

DOI:10.16136/j.joel.2023.05.0328

高平坦度可调谐多通道吸收器的优化设计

闵雨龙, 崔婉婷, 陈露, 赵洪霞*

(宁波工程学院 电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315016)

摘要: 为了提升多通道吸收器的平坦度和光谱特性的可调性, 本文构建了一种硅基底/铝底板/银单缝/石墨烯/二氧化硅(SiO_2)介质层的五层结构多通道吸收器。不但吸收光谱特性易调谐, 各通道平坦度也可提升到 2.84 dB。基于电磁场时域有限差分法(finite-difference time-domain, FDTD)从理论上分析了结构设计尺寸对吸收光谱的影响规律, 同时优化了设计结构。模拟结果证明, 吸收器顶层设置 SiO_2 介质层和单缝内填充 Au 均可显著增大吸收通道的平坦度, 同时通过调节顶层 SiO_2 或上层石墨烯的宽度, 可有效调谐吸收光谱通道数、通道间隔和单通道带宽; 尤其可通过改变石墨烯费米能级实施吸收频段和吸收率的需求选择, 在生化检测、环境监测和智能传感等领域均具有较好的应用前景。

关键词: 吸收器; 多通道; 石墨烯; 可调谐; 平坦度

中图分类号: O436.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)05-0466-07

Optimal design of the high flatness and tunable multi-channel absorber

MIN Yulong, CUI Wanting, CHEN Lu, ZHAO Hongxia*

(School of Electronic and Information Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315016, China)

Abstract: In order to improve the flatness and adjustability of spectral characteristic of multi-channel absorber, an electromagnetic metamaterial multi-channel absorber with five-layer structure is designed based on Si substrate/aluminum base/silver single slit/graphene/silicon dioxide dielectric. The multi-channel absorber not only has easily tuned absorption spectrum characteristic, but also improve the flatness of each channel by 2.84 dB. The influence rule of structural design parameters on the absorption spectrum is theoretically analyzed based on the finite-difference time-domain (FDTD), and the optimal structure is obtained. Simulation results show that the flatness of absorption channel can be improved by both the SiO_2 dielectric layer on the top of absorber and the single slit filled with Au, while the number of absorption spectral channels, channel spacing and single-channel bandwidth can be effectively tuned by adjusting the width of the top layer with SiO_2 or the upper layer with graphene. Especially, the absorption frequency band and absorptivity of the absorber can be selected by changing the Fermi energy level of the graphene. The absorber has potential applications in many fields such as biochemical testing, environmental monitoring and smart sensing.

Key words: absorber; multi-channel; graphene; tunable; flatness

0 引言

吸收器作为一种能量接收功能器件, 在电磁隐身^[1]、太阳能电池^[2]、传感器^[3]和滤波器^[4]等诸

多领域有着非常广泛的应用。因超材料介电常数的易于可控性, 自 2008 年 LANDY 等^[5]设计并实验获得第一台高性能超材料吸收器以来, 国内外研究人员即针对超材料吸收器进行了广泛的研

* E-mail: zhx-1228@163.com

收稿日期: 2022-08-11 修订日期: 2022-09-01

基金项目: 国家级大学生创新训练计划项目(202211058001)和浙江省基础公益研究计划项目(LGC20F050001)资助项目

究,最主要的研究方向是吸收频段的结构开发。如紫外、可见光、近红外^[6,7]和太赫兹等波段;基于导模共振、法布里-珀罗(Fabry-Pérot, FP)共振^[8]和磁偶极共振^[9]等完美吸收增强;基于相同或不同结构单元的二维叠加实现宽频段吸收结构的优化实现等方面的研究,但有关可调谐多通道吸收器的研究结果很少见报道。

而可调谐多通道吸收器由于具有超高的检测速度、高灵敏度、较好的频率选择特性等,在多光谱成像^[10]、双参量传感和高灵敏度探测等生化领域具有较好的应用前景,备受关注。本课题组于2020年^[11]基于交替光栅和石墨烯(Graphene)设计了近红外波段的多通道吸收器,不但能实现至少98%以上的吸收能力,而且设计结构简单,更易于片上集成;但通道数有限且各通道吸收率平坦度不高,还需进一步改进和优化设计。

本文基于银(Ag)单缝和石墨烯构建了一种高平坦度可调谐多通道吸收器。通过在Ag膜单缝结构上表面添加石墨烯,增强表面等离激元(surface plasmon polariton, SPP)局域模式,进而产生干涉效应,实现多通道吸收;同时在单缝内填充金(Au),再次激发SPP,且在顶层石墨烯与单缝对应区域的上下表面均添加二氧化硅(SiO₂),增强入射光波的透射,进一步增强通道吸收率和提升平坦度。尤其吸收器制备后,可通过在上层石墨烯施加门控电压改变其费米能级实现吸收光谱的特性调谐。该吸收模型不但能提升多通道平坦度和基于调控石墨烯费米能级实现调谐,而且多通道吸收是由吸收器结构材料本身的相互耦合产生,结构更简单,应用前景更广泛。

