

半导体基全光太赫兹空间调制器研究进展

何雨莲, 文岐业*

电子科技大学电子科学与工程学院电子薄膜与集成器件全国重点实验室, 四川 成都 611731

摘要 太赫兹 (THz) 技术在下一代移动通信技术、雷达成像技术、物质波谱识别、大气遥感和射电天文学等领域有着广泛的应用前景, 其中, 能够主动调控太赫兹波幅度、相位和频率等特性的调控器件已成为影响太赫兹技术实际应用的关键器件之一。空间光太赫兹调制器 (STM) 作为一种典型的空间型波前调控器件, 在波束偏转、波束扫描、特殊波束赋形, 甚至相控阵技术等方面有着重要的应用。总结、分析和归纳了近年来电控 STM 和光控 STM 的主要研究进展, 重点介绍了实现技术更简单、工艺成本更低的半导体基全光 STM。详细总结了这种全光 STM 的调制机制和计算模型, 系统总结了基于全光 STM 实现的太赫兹功能器件以及在太赫兹成像技术中的最新研究进展, 讨论了全光 STM 存在的局限, 并针对改善调制效率、降低器件插入损耗、提高激光利用率等方面提出多种新型器件结构。最后, 对全光 STM 未来的发展趋势进行了展望。

关键词 太赫兹波; 空间调制器; 半导体; 超材料/超表面; 太赫兹成像

中图分类号 O439 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/LOP231428

Research Progress in Semiconductor Based All-Optical Terahertz Spatial Modulators

He Yulian, Wen Qiye*

State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China

Abstract Terahertz (THz) technology has broad prospect in the fields of next-generation mobile communications, radar imaging, material identification, atmospheric remote sensing, radio astronomy, etc. Among them, regulating devices that can actively manipulate the amplitude, frequency, and phase of THz waves have become one of the core components for the actual applications. Spatial terahertz modulator (STM), as a special representative of spatial wavefront control devices, has shown important applications in beam steering, beam scanning, beam forming, and even phase arrayed technology. This paper summarizes and analyzes the state-of-the-art of electronically controlled STM and optically controlled STM in recent years, with an emphasis on the semiconductor based all-optical STM because of its simple manufacture and low cost. This paper detailedly summarizes the modulation mechanism and simulation model of this kind of all-optical STM, systematically overviews the functional devices based on all-optical STM as well as the corresponding recent advances in THz imaging, discusses the technique limits of current STMs, and then introduces several new device architectures that have been proposed to enhance the modulation efficiency, reduce the device insertion loss, improve the laser utilization, increase the modulation speed, and so on. Finally, the development trend of optically controlled STMs is discussed.

Key words terahertz waves; spatial modulator; semiconductor; metamaterial/metasurface; terahertz imaging

1 引言

空间光调制器 (SLM) 是一种在调制信号作用下,

能对入射波的某种或某些特性 (如振幅或强度、相位等) 的一维或二维分布进行空间和时间的变换或调制的器件。它的结构通常为一个由多个调制单元即“像

收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-06-05; 录用日期: 2023-07-18; 网络首发日期: 2023-08-02

基金项目: 国家自然科学基金 (61831012, 62235004)、四川省科技支撑项目 (2021JD TD0026)、四川省国(境)外高端人才引进项目 (2023JDGD0012)

通信作者: *qywen@uestu.edu.cn

素”组成的一维或二维阵列,这些像素单元均可独立地被调制信号控制,并且按照调制信号改变自身的光学特性,从而对入射波进行调制^[1]。因此,当入射波照射到 SLM 上时,这些像素单元将入射波分成若干份,对每一个像素单元进行单独控制,就可以改变入射波的空间分布。根据调制功能的不同,SLM 通常可分为振幅型 SLM 和相位型 SLM 两种。作为一种发展成熟的器件,SLM 的应用十分广泛:振幅型 SLM 主要可应用于结构光照明、投影显示、目标模拟、计算成像、光计算以及 3D 打印等领域;相位型 SLM 还具有更丰富的应用场景,包括光场调控、全息显示、全息测量、激光加工、光束整形、自适应光学、光通信、光束偏转、量子信息、光镊以及显微成像等。

近年来,频率介于微波与红外之间的太赫兹波(100 GHz~10 THz)因其诸多区别于其他频段电磁波的特有性质而举世瞩目^[2]。太赫兹波光子能量较低(0.41~41 meV),仅为 X 射线光子能量的十万分之一,远低于许多物质化学键键能,不足以引起分子的损坏或原子的激发,同时,它对许多介电材料和非极性物质均具有高透过率,可以穿透这些材料包装对隐藏在其中的不透明物体进行透视成像,因此非常适合用于无损检测或安全检查中。太赫兹波频谱极宽,包含了丰富的光谱信息,覆盖了许多极性大分子振动能级和转动能级间的跃迁、分子的弱相互作用以及大分子的骨架振动等,所以太赫兹波可以准确识别这些分子的特征共振峰,达到鉴别物质成分、分辨分子形貌甚至是研究分子结构等的目的。太赫兹波的波长较空气中悬浮颗粒尺寸更大,它在这些亚 μm 到几十 μm 的悬浮灰尘或烟尘中的散射远小于光波和红外波,因此可以在浓烟、沙尘环境中实现近无损传输,其波长较毫米波又更短,可以更清晰地分辨目标物体,获得低至几百 μm 的空间分辨成像精度。此外,太赫兹波作为微波和毫米波的延伸,频谱更宽,从 10^{11} Hz 跨越至 10^{13} Hz 近 10 THz 频带宽度,远大于毫米波所能提供的通信宽带。太赫兹波的这些特有性质使得它在无线通信、生物医学成像、国防安全、光谱检测、天文学等领域均有着广泛的应用前景^[3-5]。

显然,可在太赫兹波段高效工作的太赫兹空间调制器(STM)对太赫兹波的这些潜在应用的实现也是至关重要的。比如,在太赫兹成像系统中,STM 不仅可优化太赫兹成像系统空间分辨率和照度均匀性,还可以对太赫兹波前进行校正以控制时域光谱仪远场强度分布^[6]。太赫兹通信作为即将到来的 6G 技术的有力竞争者,可提供高达 Tbit/s 的数据传输速率^[7],然而太赫兹波在大气中严重的衰减又给太赫兹通信带来了新的挑战,这使得可实现太赫兹波束整形从而动态引导太赫兹波通过最有效路径传播的太赫兹主动器件 STM 成为必需^[8]。

液晶(LC)是一种具有晶格和流动性的聚合物,其

液晶分子的取向可随着外加电压的变化而变化,从而实现折射率的可调变化,因此,LC 被广泛应用于构建光波段 SLM,尤其是基于各向异性的相位型 SLM。然而,当其被应用于太赫兹波段时,液晶分子的双折射效应减弱。要实现有效的太赫兹波调制,所需的液晶层厚度更大甚至超过几百 μm ,如此厚的液晶层导致器件调制电压高达 100 V^[9],给利用液晶直接构建 STM 带来了巨大的挑战。超材料或超表面的兴起和繁荣使得实现基于液晶的 STM 成为可能,早在 2014 年,波士顿学院的 Padilla 团队就通过将异硫氰酸酯基液晶与超材料吸收体(MMA)结构结合构建了一个具有 6×6 像素单元阵列的 STM^[10]。该 STM 中每个像素单元的响应主要通过外加电压激励的方式控制覆盖于整个 MMA 表面的液晶二聚体来实现,且每个像素单元均可被独立控制,相应地,其可按意愿产生像素化的吸收率空间分布模式。在该 STM 中,MMA 的引入增强了太赫兹波与 LC 的相互作用,不仅大大减小了液晶层厚度,提升了器件的紧凑性,还极大地降低了调制器的工作电压,其仅在 15 V 的偏置电压作用下,即可实现高达 75% 的幅度调制深度。事实上,在更早的时候他们就已基于不同的 MMA 结构结合 n-GaAs 作为电介质隔层实现了一个 4×4 阵列的 STM,该 STM 中每一个像素单元的反射和吸收都可由外加电压独立寻址^[11]。利用该 STM 产生的实时可调、光谱敏感的空间掩模,他们更进一步实现了基于压缩感知的太赫兹单像素成像^[12]。

基于类似的电压控制方式,不同的超材料/超表面结构以及新材料包括石墨烯、相变材料氧化钒(VO_2)、机电可重构微镜阵列(MEMS)等相继被应用于实现 STM,表 1^[10-11,13-27]对现有电控 STM 的像素单元结构及基本的性能参数进行了总结。显然,这些电控 STM 的像素单元尺寸多为几十到几百、甚至上千 μm ,这就意味着电寻址 STM 可达到的空间分辨率有限。其次,由于其复杂的控制电路,这些电控 STM 所能实现的像素单元数量有限,甚至为了简化控制电路,某些电控 STM 中一个电极大多同时控制多个阵列单元,有限的像素单元阵列更进一步地退化为一维线性调制器件,造成 STM 器件的调控功能灵活性差。此外,这些 STM 器件多包含金属谐振结构,只能在特定波段附近低于百 GHz 的一个较窄带宽内工作,而且这些谐振结构还会给入射太赫兹波引入额外的损耗,导致器件幅度调制效率低,仅能达到中等甚至更低的调制水平,甚至受限于这些谐振结构以及控制电路复杂的制备工艺和高昂的制备成本,部分电控 STM 仍停留在概念设计阶段^[28-33]。

作为一种可选的方法,基于光信号调制的 STM 通常是通过将“像素化”的泵浦光束映射到高阻硅调制器表面,改变硅调制器表面载流子浓度的空间分布来实现对入射太赫兹波的空间调制。这种 STM 具有器

表 1 电控 STM 结构及性能参数总结

Table 1 Summary of the structure and parameters of electrically controlled STM

Pixel unit	Pixel size / (mm×mm)	Pixel array	Frequency /THz	Voltage /V	Modulation parameter (efficiency)	Ref.
Subwavelength split-resonant ring (SRR) array	4×4	4×4	0.36	14	Amplitude (35%–50%)	[13]
2×2 subarray of MMA-based array	1.2×1.2	4×4	2.72, 3.27, 3.81, 4.34	26.5	Amplitude (62%)	[11]
Single-atom graphene layer	0.7×0.7	4×4	0.57–0.63	–10, 40	Amplitude (~50%)	[14]
MMA array with LC	0.48×0.466	6×6	3.67	15	Amplitude (75%)	[10]
Graphene supercapacitor	1×1	5×5	0.1–1.5	2	Amplitude (62%±5%)	[15]
Sandwich structure of VO ₂ /sapphire/VO ₂	4×4	2×2	0.13–0.90	—	Amplitude (96%)	[16]
Metamaterials based on planar array of electric LC resonators	1×1.3	2×2	~0.45	1	Amplitude/36%	[17]
Graphene	30×50	1×10	1.1	–3	Phase(π/2)	[18]
Metasurface based on graphene array	1×8	1×8	0.98	26, –44	Beam steering(25°)	[19]
Electromechanical reconfigurable micromirror array	0.98×2.08	4×6	0.97–2.28	37	Amplitude(50%)	[20]
Metal-insulator-metal (MIM) structure with LC	8.5×0.34	3×8	0.67	40	Beam steering(32°)	[21]
Graphene	4×4	16×16	0.1–3.0	2	Amplitude(>70%)	[22]
MMA with LC	2.33×2.33	8×8	0.47–0.45	10	Frequency(20 GHz)	[23]
MIM with VO ₂	1.9×1.9	8×8	0.42–0.48	—	Amplitude(>65%)	[24]
MMA with LC	0.46×0.46	1×26	0.323	10	Phase(3π/4)	[25]
Asymmetric SRR array with LC	—	8×8	0.71	60	Amplitude(38.8%)	[26]
Asymmetric SRR array with LC	0.64×15.36	1×24	0.426	10	Phase(π)	[27]

件加工成本低、功能可调谐、可重复使用、调制速度快,以及像素尺寸与像素单元阵列原则上只受寻址光学成像系统分辨率的控制,而与调制器本身结构无关等优点,因此近年来受到了越来越多的关注。本文将首先概括全光调控 STM 工作原理、总结其现有的应用报道、分析其存在的不足,并针对全光调控 STM 中亟待解决的关键问题,重点综述相关的代表性研究成果。

