

# 利用石墨烯-金属复合结构实现 太赫兹电磁诱导透明超表面主动调控

李 泉<sup>1</sup>, 刘姗姗<sup>1</sup>, 路光达<sup>2</sup>, 王 爽<sup>1</sup>

(1. 天津职业技术师范大学 电子工程学院, 天津 300222;  
2. 天津职业技术师范大学 天津市信息传感与智能控制重点实验室, 天津 300222)

**摘 要:** 近年来,在超表面中实现对电磁诱导透明的主动式调控引起了越来越多的研究兴趣。采用石墨烯-金属复合结构,设计并研制了一种新颖的调制策略,通过同时施加光泵和偏置电压改变石墨烯的电导率,在太赫兹波段实现了一种主动式电磁诱导透明超表面,其在透射窗口频率处的振幅调制深度可达 73%。模拟和理论分析表明,其内在物理机理在于石墨烯对金属谐振结构的短接作用,石墨烯的电导率越大,短接效果越明显,谐振强度也越弱。该石墨烯-金属复合超表面为设计紧凑的主动式太赫兹光开关器件提供了一种实现途径,在太赫兹通信中具有潜在的应用前景。

**关键词:** 主动调控; 电磁诱导透明; 石墨烯; 超表面; 太赫兹

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210246

## Active control of terahertz electromagnetically induced transparency metasurface using a graphene-metal hybrid structure

Li Quan<sup>1</sup>, Liu Shanshan<sup>1</sup>, Lu Guangda<sup>2</sup>, Wang Shuang<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Information Sensing and Intelligent Control,  
Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** In recent years, achieving active control over the electromagnetically induced transparency (EIT) effect in metasurfaces has attracted grown interests. A novel modulation strategy was designed and fabricated based on a graphene-metal hybrid structure. An active EIT metasurface was realized in the terahertz (THz) regime by simultaneously applying optical pump and bias voltage, where the amplitude modulation depth at the transparency window frequency reached 73%. The simulation and theoretical analysis indicate that the inner physical mechanism lies in the shorting effect of the graphene to the metal resonant structure. The higher the conductivity of graphene is, the stronger the shorting effect is, and the weaker the resonance strength becomes. The proposed graphene-metal hybrid metasurface provides an alternative way towards designing compact active terahertz switching devices, and has potential in terahertz communication applications.

**Key words:** active control; electromagnetically induced transparency; graphene; metasurface; terahertz

收稿日期:2021-04-17; 修订日期:2021-04-27

基金项目:国家自然科学基金(61705167);天津市科技支撑计划重点项目(20YFZCSY00600);天津市高校中青年骨干创新人才培养计划(2020-04)

作者简介:李泉,女,讲师,博士,主要研究方向为基于石墨烯、超材料的太赫兹功能器件。

## 0 引言

电磁诱导透明 (Electromagnetically induced transparency, EIT) 本是一种发生在三能级原子系统中的量子干涉效应, 它可以有效地控制材料的透射特性, 使其从对光的高吸收变为高透明<sup>[1]</sup>。此外, 伴随着 EIT 效应的产生, 材料的原始色散特性也被极大改变, 可用于实现慢光、光存储和非线性效应增强。然而, 实现原子系统中的 EIT 效应通常需要极端的实验条件, 包括低温、高稳定性激光、特殊的工作材料等, 严重地阻碍了该效应的实际应用。超表面的提出和发展为解决该问题提供了有效途径<sup>[2-3]</sup>。为了灵活地运用 EIT 效应, 近年来, 研究人员提出了一种经典的基于超表面的类比实现方法, 即利用特殊设计的相互耦合的明模和暗模谐振型“人工原子”来实现 EIT, 通过控制模式间的近场耦合和谐振损耗来调控 EIT 效应的强弱, 即 EIT 超表面。目前, 已有许多相关工作在多个频段实现了这种 EIT 效应<sup>[4-7]</sup>, 所采用的人工原子类型也多种多样, 如切割线-开口谐振环 (Splitting ring resonator, SRR) 组合结构<sup>[4]</sup>、鱼鳞结构<sup>[5]</sup>、Fano 结构<sup>[6]</sup>等, 实现了光开关、慢光调控、偏振调控、表面等离子体激发、非线性增强等多种新颖的调控功能, 为相关集成化器件的发展开辟了道路。

