

激光与光电子学进展

基于石墨烯的吸收效率可调超材料完美吸收器

王超素¹, 江孝伟^{1,2*}

¹衢州职业技术学院信息工程学院, 浙江 衢州 324000;

²北京工业大学光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 利用金属纳米柱阵列和石墨烯构造出一种吸收效率可调的超材料完美吸收器(MPA),并基于时域有限差分法进行了优化与分析。仿真结果表明,通过调谐石墨烯的化学势可实现吸收效率调谐范围为0.5的MPA,且MPA的最高吸收效率可达到0.97,原因是入射光在MPA中同时激发了表面等离子激元(SPP)共振和磁激元(MP)共振。分析MPA结构参数对其吸收特性的影响时发现,纳米柱的周期会影响SPP的共振波长,金属纳米柱的厚度和半径则会影响MP的共振波长,因此,可通过改变纳米柱阵列的周期、纳米柱的厚度和半径实现MPA吸收波长的调谐。

关键词 材料; 超导体; 石墨烯; 吸收效率

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1516023

Metamaterial Perfect Absorber with Adjustable Absorptive Efficiency Based on Graphene

Wang Chaosu¹, Jiang Xiaowei^{1,2*}

¹College of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou, Zhejiang 324000, China;

²Key Laboratory of Opto-Electronics Technology Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124 China

Abstract In this study, a metal nanopillar array and graphene are used to develop a metamaterial perfect absorber (MPA) with adjustable absorption efficiency, which is analyzed and optimized using a finite difference time domain method. Simulation results show that by tuning the chemical potential of graphene, an MPA with an absorption efficiency tuning range of 0.5 can be achieved, with the highest absorption efficiency of the MPA reaching 0.97. This is because incident light simultaneously excites both surface plasmon polaritons (SPP) resonance and magnetic polaritons (MP) resonance in the MPA. Analyzing the effect of the MPA's structural parameters on its absorption characteristics, the period of the nanopillars affects the resonance wavelength of SPP, and the thickness and radius of metal nanopillars affect the resonance wavelength of the MP. Therefore, the MPA's absorption wavelength can be tuned by varying nanopillar arrays' period, thickness, and radius.

Key words materials; metamaterials; graphene; absorption efficiency

OCIS codes 160.3918; 160.3900; 300.1030

收稿日期: 2021-01-25; 修回日期: 2021-02-25; 录用日期: 2021-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(61575008, 61650404)、江西省自然科学基金(20171BAB202037)、江西省教育厅科技项目(GJJ170819)、浙江省教育厅科研项目(Y201941404)、衢州市科技计划(2019K20)

通信作者: *JosephJiangquzhi@126.com

1 引言

相比传统的电磁波吸收器,超材料完美吸收器(MPA)具有结构简单、体积小、吸收效率高特点,得到了人们的广泛关注^[1-2]。目前,MPA的吸收光谱不仅包括微波和太赫兹波段,还可以实现对红外和可见光的完美吸收^[3-6]。但当MPA的各项参数固定后,其吸收特性就不再变化,从而限制了MPA在一些领域的应用,如气体探测、化学探测^[7]。

为了解决上述问题,人们提出了多种解决方法,最先利用可相变材料,如VO₂、Ge₂Sb₂Te和其他金属或介质材料构造出吸收特性可调的MPA,如Mou等^[8]利用Ge₂Sb₂Te₅和Al构造出吸收效率可调的MPA,测试结果表明,该MPA对不同波长的吸收效率会随温度的变化而变化,且吸收带宽(吸收效率大于80%)也会发生变化;Lei等^[9]利用VO₂和金属Cr设计出吸收特性可调的MPA,模拟计算结果表明,当温度从25℃升到80℃时,MPA在2~5μm波长之间的吸收效率会发生明显变化。此外,可以利用石墨烯设计出吸收特性可调的MPA。石墨烯是一种蜂窝状有序排列的单C原子材料,具有很高的电子迁移速率和机械强度,且其电导率可通过外加电压进行控制,因此可基于石墨烯材料设计出吸收特性可调的MPA^[10-11]。陈浩等^[12]将石墨烯置于二维金属光栅和金属衬底之间,形成了一个吸收效率可调的MPA。计算结果表明,当石墨烯的化学势 u_c 从0.1 eV增加到1 eV后,MPA的吸收效率会从0.6下降到0.3。Zhao等^[13]直接将石墨烯铺在二维介质光栅上,构成了一个吸收波长可调的MPA。模拟计算结果表明,石墨烯化学势 u_c 的变化会使石墨烯的电导率发生变化,进而实现MPA吸收波长的可调谐。江孝伟等^[14]通过集成石墨烯与金属光栅设计出了吸收特性可调的MPA,模拟计算结果表明,当 u_c 从0.1 eV增加到0.65 eV时,该MPA的吸收效率调谐范围约为0.3。

