

# 太赫兹区石墨烯光吸收特性对其复光电导的依赖

杨翠红<sup>1,2\*</sup>, 刘震<sup>1,2</sup>, 张静云<sup>1,2</sup>, 马晓飞<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>南京信息工程大学江苏省大气海洋光电探测重点实验室, 江苏 南京 210044;

<sup>2</sup>南京信息工程大学物理与光电工程学院, 江苏 南京 210044

**摘要** 采用转移矩阵方法, 在含石墨烯的多层介质结构中, 研究了太赫兹频域的光传输过程。在多层结构中, 光吸收表现为多个吸收峰, 且吸收峰的位置依赖于入射光频率、入射角和石墨烯化学势。随着石墨烯化学势和石墨烯层数的增加, 吸收率增大, 石墨烯光导虚部增大, 吸收峰的位置蓝移。周期性吸收峰发生在反射光干涉相消的条件下, 且可通过两条主要反射光间的相位差来理解。因此, 可基于光传输中石墨烯吸收峰的位置和强度来给出石墨烯的化学势、能级展宽因子参数。给出了与石墨烯材料相关的可提高石墨烯吸收率、降低透射率的参数条件。

**关键词** 物理光学; 太赫兹光吸收; 转移矩阵; 石墨烯复光导

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.052601

## Dependence of Optical Absorption Characterization of Graphene on Its Complex Optical Conductivity in Terahertz Regime

Yang Cuihong<sup>1,2\*</sup>, Liu Zhen<sup>1,2</sup>, Zhang Jingyun<sup>1,2</sup>, Ma Xiaofei<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Jiangsu Key Laboratory for Optoelectronic Detection of Atmosphere and Ocean, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

<sup>2</sup>School of Physics & Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

**Abstract** The transfer matrix method is used to study the optical transport process in a terahertz frequency region in graphene-containing multilayer dielectric structures. In the multilayer structures, the optical absorption exhibits as multiple absorption peaks, and the position of these peaks depends on the incident frequency, incident angle and graphene chemical potential. With the increase of the graphene chemical potential and the layer number of the graphene, the absorptivity increases and the imaginary part of the graphene conductivity increases, and the position of the absorption peak shifts blue. The periodic absorption peak occurs under the condition that the reflected light interference is cancelled, and can be understood by the phase difference between the two main reflected lights. Therefore, the chemical potential and energy level broadening factor parameters of the graphene can be given based on the position and intensity of the graphene absorption peak in the light transmission. The parameter conditions related to the graphene materials which can improve the absorptivity of graphene and reduce the transmittance are given.

**Key words** physical optics; terahertz optical absorption; transfer matrix; graphene complex optical conductivity

**OCIS codes** 260.3160; 260.5150; 260.3090; 260.5430

## 1 引言

2004 年, 采用微机械剥离法首次获得了石墨烯<sup>[1-2]</sup>, 石墨烯表现出新颖奇特的电学、光学特性, 如

量子霍尔效应<sup>[2]</sup>、高迁移率<sup>[3]</sup>、Klein 隧穿<sup>[4]</sup>、光电导<sup>[5-8]</sup>等。石墨烯成为了研究二维材料的导火材料, 激发研究者们探索并挖掘了超过 600 多种稳定的剥离的二维材料<sup>[9-10]</sup>, 其力、电、光等特性被广泛研究

收稿日期: 2018-07-30; 修回日期: 2018-09-03; 录用日期: 2018-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(11547030)、南京信息工程大学 2017 年校级大学生实践创新训练计划项目(201710300258)

\* E-mail: chyang@nuist.edu.cn

并加以应用。

在外加光的作用下,光与石墨烯相互作用,载流子吸收光能形成带内和带间跃迁<sup>[5-8]</sup>,与之相关的石墨烯光电导在低能区(两倍化学势以下)带内跃迁表现出 Drude 行为<sup>[11-12]</sup>,在两倍化学势的光能处,载流子从价带到导带的带间跃迁开启,继续增加入射光能,光电导趋于一常数,此时当光垂直入射到单层石墨烯时,大约吸收 2.3% 的光能<sup>[13]</sup>。石墨烯光电导可通过门电压(化学势)、温度、无序和散射引起的展宽因子等调制,其频率覆盖太赫兹 (THz) 波段。理论计算给出的石墨烯光电导包含实部和虚部,其实部与光吸收相关,其虚部与石墨烯/介质界面可以传播横电 (TE) 和横磁 (TM) 两种模式的表面等离子体波<sup>[14-15]</sup> 相关。石墨烯光导的可调性使其在基于石墨烯的多种结构中可调制光的反射率、透射率以及吸收率,这方面已经得到广泛的研究,比如,石墨烯纳米盘阵列<sup>[16-17]</sup>、纳米带<sup>[18]</sup>、多层介质结构<sup>[19-21]</sup>。石墨烯光的传输特性与入射光能、入射角、TE/TM 模式、费米能级等因素相关,通过选择不同参数条件使其光学特性满足光电子应用的要求。将石墨烯插在多层介质结构中,可以将石墨烯层看作成一定厚度的各向同性的介质层<sup>[22-23]</sup>,或者看作为两介质界面的界面电导<sup>[19,24]</sup>。Merano<sup>[25]</sup> 采用上述两种方法研究了光的透射特性,结果表明将石墨烯层看作界面电导给出了更好的结果。

