

文章编号: 2095-4980(2022)09-0934-08

基于石墨烯的太赫兹波调制器

文松¹, 赵其祥^{2a}, 马梦诗^{2a}, 吕游^{2b}, 何国强^{3a,3b}

(1.中国电子科技集团 第十三研究所, 河北 石家庄 050051; 2.桂林电子科技大学 a.信息与通信学院;
b.材料科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 3.上海大学 a.特种光纤与光接入网重点实验室,
b.特种光纤与先进通信国际联合研究实验室, 上海 200444)

摘要: 石墨烯由于其优异的电学性能, 在微波、毫米波、太赫兹波等领域显示出潜在的应用前景。本文设计了毫米波和亚太赫兹波频段的基于石墨烯的相位和幅值波导调制器。该石墨烯调制器可以通过调节石墨烯的表面阻抗来调控电磁波在波导中传播的振幅和相位; 分析了石墨烯片的长度和位置对电磁波在波导中的透射和反射系数的影响, 同时还分析了石墨烯化学势对电磁波在波导中传输和反射的影响。结果表明, 通过调节石墨烯片的长度及其在矩形金属波导中的位置, 可以调控调制器的反射系数、透射系数和透射相位调制范围, 并满足器件级应用需求。

关键词: 石墨烯波导; 调制器; 太赫兹

中图分类号: TN761

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021260

THz modulator based on graphene

WEN Song¹, ZHAO Qixiang^{2a}, MA Mengshi^{2a}, LYU You^{2b}, HE Guoqiang^{3a,3b}

(1.The 13th Institute of China Electronics Technology Group, Shijiazhuang Hebei 050051, China; 2a.School of Information and Communication; 2b.School of Materials Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China; 3a.Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks; 3b.Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Graphene is attractive for the great potential in microwave, millimeter wave, terahertz wave and other fields due to their excellent electrical properties. In this paper, a rectangular metallic waveguide integrated with graphene for phase and amplitude modulator is designed in the millimeter and sub-terahertz waves frequencies. Through adjusting the surface impedance of graphene, the amplitude and phase of electromagnetic wave propagation in the waveguide can be controlled dynamically. Meanwhile, the influence of the length and position of the integrated graphene sheet on the transmission and reflection coefficients of electromagnetic wave in the waveguide is analyzed, as well as the effect of graphene chemical potential on the transmission and reflection of electromagnetic wave in waveguide. The results show that the reflection coefficient, transmission coefficient and transmission phase modulation range of the modulator can be customized by adjusting the length of graphene sheet and its position in rectangular metal waveguide, which meets the needs of device level applications.

Keywords: graphene waveguide; modulators; terahertz

毫米波和太赫兹(THz)技术在天文学、安检、生物技术、无线传感器和通信等领域有着广泛应用^[1-3]。近几年来, 无线网络对数据带宽的需求快速增长了几十倍。太赫兹波由于其丰富的频率资源已成为未来无线通信领域的热点^[4-5]。太赫兹调制器作为其核心部件之一, 广泛用于各种系统中, 如太赫兹通信系统、太赫兹医疗、检测系统等^[6-8]。在目前的太赫兹波技术框架下, 要实现无线太赫兹波高速通信系统, 关键是太赫兹波调制技术, 因此研究太赫兹波调制技术具有重要意义。

调制器作为无线通信的关键部件之一, 其性能对保证通信质量起着非常重要的作用。高性能调制器的研究

收稿日期: 2021-06-20; 修回日期: 2021-08-25

基金项目: 国家自然科学基金青年资助项目(62001280); 上海市浦江人才计划资助项目(20PJ1404300); 广西无线宽带通信和信号处理重点实验室资助项目(GXKL06200213)

已成为当前研究的热点。石墨烯(graphene)是一种以 sp²杂化连接的碳原子紧密堆积成单层二维蜂窝状晶格结构的新材料^[9], 具有优异的导热性、导电性和柔韧性, 引起了科学家们的广泛关注。基于石墨烯的电光调制器^[10]、热光调制器^[11-12]、太赫兹波调制器^[13-14]等逐渐被报道。2016年, Ayed Al Sayem等^[15]使用石墨烯和介质材料自然堆叠在一起, 设计了一种电可调的传输调制器, 利用石墨烯导电性的电可调特性, 实现了调制深度高、频带宽的优点, 经理论计算和分析, 器件效率可达60%, 带宽在160~235 THz之间, 同时还研究了该调制器在TM波和TE波作用下的性能参数。2011年, Berardi Sensale-Rodriguez等利用与石墨烯键合的AlGaAs/GaAs异质结构, 在室温下实现了太赫兹调制器^[16]。

