

# 基于 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 复合结构的高灵敏宽带太赫兹调制器\*

赖伟恩<sup>1)†</sup> 邬宗冬<sup>1)‡</sup> 李力奇<sup>2)‡</sup> 刘根<sup>1)</sup> 方彦俊<sup>2)‡</sup>

1) (合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 光电技术研究院, 特种显示技术国家工程实验室, 安徽省测量理论与精密仪器重点实验室, 合肥 230009)

2) (浙江大学材料科学与工程学院, 硅材料国家重点实验室, 杭州 310027)

(2023年4月4日收到; 2023年5月17日收到修改稿)

高性能硅基太赫兹调制器是构建超宽带太赫兹-光纤混合通信系统的关键器件之一. 提出了一种基于钙钛矿/石墨烯/硅 (MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si) 复合结构的近红外光驱动的超宽带大调制深度太赫兹调制器. 实验结果表明, 石墨烯薄膜和钙钛矿空穴传输层在近红外光驱动下可有效地促进界面电荷分离, 增大载流子复合寿命, 显著增强器件的表面电导率, 进一步调控太赫兹波的传输幅度, 实现光控型太赫兹波调制器的功能. 通过波长 808 nm 的近红外调制激励源, 对器件在 0.2—2.5 THz 超宽频率范围的太赫兹透射特性进行表征, 实验用 6.1 mW/mm<sup>2</sup> 的低功率密度近红外光驱动下实现了高达 88.3% 的大调制深度, 远高于裸硅基底的调制深度 (约 14.0%), 具有高灵敏、宽带和大调制深度等显著优势, 并且建立了相应的半解析器件模型, 仿真验证了实验结果. 所提出的 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene 复合薄膜在增强硅基调制器性能方面效果显著, 为未来实现硅基太赫兹调制器在近红外太赫兹-光纤混合通信系统的集成提供了一种新策略.

**关键词:** 太赫兹调制器, MAPbI<sub>3</sub>/Graphene 复合薄膜, 近红外光驱动, 高灵敏

**PACS:** 72.20.jv, 84.30.Qi, 72.80.Vp, 73.50.-h

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230527

## 1 引言

太赫兹 (THz) 辐射在电磁波谱中位于微波与红外波谱之间, 它具有穿透性好、安全性高和光谱分辨能力优异等独特特性<sup>[1]</sup>, 这些性质赋予了太赫兹波广泛的应用前景, 诸如通信、雷达、天文学、医学成像、无损检测和安全检查等<sup>[2-7]</sup>. 在这些应用中, 太赫兹通信技术在当今信息化时代显得尤为重要. 相较于传统波段, 太赫兹波不仅提供了更大的可用带宽, 同时具有更高的数据传输速率 (约

100 Gbit/s), 可以满足不断增长的无线通信需求. 此外, 能够实现太赫兹通信和光纤路由之间进行无缝连接的太赫兹-光纤混合通信系统已然成为当下的热门研究方向之一, 这对能够操纵太赫兹波的振幅<sup>[8,9]</sup>、相位<sup>[10,11]</sup>和极化<sup>[12]</sup>等特性的太赫兹调制器提出了更高要求. 作为太赫兹波段常用的基底材料, 硅在太赫兹调制器中得到了广泛应用<sup>[13]</sup>, 然而单纯的裸硅调制器难以获得较高的调制深度<sup>[14]</sup>, 限制了其在太赫兹-光纤混合通信系统中的集成.

为提高硅基太赫兹调制器的性能, 研究了各种基于 MXene<sup>[15,16]</sup>、相变材料<sup>[17-19]</sup>、贵金属纳米颗

\* 安徽省高校协同创新项目 (批准号: GXXT-2022-015) 和国家自然科学基金 (批准号: 61905058) 资助的课题.

‡ 同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: wnlai@hfut.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: jkfang@zju.edu.cn

粒<sup>[20-23]</sup>、超材料<sup>[24,25]</sup>和石墨烯(Graphene)<sup>[26,27]</sup>等材料的太赫兹调制器. 其中, 石墨烯因其超宽光谱响应范围(UV—THz)、超高载流子迁移率(在室温下约为  $15000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ )和高导电性而受到广泛关注. 在之前的工作中, 已经研究了基于单层石墨烯的太赫兹调制器, 但是受到单层石墨烯原子级厚度的限制, 导致在低功耗条件下的调制性能较低, 难以达到实际应用的需求, 因此需要其他材料与石墨烯进行结合来提升性能<sup>[28,29]</sup>. 钙钛矿型( $ABX_3$ )的  $\text{MAPbI}_3$  (MA代表甲胺)材料因具有宽光谱吸收范围、高载流子迁移率和长载流子扩散长度而被认为有制备高性能光电器件的潜力<sup>[30]</sup>. 此外, 先前所报道的钙钛矿基调制器由于其较窄带隙的限制, 一般只能工作在可见光波长范围内<sup>[31,32]</sup>, 不适用于在近红外区域工作的光纤通信系统.

本文提出了一种基于  $\text{MAPbI}_3/\text{Graphene}/\text{Si}$  复合结构的低功率近红外(near-infrared light, NIR)光驱动的太赫兹调制器. 在 NIR 光驱动下, 以硅衬底作为光子吸收层, 通过  $\text{MAPbI}_3$  与石墨烯薄膜的结合, 促进了硅衬底界面处电子-空穴对的分离, 极大提高了器件表面的电导率, 使得器件能够在近红外波段有效调控太赫兹波.  $\text{MAPbI}_3/\text{Graphene}$  复合薄膜的提出, 不仅可以有效地实现 NIR 光驱动, 在相对较弱的光激发下可以获得更好的太赫兹

调制性能, 并且该混合系统未来有望与光纤通信系统集成, 实现太赫兹通信和光纤通信的无缝连接.