1 结构模型

图1为高平坦度可调谐多通道吸收器的结构示意图,最下层为硅(Si)基底,基底上表面沉积纳米铝(Al)反射膜,用于减弱入射光波的透射,增强吸收;紧接Al膜设置银Ag纳米单缝,单缝两侧Ag膜的宽度和厚度相等均为 d_1 和 h_1 ;单缝结构表面覆盖石墨烯,最上层添加SiO₂层,进一步抑

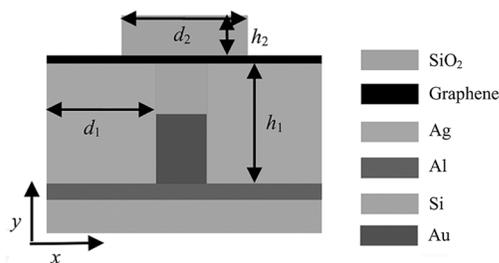


图1 多通道吸收器的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the multi-channel absorber

制入射光波在设计结构表面的反射率,进而增强设计模型共振吸收和通道平坦度, d_2 和 h_2 代表其宽度和厚度;最后将SiO₂和Au自上而下填充于单缝内,进一步激发SPP,提高通道的吸收率和平坦度。

平坦度为最大信道峰值功率与最小信道峰值功率之比, $F = 10\lg(p_{\max}/p_{\min})$ 。

2 数值模拟和机理分析

2.1 数值模拟

基于时域有限差分法(finite-difference time-domain, FDTD)模拟了横磁(transverse magnetic, TM)偏振光沿Y轴反方向垂直入射,获得如图2所示的多通道吸收器的共振光谱,其中 $h_1 = 91.8$ nm、 $d_1 = 214.5$ nm、 $h_2 = 11.4$ nm、 $d_2 = 40$ nm,单缝内SiO₂和Au的厚度和宽度均为45.9 nm和21 nm。为了防止入射光波透射,Al反射膜的厚度选择60 nm,大于其在近红外波段的趋肤深度。由此入射光波经由吸收器的吸收率可简化为 $A(\lambda) = 1 - R(\lambda)$,式中 $R(\lambda)$ 为吸收结构对入射光波的反射率。

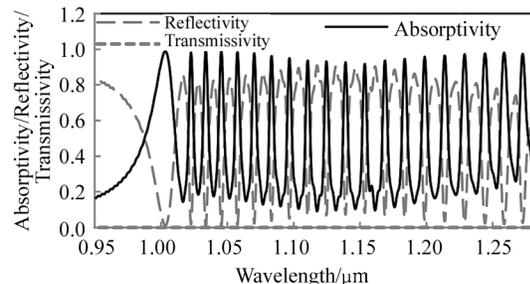


图2 多通道吸收器共振光谱

Fig. 2 Resonance spectrum of the multi-channel absorber

由图2可知,吸收结构共振光谱呈明显的多通道分布,且主要集中在1—1.3 μm频段内,左边频峰值波长为1.01 μm,半高全宽(full width at half maximum, FWHM)简称带宽为23.2 nm,吸收率高达99.8%,近完美吸收;右侧19个超窄吸收峰等间隔13.1 nm分布,单通道带宽为5.23 nm,吸收率几乎均在90%以上,且各通道平坦度可达2.84 dB,远优于文献[11]中的结果。

2.2 物理机理分析

为了明确多通道吸收光谱产生的物理机理,图3给出左边频 $\lambda_1 = 1.01$ μm和任选吸收峰A、B两共振波长 $\lambda_2 = 1.11$ μm和 $\lambda_3 = 1.24$ μm处的电场和磁场的稳定分布。由图3(a)可知,左边频 λ_1 处的电场主要集中在单缝及其对应的上层石墨烯内。而图3(b)

表明,该波长处的磁场能量主要局域在单缝内,明显符合 FP 腔共振的能量特点^[12],说明 FP 腔共振形成了该吸收峰。而 FP 腔共振源于 SPP 共振在金属单缝中产生强烈的电磁耦合,光场能量被单缝所束缚,局域的光场能量逐渐泄漏并被单缝上方石墨烯层吸收,即图 3(a)单缝对应石墨烯内的两个集中点。同时两个能量点在石墨烯表面二次激发 SPP 模式,并

沿表面传输,传输到石墨烯边界被反射,入射光和反射光满足相位匹配条件,便产生干涉效应,获得多通道等间隔吸收光谱,如图 3(c)和(d)所示,波长 λ_2 处电磁场主要分布在上层石墨烯和 Ag 膜表面,具有明显的相消干涉特性。而图 3(e)、(f)即 λ_3 处的电磁场分布中出现能量集中点,进一步佐证各干涉吸收峰源于单缝顶端能量局域点的事实。

