

光学薄膜塔姆态诱导石墨烯近红外光吸收增强

黎志文, 陆华*, 李扬武, 焦晗, 赵建林

西北工业大学理学院超常条件材料物理与化学教育部重点实验室与陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072

摘要 提出了一种增强石墨烯光吸收率的布拉格光栅/石墨烯/金属薄膜光学结构。运用传输矩阵和时域有限差分法研究了其光传输特性,发现布拉格光栅与金属薄膜之间形成的塔姆等离激元局域场可有效增强光与石墨烯的相互作用,单层石墨烯的近红外光吸收率约增大了 36 倍。探讨了布拉格光栅的周期、石墨烯位置、入射角度、布拉格光栅层厚度及石墨烯化学势与石墨烯光吸收的关系。研究结果表明,上述物理参数的变化可有效调控石墨烯的光吸收波长及效率。研究结果为高性能石墨烯探测器等新型光电子器件的实现提供了新的途径。

关键词 薄膜; 光学薄膜; 石墨烯; 塔姆等离激元; 光吸收

中图分类号 O436.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0131001

Near-Infrared Light Absorption Enhancement in Graphene Induced by the Tamm State in Optical Thin Films

Li Zhiwen, Lu Hua*, Li Yangwu, Jiao Han, Zhao Jianlin

Ministry of Education Key Laboratory of Material Physics and Chemistry Under Extraordinary Conditions and Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

Abstract A Bragg grating/graphene/metallic thin film-type optical structure is prepared to enhance light absorption in graphene, and the optical propagation properties of the structure are investigated using the transfer matrix and finite-difference time-domain methods. The light-graphene interaction can be effectively enhanced using strongly confined Tamm plasmon polaritons formed between the Bragg grating and metallic film. Thus, an approximately 36-fold increase could be observed in the near-infrared light absorption of the graphene. Additionally, the dependence of graphene absorption on the Bragg grating period number, graphene position, angle of incident light, thickness of the Bragg grating layers, and chemical potential of the graphene is investigated. The results show that the wavelength and efficiency of light absorption in graphene can be controlled by adjusting the aforementioned physical parameters. The results of this study provide a new pathway for realizing high-performance graphene devices, especially photodetectors.

Key words thin films; optical thin films; graphene; Tamm plasmon polaritons; light absorption

OCIS codes 310.6860; 240.5420; 300.1030

1 引 言

随着社会信息化的发展,传统电子器件的处理速度已经无法满足日益增长的数据处理需求。特别是大数据时代的到来,使信息技术的革新更加迫切。与电子器件相比,光子器件中光子受回路延迟的影响较小,响应时间较短且传输容量较高,对信息技术

发展具有巨大的推动作用。同时,光子器件可实现高密度存储、微型化及集成化,在光的产生、传输、处理、探测等方面有着重要的应用^[1]。其中,光的探测非常关键,研究者们对此进行了深入研究。例如, Fan 等^[2]提出了一种基于微结构半导体的光电探测器。然而,此种半导体光电器件无法摆脱固有能隙的制约,工作波长受到限制。近年来,研究者们发现

收稿日期: 2018-07-26; 修回日期: 2018-08-26; 录用日期: 2018-09-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0303800)、国家自然科学基金(11634010, 61705186, 11774290, 61377035)、中央高校基本科研项目(3102018zy039, 3102018zy050)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JQ1023)、陕西省留学人员科技活动择优资助项目(2017007)

* E-mail: hualu@nwpu.edu.cn

石墨烯作为一种新型光电材料,具有超宽工作谱范围(零带隙能带结构)、超高载流子迁移率、与光学结构兼容以及能耗低等优异特性^[3-4],在光电探测方面优势显著。尽管如此,石墨烯因单层碳原子结构而呈现出较弱的光吸收率。特别是在近红外光通信波段,单层石墨烯的光吸收率仅为入射光的2.3%^[5],严重制约着石墨烯在光电探测方面的实际应用^[6]。

为提高石墨烯的光吸收率,研究者们开展了相关研究。Engel 等^[7]利用光学微腔的场局域性实现了石墨烯的选择性光吸收,使光电流增强了19倍;Stauber 等^[8]通过周期性和随机排列的粒子结构实现了50%的石墨烯光吸收率。同时,关于表面等离激元可增强石墨烯光吸收的研究受到了广泛关注^[9-13]。这是因为表面等离激元是束缚在金属表面并向前传播的电磁波,具有场增强、场束缚、可突破衍射极限限制等优点,在光与物质相互作用增强、集成光子器件等方面具有重要应用^[14-19]。Lu 等^[10]利用金属纳米凹槽阵列结构产生的表面等离激元共振将石墨烯的光吸收率提高到了43.1%;Liu 等^[13]利用金属中磁偶极子共振与表面等离激元将石墨烯光吸收率提高到了70%。然而,金属表面等离激元具有较大的固有损耗,石墨烯光吸收增强的程度受到限制^[10,13]。塔姆等离激元是一种束缚在金属与介质布拉格光栅界面的局域态,具有场增强、可直接激发及偏振无关等优点,可用于提高光子器件性能^[20-22]。与表面等离激元不同,塔姆等离激元主要分布于无损耗介质层,这为更大程度地改善石墨烯光吸收及探测效率提供了有效方法。