石墨烯光电导为复数形式,其依赖光的频率(波长),从而导致石墨烯的等效折射率为复数。Blake 等<sup>[26]</sup> 将石墨烯看作厚度为 0.34 nm、折射率为 2.3 - 1.3i 的二维材料,其折射率的实部和虚部简化为一常数。Ying 等<sup>[27]</sup> 在含石墨烯层的 Salisbury 屏结构中分析了带间跃迁为主(中红外)的区域,研究了通过调节费米能级、入射角以及介质层厚度提高石墨烯光吸收特性。Pu 等<sup>[28]</sup> 设计了相似的层状结构,采用金

属反射层,分析了带内跃迁为主的 THz 区,发现石墨烯光吸收提高和吸收峰的蓝移现象。Andryieuski 等<sup>[24]</sup> 考虑了石墨烯-介质层-镜面反射层,并且石墨烯层被设计成多种(面、线、网状)形状结构,从而石墨烯复电导被调制,在带内电导为主的贡献区,得到了吸收率高于 0.9 的宽带和窄带吸收峰。

本文基于石墨烯的多层介质结构,区别于衬底采用金属材料导致光的全反射,研究了 THz 区石墨烯复数光电导对光传播的影响。具体分析了光的反射、透射以及吸收谱的强度随化学势、散射强度、入射角以及入射光 TE/TM 模式的依赖关系;分析了能够增强石墨烯吸收的条件;通过两条主要的反射光的相位差分析了吸收峰的位置,吸收峰对应着反射光干涉相消,分析光程差的来源,得到由于石墨烯界面电导的引入而引起的反射和透射光的相位差;另外干涉相消的条件与光导虚部相关,结合吸收峰的强度与位置可得到石墨烯光导。

## 2 理论分析

在插入石墨烯的一些层状结构的实验测量中<sup>[21,29]</sup>,如在 Si 衬底上加上 SiO<sub>2</sub> 缓冲层,然后再覆盖石墨烯层,考虑到 SiO<sub>2</sub> 层的厚度约为 100 nm,远小于 THz 波长(1 THz 对应的波长为 300 μm),故可以忽略光传输过程中此层的光程影响。考虑介质层上下表面所覆盖的石墨烯置于空气中,即 air-(G<sub>1</sub>-Si-G<sub>2</sub>)-air,以 Si 作为介质层,取折射率为  $n = 3.48$ ,厚度为  $d = 480 \mu\text{m}$ ,G<sub>1</sub> 和 G<sub>2</sub> 分别为 Si 上下表面的石墨烯层,石墨烯层提供了界面电导。假设二维平面为  $xoy$  平面,法线沿  $z$  轴方向,入射面为  $xoz$  平面。当入射光以 TE/TM 模式入射时,考虑电磁波沿  $z$  轴方向传播和电场、磁场沿切向方向的连续性,分别以  $[E'_y(z), H'_x(z)]^T$  和  $[H'_y(z), E'_x(z)]^T$  两分量表示得到的转移矩阵,表达式为

$$\mathbf{M}^{\text{TE}} = \begin{bmatrix} \cos(k_{z,1}d) & (i/\eta^{\text{TE}}) \sin(k_{z,1}d) \\ i\eta^{\text{TE}} \sin(k_{z,1}d) - \sigma_1 \cos(k_{z,1}d) & \cos(k_{z,1}d) - (i\sigma_1/\eta^{\text{TE}}) \sin(k_{z,1}d) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{M}^{\text{TM}} = \begin{bmatrix} \cos(k_{z,1}d) - i\sigma_1 \eta^{\text{TM}} \sin(k_{z,1}d) & - (i/\eta^{\text{TM}}) \sin(k_{z,1}d) + \sigma_1 \cos(k_{z,1}d) \\ -i\eta^{\text{TM}} \sin(k_{z,1}d) & \cos(k_{z,1}d) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $l$  代表第  $l$  层;T 代表转置; $k_{z,1}$  为介质中波矢沿  $z$  轴方向的分量; $\eta^{\text{TE}} = k_{z,1}/(\omega\mu_0)$ ;  $\eta^{\text{TM}} = k_{z,1}/(\omega\epsilon_0\epsilon_r)$ ;  $\epsilon_0$  和  $\mu_0$  分别为真空介电常数和真空磁导率; $\epsilon_r$  为介质中的相对介电常数; $\sigma_{1,2}$  为介质层两侧的石墨烯光导。反射系数和透射系数通过电磁场边

