

基于人工超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调幅器件

袁莹辉^{1,2}, 陈颀宇², 胡放荣^{1,3}, 熊显名^{1,3}, 张文涛^{1,3}, 韩家广^{1,2*}

¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541000;

²天津大学精密仪器与光电子工程学院太赫兹研究中心, 天津 300072;

³广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541000

摘要 设计并制备了基于人工超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调幅器件, 并对其调制效果进行了模拟仿真和实验验证。该器件以嵌在石墨烯和超表面之间的离子凝胶为电解质, 以石墨烯为主动材料, 用超表面实现太赫兹波与石墨烯相互作用的增强。通过外加偏压调节石墨烯的电导率, 进而达到对太赫兹波的主动控制。结果表明: 该器件在较小的外加偏压下就可以在谐振频率处实现 73% 的调制深度, 并且在调制过程中谐振频率几乎保持不变。该器件为小电压下的大幅度太赫兹调制提供了一种新手段。

关键词 太赫兹技术; 太赫兹调幅器件; 石墨烯; 离子凝胶; 人工超表面

中图分类号 TB383

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614016

Terahertz Amplitude Modulator Based on Metasurface/Ion-Gel/Graphene Hybrid Structure

Yuan Yinghui^{1,2}, Chen Xieyu², Hu Fangrong^{1,3}, Xiong Xianming^{1,3},
Zhang Wentao^{1,3}, Han Jiaguang^{1,2*}

¹*School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541000, China;*

²*Center for THz Waves, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

³*Guangxi Key Laboratory of Optoelectronics Information Processing, Guilin, Guangxi 541000, China*

Abstract In this study, a terahertz amplitude modulator based on metasurface/ion-gel/graphene hybrid structure was designed and fabricated. The modulation performance of the device was simulated and experimentally demonstrated. This device uses the ion-gel medium embedded between graphene and metasurface as the electrolyte, and the graphene as the active material. The enhancement of the interaction between terahertz wave and graphene is realized on the metasurface. Further, an external bias voltage was used to tune the electrical conductivity of graphene for actively controlling the terahertz waves. The results indicate that the device can achieve a modulation depth of up to 73% at the resonant frequency with a relatively small bias voltage. Moreover, the resonant frequency remains almost constant in the modulation process. Thus, the proposed device provides one novel tool in the large terahertz amplitude modulation under low voltages.

Key words terahertz technology; terahertz amplitude modulator; graphene; ion-gel; metasurface

OCIS codes 230.4170; 300.6495; 160.4670

收稿日期: 2018-12-26; 修回日期: 2019-01-15; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(61875150)

* E-mail: jiaghan@tju.edu.cn

1 引 言

太赫兹波是指频率范围在 0.1~10 THz 之间的电磁波,在电磁波谱中位于红外和毫米波之间,是近十几年来被提出并迅速成为全世界研究热点的一个电磁波段。太赫兹波之所以能吸引研究人员的眼球,是因为其特殊的频谱位置和光谱特性使其在物质结构探索与识别、安全检查、生物医学成像、雷达和超宽带通信等国民经济和国防建设领域具有广阔的应用前景^[1]。然而,由于过去工作在太赫兹波段的高效发射源、探测器和功能性器件很少或者价格昂贵,太赫兹技术距离实际应用还相差甚远。现在,太赫兹发射源和探测器的研究已有了较大进展,各种各样的太赫兹技术逐渐被提出,仅在常用的太赫兹时域频谱系统中就包括光电导天线、光整流、半导体表面发射、空气等离子体四波混频和金属薄膜自旋电流等多种技术^[2-3]。相比之下,对于控制太赫兹波的功能器件还很欠缺。因此,开发紧凑、高性能、高设计自由度、高效率的各类太赫兹波段功能器件是当前亟待解决的一大问题,这对于推动太赫兹科学技术的发展具有重要意义。超材料及超表面的出现为解决这一问题提供了有效手段。

超材料是指由亚波长的人工微结构组成的新型材料,它可以高效并自由地操控电磁波的传播。由于组成超材料的微结构及其排布方式设计的随意性,超材料可以实现许多自然材料不能实现的功能,如负折射率、隐身、超级成像等,刷新了人们对电磁波操控的认知^[4]。这些超材料都为三维结构,在实际应用中存在加工难度巨大、损耗高等问题,相比之下,对于超表面的研究更受关注。超表面是指由亚波长人工微结构在界面处以阵列排布而成的二维形式的超材料,它不仅可以实现对电磁波传输的控制,还可实现对电磁波其他参数的调控,如振幅、相位、偏振、频率和波前等^[5]。相对于三维超材料而言,超表面的加工更简单,且由于其与电磁波相互作用的长度急剧减小,损耗也较低,因此更适合用于器件的制作。与超材料一样,超表面的研究也兴起于微波和红外波段,目前几乎已延伸到了整个电磁波谱^[6]。对于功能器件欠缺的太赫兹波段来说,超表面的出现无疑为其开辟了一条新道路。目前,在太赫兹波段,已有很多基于超表面的功能器件被报道,如滤波器^[7-8]、吸收器^[9]、调制器^[10]、偏振控制器^[11]和波前控制

器^[12]等等。但可以注意到,这些器件多数都是被动型的,人们期望在此基础上,能够实现更多主动可控的太赫兹功能器件。为此,新兴的二维材料——石墨烯,吸引了研究人员的广泛关注。