本文将单层石墨烯与金属-布拉格光栅相结合,构造了一种新型的多层薄膜光学结构,利用其产生的塔姆等离激元局域态实现了石墨烯光吸收的增强。理论与模拟结果表明,该薄膜结构的塔姆表面等离激元局域场可将近红外通讯波段的单层石墨烯光吸收率提高到86.44%,即约增大了36倍。通过调节布拉格光栅周期、石墨烯位置、入射角度、布拉格光栅层厚度及石墨烯化学势等物理参数,即可实现石墨烯光吸收波长与效率的调控。该结果为石墨烯光电探测性能的提高提供了新途径。

2 理论模型及计算方法

如图1所示,多层薄膜是由SiO₂和Si₃N₄层交替而成的布拉格光栅、Al₂O₃间隔层、石墨烯及金属层组成,其中xyz为坐标系,k为波矢。薄膜的结构参数如下:SiO₂层厚度为d₁,折射率为n₁;Si₃N₄

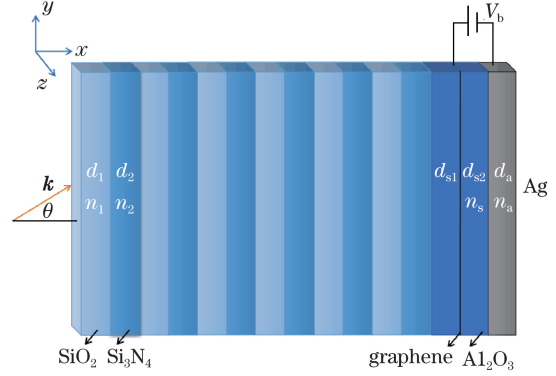


图1 多层薄膜光学结构及相关参数

Fig. 1 Multilayer thin-film optical structure and related parameters

层厚度为d₂,折射率为n₂;金属层厚度为d_a,折射率为n_a;石墨烯与布拉格光栅间的Al₂O₃层厚度为d_{s1},与金属间的Al₂O₃层厚度为d_{s2},Al₂O₃折射率为n_s;石墨烯与金属之间施加的电压为V_b,入射光角度为θ。采用较为便易的传输矩阵法理论分析多层薄膜结构的光传输特性。各介质层的折射率分别为n₁=1.45,n₂=2.2,n_s=1.76。石墨烯的折射率可由库珀公式等效获得^[23-24]。石墨烯的电导率σ_g由电子带内跃迁引起的电导率σ_{intra}和带间跃迁引起的电导率σ_{inter}构成^[24]:

$$\sigma_g = \sigma_{intra} + \sigma_{inter}, \quad (1)$$

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

$$\sigma_{inter} = i \frac{e^2}{4\pi \hbar} \ln \left[\frac{2 |\mu_c| - \hbar (\omega + i\tau^{-1})}{2 |\mu_c| + \hbar (\omega + i\tau^{-1})} \right], \quad (3)$$

式中:ħ为约化普朗克常数;k_B为玻尔兹曼常数;T为开氏温度;e为元电荷;ω为入射光角频率;μ_c为石墨烯化学势,可由外界电压控制,可表示为μ_c=ħ(πn_c)^{1/2}v_f,其中n_c为石墨烯的掺杂水平,v_f为费米速度,约等于10⁶ m/s;τ为电子固有弛豫时间,可表示为τ=μμ_c/(ev_f²),其中μ为石墨烯的载流子迁移率,可合理选为1×10⁴ cm²·V⁻¹·s⁻¹。石墨烯的掺杂水平与外加电压有关,可表示为n_c=ε_dε₀V_b/(ed_{s2}),其中ε_d为Al₂O₃的相对介电常数,ε₀为真空介电常数。根据石墨烯的电导率可等效出石墨烯层的折射率^[23],即

$$n_g = \sqrt{\epsilon_g} = \sqrt{1 + i\sigma_g / (\omega \epsilon_0 \Delta)}, \quad (4)$$

式中ε_g为石墨烯层的相对介电常数,Δ为单层石墨烯的厚度(Δ=0.34 nm)。利用Drude模型对金属银的折射率参数进行拟合,折射率公式^[25]为

$$n_a = \sqrt{\epsilon_m(\omega)} = \sqrt{\epsilon_\infty - \omega_p^2 / [\omega(\omega + i\gamma)]}, \quad (5)$$

式中： ϵ_m 为金属银的相对介电常数； ϵ_∞ 为高频相对介电常数； γ 为电子碰撞频率； ω_p 为金属自由电子气的等离子频率。根据拟合结果，可设 $\epsilon_\infty = 3.7$, $\omega_p = 9.1$ eV, $\gamma = 0.018$ eV^[26]。