尽管相变材料和石墨烯材料都能实现MPA吸收特性的调谐,但利用相变材料实现MPA吸收调谐时需要给MPA加温,且温度需要达到上百摄氏度,这不利于实际应用^[15]。目前利用石墨烯实现的MPA可调谐吸收效率较低,没有达到完美吸收,而实现完美吸收在军事、太阳能电池等领域中极为关键^[16-17]。因此,本文提出了一种由金属衬底、SiO₂介质层、石墨烯、金属纳米柱构成的吸收效率可调

MPA。基于时域有限差分法(FDTD)对该MPA进行了优化和分析,最终使MPA实现了完美吸收,吸收效率可达到0.97;且当石墨烯的 u_c 从0.1 eV增加到0.9 eV时,MPA的吸收效率调谐范围为0.5,该研究可为设计和制备更高性能的吸收特性可调MPA提供理论基础。

2 材料参数及器件结构

2.1 材料参数

单层石墨烯的光学特性可用其表面的电导率 σ_g 表示,而 σ_g 可用Kubo公式定量描述为^[18]

$$\sigma_{\text{intra}} = i \frac{e^2 k_B T}{\pi^2 (\omega + i\Gamma)} \left\{ \frac{u_c}{k_B T} + 2 \ln \left[\exp \left(-\frac{u_c}{k_B T} \right) + 1 \right] \right\}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{inter}} = i \frac{e^2}{4\pi\hbar} \ln \left[\frac{2|u_c| - \hbar(\omega + i\Gamma)}{2|u_c| + \hbar(\omega + i\Gamma)} \right], \quad (2)$$

式中, σ_{intra} 为带内跃迁电导率, σ_{inter} 为带间跃迁电导率, $\sigma_g = \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}$, e 为单个电子的电荷量, \hbar 为约化普朗克常数, k_B 为玻尔兹曼常数, ω 为入射光的角频率, T 为温度, $\Gamma = 1/(2\tau)$ 为散射率, $\tau = 0.42$ ps为动量弛豫时间^[19]。实验中取 $T = 300$ °C、 $\Gamma = 0.005$ eV。可以发现,石墨烯化学势 u_c 的变化会影响石墨烯的电导率 σ_g ,而 u_c 又受外部电压 V_g 的影响,可表示为^[20]

$$u_c = \hbar v_f \sqrt{\pi(n_0^2 + a^2 |V_{\text{CNP}} - V_g|)^2}^{1/2}, \quad (3)$$

式中, v_f 为费米速度, n_0 为残留载流子的浓度, a 为与SiO₂(折射率为1.45)介电常数和厚度有关的电容率, V_{CNP} 为补偿电压。可以发现,用石墨烯作为MPA的材料时,可通过改变添加在MPA上的电压调谐MPA的吸收效率。为了保证模拟结果的可靠性,参考文献^[21]得到Au对不同波长的折射率 n 和消光系数 k ,结果如图1所示。

