

基于磁光光子晶体的石墨烯光吸收增强

武继江*, 赵浩旭, 高金霞

山东理工大学物理与光电工程学院, 山东 淄博 255000

摘要 单层石墨烯的吸收率非常低,从而一定程度上限制了其在光电子学领域的应用。基于石墨烯的磁光效应,提出利用磁光光子晶体来增强石墨烯吸收率的方案。利用 4×4 传输矩阵法研究了相关物理参数对石墨烯吸收率的影响。结果表明:通过调节外加磁场可以有效增强石墨烯的吸收率,石墨烯的吸收特性表现出一定的磁圆二色性;调节外加磁场的磁感应强度和费米能量,可使石墨烯对左旋圆偏振光和右旋圆偏振光均具有较高的吸收率,在一定条件下可实现近完美吸收。研究结果为基于石墨烯的高性能磁圆二色性传感器、光吸收器和光电探测器等新型光电子器件的设计及制作提供了理论依据。

关键词 薄膜; 石墨烯; 磁光光子晶体; 吸收器; 传输矩阵法

中图分类号 O436.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0403003

Enhancing Light Absorption of Graphene Using Magneto-Optical Photonic Crystals

Wu Jijiang*, Zhao Haoxu, Gao Jinxia

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China

Abstract A monoatomic graphene layer exhibits considerably low absorptance, limiting its application in the optoelectronics field to some extent. In this study, we propose a method of enhancing the absorption of graphene using magneto-optical photonic crystals based on the magneto-optical effect of graphene. Subsequently, the 4×4 transfer matrix method was employed to study the influence of the relevant physical parameters on the absorption of graphene. The results show that the absorption of graphene can be effectively enhanced by adjusting the external magnetic field and that the absorption properties of graphene exhibit a certain amount of magnetic circular dichroism. However, graphene can exhibit high absorption for both left and right circularly polarized light by appropriately adjusting the magnetic induction of the external magnetic field and the Fermi energy, and near-perfect absorption can be achieved under certain conditions. The results of this study provide a theoretical basis to design and fabricate novel graphene-based optoelectronic devices such as magnetic circular dichroism sensor with high-performance, optical absorbers, and photodetectors.

Key words thin films; graphene; magneto-optical photonic crystal; absorber; transfer matrix method

OCIS codes 310.6860; 160.5298; 230.5440

1 引 言

石墨烯是一种由单层碳原子构成的二维材料,具有较高的电子迁移率和优异的电磁特性,已在透明导电膜、光调制器、光伏器件、光吸收器和光电探测器等方面得到了广泛应用^[1-3]。研究表明,在紫外到红外这一较宽的频带,单层石墨烯对入射光的光吸收率仅为 2.3%,从而极大地限制了

石墨烯在相关领域中的应用。为了提高石墨烯的光吸收率,研究人员提出了各种光学结构。

相关研究表明,将石墨烯加载到一维光子晶体表面可以形成多层光学薄膜结构,该结构利用石墨烯与光子晶体之间的间隔层所形成的光子局域特性来增强石墨烯的吸收率,但这种方法的增强效果非常有限,仅可使石墨烯的吸收率提高 3~4 倍^[4-6]。Kang 等^[7]研究了加载有石墨烯的含单

收稿日期: 2019-10-14; 修回日期: 2019-11-11; 录用日期: 2019-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(11604182)

* E-mail: w9513110@163.com

缺陷的光子晶体结构的吸收特性后发现,在一定的结构参数下,该结构在某些波段的吸收率提高了16倍。在光通信波长方面,Zhou等^[8]研究了一种基于石墨烯的Fabry-Perot腔结构,通过优化结构参数使石墨烯在光通信波长的吸收率由2.3%提高到83.2%。黎志文等^[9]和Wang等^[10]分别基于所提出的多层光学薄膜结构,使石墨烯的吸收得到了极大增强,在一定条件下可实现近完美吸收。此外,也有研究者提出了将石墨烯插入到周期或准周期光子晶体结构中来改善石墨烯吸收特性的方案^[11-12]。可以看出,尽管单层石墨烯的吸收率仅为2.3%,但通过合适的光学结构可使石墨烯的吸收率得到极大提高。