2 硅基全光太赫兹空间调制器原理及应用

2.1 调制原理

热平衡下,半导体硅中自由载流子浓度总是保持恒定不变的,但当对其施加一定的外场,比如高能光子照射半导体硅,即入射激光的光子能量($h\nu$, h 为普朗克常量, ν 为入射激光频率)大于或等于硅材料的能带间隙(E_g)时,价带中的部分电子就会吸收光子能量后跃迁到导带,成为自由电子,同时在价带中形成相同数量的空穴,产生电子-空穴对,从而在半导体硅表面附近形成非平衡载流子^[34]。这些在激光辐射下产生的非平衡载流子通常也被称为光产生或光注入非平衡载流子,简称光生载流子,其浓度 ΔN 与入射光子能量密度(也就是入射激光功率密度 P)成正比。

$$\Delta N = \frac{(1-R)\alpha P \tau_{\text{eff}}}{h\nu} \exp(-\alpha x), \quad (1)$$

式中: R 和 α 分别为半导体硅调制器对入射激光的反射率和吸收系数; τ_{eff} 为光生载流子有效寿命。

这些非平衡载流子的存在可显著地增大半导体硅中自由载流子浓度 N , 而半导体硅中自由载流子对太赫兹辐射的响应可由 Drude 模型^[35-36] 描述。Drude 模型认为半导体硅中自由载流子可近似为仅受随机碰撞影响的经典点电荷,电子与电子间无相互作用,而且除碰撞的瞬间以外,电子与离子之间也无相互作用。因此,其与太赫兹波的相互作用可表达为

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{i\tilde{\sigma}(\omega)}{\omega\epsilon_0} = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\Gamma)}, \quad (2)$$

式中: $\tilde{\epsilon}(\omega)$ 为与圆频率 ω 相关的复介电常数 ($\omega = 2\pi f$, f 为太赫兹波频率); ϵ_{∞} 为半导体硅材料介电常数; ϵ_0 为真空介电常数; Γ 为载流子两次碰撞之间的平均时间间隔(弛豫时间)的倒数,称为阻尼速率; ω_p 和 $\tilde{\sigma}(\omega)$ 分别为等离子体频率和复电导率。其相应的计算公式为

$$\omega_p^2 = \frac{Nq^2}{\epsilon_0 m^*}, \quad (3)$$

$$\tilde{\sigma}(\omega) = \sigma_{dc} \frac{i\Gamma}{\omega + i\Gamma} = \frac{i\epsilon_0 \omega_p^2}{\omega + i\Gamma}, \quad (4)$$

式中: q 为电子电荷; m^* 为自由载流子有效质量; σ_{dc} 为直流电导率。其公式表示为

$$\sigma_{dc} = q\mu N, \quad (5)$$

式中: μ 为载流子迁移率。

显然,由光注入非平衡载流子的产生而引起的自由载流子浓度增加将增大半导体硅材料的电导率,在其附近形成暂态光电导层,表现出金属特性。当入射太赫兹波作用于该暂态层时,可对太赫兹波产生额外的反射或吸收,降低透射太赫兹波幅度。同时,式(3)~(5)表明:自由载流子浓度越大,半导体硅材料电导率越高,因而暂态光电导层对太赫兹波的损耗越大,透射太赫兹波幅度越小。由于光生载流子浓度又与入射激光功率密度成正比,所以,在光强分布不同的泵浦光作用下,半导体硅表面产生的光生载流子分布不同,从而形成不同的瞬态谐振结构,实现对太赫兹幅度、相位等特性的调制,这也就是全光 STM 的基本工作原理^[37]。

2.2 新型光控太赫兹波器件

全光太赫兹空间调制器工作原理表明,无论是高能的脉冲激光,还是低功率的连续激光,只要其辐射波长 λ 满足 $\lambda \leq 2\pi E_g/h$, 则均可作为泵浦激励源,作用于半导体硅表面实现太赫兹波的有效调控。相关的实验和理论研究也进一步验证了此结论^[38-39], 这意味着这种基于光信号调控的空间调制器成本效益更高且更高效^[40]。Alius 和 Dodel^[38] 利用 1060 nm 连续激光照射高阻硅片不仅获得了高达 70% 的最大调制深度,而且当同时使用两个相同的激光源作用该硅片时还可实现太赫兹波的相位和幅度调制。Kannegulla 等^[39] 则直接推导了连续激光作用下半导体内自由载流子浓度的分析表达式,仿真讨论了相关物理参数包括调制器厚度、太赫兹频率、辐射激光波长以及光斑大小等对太赫兹波调制性能的影响,证明了该方案可以以简单、经济的方式实现高性能(如调制效率高、调制深度大、调制速度快)的太赫兹波空间调制。这种光调制方法与电控空间调制技术相比具有诸多独特的优势,包括结构简单、加工成本低、制备灵活,以及宽带调制特性。在强度空间分布不同的激光作用下,该调制器可对太赫兹辐射的幅度、频率、相位和偏振等进行特殊调控,从而实现多种多样的新型光控太赫兹波器件,比如太赫兹波束转向器、滤波器、偏振器、动态变焦聚焦透镜等。

早在 1996 年,Brand^[41] 就已率先研究了半导体硅表面形成的不同的全光诱导等离子体图案(狭缝、Fresnel 波带片等)对毫米波的衍射效应,发现大部分入射波束均沿直线方向前进,只有一小部分入射波被衍射到两侧。随后,他又证明当将预先设计好的掩模版置于激励光源和半导体硅晶片之间并对齐,利用掩

模版在硅晶片表面形成等间距的明暗相间光学投影时,大部分入射波能量即被衍射到相邻的干涉最大值^[42]。该掩模版在硅晶片表面形成全光诱导的衍射光栅结构,当入射波与其相互作用时满足 Fraunhofer 衍射原理,因此入射波的反射光束方向可随着全光诱导的光栅结构周期的变化而变化。作为教科书中的典型示例,线光栅结构率先被应用于太赫兹波段。日本京都大学 Okada 等^[43] 利用 800 nm 飞秒激光器结合液晶 SLM 产生空间调制的超快脉冲激励光后作用于硅棱镜表面形成周期为 205 μm 的光诱导线光栅结构,并采用衰减全反射(ATR)技术研究了该光诱导周期结构的表面电磁特性,如图 1 所示。

在其 ATR 谱中 0.53 THz 出现特征最小值,同时证明了该光诱导结构具有金属性质,这也意味着此种全光诱导制备技术是实现太赫兹波主动器件结构的一种简单方法。由于该光诱导结构的金属性源于光生载流子的形成,而光生载流子的空间分布又可被液晶 SLM 自由地改变,因此该光器件中的光诱导平面结构图案的周期、形状和尺寸均可任意地动态变化。基于此,Okada 等^[44] 发现随着线光栅周期的减小,太赫兹波反射谱中的特征最小值频率由 0.4 THz 增大至 1.2 THz[图 1(c)],这意味着基于这类光设计器件,仅通过简单地改变光诱导结构周期即可实现太赫兹频率的实时、宽带调制。因为他们发现即使进一步将该光诱导结构设计为二维方块阵列结构,其特征频率与阵列周期仍然表现出相同的变化趋势[图 1(d)],而且该频率几乎不受泵浦脉冲功率的影响。

除了通过改变周期来实现太赫兹波的频率调制外,Cheng 和 Liu^[45] 发现这种全光诱导的线光栅结构还可用于构建极化角度可调谐的偏振器。通过在硅衬底上映射不同图案的光激励模式,包括灰度强度不同的均匀光[图 2(b)左列]、方向不同的线光栅结构[图 2(b)中列]以及 4×4 可重构孔径阵列[图 2(b)右列],系统地演示了太赫兹透射调制研究的典型代表,相应的实验装置和调制激励类型如图 2 所示。这些不同图案的光激励模式由数字光处理(DLP)投影仪生成并投影到电阻率 $> 20000 \Omega \cdot \text{cm}$ 的无掺杂、半绝缘硅片表面。当 DLP 输出为灰度强度逐渐增大的均匀光即按图 2(b)左列中的图案从下到上变化时,激励光强度增大,透射太赫兹波功率降低,可实现对太赫兹强度进行调制的目的。当 DLP 输出为线光栅图案时,该可重构太赫兹准光器件则可看作光诱导的太赫兹偏振器。由于该线光栅图案可以直接在硅片上光学生成,而无需任何纳米压印、光刻或是化学蚀刻等微加工工艺,因此通过简单地改变 DLP 生成的线光栅图像的旋转方向即可实现太赫兹波的偏振角的高速动态调控。但受限于 DLP 系统分辨率和非相干单色的汞灯泵浦光源,该偏振器消光比仅为 3 dB。为了实现高性能瞬态线光栅偏振器,Kamaraju 等^[46] 利用

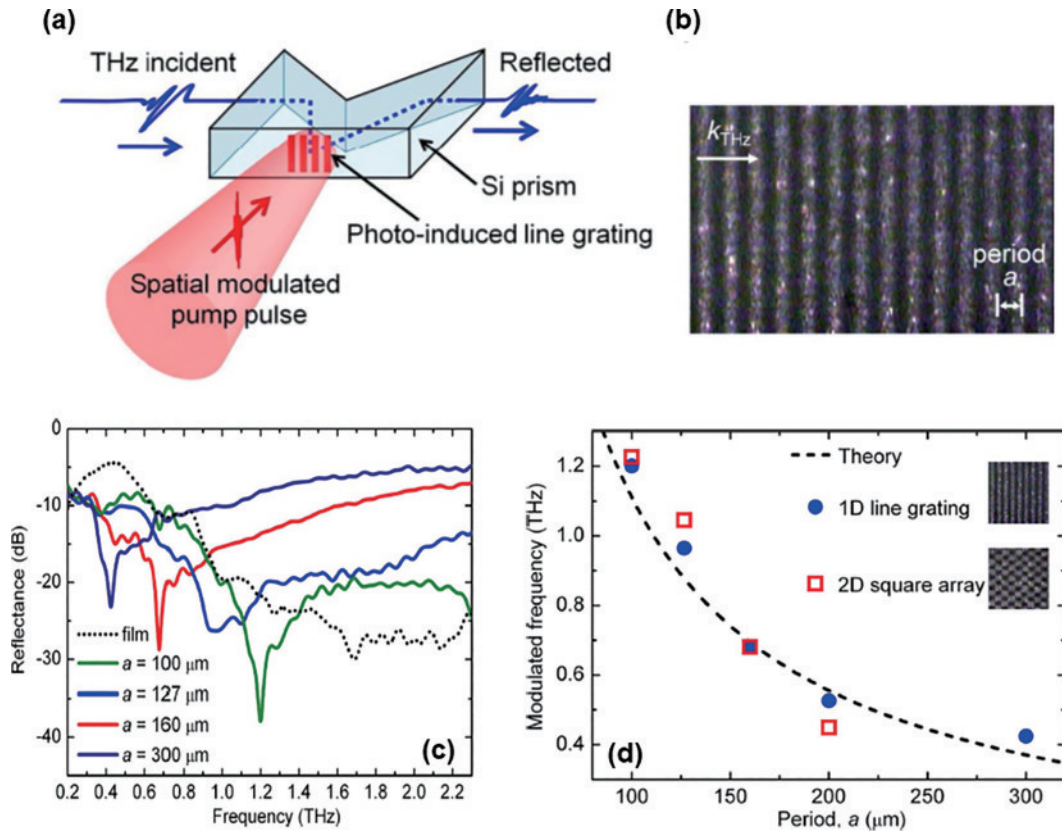


图 1 基于光诱导平面结构的太赫兹频率调制^[42]。(a) 硅棱镜表面平面光诱导线光栅图案的形成；(b) 光学显微图；(c) 调制特性随光栅周期的变化；(d) 反射谱特征最小值频率与光诱导平面结构周期的依赖关系

Fig. 1 THz frequency modulation based on photo-induced planar pattern^[42]. (a) Formation of planar light induced line grating patterns on the surface of silicon prisms; (b) optical microscope image; (c) modulation performance as a function of the period of the pattern; (d) dependence of spectral minimum frequency on structural periodicity