作为二维材料的典型代表,石墨烯因具有独特的力学、热学和电磁学性能^[13],在物理、化学、能源以及材料等多个领域得到了广泛研究。石墨烯是由蜂窝状排列的单层碳原子构成的二维平面材料,其厚度大约为 0.3 nm。理想的石墨烯具有无带隙的锥形能带结构,常温下具有很高的载流子迁移率^[14-15],为光电器件的快速工作提供了可能。与其他材料不同,石墨烯的电导率由带间跃迁和带内跃迁共同决定^[16]。在可见光波段内,石墨烯的光电导率几乎不变,对可见光的吸收率仅为 2.3%,是一种理想的透明电极材料^[17]。在太赫兹波段,石墨烯的电导率取决于带内跃迁,通过电压、化学掺杂等方式移动费米能级的位置就可以改变其电导率的大小,进而改变其与太赫兹波相互作用的强度。基于石墨烯电导率在太赫兹波段显著的可调性,研究人员将其作为主动材料提出了许多太赫兹主控器件。例如:将石墨烯转移到以硅为基底的二氧化硅上制作了太赫兹调幅器件,其在 50 V 外加偏压下实现了对太赫兹波 15% 的调制^[18];将石墨烯刻蚀成周期的矩形或 L 型形状,实现了在太赫兹频率下工作的超薄、宽带以及可调的偏振控制器件^[19]。除此之外,基于石墨烯的太赫兹吸收体也已被提出^[20-22]。

作为主动可控材料,石墨烯在太赫兹功能器件的发展中显示出了广阔的应用前景,但其厚度(纳米尺度)限制了其与太赫兹波相互作用的强度。在给定的石墨烯电导率波动范围内,石墨烯所处的平面电场越强,太赫兹波传输对石墨烯的电导率就越敏感。通过将石墨烯与超表面结合在一起,可以在一定程度上增强石墨烯与太赫兹波相互作用的强度,即增强其对太赫兹波的调控能力,从而推动了太赫兹主控器件的发展。2015 年, Li 等^[23]将石墨烯直接转移到硅基底上,再通过与超表面结合,利用光电混合调制的方法在较小的电压下实现了对太赫兹波 60% 的调制。2017 年,高红等^[24]设计的基于有图案石墨烯的超薄宽带太赫兹超材料吸收体,实现了对太赫兹波 80% 以上的吸收,并且吸收带宽达到了 1.422 THz。2017 年, Kim 等^[25]提出了一种由手性超表面和石墨烯组合而成的电控太赫兹偏振器件,其在不改变左旋圆偏光的情况下,实现了对右旋圆

偏光的显著调制。2018年, Liu等^[26]将金属超表面和石墨烯相结合, 提出了主控太赫兹超透镜, 在0~2 V的偏压下, 该超透镜实现了焦距从10.46 mm到12.24 mm的变化。

由聚合物与离子液体混合而形成的离子凝胶具有良好的导电性和较大的机械强度, 在电控石墨烯费米能级的研究中得到了广泛关注。本文以离子凝胶为电解质, 提出了一种基于人工超表面/离子凝胶/石墨烯的太赫兹调幅器件。与之前提出的太赫兹调制器件不同, 本研究将离子凝胶嵌在超表面和石墨烯之间, 通过外加偏压, 在石墨烯和离子凝胶界面形成纳米级厚度的电双层, 类似于超级电容器, 可以大幅调节石墨烯的费米能级, 所以很小的电压就可以显著改变石墨烯的电导率, 达到控制太赫兹波的目的。通过实验测量表明, 在保持谐振频率几乎不变的情况下, 该器件在3.0 V的外加偏压下即可达到64%的调制深度。在此基础上, 通过将金属结构相互作用的石墨烯层数增至两层, 调制深度可以进一步提高到73%。除此之外, 还对由不同特征尺寸金属结构所构成的器件进行了数值仿真, 仿真结果表明, 通过调整金属结构的尺寸, 可以实现不同频率下太赫兹波的大幅度调制。这种低电压、大调制深度太赫兹调幅器件对推动太赫兹技术的发展及实用化具有重大意义。

2 数值模拟仿真

图1(a)为本课题组设计的太赫兹调幅器件的结构示意图, 在石英基底上依次有单层石墨烯、离子凝胶和金属超表面。其中, 超表面为“工”字形孔径结构, 其结构图如图1(b)插图所示, 结构尺寸参数如下: $a=120\ \mu\text{m}$, $b=100\ \mu\text{m}$, $w=25\ \mu\text{m}$, 厚度 $h=10\ \mu\text{m}$, 周期 $p=200\ \mu\text{m}$ 。首先, 用数值仿真软件 CST 对无基底的金属超表面结构的太赫兹透射谱进行数值模拟仿真, 在仿真中, 为与实验一致, 材料选为金属镍, 并将其电导率设为 $1.44\times 10^7\ \text{S/m}$ 。电磁波传播方向 k 、电场的振动方向 E 及磁场的振动方向 H 如图1(b)插图所示。图1(b)中的实线是超表面的振幅透射率频谱图(在这里将振幅透射率定义为 $t=|\vec{E}_{\text{st}}/\vec{E}_{\text{rt}}|$ ^[10], 式中 \vec{E}_{st} 为样品的太赫兹透射电场, \vec{E}_{rt} 为参考的太赫兹透射电场), f 为频率, 可以看出, 在0.73 THz处存在一个透射率接近于1的谐振峰。进一步地, 对基于人工超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调幅器件进行模拟仿真, 仿真中采用的离子凝胶的介电常数 ϵ 是通过太赫兹时域光谱系统测量得到的, 如图1(c)所示。由于石墨烯的厚度非常薄, 在仿真中将单层石墨烯设置为厚度为1 nm、载流子弛豫时间为50 fs的薄膜^[27], 同时将石英基底的介电常数设定为3.8, 厚度设定为1 mm。