界条件和转移矩阵可表示为

$$\mathbf{X}^{\text{TE/TM}} \begin{pmatrix} 1 \\ r \end{pmatrix} = \mathbf{M}^{\text{TE/TM}} \mathbf{Y}^{\text{TE/TM}} \begin{pmatrix} t \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{X}^{\text{TE}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -\eta_0^{\text{TE}} & \eta_0^{\text{TE}} \end{pmatrix}$ ;  $\mathbf{X}^{\text{TM}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \eta_0^{\text{TM}} & -\eta_0^{\text{TM}} \end{pmatrix}$ ;  
 $\mathbf{Y}^{\text{TE}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -(\eta_0^{\text{TE}} + \sigma_2) & (\eta_0^{\text{TE}} - \sigma_2) \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{Y}^{\text{TM}} = \begin{bmatrix} (1 + \sigma_2 \eta_0^{\text{TM}}) & (1 - \sigma_2 \eta_0^{\text{TM}}) \\ \eta_0^{\text{TM}} & -\eta_0^{\text{TM}} \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \exp(ik_{z,0}d) & 0 \\ 0 & \exp(-ik_{z,0}d) \end{bmatrix}$ , 其中下标“0”为空气中对应的物理量。通过求解(3)式,可得到反射率  $R = |r|^2$ 、透射率  $T = |t|^2$  和吸收率  $A = 1 - R - T$ ,进一步分析其与入射角、TE/TM 模式、入射频率等的依赖关系。

关于石墨烯光导,采用 Kubo 公式可求得,光电导有带内跃迁和带间跃迁两部分贡献,即  $\sigma = \sigma^{\text{intra}} + \sigma^{\text{inter}}$ <sup>[5-8]</sup>,其中带内跃迁和带间跃迁可以表示为

$$\sigma^{\text{intra}} = i \frac{2e^2 k_B T}{\pi \hbar (\hbar\omega + i\Gamma)} \ln \left[ 2 \cosh \left( \frac{\mu_c}{2k_B T} \right) \right], \quad (4)$$

$$\sigma^{\text{inter}} = \sigma_0 \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan \left( \frac{\hbar\omega - 2\mu_c}{2k_B T} \right) - \frac{i}{2\pi} \ln \frac{(\hbar\omega + 2\mu_c)^2}{(\hbar\omega + 2\mu_c)^2 + (2k_B T)^2} \right], \quad (5)$$

式中:  $e$ 、 $\hbar$ 、 $k_B$ 、 $T$ 、 $\omega$  分别为电子电量、普朗克常数、玻尔兹曼常数、温度和入射光频率;  $\mu_c$  为化学势;  $\Gamma$  为无序和散射引起的展宽因子;  $\sigma_0 = e^2/4\hbar$ 。由(4)和(5)式可知,当入射光能很小时主要表现为带内跃迁(导带内或价带内的跃迁);当入射光能等于两倍化学势时,载流子从价带到导带的带间跃迁开启,继续增加光能,带间跃迁为主要贡献,逐渐趋于一常数  $\sigma_0$ 。

### 3 理论结果与讨论

通过转移矩阵方法,在含石墨烯的层状介质结构中求出反射系数和透射系数,进而求出反射率、透射率和吸收率。由于石墨烯夹在两介质之间,因此可以通过门电压来调来石墨烯的化学势,载流子浓度也随之改变,相应的石墨烯光电导以及由光导所引起的石墨烯光吸收将被调制。重点分析在 500~700 GHz 区间(对应的能量为 2.1~2.94 meV)的石墨烯光电导,化学势为 100 meV 或 300 meV,因此,带内跃迁对光导的贡献为主要来源。温度为 300 K,展宽为 0.1 meV。

