文章编号：2095-4980(2023)08-0965-07

石墨烯动态调控太赫兹表面等离激元

张葆青，冯明明，张翼飞*，宋爱民
(山东大学 微电子学院，山东 济南 250100)

摘　要：太赫兹表面等离激元(SPPs)是利用亚波长周期性结构在太赫兹频段模拟的具有与可见光频段表面等离激元相似的光学特性的电磁波，分为传输型和局域型2种。本文将石墨烯引入太赫兹表面等离激元结构作为动态激励源，通过外加偏压改变石墨烯的电导率，分别实现了对传输型表面等离激元的幅度、频率、相位和对局域表面等离激元共振强度的动态调控。本文方法为表面等离激元的动态调控提供了新的思路，拓宽了表面等离激元在太赫兹频段的应用。

关键词：表面等离激元；太赫兹；石墨烯；动态调控
中图分类号：TN29；O441.4　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA2022163

Active modulation of terahertz Surface Plasmons Polaritons with graphene

ZHANG Baoqing，FENG Mingming，ZHANG Yifei*，SONG Aimin
(School of Microelectronics，Shandong University，Jinan Shandong 250100，China)

Abstract：Terahertz(THz) Surface Plasmons Polaritons(SPPs) can mimic optical Surface Plasmons (SPs) and obtain similar optical properties with periodic sub-wavelength structures, which typically consist of propagating SPPs and Localized Surface Plasmons(LSPs). In this work, graphene is utilized as the active stimuli to dynamically control the amplitude, frequency, and phase of SPPs and reconfigure the resonant modes of LSPs at various bias voltages. Such design provides new solutions for active control of SPPs and LSPs at THz frequencies.

Keywords：Surface Plasmons Polaritons；terahertz；graphene；active modulation

表面等离激元(SPPs)是金属和介质交界面上的自由电荷集体振荡形成的一种电磁表面波，具有局域电场增强和突破光学衍射极限的特点，在生物传感、超分辨力成像、高效光伏等领域应用广泛[1]。根据传播特性的不同，SPPs分为在金属和介质交界面上传输的传输型表面等离激元和在金属纳米颗粒附近的局域表面等离激元。传统的表面等离激元存在于可见光和红外频段，在这个频段，贵金属表现出表面等离子体特性需要的负介电常数。在太赫兹频段，贵金属通常被当作理想导体，具有亚波长周期单元的结构化金属可以模拟具有类似非衍射极限和局域电场增强特性的表面等离激元，即太赫兹表面等离激元[2]。这种人工设计的表面等离激元表现出强共振、弱耦合、易设计和易集成等特点，使表面等离激元在太赫兹应用中表现突出，如6 G通信、相控阵天线等[3]。

作为无源器件，金属表面等离激元结构通常在设计后便具有固定的光学特性。如想改变其光学特性，则需重新设计器件结构，这限制了太赫兹表面等离激元的应用。但将太赫兹表面等离激元结构与动态激励相结合，其固定的光学特性可被动态调控，应用更广泛。对于传输型表面等离激元结构，已有的动态激励包括二极管、铁电材料钛酸锶钡(BST)、相变材料VO_2等，可以实现对表面等离激元幅度、频率等的动态调控[4-6]；对于局域表面等离激元，相变材料VO_2、掺锡氧化铟(ITO)等半导体薄膜以及微系统等已被用于动态调控其共振强度[7-9]。石墨烯作为一种二维材料，其厚度仅为单个碳原子层厚，具有高电子迁移率、良好的光学透明、优良的导热性和电导率，外加电场可调等特性，是电磁调控的优良候选材料。目前，石墨烯对表面等离激元的调控主要包括对传输型表面等离激元的宽带调幅和对局域表面等离激元整体共振的动态调制[10-11]，尚未有对表面等离激元的相位和双各向异性调制的相关报道。

收稿日期：2022-06-08；**修回日期：**2022-10-25
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2022YFA1405200)；山东省重点研发计划资助项目(2019JZZY020109)
***通信作者：**张翼飞　email:yifeizhang@sdu.edu.cn

