移率[18]。石墨烯的费米能级可以通过在表面施加电压来动态调制[19]，因为石墨烯带是连续的，大大降低了制备难度和施加门电压的难度，更有利于对吸收器的吸收光谱进行动态调谐，在所有波段下它的导电模型可用 Kubo 公式表示如下[20]：

$$\sigma_{\mathrm{G}}=\sigma_{\mathrm{intra}}+\sigma_{\mathrm{inter}} \tag{2}$$



(a) TM 偏振下吸收器在 5 个共振波长下的电场分布图



(b) TE 偏振下吸收器在 5 个谐振波长下的电场分布图

图 3　吸收器分别沿黑磷扶手形方向(TM 偏振)和锯齿形方向(TE 偏振)xOz 平面的电场分布图

$$\sigma_{\mathrm{intra}}=\frac{\mathrm{i}e^{2}k_{\mathrm{B}}T}{\pi\hbar(\omega+2\mathrm{i}\Gamma)}\left[\frac{\mu_{\mathrm{c}}}{k_{\mathrm{B}}T}+2\ln\left(1+\mathrm{e}^{-\frac{\mu_{\mathrm{c}}}{k_{\mathrm{B}}T}}\right)\right] \tag{3}$$

$$\sigma_{\mathrm{inter}}=\frac{\mathrm{i}e^{2}}{4\pi\hbar}\ln\left[\frac{2\mid\mu_{\mathrm{c}}\mid-(\omega+2\mathrm{i}\Gamma)\hbar}{2\mid\mu_{\mathrm{c}}\mid+(\omega+2\mathrm{i}\Gamma)\hbar}\right] \tag{4}$$

式中，K_{B} 是玻尔兹曼常数，$\hbar$ 是约化普朗克常数，μ_{c} 是化学势，与费米能级(E_{F})有关。散射率 $\Gamma=1/2\tau$，τ 是弛豫时间。对于太赫兹和红外区域，与带内部分相比，石墨烯的带间部分可以忽略不计，石墨烯可以 Drude 模型[21]表示为：

$$\sigma_{\mathrm{G}}=\frac{\mathrm{i}e^{2}E_{\mathrm{F}}}{\pi\hbar(\omega+\mathrm{i}/\tau)} \tag{5}$$

BP 是一种特殊的二维材料，在平面上有两种不同方向的特殊形状，即扶手椅型和锯齿形。2014 年 Low 等[1]分析了单层和多层黑磷的集体电子激发，发现其等离子激元模式表现出高度的各向异性，因此它会表现出光学各向异性特性，单层 BP 的表面电导率可以用半经典的 Drude 模型来表示：

$$\varepsilon_{j}=\varepsilon_{\mathrm{r}}+\frac{\mathrm{i}\sigma_{j}}{\varepsilon_{0}\omega t} \tag{6}$$

$$\sigma_{j}=\frac{\mathrm{i}D_{j}}{\pi\left(\omega+\frac{\mathrm{i}\eta}{\hbar}\right)},D_{j}=\frac{\pi e^{2}n_{\mathrm{s}}}{m_{j}} \tag{7}$$

式中，σ 是表面电导率，j 表示取向，m 表示电子质量，n_{s} 是电子掺杂浓度，D 是 Drude 重量。沿着 x 轴和 y 轴方向的电子质量可以由以下方程描述：

$$m_{cx}=\frac{\hbar^{2}}{\frac{2\gamma^{2}}{\Delta}+\eta_{\mathrm{c}}},m_{cy}=\frac{\hbar^{2}}{2\nu_{\mathrm{c}}} \tag{8}$$

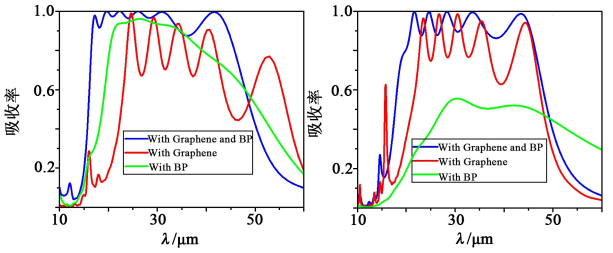
式中，$\Delta=2\ \mathrm{eV}$，$\eta_{\mathrm{c}}=\hbar^{2}/0.4m_{0}$，$\upsilon_{\mathrm{c}}=\hbar^{2}/1.4m_{0}$，$\gamma=\frac{4a}{\pi}eVm_{0}$，$\alpha$ 是布里渊区的宽度。由于在单层黑磷中 m_{cx} 与 m_{cy} 不同，导致在单层黑磷中 x 轴和 y 轴方向表面电导率并不相同，同时有效介电常数也不相同，其表面等离子激元模式表现出高度的各向异性，Zigzag 和 Armchair 情况下吸收率也会有差异。