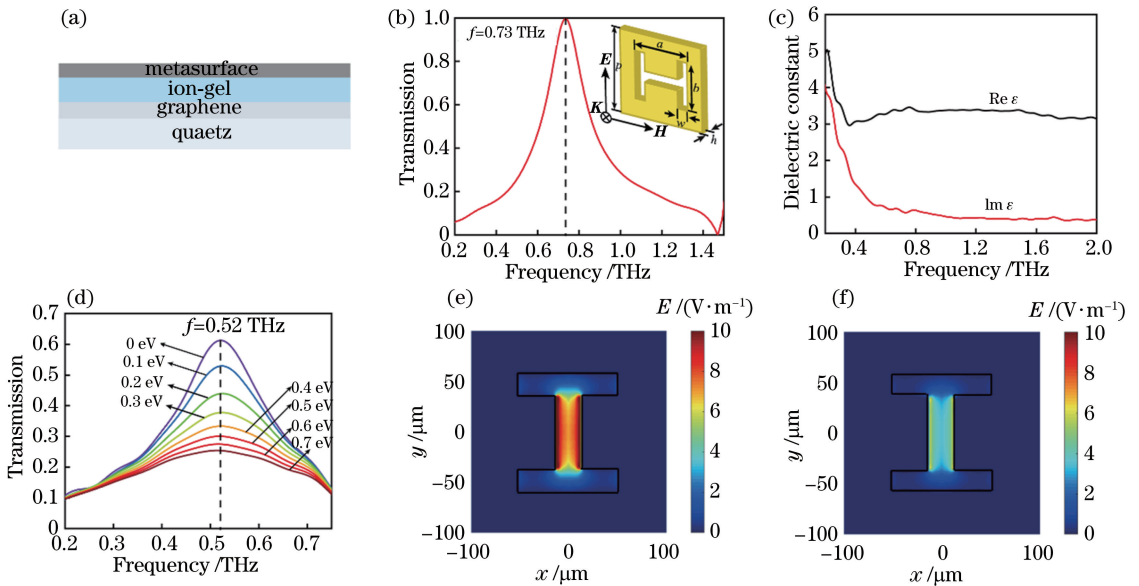


图1 仿真结果。(a)样品的结构图;(b)金属超表面的太赫兹透射谱, 插图为超表面的结构示意图;(c)离子凝胶的相对介电常数;(d)透射频谱图;(e)费米能级 $E_F=0\ \text{eV}$ 和(f) $E_F=0.5\ \text{eV}$ 下的电场分布

Fig. 1 Simulation results. (a) Structural diagram of sample; (b) terahertz transmission spectrum of metallic metasurface, and structural diagram of metasurface shown in embedded picture; (c) relative permittivity of ion-gel; (d) transmission spectra; field distributions at (e) Fermi level $E_F=0\ \text{eV}$ and (f) $E_F=0.5\ \text{eV}$

石墨烯的光电导率 $\sigma(\omega)$ 由带内跃迁 $\sigma(\omega)_{\text{intra}}$ 和带间跃迁 $\sigma(\omega)_{\text{inter}}$ 两部分共同决定, 可以表示为^[28-29]

$$\sigma(\omega) = \sigma(\omega)_{\text{intra}} + \sigma(\omega)_{\text{inter}}, \quad (1)$$

其中,

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

$$\sigma(\omega)_{\text{inter}} = i \frac{e^2}{4\pi \hbar} \ln \left[\frac{2E_F - (\omega + i\Gamma)\hbar}{2E_F + (\omega + i\Gamma)\hbar} \right], \quad (3)$$

式中: ω 为圆频率; e 为电子的电荷量; \hbar 为约化普朗克常数; Γ 为载流子散射率; T 为开尔文温度; k_B 为玻尔兹曼常量; E_F 为石墨烯的费米能级。在可见光和近红外波段, 石墨烯的光电导率主要由带间跃迁决定, 且近似为常数, 即: $\sigma(\omega) = e^2/(4\hbar)$ 。而在太赫兹波段, 带间跃迁被禁止, 石墨烯的光电导率主要由带内跃迁决定, 即 $\sigma(\omega) = \sigma(\omega)_{\text{intra}}$, 此时可以通过调制费米能级的位置对光电导率进行主动控制。选择石英作为参考, 图 1(d) 给出了不同费米能级 E_F 下复合结构的透射率仿真结果, 相比于单独金属结构的透射频谱, 该器件的谐振频率从 0.73 THz 移动到了 0.52 THz, 这是由于离子凝胶的引入改变了金属谐振结构周围的介质环境, 从而使其谐振频率向低频移动。同时也可以看出, 当石墨烯的费米能级为 0 eV 时, 复合结构的透射率约为 0.61, 小于单独金属结构的透射率, 这主要是由石墨烯自身的电导率和离子凝胶的导电性对金属超表面谐振的影响引起的。随着石墨烯费米能级逐渐增大, 复合结构的谐振频率几乎不变, 但透射率不断降低。当费米能级为 0.7 eV 时, 透射率减小到 0.25, 此时器件具有最大为 59% 的调制深度。这里将调制深度定义为 $M = |(t_{E_F=0.7 \text{ eV}} - t_{E_F=0 \text{ eV}})/t_{E_F=0 \text{ eV}}| \times 100\%$, 其中 $t_{E_F=0.7 \text{ eV}}$ 和 $t_{E_F=0 \text{ eV}}$ 分别代表费米能级在 0.7 eV 和 0 eV 时器件的透射率。为了进一步解释器件的调制机理, 对 0.52 THz 频率处金属结构的面上电场分布进行了仿真, 费米能级为 0 eV 和 0.5 eV 时的结果分别如图 1(e)~(f) 所示。可以看出, 电场始终局域在“工”字形孔结构的中心处, 并且随着石墨烯费米能级增大, 局域电场的强度明显减弱, 这是因为费米能级增大会导致石墨烯层电导率增大, 从而增强了对金属结构谐振的短接效果, 减弱了局域电场的强度, 进而降低了器件在峰值处的透射率。