本文利用石墨烯对传输型太赫兹表面等离激元结构的幅度、频率以及显著的相位进行调制，并对局域表面等离激元结构共振强度的双各向异性进行调制。通过将石墨烯引入太赫兹表面等离激元结构作为动态激励，利用离子液体顶栅电调控的方式主动改变石墨烯的电导率，在 1.2 V 的低外加电压下实现对太赫兹表面等离激元较大范围的动态调控。

1 石墨烯动态调控传输型表面等离激元

带有亚波长周期性凹槽的金属线可以传输太赫兹表面等离激元，其色散特性[12]为：

$$\beta=\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{eff}}k_0^2+\left(a/p\right)^2\varepsilon_{\mathrm{eff}}k_0^2\tan^2\left(k_0\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{eff}}}\,h\right)} \tag{1}$$

式中：$\varepsilon_{\mathrm{eff}}$ 为金属凹槽的有效介电常数；k_0 为光在自由空间的波矢；a 为凹槽的宽度；p 为周期性单元的周期；h 为凹槽的槽深。可以看出，太赫兹表面等离激元是色散的，其色散曲线在其截止频率处变水平，其截止频率为：

$$\omega_{\mathrm{p}}=\pi c_0/2\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{eff}}}\,h \tag{2}$$

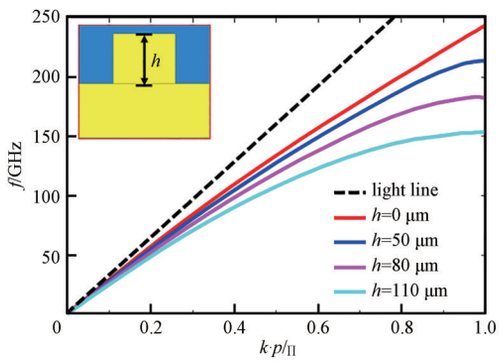


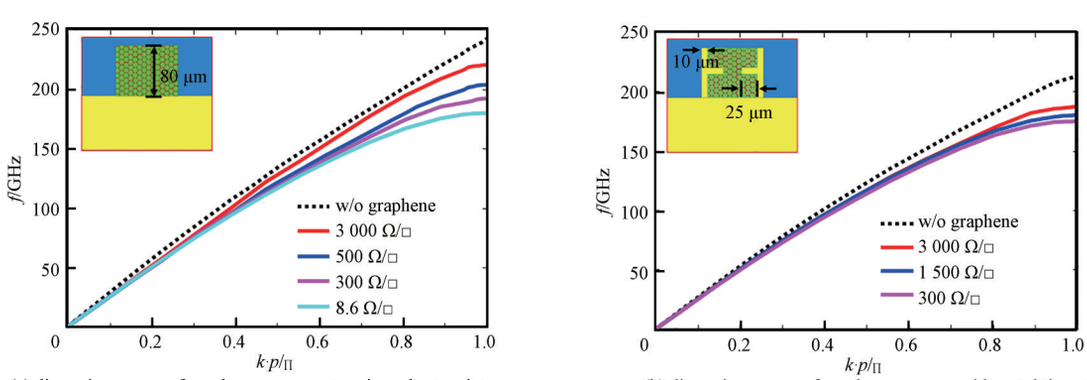
Fig.1 Dispersion curves of metal grooves with various depths
图 1 金属凹槽在不同槽深下的色散关系

式中 c_0 为自由空间光速。可以看出，改变槽深 h，可以改变太赫兹表面等离激元的截止频率及其色散特性，如图 1 所示。

为动态改变槽深，本文用石墨烯凹槽代替传统金属线上的金属凹槽，石墨烯凹槽随石墨烯电导率变化的色散曲线如图 2(a)所示。石墨烯凹槽的有效槽深可以用波沿石墨烯传输的衰减长度 ζ 来衡量，其关系式为：

$$\zeta=-\frac{\left|\sigma_{\mathrm{g}}\right|^2}{2\omega\varepsilon_{\mathrm{d}}\sigma_{\mathrm{g}}^{''}},\ \sigma_{\mathrm{g}}^{''}<0 \tag{3}$$