## 2 结果和讨论

实验器件的制备过程如下: 首先将用化学气相沉积(chemical vapor deposition, CVD)法合成的单层石墨烯薄膜转移到硅衬底上; 然后通过旋涂技术在  $\text{Graphene}/\text{Si}$  顶部旋涂一层  $\text{MAPbI}_3$  多晶薄膜; 最后在  $\text{MAPbI}_3/\text{Graphene}$  复合薄膜上涂覆一层聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)进行封装, PMMA起到保护层的作用, 以避免其受到大气中水氧的影响. 所制备的  $\text{MAPbI}_3/\text{Graphene}/\text{Si}$  太赫兹调制器的结构如图 1(a)所示. 从图 1(b)所示的薄膜的扫描电子显微镜(SEM)表征图可以看出, 在  $\text{Graphene}/\text{Si}$  上旋涂的  $\text{MAPbI}_3$  薄层分布较为均匀,  $\text{MAPbI}_3$ , Graphene 和 Si 按顺序从上到下排列分布, 复合薄膜的厚度约为  $0.37 \mu\text{m}$ .  $\text{MAPbI}_3$  薄膜在波长  $500\text{--}800 \text{ nm}$  波段处的吸收光谱如图 1(c)所示, 可以看出其在波长  $800 \text{ nm}$  处表现出吸收边, 对 NIR 光表现出较高的透明度, 使得其能够忽略 NIR 光的吸收影响.

实验制备的太赫兹调制器在  $808 \text{ nm}$  近红外激光照射下的太赫兹传输测试实验如图 2(a)所示.

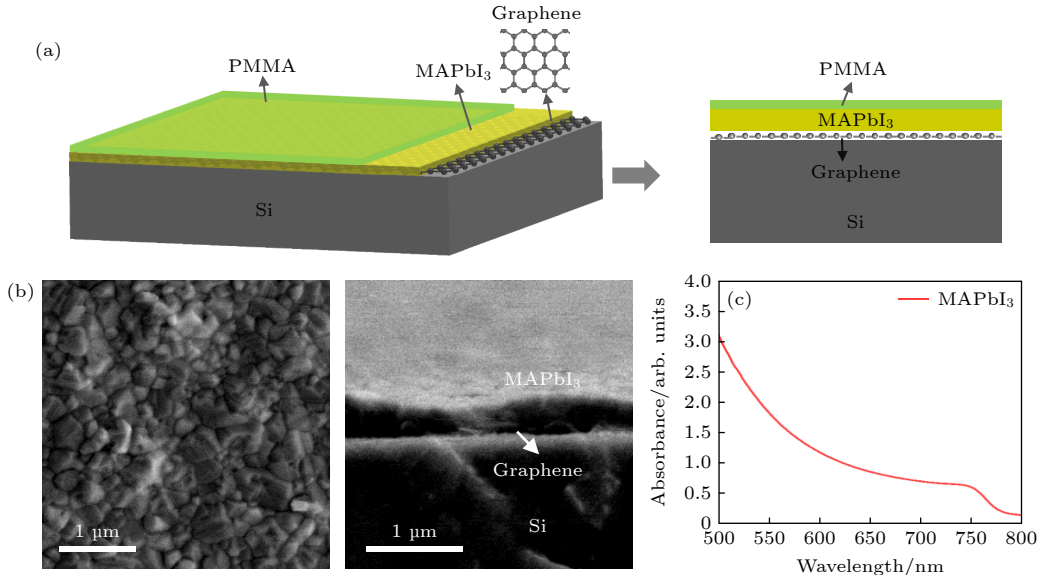


图 1 (a)  $\text{MAPbI}_3/\text{Graphene}$  基调制器结构示意图, 左侧为三维示意图, 右侧为侧视图; (b) 硅基底上  $\text{MAPbI}_3/\text{Graphene}$  复合薄膜的 SEM 表征图, 左侧为俯视图, 右侧为侧视图; (c)  $\text{MAPbI}_3$  薄膜在波长  $500\text{--}800 \text{ nm}$  下的吸收光谱

Fig. 1. (a) Schematic diagram of  $\text{MAPbI}_3/\text{Graphene}$ -based modulator structure; left, 3D schematic; right, side view; (b) SEM characterization of  $\text{MAPbI}_3/\text{Graphene}$  composite thin film on silicon substrate; left, top view; right, side view; (c) absorption spectrum of  $\text{MAPbI}_3$  thin film at the wavelength range of  $500\text{--}800 \text{ nm}$ .

