

基于石墨烯的表面等离激元带阻滤波器

赵静¹, 王加贤^{1*}, 邱伟彬², 邱平平², 任骏波², 林志立²

¹厦门工学院电子信息与电气工程学院, 福建 厦门 361021;

²华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021

摘要 提出了一种基于石墨烯的中红外波段表面等离激元带阻滤波器结构。该结构由单层石墨烯周期性排列组成。数值仿真结果表明,石墨烯纳米带化学势的轻微改变会导致谐振波长的移动。此结构在中红外光谱范围内的敏感度达 1100 nm/RIU,品质因数高达 138,可用作高灵敏度的折射率传感器。

关键词 表面光学; 表面等离激元; 石墨烯; 带阻滤波器; 折射率传感器; 有限元方法

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.012401

Surface Plasmonic Polariton Band-Stop Filters Based on Graphene

Zhao Jing¹, Wang Jiexian¹, Qiu Weibin², Qiu Pingping², Ren Junbo², Lin Zhili²

¹Academy of Electronic Information and Electrical Engineering, Xiamen Institute of Technology,

Xiamen, Fujian 361021, China;

²College of Information Science and Engineering, Huaqiao University,

Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract A graphene-based band-stop filter structure for the surface plasmonic polariton in the mid-infrared wave band is proposed, which consists of a periodic array of single-layered graphene. The numerical simulation results show that the slight variation of the chemical potential of the graphene nanoribbon results in the shift of resonance wavelength. This structure possesses a sensitivity of 1100 nm/RIU and a figure of merit of 138 in the mid-infrared spectrum range, which can be used as a highly sensitive refractive index sensor.

Key words optics at surfaces; surface plasmonic polariton; graphene; band-stop filter; refractive index sensor; finite element method

OCIS codes 240.5420; 240.6680; 240.6690

1 引言

中红外光电子器件在光谱学、材料加工、化学生物传感、秘密通讯系统等领域具有重要的应用价值,得到了研究人员的广泛研究^[1-3]。存在于金属介质分界面处的表面等离激元(SPP)可以把光限制在纳米量级,促进了集成光电子器件的发展,因此大量研究集中在中红外波段的表面等离子装置^[4-7]。由于金属的高损耗和低响应时间及折射率的不可调性,表面等离子器件在中红外波段的研究遇到了瓶颈。

石墨烯是由一层碳原子构成的呈蜂窝状晶格的

二维新型材料,具有特殊的机械、热和电光性能。与金属 SPP 相比,石墨烯 SPP 具有许多优点,如低损耗和高限制能力,尤其是石墨烯的光电特性可以通过门电路或者化学掺杂的方法进行灵活调节^[8-10]。越来越多的研究者致力于太赫兹以及近红外和中红外石墨烯纳米器件的研究,如光开关^[11]、光调制器^[12-13]、光学滤波器^[14-16]等。

本文提出了一种基于周期性排布的石墨烯纳米带的表面等离激元带阻滤波器,用有限元的方法分析了该带阻滤波器在中红外波段的透射谱特性。模拟计算结果表明,增大石墨烯的化学势,谐振波长将发

收稿日期: 2017-07-24; 收到修改稿日期: 2017-08-22

基金项目: 福建省杰出青年科学基金(2015J06015)、华侨大学中青年教师科技研究促进计划(ZQN-YX203)

作者简介: 赵静(1988—),女,硕士,助教,主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: yolanda661029@163.com

* 通信联系人。E-mail: wangjx@hqu.edu.cn

生蓝移现象。

2 模型与理论分析

所提出的带阻滤波器的三维结构图如图 1(a) 所示, 石墨烯纳米带被周期性平铺在 SiO_2 衬底上。 SiO_2 的折射率设置为 1.44, 厚度 c 设置为 200 nm。石墨烯纳米带的宽度为 $2b$, 周期为 a , 石墨烯的占空比为 $2b/a$ 。图 1(b) 所示为数值仿真窗口, x 方向设置为周期性边界条件, y 方向设置为完美匹配层(PML)。垂直入射到纳米带上的光激励表面等离子模式^[17-18]。

