

## 基于硅基 MXene 膜层阻抗可调性的太赫兹波反射调控

王道远<sup>1</sup>, 高成喆<sup>1</sup>, 黄婉霞<sup>1</sup>, 孟坤<sup>2</sup>, 施奇武<sup>1\*</sup><sup>1</sup>四川大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610065;<sup>2</sup>青岛青源峰达太赫兹科技有限公司, 山东 青岛 266104

**摘要** 对太赫兹 (THz) 波的传输调控是 THz 光学系统设计、通信、成像应用等领域的基础技术之一。界面阻抗匹配效应可以用于实现高效 THz 波反射调控, 但尚未见硅基界面阻抗设计实现 THz 波调控的报道。本研究利用自组合法在高阻硅基底上制备 MXene 膜层, 通过增加膜层厚度改变其电阻特性, 进而连续调节 Si/MXene/空气界面阻抗, 实现高效的 THz 波减反射。在接近阻抗匹配态时, 界面 THz 波反射率减少幅度达 83%, 透过率衰减约为 30%。还利用 THz 波层析扫描成像技术, 得到了 Si/MXene/空气界面阻抗变化导致的 THz 波反射强度变化趋势。设计的具有高效 THz 波反射调控性能的 Si 基功能界面为 THz 波传输调控提供了一种新思路。

**关键词** 太赫兹; 调制; Mxene 材料; 阻抗匹配

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231068

## Terahertz Wave Reflection Regulation Based on Controllable Impedance of Silicon-Based MXene Layers

Wang Daoyuan<sup>1</sup>, Gao Chengzhe<sup>1</sup>, Huang Wanxia<sup>1</sup>, Meng Kun<sup>2</sup>, Shi Qiwu<sup>1\*</sup><sup>1</sup>College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;<sup>2</sup>Qingdao QUNDA Terahertz Technology Co., Ltd., Qingdao 266104, Shandong, China

**Abstract** Efficient regulation of terahertz (THz) waves is crucial for their utilization in THz optical system, communications, imaging, etc. High-efficiency THz wave reflection regulation can be achieved through interface impedance matching. However, there have been no reports of THz wave regulation achieved via silicon-based interface impedance design. In this study, MXene films were fabricated on high-resistance silicon substrates using the self-assembly method, and their resistance were changed by increasing the thickness of the film. The impedance of the Si/MXene/air interface was continuously adjusted to achieve efficient THz wave attenuation. When approaching the impedance-matched state, the THz reflectivity at the interface is reduced by 83%, while the transmittance decays by approximately 30%. This study also confirmed the variation trend in THz wave reflection intensity resulting from the impedance change of the Si/MXene/air interface, employing THz wave tomography imaging technology. The silicon-based functional interface designed in this work, which offers efficient THz wave reflection regulation, presents a novel approach for achieving THz wave transmission regulation.

**Key words** terahertz; regulation; Mxene; impedance matching

## 1 引言

太赫兹 (THz) 波一般指频率位于 0.1~10 THz 的电磁波, 对应波长为 3000~30  $\mu\text{m}$ , 波段位于微波和红外之间, 并且处于电子学向光子学过渡区域。由于 THz 波具有频带宽、信噪比高、瞬态性等特点<sup>[1-5]</sup>, 且很多大分子的振动和转动能级也处于该波段, 因此 THz

波在高速宽带通信、无损检测、生物医学诊断等领域有着极为广泛的应用前景。THz 波的传输调控在实际应用中起着关键性的作用, 能够实现 THz 波透射、反射、偏振等信号的调谐<sup>[6]</sup>, 研发性能好、调控作用明显、调控方式简便可控的 THz 可调材料与器件已经成为当前研究的热点。

实现 THz 传输调控的功能材料主要有 3 种思路:

收稿日期: 2023-04-11; 修回日期: 2023-04-29; 录用日期: 2023-05-04; 网络首发日期: 2023-05-14

基金项目: NSAF 基金(U2230128, U1930123)、国家自然科学基金(U20A20212)、四川省自然科学基金(2022NSFSC0498)

通信作者: \*shiqiwu@scu.edu.cn

一是利用二维(2D)材料、超导体、掺杂半导体、液晶、相变材料等光电参数可调的特性,在外加激励下调控 THz 波的透射、反射等<sup>[7-10]</sup>;二是设计人工电磁超材料,通过设计结构单元及其排布,实现对 THz 波传输模式、相位、极化等特性的有效调控<sup>[11-13]</sup>;三是将上述两种方式结合,利用光电参数可调材料调节超材料电磁特性,实现对 THz 波传输的动态调控。但是,现有研究普遍存在 THz 波调控效率不高、材料制备条件苛刻、复合加工难度较大等问题。因此,研究基于新材料、新机制的 THz 波调控技术具有重要意义。

Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene 作为一种新型合成二维过渡族金属碳氮化物,在 2011 年由德雷塞尔大学的 Gogotsi 教授团队<sup>[14]</sup>通过刻蚀 MAX 相中的 A 层原子制备得到,其结构类似于石墨烯,所以被命名为 MXene。其由于具有超高的电导率、溶液制备特性、层片状生长结构、表面丰富的官能团,在能源存储、催化、电磁屏蔽及传感等领域有着广泛的应用前景<sup>[15-17]</sup>。已有研究表明,Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 也表现出明显的 THz 波调控特性,已被探索应用于超快 THz 光控开关<sup>[18]</sup>、THz 波屏蔽<sup>[19]</sup>等领域。但是, MXene 材料在 THz 研究领域才刚起步,其功能性和应用场景还有待继续扩展。

本文设计了一种硅基 MXene 膜层,用于实现高效的 THz 波反射调控。采用界面自组合法在经过亲水处理的高阻硅表面制备 MXene 薄膜,基于界面阻抗匹配理论,通过增加 MXene 的堆叠层数改变膜层电导,进而连续调节 Si/MXene/Air 界面阻抗。实验观测到 THz 波反射强度大幅变化,利用 THz 层析成像技术对界面处的 THz 波反射特性进行了扫描成像,验证了这

种功能化膜层的 THz 反射调控特性。研究还利用菲涅耳反射公式和传输线中的阻抗匹配模型对该材料的 THz 波传输调控机制进行分析。本文所采用的自组合法可以高效快捷地在硅衬底上制备 MXene 薄膜,为 THz 反射调控器件的研究提供了一个新方案与思路。

## 2 制备与原理

### 2.1 制备过程

本文所制备的 MXene 是通过 HCl+LiF 刻蚀方法获得的<sup>[20]</sup>。利用 HCl+LiF 的刻蚀剂将 Al 原子从 Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> MAX 相中刻蚀掉,随后通过离心清洗溶液,进一步超声分层,得到包含 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene 的分散水溶液;之后在分散液中分别加入 HNO<sub>3</sub> 和乙酸乙酯,促使 MXene 纳米片在溶液与空气界面发生自组装,最终形成连续的膜层;再将进行过亲水处理的高阻硅衬底放入水溶液中,缓慢将浮于水溶液表面的薄膜打捞于衬底上,完成样品制备;通过重复上述过程,即可获得不同层数堆叠的 MXene 薄膜样品<sup>[21]</sup>。

### 2.2 阻抗匹配模型

图 1(a)和图 1(b)分别为 THz 波穿透空白高阻硅衬底和高阻硅/MXene 薄膜样品的传输示意图。当 THz 波以  $\theta_1$  的角度入射到衬底与空气之间的界面时,衬底与薄膜之间产生反射信号  $E_{r1}$  并且同时产生折射角为  $\theta_2$  的折射信号,而这个信号在衬底底部/空气界面再次发生反射和折射。利用菲涅耳反射方程,可以得到 THz 波从衬底向空气传输的界面位置的反射率  $r_{21}$  和透射率  $t_{21}$ <sup>[22-23]</sup>,具体公式分别为

$$r_{21} = \frac{\cos \theta_1 n_2 - \cos \theta_2 n_1}{\cos \theta_1 n_2 + \cos \theta_2 n_1}, \quad (1)$$

