

**基于金属光栅实现石墨烯三通道光吸收增强**

江孝伟 武华 袁寿财

**Enhancement of graphene three-channel optical absorption based on metal grating**

Jiang Xiao-Wei Wu Hua Yuan Shou-Cai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 138101 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182173

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182173>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

利用窄刻槽金属光栅实现石墨烯双通道吸收增强

Double-channel absorption enhancement of graphene using narrow groove metal grating

物理学报. 2018, 67(18): 184210 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180848>

基于磁激元效应的石墨烯-金属纳米结构近红外吸收研究

Near-infrared absorption of graphene-metal nanostructure based on magnetic polaritons

物理学报. 2018, 67(11): 118101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180196>

基于可调控多肽纳米管和石墨烯复合纳米结构的光吸收催化平台

A photocatalysis system based on composite nanostructures of controllable peptide nanotubes and graphene

物理学报. 2015, 64(9): 098702 <https://doi.org/10.7498/aps.64.098702>

Al纳米颗粒增强微晶硅薄膜太阳能电池光吸收的模拟研究

Numerical simulation of light absorption enhancement in microcrystalline silicon solar cells with Al nanoparticle arrays

物理学报. 2015, 64(24): 248801 <https://doi.org/10.7498/aps.64.248801>

基于石墨烯可饱和吸收体的纳秒锁模掺铥光纤激光器

Nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser based on graphene saturable absorber

物理学报. 2017, 66(11): 114209 <https://doi.org/10.7498/aps.66.114209>

含石墨烯临界耦合谐振器的吸收特性研究

Study on the absorbing properties of critically coupled resonator with graphene

物理学报. 2015, 64(23): 238103 <https://doi.org/10.7498/aps.64.238103>

## 基于金属光栅实现石墨烯三通道光吸收增强\*

江孝伟<sup>1)3)</sup> 武华<sup>2)3)†</sup> 袁寿财<sup>2)</sup>

1) (衢州职业技术学院信息工程学院, 衢州 3240000)

2) (赣南师范大学物理与电子信息学院, 赣州 341000)

3) (北京工业大学 光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

(2018年12月11日收到; 2019年4月3日收到修改稿)

为了增强单层石墨烯在可见光和近红外波段的吸收效率并实现多通道光吸收, 本文利用石墨烯-金属光栅-介质层-金属衬底混合结构在  $\lambda_1 = 0.553 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 0.769 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_3 = 1.130 \mu\text{m}$  三通道上提高了石墨烯吸收效率, 石墨烯吸收效率最高可达 41%。对 3 个光吸收增强通道的磁场分布分析可得它们分别源于表面等离子体激元共振、法布里-帕罗干涉腔共振、磁激元共振。经过模拟分析可知, 通过调节金属光栅宽度、介质层厚度可以调谐混合结构的共振峰波长和吸收效率, 而石墨烯化学势仅能对共振峰  $\lambda_3$  的吸收效率有影响。最后优化结构参数, 在最优结构参数下混合结构在 3 个光吸收增强通道的光吸收效率可达 0.97 以上, 这可以作为超材料吸收器。

**关键词:** 石墨烯, 金属光栅, 吸收效率, 光吸收增强通道

**PACS:** 81.05.ue, 78.66.Bz, 42.25.Bs

**DOI:** 10.7498/aps.68.20182173

## 1 引言

石墨烯是由单层碳原子组成类似蜂窝状晶格结构的二维材料, 由于其具有出众的电子、机械、光学特性<sup>[1,2]</sup>, 吸引了许多科研工作者关注。因为石墨烯具有高迁移率<sup>[3,4]</sup>, 并且表面光电导率可以通过掺杂或者外加电压进行人为的控制<sup>[5,6]</sup>, 因此被广泛地应用在光电子器件当中, 如高速光电探测器<sup>[7,8]</sup>、超快激光器<sup>[9,10]</sup>、太阳能电池<sup>[11,12]</sup>、发光二极管<sup>[13]</sup>、光学调制器<sup>[14]</sup>等。

众所周知, 光电探测器、太阳能电池对材料的光吸收效率要求较高。若在中远红外光学波段, 可以借助带状、盘状的石墨烯<sup>[15,16]</sup>, 或者将无形状的

石墨烯与金属、介质光栅进行耦合来激发石墨烯的表面等离子共振<sup>[17,18]</sup>, 以此提高石墨烯的吸收效率。但如果在可见光和近红外光学波段, 石墨烯就失去了等离激元响应, 再加上单层石墨烯非常薄, 导致其吸收效率非常低, 仅有 2.3%<sup>[19]</sup>, 这会限制其在太阳能电池和光电探测器中的应用。

近些年来, 为了能够提高石墨烯在可见光和近红外波段的吸收效率, 有很多学者提出了不同的方法。介质光栅的导模共振<sup>[20]</sup>、法布里-帕罗干涉 (Fabry-Pérot, FP) 腔共振<sup>[21]</sup>、光子晶体技术<sup>[22]</sup>、金属光栅激发的磁激元 (magnetic polaritons, MPs) 共振和表面等离子体激元 (surface plasmon polariton, SPP) 共振<sup>[23,24]</sup> 等均被验证可有效提高单层石墨烯的吸收效率。当前实现石墨烯双通道甚