石墨烯具有诸多优异的物理特性,磁光效应是其中重要的一个方面。基于石墨烯的磁光效应,各种结构的光隔离器、法拉第旋转器等得到了广泛研究^[13-14]。上述增强单层石墨烯光吸收率的研究均没有考虑外磁场对石墨烯光吸收特性的影响,即没有考虑石墨烯的磁光效应。最近,Rashidi等^[15-16]基于前人研究的多层光学薄膜结构利用外磁场来增强石墨烯的吸收,结果发现,基于石墨烯的磁光效应,通过调节外加磁场可使单层石墨烯对圆偏振光的吸收得到有效增强,他们提出的结构有望在偏振光学领域得到应用。在Rashidi等构造的多层光学薄膜结构中,除石墨烯外,其他材料均为非磁性材料。本文拟利用磁性材料构成磁光光子晶体,在外磁场的作用下来增强石墨烯的吸收。

2 结构模型与方法

本文所讨论的薄膜的光学结构如图1所示,该结构可表示为GM(MD)^N或GD(MD)^N。这里G为石墨烯,磁性材料M和传统的电介质材料D构成周期为N的一维磁光光子晶体。在相关文献中,该多层薄膜光学结构已被用于增强石墨烯的吸收率^[4-6],所不同的是,这里的薄膜光学结构是由磁性材料M和电介质材料D构成的。为增强石墨烯的光学吸收,在该结构中,石墨烯和一维磁光光子晶体之间加入了一层电介质材料或磁性材料作为间隔层。这时,由于光子晶体的表面局域缺陷产生了光子局域化,因此石墨烯的反射率降低,吸收增强。

设外磁场的磁感应强度的方向沿z轴方向,此时图1所示薄膜光学结构中各种材料的相对介电常数可表示为

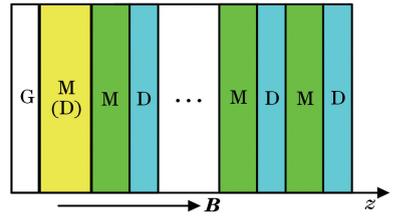


图1 石墨烯-磁光光子晶体结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of graphene-magneto-optical photonic crystal

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ -\epsilon_{xy} & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

对于电介质材料有 $\epsilon_{xy}=0$ 和 $\epsilon_{zz}=\epsilon_{xx}$ 。对于石墨烯G, $\epsilon_{zz}=1$,而且

$$\epsilon_{xx} = 1 + \frac{i\sigma_{xx}}{\omega\epsilon_0 d_g}, \epsilon_{xy} = \frac{i\sigma_{xy}}{\omega\epsilon_0 d_g}, \quad (2)$$

其中,

$$\sigma_{xx}(\omega, B) = \frac{P}{\pi} \frac{\Gamma - i\omega}{\omega_c^2 - (\omega + i\Gamma)^2}, \quad (3)$$

$$\sigma_{xy}(\omega, B) = -\frac{P}{\pi} \frac{\omega_c}{\omega_c^2 - (\omega + i\Gamma)^2}, \quad (4)$$

式中: B 为磁感应强度的大小; d_g 为石墨烯层的厚度,这里取0.34 nm; ϵ_0 为真空中的介电常数; ω 为入射光的角频率; σ_{xx} 和 σ_{xy} 为石墨烯电导率张量的矩阵元^[15]; $P = e^2 |E_F|/\hbar^2$; $\omega_c = eBv_F^2/E_F$; Γ 为散射率; e 为元电荷; \hbar 为普朗克常数; v_F 为费米速度; E_F 为费米能量。对于磁性材料,由于存在外磁场,因此 ϵ_{xy} 是 B 的函数^[17], ϵ_{zz} 、 ϵ_{xx} 与 B 无关,且有 $\epsilon_{zz} \neq \epsilon_{xx}$ 。

针对含磁性材料的分层结构的光学特性,以下将采用4×4传输矩阵法进行研究,该方法的详细描述参见文献^[18]。由该传输矩阵法可以看出,多层光学薄膜结构的光学特性仅与介电张量元 ϵ_{xx} 和 ϵ_{xy} 有关。