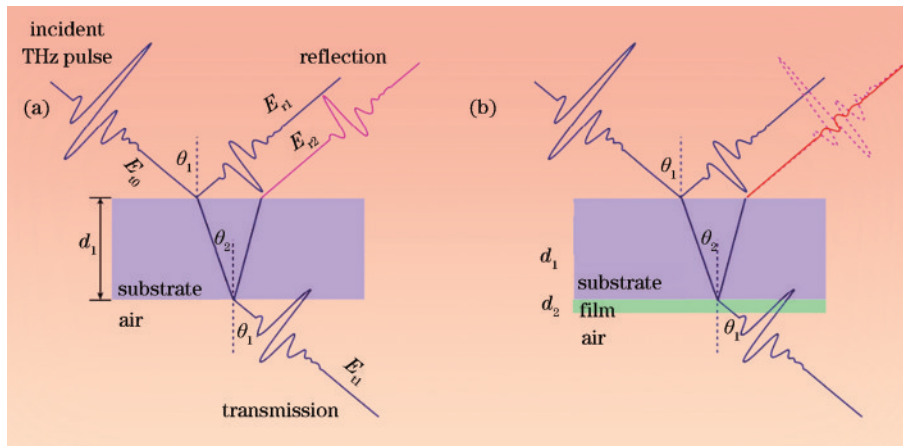


图 1 阻抗匹配模型示意图。(a) THz 波透射空白高阻硅衬底的传输示意图;(b) THz 波透射高阻硅/MXene 膜层的传输示意图

Fig. 1 Schematic of the impedance matching model. (a) THz transmission through pure Si substrate; (b) THz transmission through Si/MXene film

$$t_{21} = \frac{2\cos\theta_2 n_2}{\cos\theta_1 n_2 + \cos\theta_2 n_1}, \quad (2)$$

式中; $n_1$ 和 $n_2$ 分别指空气和衬底的折射率; $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 为从衬底到空气界面 THz 波传输的折射角和入射角。界

面处之所以会发生反射,主要由于衬底与空气之间的阻抗并不能达到一致。因此,在衬底与空气之间加入导电层 MXene 薄膜理论上可以调节界面阻抗,进而影响界面上的 THz 波反射强度。由于 MXene 膜层的厚

度远小于 THz 光波长,可以忽略 THz 波在传输过程中薄膜厚度对其产生的影响。根据传输线理论,并利用菲涅耳反射方程进行推导,得出 THz 波在高阻硅/MXene/空气界面的反射率  $r_{\text{film}}$  和透射率  $t_{\text{film}}$ ,具体公式分别为

$$r_{\text{film}} = \frac{\cos \theta_1 n_2 - \cos \theta_2 n_1 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 Z_0 \sigma}{\cos \theta_1 n_2 + \cos \theta_2 n_1 + \cos \theta_1 \cos \theta_2 Z_0 \sigma}, \quad (3)$$

$$t_{\text{film}} = \frac{2 \cos \theta_2 n_2}{\cos \theta_1 n_2 + \cos \theta_2 n_1 + \cos \theta_1 \cos \theta_2 Z_0 \sigma}, \quad (4)$$

式中:  $Z_0$  是自由空间阻抗;  $\sigma$  是导电薄膜的面电导。通过式(3)可知,当入射角度确定时, THz 波在硅衬底/MXene 薄膜/空气之间的反射率主要取决于薄膜的面电导。当薄膜的面电导不断增大时,界面的 THz 波反射强度不断减小,即逐渐接近阻抗匹配状态;当整个薄

膜满足  $\cos \theta_1 n_2 - \cos \theta_2 n_1 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 Z_0 \sigma = 0$  条件时,即达到阻抗匹配的状态,反射率减小为 0;随着薄膜面电导的继续增加,界面阻抗不再匹配, THz 反射率开始不断增大,反射信号增强,最终出现相位相反情况。

### 3 分析与讨论

图 2(a)~(d) 分别显示了硅衬底上堆叠的不同层数(1 层、2 层、4 层、8 层)自组装 MXene 膜层的 SEM 表面形貌图。可以看出,硅衬底上的表面膜层由纳米片各自连接堆叠,形成致密的连续薄膜,随着膜层厚度的增加, MXene 膜层整体均匀性未出现明显的差异,没有出现明显的孔隙缺陷和脱落的情况。这为后期研究分析样品的 THz 波传输特性排除了膜层缺陷所带来的干扰。