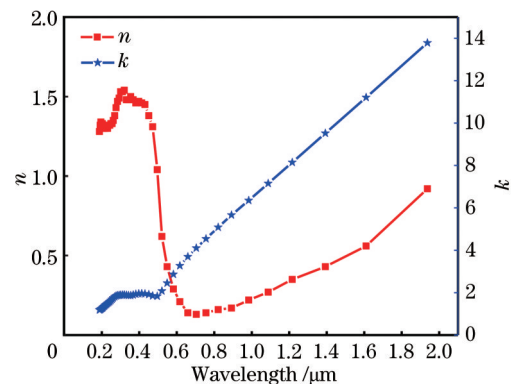


图1 Au的折射率和消光系数

Fig. 1 Refractive index and extinction coefficient of the Au

2.2 器件结构

实验设计的吸收效率可调谐 MPA 的结构由而上分别为 Au 衬底、SiO₂ 介质层、石墨烯、纳米柱阵列, 单个 MPA 的结构如图 2 所示。其中, d 为 SiO₂ 的厚度, r 和 t 分别为纳米柱的半径和厚度, x 、 y 方向的周期均为 P 。为了保证 MPA 具有高吸收效率以实现完美吸收, 使 Au 衬底的厚度为 $0.5 \mu\text{m}$, 远大于入射光的趋肤深度, 保证 MPA 的透射率为 0, 即 MPA 的吸收效率 $A=1-R$ 。其中, R 为光的反射率。可以发现, 若要使 MPA 在吸收波长处的 A 接近 1, 则必须抑制 MPA 对吸收波长的反射, 因此需优化 MPA 的结构参数, 使 MPA 的有效阻抗与自由空间的阻抗匹配, 进而使 MPA 对吸收波长的反射率接近 0^[22]。

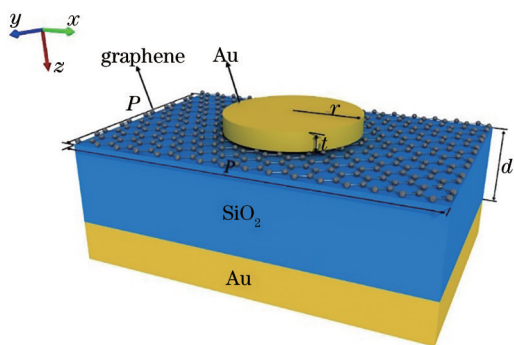


图 2 MPA 的结构

Fig. 2 Structure of the MPA

3 实验结果与讨论

3.1 MPA 完美吸收的实现

基于商业软件 FDTD 建立了图 2 中的 MPA 单

元结构, 然后在 MPA 的 x 、 y 方向分别添加周期性边界条件, 在 z 方向添加完美匹配层边界条件。将光源设为平面波, 光的偏振设为 TM 偏振, 入射角为 0° 。模拟计算结果表明, 当 $P=1 \mu\text{m}$ 、 $t=0.1 \mu\text{m}$ 、 $r=0.15 \mu\text{m}$ 、 $d=0.7 \mu\text{m}$ 、 $u_c=0.1 \text{ eV}$ 时, MPA 在 $1.3056 \mu\text{m}$ 波长处实现了近完美吸收, 吸收效率 $A=0.97$, 如图 3 所示。

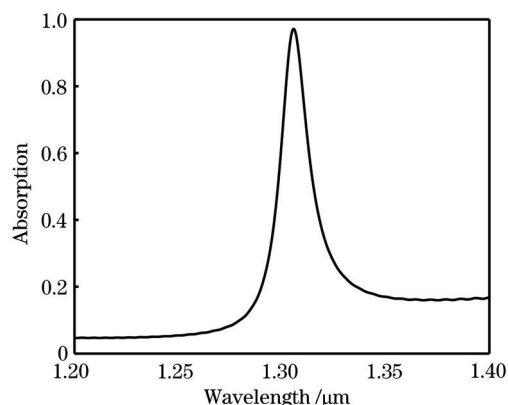


图 3 MPA 的吸收光谱

Fig. 3 Absorption spectrum of the MPA

为了探究 MPA 实现完美吸收的内在物理机制, 计算了 MPA 在吸收波长处的磁场分布, 结果如图 4(a) 所示。可以发现, MPA 在吸收波长处能实现超高吸收的原因是激发了表面等离子激元 (SPP) 共振^[23]; 且除了 SPP 共振, 在磁场分布中还可以发现磁激元 (MP) 共振, 如在纳米柱边缘处的点, 原因是能量聚集在纳米柱的边缘^[24]。图 4(b) 为 $z=1.3 \mu\text{m}$ (纳米柱与空气交界面) 时, MPA 在 x - y 平面的磁场分布。可以发现, MPA 在吸收波长处实现高吸收是 SPP 共振和 MP 共振共同作用的结果。

