

激光与光电子学进展

基于多层石墨烯的高性能宽带红外吸收器

王慧¹, 刘立英^{1*}, 安泽琳¹, 王如志^{2**}¹北京工业大学理学部, 北京 100124;²北京工业大学材料与制造学部新能源材料与技术研究所, 北京 100124

摘要 石墨烯基复合材料在红外探测隐身方面具有广泛的应用前景,但如何提升其宽带全方位红外吸收特性还缺少系统的研究工作。设计了一种光学介质层与石墨烯层交替分布的二元石墨烯基复合微纳结构红外吸收器,并采用传输矩阵方法系统地研究了其红外吸收特性。结果表明,可通过调控石墨烯层数以及结构周期使红外电磁波在该结构中产生显著的增益和损耗共振耦合效应,在 8~14 μm 全波段内的吸收率高于 80%,在 10.0~13.3 μm 波段内的吸收率高于 90%,带宽最大为 3.3 μm 。此外,该微纳结构在大角度($0^\circ\sim 60^\circ$)斜入射下表现出红外吸收偏振不敏感特性。该研究结果将为新一代石墨烯基柔性宽频带大角度可调谐红外吸收微纳结构的设计与应用提供新思路,也为实现新一代柔性轻质隐身或伪装薄膜材料提供了可行的技术方法与实现途径。

关键词 材料; 多层石墨烯; 微纳结构; 红外吸收调控; 传输矩阵法; 介质材料

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1716005

High Performance Broadband Infrared Absorber Based on Multilayer Graphene

Wang Hui¹, Liu Liying^{1*}, An Zelin¹, Wang Ruzhi^{2**}¹Department of Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;²Institute of New energy Materials and Devices, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Graphene-based composite materials have broad application prospects in infrared detection stealth, but how to improve its broadband omnidirectional infrared absorption characteristics is still lack of systematic research work. In this paper, a binary graphene-based composite micro-nano infrared absorber with alternating distribution of optical medium layer and graphene layer is designed, and its infrared absorption characteristics are systematically studied by transmission matrix method. The results show that the resonant coupling effect of gain and loss can be generated in the structure by adjusting the number of graphene layers and the structure. The absorption rate is higher than 80% in the whole band of 8-14 μm , higher than 90% in the band of 10.0-13.3 μm , and the maximum bandwidth is 3.3 μm . In addition, the micro-nano structure exhibits polarization insensitivity of infrared absorption in wide angle range ($0^\circ\sim 60^\circ$) with oblique incidence. The results of this study provide a new idea for the design and application of a new generation of graphene-based flexible wide-band and large-angle tunable infrared absorption micro-nano structure, and also provide a feasible technical method and realization path for a new generation of flexible lightweight stealth or camouflage film materials.

Key words materials; multilayer graphene; micro-nano structure; infrared absorption control; transfer matrix method; dielectric material

1 引言

为了对抗日益先进的探测器和精确的制导技术,电磁波的可调控吸收已经成为目标隐身与伪装等领域的重要发展方向^[1-2]。近年来,石墨烯基复合红外特性调控材料的研究引起了人们的广泛关注。石墨烯由单

层碳原子以 sp^2 杂化轨道构成,具有较高的电子迁移率,其零带隙能带结构使能量大于 0 的光子都可以激发石墨烯内部的电子跃迁^[3]。石墨烯的光子响应范围非常宽,可以涵盖从紫外到红外甚至微波的电磁波范围。但相比砷化镓等块状材料,石墨烯的光吸收相当低,这限制了其在光吸收领域的应用。为了提高石墨

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2021-08-20; 录用日期: 2021-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(11774017)

通信作者: *liuliying@bjut.edu.cn; **wrz@bjut.edu.cn

烯的光吸收率,人们设计了各种增强光吸收的结构^[4-7]。武继江等^[8]提出了一种利用磁光光子晶体增强石墨烯吸收率的方案,通过调节外加磁场可以有效增强石墨烯的吸收率,在一定条件下实现近完美吸收。虽然该方法能大幅提高石墨烯的吸收率,但其制备工艺复杂,器件结构庞大,难以应用于各类目标体隐身或伪装设计中。

为了解决上述问题,人们提出了石墨烯基多层微纳结构的吸收器^[9-10]。Liu等^[11]构建了多层石墨烯/介质/Au复合结构,其中,四个石墨烯层的宽度逐渐增加,底部Au层由间隔层隔开,该结构可在1.45~4.35 THz频率范围内实现超过90%的吸收,带宽为2.9 THz。李辉等^[12]构建了由方形单层石墨烯和被SiO₂介质层隔开的金属接地平面,该吸收器吸收率在90%以上的带宽达到了4.13 THz。Yi等^[13]将图案化的多层石墨烯叠加在聚对苯二甲酸乙二酯(PET)上,以调节中心频率,并通过改变石墨烯的叠加层数实现了7 GHz的调谐范围。江孝伟等^[14]将二氧化钒和石墨烯作为超材料完美吸收器的基本单元,在红外波长3.2 μm处实现了99%的高吸收。Lin等^[15]设计了一种厚度为90 nm的石墨烯超材料,该超材料由石墨烯层和介电层交替组成,光栅将光耦合成波导模式,对整个太阳光谱(300~2500 nm)的非偏振可见光和近红外光的吸收率约为85%。薛钊等^[16]设计了一种基于图形化石墨烯的太赫兹吸收器,通过改变中间介质层厚度和顶层石墨烯的费米能级可实现带宽为1.8744 THz的高吸收性能。