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61575008, 61650404)、浙江省教育厅一般科研项目 (批准号: Y201738091, Y201839950)、江西省自然科学基金 (批准号: 20171BAB202037)、江西省教育厅科技项目 (批准号: GJJ170819)、衢州市科技计划项目 (批准号: 2017G16)、智能制造工业与工业大数据技术应用创新团队 (批准号: QZCX1801) 和赣南师范大学招标课题 (批准号: 16zb04) 资助的课题。

† 通信作者。E-mail: wh1125@126.com

至多通道光吸收增强是一个研究热点, 不过目前实现石墨烯双通道或者多通道光吸收增强主要集中在太赫兹和中远红外波段<sup>[25,26]</sup>, 而在可见光和近红外波段上的研究比较鲜有. 当前国内在可见光和近红外波段实现石墨烯双通道光吸收增强的有江南大学的桑田课题组利用窄刻槽金属光栅实现石墨烯双通道光吸收增强<sup>[27]</sup>、江苏理工学院的刘波利用二维银纳米阵列激发的 MPs 共振和 SPP 共振实现双通道光吸收<sup>[28]</sup>, 迄今为止, 国内外实现石墨烯三通道光吸收增强上的研究还很少.

本文利用石墨烯-金属光栅-介质层-金属衬底混合结构实现石墨烯在可见光和近红外波段三通道光吸收增强, 在共振波长处单层石墨烯的吸收效率最大可以达到 41%, 是石墨烯本征光吸收效率的 17.82 倍. 通过分析结构在共振波长的磁场分布可知, 石墨烯在可见光和近红外波段内三通道的吸收增强分别源于金属光栅激发的 SPP 共振、结构所支持的 FP 腔共振和金属光栅激发的 MPs 共振. 此外还研究了结构参数和石墨烯化学势对混合结构共振波长和共振峰吸收效率的影响, 发现混合结构的共振波长可以通过改变结构参数进行调谐, 而且随着化学势的变化, 由 MPs 共振引起的共振吸收变化最为剧烈. 另外根据计算结果可知存在最优结构参数, 使混合结构在 3 个共振峰上吸收效率达到 0.97 以上.

## 2 结构模型及材料参数

实现石墨烯三通道光吸收增强的混合结构示意图如图 1 所示, 该结构由上而下分别是石墨烯层、银 (Ag) 金属光栅、二氧化硅 (SiO<sub>2</sub>) 层、Ag 衬底. 图 1 中  $h$ ,  $w$ ,  $p$  分别表示金属光栅的刻蚀深度、宽度、周期, 而  $d$  和  $t$  分别表示 SiO<sub>2</sub> 层的厚度和 Ag 衬底的厚度. 为了保证 Ag 光栅仅有零级衍射, 光栅周期需满足  $p < \lambda/(1 + \sin\theta)$ ,  $\lambda$  为入射光波长,  $\theta$  为入射角. 另外 Ag 衬底厚度需大于可见光和近红外光的趋肤深度, 保证混合结构透射率为 0, 以提高石墨烯吸收效率. 由此结构的整体吸收效率可以表述为  $A = 1 - R$ , 其中  $R$  为结构的反射率,  $A$  为结构的整体吸收效率.

本文使用时域有限差分法 (finite difference time domain method, FDTD) 对实现石墨烯三通道光吸收增强混合结构进行模拟计算, 在模拟中

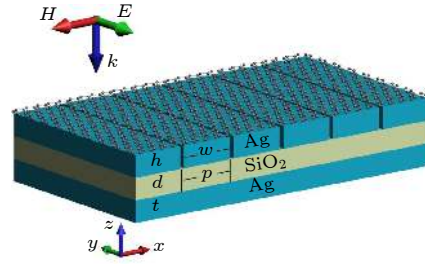


图 1 石墨烯-金属光栅-绝缘层-金属衬底混合结构

Fig. 1. Graphene-metal grating-insulating layer-metal substrate hybrid structure.

SiO<sub>2</sub> 的折射率为 1.45, 金属 Ag 的相对介电常数用 Drude 模型表达<sup>[29]</sup>, 如 (1) 式所示, 式中  $\epsilon_{\text{Ag}}$  为 Ag 的相对介电常数,  $\omega_p = 1.39 \times 10^{16}$  rad/s 为等离子体频率,  $\gamma = 2.7 \times 10^{13}$  rad/s 为衰减速率,  $\omega$  为入射光角频率.

$$\epsilon_{\text{Ag}} = 3.4 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\omega\gamma}. \quad (1)$$

单层石墨烯的光学特征可以用复值表面光电导率  $\sigma_g$  来表征, 它可以由 Kubo 公式来定量表示<sup>[30]</sup>.  $\sigma_g$  由带内跃迁光电导率  $\sigma_{\text{intra}}$  和带间跃迁光电导率  $\sigma_{\text{inter}}$  相构成,  $\sigma_{\text{intra}}$  和  $\sigma_{\text{inter}}$  分别如 (2) 式和 (3) 式所示. 式中  $u_c$  为石墨烯化学势,  $T$  为环境温度,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $\hbar$  为约化普朗克常数,  $\Gamma$  为散射率. 这里取  $u_c = 0.1$  eV,  $T = 300$  K,  $\Gamma = 0.0033$  eV.