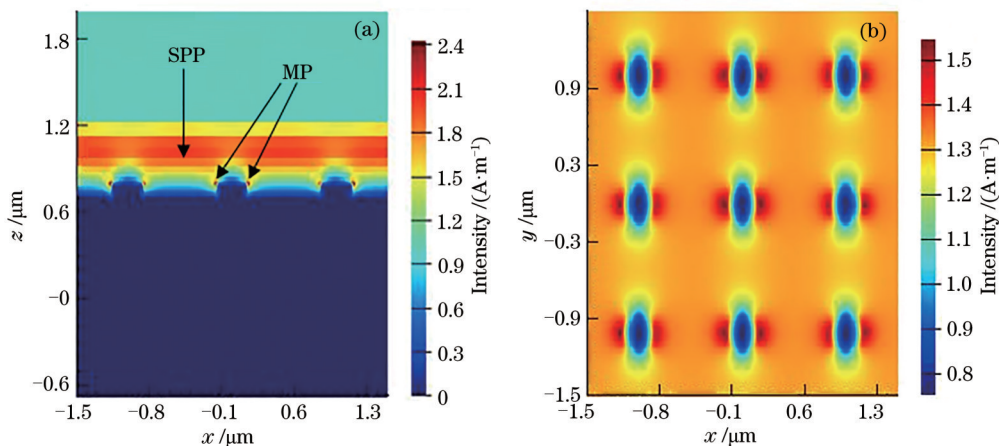


图 4 MPA 在吸收波长处的磁场分布。(a) x - z 平面; (b) x - y 平面

Fig. 4 Magnetic field distribution of the MPA at absorption wavelength. (a) x - z plane; (b) x - y plane

3.2 MPA 吸收效率的可调谐

为了验证利用石墨烯实现MPA吸收效率可调谐的有效性,模拟了石墨烯化学势 u_c 发生变化时,MPA在吸收波长 $1.3056 \mu\text{m}$ 处的吸收效率,结果如图 5 所示。可以发现,当 u_c 从 0.1 eV 增加到 0.9 eV 时,MPA在吸收波长处的吸收效率从 0.97 下降到 0.47 ,吸收效率的调谐范围为 0.5 。

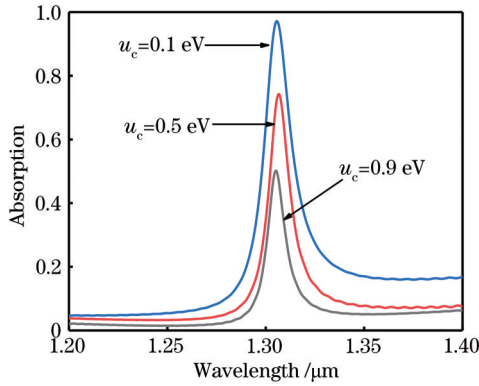


图 5 u_c 对 MPA 吸收效率的影响

Fig. 5 Effect of u_c on the absorption efficiency of the MPA

石墨烯的吸收效率 A_g 可表示为

$$A_g = \frac{\iiint \omega(x, y, z) dV}{0.5c_0 |E_{inc}|^2 S}, \quad (4)$$

式中, $\omega(x, y, z)$ 为结构中的能量分布, c_0 为真空中的光速, S 为入射截面积, E_{inc} 为入射光的电场强度。其中, $\omega(x, y, z)$ 可表示为

$$\omega(x, y, z) = 0.5\epsilon_0\omega\epsilon_{imag} |E(x, y, z)|^2, \quad (5)$$

式中, ϵ_0 为空气的介电常数, ϵ_{imag} 为石墨烯的介电常数虚部, $E(x, y, z)$ 为材料覆盖区域某点的电场强度^[25]。可以发现,在其他条件不变的情况下,MPA

的吸收效率会随 u_c 的增加逐渐下降,原因是随着 u_c 的增加,石墨烯介电常数的虚部 ϵ_{imag} 逐渐减小^[14],导致石墨烯吸收效率 A_g 下降,最终会影响 MPA 的吸收效率。