上述研究大多集中在太赫兹、可见光以及近红外波段,非常缺乏材料对中红外8~14 μm波段吸收性能的系统研究,且石墨烯与介质材料组成的异质微纳结构只会提高特定频率或有限范围内的吸收率,如单频段或多频段的高吸收,无法实现宽频段的高吸收性能,这限制了其在某些领域的应用。目前,人们仅研究了垂直入射电磁波时吸收器的吸收性能,只对某一偏振有效,对于斜入射的电磁波其吸收效果有明显降低,表现为偏振敏感特性,限制了吸收器全方位宽角度的吸收性能。因此,本文将多层石墨烯与介质层复合为微纳结构基元,在此基础上构建了简单的二元石墨烯微纳复合结构,并采用传输矩阵方法(TMM)系统研究了复合微纳结构周期数、介质层厚度以及石墨烯层数对其红外吸收特性的影响。实验结果表明,通过调控介质层的厚度和石墨烯的层数能使材料在红外区域8~14 μm全波段的吸收率高达80%,部分波段内可以达到100%,且该结构在大角度范围(0°~60°)斜入射下表现出红外吸收偏振不敏感特性,可应用于全方位红外探测器的对抗中。

2 结构模型及研究方法

以石墨烯(G)和介质层(P)复合膜为基元的周期结构如图1所示。其中, N 为复合结构的周期, d_p 、 d_G 分别为介质材料和单层石墨烯的厚度,设置 $d_G = 0.335$ nm。该复合结构由介质层P和多层石墨烯G交替沿 z 轴分布,可表示为(P/G) ^{N} 。利用TMM计算和分析该复合结构对电磁波的吸收规律。

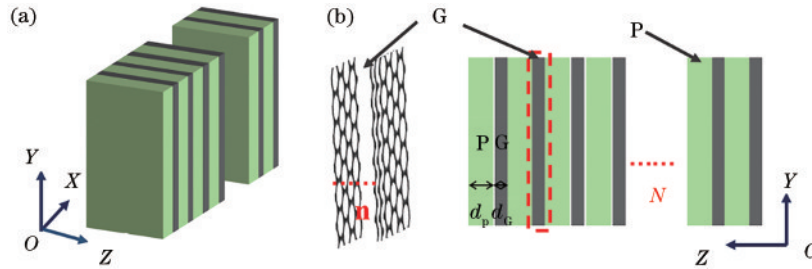


图1 复合微纳结构示意图。(a)三维图;(b)侧视图

Fig. 1 Schematic diagram of the composite micro-nano structure. (a) Three-dimensional view; (b) side view

石墨烯的电导率模型参考Kubo公式^[17-19]给出,可表示为

$$\sigma(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = N_g (\sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}), \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{intra}} = \frac{-ie^2}{\pi\hbar^2(\omega + 2i\Gamma)} \int_0^\infty \xi \left[\frac{\partial f_d(\xi)}{\partial \xi} - \frac{\partial f_d(-\xi)}{\partial \xi} \right] d\xi, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{inter}} = \frac{ie^2(\omega + 2i\Gamma)}{\pi\hbar^2} \int_0^\infty \left[\frac{f_d(-\xi) - f_d(\xi)}{(\omega + 2i\Gamma)^2 - 4(\frac{\xi}{\hbar})^2} \right] d\xi, \quad (3)$$

式中, $f_d(\xi) = \left[\exp\left(\frac{\xi - \mu_c}{k_B T}\right) + 1 \right]^{-1}$, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度, e 为电子电荷,波长 λ 、频率 f 、角频率 ω 满足 $\lambda = c/f$, $\omega = 2\pi f$, 散射率 Γ 、弛豫时间满足 $\Gamma = 1/(2\tau)$, μ_c 为由电子浓度决定的费米能级(化学势),可由栅极电压控制。

当费米能级为0.3 eV,弛豫时间为0.1 ps,温度为300 K时,不同石墨烯层数下电导率的变化情况如图2所示。其中,2G表示2层石墨烯。相对介电常数^[20] $\epsilon_r = 1 + \frac{i\sigma}{\omega\epsilon_0 N_G t_G}$, 其中, σ 为电导率, N_G 为石墨烯的层

数, t_G 为单层石墨烯的厚度, ϵ_0 为真空介电常数。折射率 $n_i = \sqrt{\epsilon_r}$, 不同石墨烯层数在 8~14 μm 波段下相对介电常数和折射率的变化情况如图 3 所示。可以发现, 石墨烯为单层或多层对于其介电常数及折射率没有影响, 石墨烯折射率的实部与虚部随波长的增加单

调增加, 同一周期内多层堆叠石墨烯的介电性质与单层石墨烯相同。通过数据拟合得到单层或多层石墨烯在 8~14 μm 波段的复折射率 $\tilde{n}_G = 0.12\lambda - 0.7 + \frac{iC_1\lambda}{3}$, 其中, $C_1 = 5.446 \mu\text{m}^{-1}$ 。