式中：ω 为角频率；ε_{d} 为周围介质的相对介电常数；$\sigma_{\mathrm{g}}^{''}$ 为石墨烯电导率 σ_{g} 的虚部。可以看到，石墨烯凹槽的有效深度随石墨烯电导率的增加而增大。由于金属线仅有一端与石墨烯相连，难以给整个石墨烯凹槽施加均匀电场，为使石墨烯有均匀的电导率，本文在金属线上设计了周期性的偏置尖端，如图 2(b)所示。



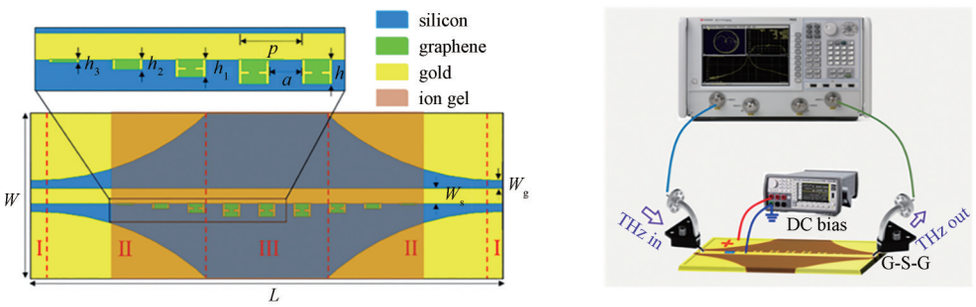
(a) dispersion curves of graphene grooves at various sheet resistances for graphene

(b) dispersion curves of graphene grooves with metal tips at various sheet resistances for graphene

Fig.2 Dispersion curves of graphene grooves
图 2 石墨烯凹槽的色散关系

根据上述分析，本文设计了动态金属–石墨烯混合表面等离激元结构，如图 3(a)所示。整个器件被设计在 200 μm 厚的高阻硅衬底上，由 3 部分组成：50Ω 的共面波导(Ⅰ)；共面波导转表面等离激元的转换(Ⅱ)；带有周期性石墨烯凹槽和偏置尖端的金属线(Ⅲ)。测试设备及接线方式如图 3(b)所示。其中金属结构的制备采用标准的紫外光刻–蒸镀–剥离流程，为避免趋肤效应，使用电子束蒸发蒸镀的金属为 200 nm 金。为给石墨烯施加偏压，在器件表面添加了一层离子液体苯乙烯磺酸钠盐，与共面波导的射频地电极和信号电极组成用于栅控石墨烯的电双层电容器结构。通过标准微纳加工工艺制备了器件，并通过矢量网络分析仪表征了其传输特性，图 4 给出了器件在不同电压下的 S 参数和相位变化结果。由图 4 可以看出，在 140~177 GHz 处，混合结构的传输特性随外加偏

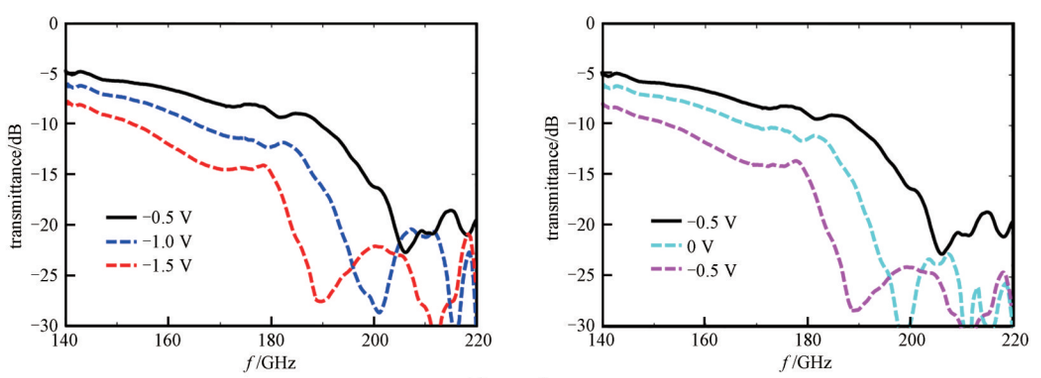
压的降低，损耗呈现降低的趋势，如，在 170 GHz 处，传输特性在外加偏压为−1.5 V、−1.0 V、−0.5 V 时的损耗分别为−7.75 dB、−10.84 dB 和−14.62 dB。在外加电压仅改变 0.5 V 的情况下，实现了大于 3 dB 的可调幅度，且截止频率可以从 177 GHz 变化至 200 GHz。从图 4(c)中还可以看到，混合结构的相位随栅压有较大改变。在外加电压从−0.5 V 变化至 0.5 V 时，在 195 GHz 处有 112°的相位变化。