3.3 结构参数对 MPA 吸收特性的影响

为了分析 MPA 结构参数对 MPA 吸收特性的影响,模拟分析了纳米柱参数对 MPA 吸收特性的影响,结果如图 6 所示。纳米柱半径 r 对 MPA 吸收特性的影响如图 6(a) 所示,可以发现,随着 r 的增加,MPA 的吸收波长出现了红移现象。MPA 在共振波长处实现了完美吸收,且除了 SPP 共振外还有 MP 共振。当 MPA 出现 MP 共振时,可将 MPA 结构等效为电阻电感电容(RLC)电路,利用 RLC 电路模型可分析和预测 MP 的共振波长^[26]。

将 MPA 结构等效为 RLC 电路后,MP 的共振波长可表示为

$$\lambda_{MP} = 2\pi c_0 \sqrt{(L_m + L_e)C_m}, \quad (6)$$

式中, λ_{MP} 为 MP 的共振波长, L_m 为纳米柱和金属衬底在光照射下产生的互感, L_e 为纳米柱和金属衬底在光照射下产生的自感, C_m 为纳米柱与金属衬底之间形成的电容。增加 r 相当于增大纳米柱与金属衬底形成电容的有效面积,导致 C_m 变大,从而使 MP 的共振波长 λ_{MP} 发生红移。从图 6(a) 中还可以发现,当 r 从 $0.1 \mu\text{m}$ 增加到 $0.2 \mu\text{m}$ 时,MPA 的吸收峰会先增大后减小。原因是当 $r=0.15 \mu\text{m}$ 时,MPA 的有效阻抗刚好与自由空间的阻抗匹配,即 MPA 的阻抗实部接近 1,虚部接近 0,有效抑制了 MPA 对光的反射,降低了反射率 R ,此时,MPA 的吸收效率最高^[27]。但当 r 变为 $0.1 \mu\text{m}$ 或 $0.2 \mu\text{m}$ 时,MPA 的有效阻抗与自由空间的阻抗不匹配,MPA 对光的反射率 R 增大,此时,MPA 的吸收效率会减小。

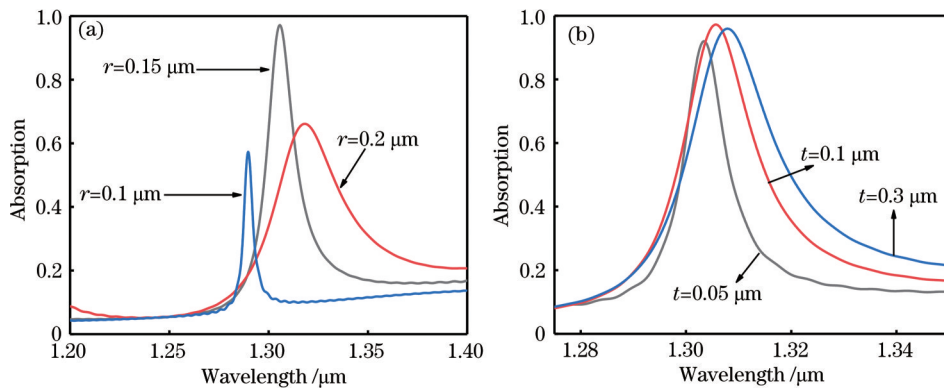


图 6 纳米柱参数对 MPA 吸收特性的影响。(a) r ; (b) t

Fig. 6 Effect of nanocolumn parameters on the absorption characteristics of the MPA. (a) r ; (b) t

从图 6(b)可以发现,MPA 的吸收波长随纳米柱厚度 t 的增加出现了蓝移现象。当 t 为 $0.3 \mu\text{m}$ 时,MP 的波长 λ_{MP} 为 $1.303 \mu\text{m}$;当 t 减小到 $0.05 \mu\text{m}$ 后,MP 的波长 λ_{MP} 反而增加到 $1.308 \mu\text{m}$ 。原因是随着 t 的增加自感 L_e 变小,共振波长 λ_{MP} 会出现蓝移现象^[28]。自感 L_e 可表示为

$$L_e = \frac{2r}{\gamma \epsilon_0 t \omega_p}, \quad (7)$$

式中, ω_p 为 Au 的等离子体频率, γ 为 Au 的阻尼系数。

此外,还模拟计算了周期 P 对 MPA 吸收特性的影响,结果如图 7 所示。可以发现,MPA 的吸收波长随 P 的增加逐渐增大。当 $P=1 \mu\text{m}$ 时,MPA 的吸收波长为 $1.3056 \mu\text{m}$;当 $P=1.04 \mu\text{m}$ 时,MPA 的吸收波长增加到了 $1.3456 \mu\text{m}$ 。原因是 SPP 共振波长受周期影响,可表示为^[29]

$$\frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda_{\text{SPP}}} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sin \theta + \frac{2\pi}{P} m, \quad (8)$$