波长 808 nm NIR 激光照射在器件的涂层表面, 太赫兹波通过透镜 (焦距  $f = 50$  mm) 聚焦, 垂直入射在调制器上, 所使用的 NIR 激光的光斑直径约为 6 mm, 而太赫兹光斑小于激光光斑. 在这种情况下, 太赫兹波被 NIR 光全部覆盖以保证其被完全调制. 调制器对太赫兹波幅值调控的工作原理解释如下, 在波长 808 nm 激光照射下, 入射光被硅基底吸收产生光生载流子, 形成表面光导层, 可有效阻挡入射太赫兹波, 衰减其通过器件的透射幅度. 表面光导层的电导率可以写成:  $\sigma = e(\mu_n + \mu_p)(N_0 + N_L)$ , 其中  $e$  是基本电荷,  $\mu_n$  是电子迁移率,  $\mu_p$  是空穴迁移率,  $N_0$  是无光激发的本征硅的载流子浓度,  $N_L$  是光激发下硅的光激发载流子浓度. 裸硅基底产生电子-空穴对后, 大部分会因为复合而消失, 导致光生载流子浓度大大降低. 在涂覆石墨烯后, 此时石墨烯充当输运层, 会有相当一部分电子-空穴对发生分离, 即空穴移动到石墨烯层而电子留存于硅衬底中, 同时高迁移率延长了载流子寿命, 增加载流子复合时间, 使载流子浓度提高, 电导率上升. 但单层石墨烯能够分离的载流子有限, 限制了其对太赫兹波的调制效果. 为提高调制性能, 通过增加涂覆一层 MAPbI<sub>3</sub> 来显著提高光生载流子分离效果, 复合薄膜加光激励后的能带示意图及电子-空穴的流动情况如图 2(b) 所示, 接触导致界面处的能带弯曲, 使得本征硅和 MAPbI<sub>3</sub> 的费米能级  $E_F$  处于同一水平, 这有利于光子产生的电子-空穴对的分离, 并促进空穴向 MAPbI<sub>3</sub> 的转移. 此外, 本征硅的能带向上弯曲, 有效阻止了界面处载流子的复合. 总体来说, 复合膜中石墨烯的极高载流子迁移率, 以及能带变化引起的界面处载流子浓度的提高, 使得由硅衬底、石墨烯层以及 MAPbI<sub>3</sub> 层组成的调制器的整体表面电导率显著增强.

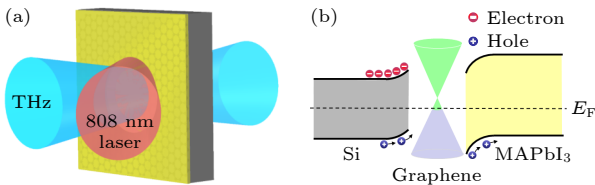


图 2 (a) MAPbI<sub>3</sub>/Graphene 模型光照示意图; (b) MAPbI<sub>3</sub>/Graphene 复合薄膜加光激励后的能带示意图以及电子-空穴的流动情况

Fig. 2. (a) Schematic of MAPbI<sub>3</sub>/Graphene model with light; (b) schematic diagram of energy band of MAPbI<sub>3</sub>/Graphene composite thin film after adding light excitation and electron-hole flow condition.

为了研究钙钛矿 MAPbI<sub>3</sub> 在调控太赫兹幅值中所起到的作用, 分别测试了 Graphene/Si 调制器和 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 调制器在光照和无光照下的电流-电压 ( $I$ - $V$ ) 曲线变化情况, 以及两种器件的开关响应曲线. 两种器件的上表面均镀上了相同大小的横向电极, 以保证其具有相同的测试环境. 使用 Keithley 2450 电流源表对器件提供偏置电压并测试其光暗电流, 使用的光源是波长 808 nm 近红外激光, 相关的测试示意图如图 3(a) 和图 3(b) 所示. 从图 3(c) Graphene/Si 调制器的暗电流和光电流对比可以看出, 随着电压的增加, 二者均呈增加趋势, 这种现象可以归因为外加电场促使样品表面的电子-空穴对分离, 产生更多的载流子, 增加了样品的整体电导率, 同时光照也存在着类似于外加电场的这种效果, 光电流明显高于暗电流. 从图 3(c) 与图 3(d) 可以看出 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 调制器的光电流比 Graphene/Si 调制器的高出近 2 个数量级, 这说明了 MAPbI<sub>3</sub> 与石墨烯结合后进一步增强了石墨烯促进电子-空穴对分离的这一效果, 使得表面产生了更多的光生载流子. 在 0.5 V 偏压, 15.1 mW 功率的 NIR 激光驱动下, 对二者进行了开关响应的测试, 周期为 20 s. 开关响应曲线如图 3(e) 和图 3(f) 所示, 可以看出, Graphene/Si 调制器在上述条件下的最大电流约为 0.8 mA, 而 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 调制器的最大电流约为 18.1 mA, 这也印证了 MAPbI<sub>3</sub> 的存在增强了电子-空穴对分离, 产生了更多光生载流子.

为了研究太赫兹波通过调制器后传输幅度的变化, 实验测试了 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 调制器的太赫兹透射的时域和频域信号, 裸硅调制器作为参考. 由于透射太赫兹波的振幅与调制器表面光导层的电导率成反比, 通过改变波长 808 nm 激光的功率密度, 可以轻松地实现对太赫兹波的调制.

太赫兹测试的相关研究以裸硅作为参考进行比较, 实验所使用的 NIR 光为波长 808 nm 激光, 激光功率密度从 0 mW/mm<sup>2</sup> 逐渐增加到 6.1 mW/mm<sup>2</sup> 左右. 参考硅片和 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 调制器在不同功率密度下的太赫兹信号分别如图 4(a) 和图 4(b) 所示, 通过 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 调制器传输的太赫兹脉冲的透射幅度随着激光功率密度的增加而显著降低, 在功率密度 6.1 mW/mm<sup>2</sup> 的激光照射下, 太赫兹脉冲的透射幅度近似为零. 但是从图 4(a) 可以很明显地看出, 通过裸硅传输