传输矩阵法可使复杂光学结构的计算简化，常被用于多层薄膜结构光传输特性的理论研究^[27]。假设图1所示的薄膜结构自左向右各界面分别为第1, 2, 3, ..., 2N+5层(N为布拉格光栅周期数)， E_{j-1}^+ 为入射光在第j层界面左侧的电场分量， E_{j-1}^- 为反射光在第j层界面左侧的电场分量， E_j^+ 为入射光在第j层界面右侧的电场分量， E_j^- 为反射光在第j层界面右侧的电场分量($j=1, 2, 3, \dots, 2N+5$)。当入射光为横磁(TM)偏振时，第j层界面的透射和反射系数可分别表示为

$$t_j = \frac{2n_{j-1} \cos\theta_{j-1}}{n_{j-1} \cos\theta_j + n_j \cos\theta_{j-1}}, \quad (6)$$

$$r_j = \frac{n_{j-1} \cos\theta_j - n_j \cos\theta_{j-1}}{n_{j-1} \cos\theta_j + n_j \cos\theta_{j-1}}, \quad (7)$$

式中： n_j 为第j层介质的折射率； θ_j 为光波在第j+1层介质处的入射角。

同一层两界面上的电场可表示为

$$\begin{bmatrix} E_j^- \\ E_j^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(-i\phi_j) & 0 \\ 0 & \exp(i\phi_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_j^- \\ E_j^+ \end{bmatrix} = \mathbf{P}_j \begin{bmatrix} E_j^- \\ E_j^+ \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 $\mathbf{P}_j = \begin{bmatrix} \exp(-i\phi_j) & 0 \\ 0 & \exp(i\phi_j) \end{bmatrix}$ ， ϕ_j 为第j层介质左右界面光波的相位差，可表示为

$$\phi_j = 2\pi d_j n_j \cos\theta_j / \lambda, \quad (9)$$

式中 d_j 为第j层介质的厚度， λ 为波长。由斯内尔定律($n_j \sin\theta_j = n_{j-1} \sin\theta_{j-1}$)，可得任意界面光传播角度 θ_j 与入射角的关系。这里， $n_0 = n_{2N+5} = 1$, $\theta_0 = \theta$ 。由菲涅耳公式可得

$$\begin{bmatrix} E_{j-1}^- \\ E_{j-1}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/t_j & r_j/t_j \\ r_j/t_j & 1/t_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_j^- \\ E_j^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{2n_{j-1} \cos\theta_{j-1}} \begin{bmatrix} A_j & B_j \\ B_j & A_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_j^- \\ E_j^+ \end{bmatrix} = \mathbf{M}_j \begin{bmatrix} E_j^- \\ E_j^+ \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中： $A_j = n_{j-1} \cos\theta_j + n_j \cos\theta_{j-1}$ ； $B_j = n_{j-1} \cos\theta_j - n_j \cos\theta_{j-1}$ ； $\mathbf{M}_j = \frac{1}{2n_{j-1} \cos\theta_{j-1}} \begin{bmatrix} A_j & B_j \\ B_j & A_j \end{bmatrix}$ 。结合(8)式和(10)式可得

$$\begin{bmatrix} E_0^- \\ E_0^+ \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{M}_2 \mathbf{P}_2 \cdots \mathbf{M}_{2N+5} \begin{bmatrix} E_{2N+5}^- \\ E_{2N+5}^+ \end{bmatrix}. \quad (11)$$

用 \mathbf{S} 表示此结构的传输矩阵，则有

$$\mathbf{S} = \mathbf{M}_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{M}_2 \mathbf{P}_2 \cdots \mathbf{M}_{2N+5} = \left[\prod_{j=1}^{2N+4} \mathbf{M}_j \mathbf{P}_j \right] \mathbf{M}_{2N+5} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{21} 、 S_{22} 为矩阵 \mathbf{S} 的矩阵元。

根据(12)式可分别计算出多层薄膜光学结构的反射率 $R = |S_{21}/S_{11}|^2$ 、透射率 $T = |1/S_{11}|^2$ 及吸收率 $A = 1 - T - R$ 。当入射光为横电(TE)偏振时，(6)式和(7)式变为

$$t_j = \frac{2n_{j-1} \cos\theta_{j-1}}{n_j \cos\theta_j + n_{j-1} \cos\theta_{j-1}}, \quad (13)$$

$$r_j = \frac{n_j \cos\theta_j - n_{j-1} \cos\theta_{j-1}}{n_j \cos\theta_j + n_{j-1} \cos\theta_{j-1}}. \quad (14)$$