式中, θ 为光的入射角,模拟计算时取为 0° , λ_{SPP} 为 SPP 的共振波长, λ_0 为光的入射波长, m 为整数, n_{eff} 为 SPP 的有效折射率。可以发现,当其他条件保持不变,仅增加 P 会导致 λ_{SPP} 增加,进而使 MPA 的吸收波长发生红移。

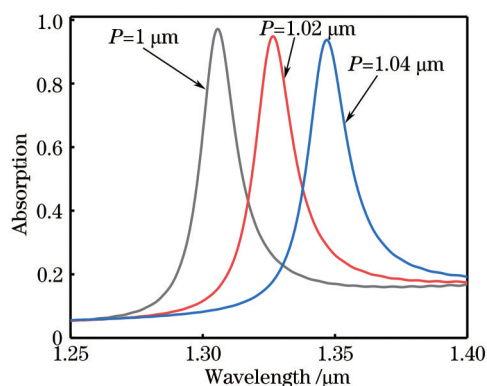


图 7 P 对 MPA 吸收特性的影响

Fig. 7 Effect of P on absorption characteristics of the MPA

4 结 论

利用石墨烯材料、金属纳米柱阵列以及金属衬底设计出了一种吸收效率可调谐的 MPA,并用 FDTD 软件对该 MPA 进行了分析与优化。模拟计算结果表明,当 $P=1 \mu\text{m}$ 、 $t=0.1 \mu\text{m}$ 、 $r=0.15 \mu\text{m}$ 、 $d=0.7 \mu\text{m}$ 、 $u_c=0.1 \text{eV}$ 时,MPA 在 $1.3056 \mu\text{m}$ 波长处可实现完美吸收。通过分析 MPA 在吸收波长处的磁场分布发现,MPA 能实现完美吸收是 SPP 共

振和 MP 共振共同作用的结果。当石墨烯的化学势 u_c 从 0.1eV 增加到 0.9eV 时,MPA 的吸收效率调谐范围为 0.5 。此外,当周期 P 和纳米柱半径 r 增加时,MPA 的吸收波长会出现红移现象;当纳米柱的厚度 t 增加时,MPA 的吸收波长会出现蓝移现象。本研究可为设计和制备高性能吸收效率可调的 MPA 提供理论支持。

参 考 文 献

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. A perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [2] Liao Y L, Zhao Y. Ultra-narrowband dielectric metamaterial absorber with ultra-sparse nanowire grids for sensing applications[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 1480.
- [3] Ding F, Cui Y X, Ge X C, et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber[J]. Applied Physics Letters, 2011, 100(10): 103506.
- [4] Liu B, Tang C J, Chen J, et al. Dual-band light absorption enhancement of monolayer graphene from surface plasmon polaritons and magnetic dipole resonances in metamaterials[J]. Optics Express, 2017, 25(10): 12061-12068.
- [5] Tuan T S, Hoa N T Q. Numerical study of an efficient broadband metamaterial absorber in visible light region[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(3): 1-10.
- [6] Sang T, Wang R, Li J L, et al. Approaching total absorption of graphene strips using a c-Si subwavelength periodic membrane[J]. Optics Communications, 2018, 413: 255-260.
- [7] Zhong M. Design and measurement of a narrow band metamaterial absorber in terahertz range[J]. Optical Materials, 2020, 100: 109712.
- [8] Mou N L, Liu X L, Wei T, et al. Large-scale, low-cost, broadband and tunable perfect optical absorber based on phase-change material[J]. Nanoscale, 2020, 12(9): 5374-5379.
- [9] Lei L, Lou F, Tao K Y, et al. Tunable and scalable broadband metamaterial absorber involving VO_2 -based phase transition[J]. Photonics Research, 2019, 7(7): 734-741.
- [10] Fan C Z, Tian Y C, Ren P W, et al. Realization of THz dualband absorber with periodic cross-shaped graphene metamaterials[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(7): 076105.