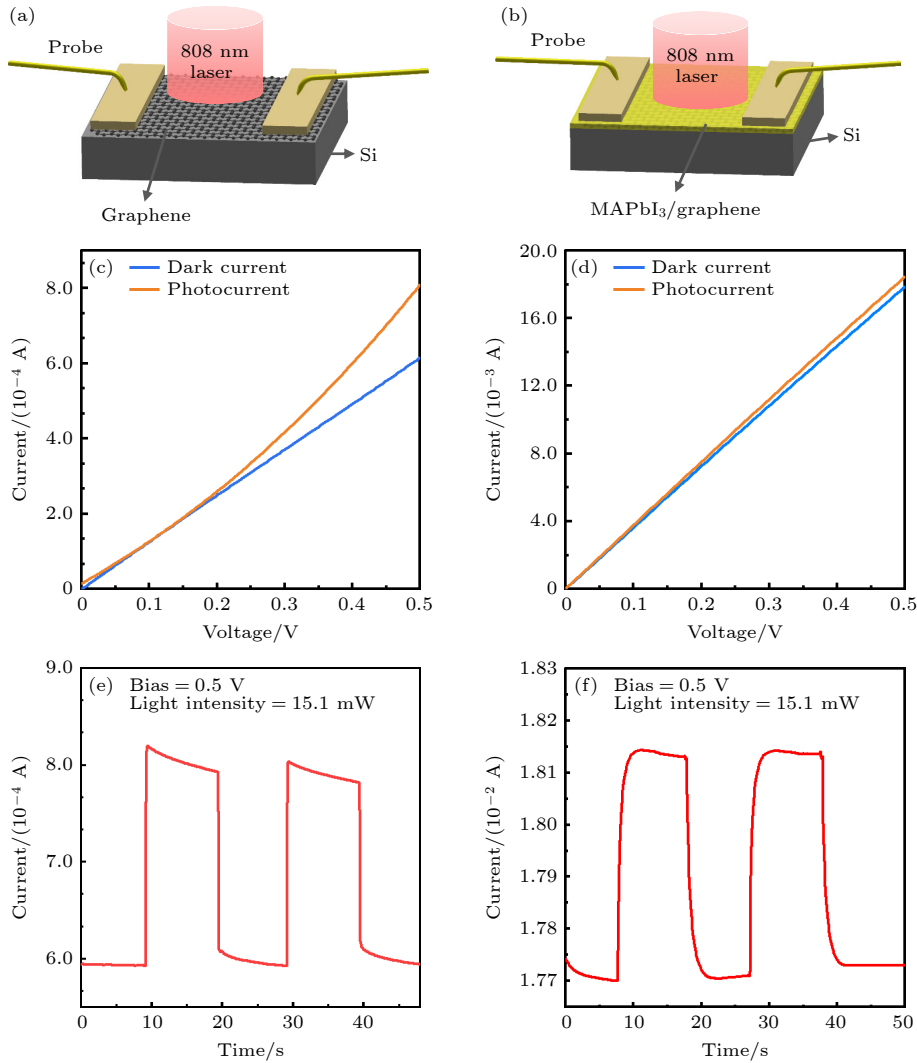


图 3 (a) Graphene/Si 调制器和 (b) MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 调制器的 *I-V* 曲线测试示意图; (c) Graphene/Si 调制器和 (d) MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 调制器在光照 (红线) 和无光照 (蓝线) 下的 *I-V* 测试曲线; (e) Graphene/Si 调制器和 (f) MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 调制器在 0.5 V 偏压, 15.1 mW 功率光激励下的开关响应曲线

Fig. 3. Schematic diagram of *I-V* curve test for (a) Graphene/Si modulator and (b) MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si modulator; *I-V* test curves for (c) Graphene/Si modulator and (d) MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si modulator under light (red line) and no light (blue line); switching response curves of (e) Graphene/Si modulator and (f) MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si modulator under light excitation with 0.5 V bias and 15.1 mW power.

的太赫兹脉冲的透射幅度随着激光功率密度的增加仅略微降低. 此外, 在没有光照 (0 mW/mm<sup>2</sup>) 的情况下, 通过 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 传输的太赫兹脉冲波形与通过裸硅传输的波形几乎相同, 该结果表明 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene 复合薄膜的插入损耗可以忽略不计, 只有在光照下才能对太赫兹波起到调控功能. 图 4(c) 和图 4(d) 显示了在不同功率密度的激光照射下通过 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 和裸硅传输的太赫兹脉冲的归一化透射率 (以 0 mW/mm<sup>2</sup> 时的透射率为标准进行归一化). 当激光功率密度从 0.6 mW/mm<sup>2</sup> 逐渐增加到 6.1 mW/mm<sup>2</sup> 时, 在 0.2—2.5 THz 的宽频带范围内通过 MAPbI<sub>3</sub>/

Graphene/Si 的归一化透射率急剧下降, 其中, 大概在 0.5 THz 频点处, 其归一化透射率从 0.60 降低至 0.07 左右, 需要注意的是裸硅在这些功率密度激光照射下的太赫兹透射率下降不太明显, 即使是在功率密度 6.1 mW/mm<sup>2</sup> 激光照射下的太赫兹透射率也仅下降到 0.84. 这表明在光激发下, MAPbI<sub>3</sub>/Graphene 复合薄膜对太赫兹波的衰减有增强作用. 这里将太赫兹调制深度 (modulation depth, MD) 定义为  $MD = (T_p - T_{p0})/T_{p0} \times 100\%$ , 其中  $T_p$  和  $T_{p0}$  分别是在不同功率密度的光激励和无光激励下通过调制器的太赫兹脉冲透射幅度. 比较了 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 和裸硅在相同光激发功率密度下的