然而, 先前的大多数研究中, 所设计的 EIT 超表面功能大多是被动的, 若要获得不同的 EIT 强度, 只能通过调整其构成结构的内在配置来实现, 如耦合距离等, 这在很多情况下不利于实际应用。若能在一种 EIT 超表面中获得主动可控的 EIT 调控功能, 从而实现透射振幅和群延时可调的器件, 将极大促进相关器件的实用化。其中一个有效的方案便是将超表面与功能材料集成在一起, 利用功能材料在外加激励下光学性质的变化来调控 EIT 超表面的谐振, 从而控制其强弱。这些功能材料包括非线性介质、光敏介质、电活性半导体材料、热调谐材料等<sup>[8-15]</sup>。另外, 由单层碳原子结构组成的石墨烯由于其出色的电学和光学特性, 也可用于实现相关调控。石墨烯最吸引人的地方是它的费米能级可通过化学、光学和电学掺杂等方式来调节, 其过程中伴随的光电导率变化非常适合用来实现主动式超表面器件。同时, 由于石墨烯中载流子的弛豫时间在皮秒量级, 基于石墨烯的调制器通常

具有更高的调制速度, 为实时调控器件的设计铺平了道路。

文中提出了一种新颖的主动式 EIT 超表面, 该超表面由单层石墨烯和以硅为基底的 EIT 金属结构复合构成, 即石墨烯-金属复合结构超表面, 其中的 EIT 金属结构采用经典的切割线谐振器 (Cut-wire resonator, CWR) 和双 U 谐振器 (Double-U-shape resonator, DUR) 组成。主动调控是通过同时给该复合超表面施加连续光泵和偏置电压来实现的。实验结果表明, EIT 的强度可在一定光泵功率下通过调节偏置电压来灵活调节, 这归因于外加激励导致的石墨烯电导率的变化调制了谐振结构的损耗大小。该主动式石墨烯-金属复合结构 EIT 超表面调控方法可在未来相关光子器件的设计中发挥重要作用。

## 1 主动式 EIT 超表面设计

图 1(a) 示意了设计的石墨烯-金属复合 EIT 超表面器件的单元结构。其中金属结构由 CWR 和 DUR

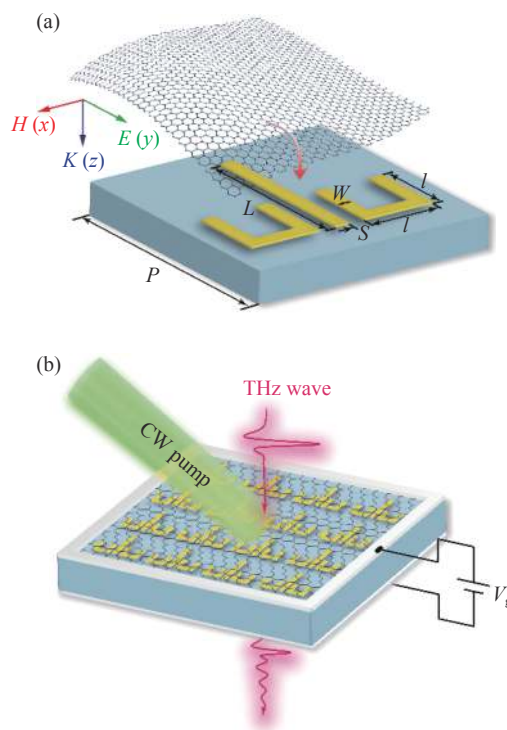


图 1 (a) 主动式 EIT 超表面结构单元示意图; (b) 主动调控方式示意图, CW: 连续光,  $V_g$ : 偏置电压

Fig.1 (a) Schematic of the unit cell of the proposed active EIT metasurface; (b) Schematic of the active control manner, CW: continuous wave,  $V_g$ : bias voltage