本文设计了一种单层石墨烯和石墨烯复合材料的矩形金属波导调制器。利用三维仿真软件对反射系数和透射系数进行计算和分析, 对石墨烯复合材料矩形金属波导调制器施加栅极电压改变化学势, 通过改变三维结构参数和石墨烯的化学势, 优化了调制器的性能。

1 石墨烯电磁特性研究

石墨烯的电导率模型, 可用 Kubo 公式表示^[17]:

$$\sigma_s(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \frac{je^2(\omega - j2\Gamma)}{\pi\hbar^2(\omega - j2\Gamma)^2} \left[\int_0^\infty \epsilon \left(\frac{\partial f_d(\epsilon)}{\partial \epsilon} - \frac{\partial f_d(-\epsilon)}{\partial \epsilon} \right) d\epsilon \int_0^\infty \frac{f_d(-\epsilon) - f_d(\epsilon)}{(\omega - j2\Gamma)^2 - 4(\epsilon/\hbar)^2} d\epsilon \right] \quad (1)$$

式中: e 为电子电量; $\hbar = h/2$ 为普朗克常量; $f_d(\epsilon) = (e^{\frac{\epsilon - \mu_c}{k_B T}} + 1)^{-1}$ 为费米-狄拉克分布, k_B 为玻兹曼常数, T, μ_c 分别为环境温度和石墨烯的费米能级; Γ 为石墨烯的散射率。石墨烯的电导率可分为带内与带间电导率, 表示为 $\sigma_s = \sigma_{s, \text{intra}} + \sigma_{s, \text{inter}}$ 。由于在太赫兹频段费米能级 $E_F \gg \hbar\omega$, 即 $E_F \gg k_B$, 载流子一般只有带内跃迁起作用, 因此, 石墨烯的电导率可简化为:

$$\sigma_s(\omega) \cong \sigma_{s, \text{intra}} = \frac{\sigma_0}{1 + j\omega\tau} \quad (2)$$

式中: τ 为石墨烯的弛豫时间; σ_0 为直流电导率, 表示为:

$$\sigma_0 = \frac{e^2 \tau k_B T}{\pi \hbar^2} \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left(e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1 \right) + 1 \right] \quad (3)$$

单层石墨烯的表面阻抗则表示为:

$$Z_s = \frac{1}{\sigma_s} = R_s + jX_s \quad (4)$$

式中: $R_s = 1/\sigma_0$ 为石墨烯的表面电阻; $X_s = \tau\omega/\sigma_0$ 为石墨烯的表面电抗。在不同化学势下, 单层石墨烯表面电阻和电抗随频率的变化如图1所示。从图中可以看出, 当化学势不变时, 石墨烯表面电阻几乎与频率无关, 随着化学势的增大而降低; 但表面电抗与频率呈线性增长的关系, 且随着化学势的增加, 表面电抗也随之增加。可调谐的表面电抗使石墨烯能够调节电磁波在波导中传播的振幅和相位。

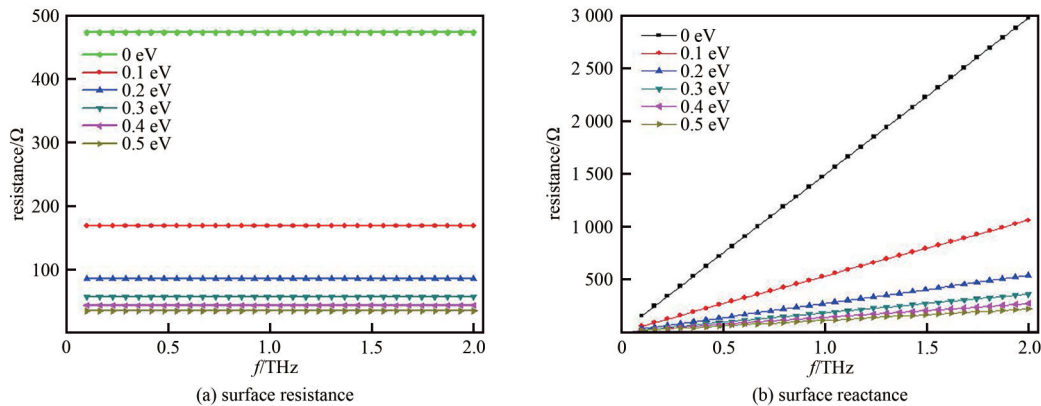


Fig.1 Graphene surface impedance versus frequency under different chemical potentials