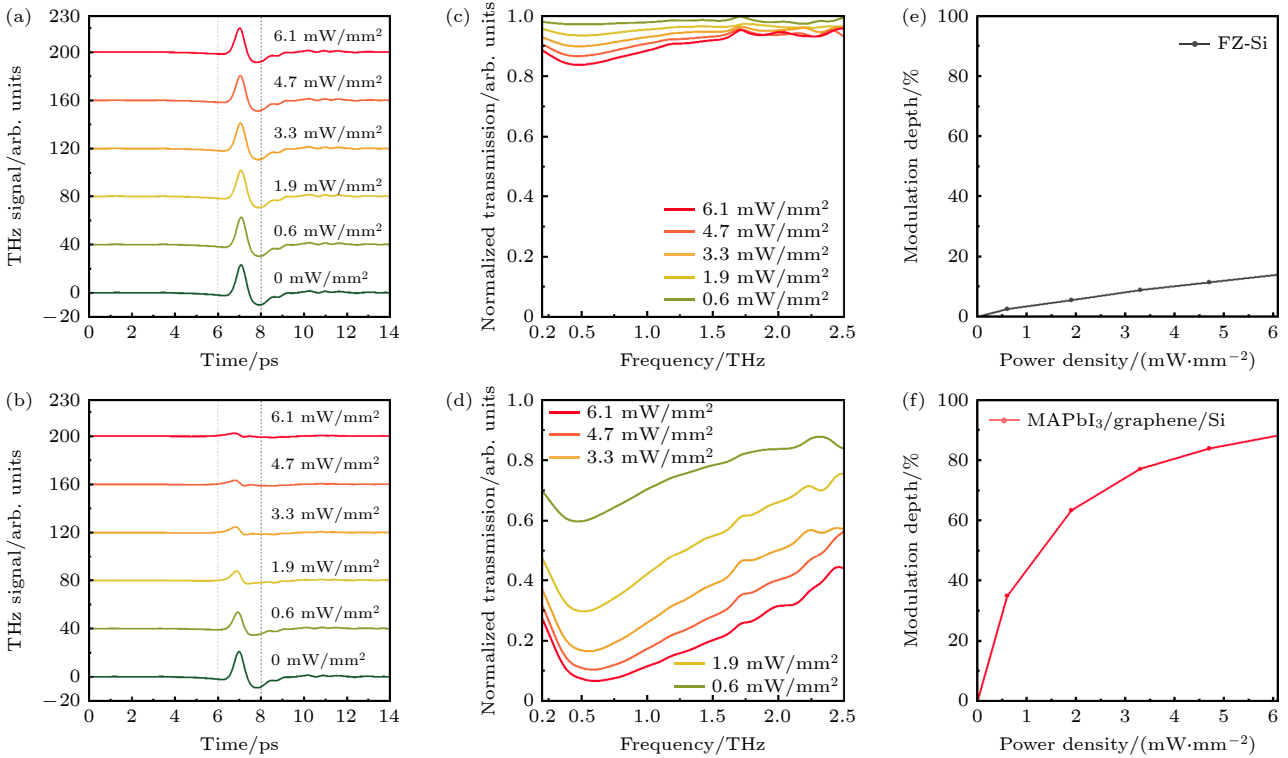


图 4 在不同功率密度的激光照射下通过 (a) 裸硅和 (b) MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 传输的太赫兹脉冲时域波形; 在不同功率密度的激光照射下通过 (c) 裸硅和 (d) MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 传输的太赫兹脉冲的归一化透射; 在不同功率密度的激光照射下 (e) 裸硅和 (f) MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 的太赫兹调制深度

Fig. 4. Time domain waveforms of terahertz pulses transmitted through (a) bare silicon and (b) MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si under laser irradiation at different power density; normalized transmission of terahertz pulses transmitted through (c) bare silicon and (d) MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si under laser irradiation at different power density; terahertz modulation depth of (e) bare silicon and (f) MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si under laser irradiation at different power density.

太赫兹调制深度情况, 如图 4(e) 和图 4(f) 所示. MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 的调制深度随着激光功率密度的增加而急剧变化, 在相同的光激发功率下, 其调制深度远远超过了裸硅. 在功率密度 6.1 mW/mm<sup>2</sup> 的光激发下, MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 的最大调制深度达到 88.3%, 而在这一功率密度的激光照射下裸硅的调制深度仅为 14.0%. 因此, 在波长 808 nm 光激发下, MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 的太赫兹调制性能明显优于裸硅. 透射太赫兹波的衰减主要是由表面载流子浓度的增加所引起的. 随着激光功率密度的增加, 器件表面载流子浓度的增加引起的电导率的增加导致透射太赫兹波进一步衰减. 在 NIR 光驱动下, 与裸硅相比, MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 表面载流子浓度的增加更为明显. 此外, MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 的增强调制效果在低功率 NIR 光激发下非常明显, 随着激光功率密度的增加, 这一增强效果明显减弱, 这是由于 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene 复合薄膜中光激发载流子的浓度逐步趋于饱和. 上述实验结果说明 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 调制器可以通过低

功耗 NIR 光来显著提高其对宽带太赫兹波的调制性能. 此外, 在先前的报道中, Weis 等<sup>[29]</sup>所制备的 Graphene/Si 调制器在相近波长激光驱动下虽然有较大的调制深度, 但该器件的灵敏性较差, 所需要的驱动激光的功率密度极大 (约 159.2 mW/mm<sup>2</sup>), 远高于本文所使用的最大激光功率密度 (约 6.1 mW/mm<sup>2</sup>). 同时也通过实验测试了 Graphene/Si 调制器的太赫兹调制性能, 所得结果与文献<sup>[29]</sup>报道相近, 即要达到高调制深度需要极大的激光功率密度. 通过表 1 与其他太赫兹调制器性能进行对比, 可以看出 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 调制器件具有明显优点, 诸如低功耗、大调制深度和宽带宽等, 该器件的高灵敏性及优异调制性能让其在与通信系统的集成中获得巨大优势.