除此之外, 对由不同特征尺寸超表面[与图 1

(b) 所示结构相似, 唯一不同的是参数 a 的值不同, 这里 a 分别取 100 μm 和 140 μm] 构成的调制器件的调制效果进行仿真, 结果如图 2(a) 和图 2(d) 所示, 可以看出: 通过改变金属结构的特征尺寸, 可以在保持调制深度的前提下, 实现对器件工作频率的大范围调节, 两种结构的谐振频率分别位于 0.48 THz 和 0.58 THz。进一步地, 对两种结构在其谐振频率处的电场分布进行仿真, 它们在 0 eV 和 0.5 eV 下的电场分布分别如图 2(b)、(c) 和图 2(e)、(f) 所示, 可以看出, 随着石墨烯费米能级增大, 局域电场的强度不断减弱。可见, 通过调整超表面几何结构的参数, 可以实现不同太赫兹频率处振幅的主动调制。

3 基于单层石墨烯调幅器件的制备与测量分析

3.1 样品的制备

以下将通过实验对该器件的调制效果进行验证。实验样品的结构如图 3(a) 所示, 其加工流程如下: 首先, 利用传统的光刻技术和化学方法制作了材质为镍的“工”字形孔径超表面; 接着, 采用常用的湿转移法^[30] 将尺寸为 1 cm \times 1 cm 的单层石墨烯转移到石英基底表面, 并利用银胶制作一个与石墨烯相接触的条形电极, 其中实验中所用的石墨烯是由化学气相沉淀法 (CVD) 生长得到的; 然后, 采用匀胶机将离子凝胶旋涂液均匀地旋涂于石墨烯表面 (速度为 3000 r/min), 随后在 70 $^{\circ}\text{C}$ 下烘烤 24 h, 去除凝胶中残余的丙酮溶剂, 至此, 就在石墨烯表面形成了一层均匀的离子凝胶薄膜; 之后, 利用银胶在离子凝胶上表面制作另一个条形电极, 并将已经制作好的金属结构贴于离子凝胶之上, 最终形成了基于人工超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调幅器件。其中, 旋涂液是由聚合物 P(VDF-HFP)、离子液体 ([EMIM][TFSI]) 和丙酮以 1:4:7 的质量比混合, 并在 50 $^{\circ}\text{C}$ 下搅拌 2 h 得到的。

3.2 实验测试

石墨烯的费米能级与外加偏压密切相关, 即 $|E_F| = \hbar v_F \sqrt{\pi N}$, 其中 $N = (n_0^2 + \alpha^2 |\Delta V_g|^2)^{1/2}$, $\Delta V_g = V_g - V_{\text{CNP}}$, v_F 为费米速度, N 为所有载流子的密度, n_0 为无外加偏压时的载流子密度, α 为电子电荷门电容, V_{CNP} 为石墨烯电中性点 (CNP) 处的外加偏压, V_g 为实际施加的外加偏压。所以通过外加偏压可以调节石墨烯的费米能级, 进而达到调制太赫兹波的目的。采用太赫兹时域光谱系统^[31] 对