图1 在不同化学势下,石墨烯表面阻抗随频率的变化

2 单层石墨烯加载矩形波导

单层矩形石墨烯加载的矩形波导结构如图 2 所示。石墨烯长度为 L ，位于空心波导中，与波导窄边之间的距离为 d 。矩形波导的尺寸为 $a=2b=0.864$ mm，长度为 $L=25.5$ mm，如图 2(a)所示。矩形波导的尺寸决定了波导主导 TE_{10} 模式的工作频率范围为 220~340 GHz。石墨烯片具有与波导窄壁相同的高度，选择石墨烯的弛豫时间为 0.5 ps，化学势为 0~0.5 eV。首先研究在化学势为 0 eV 的条件下，石墨烯长度和位置变化对太赫兹波传输的影响，结果如图 3 所示，其中石墨烯片的长度为 0.51 mm。从图 3(a)可以看出，当石墨烯与波导窄壁之间的距离 d 逐渐增大时，透射系数减小，而反射系数相反。当 d 为 432 μm 时，传输衰减达到最大。如图 3(b)所示，当 d 降低到 272 μm 时，谐振频率由高频点降到了 330 GHz 左右，且明显存在着相位变化。进一步研究表明，通过控制石墨烯的化学势，可以改变石墨烯的表面阻抗来调制谐振点，从而使石墨烯能够调制电磁波在波导中的传播相位。同时还研究了石墨烯长度对电磁波在波导中传输的影响，结果如图 4 所示，其中石墨烯片被放置在波导中间位置 $d=a/2$ 处。可以看出，在整个频率范围内，透射系数随石墨烯长度的增加而减小。特别地，当石墨烯长度增加到 5 mm 时，透射系数会随着频率的增加而呈现单调递增的关系。同时发现，石墨烯长度大于 6 mm 时，透射系数在频率范围内会出现一个缺口。反射系数一般随温度的升高而减小，频率和低于 -12 dB，因此波导衰减随时间增加。如图 4(b)所示，反射系数随着频率的增加而减小，且都低于 -12 dB。因此，波导衰减随石墨烯长度的增加而增加，而反射对石墨烯长度的变化一般不敏感。

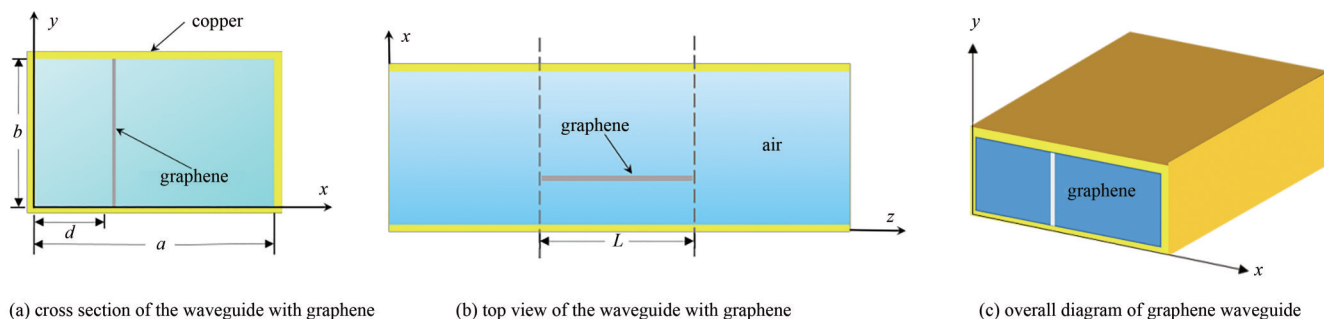


Fig.2 Schematic diagram of a rectangular metallic waveguide integrated with a monolayer graphene sheet

图2 单层石墨烯薄片的矩形波导结构示意图

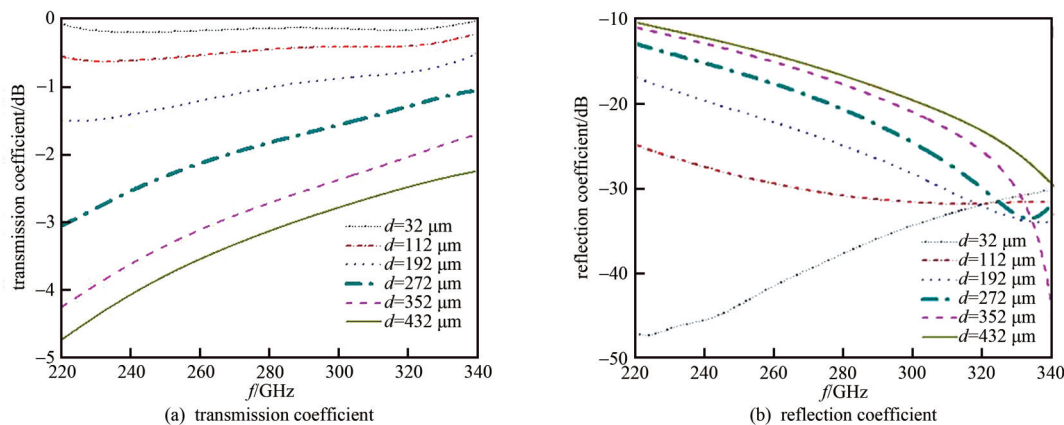


Fig.3 Influence of graphene position change on transmission and reflection coefficients