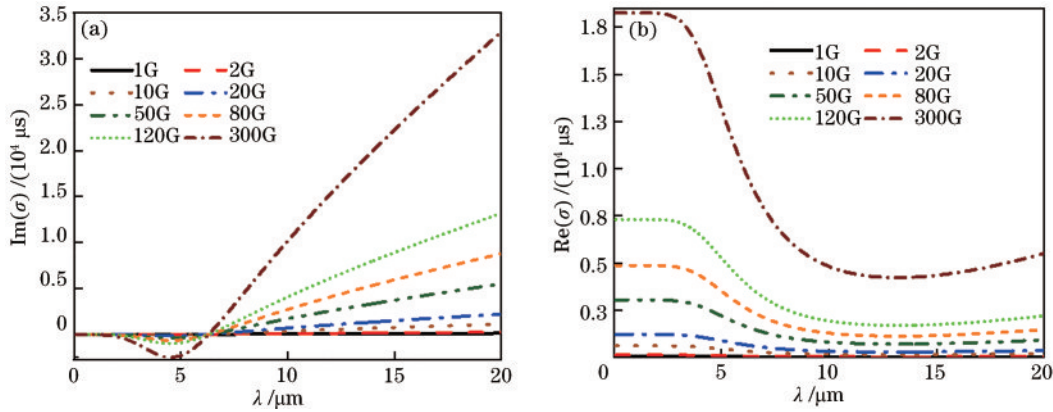


图 2 石墨烯层数对其电导率的影响。(a)电导率虚部;(b)电导率实部

Fig. 2 Effect of the number of graphene layers on its electrical conductivity. (a) Imaginary part of the conductivity; (b) real part of the conductivity

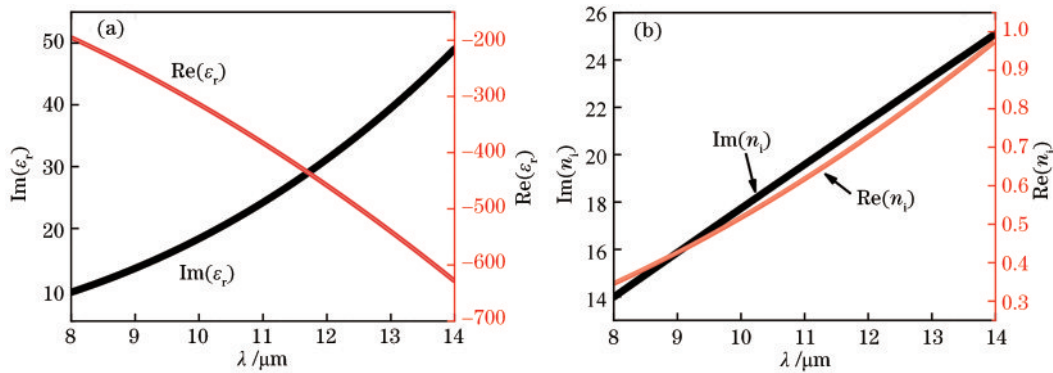


图 3 石墨烯层数对介电常数和折射率的影响。(a)介电常数;(b)折射率

Fig. 3 Effect of the number of graphene layers on the dielectric constant and refractive index. (a) Dielectric constant; (b) refractive index

TMM 是常用来分析一维多层微纳结构色散关系、相速度、群速度、反射、透射和吸收特性等光学特性的方法^[21-22], 其基本原理是利用麦克斯韦方程求解两个紧邻层面上电场和磁场的自洽与关联性, 通过传输矩阵边界耦合求解出整个多层介质的透射系数 T 和反射系数 R , 再根据电磁波能量守恒公式 $1 = A + T + R$ 计算出复合结构的吸收系数 A ^[23]。

3 结果与讨论

3.1 单周期结构的红外吸收特性

单层石墨烯的光吸收系数为 $-\frac{\ln(1 - \pi\alpha)}{d} \approx 7 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$, 与波长无关。但光与单层石墨烯的相互作用间距较短, 使单层石墨烯的吸收率仅为 $\pi\alpha = 2.3\%$ ^[24]。其中, $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = G_0/(\pi\epsilon_0 c) \approx 1/137$ 为精细结构常

数, $d = 0.335 \text{ nm}$ 为石墨烯的厚度, 利用菲涅耳方程导出具有固定光电导材料薄膜的极限透射率^[25] $G_0 = \frac{e^2}{4\hbar} = 6.08 \times 10^{-5} \Omega^{-1}$ 。利用 TMM 计算的单层石墨烯在红外波段 8~14 μm 的吸收率如图 4(a) 所示。可以发现, 单层石墨烯的光吸收率约为 2.3%, 与文献^[26-27]的报道一致。随着石墨烯层数 n 的增加, 电磁波在石墨烯中的传输距离变长, 多层石墨烯的吸收率也逐渐增加。继续增加石墨烯层数, 薄膜的厚度也随之增加, 反射率略有增加, 而吸收率略有减小。图 4(b) 为多层石墨烯对正入射红外波的吸收率随石墨烯层数的变化曲线。可以发现: 随着石墨烯层数 n 的增加, 同一波长下的吸收率先增加后减小, 且当波长减小时, 吸收峰逐渐右移, 吸收峰值逐渐变大; 对于同一石墨烯层数, 波长越小, 吸收率越大。石墨烯与介质材料组成的异质微纳结构可以在一定程度上提高结构的吸收率,