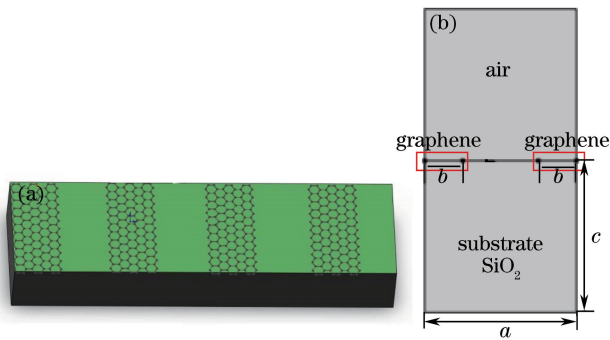


图 1 石墨烯纳米带表面等离子带阻滤波器的结构示意图。(a) 三维视图; (b) 计算窗口

Fig. 1 Structural diagram of surface plasmonic band-stop filter based on graphene nanoribbon.

(a) Three dimensional view; (b) computational window

在本模型中, 单原子层石墨烯作为零厚度来处理, 用有效折射率表征^[19-20]。石墨烯材料的有效折射率为 $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$, 其中 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间中入射光波的波数, λ 为波长, β 为传播常数。单层石墨烯支持的横磁模(TM) SPP 的传播常数^[21-22] β 满足 $\beta^2 = k_0^2 \left[1 - \left(\frac{2}{\eta_0 \sigma_{\text{intra}}} \right)^2 \right]$, 其中 η_0 (约为 377 Ω) 为自由空间的本征阻抗, σ_{intra} 为石墨烯的复表面电导率。

石墨烯的复表面电导率通过 Kubo 公式来计算^[23-24]:

$$\sigma_{\text{intra}} = \frac{-ie^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (2\pi\nu - i/\tau)} \times \left\{ \frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left[1 + \exp \left(-\frac{\mu_c}{k_B T} \right) \right] \right\} + \frac{-ie^2}{2h} \ln \left[\frac{2|\mu_c| - \hbar(\bar{\omega} - i/\tau)}{2|\mu_c| + \hbar(\bar{\omega} - i/\tau)} \right], \quad (1)$$

式中 μ_c 为石墨烯的化学势, ν 为频率, T 为温度, \hbar 为约化普朗克常量, e 为电子电量, τ 为动量弛豫时间(与电子-光子的散射率成反比), k_B 为玻尔兹曼常量, h 为普朗克常量, $\bar{\omega}$ 为等离子激元的角频率。

(1) 式中第一项和第二项分别取决于带内传输和带间传输。在室温和中红外波段, 当石墨烯的化学势大于光子能量的一半 ($|\mu_c| > \hbar\omega/2$) 时, 带内的贡献起主要作用, 在此条件下, 表面等离子动量增强, 表面等离子波在石墨烯中的传播成为可能^[10, 25]。

掺杂石墨烯的化学势主要依赖于载流子浓度 $n = (\mu_c/\hbar v_F)^2/\pi$, 其中 v_F 为费米速度。通过化学掺杂、施加应力^[26] 或外加电磁场^[27-28], 均可以调节石墨烯的载流子浓度, 即改变带隙。在温度小于 250 K 时, 载流子的浓度(单位体积内的载流子个数)可以高达 10^{14} cm^{-3} , 对应的化学势超过了 1 eV^[29]。为保证模型计算的合理性, 设置石墨烯的豫驰时间 $\tau = 0.5 \text{ ps}$, 石墨烯的化学势最高设置为 0.6 eV。

3 模拟结果与分析

图 2 所示为不同化学势下石墨烯周期排布的带阻滤波器的透射光谱图。其中, 空气的折射率 $n_1 = 1$, 衬底的折射率 $n_2 = 1.44$, 占空比设置为 1/2。如图 2 所示, 谐振腔波长随着化学势的增加明显蓝移, 透射率减小到 1% 左右, 半峰全宽 f_{FWHM} 仅为 8 nm, 所提出的结构可以起到一个很好的滤波器的作用。