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

$$\sigma_{\text{inter}} = \frac{ie^2}{4\pi\hbar} \ln \left[ \frac{2u_c - (\omega + i2\Gamma)\hbar}{2u_c + (\omega + i2\Gamma)\hbar} \right]. \quad (3)$$

通过 (2) 式和 (3) 式计算得出单层石墨烯光导率后, 由 (4) 式可以得出石墨烯的介电常数, 式中  $\epsilon_g$  为石墨烯介电常数,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $t_g$  为石墨烯厚度, 在本文中  $t_g = 0.7$  nm.

$$\epsilon_g = 1 + i \frac{\sigma_g}{\omega \epsilon_0 t_g}. \quad (4)$$

## 3 计算结果与分析

首先分析了图 1 结构中有无石墨烯层时的吸收特性, 计算结果如图 2 所示. 图 2 的结果是在 TM 偏振光垂直入射, 结构参数为  $w = 0.42$   $\mu\text{m}$ 、 $p = 0.5$   $\mu\text{m}$ 、 $h = 0.32$   $\mu\text{m}$ 、 $d = 0.1$   $\mu\text{m}$ 、 $t = 0.3$   $\mu\text{m}$

时获得. 结果表明图 1 混合结构无论有无石墨烯均会在波长  $\lambda_1 = 0.553 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 0.769 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_3 = 1.13 \mu\text{m}$  处有共振, 在没有石墨烯层的情况下, 3 个共振峰的吸收率分别为 81%, 34%, 14%, 但添加石墨烯层后 3 个共振峰的吸收率分别增加到 97%, 70%, 55%. 通过对比可知石墨烯的吸收效率有了显著的提高, 在波长  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  处石墨烯吸收效率分别为 16%, 36%, 41%. 由此证明在图 1 的混合结构中, 石墨烯实现了在可见光和近红外波段三通道光吸收增强.

图 3 是图 1 混合结构有石墨烯层时在共振波长处的磁场分布. 在图 3(a) 中, 共振波长为  $\lambda_1$ , 光场能量主要分布在金属光栅表面, 这是 SPP 共振特征, 因此可以判断该通道的石墨烯光吸收增强是源于金属光栅激发的 SPP 共振 [31]. 当共振波长在  $\lambda_2$  时, 光场能量主要被限制在金属光栅槽当中, 这是显著的 FP 腔共振特征, 如图 3(b) 所示, 由此可以得出石墨烯在该光通道光吸收增强是源于 FP 腔共振 [27]. 图 3(c) 是共振波长为  $\lambda_3$  时的磁场

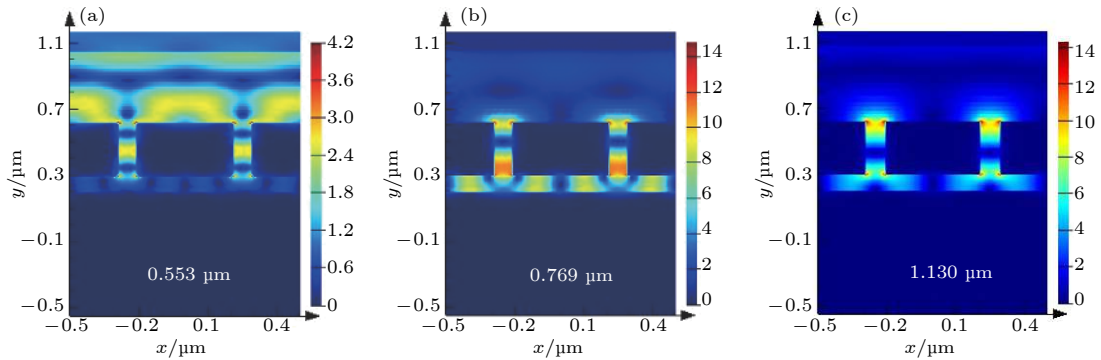


图 3 混合结构在共振波长处的磁场分布

Fig. 3. Magnetic field distribution of hybrid structure at resonance wavelength.

接着分析了结构参数对混合结构吸收特性的影响. 首先分析了光栅宽度对混合结构吸收特性的影响, 模拟计算结果如图 4 所示. 从图 4 可知当光栅宽度  $w$  从  $0.38 \mu\text{m}$  增加到  $0.44 \mu\text{m}$ , 对于  $\lambda_1$  相应的从  $0.539 \mu\text{m}$  红移到  $0.565 \mu\text{m}$ , 由 SPP 共振峰理论计算公式 [27]  $\lambda_{\text{spp}} = p[\epsilon_{\text{Ag}}/(1 + \epsilon_{\text{Ag}})]^{1/2}$  可知,  $w$  应对  $\lambda_1$  无影响, 但是之所以  $\lambda_1$  会随着  $w$  增加而红移, 是因为  $\lambda_1$  处的共振并不是单纯的都是由 SPP 共振引起, 其实它还混合着 MPs 共振和 FP 腔共振 (见图 1(a)), 图 1(a) 中的磁场分布具有 MPs 共振的特征 (在金属光栅边沿的左右两端有能量集中点) 和 FP 腔共振的特征 (有一小部分

分布, 可以看到光场能量主要集中在金属光栅上下边沿并且渗透进  $\text{SiO}_2$  层, 而且可以观察到在金属光栅边沿的左右两端有能量集中点 (泛红), 这是典型的 MPs 特征, 故石墨烯在波长  $\lambda_3$  的光通道吸收增强是由金属光栅激起的 MPs 共振形成的 [31].