组成,它们均由 200 nm 厚的铝制成,基底为硅 (n 型), DUR 中的两个 U 形谐振器对称地放置在 CWR 的左侧和右侧。相应的结构几何参数分别为: CWR 长度  $L=69 \mu\text{m}$ , U 形谐振器臂长和底长  $l=30 \mu\text{m}$ , 结构线宽  $W=6 \mu\text{m}$ , CWR 和 DUR 间距  $S=7 \mu\text{m}$ , 周期  $P=100 \mu\text{m}$ 。

当金属结构表面没有覆盖单层石墨烯时,该结构在  $y$  极化入射下会在 0.76 THz 附近显示出一个明显的 EIT 效应,如图 2(a) 中模拟的绿色透射谱曲线所示。当只存在 CWR 结构时,同样在  $y$  极化太赫兹波入射下,它会被入射电场直接激发,在 0.76 THz 附近产生明显的谐振响应,如图 2(a) 中模拟的粉色透射谱曲线所示,在 0.76 THz 附近出现了一个很强的谐振谷,可称之为明模。而当只存在 DUR 结构时,在相同的频率附近却不存在任何谐振响应,如图 2(a) 中模拟的橙色透射谱曲线所示,说明其不能被入射的  $y$  极化太赫兹波激发,可称之为暗模。当把这两种结构放在一起时, CWR 会首先被外场强烈激发,由于距离很近, CWR 的谐振近场会激发起 DUR 的谐振;同时,被激发起来的 DUR 的近场谐振又会反过来影响 CWR 的谐振。最终结果便是, CWR 中被外场激发的谐振响应和被 DUR 激发的谐振响应相互干涉相消,使其谐振被抑制。而根据图 2(a) 中的结果, CWR 的谐振会引起透射谷,即谐振频率处的透射小,可想而知,若其谐振被抑制,则谐振谷便会消失,透射变大,在原有单独 CWR 存在时的透射谷中间“诱导”出了一个透明窗口,该现象即为超表面中的电磁诱导透明。图 2(b) 给出了模拟得到的在 EIT 窗口频率处的表面电流分布,可以看到 DUR 的谐振强度很强,而 CWR 的谐振强度很弱,与以上描述是相吻合的。

为了通过实验证明该 EIT 效果,通过传统光刻方法制备了一个  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$  大小的 EIT 超表面,并使用太赫兹时域光谱系统测量了其透射谱,如图 3 中蓝色曲线所示,可以看出仿真与实验结果非常吻合。为了实现提出的石墨烯-金属复合 EIT 超表面,将用化学气相沉积法得到的单层石墨烯通过湿法转移的方法转移到了该超表面上。图 3 中粉色虚线给出了测得的该复合 EIT 超表面在没有任何外加激励下的透射谱,可见当金属结构表面覆盖单层石墨烯后,原有的 EIT 谱线被石墨烯明显调制,谐振强度明显变弱。虽然 EIT 的谱线线型还基本存在,但其透射窗口频率处的