图3 石墨烯位置变化对透射和反射系数的影响

当石墨烯长度为 0.51 mm，位置 d 为 260 μm 时，相位调制结果如图 5 所示，其中石墨烯弛豫时间为 0.5 ps，化学势在 0~0.5 eV 之间变化，以化学势为 0 eV 时的相位 ϕ_0 作为参考相位，相位偏移量与参考相位和真实相位之间的关系为 $\Delta\phi(\mu) = \phi(\mu) - \phi_0$ 。从图中可以看出，随着化学势的上升，频率带内相移单调增加。当石墨烯化学势确定，相移随频率的增加而减小。在最低频率 287 GHz 处，最大相移为 52°，在最高频率 340 GHz 处，最小相移为 23°。

当石墨烯的长度 L 为 1 mm，放在沿波导宽壁方向的中间位置时，幅值调制结果如图 6 所示，其中石墨烯的弛豫时间保持为 0.5 ps，化学势在 0~0.5 eV 范围内变化。可以看出，在整个频率范围内，透射系数随化学势的增大而减小，但反射系数随化学势的增加而增加。当石墨烯的化学势从 0 eV 增加至 0.5 eV，石墨烯的表面电阻由

475 Ω 减小至 34 Ω，这增加了空心波导截面与石墨烯加载波导截面的不匹配，也增加了衰减。

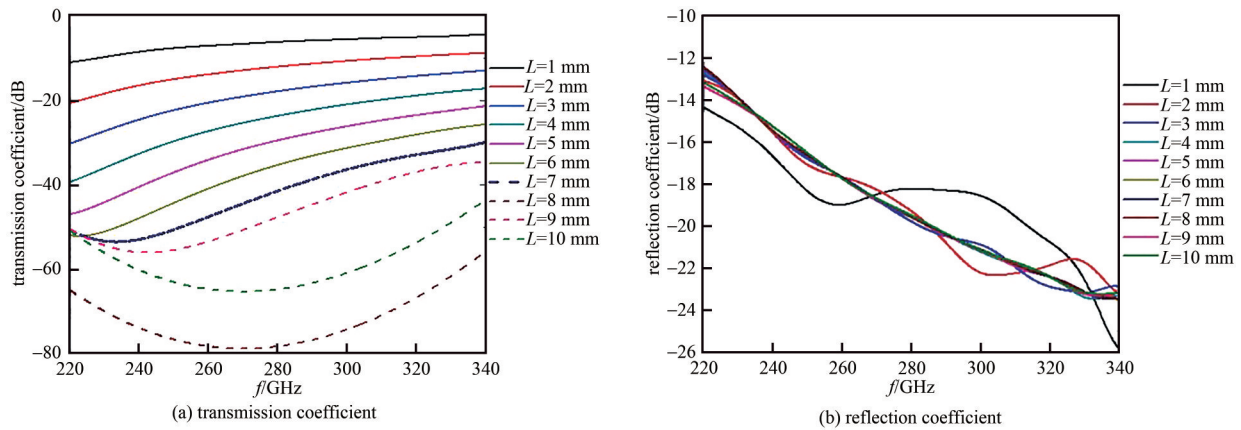


Fig.4 Influence of graphene length on transmission and reflection coefficients
图 4 石墨烯长度对透射和反射系数的影响

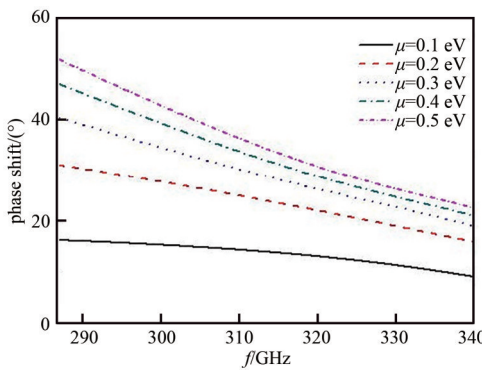


Fig.5 Phase shifts of transmission in the waveguide versus frequency under different chemical potentials of graphene
图 5 不同化学势下电磁波传输的相移随频率的变化