将(13)式和(14)式代入(8)~(12)式，可计算出入射光为TE偏振时薄膜结构的透射谱、反射谱和吸收谱。

3 结果及分析

为验证理论计算结果并获得光场分布情况，采用时域有限差分法(FDTD)对多层薄膜光学结构进行数值模拟^[28]，FDTD的数值模拟设置如下：当光从左至右垂直入射时，x轴两端设为完全匹配层，y轴两端设为周期性边界条件；当光斜入射时，y轴两端改变为布洛赫边界条件；网格设置为非均匀网格，最小网格为0.068 nm，最大网格为4 nm。取参数 $\theta = 0$, $d_1 = 275$ nm, $d_2 = 160$ nm, $d_{s1} = d_{s2} = 220$ nm, $d_a = 200$ nm, $N = 6$, $\mu_c = 0.252$ eV。得到的多层薄膜光学结构的反射谱、透射谱和吸收谱如图2所示。

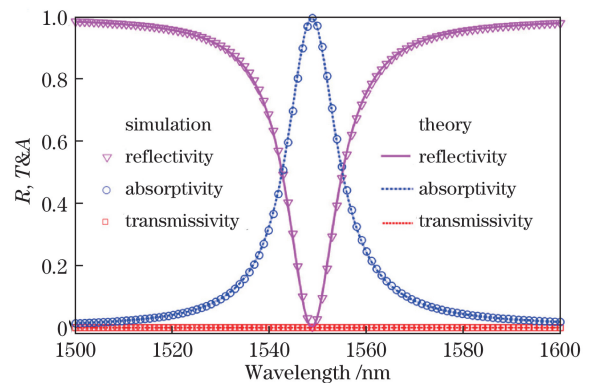


图2 多层薄膜光学结构的反射谱、透射谱和吸收谱
Fig. 2 Reflectance, transmission, and absorptivity spectra of the multilayer thin-film structure

由图2可知，多层薄膜光学结构的透射、吸收及反射谱线的数值模拟结果与理论结果一致，该

结构在近红外波段的透射率几乎为 0。吸收谱在 1549 nm 处形成了明显的窄峰,该吸收峰的出现源于该结构塔姆态的产生,即塔姆等离子激元^[21]。有无多层薄膜时单层石墨烯的光吸收谱及多层薄膜结构的电场强度分布如图 3 所示,其中入射波长为 1549 nm、入射电场强度为 1 V/m,参数设置如下: $\theta=0, d_1=275 \text{ nm}, d_2=160 \text{ nm}, d_{s1}=d_{s2}=220 \text{ nm}, d_a=200 \text{ nm}, N=6, \mu_c=0.252 \text{ eV}$ 。如图 3(a) 所示,石墨烯在 1549 nm 处的光吸收率高达 85.76%, 远超过单层石墨烯的固有吸收率(2.3%)。由图 3(b) 可知,绝大部分光场被局域在布拉格光栅与金属之间,形成了塔姆等离子激元,在金属附近的隔离层中产生极大的场增强^[21]。若将石墨烯引入到隔离层,光与石墨烯的相互作用将得到增强,石墨烯在 1549 nm 波长处的光吸收率将显著提高。塔姆等离子激元的产生取决于布拉格光栅-金属结构,与石墨烯无关。相比以前提出的表面等离子激元方法^[10],此塔姆等离子激元将单层石墨烯的光吸收率提高了近 1 倍,且结构更简单,易于制备。

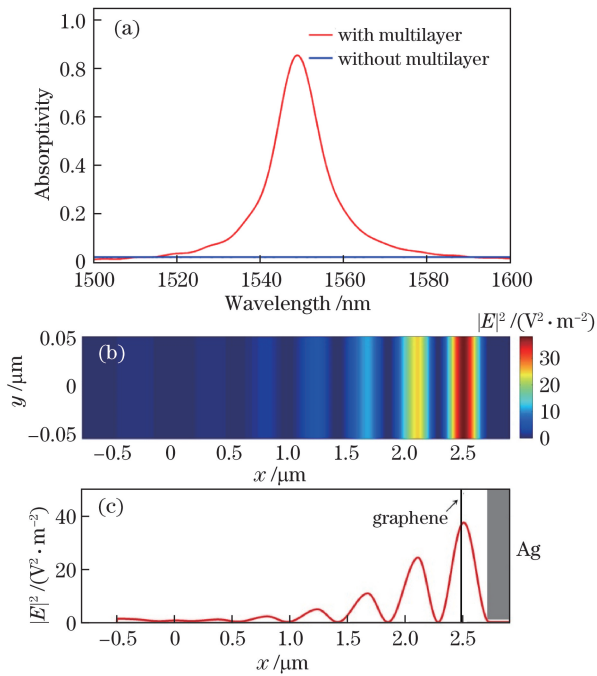


图 3 吸收谱及电场强度分布。(a)有无多层薄膜时单层石墨烯的光吸收谱;(b)多层薄膜结构的电场强度分布;(c)沿 x 轴方向的电场强度分布

Fig. 3 Absorption spectra and electric field intensity distribution. (a) Light absorption spectra of monolayer graphene with/without the multilayer thin-film structure; (b) electric intensity field distribution of the multilayer structure; (c) intensity profile of electric field along the x -axis direction