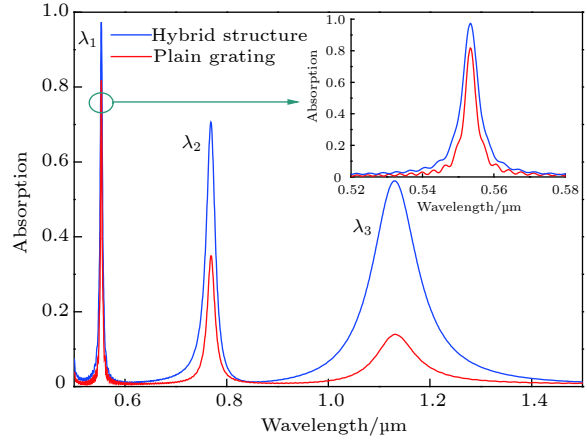


图 2 有和没有石墨烯层混合结构的吸收率

Fig. 2. Absorption efficiency of hybrid structure with and without a graphene layer.

能量限制在光栅槽当中) [32, 33], 所以随着光栅宽度  $w$  的增加, 共振峰  $\lambda_1$  会红移, 不过  $\lambda_1$  共振主要是 SPP 共振引起, MPs 共振和 FP 腔共振是其次, 所以  $\lambda_1$  红移的幅度 (26 nm) 没有  $\lambda_3$  (40 nm) 和  $\lambda_2$  (60 nm) 的大.

光栅宽度的增加对共振峰  $\lambda_2$  波长有较大影响. 这是由于光栅宽度增加使光栅占空比  $f = w/p$  增加, 根据等效介质理论, 随着占空比的增加, 光栅的等效折射率会增加. 而依据 FP 腔共振理论, FP 腔的共振波长由光栅折射率和光栅刻蚀深度决定, 其表达式近似为  $2n_{\text{TM}}h + 1/2\lambda = N\lambda$ , 式中  $n_{\text{TM}}$  是光栅对于 TM 偏振光的等效折射率,  $N$  是正

整数. 所以随着光栅宽度的增大, 混合结构在  $\lambda_2$  的光吸收峰红移, 但是之所以  $\lambda_2$  红移的幅度比  $\lambda_3$  的大是因为在 FP 腔共振 (主要共振) 中混合着 MPs 共振 (见图 1(b)), 两种共振的作用导致波长  $\lambda_2$  红移的幅度较大. 另外随着光栅宽度的增加, 混合机构在波长  $\lambda_2$  的吸收效率也逐渐提高, 这是由混合在 FP 腔共振中的 MPs 共振引起的.

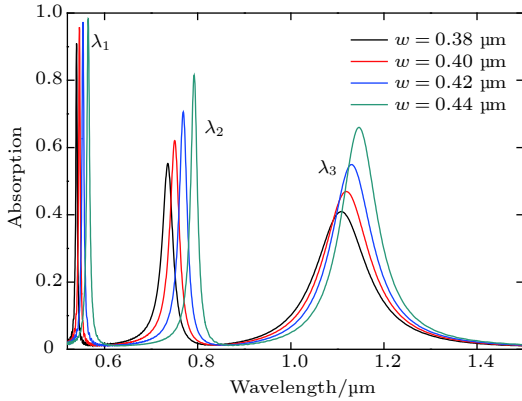


图 4 光栅宽度对混合结构吸收特性的影响  
Fig. 4. Influence of the width of the grating on the absorption characteristics of the hybrid structure.

对于光栅宽度增加使混合结构在波长  $\lambda_3$  的光吸收特性有显著变化, 可使用等效 RLC 电路模型进行分析. 图 1 混合结构的 RLC 等效电路如图 5 所示, 电路图中  $L_{m1}$  和  $L_{m2}$  分别是 Ag 光栅和 Ag 衬底在 TM 偏振电磁波照射下产生的互感,  $L_{e1}$  和  $L_{e2}$  分别是 Ag 光栅和 Ag 衬底在 TM 偏振电磁波照射下产生的自感,  $C$  是  $\text{SiO}_2$  在 Ag 光栅和 Ag 衬底之间产生的电容, 该电容大小由  $\text{SiO}_2$  厚度、 $\text{SiO}_2$  介电常数、金属表面的电子分布情况决定,  $R_g$  是代表石墨烯产生的电阻. 在 RLC 电路中, MPs 共振波长  $\lambda_3$  正比于  $2\pi c_g [C(L_{m1} + L_{m2} + L_{e1} + L_{e2})]^{-1/2}$ , 式中  $c_g$  代表真空光速, 可以发现石墨烯并不影响 MPs 共振波长, 并且由此可知当光栅宽度增加, Ag 光栅和 Ag 衬底之间产生电容的有效面积会增大, 使 RLC 电路中的  $C$  增大, 最终使混合结构的吸收峰  $\lambda_3$  波长产生红移<sup>[29]</sup>. 另外随着光栅宽度增宽, 混合结构在波长  $\lambda_3$  的吸收效率增加, 这是因为 MPs 共振光场能量主要集中在 Ag 光栅边沿的上角, 当占空比增大, 单位面积内 Ag 光栅阵列分布密度增大, 导致石墨烯对能量吸收能力变大, 整个混合结构的吸收效率就会增加.

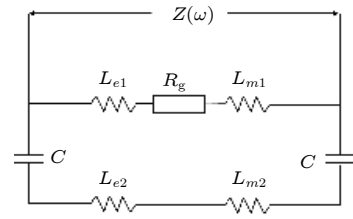


图 5 混合结构 RLC 等效电路  
Fig. 5. RLC equivalent circuit of hybrid structure.