3 计算结果与分析

设垂直入射的光波为线偏振光,利用4×4传输矩阵法可计算得到图1所示多层光学薄膜结构的吸收特性。线偏振光可以看作是由两个旋向相反的左右旋圆偏振光叠加而成的。左旋圆偏振光(LCP)和右旋圆偏振光(RCP)在图1所示结构中传播时,吸收特性存在一定差异。图2给出了在相同的结构参数下,两种结构GM(MD)¹⁰和GD(MD)¹⁰在外磁场作用下的吸收谱。在计算中,磁性材料选择Ce:YIG,其介电张量元 $\epsilon_{xx}=4.884$ 。为简单起见,先设 ϵ_{xy} 不随磁场变化,取 $\epsilon_{xy}=0.009i$ ^[18];电介质材料D选择SiO₂,其

相对介电常数 $\epsilon_D = 2.19^{[18]}$ 。类似于文献[15], 石墨烯的相关参数在计算过程中的取值如下: 费米能量 $E_F = -0.34$ eV, 费米速度 $v_F = 10^6$ m/s, 散射率 $\Gamma = 10$ meV/ \hbar 。除石墨烯外, 其他各层材料的光学厚度满足 $n_D d_D = n_M d_M = \lambda_0/4$ 。这里 n_D (n_M) 和 d_D (d_M) 分别为电介质材料(磁性材料)的折射率和几何厚度, λ_0 为参考波长, 取 $\lambda_0 = 70$ $\mu\text{m}^{[15]}$ 。

由图 2 可以看出, 在所采用的参数下, 图 1 所示结构在以 70 μm 为中心的一个波段范围内表现出较强的吸收, 而在这一吸收带两侧, 还有一定数目的次吸收带。无外加磁场时, 左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的吸收率基本一致; 外加磁场的磁感应强度

不为零时, 两种圆偏振光的吸收率随着 B 的变化而有所不同。在当前参数下, 随着 B 增大, 左旋圆偏振光的吸收率增大, 而右旋圆偏振光的吸收率则减小。由图 2 还可以看出, 当外加磁场不为零时, 左旋圆偏振光的吸收率总体上要大于右旋圆偏振光的吸收率, 表现出一定的磁圆二色性。比较图 2(a) 和图 2(b) 可看出: 在相同的 B 下, 结构 GM(MD)¹⁰ 的吸收带的峰值半宽度要小于结构 GD(MD)¹⁰ 的吸收带的峰值半宽度; 结构 GD(MD)¹⁰ 的次吸收带总体上大于结构 GM(MD)¹⁰ 的次吸收带, 这在实际应用中会引起一些不利影响。后续将主要研究以磁性材料作为间隔层的结构 GM(MD)¹⁰ 的吸收特性。

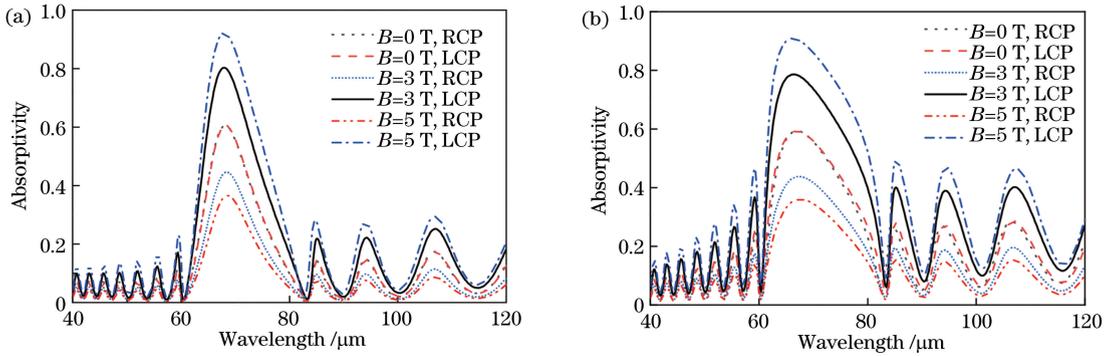


图 2 两种结构在外磁场作用下的吸收谱。(a) GM(MD)¹⁰; (b) GD(MD)¹⁰

Fig. 2 Absorption spectra of two structures at magnetic field. (a) GM(MD)¹⁰; (b) GD(MD)¹⁰