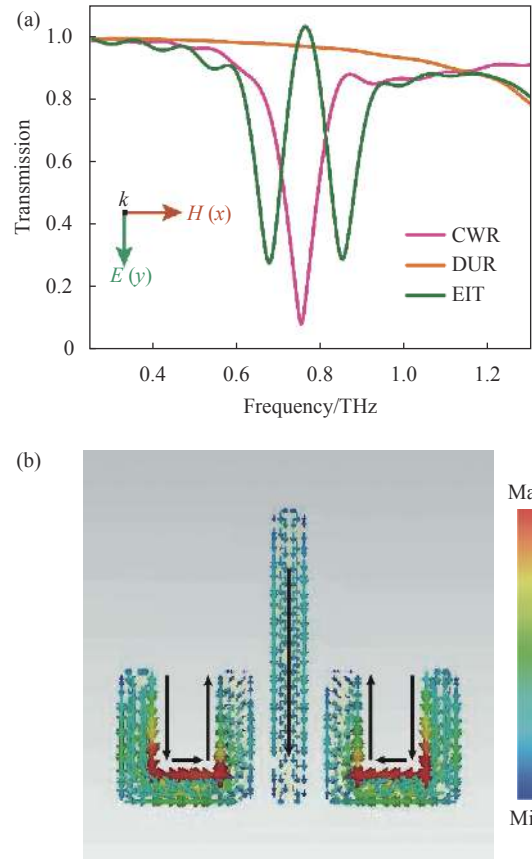


图 2 (a) 模拟的 CWR(明模), DUR (暗模) 和 EIT 结构的透射谱; (b) 模拟的 EIT 结构在透射窗口频率处的表面电流分布,其中黑色箭头表示电流流向

Fig.2 (a) Simulated amplitude transmission spectra of the CWR (bright mode), DUR (dark mode) and the EIT structure, respectively; (b) Simulated surface current distributions of the EIT structure at the transparency window frequency, the black arrows illustrate the directions of the surface currents

透射幅值从 0.92 降低到 0.68,左(右)谐振谷处的透射幅值从 0.40(0.40)增加到 0.65(0.59)。这种调制现象可归因于:转移上去的石墨烯具有一定的初始电导率,它通过短接效应给 CWR 和 DUR 的谐振强度带来了较大的谐振损耗。以 DUR 的谐振举例,根据图 2(a) 中的结果,它支持的谐振可看成一种 LC 谐振,其中的金属部分可看成为电感,两臂中间的部分可看成为电容,当其上被覆盖石墨烯后,相当于电容部分被并联了一个电阻,使两臂上的电流能够导通,从而降低了谐振强度。石墨烯的电导率越高,导通效果越好,谐振强度也越弱。此外,与没有石墨烯的情况相比,共振频率略有红移,这是由于石墨烯的存在,导致结构周围的有效介电常数增加所致。

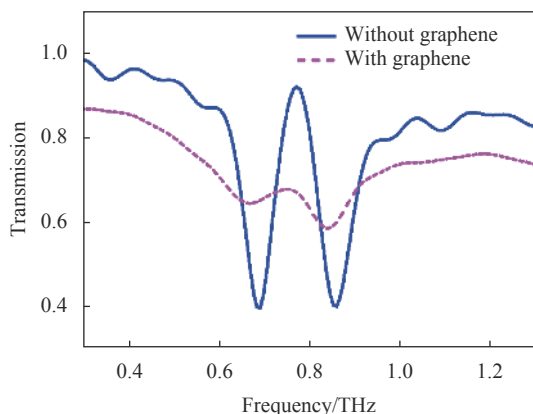


图 3 测量的 EIT 超表面在有、无石墨烯时的太赫兹透射谱

Fig.3 Measured amplitude transmission spectra of the EIT metasurface with and without the graphene layer

## 2 主动式 EIT 调控实验结果

为了实现对 EIT 现象的主动调制,在样品上同时施加了连续光泵和偏置电压,再测量其透射谱的变化,具体实验示意如图 1(b) 所示。连续光泵的激光波长为 532 nm,泵浦光束以 45°入射角从石墨烯和金属结构一侧倾斜照射到复合超表面上;偏置电压通过石墨烯上和基底底部的两个用银胶制作的方环电极施加到石墨烯上。该方环电极的中间透明区域大于泵浦光束的光斑,泵浦光束的光斑又大于实验中入射太