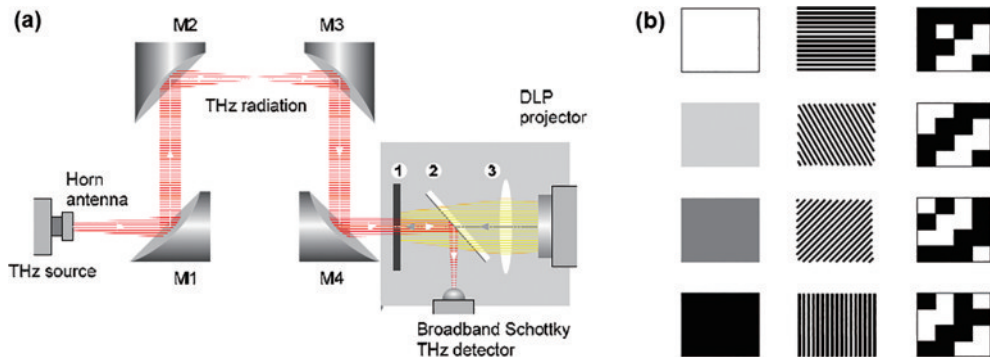


图 2 几种代表性太赫兹透射调制演示^[45]。(a) 太赫兹调制实验装置；(b) 不同图案的光激励模式

Fig. 2 Demonstration of several types of modulations with various photo-excited patterns^[45]. (a) Experimental setup for THz modulation. (b) light excitation modes of different patterns

经掩模版赋形后的 800 nm 飞秒激光脉冲照射半导体硅板, 创建了一个由平行金属线周期排列形成的瞬态线光栅结构, 获得了高达 10 倍数量级的功率消光比。作为一种可选的方法, 手性图案如希腊十字形状的光激励模式也已被成功地应用于控制太赫兹偏振^[47]。除了使用预先设计好的空间强度调制泵浦光束外, 两束平面波同时作用于硅晶片表面形成的干涉图案也是制备光诱导光栅结构的一种有效方法。Rizza 等^[48]从理论上研究了具有这种干涉图样的硅板的太赫兹

介电响应特性, 证明其光学响应随着形成的光栅的改变而改变并且可以在免于微细加工工艺的情况下获得双折射、双曲、各向异性负介电特性。然而, 迄今为止该研究仍还停留在理论研究阶段, 相关实验验证还未有报道。

Okada 等^[43]证明了利用硅片上形成的虚拟光栅实现太赫兹波频率调谐的可行性。类似的结论也得到了 Busch 等^[49]的证实: 随着虚拟光栅中线密度的增加, 光栅周期减小, 透射太赫兹信号的峰值向着高频方向移

动。同时,他们还发现该光诱导的虚拟光栅结构可有效调控太赫兹波束传播方向,但与文献[50]和[51]中提出的光诱导的菲涅耳带片(PI-FZP)相比,这种光栅结构可达到的太赫兹波束偏转角度较有限。利用PI-FZP对太赫兹波前进行空间编码,可同时实现太赫兹波束偏转和赋形,相应的代表性PI-FZP如图3(a)所示。图3(b)~(e)所示为不同光激励模式下探测得到的太赫兹波束二维轮廓图,其分别对应于无PI-FZP、

焦距和偏转角分别为70 nm和0°的PI-FZP、焦距和偏转角分别为50 nm和0°的PI-FZP以及焦距和偏转角分别为50 nm和6°的PI-FZP。显然:随着PI-FZP焦距的缩短,太赫兹波束逐渐聚焦、光斑减小;随着其偏转角的增大,太赫兹波束光斑也如预期一样偏离其原来的中心点。这种动态可调的太赫兹波束偏转和赋形功能使得PI-FZP在自适应太赫兹无线通信中有着广泛的应用前景。

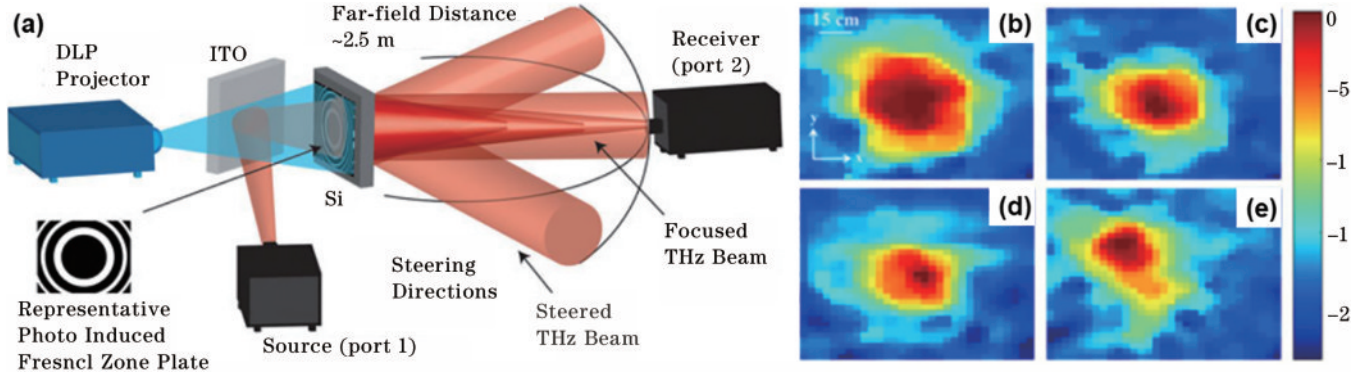


图3 PI-FZP的太赫兹调控性能^[51]。(a)实验装置;(b)~(e)不同PI-FZP光激励模式下探测得到的太赫兹波束二维轮廓图
Fig. 3 THz modulation of PI-FZP^[51]. (a) Experimental setup; (b)~(e) measured two-dimensional radiation intensities showing the THz beam profile for different PI-FZP patterns

利用全光太赫兹空间调制器进行太赫兹波前编码的另一个应用方向在于利用计算全息术产生太赫兹特殊波束^[52-53],如图4所示。利用传统SLM调控激励光束强度空间分布,在硅片表面产生所需的光生载流子空间分布后,因受到载流子浓度分布不同的影响,不同硅片位置对太赫兹波表现出不同的透射率,基于此,首都师范大学Xie等^[52]将由计算机生成的全

息图投影到硅表面后成功得到了具有特殊相位和幅度分布的太赫兹涡旋光束。随后,他们将亚波长尺寸的金属光栅与该光生太赫兹全息图结合,进一步获得了太赫兹矢量光束^[53]。这种对太赫兹波前进行编码产生太赫兹特殊光束的方法为太赫兹成像、太赫兹信息处理和太赫兹通信技术的实现开辟了新的途径。

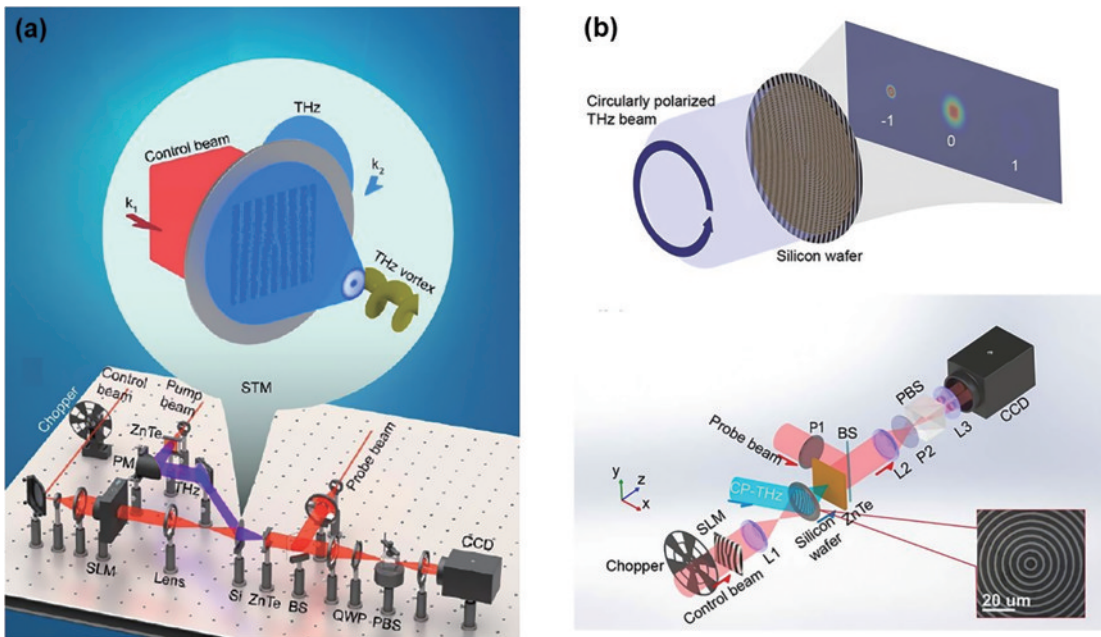


图4 太赫兹特殊光束的产生。(a)涡旋光束^[52];(b)矢量光束^[53]
Fig. 4 Generation of THz special beams. (a) Vortex beam^[52]; (b) vector beam^[53]

2.3 太赫兹成像

STM 作为一种正在快速发展中的主动太赫兹调控器件类型, 凭借其对太赫兹波束强大的调控能力, 已然成为了多个不同应用场景中必不可少的组件, 其中, 计算鬼成像和简单的单像素成像是其最主要的应用之一。这个成像过程可以由以下数学公式描述

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A} \Psi, \quad (6)$$

即将目标矢量 Ψ 投影到一个新的基点 \mathbf{A} , 且 \mathbf{A} 中基矢量则一一对应于 STM 表面不同空间分布的光激励调制模式, 相应地, 矢量 \mathbf{Y} 中的投影系数即为探测器记录得到的时间分辨探测信号。由于成像过程中的光激励调制模式是预先定义好的, 即式(6)中参数 \mathbf{Y} 和 \mathbf{A} 均已知, 因此, 目标矢量 Ψ 通过简单的矩阵逆运算即可求解得到, 从而重构出目标成像物体。详细的成像理论已在大量相关综述内完整地阐述, 这里就不再赘

述^[54-57]。由于基于 STM 的太赫兹波调控技术可同时实现太赫兹波强度和相位的可重构, 因此, 这种成像技术可以对多种多样的材料进行太赫兹成像, 比如金属分辨率卡^[58]、刀具^[59]、塑料^[60]、半透明材料^[61]、树叶^[62]以及电路板^[63]。图 5 为基于全光硅基 STM 的单像素太赫兹成像系统的典型结构, 在该研究中 Stantchev 等^[63]采用电阻率为 $1000 \Omega \cdot \text{cm}$ 、厚度为 $115 \mu\text{m}$ 的高阻硅晶圆作为太赫兹波调制器, 利用数字微镜器件(DMD)调控 800 nm 飞秒激光脉冲强度空间分布后与准直后的入射太赫兹脉冲相互协同并共同作用于硅片前界面同一区域, 此时 DMD 作用泵浦脉冲产生的二元激励图案可被直接写入太赫兹脉冲, 该调制后的太赫兹脉冲穿过 $115 \mu\text{m}$ 厚的硅调制器后与置于硅调制器后的被成像物体(金属车轮)相互作用, 随后其远场透射峰值被一个单像素探测器记录。

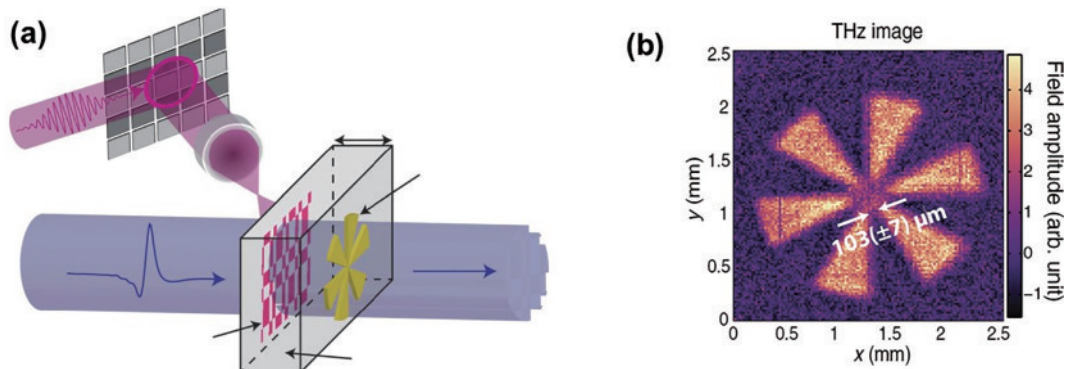


图 5 基于光寻址 STM 的单像素太赫兹成像技术^[63]。(a) 成像系统典型结构; (b) 太赫兹成像结果

Fig. 5 THz imaging based a single-pixel detector with optically controlled STM^[63]. (a) Typical schematic of imaging system; (b) THz imaging result