图 6 是介质层  $\text{SiO}_2$  厚度  $d$  对混合结构吸收特性的模拟结果. 由图 6 可知混合结构共振峰  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  对  $d$  并不敏感, 当  $\text{SiO}_2$  介质层厚度  $d$  从  $0.14 \mu\text{m}$  减少到  $0.1 \mu\text{m}$  过程中, 共振峰  $\lambda_1$  相应的从  $0.566 \mu\text{m}$  蓝移到  $0.555 \mu\text{m}$ , 这是由混合在 SPP 共振中的 FP 腔共振引起. 而当  $d$  从  $0.1 \mu\text{m}$  减少到  $0.06 \mu\text{m}$  过程中, 共振峰  $\lambda_1$  会从  $0.555 \mu\text{m}$  红移到  $0.573 \mu\text{m}$ , 这是由混合在 SPP 共振中的 MPs 共振引起<sup>[32, 33]</sup>.

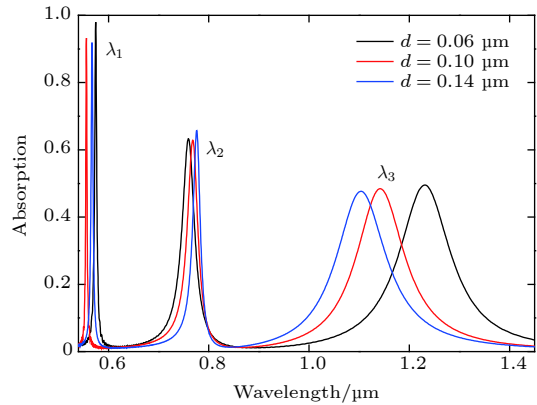


图 6  $\text{SiO}_2$  层厚度  $d$  对混合结构吸收特性的影响  
Fig. 6. Influence of the thickness of the  $\text{SiO}_2$  layer on the absorption characteristics of the hybrid structure.

对于波长  $\lambda_2$  共振峰, 它随着  $d$  的增加出现了红移现象. 这是由于混合结构 FP 腔共振的谐振腔长虽然主要是 Ag 光栅厚度  $h$ , 但是由于有一部分光会渗透进  $\text{SiO}_2$  层 (见图 2(b)), 因此 FP 腔的谐振腔长会包括一部分介质层的厚度. 故此随着  $d$  的增加, FP 腔谐振腔长增大, 根据 FP 腔共振理论可得波长  $\lambda_2$  会红移. 但由于只有很小一部分的介质层厚度包含在谐振腔腔长内, 所以随着  $d$  的增加共振峰  $\lambda_2$  红移幅度较小.

但是对于石墨烯光吸收通道  $\lambda_3$  对于  $d$  的变化非常敏感, 因为  $d$  的大小会直接影响 Ag 光栅和 Ag 衬底之间的电容  $C$  的大小, 从而影响共振波长  $\lambda_3$ . 当  $d$  增大时, 电容  $C$  值在其他参数不变的情况

下会减小, 则波长  $\lambda_3$  蓝移. 另外随着  $d$  从  $0.06 \mu\text{m}$  增加到  $0.14 \mu\text{m}$ , 共振峰  $\lambda_3$  对应的吸收效率从  $0.494$  下降到  $0.475$ , 这是因为  $d$  的增加会减弱 Ag 光栅与 Ag 衬底之间的耦合效果, 从而导致 MPs 共振对局部光场能量增强的作用减弱, 最终影响了石墨烯对光场能量的吸收.

最后模拟计算了石墨烯化学势对混合结构吸收特性的影响. 当化学势  $\mu_c$  从  $0.1 \text{ eV}$  增加到  $0.65 \text{ eV}$  的过程中, 混合结构在共振峰波长  $\lambda_3$  吸收效率变化较大, 可在共振峰  $\lambda_1, \lambda_2$  上, 混合结构的光吸收效率却对  $\mu_c$  的变化不敏感, 如图 7 所示. 要解释图 7 的现象, 可根据石墨烯的相对介电常数随  $\mu_c$  变化的性质. 图 8 是在 3 个不同共振波长条件下石墨烯相对介电常数虚部  $\varepsilon_{g\text{imag}}$  随着  $\mu_c$  变化图, 当波长是  $\lambda_3$  时,  $\varepsilon_{g\text{imag}}$  在  $\mu_c < 0.5 \text{ eV}$  时是在  $8.2$  左右, 此时石墨烯相当于一种普通的电介质, 但是当  $\mu_c > 0.5 \text{ eV}$  时,  $\varepsilon_{g\text{imag}}$  突变到  $0$ , 此时石墨烯相当于一种金属 [34]; 当波长是  $\lambda_2$  时,  $\varepsilon_{g\text{imag}}$  在  $\mu_c < 0.8 \text{ eV}$  范围内石墨烯相当于一种普通的电介质, 当  $\mu_c > 0.8 \text{ eV}$  时,  $\varepsilon_{g\text{imag}}$  降为  $0$ , 此时石墨烯相当于一种金属; 当波长是  $\lambda_1$  时,  $0.1 \text{ eV} < \mu_c < 1 \text{ eV}$  时,  $\varepsilon_{g\text{imag}}$  一直保持在  $4$  左右, 在这个范围内, 石墨烯一直保持电介质的性质.