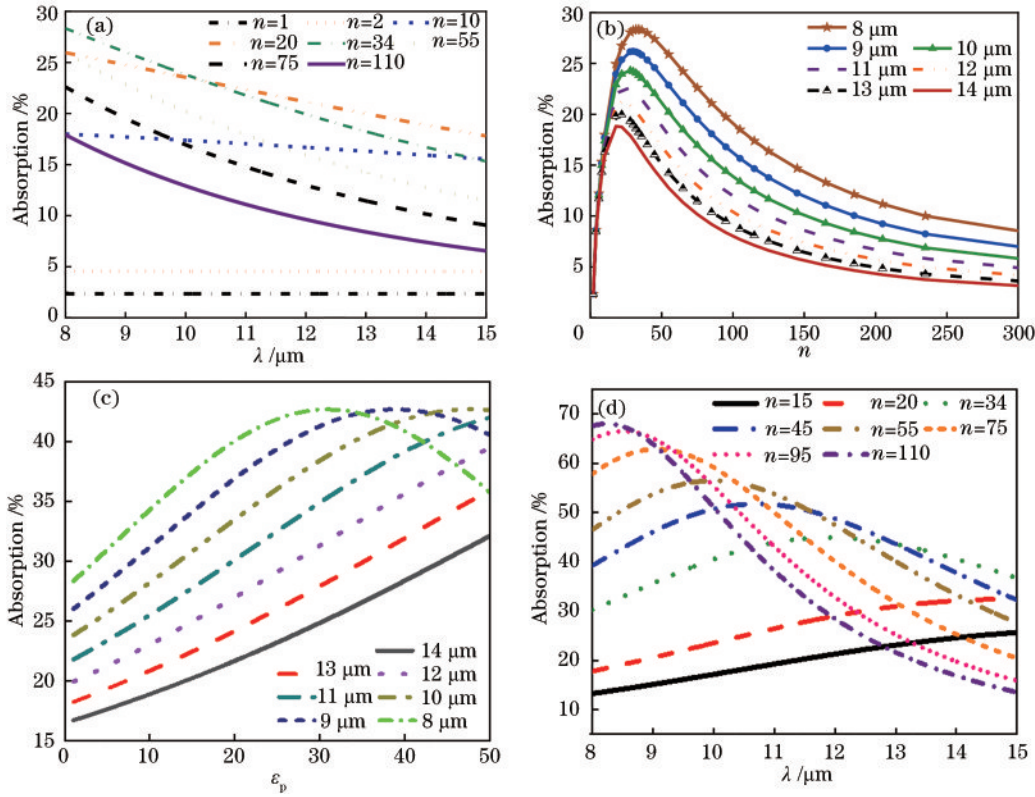


图 4 微纳结构的吸收谱。(a)单层石墨烯的吸收谱；(b)多层石墨烯的吸收谱；(c)介电常数对微纳结构吸收谱的影响；(d)石墨烯层数对微纳结构吸收谱的影响

Fig. 4 Absorption spectra of micro-nano structures. (a) Absorption spectrum of single-layer graphene; (b) absorption spectrum of multilayer graphene; (c) effect of dielectric constant on the absorption spectrum of micro-nano structure; (d) effect of the number of graphene layers on the absorption spectra of micro-nano structures

该微纳结构由 34 层石墨烯和介质材料(介质厚度 $d_p = 500 \text{ nm}$)组成,不同波长下微纳结构吸收率随介质层介电常数 ϵ_p 的变化情况如图 4(c)所示。可以发现,随着介电常数的增加,各波长对应的吸收率都是先增加后减小,且各波长吸收峰对应的介电常数不同,波长越短,其吸收峰对应的介电常数越小,但每个波长的吸收峰值是相同的,均为 0.43。对于同一介电常数(1~30 之间),波长越短,其吸收系数越大,当波长为 $8 \mu\text{m}$ 时,吸收率达到峰值;之后,对于同一介电常数($\epsilon_1 > 30$),波长越短,其吸收系数越小。当介质层 $\epsilon_p = 10, d_p = 500 \text{ nm}$ 时,不同石墨烯层数微纳结构的吸收谱如图 4(d)所示。可以发现,当石墨烯的层数增加时,红外吸收峰值变大,吸收峰位置向短波长方向移动。从单层介质膜的光学特性分析,当光线从折射率为 n_1 的介质入射到折射率为 n_2 的介质中($n_1 < n_2$),膜层的作用是增加透射率、减小表面反射率。当介质膜透射的电磁波经过吸收膜时,吸收膜的复折射率有较明显的色散现象,导致电磁波产生显著的增益和损耗共振耦合效应,从而使复合膜的吸收增强,且出现了吸收峰。