由图 2 可以看出, B 对石墨烯的吸收具有一定的调节作用。为全面了解 B 对吸收的影响, 在不同

的费米能量下, 分析了结构 GM(MD)¹⁰ 的吸收谱随 B 的变化。由图 3 可以看出, 类似于图 2 的计算结

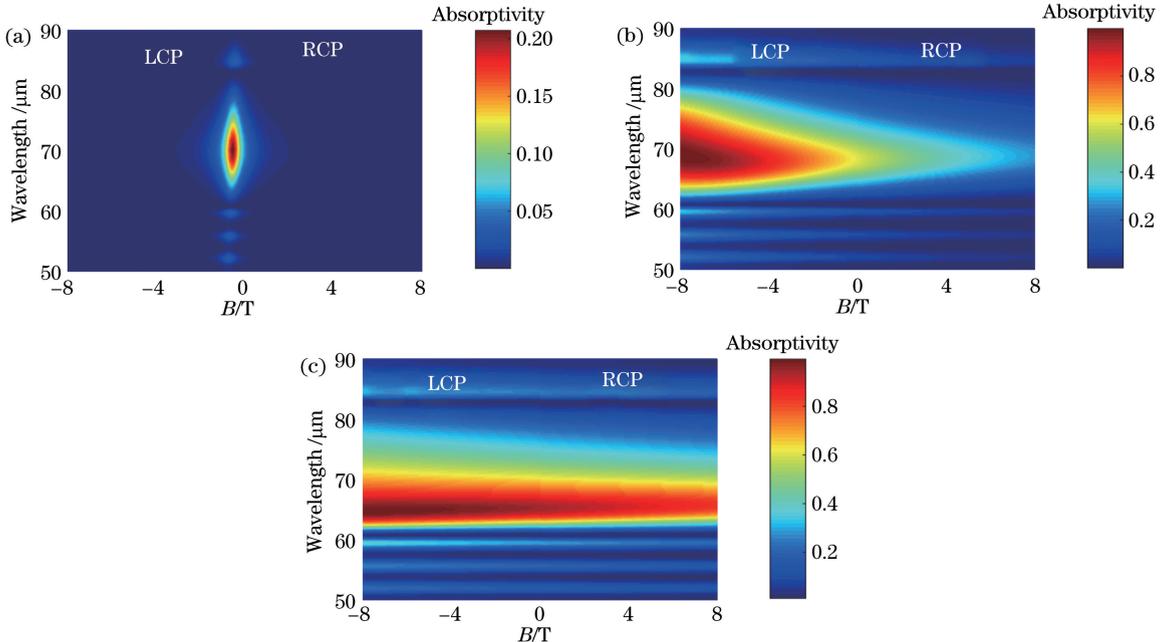


图 3 不同费米能量下外磁场对吸收率的影响。(a) $E_F = -0.02$ eV; (b) $E_F = -0.34$ eV; (c) $E_F = -1.00$ eV

Fig. 3 Influence of external magnetic field on absorption at different Fermi energies.

(a) $E_F = -0.02$ eV; (b) $E_F = -0.34$ eV; (c) $E_F = -1.00$ eV

果,相对于左旋圆偏振光,右旋圆偏振光的吸收率依然相对较低。 B 对吸收率的调节作用与费米能量有关联:当费米能量为 -0.02 eV时,对于左旋圆偏振光, B 在一个较窄的变化范围内才有一个相对较大的吸收率;当费米能量减小到 -0.34 eV时, B 可以在一个较大的变化范围内使左旋圆偏振光具有相当大的吸收率;当费米能量为 -1.00 eV时,不仅左旋圆偏振光具有较高的吸收率,右旋圆偏振光的吸收率也得到了相当的增强。此外,类似于图3(a)的结果,进一步的计算表明,在确定的费米能量下,随着 B 增大,左旋圆偏振光的吸收率先增大后减小,即在相应的费米能量下,存在一个最佳的 B ,使得左旋圆偏振光具有最高的吸收率。