图 1 所示为在 air-(G-Si)-air 层状结构中,TE 模式入射条件下光的反射率、透射率以及吸收率随入射光频率和入射角的变化关系。随着入射光能的增加,中间介质层引起的相位  $2n_1 k_0 d \cos \theta$  随  $2\pi$  周期

性变化,表现出周期性的吸收峰,在 500~700 GHz 区间有两个吸收峰,在反射波干涉相消的点吸收率为极大值。通过冗长的推导,干涉相消的条件近似满足  $\eta^{\text{TE}} \tan(n_1 k_0 d \cos \theta) \approx \text{Im } \sigma$ ,其中  $\text{Im}$  为取虚部。在文献[24,27-28]中,考虑了含石墨烯的层状介质,并且使用金属作为衬底发生全反射,干涉相消的条件为  $\cot(nk_0 d \cos \theta) = \text{Im } \sigma / (\epsilon_0 \epsilon_r / \mu_0)^{1/2}$ ,与本文中光在介质中能透射的情况相区别,存在  $\pi$  的相位差。根据干涉条件  $2n_1 k_0 d \cos \theta + \Delta\phi = m\pi$ ,式中  $\Delta\phi$  为两介质表面光反射波透射波的相位差,  $m$  为整数,可知随着角度  $\theta$  的增加,  $k_0 \cos \theta \propto m$ ,光吸收峰向高能方向移动。对 TE 模式的入射波,随入射角的增加吸收增加,在掠入射时,出现极大值,这与文献[27]的结果一致。给定入射光频率和石墨烯光导无序和散射引起的展宽因子,将石墨烯化学势从 100 meV 增加到 300 meV,石墨烯带内光导的实部和虚部都增加,反射峰和透射峰表现的更加尖锐,吸收率的峰值蓝移且吸收率增加。在金属衬底全反射的含石墨烯的层介质中,吸收峰也同样随化学势的增加而蓝移<sup>[28]</sup>。区别于 TE 模式,图 2 给出了 TM 模式入射下光的反射率、透射率以及吸收率随入射光频率和入射角的变化关系。其吸收峰个数和位置随入射光能与 TE 模式下的结果类似之外,值得一提的是,当入射光为 TM 模式时,在 73.97°(两介质间对应的布儒斯特角)附近出现  $\pi$  相位的突变,光传输光谱表现出对角度复杂的依赖关系。另一区别为随着入射角的增加, TM 模式入射的光吸收减小,文献[27]中最大吸收率为  $4x/(1+x)^2$ ,式中  $x = \text{Re } \sigma \cos \theta \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ ,其中  $\text{Re}$  为取实部,可知随入射角的增加,吸收减小。

为进一步提光石墨烯光的吸收率,将中间介质层两侧都覆盖上石墨烯,图 3 和 4 分别描述了在 air-(G-Si-G)-air 结构中,TE 和 TM 模式入射条件下光的反射率、透射率以及吸收率随入射光频率和入射角之间的变化关系。与图 1 和 2 对应的结果相比,由于另一层石墨烯的插入,反射光干涉相消的点向高能方向偏移。当化学势增加到 300 meV 时,入射光频率接近 500 GHz 的点新增了从左侧偏移过来满足干涉相消的峰值,从而在 500~700 GHz 频率区间出现了三个吸收峰。另外,由于新加一层石墨烯,光吸收率明显增加,可对比图 1、3(c)(f)和图 2、4(c)(f)可知,色度条从 0.2 增加到 0.5。从图 3 和 4 还可以看出,当化学势增加时,光吸收的增加主要由光透射的减小所贡献的。