3.2 周期结构的红外吸收特性

为了实现结构在红外波段的高吸收,系统研究了周期数对微纳结构吸收率的影响,设石墨烯层数 $n = 34$,介质层 $\epsilon_p = 10, d_p = 500 \text{ nm}$,计算结果如图 5 所

示。从图 5(a)可以发现,当周期数 N 增加时,该微纳结构在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的吸收率也逐渐增加。从几何光学角度来讲,当光在介电常数周期性变换的介质中传播时,电磁波受到周期性分布介电常数的调制作用产生光子带隙,使电磁波在穿过微纳结构时的光程增加,促进了光与物质的相互作用,进而导致微纳结构的吸收率增加。当周期数增到 8 时,结构的吸收峰值已经达到饱和,继续增加周期,结构的吸收率仍为 100%,吸收谱对于周期不再敏感。考虑到结构的轻薄柔性,选取的周期数为 8,原因是复合膜层太厚不仅不会增加吸收率,还额外增加了膜层的质量,破坏了其柔性。该研究结论对于轻质柔性红外吸收器的设计有着很好的指导意义。图 5(b)为不同周期数下微纳结构的反射谱。可以发现,微纳结构在约 $11.9 \mu\text{m}$ 波长处出现通带,其反射值趋于 0,曲线呈 V 形。原因是电磁波在光子晶体里受到膜层位相厚度的周期性调制,在特定波长出现通带和禁带,在通带附近的反射率很小,电磁波进入结构内部,与石墨烯发生相互作用,产生能量转换,从而出现较大的吸收谱值。

微纳结构的吸收率和带宽等特性依赖于石墨烯的层数以及复合介质层的厚度,设介质层的 $\epsilon_p = 10$,结构周期数 $N = 8$,采用控制变量法探究了石墨烯层数 n 与介质层厚度 d_p 对结构吸收谱的影响,结果如图 6 所

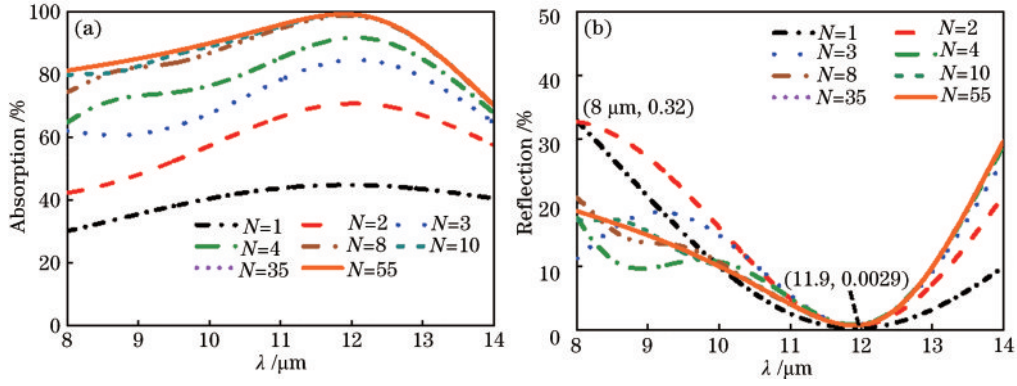


图 5 不同周期下微纳结构的吸收谱和反射谱。(a)吸收谱;(b)反射谱

Fig. 5 Absorption and reflection spectra of micro-nano structures at different periods. (a) Absorption spectrum; (b) reflection spectrum