为了获得清晰的太赫兹成像结果, Stantchev 等记录了 N 个不同空间编码掩模下的 N 次测量结果。由于在太赫兹波与被成像物体相互作用前传输的距离较之波长短了很多, 因此, 此时记录得到的为远场 Fraunhofer 衍射发生前的太赫兹图像, 分辨率高达 $(103 \pm 7) \mu\text{m}$, 远低于该研究中使用的太赫兹波峰值波长 $375 \mu\text{m}$ 。更重要的是, 这个分辨率值主要是由有限厚度的光电调制器(硅片)决定的, 而不是该成像系统所能达到的极限值。随后, Stantchev 等^[58]通过减小硅片厚度至 $6 \mu\text{m}$ 进一步将成像分辨率提高到了 $9 \mu\text{m}$, 仅为 0.75 THz 太赫兹波波长的 $1/45$, 同时他们将该成像系统与自适应和压缩感知算法结合, 将其成像速度也提升了近 3 倍。当前, 基于全光 STM 的单像素太赫兹成像系统可达到的成像分辨率最高纪录为 0.5 THz 太赫兹波波长的 $1/133$ ^[64]。就成像速度而言, DMD 编码的硅全内反射调制器结合压缩感知对 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 阵列实现了 6 frame/s 的实时成像^[62]。由此可见, 这种基于全光硅基 STM 的单像素太赫兹成像技术具有高保真度、高分辨率、实时成像的优势。更重要的是, 它不仅可有效解决传统成像技术

中单点探测机械扫描成像法成像速度慢的问题, 还可克服当前商业焦平面阵列探测成像系统结构复杂、成本高昂的缺陷, 因此, 已然成为了当前太赫兹成像研究的焦点。

3 硅基全光太赫兹空间调制器的局限

尽管这种基于半导体硅的全光诱导超表面的太赫兹空间主动调制器件可快速、便捷地开关或调控宽带太赫兹波, 相较于其他空间调制技术更简单、成本效益更高且有潜力实现宽带、密集像素空间调制, 并具备在免于器件再加工的条件下实现太赫兹波任意波前动态调控的可行性, 因受到半导体硅本身性质的限制, 基于全光硅基 STM 的应用研究报道还十分有限, 其商用化进程仍面临着调制效率低、速度慢、损耗大等诸多挑战^[65]。

首先, 受制于半导体硅固有的微弱的电光特性, 基于本征硅晶圆的的全光 STM 调制效率通常较低^[39]。就裸硅而言, 其在 1 W/cm^2 光注入强度下测得的调制深度仅为 $20\% \sim 40\%$, 远低于相应的理论预测值, 当前导致这种差距产生的限制因素仍然未知, 而且, 如此低的

光调制效率也就意味着全光硅基 STM 需要更强的激光才能获得理想的调制效果。然而,更强的泵浦激光强度也意味着器件的能量消耗甚至是产热量也更大,尤其是高热量的产生更是会给耐热性较差的 DMD 器件性能带来致命的影响。因此,如何实现低光注入强度下的大调制深度是全光硅基 STM 进一步发展需要攻克的首个难关。

其次,由于硅材料本身折射率较大($n=3.42$),入射太赫兹波和泵浦激光由空气入射到调制器表面时,会因空气-硅界面处的折射率突变而导致太赫兹波和泵浦激光的反射率均很高。实验测试表明:对 300~1000 nm 波长的泵浦激光来说,其反射率约为 40%~60%,导致泵浦激光利用率低;对太赫兹波来说,则有近三分之一的入射波被反射^[66-68],甚至在某些全光硅基 STM 中该值更大^[69-71],达到 50%^[72],导致器件插入损耗大。如此高的插入损耗对 STM 的实际应用是非常不利的,尤其是当前太赫兹源输出功率仍然十分有限,同时来自硅表面的二次反射也会造成其时间窗口有限,导致光谱分辨率低。此外,大量反射的光波和太赫兹波还会给这种准光或全光太赫兹系统引入额外的干扰和噪声。由此可见,减小空气-硅界面的反射率对改善调制器性能具有重要意义。

最后,这种全光硅基太赫兹空间调制器的调制速率有限,通常仅能有效响应百 kHz 量级或是更低的动态调制频率,如何实现高速调制仍然是 STM 研究中一个亟待解决的关键问题。

为了克服以上缺陷,科学界基于不同材料、结构或技术提出了多种增强调制的新方法,这些改善方法要么通过将太赫兹波和泵浦激光的相互作用局部化在一个很小的区域内以增强它们之间的相互作用,要么通过优化光吸收、提高光量子效率的方式来实现更大的调制深度。其中:前一种方式通常需要在半导体表面

制备金属谐振结构,但这种器件仅能工作在较窄的频率带宽内,而且额外谐振结构的引入还会增加器件的制备复杂度和插入损耗;后一种方式则直接通过在半导体硅表面制备异质纳米材料薄膜形成复合结构来实现,包括代表性有机纳米材料铜酞菁(CuPc)、富勒烯衍生物(PCBM)、可溶性聚对苯乙炔(MEH-PPV)、钙钛矿(perovskite)、二乙胺基三氟化硫(DAST)等^[73-90],二维材料石墨烯、过渡金属硫化物二硫化钨(WS_2)、碲化钼($MoTe_2$)、六方氮化硼(h-BN)等^[91-109],以及金属纳米材料金纳米颗粒(Au NPs)、金纳米棒(Au NRs)、氧化铁纳米颗粒(Fe_3O_4 NPs)等^[110-112]。这些材料通常对太赫兹波透明,不会给器件带来额外的损耗,制备流程容易,成本效益也更高,更重要的是他们的复合结构还完美继承了半导体硅的大带宽调制特性,能显著改善器件的调制效率^[113],尤其是有机聚合物与硅的复合结构甚至可达到与理论预测相比拟的水平,具备了在低光注入强度下获得近完美调制表现的能力。然而,由于仍不清楚导致硅本征调制效率低的限制因素,因此目前关于这些复合结构调制性能增强的机理仍不明确,尽管一种较为普遍的观点认为这一增强现象来源于表面异质薄膜与硅构成的异质结使得光生电子-空穴对分离并进入异质薄膜,但该解释对 h-BN 等绝缘异质薄膜与硅形成的复合结构不再适用^[109,114-115],因此,调制增强产生机理仍有待研究。其次,这些半导体异质薄膜复合结构几乎均聚焦于静态调制性能(透射幅度/透射率调制深度)的提升,极少关注器件的动态响应(调制速度/响应速度),表 2 总结了当前基于这种复合结构的全光硅基 STM 中同时进行了静态调制性能和动态响应特性研究的结果^[71,84,88,90,94,96,103-104,109-112]。显然,全光硅基复合结构 STM 调制速度大多都较低,即便基于 CsPbBr₃ 量子点和 DAST 的硅基复合结构已实现了 MHz 量级的调制速度^[84,90],但该值相较于基于其他方法

表 2 基于异质薄膜复合结构的全光硅基 STM 性能参数对比

Table 2 Performance comparison of all-optical Si-based STM based on heterostructure

Heterogeneous film	Bandwidth /THz	Modulation depth /%	Modulation speed or response time	Ref.
CH ₃ NH ₃ PbBr ₃	0.2-2.0	80	80 kHz	[88]
MEH-PPV	0.2-2.6	99.5	2.56 ms	[94]
Graphene	0.8-1.4	92.7	0.2 s	[96]
WS ₂	0.2-1.6	94.8	~3 kHz	[103]
MoTe ₂	0.3-2.0	99.9	26.2 ms	[104]
h-BN	0.2-1.6	63	0.3 s	[109]
AuNPs	0.15-1.0	70	0.41 ms	[71]
AuNPs	0.2-1.2	80	3.8 kHz	[110]
AuNRs	0.2-1.2	69	4.6 kHz	[110]
AuNRs@PVA	0.2-1.1	80	3 kHz	[111]
Fe ₃ O ₄ NPs	0.2-2.6	92	~12 kHz	[112]
DAST	0.23-0.35	53	1.26 MHz	[84]
CsPbBr ₃	0.23-0.35	45.5	2.5 MHz	[90]

如石墨烯等离子体谐振器与 SRR 混合结构构建的调制器而言^[116], 仍存在极大的提升空间。而且, 它们的调制深度与其他同类器件相比较差一点, 工作带宽也较窄仅为 0.23~0.35 THz。该结果预示着这种复合结构的调制深度、速度和带宽三者间存在相互制约的关系: 可实现高调制深度、大工作带宽的复合结构, 它的调制速度或响应时间较低; 反之, 调制速度快的复合结构, 调制深度和工作带宽又较差。除此之外, 虽然这些异质薄膜本身对太赫兹波没有吸收, 但同时它们也无法解决因半导体本身折射率大导致的太赫兹波、光波反射率高、器件插损大、泵浦激光利用率低的问题。

4 半导体基全光太赫兹空间调制器性能增强研究

针对当前全光硅基太赫兹空间调制器存在的局限, 电子科技大学文岐业教授团队自 2015 年起开展了一系列的理论和实验探索, 提出了一系列改善全光硅

基太赫兹空间调制器性能的新方法或新结构。

首先, 为了厘清导致硅本征调制效率低的主要因素, 探寻基于异质薄膜-硅复合结构的全光 STM 中调制效率增强的理论依据, 电子科技大学文岐业教授团队基于半导体硅内载流子浓度的一般动力学方程, 并结合 Drude 模型和 Fresnel 传输矩阵, 建立了如图 6(a)^[117] 所示的全光硅基 STM 理论模型。该模型将激光作用半导体硅调制太赫兹波的过程看作入射太赫兹依次穿过由不同复折射率薄层组成的多层膜系。基于此, 推导了光生载流子浓度近似计算公式, 得到影响光生载流子浓度的因素有泵浦激光功率、激光波长和激光反射率, 以及硅厚度和载流子有效寿命等, 并系统地仿真分析了这些参数对器件调制深度的影响, 结果如图 6(b)~(e) 所示。仿真结果表明: 对于全光硅基 STM 来说, 选择 690~1050 nm 波长激光作为泵浦时, 器件调制深度更大; 其次, 器件调制深度会随着激光反射率的降低、或是载流子有效寿命的增大而增大,