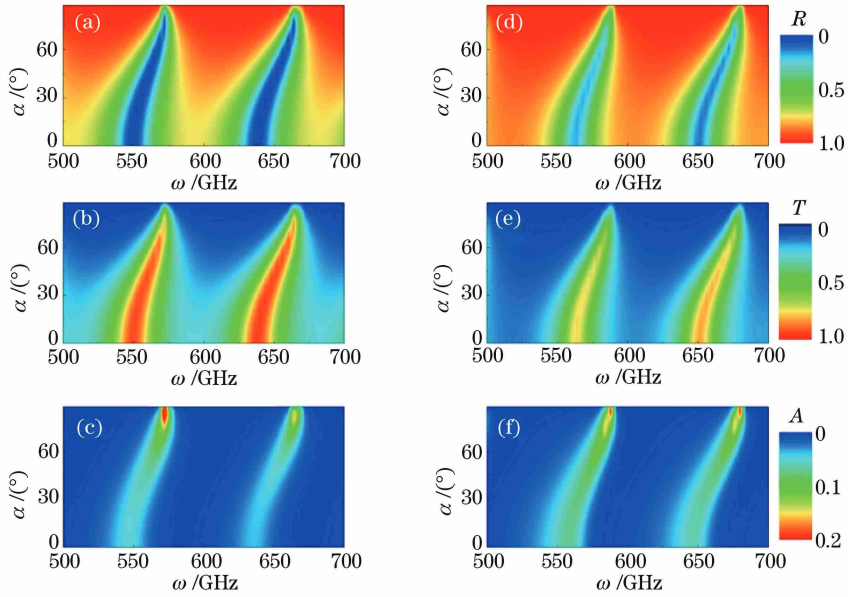


图 1 在 air-(G-Si)-air 结构中,TE 模入射,化学势不同条件下,光的反射率、透射率及吸收率对入射光频率和入射角的依赖关系。100 meV 时的(a)反射率,(b)透射率和(c)吸收率;300 meV 时的(d)反射率,(e)透射率和(f)吸收率  
 Fig. 1 In an air-(G-Si)-air structure, reflectance, transmittance and absorptance as a function of incident optical frequency and incident angle for TE mode when chemical potential is different. (a) Reflectance, (b) transmittance and (c) absorptance at 100 meV; (d) reflectance, (e) transmittance and (f) absorptance at 300 meV

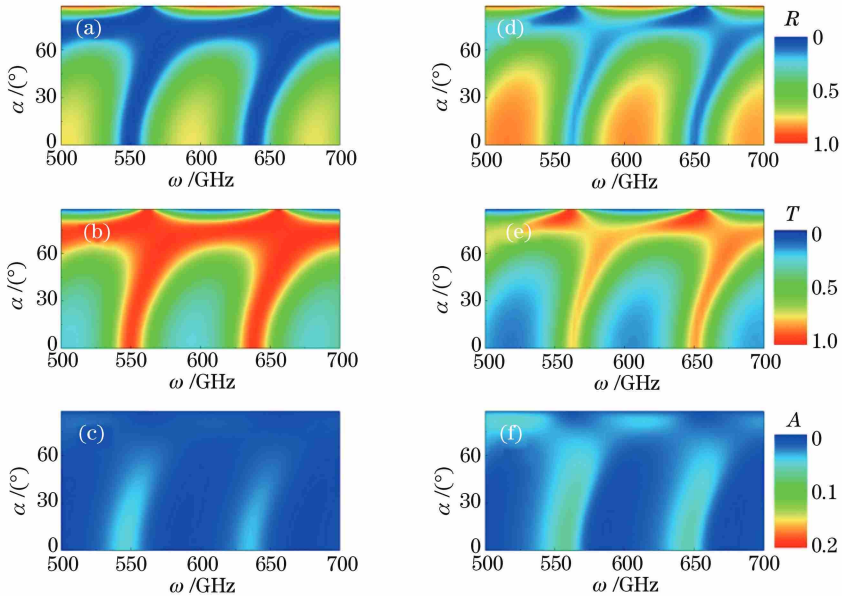


图 2 在 air-(G-Si)-air 结构中,TM 模入射,化学势不同条件下,光的反射率、透射率及吸收率对入射光频率和入射角的依赖关系。100 meV 时的(a)反射率,(b)透射率和(c)吸收率;300 meV 时的(d)反射率,(e)透射率和(f)吸收率  
 Fig. 2 In an air-(G-Si)-air structure, reflectance, transmittance and absorptance as a function of incident optical frequency and incident angle for TM mode when chemical potential is different. (a) Reflectance, (b) transmittance and (c) absorptance at 100 meV; (d) reflectance, (e) transmittance and (f) absorptance at 300 meV

从上述对 air-(G-Si)-air 和 air-(G-Si-G)-air 两个结构中光传播特性的研究可以清楚地看到,石墨烯光吸收率依赖于 TE/TM 模式,依赖于入射光的频率和入射角以及通过石墨烯的化学势来进一步调

节吸收率的大小和吸收峰的位置。为进一步分析峰值位置的变化,在三层介质中,当光垂直入射至多层介质时,可通过第一条反射光波与第二条经透射-反射-再透射的光波之间的相位差来理解,如图 5 所