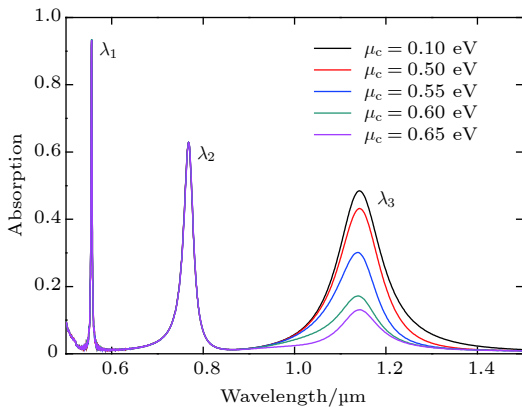


图 7 化学势对混合结构吸收特性的影响

Fig. 7. Influence of the chemical potential on the absorption characteristics of the hybrid structure.

根据 (5) 式和 (6) 式可知, 石墨烯的吸收效率和  $\varepsilon_{g\text{imag}}$  有关, 式中  $E(x, y, z)$  是材料覆盖区域某点的电场强度,  $E_{\text{inc}}$  是入射光电场强度,  $S$  是入射截面积 (TM 偏振光垂直入射),  $w(x, y, z)$  是在某一位置的能量散射密度. 将 (5) 式和 (6) 式与图 8 结合分析, 可解释图 7 混合结构吸收效率随着  $\mu_c$  的变化趋势. 在波长  $\lambda_3$  当  $\mu_c < 0.5 \text{ eV}$  时混合结构有高

吸收效率, 是因为  $\varepsilon_{g\text{imag}}$  在  $\mu_c < 0.5 \text{ eV}$  范围内在  $8.2$  左右, 所以混合结构吸收效率随着  $\mu_c$  增加变化较小. 但是当  $\mu_c > 0.5 \text{ eV}$  时,  $\varepsilon_{g\text{imag}}$  就突然下降到  $0$ , 所以混合结构的吸收效率就大幅下降, 最终与无石墨烯层时的吸收效率相当.

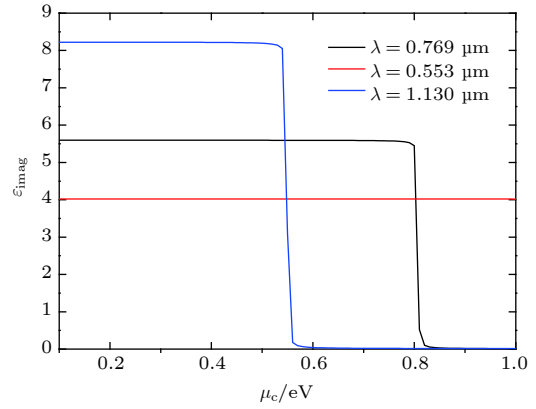


图 8 不同共振波长下化学势对石墨烯介电常数虚部的影响

Fig. 8. Influence of the chemical potential on the imaginary part of dielectric constant of graphene at different Resonance wavelength.

对于混合结构在波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的吸收效率随着  $\mu_c$  增加几乎不变, 是因为  $\mu_c$  在  $0.6 \text{ eV}$  范围内, 它们的  $\varepsilon_{g\text{imag}}$  均几乎稳定在一个值上, 所以吸收效率随着  $\mu_c$  (在  $0.65 \text{ eV}$  范围内) 的变化几乎无变化.

$$A(\lambda) = \frac{\iiint w(x, y, z) dV}{0.5c_g\varepsilon_0|E_{\text{inc}}|^2S}, \quad (5)$$

$$w(x, y, z) = \frac{1}{2}\varepsilon_0\omega\varepsilon_{g\text{imag}}|E(x, y, z)|^2. \quad (6)$$

根据图 4 和图 6 可知介质层厚度  $d$  对混合结构的共振峰吸收效率影响没有光栅条宽  $w$  的显著, 因此可以通过调节  $w$  实现混合结构吸收峰吸收效率最大化. 通过对结构优化后可知, 当  $w = 0.48 \mu\text{m}$ 、 $p = 0.5 \mu\text{m}$ 、 $h = 0.32 \mu\text{m}$ 、 $d = 0.06 \mu\text{m}$ 、 $t = 0.3 \mu\text{m}$ 、 $\mu_c = 0.1 \text{ eV}$  时, 3 个共振峰吸收效率都可以达到  $0.97$  以上, 模拟结果如图 9 所示. 在图 9 中可以发现 3 个共振峰分别红移到  $\lambda_1 = 0.716 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 0.956 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_3 = 1.44 \mu\text{m}$ , 其中  $\lambda_3$  吸收峰的吸收效率最高, 可以达到  $0.997$ . 根据文献 [35]、[36] 可知, 该最优混合结构可以作为超材料吸收器等应用.

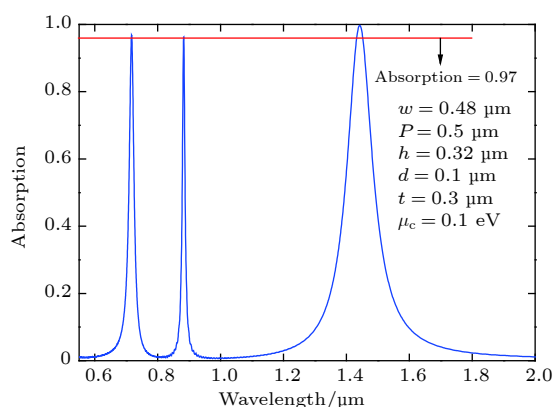


图9 最优参数下混合结构的吸收效率

Fig. 9. Absorption efficiency of optimal mixed structures.