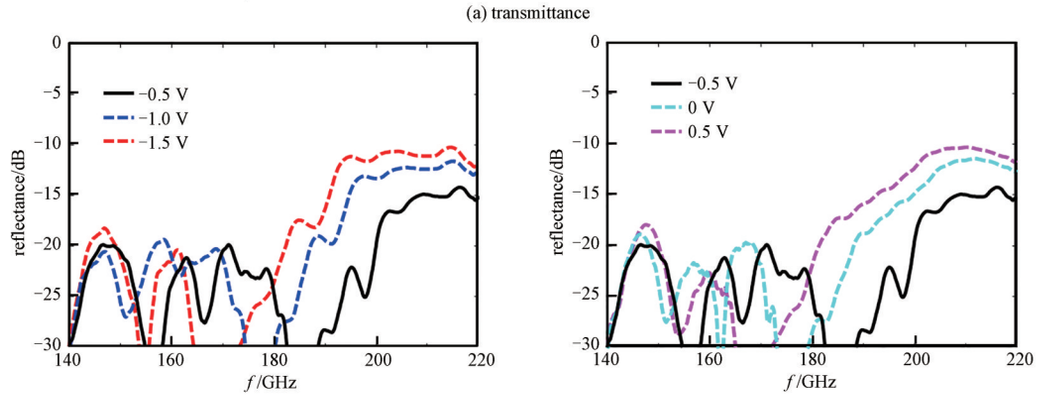
(a) active modulation metal-graphene hybrid structure　　(b) measurement system

Fig.3 Schematic of active modulation metal−graphene hybrid structure and the measurement system