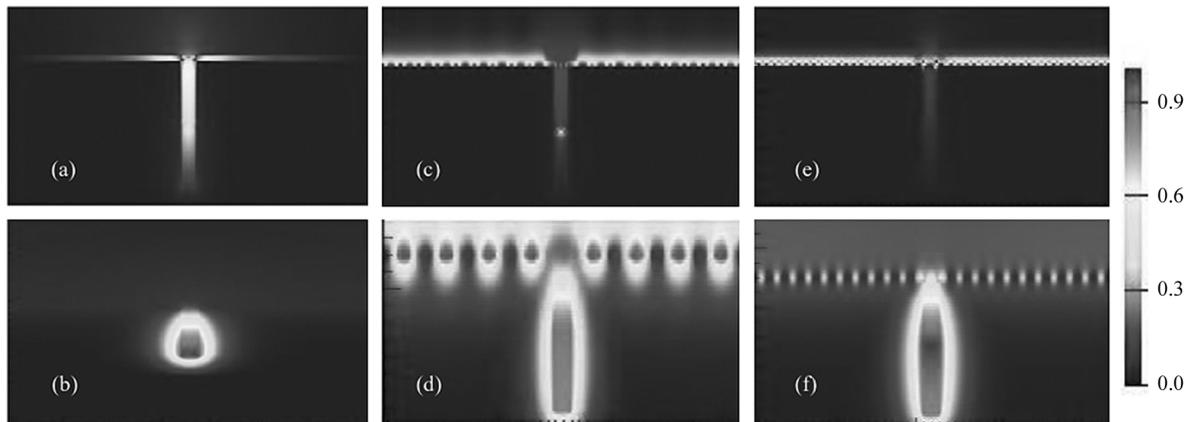


图 3 $z=0$ 平面的电场和磁场分布; $\lambda_1=1.01 \mu\text{m}$ 处的 (a) 电场和 (b) 磁场分布;
 $\lambda_2=1.11 \mu\text{m}$ 处的 (c) 电场和 (d) 磁场分布; $\lambda_3=1.24 \mu\text{m}$ 处的 (e) 电场和 (f) 磁场分布
 Fig. 3 Electromagnetic field distribution on $z=0$ plane: (a) electric field distribution and (b) magnetic field distribution with $\lambda_1=1.01 \mu\text{m}$;
 (c) electric field distribution and (d) magnetic field distribution with $\lambda_2=1.11 \mu\text{m}$;
 (e) electric field distribution and (f) magnetic field distribution with $\lambda_3=1.24 \mu\text{m}$

3 吸收器优化设计

数值模拟可知,多通道吸收光谱特性与吸收器结构设计参数直接相关,为了选择最好的吸收器结构,数值分析了光源入射角和结构参数对吸收光谱的影响和调谐规律。

3.1 吸收器上层 SiO₂ 尺寸对吸收光谱的影响规律

图 4 是设计结构顶层有无 SiO₂ 的吸收光谱,充

分证明顶层 SiO₂ 介质层对吸收光谱的作用和引入的必要性。其中 SiO₂ 介质层的宽度为 100 nm,其他结构参数与图 2 相同。由图 4 可知,吸收结构顶层设置 SiO₂ 前后,吸收光谱长波段变化明显。主要因为引入 SiO₂ 介质层使吸收结构阻抗与空气阻抗更好匹配,显著减小了入射光波的反射,吸收能量增强,激发更多谐振峰,导致吸收通道平坦度由 4.85 dB 增到 2.93 dB。