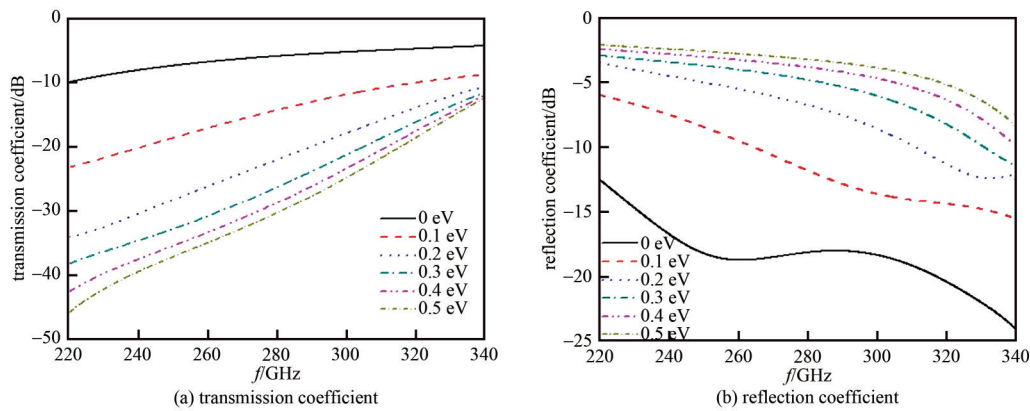


Fig.6 Variation of transmission and reflection coefficients with frequency under different chemical potentials
图 6 不同化学势下透射和反射系数随频率的变化

3 具有 SiO₂ 和 Si 衬底的石墨烯层加载矩形波导

前面研究表明，石墨烯加载的矩形波导结构具有调制电磁波幅值和相位的能力。通常在石墨烯和硅衬底之间施加栅极电压来调节石墨烯化学势，从而对电磁波进行幅值和相位调制。石墨烯与硅衬底之间的电压绝缘基板通常为 SiO₂。硅层厚度约 0.5 mm，这对于尺寸为 $a=b=0.864$ mm 的波导来说太大，因此将研究频率调整为 V 波段，波导长度 $L=25.5$ mm。石墨烯及其 SiO₂ 和 Si 基底形成了 3 层复合材料，按照图 7 所示的形式加载到矩形波导中。石墨烯与底部和顶部波导宽壁之间有小间隙，掺杂硅与波导宽壁相连。栅电压通过金属波导壁施加在石墨烯和硅衬底之间，如图 7(a) 所示。利用商业软件 CST 微波工作室模拟研究了石墨烯复合材料加载的矩形波导的

透射和反射系数，结果如图 8 所示。可以看出，透射系数在整个频带内随化学势的增大而减小，当化学势增大到约 0.2 eV 时，达到最小值，如图 8(a) 中的黑色曲线所示；当化学势从 0.25 eV 增加时，透射系数也随着增加，如图 8 (a) 中的红色曲线所示。反射系数在频率范围内呈周期性变化，但不随石墨烯化学势的变化而变化。传输的相移通过式(4)来计算，电位从 0.034~0.5 eV 不等。在不同化学势下，相位偏移随频率变化的结果如图 9 所示，可以看出，当化学势从 0.034 eV 开始增加时，相位偏移从 -120° 开始增加，当化学势增加至 0.2 eV 时，相位偏移达到最大值；当化学势增加到 0.25 eV 时，相位偏移突然跳跃至 -200°，然后再次随化学势的增加而不断增大。因此通过在石墨烯上施加栅极电压来调节石墨烯的化学势，能够调制电磁波在波导中传播的振幅和相位。但反射损耗太大，不能用于实际中。

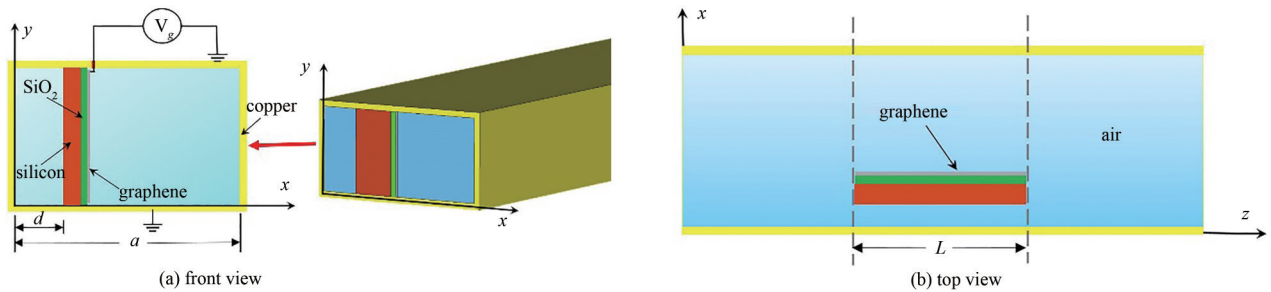


Fig.7 Schematic diagram of the rectangular waveguide integrated with the three-layer graphene composite