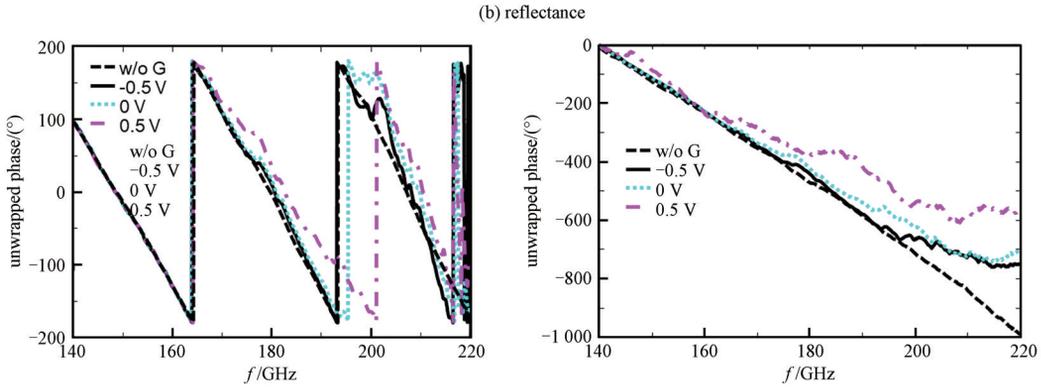
图3 动态金属−石墨烯混合结构及其测量系统示意图



(a) transmittance



(b) reflectance



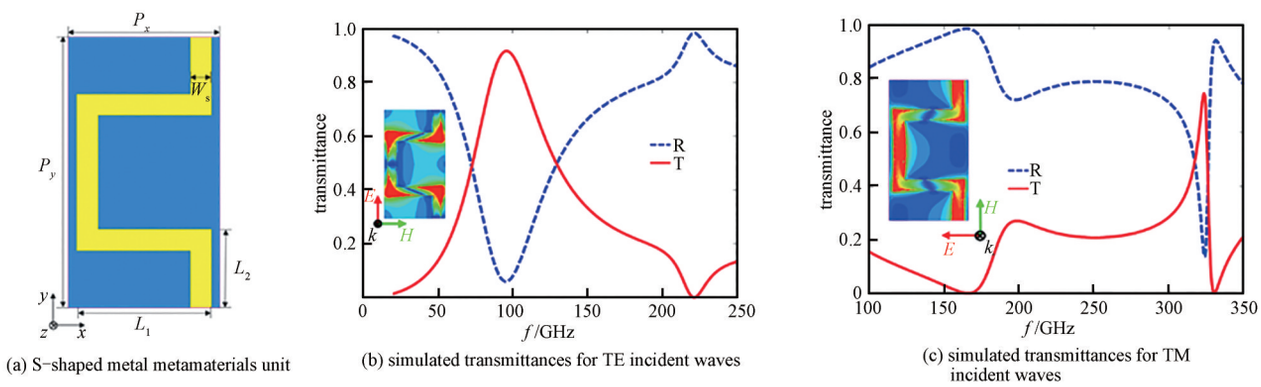
(c) unwrapped phase

Fig.4 Measurement results of active modulation metal−graphene hybrid structure

图4 动态金属−石墨烯混合结构的测量结果

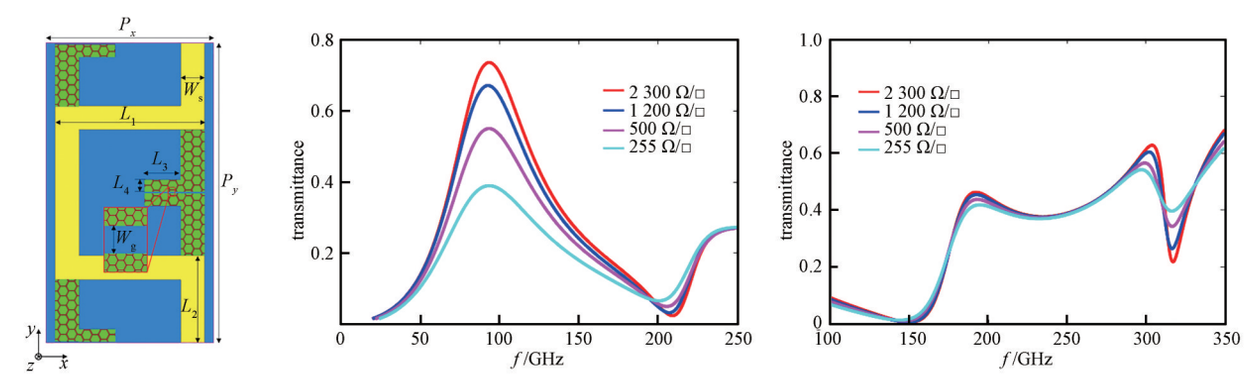
2 石墨烯对局域表面等离激元的双各向异性调控

首先，设计S型金属线超材料，并仿真其TE和TM入射下的透射参数和电场分布，如图5所示。TE入射时，特征峰出现在103 GHz处，TM入射时，特征峰出现在195 GHz和320 GHz处。根据仿真电场，可以发现TE和TM入射下的电场都集中在S型金属栅中，是一种金属栅模式的电场。然后，将对称的L型石墨烯对作为动态激励引入S型金属栅中，如图6(a)所示，其中石墨烯对关于TE入射电场对称，关于TM入射电场不对称。为动态调控石墨烯电导率，仿真中加入了一层离子液体，然后对整个结构进行仿真，如图6(b)~(c)所示。由于石墨烯电导率的影响，TM波320 GHz的特征峰发生红移，谐振强度减小。当石墨烯电导率降低，TE入射时，100 GHz处的透射从0.73减少至0.38；TM入射时，190 GHz处谐振峰强度从0.46降低至0.415，295 GHz处谐振峰强度从0.62降低至0.5。混合结构对TE入射和TM入射的调制深度表现出明显差异，TE入射对石墨烯电导率的变化响应敏感，而TM入射波不敏感，这体现出混合超材料的双各向异性调控。