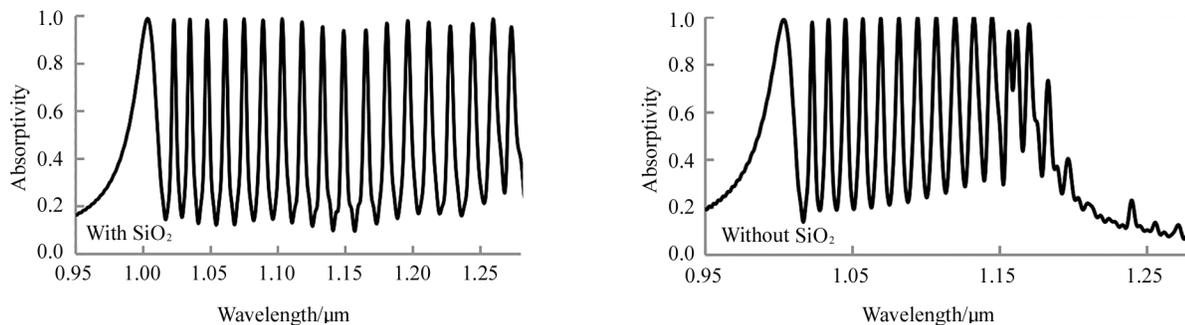


图 4 有无顶层 SiO₂ 的吸收光谱
 Fig. 4 Absorption spectra with or without upper SiO₂

为了进一步探明顶层 SiO₂ 设计尺寸对吸收光谱的影响,图 5 给出不同顶层 SiO₂ 尺寸下的吸收光谱。由图 5(a)可知,随着 SiO₂ 宽度从 20 nm 增大到 450 nm,因 FP 腔结构尺寸恒定,左边频吸收峰共振波长和带宽基本不变;但干涉吸收峰数目变化明显,由 21 个减为 14 个;并伴随通道间隔和带宽的增大。以左数第 2 个干涉峰为例,通道间隔由 9.62 nm 增大到 18.6 nm,带宽由 4.24 nm 增为 5.39 nm。变化的原因是随着顶层 SiO₂ 增宽,入射光波在吸收结构的透射率增大,导致单缝内电磁场增强,干涉场减弱;最重要的是由于 SiO₂ 两端面的反射,导致主要干涉区域随着 d_2 的增大而减小,由图 6 中 3 个宽度下

的左数第 8 个干涉峰的电场分布明显佐证。而干涉峰数目满足等式 $N = 2L/\lambda$ [13], L 是光程差,即随着干涉区域变短,导致干涉峰数目减小,伴随通道间隔和带宽的增大。

图 5(b)是 SiO₂ 宽度 d_2 任选 40 nm,不同 h_2 值的吸收光谱。由图可知,随着顶层 SiO₂ 厚度从 1 nm 增大到 10 nm,由于入射光反射的减小,低频段干涉峰吸收率显著提高, h_2 在 10—20 nm 区间,只有右边频吸收率小幅提升,20 nm 以上光谱恒定不变,说明吸收结构阻抗与空气阻抗完美匹配。所以为了获得最佳通道平坦度, $d_2 = 450$ nm 和 $h_2 = 21$ nm 时最优。

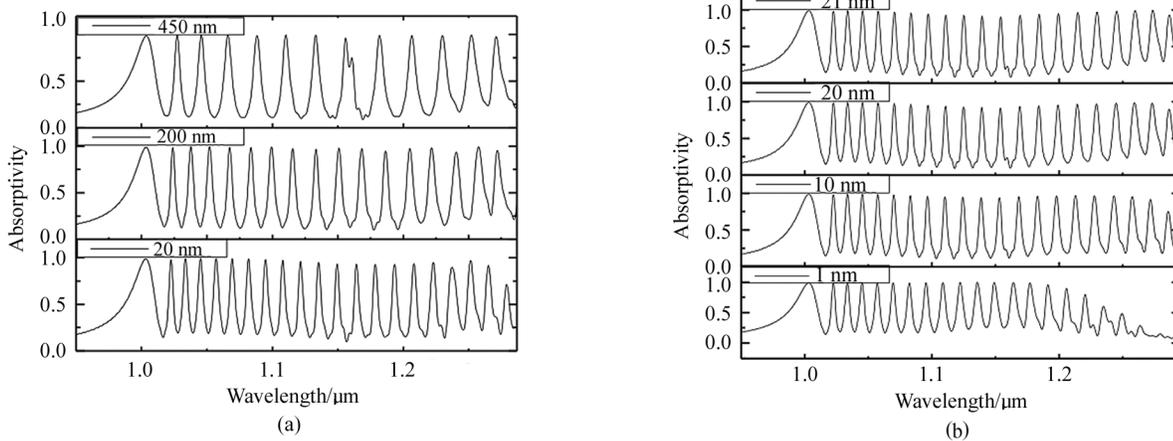


图 5 不同顶层 SiO₂ 尺寸下的吸收光谱:(a) 宽度;(b) 厚度

Fig. 5 Absorption spectra with different upper SiO₂ sizes:(a) Widths;(b) Thickness