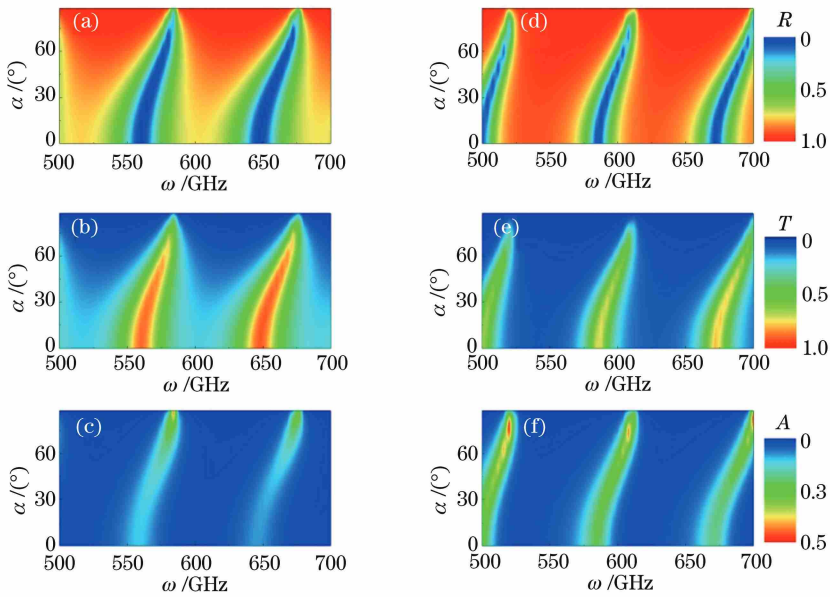


图 3 在 air-(G-Si-G)-air 结构中,TE 模入射,化学势不同条件下,光的反射率、透射率及吸收率对入射光频率和入射角的依赖关系。100 meV 时的(a)反射率,(b)透射率和(c)吸收率;300 meV 时的(d)反射率,(e)透射率和(f)吸收率  
 Fig. 3 In an air-(G-Si-G)-air structure, reflectance, transmittance and absorptance as a function of incident optical frequency and incident angle for TE mode when chemical potential is different. (a) Reflectance, (b) transmittance and (c) absorptance at 100 meV; (d) reflectance, (e) transmittance and (f) absorptance at 300 meV

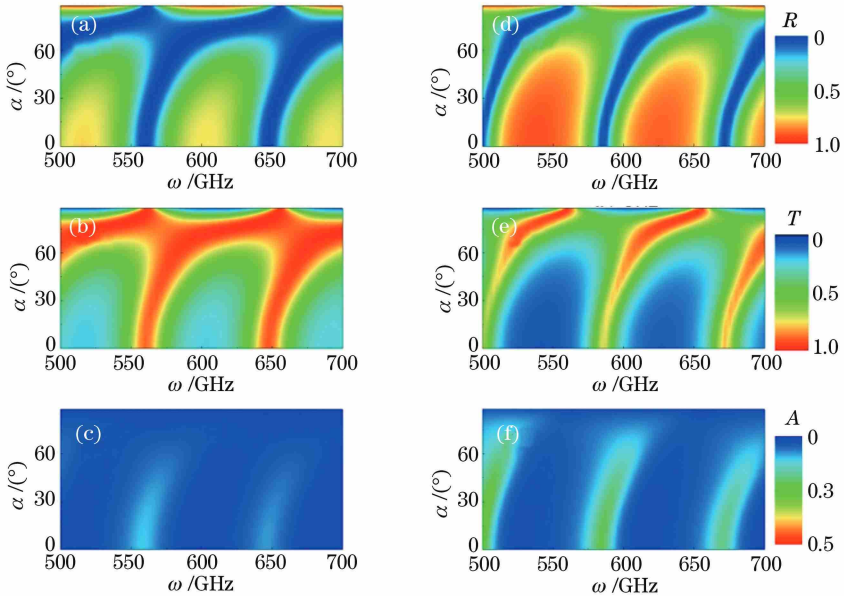


图 4 在 air-(G-Si-G)-air 结构中,TM 模入射,化学势不同条件下,光的反射率、透射率及吸收率对入射光频率和入射角的依赖关系。100 meV 时的(a)反射率,(b)透射率和(c)吸收率;300 meV 时的(d)反射率,(e)透射率和(f)吸收率  
 Fig. 4 In an air-(G-Si-G)-air structure, reflectance, transmittance and absorptance as a function of incident optical frequency and incident angle for TM mode when chemical potential is different. (a) Reflectance, (b) transmittance and (c) absorptance at 100 meV; (d) reflectance, (e) transmittance and (f) absorptance at 300 meV

示。作为参考,黑色点线给出了 air-Si-air 三层结构中两条最主要反射光波的相位差,随着入射频率的增加,大约在 531 GHz 和 619 GHz 时出现干涉相消。增加一层石墨烯形成 air-(G-Si)-air 结构,当化