(a) S-shaped metal metamaterials unit (b) simulated transmittances for TE incident waves (c) simulated transmittances for TM incident waves

Fig.5 S-shaped metal MTMs and simulation results
图5 S型金属栅超结构及其仿真

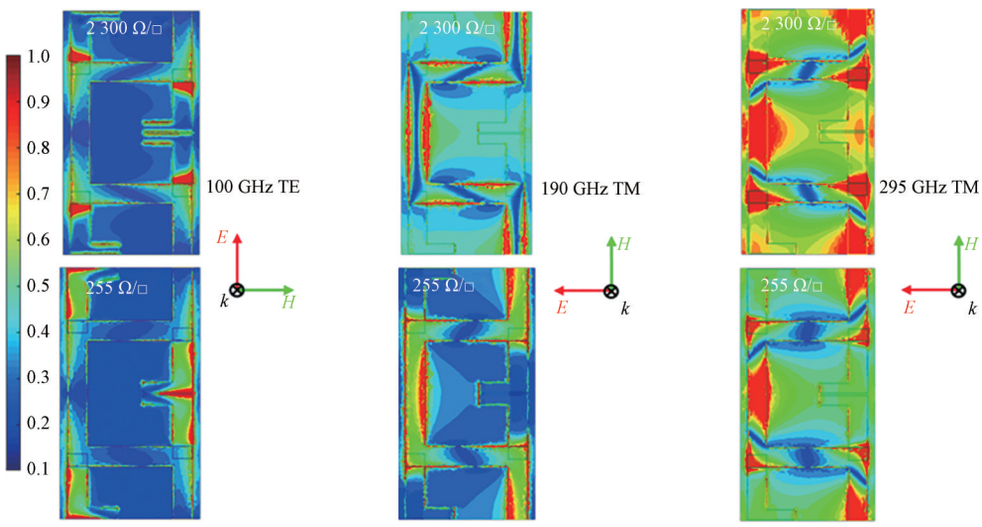


(a) hybrid metal-graphene MTMs unit (b) simulated transmittances of MTMs with graphene strip pairs at various graphene sheet resistances for TE incident waves (c) simulated transmittances of MTMs with graphene strip pairs at various graphene sheet resistance for TM incident waves

Fig.6 Schematic of hybrid metal-graphene MTMs unit and the simulation results
图6 金属-石墨烯混合超材料单元的结构示意图及动态调控仿真结果

为解释这种双各向异性调控，给出了石墨烯最大和最小电导率处，混合超材料在TE入射下100 GHz处、TM入射下190 GHz和295 GHz处3个透射峰处的电场分布，如图7所示。可以看到，由于对称的L型石墨烯对的存在，电场分布由无源结构时的金属栅电场和金属栅与石墨烯对之间的表面等离激元电场组成。TE入射在混合超材料激发表面等离激元偶极子模式电场，随石墨烯电导率的增加而显著增强，并削弱了金属栅模式的电场。因此，改变石墨烯的电导率显示出对TE入射波传输的明显调制。TM入射在混合超材料激发表面等离激元奇模电场，比金属栅模式电场的主导性要小，随着石墨烯电导率的增加，电场被更加局限在金属栅中。这种奇模电场被轻微抑制，因此调制效果很小。