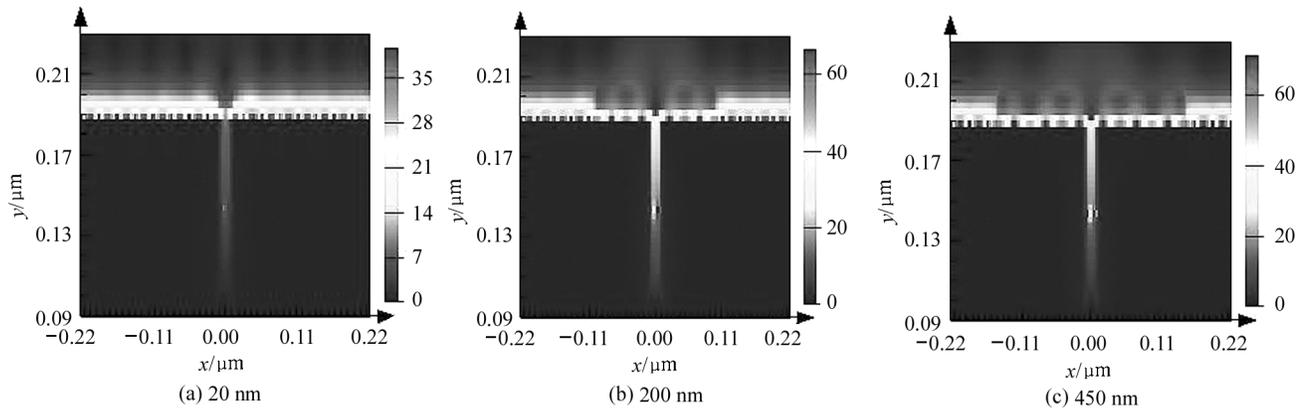


图 6 不同顶层 SiO₂ 宽度下的电场分布

Fig. 6 Electric field distribution with different upper SiO₂ widths

3.2 石墨烯对吸收光谱的影响

3.2.1 单缝上表面石墨烯宽度对吸收光谱的影响

图 7(a)是单缝上层石墨烯 250 nm、350 nm 和 450 nm 宽度下的多通道吸收光谱,如图所示,左边频

因单缝结构尺寸恒定几乎不变;但干涉光谱特性变化明显,在同一频段内,干涉吸收峰数目由 7 个增大到 17 个,伴随干涉峰间距由 34.19 nm 减小到 12.9 nm,带宽由 13.9 nm 压窄到 9.97 nm。图 7(b)

是上述3个石墨烯宽度下左数第4个干涉吸收峰共振波长 $1.13\ \mu\text{m}$ 、 $1.1\ \mu\text{m}$ 和 $1.09\ \mu\text{m}$ 下的电场分布,由图7(b)可知,干涉效应与石墨烯宽度直接相关,而

干涉峰数目与光程差成正比,因光程差随石墨烯宽度的增大而增大,导致干涉峰数目增多,伴随干涉通道间隔和带宽减小,虽平坦度基本不变,但取 $450\ \text{nm}$

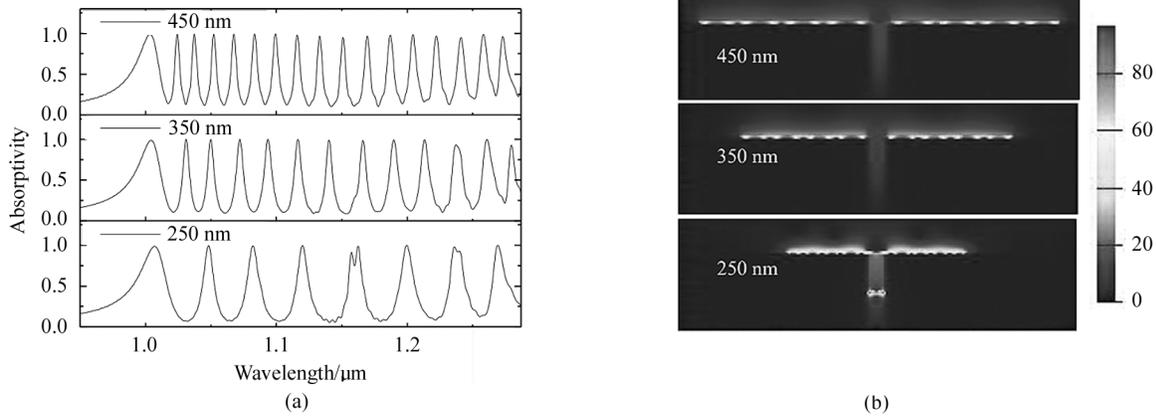


图7 不同上层石墨烯宽度下的光谱特性:(a) 吸收光谱;(b) 电场分布

Fig. 7 Spectral characteristic with different widths of the upper graphene: (a) Absorption spectrum; (b) Electric field distribution

时,更具实用性,成为优选尺寸。

3.2.2 石墨烯费米能级对多通道吸收光谱的调谐

石墨烯费米能级 E_f 是一个压控量,即通过施加门控电压 E_f 可获得动态调控,并对吸收光谱特性影响显著,见图8(a),由图可知,随着费米能级由 $0.5\ \text{eV}$ 增大到 $0.6\ \text{eV}$,吸收光谱大幅蓝移,伴随吸收率明显增大,左边频带宽被压窄。吸收峰共振波长和吸收率与费米能级的变化规律如图8(b)所示。由图可知,在 $E_f=0.6\text{--}1\ \text{eV}$ 区间,左边频和干涉峰共振波长变化曲线完全重合,说明吸收光谱整体蓝移。与文献[14]给出的 $\lambda \approx 2\pi c\hbar/e\sqrt{\eta\epsilon\epsilon_0\omega/E_f}$ (c 为光速、 $\eta=3.1$, ϵ 为周围介质有效介电常数),即 λ 与 E_f 的