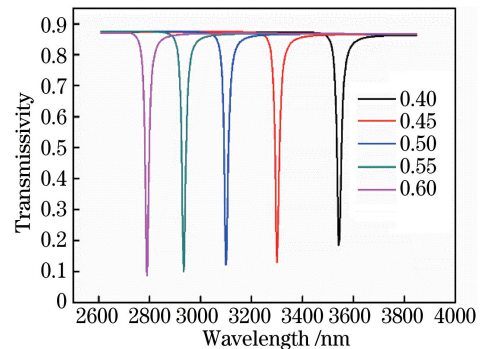


图 2 不同化学势下的透射率

Fig. 2 Transmissivity under different chemical potentials

石墨烯纳米带的谐振波长 λ_{res} 与石墨烯宽度 $2b$ 及石墨烯化学势 μ_c 的关系^[18] 为

$$\lambda_{\text{res}} \propto \sqrt{\frac{2b}{\mu_c}}. \quad (2)$$

由(2)式可知, 随着石墨烯化学势的增加, 谐振波长减小, 这很好地解释了图 2 中石墨烯化学势增加时谐振波长出现蓝移的现象。

为了研究石墨烯的占空比对光透射率的影响, 选取了占空比 ($D = 2b/a$) 分别为 3/5、8/15、7/15、2/5、1/3 进行模拟。其中石墨烯化学势定为 0.5 eV, $n_1 = 1$, $n_2 = 1.44$ 。图 3 所示为不同占空比

时的透射光谱图,可以看出,随着占空比的增加,谐振波长出现红移现象,透射率稍微减小,但是透射谱的 f_{FWHM} 会逐渐增大。

接着研究了不同周期下的透射谱,结果如图 4 所示,占空比设置为 1/2,石墨烯化学势定为 0.5 eV, $n_1=1, n_2=1.44, a$ 分别取 20, 30, 40, 50 nm。由图 4

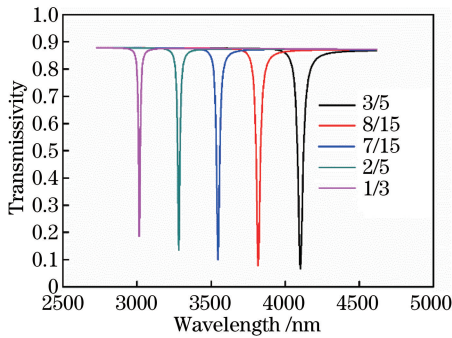


图 3 不同占空比下的透射率

Fig. 3 Transmissivity under different duty ratios

石墨烯表面等离子纳米传感器是基于表面等离子波对周围环境折射率的高敏感性的一种纳米量级探测器。模拟了当折射率 n 从 1 变化到 1.1 时,对称单层石墨烯材料光谱透射率的变化情况,如图 5

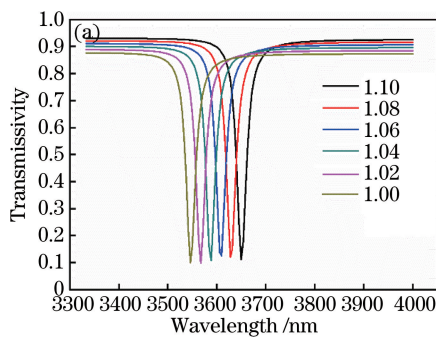


图 5 (a)不同折射率下的透射谱图;(b)峰值波长随着折射率的变化

Fig. 5 (a) Transmission spectra under different refractive indexes; (b) peak wavelength versus refractive index