学势为 100 meV 时,蓝色虚线给出干涉相消的点频率分别增加到 539 GHz 和 626 GHz;继续增加一层石墨烯形成 air-(G-Si-G)-air 结构,相应的干涉相消点约为 549 GHz 和 635 GHz,如图中红色实线所

示。可见随着石墨烯的增加,吸收率峰值位置蓝移。将石墨烯化学势调至 300 meV 时,air-(G-Si)-air 和 air-(G-Si-G)-air 两体系中干涉相消的位置分别为 (547 GHz, 635 GHz) 和 (571 GHz, 657 GHz), 也同样看到因为石墨烯层的增加,吸收率的峰值位置蓝移,并且在小于 500 GHz 的附近点新增一干涉相消点。通过对比,上述两条主要的光波干涉相位差与图 1~4 吸收峰位置基本吻合,因此可以从吸收峰位置来判断界面层由石墨烯界面电导的引入所引起的反射光、透射光的相位差。此时吸收峰位置对应着反射光干涉相消的条件,从而得到石墨烯光导的虚部。在所考虑的频段中,带内光导的大小依赖于化学势、入射光频率以及展宽因子,因此当入射光频率已知的条件下,可通过峰值位置逐步得到石墨烯化学势以及展宽因子参数。

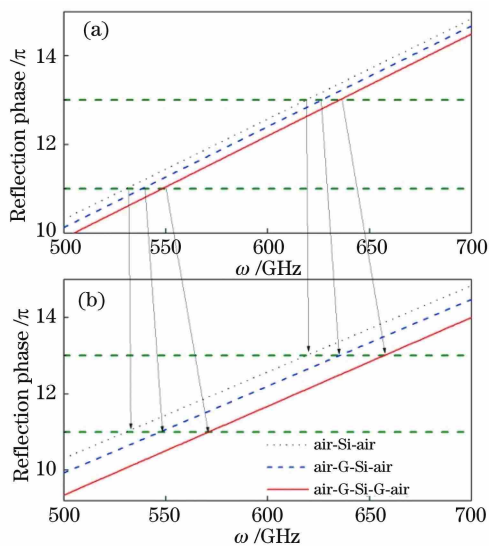


图 5 在三层状介质中,垂直入射,化学势不同条件下,第一条反射光与第二条经透射-反射-透射的光波之间的相位差随入射光频率的关系。(a) 100 meV; (b) 300 meV

Fig. 5 Phase difference between the first reflected light and the second transmitted-reflected-transmitted light as a function of incident optical frequency at the normal incidence in three dielectric layer structure when chemical potential is different. (a) 100 meV; (b) 300 meV

## 4 结 论

考虑电场和磁场在介质分界面上的连续性条件,并采用转移矩阵方法表示光在多层介质中的传播,研究了含石墨烯三层介质中的光输运过程。具体研究了光反射、透射以及吸收随入射光频率、入射

角、TE/TM 模、以及石墨烯光导相关参数间的依赖关系。当只有一层石墨烯插在两介质之间时,介质中的光程随入射光频率的增加呈现  $2\pi$  的周期性,表现出多个吸收峰。吸收率最大时满足的条件为干涉相消,与金属作为衬底相比,介质为衬底时光能够透射,有  $\pi$  的相位差;光从垂直入射到掠面入射,光吸收峰向高频方向偏移以满足相干条件,并且 TE 模式的光吸收表现出随入射角的增加而增加,而 TM 模式的光吸收则越来越弱。TM 模式中,在布儒斯特角附近因相位的突变,光吸收谱非单调变化。提高石墨烯的化学势使石墨烯带内光导的实部虚部都随之增加,光的反射和透射峰更加尖锐,吸收更强。为进一步提高石墨烯光的吸收,在介质两侧都覆盖上石墨烯,光有更多的机会穿过石墨烯层,引起石墨烯吸收的增加。从光的吸收率谱图上得到光吸收峰蓝移和吸收率增加。光的吸收峰位置可通过反射光的相位来分析。重点考虑第一个分界面上的第一束反射光和经两个界面透射-反射-透射的第二束光的相位差可以分析干涉相消的频率条件与峰值位置的对应关系。以上分析可知,通过光学方法可以给出石墨烯光导的主要参数。具体结合光传输中的反射率、透射率、和吸收率的峰值位置得到由石墨烯界面电导的引入引起的反射光和透射光的相位差,以及光导虚部的大小,进而得到石墨烯的化学势和展宽因子。该研究结果对基于石墨烯材料的 THz 光电器件,提供了光传输特性分析以及对石墨烯可调参数的要求。