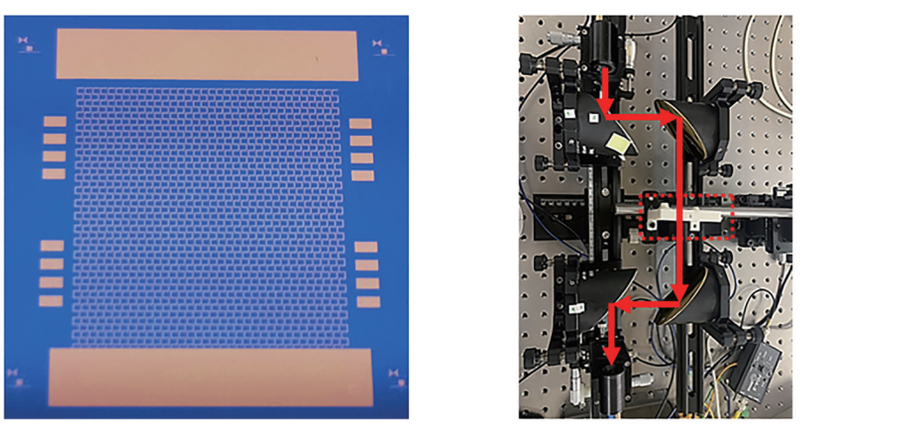
根据仿真分析，使用微纳加工制作了金属-石墨烯混合超材料，所采用的工艺与动态金属-石墨混合表面等离激元结构相同。在金属图案定义后，采用湿法转移技术获得单层石墨烯，并利用光刻及等离子体刻蚀技术除去多余的石墨烯，仅在指定区域保留L型石墨烯图案。使用太赫兹频谱仪对其透射特性进行表征，测量光路如图8所示。



(a) TE incident waves, 100 GHz　(b) TM incident waves, 190 GHz　(c) TM incident waves, 295 GHz

Fig.7 Simulation results of electric field distributions of the hybrid MTMs

图 7　金属–石墨烯混合超材料单元电场分布的仿真结果



(a) fabricated hybrid MTMs　(b) schematic of the signal path for the transmittance measurement

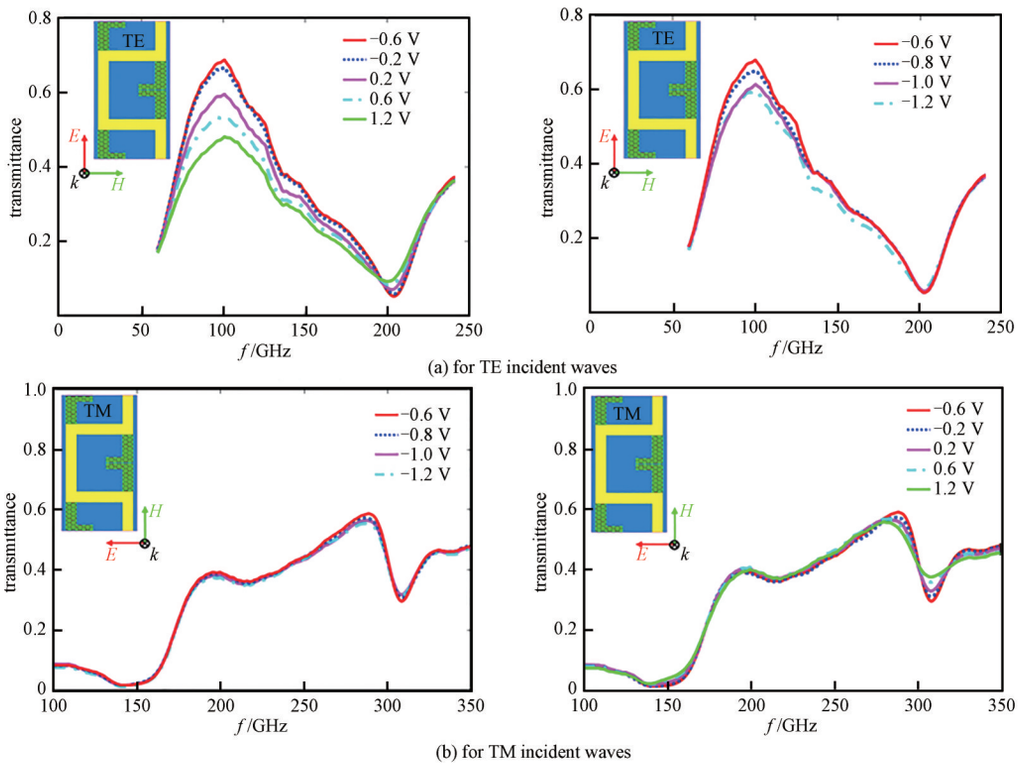
Fig.8 Fabricated MTMs and illustration of the measurement system