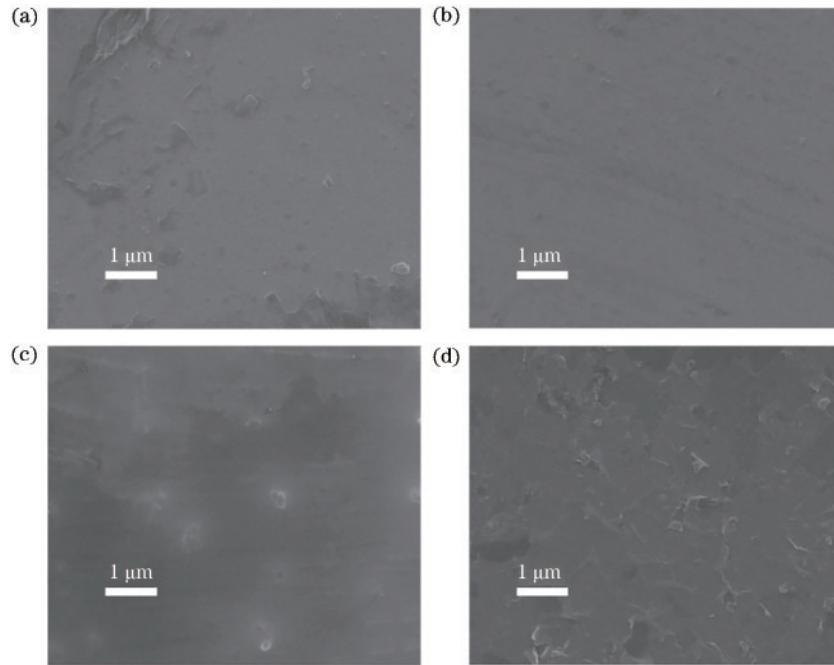


图 2 不同堆叠层数 MXene 薄膜的扫描电镜表面形貌。(a) 1 层;(b) 2 层;(c) 4 层;(d) 8 层

Fig. 2 SEM morphology of MXene film with different stacking layers. (a) 1 layer; (b) 2 layers; (c) 4 layers; (d) 8 layers

利用反射式 THz-TDS 系统测试硅衬底上不同厚度 MXene 薄层的 THz 波反射特性。图 3(a)~(d) 分别为 4 个不同入射角度下的时域光谱结果。当 THz 波入射到硅衬底表面时,首先在上界面 Air/Si 处 THz 波发生一次反射,即图 1 所示的  $E_{r1}$  信号,随后 THz 波继续向内部进行传播,在第二个界面 Si/MXene/Air 处产生二次反射峰  $E_{r2}$ 。在图 3(a)~(d) 中,当 THz 波入射角度保持不变时,可以看出所有一次反射信号  $E_{r1}$  具有较为一致的振幅,说明 Air/Si 界面对 THz 波的一次反射不会产生明显影响。而二次 THz 反射信号  $E_{r2}$  随着 MXene 层数的不同和入射角度的改变发生了较为明显的变化。如图 3(a) 所示,随着 MXene 膜层堆叠数量的不断增加,二次反射峰  $E_{r2}$  的强度不断减小,根据阻抗匹配理论,发生这种现象的原因是随着

MXene 膜层厚度增加,电导率逐渐增大,导致界面上的 THz 波反射强度减小<sup>[20]</sup>。在 MXene 堆叠层数为 5 时,反射峰近似平滑曲线,即接近极小值,表明此时样品已经接近阻抗匹配的理想状态;当堆叠层数达 6 时,可以看出有轻微相位反转的现象,表明膜层电导继续增加使 THz 波产生了相位相反的效果。在其他 3 个不同入射角的条件下, THz 波反射信号强度的变化表现出类似的规律。进一步对比 4 张图,随着入射角度不断的增大, THz 反射波调控效果略有差别,这是因为相同层数的 MXene 膜层具有相同的面电导,而由式(3)知,阻抗匹配与面电导和入射角度等条件有关系,只需满足  $\cos \theta_1 n_2 - \cos \theta_2 n_1 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 Z_0 \sigma = 0$  即可。当其余参数为定值时,改变入射角度、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$  会对 THz 波的反射率产生影响,进而改变 THz