图 7 三层石墨烯复合材料加载的矩形波导的示意图

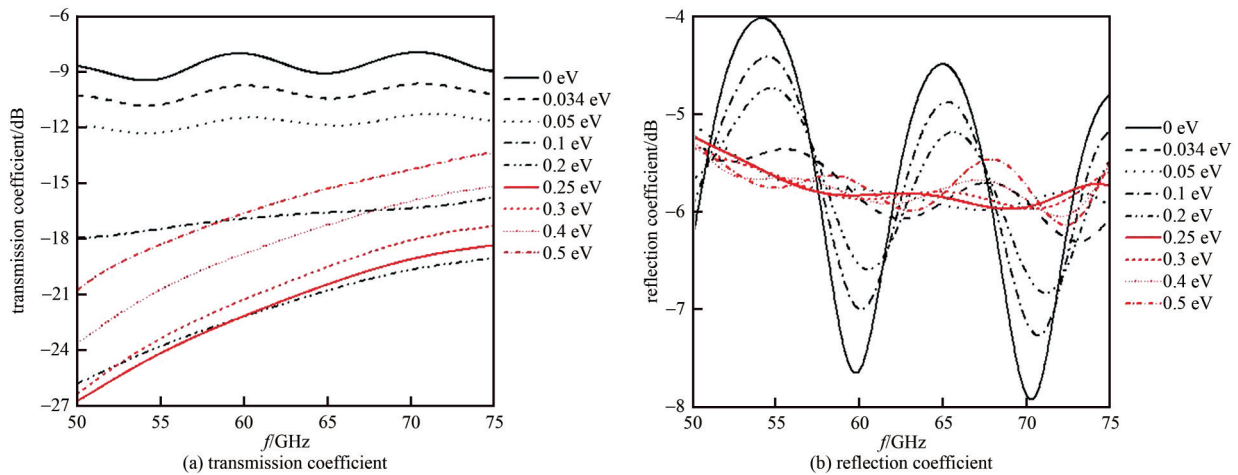


Fig.8 Simulated transmission and reflection coefficients of the rectangular waveguide integrated with the graphene composite versus frequency when the graphene chemical potential varying from 0 eV to 0.5 eV

图 8 当石墨烯化学势为 0~0.5 eV 时，矩形波导的透射和反射系数随频率的变化

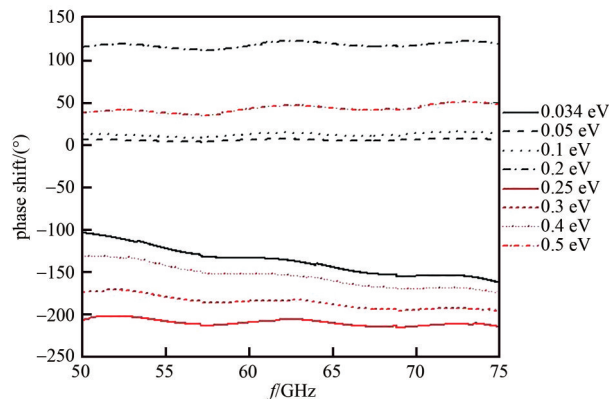


Fig.9 Phase shift of the transmission in the rectangular waveguide integrated with the graphene composite when the chemical potential varying from 0.034 eV to 0.5 eV

图 9 化学势在 0.034~0.5 eV 之间变化时，石墨烯复合材料加载的矩形波导中传输相移

为降低反射损耗，提出了一种椭圆形石墨烯复合材料来实现与空心矩形波导阻抗匹配，结构如图 10 所示，其中石墨烯、SiO₂ 和 Si 的相对位置和图 7(a) 相同。半径沿椭圆石墨烯复合层的 z 和 y 轴分别为 $a_c=4$ mm 和 $b_c=1.2$ mm。SiO₂ 和 Si 衬底的厚度分别保持为 300 nm 和 0.5 mm。石墨烯复合层沿宽壁方向(x 轴)定位在波导管的中间。这种椭圆石墨烯加载的波导透射和反射系数结果如图 11 所示，其中石墨烯化学势在 0~0.5 eV 范围内变化。可以看出，当石墨烯化学势在 0~0.5 eV 变化时，透射系数在全频段都低于 -25 dB。反射系数随频率的增加而降低，在整个频率范围内随化学势增加而增加(化学势 0 eV 除外)。与化学势为 0 eV 的相比，相位偏移在 0.1~0.5 eV 之间变化时，传输相移随频率的变化如图 12 所示。可以看出，整个频段相位偏移随化学势的增加而减小。反射系数的幅值可以通过调节石墨烯的化学势实现在整个频带内线性调制，因此具有椭圆石墨烯复合层的波导结构可作为可调谐的宽带反射器。由于传输损耗大于 25 dB，相位调制并不能实际应用。为降低传输损耗，将椭圆石墨烯复合层的一半移到非常接近波导窄壁位置，即 $d=1.67$ mm。这个矩形波导的传输损耗和反射系数如图 13 所示。可以看出，当石墨烯化学势在 0~0.5 eV 变化时，最大传输损耗在整个频带内都小于 4 dB，反射系数都低于 -20 dB。同时发现，反射系数随化学势的增加而增加。与石墨烯化学势 0 eV 相比较，化学势在 0.1~0.5 eV 之间的相移结果如图 14 所示。可以看出，所有化学势的最大相移约为 34°，且随着石墨烯化学势的增大，相移增大。说明了这种结构能够调制电磁波相位，且具有低传输损耗和低反射损耗。