敏感度和品质因数(F_{OM})是研究表面等离子传感器性能的重要参数^[15,30]。传感器的敏感度 S 定义为折射率每变化一个单位时谐振波长的移动量,其计算公式为 $S=d\lambda/dn$,单位为折射率单位(RIU)。 F_{OM} 被用来评价谐振的线性度,定义为 $F_{OM}=S/f_{FWHM}$ 。所提出结构的敏感度和品质因数分别为 1100 nm/RIU 和 138。

4 结 论

提出了一种基于石墨烯周期性排布的中红外波段表面等离子带阻滤波器结构,数值仿真结果表明,其谐振腔波长随着化学势的增加出现明显蓝移现象,透射率减小到 1% 左右, f_{FWHM} 仅为 8 nm。该滤

可以看到,随着周期的增大,谐振波长同样出现红移现象,透射谱的 f_{FWHM} 也会逐渐增大。

由(2)式可知,谐振波长随着石墨烯宽度的增加而增加。在图 3 和图 4 中,当占空比和周期增加时,石墨烯宽度增加,从而谐振波长出现明显的红移现象。

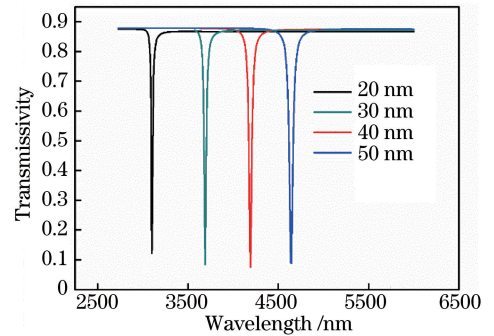
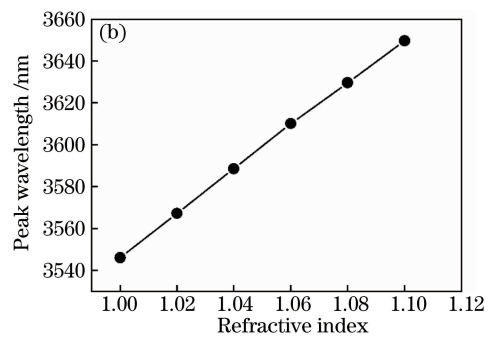


图 4 不同周期下的透射率

Fig. 4 Transmissivity under different periods

所示,其中占空比设置为 16/30。可以看出,当折射率改变一个很小的量时,透射峰值就出现了偏移,而 f_{FWHM} 几乎不变。图 5(b)表明谐振波长与周围环境折射率间为线性关系。



波器结构可用作高灵敏度的纳米折射率传感器,在中红外光谱范围内其敏感度达 1100 nm/RIU,品质因数高达 138。

参 考 文 献

- [1] Soref R. Mid-infrared photonics in silicon and germanium[J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 495-497.
- [2] Macdonald J R, Beecher S J, Berry P A, et al. Compact mid-infrared Cr: ZnSe channel waveguide laser[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(16): 161110.
- [3] Li Z Y, Tan R Q, Huang W, et al. Methane