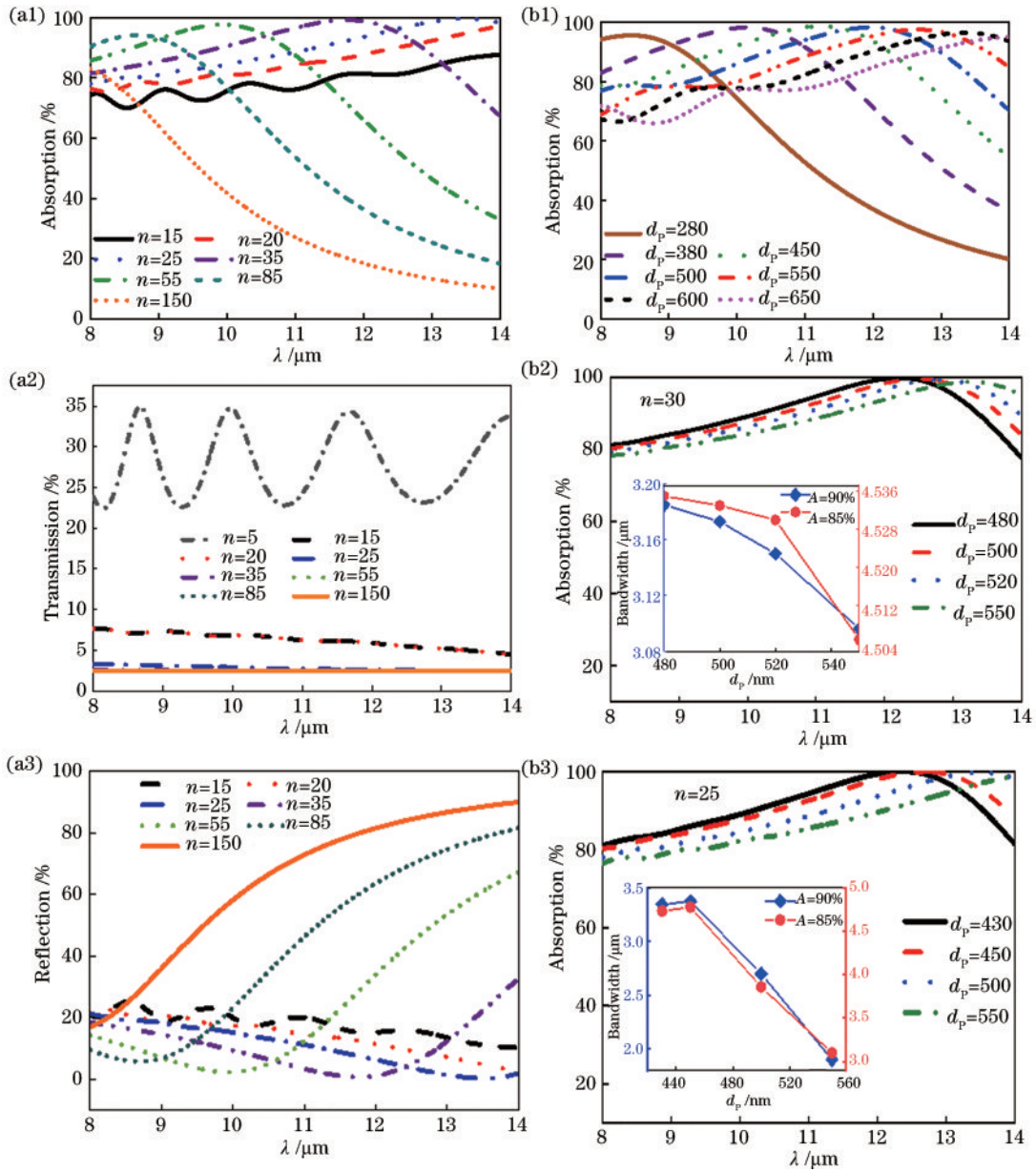


图 6 微纳结构的光学特性。(a)不同石墨烯层数下的微纳结构;(b)不同介质层厚度下的微纳结构

Fig. 6 Optical properties of micro-nano structures. (a) Micro-nano structures with different numbers of graphene layers; (b) Micro-nano structures with different dielectric layer thicknesses

示。当介质厚度为 500 nm 时,石墨烯层数 n 对结构吸收谱的影响如图 6(a) 所示。可以发现:在 8~14 μm 波段内结构的吸收率先增大后减小,随着石墨烯层数的增加,吸收峰逐渐左移,半峰全宽逐渐减小,吸收峰值略有下降;当石墨烯层数 $n < 35$ 时,结构的吸收谱在全波段都保持平稳,且吸收率随着 n 的增加逐渐增加。考虑到带宽和吸收率两个因素,将石墨烯层数控制在 20~35 之间就能实现宽频带高吸收。

当入射光垂直入射至吸收器结构表面时,采用阻抗匹配理论^[28]分析多层石墨烯基微纳结构在 8~14 μm 波段内的高吸收机理。吸收器的相对阻抗 Z_r ^[29] 可表示为

$$Z_r = \frac{Z}{Z_0} = \sqrt{\frac{(1+R)^2 - T^2}{(1-R)^2 - T^2}}, \quad (4)$$

式中, Z 为吸收器的结构阻抗, Z_0 为自由空间阻抗。当吸收器的结构阻抗和自由空间阻抗相等 ($Z_r = 1$) 时,二者的阻抗相匹配,反射系数最小。由优化后的结构参数计算出不同石墨烯层数吸收器的吸收谱、透射谱以及反射谱如图 6(a1)、图 6(a2)、图 6(a3) 所示。将不同石墨烯层数、不同波段的反射系数以及透射系数代入阻抗匹配公式中,计算结果表明,吸收器的相对阻抗越接近 1,其结构阻抗与自由空间阻抗匹配越好,反射系数越低,吸收效果越好,从而使该微纳结构在 8~14 μm 红外波段内具有较为完美的吸收特性。此外,当石墨烯层数在一定范围内时,随着层数的堆叠,相对阻抗越接近 1,阻抗匹配效果越好,吸收率越高。

为探究介质层厚度对吸收器性能的影响,控制石墨烯层数为 34,通过扫描介质层厚度 d_p ,仿真得到结构的吸收谱如图 6(b1) 所示。可以发现:随着厚度的增加,结构在 8~14 μm 波段的吸收率整体都在增加;当厚度增加到 280 nm 时,在 8~14 μm 波段可以明显看到吸收峰。吸收峰随介质层厚度的变化规律:1) 吸收峰位置逐渐红移;2) 吸收峰值表现为先增大后减小,但变化不太明显,吸收率约为 100%;3) 吸收峰的半峰