2.2　结构特性

对于三种隔离层结构的吸收器在 TM 和 TE 偏振中的吸收光谱图分别如图 4(a)和(c)所示，分别是石墨烯-hBN(GH)，hB-黑磷(HB)和石墨-hBN-黑磷(GHB)。在 TM 偏振下隔离层为 GH 时，MA 产生六个吸收峰，其中一个吸收峰的吸收率仅 29%，其余五个吸收峰均大于 60%，最高吸收为 98%；当隔离层为 HB 时，MA 在 20～50 μm 的红外波长下产生宽带吸收，平均吸收率大于 80%；当隔离层为 GHB 时 MA 产生具有六个吸收峰，其中一个吸收峰从 29%增加到 98%，吸收器的平均吸收率大于 95%；在 TE 偏振下，当隔离层为 GH 时，吸收器产生了六个吸收峰，其中一个吸收峰为 62%，其余吸收峰均大于 90%；当隔离层为 HB 时，吸收器在 30～40 μm 波长中产生了 50%的平均吸收；当隔离层为 GHB 时，其中一个吸收峰消失，其余五个吸收峰峰谷位置吸收率显著提高。

由于光与多层黑磷之间局域表面等离子激元的耦合作用以及单层 BP 分子结构的各向异性导致了在 TM 偏振和 TE 偏振下不同形式的吸收，同时多

个单层的石墨烯块的组合也会产生一定程度的各向异性特性。石墨烯和 BP 的组合结构在保持吸收带宽的同时显著提高了吸收效率，这是由于当石墨烯表面等离子体波的平面内波矢量与由 BP 膜散射的衍射级波矢量匹配时发生共振。该超结构与金属衬底形成了类法布里-珀罗(F-P)腔共振造成了吸收增强[22]。

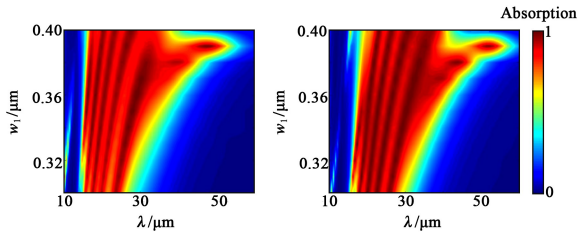


(a) TM 偏振 (b) TE 偏振

图 4 在两种偏振下三种不同间隔层吸收器的吸收光谱

3 可调谐特性

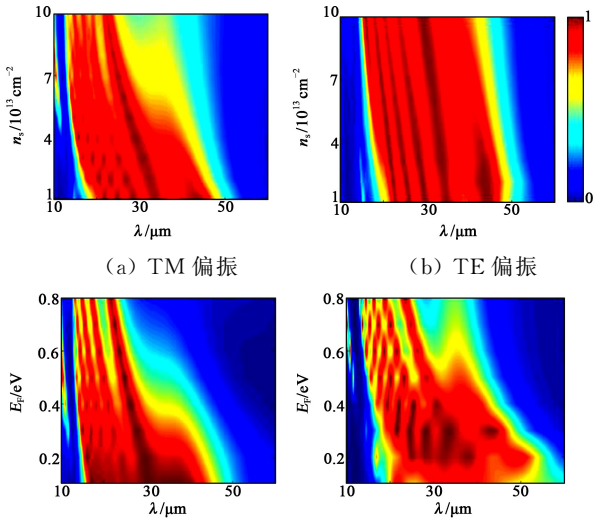
吸收器吸收带宽和吸收的动态调谐方法一共有两种。一种调谐方法是尝试通过改变吸收器的结构来调节吸收，通过 GHB 块的宽度进行调谐。假设保持每个相邻的 CHB 层从底部到顶部减少 0.04 μm，然后将底部 GHB 层的宽度 w_1 从 0.3 μm 逐渐变化为 0.4 μm。吸收器在 TM 偏振和 TE 偏振中的吸收光谱变化如图 5 所示。两种偏振下吸收光谱的变化近似相同，随着 GHB 层宽度的增加吸收谱有红移的现象，且吸收峰的带宽逐渐增加，在 $w_1=0.38$ μm 时吸收带宽达到最大，当 w_1 继续增加时吸收带宽反而下降，这是因为最底 GHB 层的宽度在一个单元周期内几乎占满，无法激发 LSPR 造成吸收带宽减小。



(a) TM 偏振 (b) TE 偏振

图 5 最底部 GHB 的宽度 w_1 到最顶部 GHB 的宽度 w_6 依次递减 0.04 μm，分别在两种偏振下改变 GHB 块的宽度 w_1 对 MA 吸收光谱的影响