此外, 还测试了 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 复合薄膜的响应速率的相关情况. 在 0.12 THz 的连续太赫兹波入射, 激光功率密度为 6.1 mW/mm<sup>2</sup>, 激光调制频率为 1 kHz 时, 如图 5(b) 所示, 器件的响应时间 (即上升时间  $\tau_{\text{rise}}$ ) 约为 95  $\mu\text{s}$ , 下降时间  $\tau_{\text{fall}}$

约为 44  $\mu\text{s}$ , 其响应速率可以满足一定的实际应用需求.

通过半解析模型模拟了太赫兹波通过 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 的传输, 使用电磁仿真软件 (CST) 进行模拟. 当 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 受到波长 808 nm NIR 光照射时, Si 衬底大致可分为无损层和由激光束穿透深度定义的导电层<sup>[23,29]</sup>, 硅的光掺杂导电

层的厚度被设定为 5  $\mu\text{m}$ , 无损层的厚度为 495  $\mu\text{m}$ , 从 SEM 图像中提取的 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene 复合薄膜厚度为 0.37  $\mu\text{m}$ . 波长为 808 nm 的平面波从法线方向照射到样品上. 使用拟合电导率  $\sigma_{\text{total}}$  来模拟器件引起的太赫兹透射率变化, 图 6(b) 仿真结果验证了太赫兹波在通过模型后透射的幅度随着电导率的增加迅速减小, 变化趋势与实验结果相近.

表 1 常见太赫兹调制器性能比较

Table 1. Performance comparison of common terahertz modulators.

Material	Wavelength/nm	Power density/(mW·mm <sup>-2</sup> )	Spectral range/THz	MD/%	Reference
MAPbI <sub>3</sub> /Graphene/Si	808	6.1	0.2—2.5	88.3	This work
MAPbI <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	1064	53.1	0.1—1.0	66.2	[33]
MoS <sub>2</sub> /Si	532	2.4	0.2—2.0	75.0	[34]
Graphene/TiO <sub>2</sub> /Si	808	71.3	0.3—1.7	88.0	[35]
Silicon nanotip	808	60.0	0.1—4.0	91.6	[36]
MAPbBr <sub>3</sub> /Si	450	30.0	0.2—2.6	80.0	[37]
CsPbBr <sub>3</sub> /Si	450	20.0	0.23—0.35	45.5	[38]
Graphene/Si	780	159.2	0.2—2.0	99.0	[29]

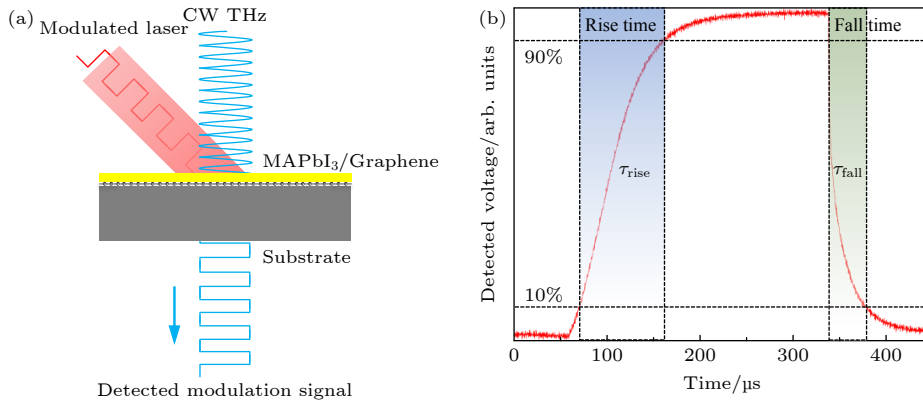


图 5 (a) MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 复合结构的响应时间测试示意图; (b) 器件的响应时间函数

Fig. 5. (a) Schematic diagram of response time testing of MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si composite structure; (b) response time function of device.

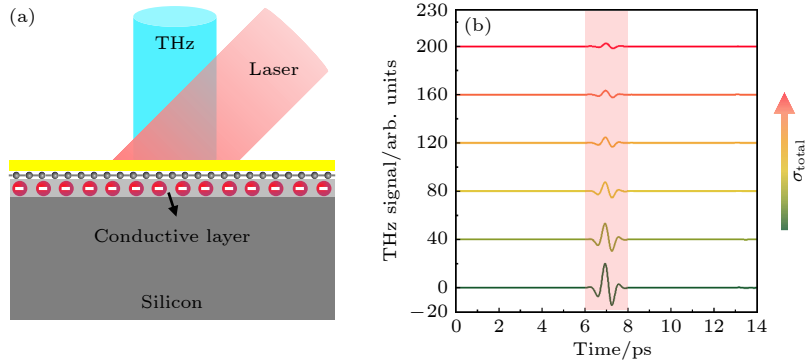


图 6 (a) 仿真模拟模型示意图; (b) 通过改变模型的电导率来调制太赫兹脉冲的波形

Fig. 6. (a) Schematic diagram of the simulated model; (b) waveform of modulated terahertz pulse by changing conductivity of model.