全宽逐渐增大;4) 当厚度大于 500 nm 时,在短波长处可以看到吸收率曲线出现明显抖动,抛物曲线逐渐趋于平缓,而在长波长处表现为高吸收,吸收率高达 80%。从带宽和吸收率两个因素考虑,将介质层的厚度控制在 450~550 nm 就能实现宽频高吸收的特性。分别选择石墨烯层数 n 为 35 和 25,在最佳介质厚度范围内进行调控,其宽频高效率的吸收光谱如图 6(b2)、图 6(b3) 所示。可以发现,该结构在 8~14 μm 全波段的吸收率大于 80%,在一定波长下,吸收率高达 100%。从插图中可以发现,该微纳结构在 10~13.3 μm 波段可实现 90% 以上的吸收,带宽最大为 3.3 μm ,在 9.2~14.0 μm 波段实现了 85% 以上的吸收,带宽为 4.8 μm 。这种高吸收结构的大宽带主要由石墨烯本身的带间跃迁导致。高性能吸收器对于入射光的角度响应也是很重要的,因此,选定石墨烯层数 $n = 34$,介质层 $\epsilon_p = 10$, $d_p = 500$ nm,结构周期数为 $N = 8$,研究了电磁波斜入射角度对微纳结构吸收谱的影响,结果如图 7 所示。可以发现,当入射角 $\theta \neq 0^\circ$ 时,虽然结构吸收峰的位置都发生微小偏移,但由于结构的对称性,横电 (TE) 偏振模式和横磁 (TM) 偏振模式下不同偏振态对吸收结果没有明显影响,结构表现为偏振不敏感特性。在 TM 模式下,随着入射角的增大,微纳结构的吸收峰向左移动,原因是电磁波在介质层与多层石墨烯中产生共振吸收需要波矢的法向分量,当入射角增加时,波矢在介质层的法向分量变小,为保持共振吸收效果,波矢需要变大,相应频率也增加,共振波长也会变小。在 TE 模式下,随着入射角的增加,微纳结构的吸收谱发生微小右移,且吸收率逐渐变小,原因是随着入射角的增加,磁场的矢量方向与入射波波矢方向的夹角增加,磁场沿波矢方向的感应电流变小,导致吸收率变小。此外,石墨烯和介质层的介电常数相差较大,使入射角对相位差 δ 的影响很小,结构的能带属性对入射角度不敏感,结构的吸收谱变化几乎可以忽略^[30],因此,实验设计的高吸收微纳结构有很好的角度响应,可在中红外全波段获得较高且全方位的吸收。

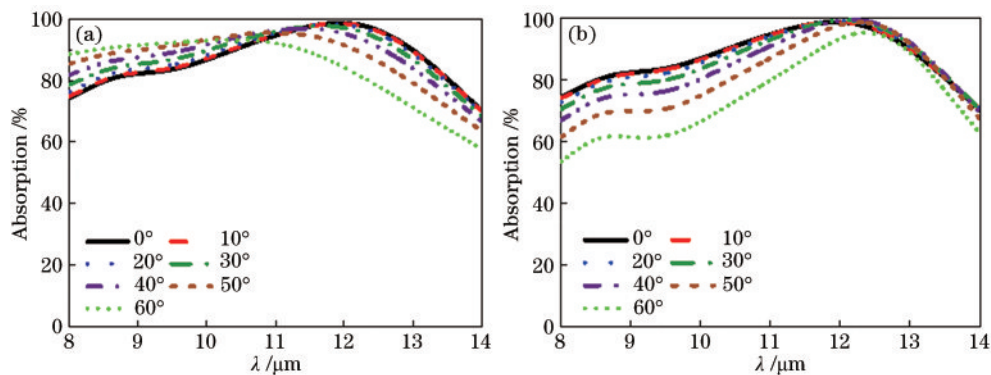


图 7 不同入射角下微纳结构的吸收光谱。(a) TM 模式;(b) TE 模式

Fig. 7 Absorption spectra of micro-nano structures at different incident angles. (a) TM mode; (b) TE mode

4 结 论

提出了石墨烯层/介质层的多层微纳结构,并推导出多层石墨烯在红外波段 8~14 μm 的复折射率,计算了单周期结构和多周期结构的红外吸收特性,对材料的物性参数、石墨烯层数、介质厚度以及复合周期数进行了系统研究,并深入分析了电磁波入射角对微纳结构吸收性能的影响。实验结果表明,通过优化结构参数,基于多层石墨烯复合微纳结构的红外吸收器可以在高吸收率条件下实现宽频与大角度偏振不敏感的红吸收特性。该研究不仅为下一代柔性红外隐身或伪装器件的设计提供了新思路与技术途径,也为新一代柔性中红外隐身和宽带高吸收光探测器件的结构设计及应用提供了理论指导。