- pressure detection based on Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0301006.
- 李志永, 谭荣清, 黄伟, 等. 傅里叶变换红外光谱技术测量甲烷气压的实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0301006.
- [4] Stanley R. Plasmonics in the mid-infrared[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 409-411.
- [5] Low T, Avouris P. Graphene plasmonics for terahertz to mid-infrared applications [J]. ACS Nano, 2014, 2(8): 1086-1101.
- [6] Brar V W, Jang M S, Sherrott M, *et al.* Highly confined tunable mid-infrared plasmonics in graphene nanoresonators[J]. Nano Letters, 2013, 13(6): 2541-2547.
- [7] Zhu C H, Tan C, Wang Y, *et al.* Research on high sensitivity temperature and magnetic field sensor based on surface plasmon resonance and mode coupling in photonic crystal fibers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0310001.
- 朱晟昇, 谭策, 王琰, 等. 基于 SPR 效应和缺陷耦合的光子晶体光纤高灵敏度磁场与温度传感器[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0310001.
- [8] Fei Z, Rodin A S, Andreev G O, *et al.* Gate-tuning of graphene plasmons revealed by infrared nano-imaging[J]. Nature, 2012, 487(7405): 82-85.
- [9] Chen J, Badioli M, Alonso-González P, *et al.* Optical nano-imaging of gate-tunable graphene plasmons[J]. Nature, 2012, 487(7405): 77-81.
- [10] Koppens F H, Chang D E, Garcias Abajo F J. Graphene plasmonics: a platform for strong light-matter interactions[J]. Nano Letters, 2011, 11(8): 3370-3377.
- [11] Chu H, How Gan C. Active plasmonic switching at mid-infrared wavelengths with graphene ribbon arrays [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(23): 231107.
- [12] Yang L, Pei C, Shen A, *et al.* An all-optical modulation method in sub-micron scale[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9206-9206.
- [13] Liu Y Z, Zhang Y P, Cao Y Y, *et al.* Modulator of tunable modulation depth based on graphene metamaterial[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1016002.
- 刘元忠, 张玉萍, 曹妍妍, 等. 基于石墨烯超材料深度可调的调制器 [J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1016002.
- [14] Gao Y, Ren G, Zhu B, *et al.* Tunable plasmonic filter based on graphene split-ring[J]. Plasmonics, 2016, 11(1): 291-296.
- [15] Wei Z, Li X, Yin J, *et al.* Active plasmonic band-stop filters based on graphene metamaterial at THz wavelengths [J]. Optics Express, 2016, 24(13): 14344-14351.
- [16] Shi B, Cai W, Zhang X, *et al.* Tunable band-stop filters for graphene plasmons based on periodically modulated graphene[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 26796-26796.
- [17] Ju L, Geng B, Horng J, *et al.* Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials[J]. Nature Nanotechnology, 2011, 6(10): 630-634.
- [18] 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, 2012, 85(8): 081405.
- [19] Zhao J, Liu X, Qiu W, *et al.* Surface-plasmon-polariton whispering-gallery mode analysis of the graphene monolayer coated InGaAs nanowire cavity[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5754-5761.
- [20] Qiu W, Liu X, Zhao J, *et al.* Nanofocusing of mid-infrared electromagnetic waves on graphene monolayer [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(4): 041109.
- [21] Wang B, Zhang X, Yuan X, *et al.* Optical coupling of surface plasmons between graphene sheets [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(13): 131111.
- [22] Qiu P P, Qiu W B, Lin Z L, *et al.* Energy-band structure and density of states of composite lattice two-dimensional graphene plasmon polariton crystals [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 052401.
- 邱平平, 邱伟彬, 林志立, 等. 复式晶格二维石墨烯等离子激元晶体的能带结构与态密度 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 052401.
- [23] Hanson G W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(6): 064302.
- [24] Gusynin V P, Sharapov S G, Carbotte J P. Magneto-optical conductivity in graphene [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2007, 19(2): 026222.
- [25] Jablan M, Buljan H, Soljacic M. Plasmonics in graphene at infrared frequencies[J]. Physical Review B, 2009, 80(24): 245435.
- [26] Choi S, Jhi S, Son Y. Controlling energy gap of bilayer graphene by strain[J]. Nano Letters, 2010, 10(9): 3486-3489.
- [27] Liu J, Wright A R, Zhang C, *et al.* Strong terahertz

- conductance of graphene nanoribbons under a magnetic field [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93 (4): 041106.
- [28] Zhang Y, Tang T, Girit C, *et al.* Direct observation of a widely tunable bandgap in bilayer graphene [J]. *Nature*, 2009, 459(7248): 820-823.
- [29] Efetov D K, Kim P. Controlling electron-phonon interactions in graphene at ultrahigh carrier densities [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(25): 256805.
- [30] Yan X, Wang T, Han X, *et al.* High sensitivity nanoplasmonic sensor based on plasmon-induced transparency in a graphene nanoribbon waveguide coupled with detuned graphene square-nanoring resonators [J]. *Plasmonics*, 2016, 12(5): 1449-1455.