### 3 结 论

本文展示了一种低功率 NIR 驱动的宽带大调制深度的太赫兹调制器, 在硅基底表面涂覆了一层 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene 复合薄膜, 制备出 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 太赫兹调制器, 并对 MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si 调制器的调制性能进行了测试. 实验结果表明, MAPbI<sub>3</sub> 与 Graphene 的结合进一步促进了电子-空穴对的分离, 使得硅基底界面处的光生载流子浓度显著增加, 所引起的电导率增加导致透射太赫兹波进一步衰减, 仿真结果验证了这一点. 调制器在功率密度 6.1 mW/mm<sup>2</sup> 的光照强度下表现出高达 88.3% 的大调制深度, 同时器件表现出较大的有效调制宽度 (0.2—2.5 THz). 这项工作为近红外太赫兹无线通信系统提供了重要应用价值, 同时也为硅基调制器在近红外太赫兹-光纤混合通信系统的集成开拓了一种新思路.

### 参考文献

- [1] Ma J J, Shrestha R, Adelberg J, Yeh C Y, Hossain Z, Knightly E, Jornet J M, Mittleman D M 2018 *Nature* **563** 89
- [2] Kawano Y 2013 *Contemp. Phys.* **54** 143
- [3] Yan Z Y, Zhu L G, Meng K, Huang W X, Shi Q W 2022 *Trends Biotechnol.* **40** 816
- [4] Smith R A 2021 *Appl. Sci.* **11** 11724
- [5] Wang R Q, Xie L J, Hameed S, Wang C, Ying Y B 2018 *Carbon* **132** 42
- [6] Zhang Z Z, Li H, Cao J C 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 090702 (in Chinese) [张真真, 黎华, 曹俊诚 2018 *物理学报* **67** 090702]
- [7] Xu G F, Skorobogatiy M 2022 *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **43** 728
- [8] Song Q, Chen H, Zhang M, Li L, Yang J B, Yan P G 2021 *APL Photonics* **6** 056103
- [9] Shi Z W, Cao X X, Wen Q Y, Wen T L, Yang Q H, Chen Z, Shi W S, Zhang H W 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1700620
- [10] Kakenov N, Ergoktas M S, Balci O, Kocabas C 2018 *2D Mater.* **5** 035018
- [11] Zeng H X, Gong S, Wang L, Zhou T C, Zhang Y, Lan F, Cong X, Wang L Y, Song T Y, Zhao Y C, Yang Z Q, Mittleman D M 2022 *Nanophotonics* **11** 415
- [12] Wang J, Tian H, Li S, Li L, Guo W P, Zhou Z X 2020 *Opt. Lett.* **45** 1276
- [13] Tian W, Wen Q Y, Chen Z, Yang Q H, Jing Y L, Zhang H W 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 028401 (in Chinese) [田伟, 文岐业, 陈智, 杨青慧, 荆玉兰, 张怀武 2015 *物理学报* **64** 028401]
- [14] Hochberg M, Baehr J T, Wang G X, Shearn M, Harvard K, Luo J D, Chen B Q, Shi Z W, Lawson R, Sullivan P, Jen K Y A, Dalton L, Scherer A 2006 *Nat. Mater.* **5** 703
- [15] Feng T D, Huang W X, Zhu H F, Lu X G, Das S, Shi Q W 2021 *ACS Appl. Mater. Inter.* **13** 10574
- [16] Feng T D, Hu Y W, Chang X, Wan Xia Huang, Wang D Y, Zhu H F, An T Y, Li W P, Meng K, Lu X G, Roul B, Das S, Deng H, Zaytsev K I, Zhu L G, Shi Q W 2023 *ACS Appl. Mater. Inter.* **15** 7592
- [17] Ren Z, Xu J Y, Liu J M, Li B L, Zhou C, Sheng Z G 2022 *ACS Appl. Mater. Inter.* **14** 26923
- [18] Xing P K, Wu Q 2022 *Opt. Mater.* **133** 112832
- [19] Sun D D, Chen Z, Wen Q Y, Qiu D H, Lai W E, Dong K, Zhao B H, Zhang H W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 017202 (in Chinese) [孙丹丹, 陈智, 文岐业, 邱东鸿, 赖伟恩, 董凯, 赵碧辉, 张怀武 2013 *物理学报* **62** 017202]
- [20] Zhang P J, Cai T, Zhou Q L, She G W, Liang W L, Deng Y W, Ning T Y, Shi W S, Zhang L L, Zhang C L 2022 *Nano Lett.* **22** 1541
- [21] Zhou R Y, Wang C, Huang Y X, Xu W D, Xie L J, Ying Y B 2020 *Opt. Lasers Eng.* **133** 106147
- [22] Yoshioka K, Minam Y, Shudo K I, Dao T D, Nagao T, Kitajima M, Takeda J, Katayama I 2015 *Nano Lett.* **15** 1036
- [23] Lai W E, Zhu Q, Liu G, Shi G H, Gan Y C, Amini A, Cheng C 2022 *J. Phys. D:Appl. Phys.* **55** 505103
- [24] Zhao X L, Lou J, Xu X, Yu Y, Wang G M, Qi J H, Zeng L X, He J, Liang J G, Huang Y D, Zhang D P, Chang C 2022 *Adv. Opt. Mater.* **10** 2102589
- [25] Zhou Z, Chen Y L, Feng L S 2016 *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **37** 953
- [26] Ruan Z L, Pei L, Ning T G, Wang J S, Zheng J J, Li J, Xie Y H, Zhao Q, Wang J 2020 *Opt. Commun.* **469** 125817
- [27] Cheng L, Jin Z M, Ma Z W, Su F H, Zhao Y, Zhang Y Z, Su T Y, Sun Y, Xu X L, Meng Z, Bian Y C, Sheng Z G 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1700877
- [28] Qiu Q X, Huang Z M 2021 *Adv. Mater.* **33** 2008126
- [29] Weis P, L J, Pomar G, Hoh M, Reinhard B, Brodyansk A, Rahm M 2012 *ACS Nano* **6** 9118
- [30] Lai W E, Ge C D, Yuan H, Dong Q F, Yang D R, Fang Y J 2020 *Adv. Mater. Technol.* **5** 1901090
- [31] Wang K H, Li J S, Yao J Q 2020 *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **41** 557
- [32] Yang M S, Li T T, Yan X, Liang L J, Yao H Y, Sun Z Q, Li J, Li J, Wei D Q, Wang M, Ye Y X, Song X X, Zhang H T, Yao J Q 2022 *ACS Appl. Mater. Inter.* **14** 2155
- [33] Wang H X, Ling F R, Luo C Y, Wang C H, Xiao Y R, Chang Z Y, Wu X C, Wang W J, Yao J Q 2022 *Opt. Mater.* **127** 112235
- [34] Chen S, Fan F, Miao Y P, He X T, Zhang K L, Chang S J 2016 *Nanoscale* **8** 4713
- [35] Wei M Q, Zhang D N, Li Y P, Zhang L, Jin L C, Wen T L, Bai F M, Zhang H W 2019 *Nanoscale Res. Lett.* **14** 159
- [36] Mo C, Liu J B, Wei D S, Wu H L, Wen Q Y, Ling D X 2020 *Sensors* **20** 2198
- [37] Liu D D, Wang W, Xiong L Y, Ji H Y, Zhang B, Shen J L 2019 *Opt. Mater.* **96** 109368
- [38] Li S H, Li J S 2018 *Appl. Phys. B* **124** 224