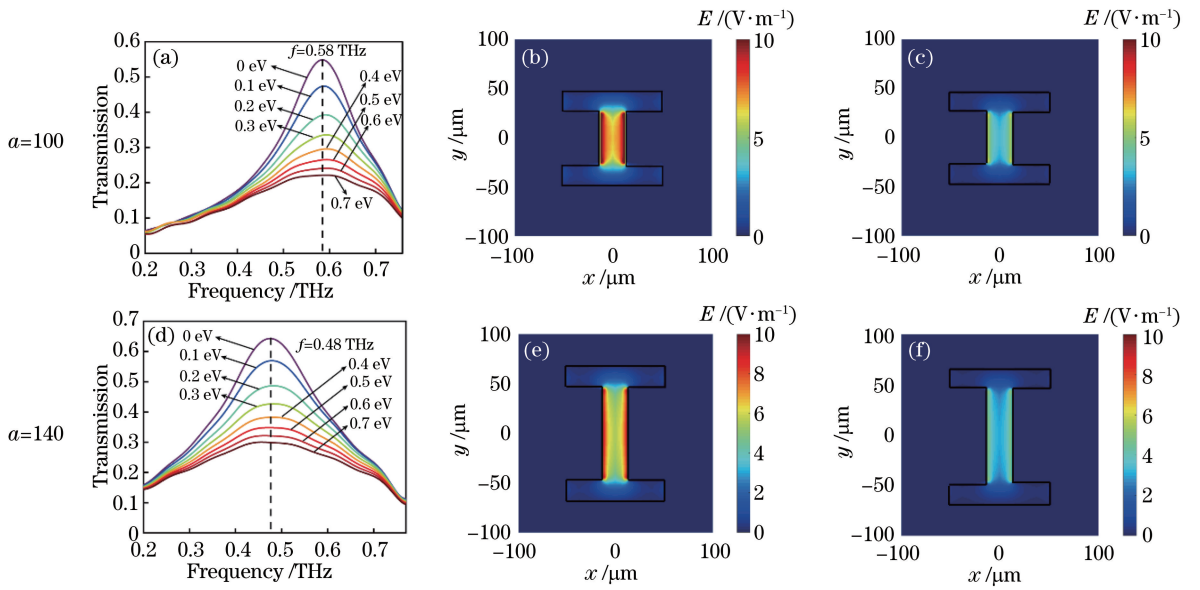


图 2 具有不同特征尺寸的超表面样品的仿真结果。(a)(d)透射频谱图；
(b)(e) $E_F=0$ eV 下的电场分布；(c)(f) $E_F=0.5$ eV 下的电场分布

Fig. 2 Simulation results of samples with different characteristic sizes of metasurfaces. (a)(d) Transmission spectra; (b)(e) electric field distributions at $E_F=0$ eV; (c)(f) electric field distributions at $E_F=0.5$ eV

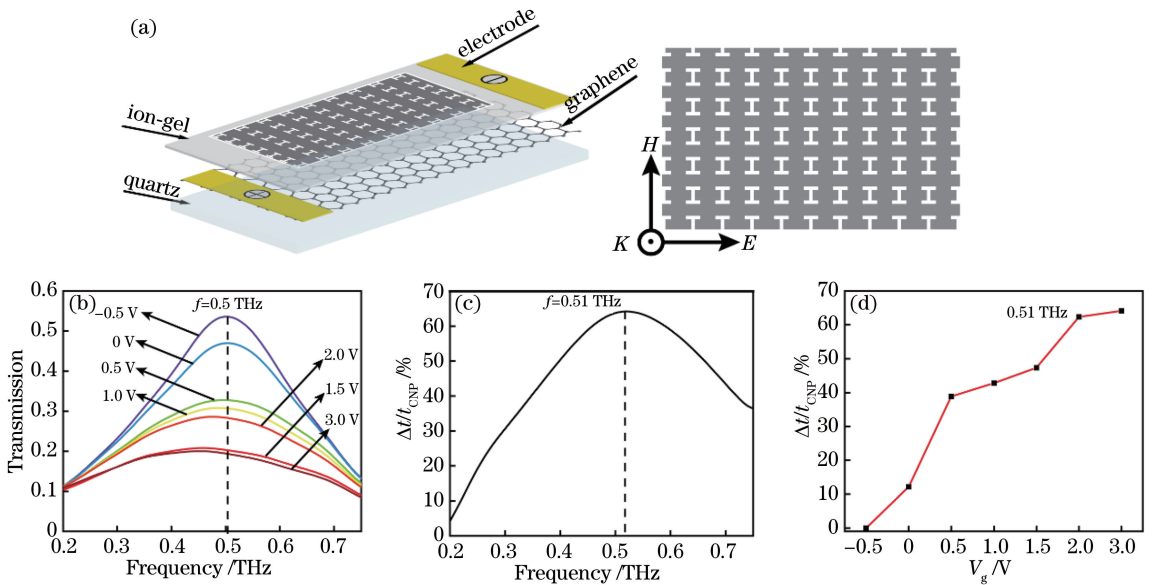


图 3 基于石墨烯/离子凝胶/超表面复合结构的太赫兹调幅器件的结构示意图和实验结果。

(a)结构示意图；(b)透射频谱图；(c)不同频率下的调制深度；(d)不同外加偏压下的调制深度

Fig. 3 Structural diagram and experimental results of terahertz amplitude modulator based on graphene/ion-gel/metamaterial hybrid structure. (a) Structural diagram; (b) transmission spectra; (c) modulation depth versus frequency; (d) modulation depth versus external bias voltage

样品在不同外加偏压下的透射率进行测量,图 3(b)所示为不同外加偏压下基于人工超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调幅器件的透射率频谱图。相比于仿真得到的谐振频率 0.52 THz,实验中得到的样品的谐振频率稍微向低频偏移,这可能是由凝胶厚度的微小差异导致的。从图 3(b)中可以

看出:在 -0.5 V 的外加偏压下,样品的透射率达到最大,说明该样品所采用的石墨烯处于弱 p 掺杂状态,并且在 -0.5 V 处达到了电中性点,这与文献 [18,32] 的结论是一致的;随着外加偏压从 -0.5 V 增大到 3.0 V,器件的谐振频率几乎保持不变,但透射幅度不断减小,这与仿真结果是一致的。为了清