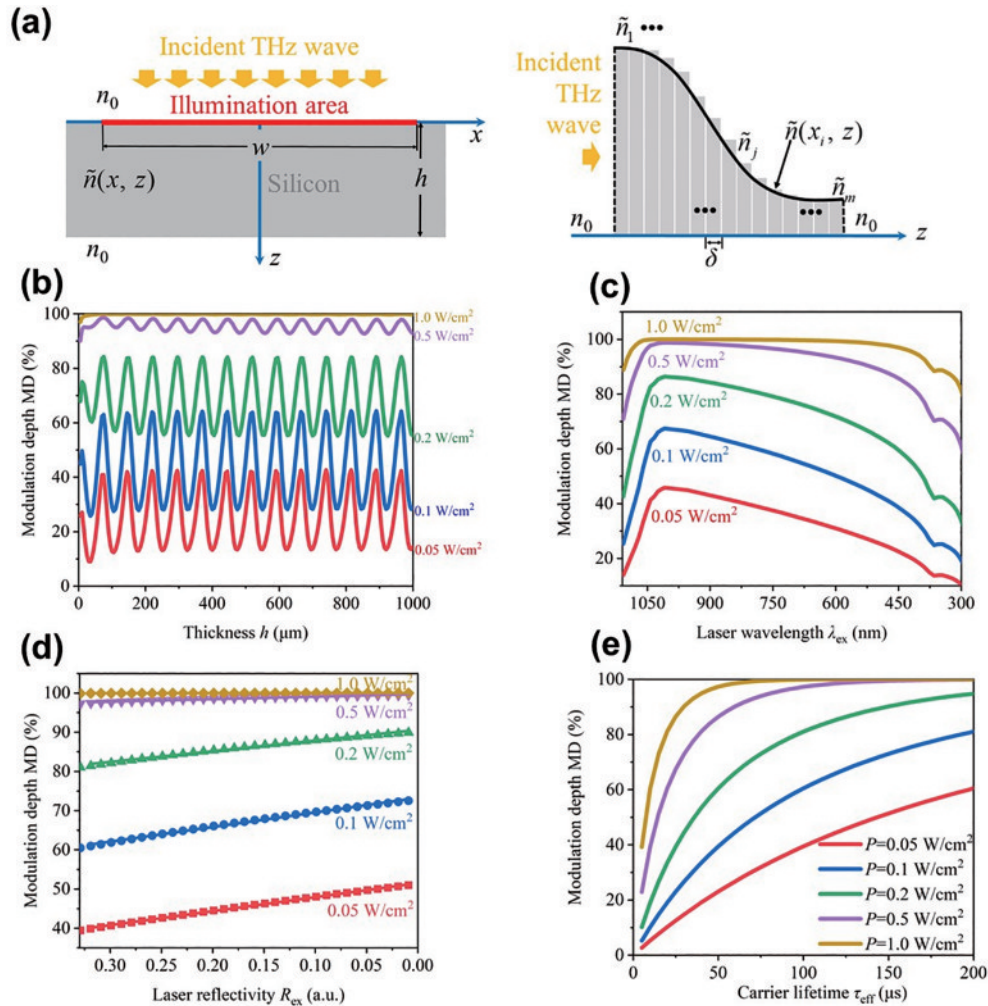


图 6 全光硅基 STM 理论研究^[117]。(a)理论模型; (b)调制深度随硅厚度的变化曲线; (c)调制深度随泵浦激光波长的变化曲线; (d)调制深度随泵浦激光反射率的变化曲线; (e)调制深度对载流子有效寿命的变化曲线

Fig. 6 Theoretical investigation on all-optical Si-based STM^[117]. (a) Theoretical model; (b) modulation depth variation curve with Si thickness; (c) modulation depth variation curve with pump laser wavelength; (d) modulation depth variation curve with laser reflectivity; (e) modulation depth variation curve with carrier lifetime

其中载流子有效寿命对调制深度的影响相对激光反射率更加显著。众所周知,载流子有效寿命是由载流子体寿命、扩散寿命和表面寿命三者共同决定,

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_{\text{bulk}}} + \frac{1}{\tau_{\text{diff}} + \tau_{\text{surf}}}, \quad (7)$$

式中:载流子扩散寿命 τ_{diff} 对有效寿命的影响较小可忽略;体寿命 τ_{eff} 则是由硅本身的质量决定。因此对于同一测试样品来说,载流子表面寿命 τ_{surf} 是影响其有效寿命的关键所在。载流子有效寿命的大小与硅表面载流子的复合过程强烈相关,表面复合率越高,表面寿命越短,相应的载流子有效寿命也越短。也就是说,对于全光硅基太赫兹调制器,其表面载流子复合过程的发生,会导致器件调制性能降低。因此,电子科技大学文岐业教授团队率先提出全光硅基 STM 实验结果与理论预期不符正是表面载流子的复合过程导致其有效寿命小于体寿命值,而基于异质薄膜-硅复合结构的全光 STM 中调制效率增强的本质则在于异质薄膜对半导体硅表面的钝化作用引起的载流子复合率降低和有效寿命延长。

为了证明以上猜想,电子科技大学文岐业教授团队利用太阳能电池领域常用的钝化膜 SiN_x 和 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$, 相继设计并制备了基于 SiN_x 单层和 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ 叠层钝化的两种全光硅基 STM ($\text{SiN}_x\text{-Si}$ 和 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2\text{-Si}$), 通过精确控制 SiN_x 单层和 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ 叠层薄膜厚度, 两种复合结构对 808 nm 泵浦激光反射的抑制能力相当, 均为 2.1%, 但 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ 叠层更优秀的表面钝化能力促使 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2\text{-Si}$ 中载流子有效寿命更长。正如预期, 该叠层钝化复合结构 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2\text{-Si}$ 的调制器性能也较 $\text{SiN}_x\text{-Si}$ 更好, 其调制深度更大, 宽带调制也更均匀。它只需 1 W 激光功率就实现了 0.2~1.0 THz 宽带范围内的均匀调制, 调制深度更高达 98.4%。由于载流子有效寿命是该叠层钝化复合结构与单层钝化复合结构之间唯一的变量, 这就意味着该增强的调制必然来自于更长的载流子有效寿命。换句话说, 该复合结构增强调制的本质就是 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ 叠层对硅表面的钝化作用。该研究进一步从实验上证明了表面钝化效应在全光硅基 STM 中的性能增强作用, 为不同异质薄膜-半导体复合结构中的太赫兹波调制的增强机制提供了一种普适、通用的解释。

众所周知, 电磁波防反射可通过几种不同的途径来实现, 包括: 基于相干相消干涉原理的单层或多层防反射膜、基于吸收的防反射涂层以及非均匀介质结构。显然, 对于全光硅基 STM 来说, 吸收型防反射涂层是不适用的, 因为这些器件通常希望抑制太赫兹波反射的同时还可增加其透射。就单层防反射膜而言, 它要求材料折射率满足 $n \approx \sqrt{n_{\text{Si}}}$ 且膜厚度为 1/4 波长, 这导致长波长的太赫兹所需厚度非常大, 在应用中是不切实际的, 而且这种单层防反射膜仅能工作在一个特

定的频率^[118]。然而, 太赫兹波固有的宽带特性使得它更需要一种可实现宽带增透的涂层, 尽管多层结构防反射膜可满足该要求, 但缺乏对太赫兹波吸收率低且折射率介于硅和空气之间的合适材料使得多层膜设计和制备非常复杂。综合来看, 非均匀介质防反射结构在太赫兹波段通用性和可操作性更强, 它基于硅表面制备的同质亚波长尺寸浮雕结构的增强入射波零级衍射效应, 可抑制宽带太赫兹波的反射损耗^[119-120]。基于此, 2018 年电子科技大学文岐业教授团队率先报道了一种利用硅纳米针 (SiNT) 阵列作为太赫兹波的防反射层, 实现低损耗、高光谱带宽全光硅基太赫兹调制器, 如图 7^[121] 所示。该 SiNT 阵列的“团簇结构”与空气从上而下形成折射率连续变化的非均匀介质特性, 使得该结构可同时实现对入射太赫兹波和泵浦激光反射的抑制作用, 且纳米针长度越长, 反射率越低。然而, 这种 SiNT-Si 要想获得更高的调制深度, 则必须精确控制纳米尖长度以及纳米尖与空气两者间的填充比, 制备难度大, 而且, 即便如此, 它的饱和调制深度仍然有限, 在 5 W/cm² 强度的 808 nm 泵浦激光作用下也仅获得了 75.8% 的调制深度。

基于文献 [121] 研究成果, 电子科技大学文岐业教授团队随后采用一种更简单、更易实现的制备方法——各向异性湿化学刻蚀技术, 该制备方法基于 KOH 刻蚀液的各向异性腐蚀特性, 对不同晶面上原子密度和激能不同的硅原子表现出不同的蚀刻速率, 其中 (100) 晶面刻蚀最快而 (111) 晶面最慢, 从而在半导体硅表面形成随机分布的密堆积类金字塔结构的微结构阵列 (Si-MPA), 如图 8^[122] 所示。该 Si-MPA 不仅有助于提高调制器对宽带波长范围内的激光的捕获能力, 而且大大增加了太赫兹波调制的有效面积。在不同波长的激光泵浦下, 其调制深度均可达到裸硅的 4 倍以上, 特别地, 当泵浦激光波长为 638 nm、激光强度为 1 W/cm² 时, 调制深度高达 93.8%。然而, 由于这些微金字塔结构尺寸集中在 2~10 μm , 远小于入射太赫兹波长, 因此该 Si-MPA 非均匀介质防反射结构只对泵浦激光有效, 而对太赫兹波失效, 导致硅基 STM 器件插入损耗无变化。为此, 电子科技大学文岐业教授团队进一步优化了制备流程, 将各向异性湿化学刻蚀技术与传统光刻技术相结合, 在半导体硅表面设计并制备了规则密分布的硅基同质微米量级的截顶金字塔阵列 (TPA), 该截顶金字塔结构具有亚太赫兹波长尺寸, 底部和顶部边长分别为 100 μm 和 60 μm 、高度为 30 μm 。同时, 考虑到光刻过程中制备的 SiO_2 掩模也是一种优秀的钝化膜, 有利于抑制硅表面复合过程提高调制器效率, 因此, 这里刻意地保留了微结构顶部的 SiO_2 掩模, 最终得到如图 9^[123] 所示基于表面微结构和部分表面钝化的全光硅基太赫兹调制器 (Si-TPA)。Si-TPA 表面形成的非均匀介质防反射结构将泵浦激光反射率降

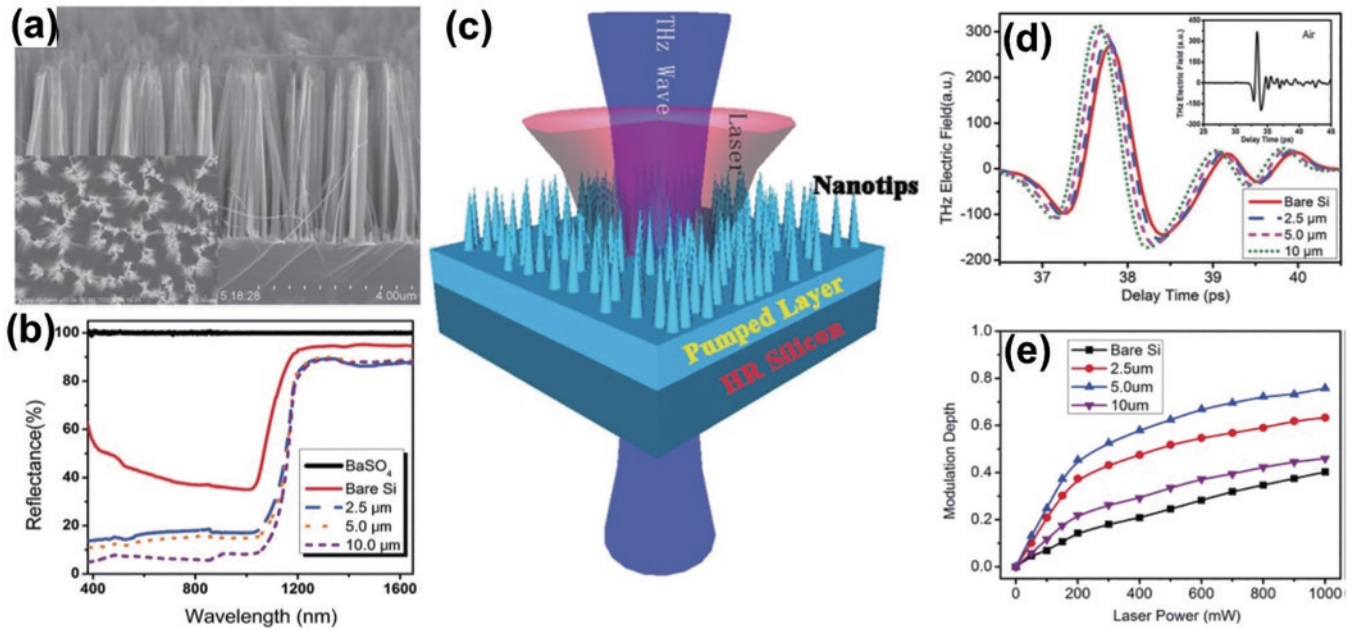


图 7 基于 SiNT-Si 的全光太赫兹调制器^[121]。(a) 硅纳米针扫描电镜 (SEM) 表征结果; (b) 激光反射率测试结果; (c) 基于 SiNT-Si 的全光太赫兹调制器结构示意图; (d) THz 时域谱; (e) 调制深度随激光功率的变化曲线
 Fig. 7 All-optical THz modulator based on SiNT-Si^[121]. (a) Scanning electron microscope (SEM) results of SiNT; (b) test results of laser reflectivity; (c) schematic of all-optical THz modulator based on SiNT-Si; (d) THz time-domain spectra; (e) modulation depth variation curves with laser power