图4给出了费米能量对吸收谱的影响。计算中取 $B=5$ T,其他参数取值同图2。对于右旋圆偏振光,当费米能量在量值上较小时,其吸收率非常低;当费米能量小于 -1.0 eV时,吸收率可达到90%以上;随着费米能量在量值上逐渐增大,吸收率先增大后减小,吸收带的峰值波长向短波方向移动,吸收带的宽度随之变窄。对于左旋圆偏振光,当费米能量大于 -0.1 eV时,吸收率较小,但随着费米能量在量值上的增大,吸收率骤然增大,而后随着费米能量在量值上增大,吸收谱的变化规律与右旋圆偏振光基本一致。此外,由图4还可看出,对于两种圆偏振光,在一定的费米能量下,石墨烯均可实现近完美吸收。

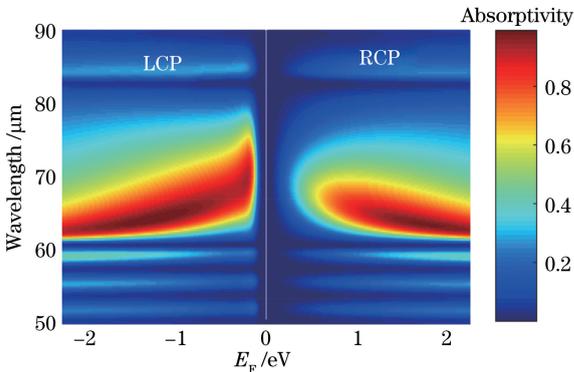


图4 费米能量对吸收谱的影响

Fig. 4 Effect of Fermi energy on absorption spectra

在上面的计算中,间隔层的光学厚度(表示为 d_{M1})取为中心波长的四分之一。相关文献的研究结果已表明^[4],间隔层的光学厚度对石墨烯的吸收具有重要影响。图5给出了间隔层的光学厚度 d_{M1} 对吸收的影响。计算中取 $B=5$ T, $E_F=-1.0$ eV,其他参数的取值同图2。图5中的 d_{M1} 以 λ_c ($\lambda_c =$

λ_0/n_M)为单位。由图5可以看出:随着 d_{M1} 增大,在以 $70 \mu\text{m}$ 为中心的一个波段范围内,周期性地出现了高吸收带;对于每一个吸收带,随着光学厚度增大,吸收峰向长波方向移动。由图5可知,通过调节间隔层的光学厚度 d_{M1} ,可在一定范围内实现对吸收峰中心波长的调节。

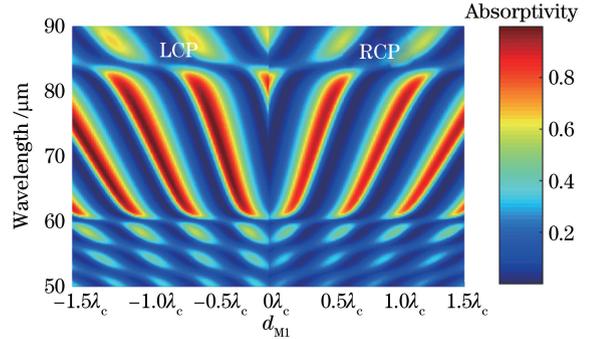


图5 间隔层光学厚度 d_{M1} 对吸收谱的影响

Fig. 5 Effect of thickness d_{M1} of spacer layer on absorption spectra

在前面的计算中,电介质材料D选用 SiO_2 。为了解电介质材料D对吸收的影响,图6给出了吸收谱随电介质材料D的相对介电常数 ϵ_D 的变化情况。计算中,各层光学厚度的取值同图2,其他参数的取值同图5。由图6可以看出, ϵ_D 对两种圆偏振光的影响基本一致,吸收率均随着 ϵ_D 的增大而逐渐减小,吸收带中心波长也随之向长波方向移动。可见,要得到大的吸收率,在构造磁光光子晶体时,电介质材料D的相对介电常数 ϵ_D 要尽可能小。