晰地展示器件的调制性能,计算了 3.0 V 外加偏压下不同频率处的调制深度曲线(此时将调制深度定义

为 $M = \frac{\Delta t}{t_{\text{CNP}}} \times 100\% = \frac{|t_{V_g} - t_{\text{CNP}}|}{t_{\text{CNP}}} \times 100\%$,其中

t_{V_g} 是外加偏压为 V_g 时样品的透射系数, t_{CNP} 是电中性点处样品的透射系数),如图 3(c)所示,可以看出该调制器件在较宽的频带范围内都有良好的调制效果,并且在 0.51 THz 处的调制深度达到最大值 64%,说明在谐振频率处,石墨烯与金属结构的相互作用是最强的。此外,计算了在谐振频率 0.51 THz 处器件在不同偏压下的调制深度,如图 3(d)所示,可以看出,调制深度随着外加偏压的增大而增大,并在 3.0 V 外加偏压下达到了极值。然而,受限于离子凝胶的电化学窗口,继续增大外加偏压会有损坏

器件的危险,因此 3.0 V 是实验中所施加的最大外加偏压。

3.3 对比分析

为了深入了解调制机理,本课题组设计并制作了一个仅由单层石墨烯和离子凝胶构成的太赫兹调幅器件,其示意图如图 4(a)所示。该器件与带有金属结构的样品一样,正负电极分别加在石墨烯和离子凝胶的表面。同样,利用太赫兹时域光谱系统对该样品的透射率进行测量,图 4(b)为该样品在不同外加偏压下的透射率频谱,图 4(c)为 3.0 V 外加偏压下的调制深度曲线。相比于基于超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调幅器件而言,基于石墨烯/离子凝胶结构的太赫兹调幅器件的调制深度明显降低。

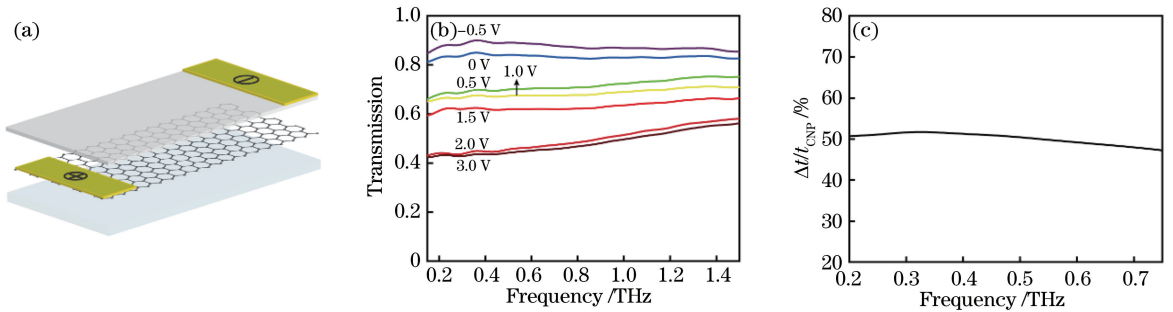


图 4 基于石墨烯/离子凝胶的太赫兹调幅器件的结构示意图和实验结果。

(a)结构示意图;(b)透射频谱;(c)不同频率下的调制深度

Fig. 4 Structural diagram and experimental results of terahertz amplitude modulator based on graphene/ion-gel.

(a) Structural diagram; (b) transmission spectra; (c) modulation depth versus frequency

综合以上实验结果可以看出,基于人工超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调幅器件可在较小的电压下实现对太赫兹波的大幅调制,这种调制效果是金属结构、石墨烯以及离子凝胶三者相互作用的结果。在外加偏压下,正负离子聚集在离子凝胶和石墨烯的界面,形成纳米级厚度的电双层(EDL)结构,并且外加偏压大部分落在电双层内,形成非常强的电场,因此只需要很小的电压,就能实现对费米能级的大幅调制^[33],进而达到了对太赫兹波调制的效果。另外,在增加了金属谐振结构后,由于离子凝胶的厚度仅为几个微米,石墨烯仍处于金属结构所局域的电场中^[34],增强了金属结构与石墨烯之间的相互作用,因此进一步提高了器件的调制深度。

4 基于双层石墨烯的太赫兹调幅器件

4.1 调制性能

为了更进一步增大器件的调制深度,在上述调

制器件的基础上,本课题组又设计并制作了由两个单层石墨烯构成的调幅器件,其结构如图 5(a)所示。在该结构中,将两个单层石墨烯分别置于金属谐振结构的两侧,并将这两个石墨烯层分别作为器件的正负电极。在有外加偏压的情况下,上下石墨烯和离子凝胶界面均形成电双层,实现一层石墨烯费米能级的上升,另一层石墨烯费米能级的下降,从而导致这两层石墨烯的电导率同时随着电压的增大而增大,再加上两层石墨烯对金属结构的谐振均具有短接的作用,因此此结构能够进一步增大对太赫兹波的调制。同样,利用太赫兹时域光谱系统对不同偏压下样品的透射谱进行了测量,结果如图 5(b)所示。需要注意的是,此时的参考为两个非接触石英片的透射谱。可以看到,此器件的谐振频率仍出现在 0.51 THz,并且在 0 V 和 3.0 V 偏压下的透射率分别为 0.60 和 0.16。为了直观地看出该器件的调制性能,计算了其在不同频率下的调制深度(此时