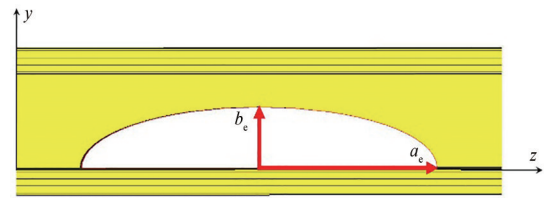


Fig.10 Schematic diagram of the rectangular waveguide integrated with half of the elliptical graphene composite
图 10 具有半椭圆石墨烯复合材料的波导结构示意图

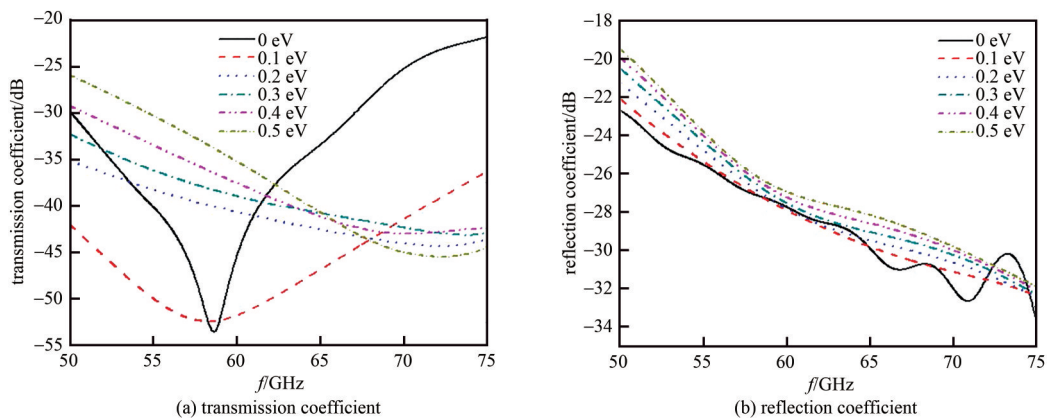


Fig.11 Simulated transmission and reflection coefficients of the rectangular waveguide integrated with the elliptically shaped graphene composite positioned in the middle of the waveguide wide wall versus frequency when the graphene chemical potential varying from 0 eV to 0.5 eV
图 11 当石墨烯化学势在 0~0.5 eV 时，具有椭圆形状石墨烯复合层加载的矩形波导的透射和反射系数与频率的关系

4 结论

本文研究了两种不同石墨烯结构加载的波导对电磁波的调制作用。单层石墨烯薄片加载的波导结构对太赫兹波幅度调制显示出了宽带特性，但调制深度有限，这归因于单层石墨烯的有限太赫兹吸收。提出了将石墨烯及其衬底材料加载在矩形波导中实现调制电磁波在波导中传播的振幅和相位。研究发现，石墨烯的位置影响电磁波在波导中传播和发射的幅值，且电磁波在波导中的传播衰减随石墨烯向波导窄壁移动而增加，当石墨烯位于波导窄壁中间时，达到最大值，此时是幅值调制的理想选择。当石墨烯靠近波导窄壁时，能够实现相位调制且传输损耗较低。综上结果表明，这种石墨烯加

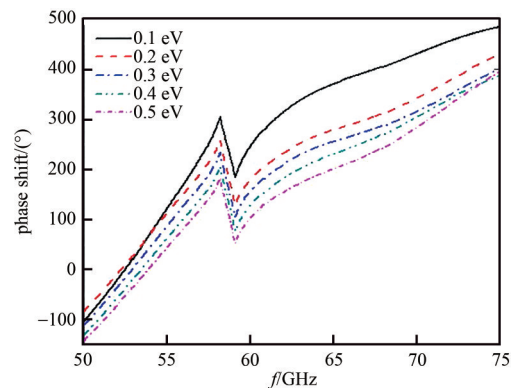


Fig.12 Phase shift of the transmission in the rectangular waveguide integrated with half of the elliptical graphene composite positioned in the middle of the waveguide wide wall versus frequency when the chemical potential ranging from 0 eV to 0.5 eV
图 12 当化学势在 0~0.5 eV 之间时，具有椭圆石墨烯复合层加载的矩形波导中传输相移随频率的变化