分之一次方成反比的变化规律完全吻合。另如图8(b)所示, $E_f=0.64\ \text{eV}$ 时干涉峰吸收率取得最大值,此点与石墨烯的相对介电常数虚部的变化规律一致。所以在不改变器件的物理尺寸和结构参数的前提下,可通过调控石墨烯的费米能级获得吸收峰峰位和吸收率的需求选择,这在实际应用中具有很好的价值。吸收光谱整体蓝移的同时,左边频即PF腔共振带宽被压窄,根据石墨烯的介电常数公式,随着 E_f 由 $0.5\ \text{eV}$ 增大到 $0.6\ \text{eV}$,石墨烯介电常数的实部提高,单缝内双膜结构的有效折射率增大,导致由公式 $\Delta\lambda_{1/2} = \frac{\lambda^2}{2\pi n_{\text{eff}}L} \frac{1-R}{\sqrt{R}}$ 决定的FP腔模带宽压窄。

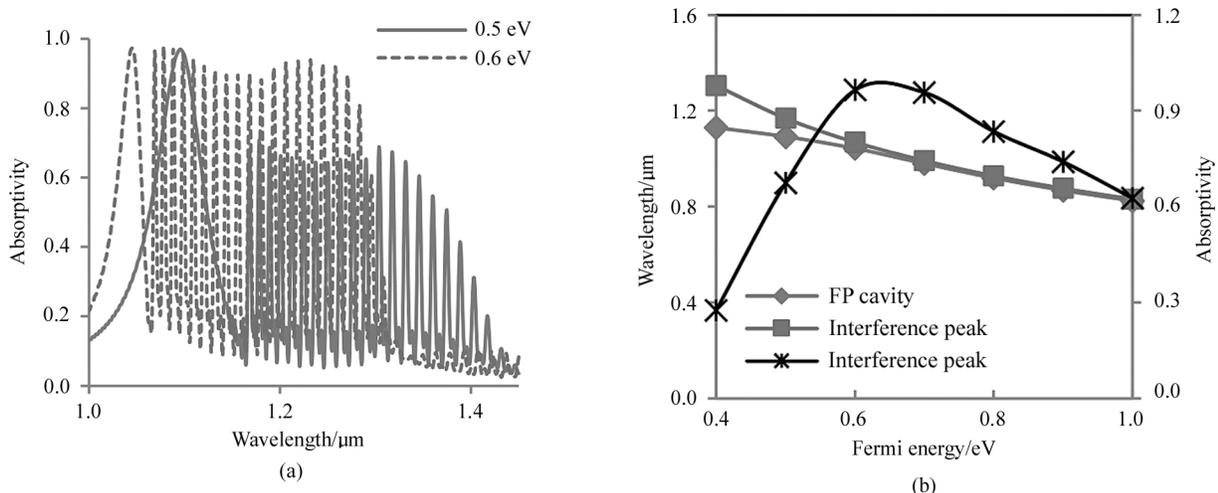


图8 不同费米能级下的光谱特性:(a) 吸收光谱;(b) 光谱规律

Fig. 8 Spectral characteristic with different Fermi energies: (a) Absorption spectrum; (b) Spectral regular

3.3 单缝结构参数对吸收光谱的影响

3.3.1 不同单缝宽度下的吸收光谱

图 9(a)是不同单缝宽度下的吸收光谱,其他结构参数与图 2 相同。由图可知,单缝宽度从 14 nm 增大到 40 nm 的过程中,左边频从 1.03 μm 快速左移到 0.95 μm , 伴随带宽从 5.27 nm 大幅增到 84.5 nm。原因是单缝宽度加大,导致 FP 腔内有效折射率 n_{eff} 减小^[12],由式 $2n_{\text{eff}} + \lambda/2 = \lambda N$ ^[14] 估算的

FP 腔共振波长左移, L 为腔长; N 为正整数。同时由 FP 腔共振光谱带宽公式 $\Delta\lambda_{1/2} = \frac{\lambda^2}{2\pi n_{\text{eff}} L} \frac{1-R}{\sqrt{R}}$ ^[14] 决定的左边频带宽增大。另外,缝宽增大导致 FP 腔内电磁场增强,使得石墨烯表面局域光场减弱,导致长波段干涉峰吸收率迅速减弱,由图 9(b)不同缝宽下的左边频电场分布可见,且当缝宽为 21 nm 时,各干涉峰平坦度最大。