赫兹波的光斑。在光泵下,由于激光光子能量大于硅的带隙,使得硅在其照射下会产生光生载流子。这些载流子在偏置电压的作用下,会与石墨烯中的载流子发生相互作用,从而引起石墨烯电导率的改变。在整个太赫兹透射谱测量过程中,泵浦光的功率密度固定为  $0.25 \text{ W cm}^{-2}$ ,所有数据的参考信号是没有被施加光泵和偏置电压的相同厚度的裸硅衬底的透射谱。

图 4(a) 展示了当偏置电压在  $-5 \sim 10 \text{ V}$  之间变化时测量的复合超表面的透射谱。此处,定义正电压为电压源正极连接到石墨烯时的电压,负电压为电压源正极连接到硅基底底部电极时的电压。当只存在光泵时(对应电压为  $0 \text{ V}$ ),其透射结果中的 EIT 谐振特征较无光泵时被进一步削弱,整体透射幅值也变小,见图 4(a) 中的紫色曲线。当偏置电压从  $0 \text{ V}$  增加到  $10 \text{ V}$ ,实验测得复合超表面的整体透射谱的幅值逐渐增加,逐渐趋于未加光泵和偏置电压的情况。然而,当偏置电压从  $0 \text{ V}$  降低到  $-5 \text{ V}$ ,整体透射谱的幅值逐渐降低,EIT 特征也几乎消失。图 4(b) 展示了 EIT 窗口频率处的透射幅值与偏置电压的关系,可见在  $-1 \sim 2 \text{ V}$  范围内,透射幅值急剧变化,超出该范围,透射幅度均趋于饱和。整个过程的最大的调制深度  $|(T_{\max} - T_{\min})/T_{\max}|$  达到了 73%,其中  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  分别是当偏置电压为  $10 \text{ V}$  和  $-5 \text{ V}$  时,EIT 窗口频率处的最大和

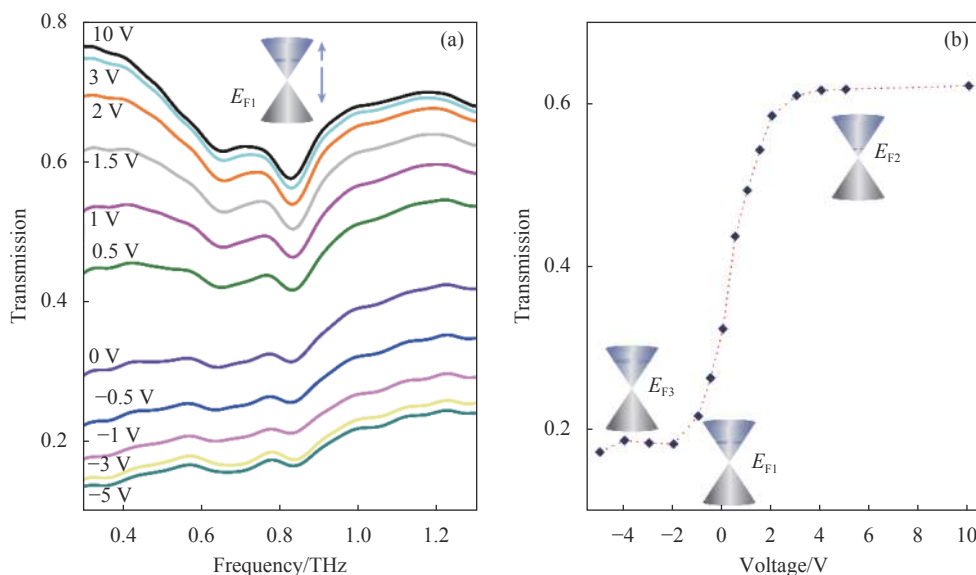


图 4 测量的复合超表面在  $0.25 \text{ W cm}^{-2}$  的连续光泵下,不同偏置电压时的 (a) 太赫兹透射谱和 (b) EIT 透射窗口频率处的透射幅值变化