图 8　实物及测量系统

测量结果如图 9 所示。可以发现，在外加电压改变 1.2 V 的情况下，TE 入射时，混合超材料在 100 GHz 处透射率的变化范围为 0.47~0.7；TM 入射时，混合超材料在 195 GHz 处透射率的变化范围为 0.38~0.39；289 GHz 处为 0.52~0.57。混合超材料的极化调制比为 23 和 5.6，说明此金属–石墨烯混合超材料具有主动控制不对称传输和双各向异性的良好潜力。由于实验中石墨烯的均匀性不如仿真模型，因此在 TM 入射时，295 GHz 处的透射峰有所减弱，调制能力有所下降。

3　结论

本文提出在太赫兹波段利用石墨烯对传输型和局域型 SPPs 的动态调控。通过采用石墨烯凹槽代替金属传输线上的金属凹槽，在 0.5 V 的外加电压下，实现了 THz SPPs 在 140~177 GHz 处大于 3 dB 的可调幅度、177~200 GHz 的可调截止频率和 195 GHz 处 112°的可调相位。通过将石墨烯与 S 型金属栅超材料相结合，在 1.2 V 的外加电压下，由于局域表面等离激元奇模和偶模对石墨烯电导率变化不一致，实现 S 型金属栅超材料 23 和 5.6 的极化调制比，表现出良好的双各向异性。本文提出的动态结构拓宽了表面等离激元在太赫兹动态器件领域的应用。



(a) for TE incident waves

(b) for TM incident waves

Fig.9 Measured transmittances of hybird MTMs with graphene strip pairs at various bias voltages

图9 混合超材料在不同外加电压下透射率的测试结果

参考文献：

[1] BARNES W L,DEREUX A,EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. Nature, 2003,424(6950):824–830.

[2] PENDRY J B,MARTÍN–MORENO L,GARCIA–VIDAL F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces[J]. Science, 2004(305):847–848.

[3] ZHANG Xueqian,XU Quan,XIA Lingbo,et al. Terahertz surface plasmonic waves:a review[J]. Advanced Photonics, 2020,2(1): 2–20.

[4] XU Jie, ZHANG Haochi, TANG Wenxuan, et al. Transmission–spectrum–controllable spoof surface plasmon polaritons using tunable metamaterial particles[J]. Applied Physics Letters, 2016,108(19):191906.

[5] ZHANG Yifei,LING Haotian,CHEN Pingjian,et al. Tunable surface plasmon polaritons with monolithic Schottky diodes[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2019,1(10):2124–2129.

[6] LOU Jing,WANG Jun,MA Hua,et al. Tunable spoof surface plasmon polariton transmission line based on ferroelectric thick film[J]. Applied Physics A, 2019,125(10):737.

[7] KIM S J. Diffractive VO_2 metagrating for strong multi–objective amplitude modulation of optical reflection[J]. Applied Optics, 2021,60(9):2483–2487.

[8] HO C P, PITCHAPPA P, LIN Yusheng, et al. Electrothermally actuated microelectromechanical systems based omega–ring terahertz metamaterial with polarization dependent characteristics[J]. Applied Physics Letters, 2014,104(16):161104.

[9] KIM S J, FAN Pengyu, KANG Juhyung, et al. Creating semiconductor metafilms with designer absorption spectra[J]. Nature Communications, 2015,6(7):7591.

[10] LIN Han, STURMBERG B C P, LIN Kengte, et al. A 90 nm thick graphene metamaterial for strong and extremely broadband absorption of unpolarized light[J]. Nature Photonics, 2019,13(4):270–276.

[11] TANG Wenxuan,ZHANG Haochi,MA Huifeng,et al. Concept,theory,design,and applications of spoof surface plasmon polaritons at microwave frequencies[J]. Advanced Optical Materials, 2018,7(1):1800421–1–22.

[12] LIU Xiaoyong,FENG Yijun,ZHU Bo,et al. High–order modes of spoof surface plasmonic wave transmission on thin metal film structure[J]. Optics Express, 2013,21(25):31155–31165.

（下转第976页）