的调制深度定义为： $M = \frac{\Delta t}{t_{V_g=0}} \times 100\% = \frac{|t_{V_g} - t_{V_g=0}|}{t_{V_g=0}} \times 100\%$ ，其中 $t_{V_g=0}$ 是 $V_g=0$ 时样品的透射系数，如图 5(c) 所示。可以发现，该器件的最佳调制效果也出现在 0.51 THz 处，并且此处的调制深度达到了 73%，相比于单层石墨烯调制器件有了进一步提升。此外，还计算了该器件在 0.51 THz 谐振频率处不同偏压下的调制深度，如图 5(d) 所示，其变化趋势与前面提出的带有单层石墨烯的调幅器件相似。

4.2 调制速度

对图 5(a) 所示样品的调制速度进行测量，测量

装置如图 6(a) 所示。其中：VDI 用于产生中心频率为 0.51 THz 的连续太赫兹波，离轴抛物面镜 (OAPM) 将由 VDI 产生的连续太赫兹波准直聚焦于样品上；高莱盒置于样品后，用于检测透过样品的太赫兹功率；锁相放大器与高莱盒相连，用于提取太赫兹光功率的变化。在测量中，0~3 V 的方波调制电压施加于样品电极的两端，图 6(b) 展示了不同频率方波电压作用下，透过样品的归一化光功率的变化趋势，可以看出，随着施加于样品两端电压的频率从 0 Hz 增加到 30 Hz，透过样品的光功率不断下降。以 3 dB 处的点作为器件的截止频率，可以估算出该器件的调制速度约为 4.5 Hz，可以满足部分实际应用的需要。

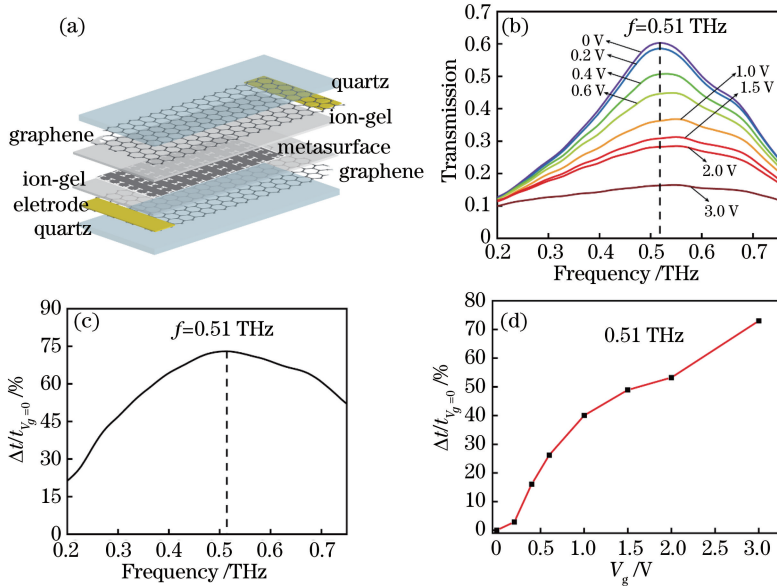


图 5 基于双层石墨烯的太赫兹调幅器件的结构示意图及实验结果。

(a) 结构示意图；(b) 透射频谱；(c) 不同频率下的调制深度；(d) 不同偏压下的调制深度

Fig. 5 Structural diagram and experimental results of terahertz amplitude modulator based on bilayer graphene.

(a) Structural diagram; (b) transmission spectra; (c) modulation depth versus frequency; (d) modulation depth versus bias voltage

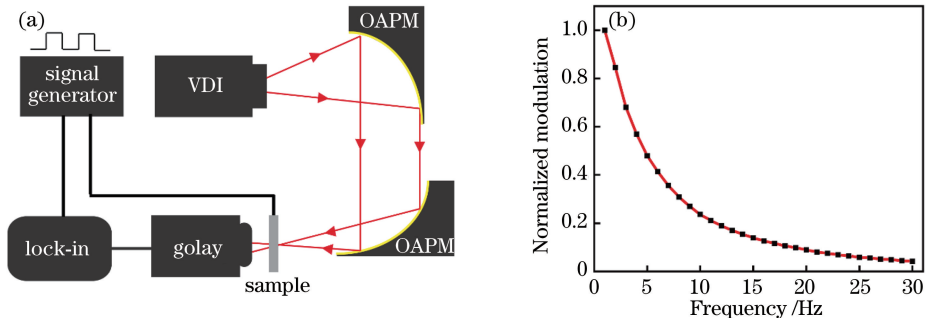


图 6 调制速度的测量。(a) 测量装置；(b) 测量结果

Fig. 6 Measurement of modulation speed. (a) Measurement setup; (b) measurement result

5 结 论

本课题组提出了基于人工超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调幅器件。在该器件中,超表面局域表面电场的能力增强了太赫兹波与石墨烯相互作用的强度,在外加偏压下,石墨烯和离子凝胶界面形成了具有纳米厚度的电双层,类似于超级电容器,可以大幅调节石墨烯的电导率,一方面使其与太赫兹波的相互作用发生变化,另一方面改变了超表面的谐振能力,最终达到调制太赫兹波幅值的效果。采用双层石墨烯的设计比单层石墨烯可以获得更好的调制效果,其在 3.0 V 外加偏压下就可以在谐振频率处实现 73% 的调制深度,并且在调制过程中的谐振频率几乎保持不变。另外,采用不同几何结构或特征尺寸的超表面可以实现不同频率处的调制功能。本课题组提出的基于超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的主动太赫兹调幅器件,在较小的外加偏压下,可以实现较大幅度的太赫兹调制,为新兴太赫兹功能器件的发展提供了一种有效途径。

参 考 文 献

[1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.