Fig.4 Measured (a) terahertz transmission spectra and (b) transmission amplitudes at the EIT window frequency of the hybrid metasurface at different bias voltages under  $0.25 \text{ W cm}^{-2}$  CW pump

最小透射幅值。

### 3 实验结果分析与讨论

在这项工作中, EIT 效应的主动调控可主要归因于光泵和偏置电压共同作用下引起的石墨烯电导率变化, 为了理解该调控行为, 提出了一种基于石墨烯费米能级变化方式的定性分析方法。当复合超表面在光泵照射时, 结构周围的硅表面产生了一种光电导硅层, 其厚度由泵浦光的穿透深度决定, 约为  $1\ \mu\text{m}$ , 其电导率的大小取决于其中的光生载流子浓度, 光泵功率越大, 光生载流子浓度越高, 电导率也越大<sup>[16]</sup>。由于该光电导硅层和石墨烯直接接触, 所以其中存在着载流子交换和流通过程。由于通过 CVD 制备的石墨烯通常为弱 P 型, 因此其初始费米能级在价带中并且接近狄拉克点。而因为所采用的硅基底为 n 型, 在外加光泵下, 光电导硅层中电子的浓度较大, 而石墨烯薄层中产生的光生载流子数量非常少。当外加电压为 0 V 时, 光电导硅层中大量的电子会在浓度梯度的影响下扩散到石墨烯薄膜中, 直至平衡, 使得石墨烯的费米能级  $E_{F1}$  越过狄拉克点移动至导带中, 如图 4(a) 中插图所示。此时结构在光电导硅层和石墨烯的双重短接作用下, EIT 谐振强度进一步被削弱, 特征也趋于消失, 整体透过率也明显下降。当有偏置电压时, 石墨烯的费米能级会由于石墨烯和硅层间的电容作用(可类比 PN 结电容)进一步发生变化, 而光电导硅层由于其厚度较大, 其电导率随电压的变化不大, 其对透射谱变化的影响可以忽略。

当施加电压为正时, 电容作用会逐渐减弱扩散作用, 使得石墨烯中积累更多的空穴, 这些空穴与石墨烯中的多子电子复合, 促使其费米能级在导带中朝着狄拉克点移动, 电压幅值越大, 移动得越多, 石墨烯的电导率因此逐渐减弱, 使得对 EIT 谐振的短接作用变弱, EIT 特征逐渐明显, 对应图 4 中电压 0~3 V 的情况。继续增加正向电压, 电容间的载流子漂移作用逐渐变强, 导致石墨烯中不能继续积累更多的空穴, 费米能级的变化出现饱和, 石墨烯的电导率趋于稳定, 导致透射谱基本不再发生变化, 对应图 4 中电压 3~10 V 的情况。

与正电压不同, 当施加电压为负时, 电容作用会同扩散作用一样, 使石墨烯中积累更多的电子, 使得

石墨烯的费米能级在导带中向着远离狄拉克点的方向运动, 这将增大石墨烯的电导率, 从而进一步加强对结构的短接作用, 削弱太赫兹 EIT 的谐振并最终将其关闭, 同时整体的透射幅值也随之下降, 对应图 4 中电压 0~3 V 的情况。继续增加负向电压幅值, 同样由于电容间的载流子在电压下的漂移作用逐渐变强, 使得石墨烯中无法积累更多电子, 费米能级的变化达到饱和, 石墨烯的电导率趋于稳定, 导致透射谱也不再发生变化, 对应图 4 中电压 -3~5 V 的情况。

与先前的已发表的工作相比, 该石墨烯-金属复合超表面的提出具有如下创新意义。文中的调制策略是对先前提出的连续光泵和偏置电压双重调控方法在 EIT 主动调控上的成功应用<sup>[16]</sup>, 实现了在固定光泵强度下, 电压调控的主动式 EIT。对比 Gu J 等人提出的基于脉冲光泵的主动式 EIT<sup>[8]</sup>, 该调制策略具有更强的现实应用意义: 采用连续光作为激励, 应用成本更低; 选择完整的单层石墨烯作为电导率可变的功能材料, 避免了样品加工过程中的材料刻蚀步骤, 加工更简单。