如前所述,磁性材料 Ce:YIG 的介电张量元 ϵ_{xy} 为 B 的函数,但在前面的计算中, ϵ_{xy} 固定为 $0.009i$ 不变,这不符合实际情况。为了解 ϵ_{xy} 对吸收的影响,图7给出了左旋圆偏振光在几种不同 ϵ_{xy} 取值下的吸收谱。为清晰地显示前三条曲线的差异,图7中的小图给出了它们在吸收峰附近的变化情况。计算中取 $B=3$ T, $E_F=-1.0$ eV,其他参数的取值同图2。由图7可以看出:当 ϵ_{xy} 的取值分别为 $0.003i$ 、 $0.006i$ 和 $0.009i$ 时, ϵ_{xy} 的改变对吸收的影响很小,可以忽略不计;当 ϵ_{xy} 增大到 $0.09i$ 时,吸收率曲线才有一个微小的平移。可见,只有当 ϵ_{xy} 足够大时,吸收谱才有较为明显的变化,而这种改变也仅是吸收率曲线整体向长波方向平移,并使峰值波长处的吸收率稍稍有了一定的增大。 ϵ_{xy} 由于外磁场的改变而发生的变化并不大,在通常情况下, ϵ_{xy} 不会达到 $0.9i$,因此 ϵ_{xy} 的改变对吸收的影响并不大,前面的计算结果依然是有效的。

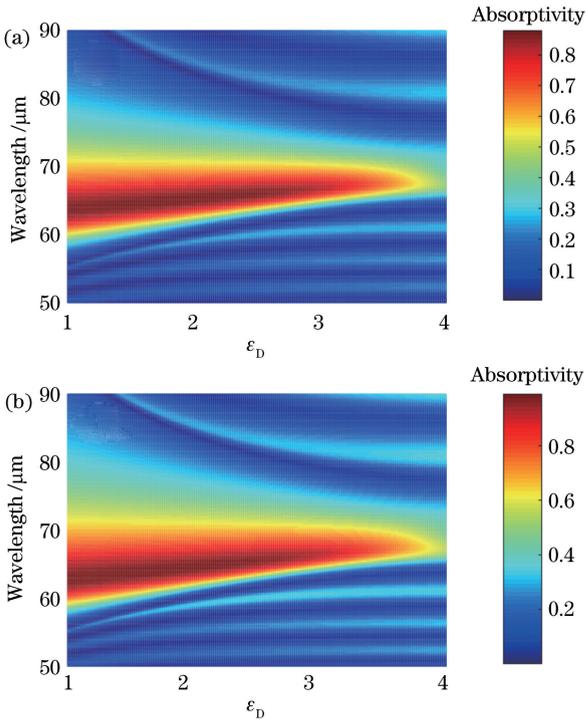


图 6 电介质材料的介电常数对吸收谱的影响。
(a) RCP; (b) LCP

Fig. 6 Effect of dielectric constant of dielectric material on absorption spectra. (a) RCP; (b) LCP

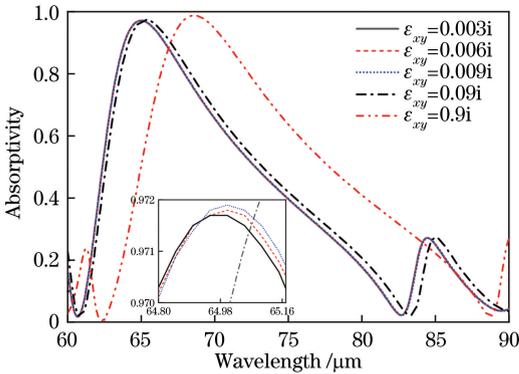


图 7 磁光材料的介电张量元 ϵ_{xy} 对吸收的影响
Fig. 7 Influence of dielectric tensor element ϵ_{xy} of magneto-optical material on absorption

4 结 论

基于石墨烯的磁光效应,本文利用磁光光子晶体在外磁场的作用来增强石墨烯的光吸收率。利用 4×4 传输矩阵法数值模拟了外磁场、石墨烯费米能量、间隔层光学厚度和电介质材料的相对介电常数对石墨烯吸收率的影响,讨论了入射光圆偏振态对石墨烯吸收率的影响与相关参数的依赖性。计算结果表明,石墨烯的吸收与入射光的圆偏振态有关,并表现出一定的磁圆二色性,且入射光圆偏振态对石