载的波导具有幅值调制功能，能够用于毫米波和太赫兹波导的衰减器。

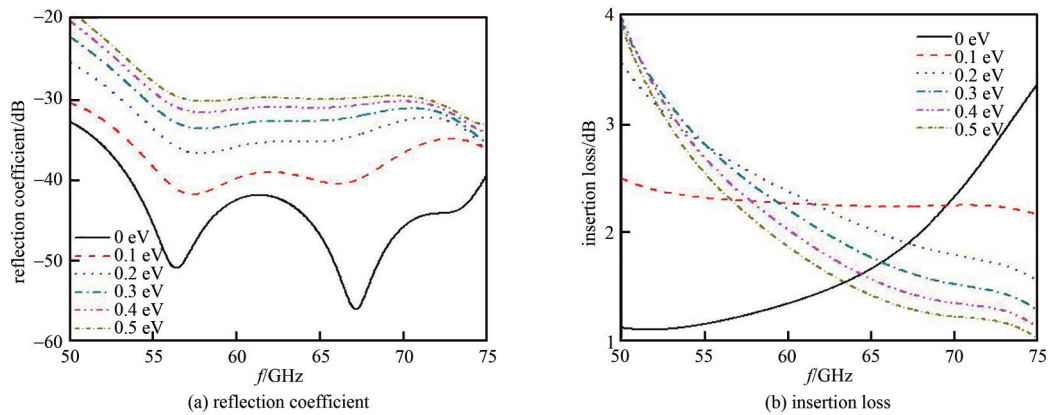


Fig.13 Simulated insertion loss and reflection coefficient of the rectangular waveguide integrated with the elliptically shaped graphene composite positioned close to the waveguide narrow wall with $d=1.67$ mm versus frequency for the graphene chemical potential varying from 0 eV to 0.5 eV
图 13 当石墨烯化学势在 0~0.5 eV 变化时，具有椭圆形状石墨烯复合层加载的矩形波导的反射系数和插入损耗与频率的关系(矩形波导与靠近波导窄壁 $d=1.67$ mm)

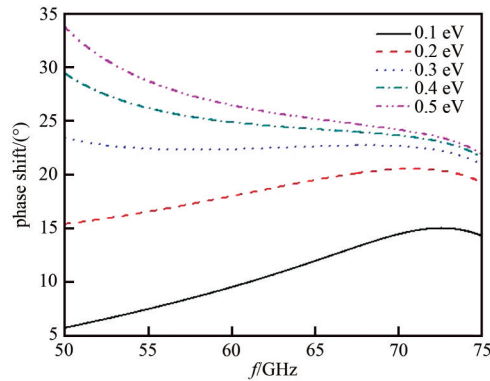


Fig.14 Phase shift of the transmission in the rectangular waveguide integrated with half of the elliptical graphene composite positioned close to the waveguide narrow wall with $d=1.67$ mm versus frequency when the chemical potential ranging from 0 eV to 0.5 eV

图 14 当化学势为 0~0.5 eV 时，具有一半椭圆石墨烯复合波导中传输的相移随频率的变化

参考文献:

- [1] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006,8(1):7-12. (LIU Shenggang. Recent development of terahertz science and technology[J]. China Basic Science, 2006,8(1):7-12.)
- [2] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术与应用[M]. 北京:北京大学出版社, 2007. (XU Jingzhou,ZHANG Xicheng. Terahertz technology and application[M]. Beijing:Peking University Press, 2007.)
- [3] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007,1(2):97-105.
- [4] 姚建铨,迟楠,杨鹏飞,等. 太赫兹通信技术的研究与展望[J]. 中国激光, 2009,36(9):2213-2233. (YAO Jianquan,CHI Nan, YANG Pengfei,et al. Study and outlook of terahertz communication technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009,36(9):2213-2233.)
- [5] 赵明明,余建军. 太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(6):931-937. (ZHAO Mingming, YU Jianjun. Terahertz communication system: present and outlook[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(6):931-937.)
- [6] REDO-SANCHEZ Albert,ZHANG Xicheng. Terahertz science and technology trends[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2008,14(2):260-269.
- [7] 余晓,杨帆. 太赫兹成像技术用于皮肤烧伤检测的研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(2):201-209. (YU Xiao, YANG Fan. Recent advances in terahertz imaging of skin burn assessment[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(2):201-209.)

(下转第 972 页)