## 4 结论

利用石墨烯-金属光栅-介质层-金属衬底混合结构实现单层石墨烯在  $\lambda_1 = 0.553 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 0.769 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_3 = 1.130 \mu\text{m}$  三通道上光吸收增强。在这 3 个光吸收增强通道上, 石墨烯的吸收效率分别是 16%, 36%, 41%。根据磁场分布可知  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  吸收增强通道分别是由金属光栅激发的 SPP 共振、FP 腔共振和金属光栅激起的 MPs 共振。通过模拟计算得出, 随着金属光栅宽度  $w$  的增加, 3 个共振峰  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  均会发生红移, 而且混合结构在波长  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  处吸收效率提高显著。但是随着介质层厚度  $d$  的增加共振峰  $\lambda_2$  会产生微弱的红移, 共振峰  $\lambda_3$  会显著地红移, 而共振峰  $\lambda_1$  则会先蓝移后红移。石墨烯化学势  $\mu_c$  从 0.1 eV 增加到 0.65 eV 过程中, 混合结构只有  $\lambda_3$  共振峰的吸收效率有了显著变化, 而在另外两个光共振峰几乎无变化。通过优化器件结构, 可以发现最优混合结构 3 个共振峰的吸收效率可达 0.97 以上。基于石墨烯-金属光栅-介质层-金属衬底混合结构实现石墨烯三通道光吸收增强结构在光电子器件领域具有一定应用前景。

## 参考文献

[1] Zhao B, Zhao J M, Zhang Z M 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 031905  
 [2] Lee C, Wei X, Kysar J W, Hone J 2008 *Science* **321** 385  
 [3] Du X, Skachko I, Barker A, Andrei E Y 2008 *Nature Nanotechnol.* **3** 491  
 [4] Liang Z J, Liu H X, Niu Y X, Yin Y H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 138501 (in Chinese) [梁振江, 刘海霞, 牛燕雄, 尹贻恒 2016 物理学报 **65** 138501]

[5] Sukosin T, Frank H L K, Javier G D A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 47401  
 [6] Zhao Z, Li G, Yu F, Yang H, Chen X, Lu W 2018 *Plasmonics* **13** 2267  
 [7] Liang Z J, Liu H X, Niu Y X, Liu K M, Yin Y H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 168101 (in Chinese) [梁振江, 刘海霞, 牛燕雄, 刘凯铭, 尹贻恒 2016 物理学报 **65** 168101]  
 [8] Gao Y, Zhou G, Zhao N, Tsang H K, Shu C 2018 *Opt. Lett.* **43** 1399  
 [9] Ferrari A, Ferrante C, Virga A, Benfatto L, Martinati M, Fazio D D 2018 *Nat. Commun.* **9** 308  
 [10] Sun Z, Hasan T, Torrisi F, Popa D, Privitera G, Wang F 2010 *Acs Nano* **4** 803  
 [11] Qiu J, Shang Y, Chen X, Li S, Ma W, Wan X 2018 *J. Mater. Sci. Technol.* **34** 2197  
 [12] Zhang L, Ding Z C, Tong T, Liu J 2017 *Nanoscale* **9** 3524  
 [13] Hsiao T J, Eyassu T, Henderson K, Kim T, Lin C T 2013 *Nanotechnology* **24** 395401  
 [14] Lu H, Cumming B P, Gu M 2015 *Opt. Lett.* **40** 3647  
 [15] Fang Z Y, Wang Y M, Schlather A E, Liu Z, Ajayan P M 2014 *Nano Lett.* **14** 299  
 [16] Zhang H Y, Huang X Y, Chen Q, Ding C F, Li T T, Lü H H, Xu S L, Zhang X, Zhang Y P, Yao J 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 018101 (in Chinese) [张会云, 黄晓燕, 陈琦, 丁春峰, 李彤彤, 吕欢欢, 徐世林, 张晓, 张玉萍, 姚建铨 2016 物理学报 **65** 018101]  
 [17] Sang T, Wang R, Li J L, Zhou J Y, Wang Y K 2018 *Opt. Commun.* **413** 255  
 [18] Wang B, Qin C, Huang H, Long H, Wang K, Lu P 2014 *Opt. Express* **22** 25324  
 [19] Nair R R, Blake P, Grigorenko A N, Novoselov K S, Booth T J 2008 *Science* **320** 1308  
 [20] Liu Y, Chadha A, Zhao D, Piper J R 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 181105  
 [21] Furchi M, Urich A, Pospischil A, Lilley G, Unterrainer K 2012 *Nano Lett.* **12** 2273  
 [22] Liu J T, Liu N H, Li J, Li X J, Huang J H 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 052104  
 [23] Zhang L, Tang L, Wei W, Cheng X, Wang W, Zhang H 2016 *Opt. Express* **24** 20002  
 [24] Fang Z, Wang Y, Zheng L, Schlather A, Ajayan P M 2012 *Acs Nano* **6** 10222  
 [25] Xia S X, Zhai X, Huang Y, Liu J Q, Wang L L, Wen S C 2017 *Opt. Lett.* **42** 3052  
 [26] Thareja V, Kang J H, Yuan H, Milaninia K M, Hwang H Y, Cui Y 2015 *Nano Lett.* **15** 1570  
 [27] Gao J, Sang T, Li J L, Wang L 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 184210 (in Chinese) [高健, 桑田, 李俊浪, 王啦 2018 物理学报 **67** 184210]  
 [28] Liu B, Tang C, Chen J Pei M, Wang Q 2017 *Opt. Express* **25** 12061  
 [29] Chen H, Zhang X X, Wang H, Ji Y H. 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 118101 (in Chinese) [陈浩, 张晓霞, 王鸿, 姬月华 2018 物理学报 **67** 118101]  
 [30] Bao Q, Zhang H, Wang B, Ni Z, Wang Y 2011 *Nature Photo.* **5** 411  
 [31] Zhao B, Zhao J M, Zhang Z M 2015 *J. Opt. Soc. Am. B* **32** 1176  
 [32] Wang L P, Zhang Z M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 111904  
 [33] Garcıavidal F J, Sanchezdehesa J, Dechelette A 2002 *J. Lightwave Technol.* **11** 2191  
 [34] Ye S W 2018 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China)(in Chinese) (in Chinese) [叶胜威 2018 博士学位论文(成都: 电子科技大学)]  
 [35] Su Z, Yin J, Zhao X 2015 *Opt. Express* **23** 1679  
 [36] Luo C, Ling F, Yao G 2016 *Opt. Express* **24** 1518