另一种更方便的调谐方法是动态调谐，通过改变石墨烯的费米能级 E_F 和黑磷的电子掺杂浓度 n_s 来实现。图 6(a)和(b)分别显示了在 TM 和 TE 极化中，n_s 从 1×10^{13} cm^{-2} 到 10×10^{13} cm^{-2} 变化的吸收光谱。随着 n_s 的逐渐增加，在两种极化下都表现出蓝移的趋势。不同之处在于，在 TM 偏振下，当 n_s 大于 7×10^{13} cm^{-2} 时，吸收峰和吸收带宽呈现减弱趋势，且吸收峰的宽度逐渐变小而 TE 极化的吸收和吸收带宽没有显著变化。



(a) TM 偏振 (b) TE 偏振

(c) TM 偏振 (d) TE 偏振

图 6 改变黑磷和石墨烯的电子掺杂浓度 n_s 和费米能级的吸收光谱

图 6(c)和(d)分别显示了在 TM 和 TE 偏振下，石墨烯的 E_F 从 0.1～0.8 eV 变化的吸收光谱。在两种偏振下，吸收带也随着 E_F 的增加呈现蓝移趋势。当 TM 偏振大于 0.3 eV 时，宽带吸收逐渐变为具有四个吸收峰的窄带吸收。在 TE 偏振下，随着 E_F 从 0 eV 上升到 0.4 eV，平均吸收先增加后减少，当 E_F 大于 0.4 eV 时，逐渐演变为具有四个吸收峰的窄带吸收，吸收峰的宽度逐渐变窄。无论是 n_s 变化还是 E_F 变化，MA 都表现出各向异性，这为宽带可调谐偏振选择性光吸收器件提供了理论思路。

最后，对比了其他不同结构、相同类型红外吸收器，如表 1 所示，在本文所提出的多层石墨烯-黑磷中远红外吸收器不仅在平均吸收率、带宽上具有优势，同时该器件还具有双参数动态可调谐吸收光谱的特征，即改变石墨烯的 E_F 和黑磷的 n_s 可以调整吸收。

表 1　不同结构红外吸收器性能对比

参考文献	结构	工作波长/μm	带宽/μm	平均吸收率/%	可调性
[23]	Si-Ag-Si_3N_4-SiO_2	9.1～24.1	15	97.2	非动态可调
[24]	Si(undoped)-Si(doped)	1～15	14	92.6	非动态可调
[9]	Au-Al_2O_3-Au-SiO_2-Au	7～16	6.76	95.17	非动态可调
[25]	Ti-Ge-Ti	8.5～12.5	4	86	非动态可调
[26]	Ti-Si-SiO_2-Ti	14～26.3	12.3	90	非动态可调
[27]	Graphene-BP-Al_2O_3	13.71～16.62	2.91	Above 90	双参数可调
[28]	Graphene disk	About 7.5～15	About 7.5	Above 95	单参数可调
本研究	Graphene-hBN-BP	16.6～46.6	30	96	双参数可调

4　结论

本文提出了一种多层石墨烯-hBN-黑磷吸收器，用于实现红外波长范围内的宽带吸收。数值模拟结果显示，TE 偏振下，吸收器波长在 20.8～45.34 μm 范围内可实现 94% 的宽带平均吸收性；TM 偏振下，波长在 16.6～44.6 μm 范围内可以实现 96% 的宽带平均吸收。这两种偏振状态下覆盖了中远红外部分波段，并且表现出一定程度的宽带各向异性吸收特性。阻抗匹配理论和局域表面等离子体共振耦合效应可以解释吸收器的完美吸收现象。通过调节 GHB 的宽度、石墨烯的费米能级和黑磷的掺杂浓度，可以在 TM 和 TE 偏振状态下调谐吸收带，从而实现可调谐的各向异性吸收特性。该研究成果有望在偏振选择性吸收、红外伪装和可调谐光学器件等领域得到广泛应用。

参考文献：

[1] Low T, Roldán R, Wang H, et al. Plasmons and screening in monolayer and multilayer black phosphorus[J]. Phys. Rev. Lett., 2014, 113(10): 106802.

[2] Guo Q S, Li C, Deng B C, et al. Infrared nanophotonics based on graphene plasmonics[J]. Acs Photon., 2017, 4(12): 2989-2999.

[3] Yao W, Tang L, Wang J, et al. Spectrally and spatially tunable terahertz metasurface lens based on graphene surface plasmons[J]. IEEE Photon. J., 2018, 10(4): 1-8.

[4] Yao W, Tang L, Wang J, et al. Anomalous redshift of graphene absorption induced by plasmon-cavity competition [J]. Opt. Express, 2020, 28(25): 38410-38418.

[5] Yao W, Tang L, Nong J, et al. Electrically tunable graphene metamaterial with strong broadband absorption [J]. Nanotechnol., 2020, 32(7): 075703.