- [11] He X J, Yao Y, Zhu Z H, et al. Active graphene metamaterial absorber for terahertz absorption bandwidth, intensity and frequency control[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(4): 1031-1042.
- [12] Chen H, Zhang X X, Wang H, et al. Near-infrared absorption of graphene-metal nanostructure based on magnetic polaritons[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(11): 118101.
陈浩, 张晓霞, 王鸿, 等. 基于磁激元效应的石墨烯-金属纳米结构近红外吸收研究[J]. *物理学报*, 2018, 67(11): 118101.
- [13] Zhao Z Y, Li G H, Yu F L, et al. Sub-wavelength grating enhanced ultra-narrow graphene perfect absorber[J]. *Plasmonics*, 2018, 13(6): 2267-2272.
- [14] Jiang X W, Wu H, Yuan S C. Enhancement of graphene three-channel optical absorption based on metal grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(13): 138101.
江孝伟, 武华, 袁寿财. 基于金属光栅实现石墨烯三通道光吸收增强[J]. *物理学报*, 2019, 68(13): 138101.
- [15] Liu Z M, Li Y, Zhang J, et al. Design and fabrication of a tunable infrared metamaterial absorber based on VO₂ films[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(38): 385104.
- [16] Rufangura P, Sabah C. Design and characterization of a dual-band perfect metamaterial absorber for solar cell applications[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 671: 43-50.
- [17] Iwaszczuk K, Strikwerda A C, Fan K B, et al. Flexible metamaterial absorbers for stealth applications at terahertz frequencies[J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 635-643.
- [18] Lu H, Cumming B P, Gu M. Highly efficient plasmonic enhancement of graphene absorption at telecommunication wavelengths[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3647-3650.
- [19] Zhang L, Tang L L, Wei W, et al. Enhanced near-infrared absorption in graphene with multilayer metal-dielectric-metal nanostructure[J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20002-20009.
- [20] Li X B, Lu W B, Liu Z G, et al. Dynamic beam-steering in wide angle range based on tunable graphene metasurface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(18): 184101.
李小兵, 陆卫兵, 刘震国, 等. 基于可调石墨烯超表面的宽角度动态波束控制[J]. *物理学报*, 2018, 67(18): 184101.
- [21] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, 6(12): 4370-4379.
- [22] Li W C, Zhou X, Ying Y, et al. Polarization-insensitive wide-angle multiband metamaterial absorber with a double-layer modified electric ring resonator array[J]. *AIP Advances*, 2015, 5(6): 067151.
- [23] Zhao B, Zhao J M, Zhang Z M. Resonance enhanced absorption in a graphene monolayer using deep metal gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(6): 1176-1185.
- [24] Yu W W, Lu Y, Peng F, et al. Localized surface plasmon resonance based tunable dual-band absorber within 1–10 μm[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(6): 790-797.
俞伟伟, 卢玥, 彭芳, 等. 基于等离子体共振 1~10 μm 波段内可调节的双波段超吸收研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(6): 790-797.
- [25] Ren Y Z. Research on the optical absorption characteristics based on molybdenum disulfide-grating composite structure[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019: 15-35.
任永泽. 基于二硫化钼-光栅复合结构的光学吸收特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019: 15-35.
- [26] Feng R, Qiu J, Liu L H, et al. Parallel LC circuit model for multi-band absorption and preliminary design of radiative cooling[J]. *Optics Express*, 2014, 22(107): A1713-A1724.
- [27] Huang H L, Xia H, Guo Z B, et al. Design of broadband metamaterial absorbers for permittivity sensitivity and solar cell application[J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34(11): 117801.
- [28] Wu D, Li R, Liu Y, et al. Ultra-narrow band perfect absorber and its application as plasmonic sensor in the visible region[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12(1): 427.
- [29] Wang R. Guided mode resonance and extraordinary transmission in subwavelength metallic gratings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 20-30.
王茹. 亚波长金属光栅的导模共振和异常透射特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 20-30.