石墨烯光吸收率与塔姆等离子激元的场强、场分布密切相关。改变布拉格光栅周期 N 可改变间隔层的电场强度,进而调控石墨烯的光吸收率。石墨烯光吸收率与布拉格光栅周期数的关系曲线及多层薄膜结构的电场强度分布如图 4 所示。由图 4(a) 可知,石墨烯光吸收率依赖于布拉格光栅周期数 N 。根据耦合模理论,薄膜结构的光吸收率可表示为 $\alpha=4\delta\gamma_e/[(\omega-\omega_0)^2+(\delta+\gamma_e)^2]$ ^[29],其中, γ_e 为外部辐射率, δ 为内在损耗率, ω 为角频率, ω_0 为结构的共振角频率。由于 γ_e 和 δ 随 N 的变化而改变,当 N 从 0 增大到 6 时,随着间隔层场约束的不断增强,场约束条件逐渐接近结构的临界耦合条件($\gamma_e=\delta$)^[29],石墨烯光吸收率急剧增大;当 $N=6$ 时,石墨烯的光吸收率达到峰值;当 N 进一步增大时,场约束条件逐渐远离石墨烯的临界耦合条件,场约束减弱,石墨烯光吸收率不断减小。图 4(b) 所示为 $N=10$ 时薄膜的光场强度分布,可以看出,间隔层内部的电场强度整体较弱,且大部分光被反射,石墨烯光

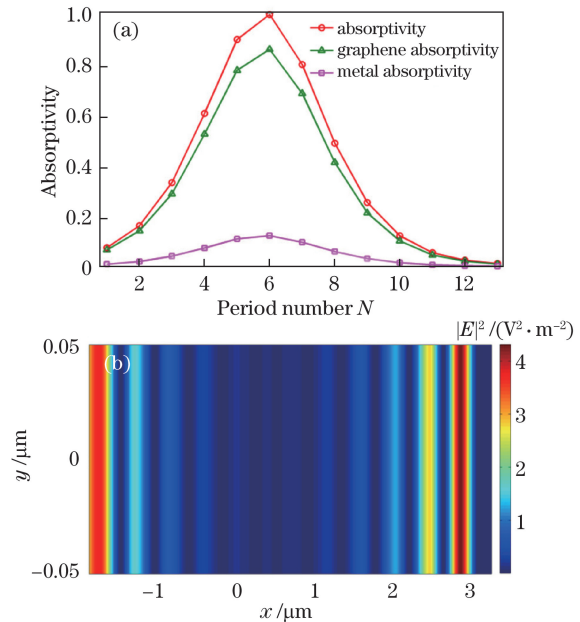


图 4 石墨烯光吸收曲线及多层薄膜结构的电场强度分布。(a)入射波长为 1549 nm 时,吸收率与布拉格光栅周期数 N 的关系曲线;(b)入射光波长为 1549 nm、 $N=10$ 时,多层薄膜结构的电场强度分布

Fig. 4 Graphene absorptivity curves and electric field intensity distribution of multilayer film structure. (a) Curves of absorptivity and the period number N of Bragg grating with the incident wavelength of 1549 nm; (b) electric field intensity distribution of multilayer thin film structure with incident wavelength of 1549 nm and $N=10$

吸收率只有 10% 左右。石墨烯的引入改变了多层薄膜系统的吸收情况,当 N 从 1 增大到 7 时,石墨烯会增强系统的总吸收率;当 N 进一步增大时,石墨烯将抑制系统的总吸收率。

图 5 为石墨烯光吸收与石墨烯在间隔层中位置的关系图。如图 5(a) 所示,石墨烯的光吸收谱峰值随 d_{s2} (间隔层总厚度、电压不变) 的改变而变化,但吸收谱峰位置保持不变。石墨烯为单原子层,其介电常数实部的变化对薄膜结构电场强度分布的影响较小,但虚部可随 d_{s2} 的变化有效改变间隔层、石墨烯层的电场强度。图 5(b) 所示为石墨烯吸收峰值与 d_{s2} (间隔层总厚度不变) 的关系曲线。在此薄膜结构中,石墨烯光吸收率 A 的理论结果可由石墨烯体积 V 中石墨烯的吸收功率比进行计算^[9],表达式为

$$A = \frac{\iiint_V w(x, y) dV}{0.5c\epsilon_0 |E_{in}|^2 S \cos\theta}, \quad (15)$$

式中: w 为功率损耗密度, $w(x, y) = 0.5\epsilon_0\omega \cdot \epsilon''(x, y) |E(x, y)|^2$, $\epsilon''(x, y)$ 为石墨烯相对介电常数的虚部, $E(x, y)$ 为石墨烯所在位置的电场强度; c 为真空中的光速; S 为多层薄膜结构在 xy 平面内的面积; E_{in} 为入射光的电场强度。如图 5(b) 所示,数值模拟与理论计算结果非常吻合。由图 5 可知,