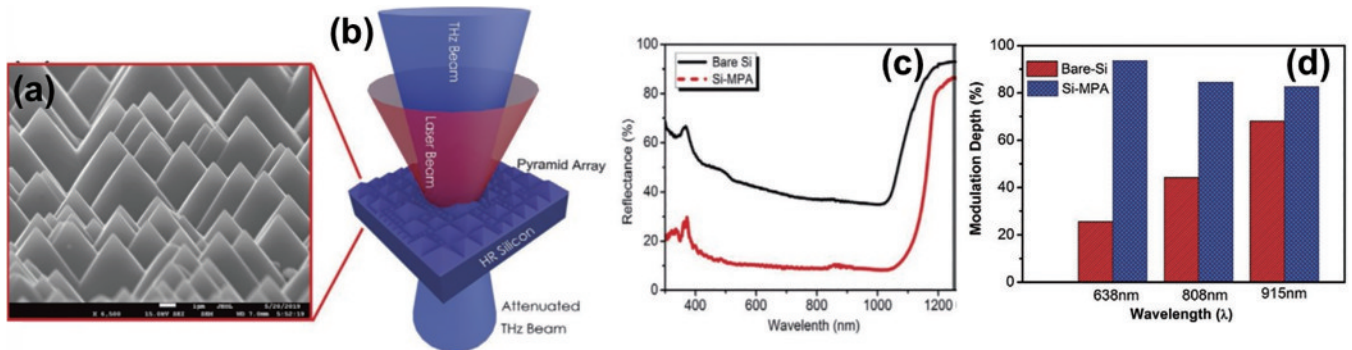


图 8 基于 MPA-Si 的全光太赫兹调制器^[122]。(a)(b) SEM 表征结果及基于 MPA-Si 的全光太赫兹调制器结构示意图; (c) 激光反射率测试结果; (d) 不同激光波长作用下的调制深度对比结果
 Fig. 8 All-optical THz modulator based on MPA-Si^[122]. (a)(b) SEM results and schematic of all-optical THz modulator based on MPA-Si; (c) results of laser reflection measurement; (d) comparison results of modulation depth obtained with different laser wavelengths

低了一半, 将太赫兹调制主动面积扩展了 20%, 同时刻意保留的 SiO₂ 掩模可有效钝化 TPA 平顶表面, 将 TPA-Si 载流子有效寿命提高了 3 倍, 最终在 0.53 W/cm² 强度泵浦激光作用下实现 91% 的调制深度, 相比 Si-MPA 所需激光功率降低了一半。但 TPA 高度有限且顶部边长较大, 太赫兹波在由空气入射到调制器表面时仍经历了一个较大折射率突变, 且折射率梯度变化过程有限, 这使得在实验中并未观察到明显的太赫兹波增透效果。尽管如此, 该 Si-TPA 更低的激光功率意味着更高的调制效率以及更低的器件热效应, 非常适用于基于 DMD 的单像素成像, 而且其同质微结构构成的类 MESA 结构可有效

抑制长载流子寿命导致的载流子侧向扩散, 有利于改善太赫兹成像分辨率。

硅作为间接带隙半导体, 由于其本身载流子寿命相对较长, 典型值为几十 μs 到亚 ms 量级, 因此有益于实现太赫兹波的高效调制, 然而, 如此长的载流子寿命通常将这类硅基调制器可实现的调制速度限制在百 kHz 量级以内。基于 SiN_x 单层和 SiN_x/SiO₂ 叠层钝化的全光硅基太赫兹调制器, 电子科技大学文岐业教授团队还发现载流子有效寿命也是影响器件响应速度的一个主要因素。尽管 SiN_x 单层和 SiN_x/SiO₂ 叠层优秀的表面钝化能力促使调制器效率显著提升, 但其动态响应速度却十分有限, 仅能响应几 kHz 的动态

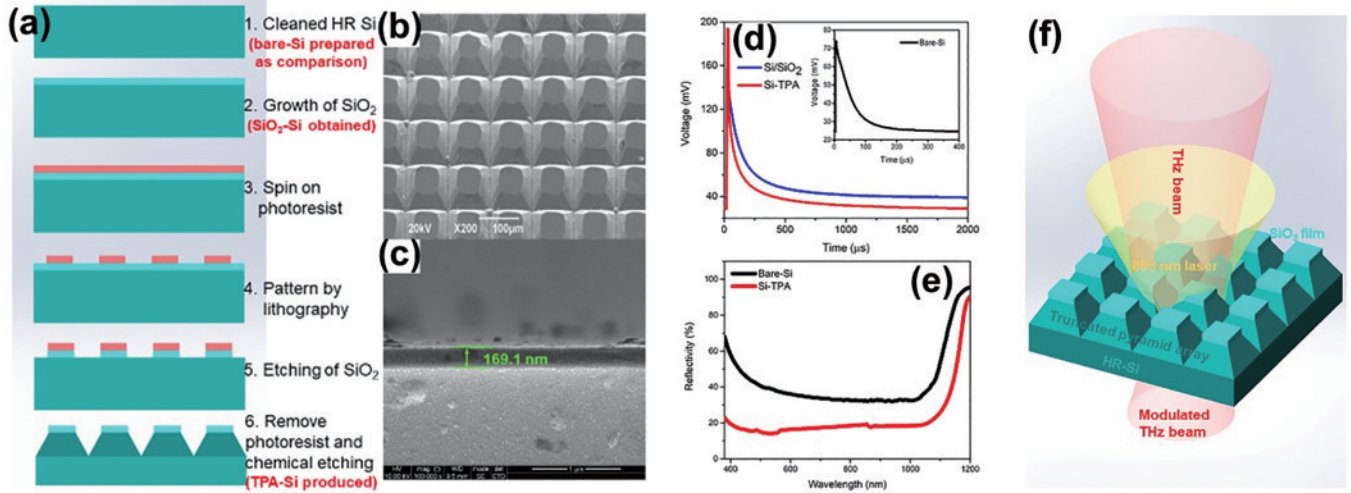


图 9 基于 TPA-Si 的全光太赫兹调制器研究^[123]。(a) 制备流程; (b) 表面 SEM 图; (c) 截面 SEM 图; (d) 载流子有效寿命表征结果; (e) 激光反射率测试结果; (f) 基于 TPA-Si 的全光太赫兹调制器结构示意图

Fig. 9 All-optical THz modulator based on TPA-Si^[123]. (a) Preparation procedure; (b) SEM result of TPA-Si surface; (c) SEM result of TPA-Si cross section; (d) measured results of effective lifetime of carriers; (e) results of laser reflection measurement; (f) schematic of all-optical THz modulator based on TPA-Si

调制,而且载流子寿命更长的 SiN_x/SiO₂-Si 的 3 dB 工作带宽小于载流子寿命较短的 SiN_x-Si (642 Hz), 仅为 410 Hz。由此可见,与调制效率相反,短的载流子寿命才是获得高速调制的关键。早在 2015 年,电子科技大学文岐业教授团队^[124]就已尝试通过将金(Au)原子掺入硅衬底提供有效复合中心,以缩短载流子寿命的方式提高硅基太赫兹调制器的调制速度,但该方式极大地牺牲了调制深度(低至 21%),即便如此,其最大调制速度也仅为 4.3 MHz。为了实现高速全光

太赫兹空间调制器,电子科技大学文岐业教授团队率先提出了利用载流子寿命低至 ns 甚至 ps 量级的直接带隙半导体砷化镓(GaAs)开展高速空间太赫兹调制技术研究,同时结合表面钝化技术优势克服 GaAs 太赫兹调控器件对强激光源的依赖,设计并制备了基于硫化学钝化的 GaAs 太赫兹调制器,如图 10^[125]所示,并利用自建的光泵浦太赫兹探测测试系统(OPTP)研究了 GaAs 砷化镓钝化前后的载流子动力学行为和太赫兹调制性能。

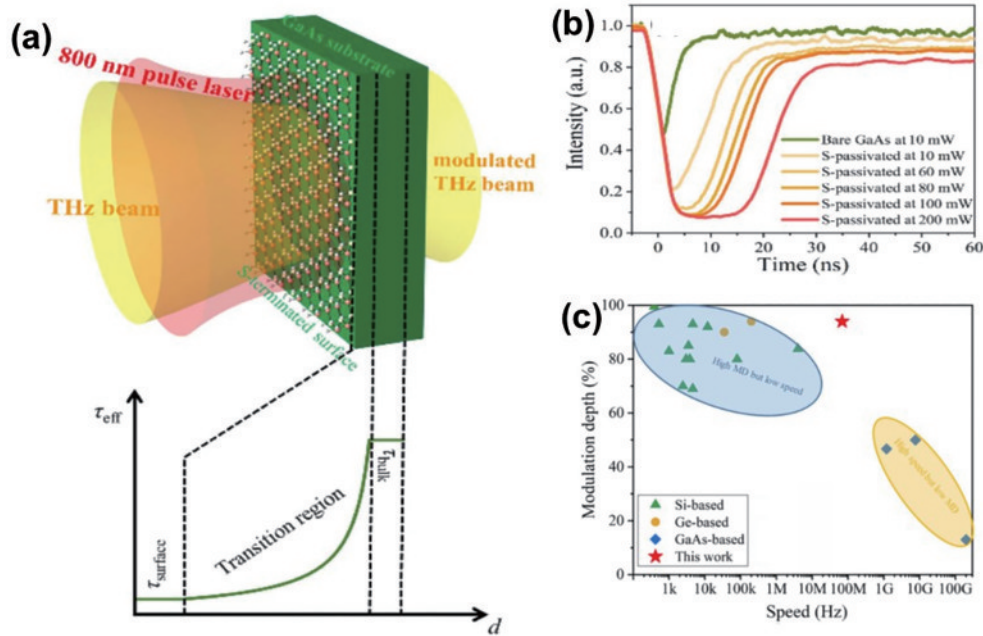


图 10 基于硫钝化的 GaAs 全光太赫兹调制器^[125]。(a) 结构示意图; (b) 动态响应表征结果; (c) 全光太赫兹调制器综合性能对比

Fig. 10 All-optical THz modulator based on S-passivated GaAs^[125]. (a) Structure diagram; (b) results of dynamic response characterization; (c) performance comparison of all-optical THz modulators

结果表明,钝化后的 GaAs 调制器载流子寿命提高了 1.5 倍,显著增强了低光掺杂下的太赫兹调制性能,并可在 60 mW 激光功率下获得了调制深度高达 94% 的 69 MHz 高速宽带太赫兹调制。该结果与现有的全光硅基太赫兹调制器相比,具有相当的调制深度但更快的调制速度。相较于 GaAs 调制器,该基于硫表面钝化的器件虽然响应速度有所下降,但具有大得多的调制深度以及宽带调制特性。这种可同时获得宽带、大调制深度、高速调制的器件在实际应用中是更加迫切需要的,它在一定程度上解决了当前全光硅基太赫兹调制器中调制深度与响应速度间相互制约的技术难题,在两者间取得了一定的平衡。该研究也为如何同时实现具有高调制效率和响应速度的太赫兹调制提供了一种新的设计思路。