墨烯吸收率的影响在很大程度上依赖于费米能量。在合适的磁感应强度和费米能量的调节下,石墨烯对左旋圆偏振光和右旋圆偏振光均具有较高的吸收率,可以实现近完美吸收。研究结果为偏振光学领域基于石墨烯设计及制备磁圆二色性传感器、光吸收器和光电探测器提供了理论依据。

参 考 文 献

[1] Xiao G L, Yang X H, Yang H Y, et al. Plasma refractive index sensor with tunable cross tie-shaped graphene array structure [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0728011.
肖功利, 杨秀华, 杨宏艳, 等. 可调谐交叉领结形石墨烯阵列结构等离子体折射率传感器 [J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0728011.

[2] Wang L, Luan K Z, Zuo Y F, et al. Graphene optical modulator based on optical Tamm states [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1106001.
王磊, 栾开智, 左依凡, 等. 基于光学 Tamm 态的石墨烯光调制器 [J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1106001.

[3] Wang Y, Leng Y B, Dong L H, et al. Design of tunable metamaterial absorber based on graphene-metal hybrid structure [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0716001.
王越, 冷雁冰, 董连和, 等. 基于石墨烯-金属混合结构的可调超材料吸波体设计 [J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0716001.

[4] Liu J T, Liu N H, Li J, et al. Enhanced absorption of graphene with one-dimensional photonic crystal [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(5): 052104.

[5] Peres N M R, Bludov Y V. Enhancing the absorption of graphene in the terahertz range [J]. EPL (Europhysics Letters), 2013, 101(5): 58002.

[6] Xie L Y, Xiao W B, Huang G Q, et al. Terahertz absorption of graphene enhanced by one-dimensional photonic crystal [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(5): 057803.
谢凌云, 肖文波, 黄国庆, 等. 光子晶体增强石墨烯 THz 吸收 [J]. 物理学报, 2014, 63(5): 057803.

[7] Kang Y, Liu H, Cao Q. Enhanced absorption in heterostructure composed of graphene and a doped photonic crystal [J]. Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications, 2018, 12(11/12): 665-669.

[8] Zhou K, Cheng Q, Song J L, et al. Highly efficient narrow-band absorption of a graphene-based Fabry-Perot structure at telecommunication wavelengths [J]. Optics Letters, 2019, 44(14): 3430-3433.

- [9] Li Z W, Lu H, Li Y W, et al. Near-infrared light absorption enhancement in graphene induced by the Tamm state in optical thin films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0131001.
黎志文, 陆华, 李扬武, 等. 光学薄膜塔姆态诱导石墨烯近红外光吸收增强 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0131001.
- [10] Wang X, Jiang X, You Q, et al. Tunable and multichannel terahertz perfect absorber due to Tamm surface plasmons with graphene [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(6): 536-542.
- [11] Liu J T, Li X J, Wu Y Y, et al. Effect of thickness deviation on the absorption of graphene in photonic crystal microcavity [J]. *Optik*, 2018, 164: 610-616.
- [12] Zand I, Dalir H, Chen R T, et al. Multispectral selective near-perfect light absorption by graphene monolayer using aperiodic multilayer microstructures [J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11 (3): 035101.
- [13] Sattari M, Pourali N, Sadri B. Dual cavity modes in photonic microcavity-integrated graphene [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(7): 073102.
- [14] Roshan Entezar S, Karimi Habil M. Nonreciprocal optical isolation via graphene based photonic crystals [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, 449: 33-39.
- [15] Rashidi A, Namdar A, Abdi-Ghaleh R. Magnetically tunable enhanced absorption of circularly polarized light in graphene-based 1D photonic crystals [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(21): 5914-5919.
- [16] Rashidi A, Namdar A, Hatf A. Magnetic field induced enhanced absorption using a gated graphene/1D photonic crystal hybrid structure: quantum regime [J]. *Optical Materials*, 2018, 83: 73-77.
- [17] Jalali T, Hessamodini M. The effect of 1D magnetophotonic crystal defect mode on Faraday rotation [J]. *Optik*, 2015, 126(23): 3954-3958.
- [18] Abdi-Ghaleh R, Namdar A. Circular polarization bandpass filters based on one-dimensional magnetophotonic crystals [J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, 60(19): 1619-1626.