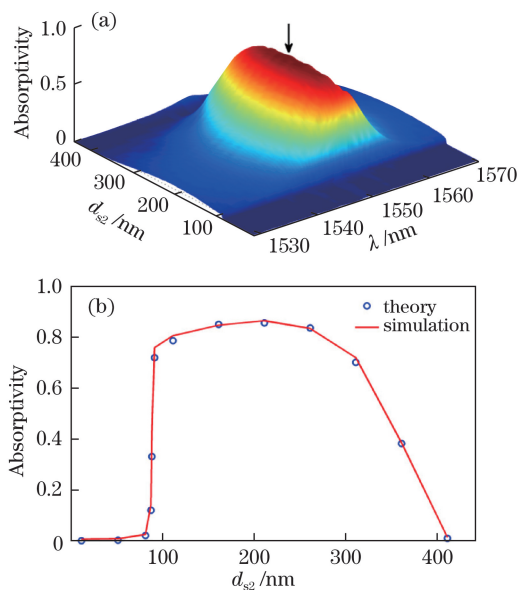


图 5 石墨烯的光吸收随 d_{s2} 的变化。(a) 石墨烯的吸收谱随 d_{s2} 的演化;(b) 石墨烯吸收峰值与 d_{s2} 的关系曲线 ($N=6$)

Fig. 5 Changes of light absorption of graphene with d_{s2} . (a) Spectral evolution of graphene light absorption with d_{s2} ; (b) curve of graphene light absorptivity peak versus d_{s2} when $N=6$

当 $d_{s2}=210$ nm 时(箭头处),石墨烯的光吸收率达到 86.44%。由于金属固有损耗的存在,石墨烯无法完全吸收入射光,但相比于表面等离子激元,该薄膜结构的石墨烯光吸收更具优势。

考虑入射角对石墨烯光吸收的影响,研究了石墨烯的光吸收与入射光角度的关系,参数设定如下: $d_1=275$ nm, $d_2=160$ nm, $d_{s1}=230$ nm, $d_{s2}=210$ nm, $d_a=200$ nm, $N=6$, $\mu_c=0.258$ eV。图 6(a) 所示为不同角度下 TE 和 TM 偏振对应的石墨烯光吸收谱。可以看出,当入射角较大时,TE 和 TM 偏振将产生不同的吸收谱^[21]。如图 6(b) 所示,随着入射角的增大,吸收峰发生蓝移^[21],数值模拟与理论计算结果吻合。入射角度影响石墨烯光吸收的原因可从理论模型直观得到,(6)~(10)式中的相关参数均与入射角 θ 有关,经累积相乘,吸收谱将受 θ 影响。此结果为调控石墨烯的光吸收波长提供了一种简单有效的方法。由(9)式可知,塔姆等离子激元波长与布拉格光栅层的厚度有关,调节布拉格光栅层将引起石墨烯光吸收峰的变化。图 6(c)、(d) 所示为不同的 SiO_2 层厚度 d_1 对石墨烯光吸收谱的影响。由图 6(d) 可知,石墨烯的光吸收峰随 SiO_2 层厚度的增加发生红移,模拟结果与理论计算相符。同理,石墨烯的光吸收峰随 Si_3N_4 层厚度 d_2 的增加也会发生红移。

以上结果均为 TM 偏振光入射的情况,当入射光为 TE 偏振时,石墨烯的光吸收峰将因塔姆等离子激元波长的变化与 TM 吸收峰分离^[21],如图 6(b) 所示。

石墨烯化学势的变化可影响塔姆等离子激元状态,进而调节薄膜结构的光吸收特性。塔姆等离子激元的工作波长随石墨烯化学势的变化而发生偏移。如图 7(a) 所示,随石墨烯化学势的变化,多层薄膜结构的光吸收率保持了较高水平;当石墨烯的化学势达到一定值时,光吸收率迅速降低。该现象可利用石墨烯的吸收特性进行解释:当石墨烯的化学势较小时,石墨烯的价带电子吸收入射光,跃迁到导带,发生带间吸收;当石墨烯的化学势较高并超过入射光能量的一半时,由于泡利阻塞效应,石墨烯的价带电子无法跃迁到导带,入射光将不被石墨烯吸收,该结构的光吸收率迅速降低。利用此原理,可实现结构光吸收的主动调控。当石墨烯化学势为 0.325 eV 和 0.398 eV 时,薄膜结构的光吸收率比值随波长的变化如图 7(b) 所示,可以看出,当入射光波长为 1542 nm 时,吸收率比值达到最大值(6.08)。