### 4 结 论

综上, 文中提出了一种基于石墨烯-金属复合结构的主动式 EIT 超表面, 通过将单层石墨烯简单集成到以硅为基底的 EIT 超表面上, 实验证明了其在固定的连续光泵浦下, EIT 透射谱会随着外加偏置电压的变化而发生明显调制。理论分析表明, 该调制可归因于光泵时硅基底表面产生的光电导硅层内的光生载流子(电子)的扩散效应, 偏置电压下硅和石墨烯间电容效应导致的石墨烯中电子和空穴的积累效应, 以及载流子漂移效应的共同作用导致的石墨烯中费米能级的变化。该费米能级变化会改变石墨烯的电导率, 从而改变其对谐振结构的短接作用, 从而调控其透射响应。该方法从实际应用角度出发, 为主动式 EIT 响应调控的实现提供了一种有效途径。此外, 这种方法还可以用于调控其它类型的谐振, 实现更加广泛的主动式调控功能。

#### 参考文献:

- [1] Boiler K J, Imamoglu A, Harris S E. Observation of electromagnetically induced transparency [J]. *Physical Review*

- Letters*, 1991, 66: 2593-2596.
- [2] Wang Jing, Tian Hao. Terahertz flexible stretchable metasurface based on double resonance response [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201059. (in Chinese)
- [3] Zhao Yun, Yang Yuanmu. Nonlinear metasurfaces: harmonic generation and ultrafast control [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20201037. (in Chinese)
- [4] Liu M, Yang Q, Xu Q, et al. Tailoring mode interference in plasmon-induced transparency metamaterials [J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2018, 51: 174005.
- [5] Li Q, Liu S, Zhang X, et al. Electromagnetically induced transparency in terahertz metasurface composed of meanderline and U-shaped resonators [J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8792-8801.
- [6] Singh R, Al-Naib I, Yang Yuping, et al. Observing metamaterial induced transparency in individual Fano resonators with broken symmetry [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99: 201107.
- [7] Mal K, Islam K, Mondal S, et al. Electromagnetically induced transparency and electromagnetically induced absorption in Y-type system [J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(5): 054211.
- [8] Gu J, Singh R, Liu X, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1151.
- [9] Cao Yanyan, Li Yue, Liu Yuanzhong, et al. Tunable electromagnetically induced transparency based on T-shaped graphene metamaterials [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2017, 15(2): 192-197. (in Chinese)
- [10] Chu Q, Song Z, Liu Q H. Omnidirectional tunable terahertz analog of electromagnetically induced transparency realized by isotropic vanadium dioxide metasurfaces [J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11: 082203.
- [11] Tamayama Y, Kida Y. Tunable group delay in a doubly resonant metasurface composed of two dissimilar split-ring resonators [J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 2019, 36: 2694-2699.
- [12] Li Guangsen, Yan Fengping, Wang Wei, et al. Analysis of photosensitive tunable multiband electromagnetically induced transparency metamaterials [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0114002. (in Chinese)
- [13] Sun H, Tang Y, Hu Y, et al. Active formatting modulation of electromagnetically induced transparency in metamaterials [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(9): 092402.
- [14] Zhou J, Zhang C, Liu Q, et al. Controllable all-optical modulation speed in hybrid silicon-germanium devices utilizing the electromagnetically induced transparency effect [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 2797-2807.
- [15] Du C, Zhou D, Guo H, et al. Active control scattering manipulation for realization of switchable EIT-like response metamaterial [J]. *Optics Communications*, 2021, 483: 126664.
- [16] Li Q, Tian Z, Zhang X, et al. Active graphene-silicon hybrid diode for terahertz waves [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7082.