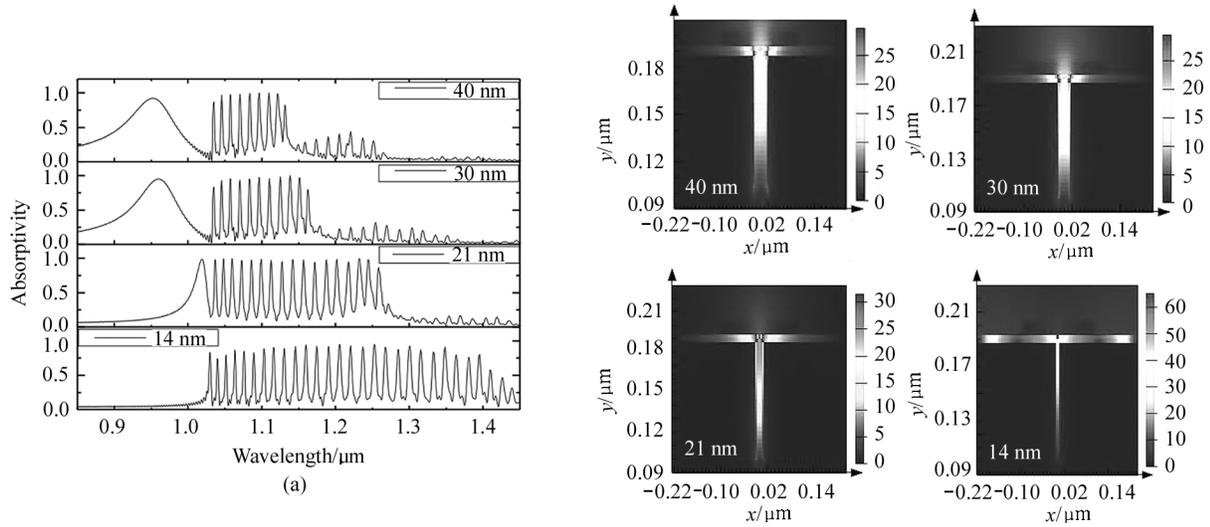


图 9 不同单缝宽度下的吸收光谱和电场分布:(a) 吸收光谱;(b) 电场分布

Fig. 9 Absorption spectra with different single slit widths: (a) Absorption spectrum; (b) Distribution of electric field

3.3.2 单缝内 SiO₂ 与 Au 双膜厚度比对吸收光谱的影响

图 10(a)是单缝内填充不同的 SiO₂ 和 Au 厚度比下的多通道吸收光谱。由图可知,在单缝设计尺

寸恒定下,随着缝内 SiO₂ 与 Au 厚度比的增大,吸收光谱左边频明显右移,带宽快速压窄,伴随各干涉峰吸收率呈现先大幅上升,再小幅下降的趋势。左边频右移源于单缝内填充的 SiO₂ 层增厚,使 FP 腔腔

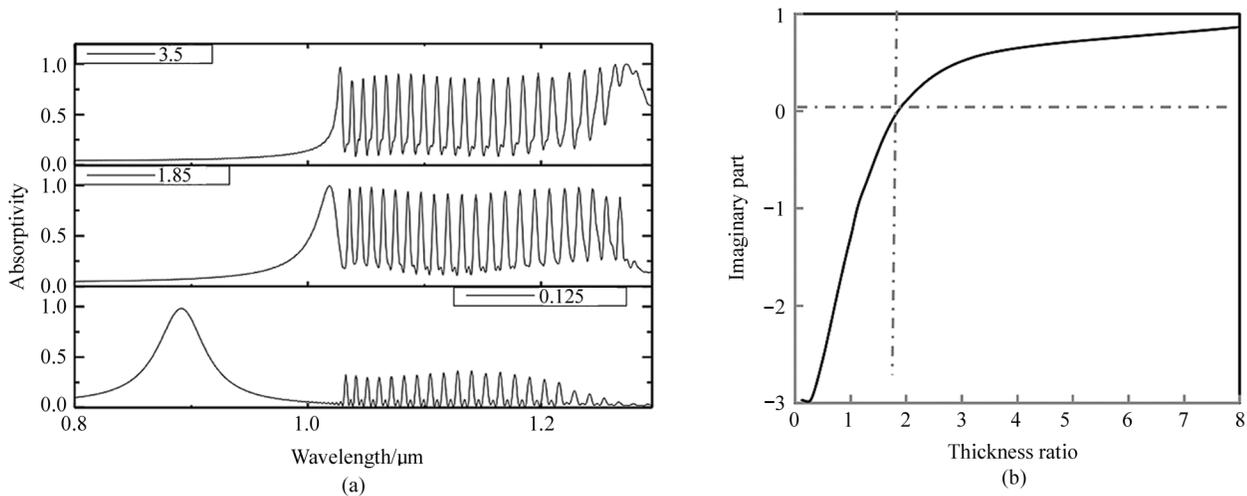


图 10 不同 SiO₂ 与 Graphene 厚度比下的吸收光谱和双膜结构有效折射率:(a) 吸收光谱;(b) 双膜结构有效折射率

Fig. 10 The absorption spectra and effective refractive index of the double-film structure with different thickness ratios of SiO₂ to Graphene: (a) Absorption spectrum; (b) Effective refractive index of double-membrane structure

长增大,导致由公式 $2n_{\text{eff}}L + \lambda/2 = \lambda N$ 估算的 FP 腔共振波长右移所致。同时由 FP 腔共振光谱带宽和腔长满足反比关系,导致左边频光谱带宽会随着 SiO₂ 厚度增大而减小。另因单缝内双膜结构的有效折射率虚部,随着 SiO₂ 与 Au 厚度比的增大呈上升趋势,并且在厚度比为 1.88 以后,由负值光场吸收转为正值增益,如图 10(b)所示,导致各干涉峰吸收率出现先大幅增大后小幅减小的变化趋势。