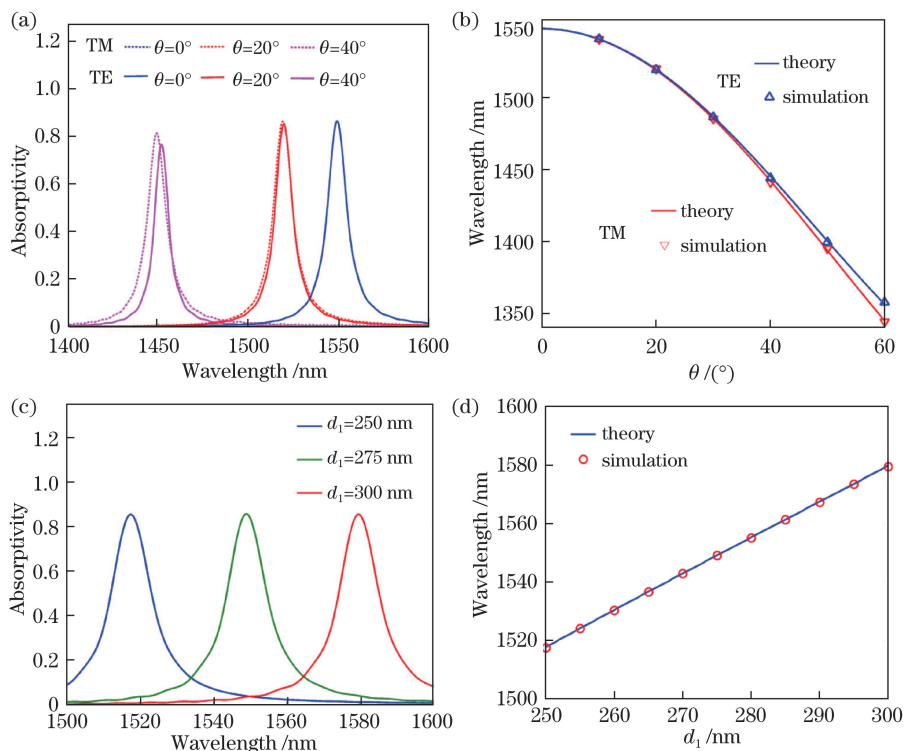


图 6 石墨烯的光吸收谱。(a)不同入射角 θ 对应的石墨烯光吸收谱;(b)石墨烯的光吸收峰波长与 θ 的关系曲线;
(c)不同 SiO₂ 层厚度 d_1 对应的石墨烯光吸收谱;(d)石墨烯的光吸收峰波长与 d_1 的关系曲线

Fig. 6 Graphene absorption spectra. (a) Absorption spectra of graphene with different incident angles θ ; (b) curves of peak wavelength of graphene absorption versus θ ; (c) light absorption spectra of graphene versus the thicknesses d_1 of SiO₂ layer; (d) curve of peak wavelength of graphene absorption versus d_1

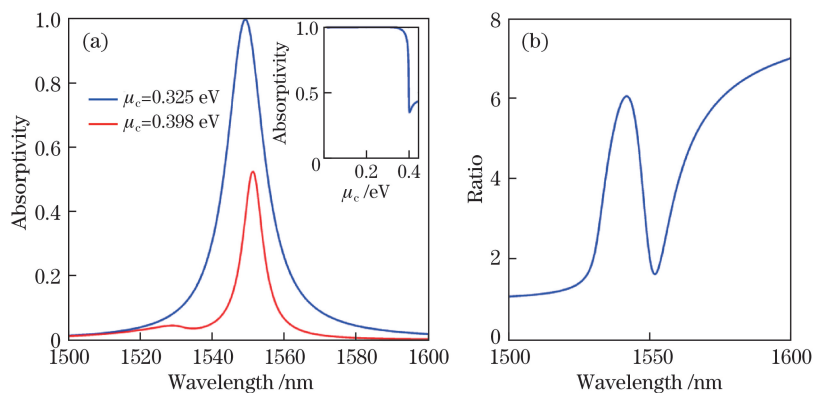


图 7 石墨烯化学势对多层薄膜结构的光吸收的影响。(a)石墨烯化学势为 0.325 eV 和 0.398 eV 时,多层薄膜结构的光吸收谱,插图为 1549 nm 处该结构的光吸收率随石墨烯化学势的变化曲线;(b)石墨烯化学势为 0.325 eV 和 0.398 eV 时多层薄膜结构的光吸收比

Fig. 7 Effect of graphene chemical potential on light absorption of multilayer films. (a) Light absorption spectra of multilayer film structure with chemical potential of 0.325 eV and 0.398 eV (The illustration is the variation curve of light absorptivity versus graphene e chemical potential at 1549 nm); (b) light absorption ratio of multilayer films with graphene chemical potential of 0.325 eV and 0.398 eV

4 结 论

提出了一种新型的多层薄膜光学结构,利用该结构产生的塔姆等离子激元及其强场局域特性,有效

诱导了石墨烯的近红外光吸收增强。通过传输矩阵理论计算和 FDTD 数值模拟,发现在塔姆等离子激元波长处,薄膜结构中单层石墨烯的光吸收率可达 86.44% (约增大了 36 倍)。讨论了相关物理参数对