[6] Sarkar D, Liu W, Xie X J, et al. MoS_2 field-effect transistor for next-generation label-free biosensors[J]. Acs Nano., 2014, 8(4): 3992-4003.

[7] Wang Y, Cui D J, Wang Y, et al. Electrically and thermally tunable multifunctional terahertz metasurface array[J]. Phys. Rev. A, 2022, 105(3): 033520.

[8] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Phys. Rev. Lett., 2008, 100(20): 207402.

[9] Huang X J, Zhou Z L, Cao M, et al. Ultra-broadband mid-infrared metamaterial absorber based on multi-sized resonators [J]. Materials, 2022, 15(15): 5411.

[10] Qin Z, Meng D J, Yang F M, et al. Broadband long-wave infrared metamaterial absorber based on single-sized cut-wire resonators[J]. Opt. Express, 2021, 29(13): 20275-20285.

[11] Feng H, Xu Z X, Li K, et al. Tunable polarization-independent and angle-insensitive broadband terahertz absorber with graphene metamaterials[J]. Opt. Express, 2021, 29(5): 7158-7167.

[12] Zhang M, Song Z Y. Switchable terahertz metamaterial absorber with broadband absorption and multiband absorption [J]. Opt. Express, 2021, 29(14): 21551-21561.

[13] Liu H T, Wu B Y, Yang B, et al. Gradient index effect assisted anisotropic broadband absorption in a-MoO_3 metamaterial[J]. Appl. Opt., 2023, 62(11): 2711-2719.

[14] Luxmoore I J, Gan C H, Liu P Q, et al. Strong coupling in the far-infrared between graphene plasmons and the surface optical phonons of silicon dioxide[J]. Acs Photon., 2014, 1(11): 1151-1155.

[15] Deng T L, Zheng Z P, Bian L, et al. Ultra-broadband polarisation-insensitive far infrared absorber based on an umbrella tungsten array structure [J]. Opt. Communications, 2023, 545(8): 129651.

[16] Ishii T, Sato T. Growth of single crystals of hexagonal boron nitride-ScienceDirect[J]. J. of Crystal Growth, 1983, 61(3): 689-690.

[17] Hosseinbeig A, Pirooj A, Zarrabi F B. A reconfigurable subwavelength plasmonic fano nano-antenna based on split ring resonator[J]. J. of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 423: 203-207.

[18] Kim K, Choi J Y, Kim T, et al. A role for graphene in silicon-based semiconductor devices[J]. Nature, 2011, 479(7373): 338-344.

[19] Zhao X L, Yuan C, Zhu L, et al. Graphene-based tunable terahertz plasmon-induced transparency metamaterial[J]. Nanoscale, 2016, 8(33): 15273-15280.

[20] Falkovsky L A, Varlamov A A. Space-time dispersion of graphene conductivity[J]. European Phys. J. B., 2007, 56(4): 281-284.

[21] Wang B, Zhang X, Yuan X, et al. Optical coupling of

surface plasmons between graphene sheets[J]. Appl. Phys. Lett., 2012, 100(13): 131111.

[22] Xiao G, Lin Z, Yang H, et al. Tunable and anisotropic perfect absorber using graphene-black phosphorus nanoblock [J]. Optics Express, 2022, 30(13): 23198-23207.

[23] Yang H, Li Z, Mei Z, et al. Background insensitive polarization-independent ultra-broadband metamaterial perfect absorber in mid-infrared regions[J]. IEEE Photon. J., 2022, 14(5): 1-6.

[24] Abdelsalam M, Swillam M A. Ultra-broadband MIR super absorber using all silicon metasurface of triangular doped nanoprisms[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 14802.

[25] Shi X, Hou E, Liang Z, et al. Broadband metamaterial absorber based on hybrid multi-mode resonance in mid-wave and long-wave infrared region[J]. Results in Physics, 2022, 42: 105972.

[26] Chen S, Li Z, Wu L, et al. Ultra-long-wave infrared broadband absorber based on a nano-resonant ring structure [J]. Optical Materials Express, 2023, 13(6): 1579-1588.

[27] Cai Y, Xu K, Feng N, et al. Anisotropic infrared plasmonic broadband absorber based on graphene-black phosphorus multilayers[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3101-3112.

[28] Abbasi M, Biabanifard M, Abrishamian M S. Design of symmetrical wide-angle graphene-based mid-infrared broadband perfect absorber based on circuit model [J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2019, 36(8): 100729.

作者简介：

肖功利(1975—)，男，博士，研究员，硕士生导师，主要从事微纳光电子方面的研究；

杨宏艳(1972—)，女，博士，研究员，硕士生导师，主要从事超材料与超表面方面的研究。