4 结 论

基于 Ag 单缝和石墨烯构建了近红外波段 0.95—1.3 μm 范围内的多通道吸收光谱。根据左边频 $\lambda_1 = 1.01 \mu\text{m}$ 和任选波长 $\lambda_2 = 1.11 \mu\text{m}$ 及 $\lambda_3 = 1.24 \mu\text{m}$ 下的电磁场稳定分布,证明多通道吸收光谱是 FP 腔共振和 SPP 干涉效应产生的。通过在石墨烯上下表面添加 SiO₂ 介质层,有效减弱入射光波的反射增强透射,可大幅提升多通道吸收率平坦度。并且当单缝宽度和顶层 SiO₂ 的厚度均为 21 nm、上层石墨烯宽度优选 450 nm,单缝内 SiO₂ 与 Au 厚度比为 1.88 时,有最佳的吸收效果,平坦度可达 2.84 dB。尤其可通过外加门控电压调控石墨烯费米能级按实际需求选择相邻通道间距、通道数和单通道带宽,应用前景广泛。

参考文献:

- [1] IN S R. Consideration on the electromagnetic wave absorption properties of the plasma for the stealth technology[J]. Applied Science and Convergence Technology, 2008, 17(6): 501-510.
- [2] QIU J J, SHANG Y D, CHEN X H, et al. Enhanced efficiency of graphene-silicon Schottky junction solar cell through inverted pyramid arrays texturation[J]. Materials Science and Technology, 2018, 34(11): 2197-2204.
- [3] TAN Z R, HONG Y X, GUO H F, et al. Compact integrated biosensors based on the silicon slot micro ring resonator[J]. Journal of optoelectronics · Laser, 2019, 30(8): 779-784.
谭志荣, 洪忆霄, 过海峰, 等. 基于硅基槽型微环谐振器的集成生物传感器[J]. 光电子·激光, 2019, 30(8): 779-784.
- [4] GAO W, WANG J Y, WU Q N. Design and investigation of a metamaterial terahertz broadband bandpass filter based on dual metallic rings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0516001.
高万, 王建扬, 吴倩楠. 基于双金属环的超材料太赫兹宽频带通滤波器设计与研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0516001.
- [5] LANDY N I, SAJUJIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [6] MIN Y L, ZHAO H X, ZHENG Z, et al. Research on optical design of a four-channel absorber[J]. Journal of optoelectronics · Laser, 2021, 32(5): 451-456.
闵雨龙, 赵洪霞, 郑邹, 等. 一种四通道吸收器优化设计研究[J]. 光电子·激光, 2021, 32(5): 451-456.
- [7] HUANG X T, ZHANG C B, CONG L, et al. Investigation of wide-angle thin metamaterial absorber at infrared region[J]. Optoelectronics Letters, 2021, 17(11): 669-672.
- [8] LIANG Z J, LIU H X, NIU Y X, et al. Design and performance analysis of microcavity-enhanced graphene photodetector[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(13): 138501.
梁振江, 刘海霞, 牛燕雄, 等. 基于谐振腔增强型石墨烯光电探测器的设计及性能分析[J]. 物理学报, 2016, 65(13): 138501.
- [9] CAI Y J, ZHU J F, LIU Q H. Tunable enhanced optical absorption of graphene using plasmonic perfect absorbers[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(4): 043105.
- [10] LEE J K, KIM H. Mid-infrared plasmonic tuning via nanogap control in periodic multilayer graphene nanoribbons[J]. Optical Materials, 2016, 54: 22-25.
- [11] ZHAO H X, DING Z Q, CHENG P H, et al. Research on spectral characteristics of a multi-channel absorber with composite structure[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1324001.
赵洪霞, 丁志群, 程培红, 等. 一种复合结构多通道吸收器优化设计研究[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1324001.
- [12] GAO J, SANG T, LI J L, et al. Double-channel absorption enhancement of graphene using narrow groove metal grating[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(18): 184210.
高健, 桑田, 李俊浪, 等. 利用窄刻槽金属光栅实现石墨烯双通道吸收增强[J]. 物理学报, 2018, 67(18): 184210.
- [13] SHI S X, ZHANG H X, LIU J S, et al. Physical optics and applied optics[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2006: 92.
石顺祥, 张海兴, 刘劲松, 等. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 92.
- [14] NIKITIN A Y, GUINEA F, GARCIA-VIDAL F J, et al. Surface plasmon enhanced absorption and suppressed transmission in periodic arrays of graphene ribbons[J]. Physical Review B, 2018, 85(8): 081405.

作者简介:

赵洪霞 (1970—), 女, 硕士, 副教授, 主要从事光纤传感和微纳光器件方面的研究。