石墨烯光吸收的调控特性。研究表明,石墨烯的光吸收峰依赖于布拉格光栅的周期和石墨烯位置的变化,随入射角的增大发生蓝移,随布拉格光栅层厚度的增大发生红移。利用石墨烯的泡利阻塞效应,通过改变石墨烯的化学势可实现多层薄膜结构光吸收的调控。研究结果为实现新型高性能石墨烯光电子器件(如探测器、调制器)开辟了新途径。

参 考 文 献

- [1] Li Z Q, Feng D D, Li X, *et al.* Graphene surface plasmon polaritons based photoelectric modulator with double branched structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0124001.
李志全, 冯丹丹, 李欣, 等. 基于石墨烯表面等离激元的双支节结构光电调制器[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0124001.
- [2] Fan P Y, Chettiar U K, Cao L Y, *et al.* An invisible metal-semiconductor photodetector[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 380-385.
- [3] Pospischil A, Humer M, Furchi M M, *et al.* CMOS-compatible graphene photodetector covering all optical communication bands[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7: 892-896.
- [4] Bao Q L, Loh K P. Graphene photonics, plasmonics, and broadband optoelectronic devices[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(5): 3677-3694.
- [5] Fang Z Y, Liu Z, Wang Y M, *et al.* Graphene-antenna sandwich photodetector[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(7): 3808-3813.
- [6] Zhu X L, Shi L, Schmidt M S, *et al.* Enhanced light-matter interactions in graphene-covered gold nanovoid arrays[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(10): 4690-4696.
- [7] Engel M, Steiner M, Lombardo A, *et al.* Light-matter interaction in a microcavity-controlled graphene transistor[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 906.
- [8] Stauber T, Gómez-Santos G, García de Abajo F J. Extraordinary absorption of decorated undoped graphene[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(7): 077401.
- [9] Zhao B, Zhao J M, Zhang Z M. Enhancement of near-infrared absorption in graphene with metal gratings[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(3): 031905.
- [10] 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.
- [11] Li X H, Zhu J M, Wei B Q. Hybrid nanostructures of metal/two-dimensional nanomaterials for plasmon-enhanced applications[J]. *Chemical Society Reviews*, 2016, 45: 3145-3187.
- [12] Jiang X Q, Liu Z B, Tian J G. The optical properties of graphene and its application[J]. *Progress in Physics*, 2017, 37(1): 22-36.
姜小强, 刘智波, 田建国. 石墨烯光学性质及其应用研究进展[J]. *物理学进展*, 2017, 37(1): 22-36.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [16] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(2): 83-91.
- [17] Ren H, Li X, Zhang Q, *et al.* On-chip noninterference angular momentum multiplexing of broadband light[J]. *Science*, 2016, 352(6287): 805-809.
- [18] Lu H, Liu X M, Mao D. Plasmonic analog of electromagnetically induced transparency in multi-nanoresonator-coupled waveguide systems[J]. *Physical Review A*, 2012, 85(5): 053803.
- [19] Lu H, Zeng C, Zhang Q M, *et al.* Graphene-based active slow surface plasmon polaritons[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8443.
- [20] Zhang X L, Song J F, Li X B, *et al.* Optical Tamm states enhanced broad-band absorption of organic solar cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(24): 243901.
- [21] Kaliteevski M, Iorsh I, Brand S, *et al.* Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror[J]. *Physical Review B*, 2007, 76(16): 165415.
- [22] Sasin M E, Seisyan R P, Kaliteevski M A, *et al.* Tamm plasmon polaritons: Slow and spatially compact light[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(25): 251112.
- [23] Christensen J, Manjavacas A, Thongrattanasiri S, *et al.* Graphene plasmon waveguiding and hybridization in individual and paired nanoribbons[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(1): 431-440.

- [24] Chen P Y, Alù A. Atomically thin surface cloak using graphene monolayers[J]. ACS Nano, 2011, 5(7): 5855-5863.
- [25] Lu H, Gan X T, Mao D, *et al.* Graphene-supported manipulation of surface plasmon polaritons in metallic nanowaveguides[J]. Photonics Research, 2017, 5(3): 162-167.
- [26] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. Physical Review B, 1972, 6(12): 4370.
- [27] Wartak M S. Computational photonics-An introduction with MATLAB[M]. Wu Z S, Wu X S, Transl. Beijing: Science Press, 2015: 56-60.
瓦泰克. 计算光子学—MATLAB 导论[M]. 吴宗森, 吴小山, 译. 北京: 科学出版社, 2015: 56-60.
- [28] Taflove A, Hagness S. Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method [M]. 3rd ed. Boston: Artech House, 2005: 1-997.
- [29] Piper J R, Fan S H. Total absorption in a graphene monolayer in the optical regime by critical coupling with a photonic crystal guided resonance[J]. ACS Photonics, 2014, 1(4): 347-353.