参 考 文 献

- [1] Sun Y, Wang Y Y, Zhang C, et al. Flexible mid-infrared radiation modulator with multilayer graphene thin film by ionic liquid gating[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(14): 13538-13544.
- [2] Sun B, Xie F F, Luo Y, et al. Low-voltage controlling high order plasmonic modes based on graphene/metal electrodes[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 136: 106775.
- [3] Shiri J, Khalilzadeh J. Magnetically controllable transmission spectrum of a 1D photonic crystal with a graphene defect layer in infrared region[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(12): 506.
- [4] 袁志豪, 徐俞, 曹冰, 等. 基于石墨烯等离子体的宽带透射式红外光调制器[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 232301.
Yuan Z H, Xu Y, Cao B, et al. Broadband transmission infrared light modulator based on graphene plasma[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 232301.
- [5] Krishna A, Kim J M, Leem J, et al. Ultraviolet to mid-infrared emissivity control by mechanically reconfigurable graphene[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(8): 5086-5092.
- [6] 赵承祥, 郗媛, 余耀, 等. 等离激元增强的石墨烯光吸收[J]. *物理学报*, 2020, 69(6): 067801.
Zhao C X, Qie Y, Yu Y, et al. Enhanced optical absorption of graphene by plasmon[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(6): 067801.
- [7] Kumar A, Singh P, Thapa K B. Study of super absorption properties of 1D graphene and dielectric photonic crystal for novel applications[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(10): 423.
- [8] 武继江, 赵浩旭, 高金霞. 基于磁光光子晶体的石墨烯光吸收增强[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0403003.
Wu J J, Zhao H X, Gao J X. Enhancing light absorption of graphene using magneto-optical photonic crystals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0403003.
- [9] Wang Y L, Liu S, Zhong S Y. Tunable multichannel terahertz filtering properties of dielectric defect layer in one-dimensional magnetized plasma photonic crystal[J]. *Optics Communications*, 2020, 473: 125985.
- [10] 王超素, 江达飞, 江孝伟. 偏振无关高吸收效率宽吸收带超材料吸收器[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 031601.
Wang C S, Jiang D F, Jiang X W. Polarization independent high absorption efficiency wide absorption bandwidth metamaterial absorber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 031601.
- [11] Liu W W, Song Z Y, Wang W H. A high-performance broadband terahertz absorber based on multilayer graphene squares[J]. *Physica Scripta*, 2021, 96(5): 055504.
- [12] 李辉, 余江, 陈哲. 基于单层石墨烯的偏振无关和入射角度不敏感的可切换宽带吸收器/反射器[J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0803001.
Li H, Yu J, Chen Z. Polarization-independent and incident-angle-insensitive switchable broadband absorber/reflector based on single-layer graphene[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0803001.
- [13] Yi D, Wei X C, Xu Y L. Tunable microwave absorber based on patterned graphene[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(8): 2819-2826.
- [14] 江孝伟, 武华. 吸收波长和吸收效率可控的超材料吸收器[J]. *物理学报*, 2021, 70(2): 027804.
Jiang X W, Wu H. Metamaterial absorber with controllable absorption wavelength and absorption efficiency [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(2): 027804.
- [15] Lin H, Sturmberg B C P, Lin K T, et al. A 90-nm-thick graphene metamaterial for strong and extremely broadband absorption of unpolarized light[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(4): 270-276.
- [16] 薛钊, 张海婷, 杨茂生, 等. 基于图形化石墨烯的可调谐宽光谱太赫兹吸收器的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 59(5): 0530002.
Xue Z, Zhang H T, Yang M S, et al. Study on tunable broad-spectrum terahertz absorber based on graphic graphene[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 59(5): 0530002.
- [17] Gusynin V P, Sharapov S G, Carbotte J P. Magneto-optical conductivity in graphene[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2007, 19(2): 026222.
- [18] Falkovsky L A, Varlamov A A. Space-time dispersion of graphene conductivity[J]. *The European Physical Journal B*, 2007, 56(4): 281-284.
- [19] Falkovsky L A, Pershoguba S S. Optical far-infrared properties of a graphene monolayer and multilayer[J]. *Physical Review B*, 2007, 76(15): 153410.
- [20] Vakil A, Engheta N. Transformation optics using graphene[J]. *Science*, 2011, 332(6035): 1291-1294.
- [21] Al-Ghezi H, Gnawali R, Banerjee P P, et al. 2×2 anisotropic transfer matrix approach for optical propagation in uniaxial transmission filter structures[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 35761-35783.
- [22] Niu Q L, Yan J H, Shen L F, et al. Space-wave isolator based on remanence at microwave frequencies[J]. *Optik*, 2021, 227: 165531.
- [23] Zhao L Y, Zhang R Y, Deng C Y, et al. Tunable infrared emissivity in multilayer graphene by ionic liquid

- intercalation[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(8): 1096.
- [24] Furchi M, Urich A, Pospischil A, et al. Microcavity-integrated graphene photodetector[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(6): 2773-2777.
- [25] Kuzmenko A B, van Heumen E, Carbone F, et al. Universal optical conductance of graphite[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(11): 117401.
- [26] Geim A K. Graphene: status and prospects[J]. *Science*, 2009, 324(5934): 1530-1534.
- [27] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, et al. Graphene photonics and optoelectronics[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(9): 611-622.
- [28] Smith D R, McCall S L, Platzman P M, et al. Photonic band structure and defects in one and two dimensions[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1993, 10(2): 314-321.
- [29] Ding F, Dai J, Chen Y, et al. Broadband near-infrared metamaterial absorbers utilizing highly lossy metals[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 39445.
- [30] Fang Y T, He S L. Transparent structure consisting of metamaterial layers and matching layers[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(2): 023813.