[2] Zhang X C, Xu J Z. Introduction to THz wave photonics[M]. Boston, MA: Springer: 2010.

[3] Seifert T, Jaiswal S, Martens U, *et al.* Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(7): 483-488.

[4] Zheludev N I. The road ahead for metamaterials[J]. *Science*, 2010, 328(5978): 582-583.

[5] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.

[6] Glybovski S B, Tretyakov S A, Belov P A, *et al.* Metasurfaces: from microwaves to visible [J]. *Physics Reports*, 2016, 634: 1-72.

[7] Li Q, Zhang X Q, Cao W, *et al.* An approach for mechanically tunable, dynamic terahertz bandstop filters[J]. *Applied Physics A*, 2012, 107(2): 285-291.

[8] Chen M, Fan F, Yang L, *et al.* Mechanically tunable terahertz plasmonic waveguide filter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0411001.
陈猛, 范飞, 杨磊, 等. 机械可调谐太赫兹等离子体波导滤波器[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0411001.

[9] Zhang X Q, Xu N N, Qu K N, *et al.* Electromagnetically induced absorption in a three-

resonator metasurface system[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10737.

[10] Li Q, Tian Z, Zhang X Q, *et al.* Active graphene-silicon hybrid diode for terahertz waves[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7082.

[11] Cong L Q, Xu N N, Zhang W L, *et al.* Polarization control in terahertz metasurfaces with the lowest order rotational symmetry [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(9): 1176-1183.

[12] Zhang H F, Kang M, Zhang X Q, *et al.* Coherent control of optical spin-to-orbital angular momentum conversion in metasurface[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(6): 1604252.

[13] Geim A K. Graphene: status and prospects [J]. *Science*, 2009, 324(5934): 1530-1534.

[14] Kampfrath T, Perfetti L, Schapper F, *et al.* Strongly coupled optical phonons in the ultrafast dynamics of the electronic energy and current relaxation in graphite[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(18): 187403.

[15] 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.

[16] Kuzmenko A B, van Heumen E, Carbone F, *et al.* Universal optical conductance of graphite [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(11): 117401.

[17] Ishigami M, Chen J H, Cullen W G, *et al.* Atomic structure of graphene on SiO₂ [J]. *Nano Letters*, 2007, 7(6): 1643-1648.

[18] Sensale-Rodriguez B, Yan R S, Kelly M M, *et al.* Broadband graphene terahertz modulators enabled by intraband transitions [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 780.

[19] Guo T J, Argyropoulos C. Broadband polarizers based on graphene metasurfaces[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(23): 5592-5595.

[20] Andryieuski A, Lavrinenko A V. Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: effective surface conductivity approach [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 9144-9155.

[21] Amin M, Farhat M, Bağcı H. An ultra-broadband multilayered graphene absorber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29938-29948.

[22] Min Woo J, Kim M S, Woong Kim H, *et al.* Graphene based salisbury screen for terahertz absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(8): 081106.

[23] Li Q, Tian Z, Zhang X Q, *et al.* Dual control of active graphene-silicon hybrid metamaterial devices [J]. *Carbon*, 2015, 90: 146-153.

[24] Gao H, Yan F P, Tan S Y, *et al.* Design of ultra-

- thin broadband terahertz metamaterial absorber based on patterned graphene[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0703024.
- 高红, 延凤平, 谭思宇, 等. 基于有图案石墨烯的超薄宽带太赫兹超材料吸收体的设计[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0703024.
- [25] Kim T T, Oh S S, Kim H D, *et al.* Electrical access to critical coupling of circularly polarized waves in graphene chiral metamaterials[J]. Science Advances, 2017, 3(9): e1701377.
- [26] Liu W G, Hu B, Huang Z D, *et al.* Graphene-enabled electrically controlled terahertz meta-lens[J]. Photonics Research, 2018, 6(7): 703-708.
- [27] Luxmoore I J, Gan C H, Liu P Q, *et al.* Strong coupling in the far-infrared between graphene plasmons and the surface optical phonons of silicon dioxide[J]. ACS Photonics, 2014, 1(11): 1151-1155.
- [28] Gusynin V P, Sharapov S G, Carbotte J P. Magneto-optical conductivity in graphene [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2007, 19(2): 026222.
- [29] Chen P Y, Alù A. Atomically thin surface cloak using graphene monolayers[J]. ACS Nano, 2011, 5(7): 5855-5863.
- [30] Deokar G, Avila J, Razado-Colambo I, *et al.* Towards high quality CVD graphene growth and transfer[J]. Carbon, 2015, 89: 82-92.
- [31] Grischkowsky D, Keiding S, van Exter M, *et al.* Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1990, 7(10): 2006-2015.
- [32] Wu Y, La-O-vorakiat C, Qiu X P, *et al.* Graphene terahertz modulators by ionic liquid gating [J]. Advanced Materials, 2015, 27(11): 1874-1879.
- [33] Lee K H, Kang M S, Zhang S P, *et al.* “cut and stick” rubbery ion gels as high capacitance gate dielectrics[J]. Advanced Materials, 2012, 24(32): 4457-4462.
- [34] Yan R S, Arezoomandan S, Sensale-Rodriguez B, *et al.* Exceptional terahertz wave modulation in graphene enhanced by frequency selective surfaces [J]. ACS Photonics, 2016, 3(3): 315-323.