# Enhancement of graphene three-channel optical absorption based on metal grating\*

Jiang Xiao-Wei<sup>1)3)</sup> Wu Hua<sup>2)3)†</sup> Yuan Shou-Cai<sup>2)</sup>

1) (*College of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou 32400, China*)

2) (*College of Physics and Electronic Information, GanNan Normal University, Ganzhou 341000, China*)

3) (*Provincial and Ministerial Co-construction of Key Laboratory of Opto-electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

( Received 11 December 2018; revised manuscript received 3 April 2019 )

## Abstract

As an emerging new material, graphene has aroused the great research interest. How to improve its absorption efficiency is one of the hot research topics. However, currently most of the studies concentrate in THz band or middle-to-far-infrared region: the research in the visible and near-infrared regions is rare, which greatly limits the applications of graphene in opto-electric fields. In order to improve the absorption efficiency of single-layered graphene in visible and near-infrared band and realize multi-channel optical absorption enhancement, we propose a hybrid structure consisting of graphene-metal grating-dielectric layer-metal substrate. The proposed structure can realize three-channel light absorption enhancement at wavelengths  $\lambda_1 = 0.553 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 0.769 \mu\text{m}$ , and  $\lambda_3 = 1.130 \mu\text{m}$ . The maximum absorption efficiency of graphene is 41%, which is 17.82 times that of single-layered graphene. The magnetic field distributions of the hybrid structure at three resonance wavelengths are calculated respectively. It can be found that for the resonance peak  $\lambda_1$ , the energy of light field is distributed mainly on the surface of metal grating, which is the characteristic of surface plasmon polariton (SPP) resonance. Therefore, it can be judged that the enhancement of graphene absorption in this channel is due to the SPP resonance stimulated by metal grating. For the resonance peak  $\lambda_2$ , the energy of the optical field is mainly confined into the metal grating groove, which is the remarkable resonance characteristic of the Fabry-Pérot (FP) cavity, it can be concluded that the enhancement of the optical absorption of graphene at the resonance peak  $\lambda_2$  is due to the resonance of the FP cavity. When the resonance peak is  $\lambda_3$ , the energy of the light field mainly concentrates on the upper and lower edges of the metal grating and permeates into the  $\text{SiO}_2$  layer, and it can be observed that there are energy concentration points (reddish) at the left end and the right end of the metal grating edge, which is a typical magnetic polariton (MP) resonance feature. Therefore, the enhancement of absorption of graphene at the resonance peak  $\lambda_3$  is caused by the MP resonance induced by the metal grating. We also analyze the absorption characteristic (resonance wavelength and absorption efficiency) dependence on structure parameters by using the finite-difference time-domain (FDTD) simulation. Our study reveals that by increasing grating width, all the three resonance wavelengths are red-shifted, and the absorption efficiency at  $\lambda_2$  and  $\lambda_3$  are both enhanced whereas the absorption efficiency at  $\lambda_1$  almost keeps

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61575008, 61650404), the General Research Projects of Zhejiang Provincial Education Department, China (Grant Nos. Y201738091, Y201839950), the Jiangxi Natural Science Foundation, China (Grant No. 20171BAB202037), the Technology Project of Jiangxi Provincial Education Department, China (Grant No. GJJ170819), the Quzhou Science and Technology Project, China (Grant No. 2017G16), Intelligent Manufacturing Industry and Industrial Big Data Technology Application Innovation Team, China (Grant No. QZCX1801), and the Science and the Bidding for Gannan Normal University, China (Grant No. 16zb04).

† Corresponding author. E-mail: [wh1125@126.com](mailto:wh1125@126.com)



unchanged. By increasing dielectric layer thickness,  $\lambda_2$  will be red-shifted and  $\lambda_3$  will be blue-shifted, whereas the absorption efficiency at the three resonance wavelengths all remain constant. By increasing graphene chemical potential, none of the wavelengths of the three absorption peaks is shifted, and the absorption efficiency at  $\lambda_3$  decreases. According to our findings, we optimize structure parameters and achieve the light absorption efficiency larger than 97% at the three channels simultaneously, which can make metamaterial absorbers.

**Keywords:** graphene, metal grating, absorption efficiency, optical absorption enhancement channel

**PACS:** 81.05.ue, 78.66.Bz, 42.25.Bs

**DOI:** [10.7498/aps.68.20182173](https://doi.org/10.7498/aps.68.20182173)