5 结束语

根据激励方式的不同,本文首先概括了近年来电控和光控两种 STM 的研究进展,并重点综述了光控 STM 的工作机理、功能器件实现和太赫兹成像应用,分析了全光 STM 的技术局限,并总结了改善全光 STM 调制效率、器件插入损耗、泵浦激光利用率以及调制速度等方面的典型研究工作。就调制效率而言,基于表面钝化效应的异质薄膜-硅复合结构可在极低的泵浦功率($<1 \text{ W/cm}^2$)下实现 99% 调制深度,达到与理论计算相比拟的高调制效率水平,然而这些异质薄膜无法改善调制器插入损耗高、激光利用率低、调制速度有限的问题。表面微纳结构加工处理的硅基调制器可有效降低器件插入损耗同时提高激光利用率,然而,其微纳加工引入的额外缺陷使得这类调制器通常需要更大泵浦激光功率且需牺牲一定量的饱和调制深度,更重要的是,受限于硅较长的载流子有效寿命,其调制深度也仅停留在 kHz 量级。基于载流子体寿命低至 ns 甚至 ps 量级的直接带隙半导体砷化镓的超快动力学特性,同时实现了调制深度高达 95%,响应速度快至 69 MHz 的宽带太赫兹幅度调制,然而该调制器的泵浦源为飞秒脉冲激光。因此,如何在低功率连续激光作用下,同时实现效率高、速度快的宽带太赫兹调制仍是未来半导体全光 STM 研究的一个主流方向。

鉴于半导体基空间光学太赫兹调制器丰富的波前调控功能、CMOS 兼容的工艺实现方法、较低的制造成本和大规模大尺寸器件构建能力,其在太赫兹通信、成像、波谱检测等系统的应用潜力是巨大的。当然,实际应用系统也对 STM 器件提出了更高的要求,未来还需要结合实际应用场景进一步提升器件性能和拓展器件功能。

1) 在高速全光 STM 研究中,利用硫钝化砷化镓证明了表面钝化技术结合砷化镓超快载流子动力学特性同时实现具有高调制效率和响应速度的太赫兹调制

的可行性,但是该硫钝化的器件稳定性较差,钝化效果将随着在空气中放置时间的增加而逐渐失效,可进一步探索新的材料实现砷化镓表面稳定钝化,如采用结构致密的介质钝化薄膜 Al_2O_3 等隔绝空气的影响,同时,进一步探索砷化镓表面同质微纳结构制备方法,以期降低器件插入损耗和泵浦激光反射率也是十分必要的。

2) 在太赫兹波功能实现和成像应用中,需进一步提高泵浦光激励的均匀性和其在调制器表面投影的精确性、探究不同投影结构的功能应用等。

3) 随着太赫兹技术日益广泛的应用以及小型化可穿戴设备日益增长的需求,当前这种基于硬质半导体的全光 STM 无法与弯曲或不规则表面共形,难以应用在这些复杂表面系统中,有待进一步探索基于柔性材料的全光 STM 实现方法。

4) 智能反射超表面技术(RIS)成为太赫兹通信系统中提升通信覆盖范围、解决非视距传输问题的核心器件之一,而 STM 结构可以单独制备成介质超表面,或者与金属结构相集成构建复合超表面,采用全光控方法实现可重构的智能超表面器件。这对于实现低成本、大规模阵列和高速响应的 RIS 器件提供了一种可行的新途径。

参 考 文 献

- [1] 贺敬文,董涛,张岩. 太赫兹波前调制超表面器件研究进展[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(9): 20201033.
He J W, Dong T, Zhang Y. Development of metasurfaces for wavefront modulation in terahertz waveband[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(9): 20201033.
- [2] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [3] Federici J, Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(11): 111101.
- [4] Sun Q S, He Y Z, Liu K, et al. Recent advances in terahertz technology for biomedical applications[J]. Quantitative Imaging in Medicine and Surgery, 2017, 7(3): 345-355.
- [5] Jepsen P U, Cooke D G, Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging-modern techniques and applications[J]. Laser & Photonics Reviews, 2011, 5(1): 124-166.
- [6] Laurita N J, Cheng B, Barkhouser R, et al. A modified 8f geometry with reduced optical aberrations for improved time domain terahertz spectroscopy[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2016, 37(9): 894-902.
- [7] Nagatsuma T, Ducournau G, Renaud C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics[J]. Nature Photonics, 2016, 10(6): 371-379.
- [8] Fu X J, Yang F, Liu C X, et al. Terahertz beam steering technologies: from phased arrays to field-programmable metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(3): 1900628.
- [9] Lin X W, Wu J B, Hu W, et al. Self-polarizing terahertz

- liquid crystal phase shifter[J]. *AIP Advances*, 2011, 1(3): 032133.
- [10] Savo S, Shrekenhamer D, Padilla W J. Liquid crystal metamaterial absorber spatial light modulator for THz applications[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(3): 275-279.
- [11] Shrekenhamer D, Montoya J, Krishna S, et al. Four-color metamaterial absorber THz spatial light modulator [J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, 1(12): 905-909.
- [12] Watts C M, Shrekenhamer D, Montoya J, et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 605-609.
- [13] Chan W L, Chen H T, Taylor A J, et al. A spatial light modulator for terahertz beams[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(21): 213511.
- [14] Sensale-Rodriguez B, Rafique S, Yan R S, et al. Terahertz imaging employing graphene modulator arrays [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 2324-2330.
- [15] Kakenov N, Takan T, Ali Ozkan V, et al. Graphene-enabled electrically controlled terahertz spatial light modulators[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 1984-1987.
- [16] Hoque M N F, Karaoglan-Bebek G, Holtz M, et al. High performance spatial light modulators for terahertz applications[J]. *Optics Communications*, 2015, 350: 309-314.
- [17] Rout S, Sonkusale S R. A low-voltage high-speed terahertz spatial light modulator using active metamaterial [J]. *APL Photonics*, 2016, 1(8): 086102.
- [18] Kakenov N, Ergoktas M S, Balci O, et al. Graphene based terahertz phase modulators[J]. *2D Materials*, 2018, 5(3): 035018.
- [19] Tamagnone M, Capdevila S, Lombardo A, et al. Graphene reflectarray metasurface for terahertz beam steering and phase modulation[EB/OL]. (2018-06-05) [2023-03-05]. <https://arxiv.org/abs/1806.02202>.
- [20] Kappa J, Sokoluk D, Klingel S, et al. Electrically reconfigurable micromirror array for direct spatial light modulation of terahertz waves over a bandwidth wider than 1 THz[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 2597.
- [21] Wu J B, Shen Z, Ge S J, et al. Liquid crystal programmable metasurface for terahertz beam steering[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(13): 131104.
- [22] Malevich Y, Ergoktas M S, Bakan G, et al. Video-speed graphene modulator arrays for terahertz imaging applications[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(9): 2374-2380.
- [23] Li W L, Hu X M, Wu J B, et al. Dual-color terahertz spatial light modulator for single-pixel imaging[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 191.
- [24] Chen B W, Wu J B, Li W L, et al. Programmable terahertz metamaterials with non-volatile memory[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(4): 2100472.
- [25] Liu S, Xu F, Zhan J L, et al. Terahertz liquid crystal programmable metasurface based on resonance switching [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(7): 1891-1894.
- [26] Tao S N, Shen Z X, Yu H G, et al. Transflective spatial terahertz wave modulator[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(7): 1650-1653.
- [27] Liu C X, Yang F, Fu X J, et al. Programmable manipulations of terahertz beams by transmissive digital coding metasurfaces based on liquid crystals[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(22): 2100932.
- [28] Shabanpour J. Programmable anisotropic digital metasurface for independent manipulation of dual-polarized THz waves based on a voltage-controlled phase transition of VO₂ microwires[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(21): 7189-7199.
- [29] Wang H, Ling F, Zhang B. Tunable metasurfaces for independent control of linearly and circularly polarized terahertz waves[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36316-36326.
- [30] Shabanpour J, Beyraghi S, Cheldavi A. Ultrafast reprogrammable multifunctional vanadium-dioxide-assisted metasurface for dynamic THz wavefront engineering[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 8950.
- [31] Ren B, Feng Y X, Tang S A, et al. Dynamic control of THz polarization modulation and multi-channel beam generation using a programmable metasurface[J]. *Optics Express*, 2021, 29(11): 17258-17268.
- [32] Pan W M, Li J S, Zhou C. Switchable digital metasurface based on phase change material in the terahertz region[J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(4): 1070-1079.
- [33] Wang L, Yang Y, Deng L, et al. Vanadium dioxide embedded frequency reconfigurable metasurface for multi-dimensional multiplexing of terahertz communication[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(25): 255003.
- [34] 黄昆, 谢希德. 半导体物理[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- Huang K, Xie X D. *Semiconductor physics*[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [35] Ulbricht R, Hendry E, Shan J E, et al. Carrier dynamics in semiconductors studied with time-resolved terahertz spectroscopy[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2011, 83(2): 543-586.
- [36] van Exter M, Grischkowsky D. Carrier dynamics of electrons and holes in moderately doped silicon[J]. *Physical Review B*, 1990, 41(17): 12140-12149.
- [37] Guan S N, Cheng J R, Chang S J. Recent progress of terahertz spatial light modulators: materials, principles and applications[J]. *Micromachines*, 2022, 13(10): 1637.
- [38] Alius H, Dodel G. Amplitude-, phase-, and frequency modulation of far-infrared radiation by optical excitation of silicon[J]. *Infrared Physics*, 1991, 32: 1-11.
- [39] Kannegulla A, Shams M I B, Liu L, et al. Photo-induced spatial modulation of THz waves: opportunities and limitations[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32098-32112.
- [40] Georgiou G, Tyagi H K, Mulder P, et al. Photo-generated THz antennas[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 3584.
- [41] Brand G F. Diffraction of millimeter waves by projecting a shadow pattern onto a semiconductor[J]. *International*

- Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1996, 17(7): 1253-1262.
- [42] Brand G F. Remote millimeter-wave beam control by the illumination of a semiconductor[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(5): 855-857.
- [43] Okada T, Ooi K, Nakata Y, et al. Direct creation of a photoinduced metallic structure and its optical properties in the terahertz frequency region[J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1719-1721.
- [44] Okada T, Tanaka K. Photo-designed terahertz devices [J]. Scientific Reports, 2011, 1: 121.
- [45] Cheng L J, Liu L. Optical modulation of continuous terahertz waves towards cost-effective reconfigurable quasi-optical terahertz components[J]. Optics Express, 2013, 21(23): 28657-28667.
- [46] Kamaraju N, Rubano A, Jian L K, et al. Subcycle control of terahertz waveform polarization using all-optically induced transient metamaterials[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(2): e155.
- [47] Kanda N, Konishi K, Kuwata-Gonokami M. All-photoinduced terahertz optical activity[J]. Optics Letters, 2014, 39(11): 3274-3277.
- [48] Rizza C, Ciattoni A, Columbo L, et al. Terahertz optically tunable dielectric metamaterials without microfabrication [J]. Optics Letters, 2013, 38(8): 1307-1309.
- [49] Busch S, Scherger B, Scheller M, et al. Optically controlled terahertz beam steering and imaging[J]. Optics Letters, 2012, 37(8): 1391-1393.
- [50] Wang X K, Xie Z W, Sun W F, et al. Focusing and imaging of a virtual all-optical tunable terahertz Fresnel zone plate[J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4731-4734.
- [51] Shams M I B, Jiang Z G, Rahman S M, et al. A 740-GHz dynamic two-dimensional beam-steering and forming antenna based on photo-induced reconfigurable Fresnel zone plates[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2017, 7(3): 310-319.
- [52] Xie Z W, Wang X K, Ye J S, et al. Spatial terahertz modulator[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 3347.
- [53] Xie Z W, He J W, Wang X K, et al. Generation of terahertz vector beams with a concentric ring metal grating and photo-generated carriers[J]. Optics Letters, 2015, 40(3): 359-362.
- [54] Lee G, Lee J, Park Q H, et al. Frontiers in terahertz imaging applications beyond absorption cross-section and diffraction limits[J]. ACS Photonics, 2022, 9(5): 1500-1512.
- [55] Castro-Camus E, Koch M, Mittleman D M. Recent advances in terahertz imaging: 1999 to 2021[J]. Applied Physics B, 2021, 128(1): 12.
- [56] Valušis G, LISAUSKAS A, Yuan H, et al. Roadmap of terahertz imaging 2021[J]. Sensors, 2021, 21(12): 4092.
- [57] Lu T A, Qiu Z H, Zhang Z B, et al. Comprehensive comparison of single-pixel imaging methods[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 134: 106301.
- [58] Stantchev R I, Phillips D B, Hobson P, et al. Compressed sensing with near-field THz radiation[J]. Optica, 2017, 4(8): 989-992.
- [59] Shrekenhamer D, Watts C M, Padilla W J. Terahertz single pixel imaging with an optically controlled dynamic spatial light modulator[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12507-12518.
- [60] Chan W L, Charan K, Takhar D, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(12): 121105.
- [61] Zanutto L, Piccoli R, Dong J, et al. Time-domain terahertz compressive imaging[J]. Optics Express, 2020, 28(3): 3795-3802.
- [62] Stantchev R I, Yu X, Blu T, et al. Real-time terahertz imaging with a single-pixel detector[J]. Nature Communications, 2020, 11: 2535.
- [63] Stantchev R I, Sun B Q, Hornett S M, et al. Noninvasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector[J]. Science Advances, 2016, 2(6): e1600190.
- [64] Chen S C, Du L H, Meng K, et al. Terahertz wave near-field compressive imaging with a spatial resolution of over $\lambda/100$ [J]. Optics Letters, 2018, 44(1): 21-24.
- [65] Bai Y, Bu T, Chen K J, et al. Review about the optical-controlled terahertz waves modulator[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2015, 50(9): 707-727.
- [66] Liu W M, Fan F, Xu S T, et al. Terahertz wave modulation enhanced by laser processed PVA film on Si substrate[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 8304.
- [67] Fu M X, Wang X K, Wang S, et al. Efficient terahertz modulator based on photoexcited graphene[J]. Optical Materials, 2017, 66: 381-385.
- [68] Liu X, Zhang B, Wang G C, et al. Active terahertz wave modulator based on molybdenum disulfide[J]. Optical Materials, 2017, 73: 718-722.
- [69] Yue J, Ling F R, Yao J Q. All-optical tunable terahertz modulator based on a BiFeO₃/Si heterostructure[J]. Optical Materials Express, 2020, 10(11): 2919-2927.
- [70] Wei M Q, Zhang D N, Li Y P, et al. High-performance all-optical terahertz modulator based on graphene/TiO₂/Si trilayer heterojunctions[J]. Nanoscale Research Letters, 2019, 14(1): 1-6.
- [71] Wen T L, Zhang D N, Wen Q Y, et al. Enhanced optical modulation depth of terahertz waves by self-assembled monolayer of plasmonic gold nanoparticles[J]. Advanced Optical Materials, 2016, 4(12): 1974-1980.
- [72] Zhou R Y, Wang C, Huang Y X, et al. Optically enhanced terahertz modulation and sensing in aqueous environment with gold nanorods[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 133: 106147.
- [73] He T, Zhang B, Shen J L, et al. High-efficiency THz modulator based on phthalocyanine-compound organic films[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(5): 053303.
- [74] Yoo H K, Yoon Y, Lee K, et al. Highly efficient terahertz wave modulators by photo-excitation of organics/silicon bilayers[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(1): 011115.
- [75] Yoo H K, Kang C, Kee C S, et al. Characteristics of terahertz wave modulation using wavelength-selective

- photoexcitation in pentacene/Si and TIPS pentacene/Si bilayers[J]. *AIP Advances*, 2016, 6(11): 115310.
- [76] Matsui T, Mori H, Inose Y, et al. Efficient optical terahertz-transmission modulation in solution-processable organic semiconductor thin films on silicon substrate[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, 55(3S2): 03DC12.
- [77] Park J M, Sohn I B, Kang C, et al. Terahertz modulation using TIPS-pentacene thin films deposited on patterned silicon substrates[J]. *Optics Communications*, 2016, 359: 349-352.
- [78] Zhang B, He T, Shen J L, et al. Conjugated polymer-based broadband terahertz wave modulator[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6110-6113.
- [79] Wang W, Zhang B, Ji H Y, et al. Terahertz spatial-shift modulation by photo-excitation of polymer/silicon hybrid structures[J]. *Optics Communications*, 2018, 421: 110-114.
- [80] He T, Zhang B, Wang G C, et al. High efficiency THz-wave modulators based on conjugated polymer-based organic films[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(7): 075111.
- [81] Yoo H K, Lee H J, Lee K, et al. Conditions for optimal efficiency of PCBM-based terahertz modulators[J]. *AIP Advances*, 2017, 7(10): 105008.
- [82] Song M S, Kang C, Kee C S, et al. Trilayer hybrid structures for highly efficient THz modulation[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25315-25321.
- [83] Yoo H K, Cho S B, Park S J, et al. Metal-organic hybrid metamaterials for spectral-band selective active terahertz modulators[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11: 2765.
- [84] Li J S, Li S H, Zhang L. Terahertz modulator using 4-N, N-dimethylamino-4'-N'-methyl-stilbazolium tosylate (DAST)/Si hybrid structure[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(2): 5900306.
- [85] Liu Y Q, Li X A, Yang T T, et al. Mechanism of terahertz reflection enhancement on photo-excited MEH-PPV/PEDOT: PSS/Si hybrid structure[J]. *Modern Physics Letters B*, 2021, 35(28): 2150457.
- [86] Zhang B, Lv L F, He T, et al. Active terahertz device based on optically controlled organometal halide perovskite [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(9): 093301.
- [87] Lee K S, Kang R, Son B, et al. All-optical THz wave switching based on $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskites[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37912.
- [88] Liu D D, Wang W, Xiong L Y, et al. High-efficiency optical terahertz modulation of organometallic halide perovskite nanoplates on silicon[J]. *Optical Materials*, 2019, 96: 109368.
- [89] Lai W E, Ge C D, Yuan H, et al. NIR light driven terahertz wave modulator with a large modulation depth based on a silicon-PEDOT: PSS-perovskite hybrid system [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(4): 1901090.
- [90] Li S H, Li J S. Terahertz modulator a using CsPbBr_3 perovskite quantum dots heterostructure[J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(12): 224.
- [91] 付亚洲, 谭志勇, 王长, 等. 基于单层二硫化钨光控太赫兹调制器研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(5): 655-661.
- Fu Y Z, Tan Z Y, Wang C, et al. Research on optical controlled terahertz modulator based on monolayer tungsten disulfide[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(5): 655-661.
- [92] Weis P, Garcia-Pomar J L, Höh M, et al. Spectrally wide-band terahertz wave modulator based on optically tuned graphene[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(10): 9118-9124.
- [93] Du W Y, Yao Z H, Zhu L P, et al. Photodoping of graphene/silicon van der Waals heterostructure observed by terahertz emission spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(8): 081106.
- [94] Wang G C, Zhang B, Ji H Y, et al. Monolayer graphene based organic optical terahertz modulator[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(2): 023301.
- [95] Dai Z J, Jing Y, Cheng G, et al. Optically controlled graphene based terahertz modulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0125001.
- [96] Du W Y, Zhou Y X, Yao Z H, et al. Active broadband terahertz wave impedance matching based on optically doped graphene-silicon heterojunction[J]. *Nanotechnology*, 2019, 30(19): 195705.
- [97] Cao Y P, Gan S, Geng Z X, et al. Optically tuned terahertz modulator based on annealed multilayer MoS_2 [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22899.
- [98] Chen S, Fan F, Miao Y P, et al. Ultrasensitive terahertz modulation by silicon-grown MoS_2 nanosheets[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(8): 4713-4719.
- [99] Zheng W, Fan F, Chen M, et al. Optically pumped terahertz wave modulation in MoS_2 -Si heterostructure metasurface[J]. *AIP Advances*, 2016, 6(7): 075105.
- [100] Ji J E, Zhou S Y, Wang W J, et al. Active control of terahertz plasmon-induced transparency in the hybrid metamaterial/monolayer MoS_2 /Si structure[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(19): 9429-9435.
- [101] Hao S B, Cheng Y C, Zhou J P, et al. Enhanced terahertz transmission in molybdenum disulfide/silicon heterojunction[J]. *Advanced Photonics Research*, 2022, 3(5): 2100201.
- [102] Fan Z Y, Geng Z X, Lv X Q, et al. Optical controlled terahertz modulator based on tungsten disulfide nanosheet [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 14828.
- [103] Yang D S, Jiang T A, Cheng X A. Optically controlled terahertz modulator by liquid-exfoliated multilayer WS_2 nanosheets[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16364-16377.
- [104] Qiao J, Wang S P, Wang Z M, et al. Ultrasensitive and broadband all-optically controlled THz modulator based on MoTe_2 /Si van der Waals heterostructure[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(17): 2000160.
- [105] Jakhar A, Kumar P, Moudgil A, et al. Optically pumped broadband terahertz modulator based on nanostructured PtSe_2 thin films[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(7): 1901714.
- [106] Jakhar A, Kumar P, Husain S, et al. Integration of nanometer-thick 1T-TaS₂ films with silicon for an optically driven wide-band terahertz modulator[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(11): 10767-10777.

- [107] Fan Z Y, Geng Z X, Fang W H, et al. Characteristics of transition metal dichalcogenides in optical pumped modulator of terahertz wave[J]. *AIP Advances*, 2020, 10(4): 045304.
- [108] Li Z W, Li J S. Bi₂O₂Se for broadband terahertz wave switching[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(35): 11076-11079.
- [109] Yao Z H, Huang Y Y, Du W Y, et al. Interface-induced enhancement of THz generation and modulation in hexagonal boron nitride/Si mixed-dimensional van der Waals heterostructure[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2020, 10(2): 101-106.
- [110] Li Y P, Wen T L, Zhang D N, et al. Comparison study of gold nanorod and nanoparticle monolayer enhanced optical terahertz modulators[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, 9(5): 484-490.
- [111] Yu J P, Chen S, Fan F, et al. Accelerating terahertz all-optical modulation by hot carriers effects of silver nanorods in PVA film[J]. *AIP Advances*, 2019, 9(7): 075017.
- [112] Xiong L Y, Zhang B, Ji H Y, et al. Active optically controlled broadband terahertz modulator based on Fe₃O₄ nanoparticles[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, 8(5): 535-540.
- [113] Du W Y, Huang Y Y, Zhou Y X, et al. Terahertz interface physics: from terahertz wave propagation to terahertz wave generation[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55(22): 223002.
- [114] She R B, Liu W Q, Wei G L, et al. Terahertz single-pixel imaging improved by using silicon wafer with SiO₂ passivation[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(7): 2427.
- [115] Hooper I R, Grant N E, Barr L E, et al. High efficiency photomodulators for millimeter wave and THz radiation [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 18304.
- [116] Liu P Q, Luxmoore I J, Mikhailov S A, et al. Highly tunable hybrid metamaterials employing split-ring resonators strongly coupled to graphene surface plasmons [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8969.
- [117] 何雨莲. 表界面增强太赫兹波段可调器件研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022: 26-43.
He Y L. Research on terahertz modulators with surface/interface enhancement[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022: 26-43.
- [118] Gatesman A J, Waldman J, Ji M, et al. An anti-reflection coating for silicon optics at terahertz frequencies [J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 2000, 10(7): 264-266.
- [119] Chen Y W, Han P Y, Zhang X C. Tunable broadband antireflection structures for silicon at terahertz frequency [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(4): 041106.
- [120] Yu X, Goto K, Yasunaga Y, et al. Polymer-coated moth-eye hybrid structure for broadband antireflection in the terahertz region[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(15): 3761-3764.
- [121] Shi Z W, Cao X X, Wen Q Y, et al. Terahertz modulators based on silicon nanotip array[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(2): 1700620.
- [122] Wen Q Y, He Y L, Yang Q H, et al. High-performance photo-induced spatial terahertz modulator based on micropylramid silicon array[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(6): 1901058.
- [123] He Y L, Wang Y S, Li M, et al. All-optical spatial terahertz modulator with surface-textured and passivated silicon[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8914-8925.
- [124] 田伟, 文岐业, 陈智, 等. 硅基全光宽带太赫兹幅度调制器的研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(2): 028401.
Tian W, Wen Q Y, Chen Z, et al. Optically tuned wideband terahertz wave amplitude modulator based on gold-doped silicon[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(2): 028401.
- [125] He Y L, Wang Y S, Yang Q H, et al. Enhanced performance of a fast GaAs-based terahertz modulator via surface passivation[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(11): 2230-2236.