# Highly sensitive broadband terahertz modulator based on MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si composite structure<sup>\*</sup>

Lai Wei-En<sup>1)†</sup> Wu Zong-Dong<sup>1)#</sup> Li Li-Qi<sup>2)#</sup> Liu Gen<sup>1)</sup> Fang Yan-Jun<sup>2)‡</sup>

1) (*Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, National Engineering Laboratory of Special Display Technology, Academy of Opto-electronic Technology, School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

2) (*State Key Laboratory of Silicon Materials, School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

( Received 4 April 2023; revised manuscript received 17 May 2023 )

## Abstract

A high-performance silicon-based terahertz modulator is one of the key devices for building an ultrawideband terahertz-fiber hybrid communication system. In this paper, an ultrawideband terahertz modulator with large modulation depth based on a chalcogenide/graphene/silicon (MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si) composite structure driven by near-infrared light (NIR) is proposed. The experimental results show that the graphene thin film and the chalcogenide hole transport layer can effectively promote the interfacial charge separation, increase the carrier complex lifetime, significantly enhance the surface conductivity of the device, further modulate the terahertz wave transmission amplitude, and realize the function of the light-controlled terahertz wave modulator under the NIR light drive. The terahertz transmission characteristics of the device are characterized by an 808 nm NIR modulation excitation source, and a large modulation depth of up to 88.3% is achieved in an ultra-wide frequency range of 0.2–2.5 THz and a low power density of 6.1 mW/mm<sup>2</sup> driven by NIR light, which is much higher than that of the bare silicon substrate (14.0%), with the significant advantages of high sensitivity, broadband, and large modulation depth. The corresponding semi-analytical device model is established and the experimental results are verified by simulation. The proposed MAPbI<sub>3</sub>/Graphene composite thin film is effective in enhancing the silicon-based modulator performance and provides a new strategy for the future integration of silicon-based terahertz modulators in NIR terahertz-fiber hybrid communication systems.

**Keywords:** terahertz modulator, MAPbI<sub>3</sub>/Graphene composite thin film, near-infrared optical drive, high sensitivity

**PACS:** 72.20.jv, 84.30.Qi, 72.80.Vp, 73.50.-h

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230527

<sup>\*</sup> Project supported by the University Synergy Innovation Program of Anhui Province, China (Grant No. GXXT-2022-015) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61905058).

<sup>#</sup> These authors contributed equally.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [wnlai@hfut.edu.cn](mailto:wnlai@hfut.edu.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [jkfang@zju.edu.cn](mailto:jkfang@zju.edu.cn)



## 基于MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si复合结构的高灵敏宽带太赫兹调制器

赖伟恩 邬宗冬 李力奇 刘根 方彦俊

## Highly sensitive broadband terahertz modulator based on MAPbI<sub>3</sub>/Graphene/Si composite structure

Lai Wei-En Wu Zong-Dong Li Li-Qi Liu Gen Fang Yan-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 157201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230527

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230527>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

光学反馈线性腔衰荡光谱技术不确定性

Uncertainty of optical feedback linear cavity ringdown spectroscopy

物理学报. 2022, 71(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20220186>

基于向日葵型圆形光子晶体的高灵敏度太赫兹折射率传感器

High sensitivity terahertz refractive index sensor based on sunflower-shaped circular photonic crystal

物理学报. 2019, 68(20): 207801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191024>

基于石墨烯的宽带全光空间调制器

Graphene-based broadband all-optical spatial modulator

物理学报. 2018, 67(21): 214201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180307>

基于多孔金膜的太赫兹导模共振生化传感特性仿真

Performance simulation of terahertz waveguide resonance biochemical sensor based on nanoporous gold films

物理学报. 2022, 71(21): 218701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220722>

基于超材料复合结构的太赫兹液晶移相器

Terahertz liquid crystal phase shifter based on metamaterial composite structure

物理学报. 2022, 71(17): 178701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212400>

图案化石墨烯/氮化镓复合超表面对太赫兹波在狄拉克点的动态多维调制

Terahertz dynamic multidimensional modulation at Dirac point based on patterned graphene/gallium nitride hybridized with metasurfaces

物理学报. 2022, 71(6): 068101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211845>