## 参 考 文 献

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, *et al.* Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene[J]. Nature, 2005, 438(7065): 197-200.
- [2] Zhang Y B, Tan Y W, Stormer H L, *et al.* Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene[J]. Nature, 2005, 438(7065): 201-204.
- [3] Morozov S V, Novoselov K S, Katsnelson M I, *et al.* Giant intrinsic carrier mobilities in graphene and its bilayer[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(1): 016602.
- [4] Katsnelson M I, Novoselov K S, Geim A K. Chiral tunnelling and the Klein paradox in graphene [J]. Nature Physics, 2006, 2(9): 620-625.
- [5] Falkovsky L A, Pershoguba S S. Optical far-infrared properties of a graphene monolayer and multilayer [J]. Physical Review B, 2007, 76(15): 153410.

- [6] 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.
- [7] Falkovsky L A, Varlamov A A. Space-time dispersion of graphene conductivity [J]. *The European Physical Journal B*, 2007, 56(4): 281-284.
- [8] Stauber T, Peres N M R, Geim A K. Optical conductivity of graphene in the visible region of the spectrum [J]. *Physical Review B*, 2008, 78(8): 085432.
- [9] Ashton M, Paul J, Sinnott S B, *et al.* Topology-scaling identification of layered solids and stable exfoliated 2D materials[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(10): 106101.
- [10] Castellanos-Gomez A. Black phosphorus: narrow gap, wide applications [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2015, 6(21): 4280-4291.
- [11] Li Z Q, Henriksen E A, Jiang Z, *et al.* Dirac charge dynamics in graphene by infrared spectroscopy [J]. *Nature Physics*, 2008, 4(7): 532-535.
- [12] Kuzmenko A B, van Heumen E, Carbone F, *et al.* Universal optical conductance of graphite [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(11): 117401.
- [13] Mak K F, Sfeir M Y, Wu Y, *et al.* Measurement of the optical conductivity of graphene [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(19): 196405.
- [14] Luo X G, Qiu T, Lu W B, *et al.* Plasmons in graphene: recent progress and applications [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2013, 74(11): 351-376.
- [15] Xiao B G, Qin K, Xiao S S, *et al.* Metal-loaded graphene surface plasmon waveguides working in the terahertz regime [J]. *Optics Communications*, 2015, 355: 602-606.
- [16] Thongrattanasiri S, Koppens F H L, García de Abajo F J. Complete optical absorption in periodically patterned graphene [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(4): 047401.
- [17] Fang Z Y, Wang Y M, Schlather A E, *et al.* Active tunable absorption enhancement with graphene nanodisk arrays [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(1): 299-304.
- [18] Yan H G, Low T, Zhu W J, *et al.* Damping pathways of mid-infrared plasmons in graphene nanostructures [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 394-399.
- [19] Bludov Y V, Vasilevskiy M I, Peres N M R. Mechanism for graphene-based optoelectronic switches by tuning surface plasmon-polaritons in monolayer graphene [J]. *Europhysics Letters*, 2010, 92(6): 68001.
- [20] Otsuji T, Watanabe T, Tombet S A B, *et al.* Emission and detection of terahertz radiation using two-dimensional electrons in III-V semiconductors and graphene [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, 3(1): 63-71.
- [21] Sensale-Rodriguez B, Yan R S, Rafique S, *et al.* Extraordinary control of terahertz beam reflectance in graphene electro-absorption modulators [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4518-4522.
- [22] 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.
- [23] Hu J H, Huang Y Q, Duan X F, *et al.* Enhanced absorption of graphene strips with a multilayer subwavelength grating structure [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(22): 221113.
- [24] Andryieuski A, Lavrinenko A V. Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: effective surface conductivity approach [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 9144-9155.
- [25] Merano M. Fresnel coefficients of a two-dimensional atomic crystal [J]. *Physical Review A*, 2016, 93(1): 013832.
- [26] Blake P, Hill E W, Castro Neto A H, *et al.* Making graphene visible [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(6): 063124.
- [27] Ying X X, Pu Y, Li Z, *et al.* Absorption enhancement of graphene Salisbury screen in the mid-infrared regime [J]. *Journal of Optics*, 2015, 44(1): 59-67.
- [28] Pu M B, Chen P, Wang Y Q, *et al.* Strong enhancement of light absorption and highly directive thermal emission in graphene [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 11618-11627.
- [29] Ryzhii V, Ryzhii M, Satou A, *et al.* Feasibility of terahertz lasing in optically pumped epitaxial multiple graphene layer structures [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(8): 084507.