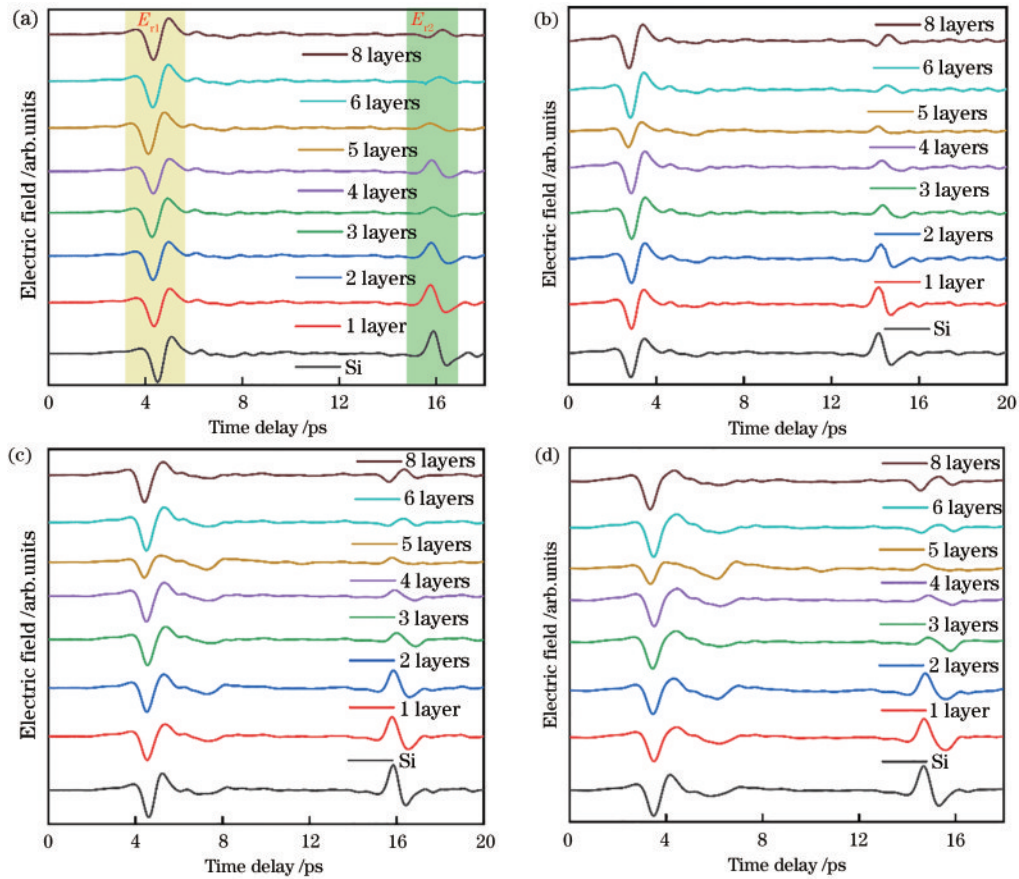


图3 不同的入射角度下,THz波反射信号随MXene薄膜厚度的变化关系。(a) 30°; (b) 40°; (c) 50°; (d) 55°

Fig. 3 Schematic of the relationship between THz wave reflection signal and MXene film thickness under different incident angles.

(a) 30°; (b) 40°; (c) 50°; (d) 55°

波的反射强度。综上所述,在Si衬底上堆叠5层MXene膜层能得到较为理想的THz波调控效果,界面处接近阻抗匹配状态,二次反射峰得到明显削弱,但当层数继续增加时,二次反射峰出现相位相反且幅值增加的情况。而这些现象的发生都源于Si衬底、自组装MXene膜层与空气界面的阻抗调节作用。

进一步对在不同入射角度下测试得到的Si/MXene/Air界面THz波反射峰信号 $E_{r2}$ 进行归一化处理,得到样品的THz波反射信号强度( $E_{r2}/E_{Si}$ )变化情况,如图4所示。在入射角度不同的条件下,随着MXene堆叠层数的增加,界面的THz波反射信号强度逐渐减小到极小值,强度衰减幅度接近83%。同时当入射角度发生变化时,阻抗匹配条件随之发生变化,故THz波的反射调控效果也发生了变化。当入射角度为30°和40°时,堆叠层数在6与8之间的样品的二次反射信号有了明显提升的趋势,表明堆叠层数为6时膜层处接近阻抗匹配状态;当入射角度为50°和55°时,堆叠层数在5和6时,二次反射信号就有了明显上升趋势。故阻抗匹配状态应在5层附近,这也很好地印证了阻抗匹配与入射角度相关联。THz波第二个反射信号因阻抗不匹配程度增加,出现相位反转和幅值增加的现象。

为进一步验证Si/MXene/Air界面THz波反射强度的变化是MXene膜层的引入导致的,利用反射式THz时域光谱系统搭配二维扫描平台,分别对样品上下表面进行面扫描层析成像。光电导产生的THz波入射角度为30°,扫描步距为0.5 mm,对制备样品进行逐点扫描,采集每个扫描点所得到的时域光谱。提取反射光谱中第二个波峰进行最大强度对比成像算法处理,获得不同层数堆叠样品的THz反射成像结果。图5为上表面(Air/Si)的THz波成像效果图,可见MXene膜层厚度增加并不会对上表面的THz波反射信号造成影响,该结果与图3所示的时域谱反映的规律一致。

相比之下,Si/MXene/Air界面的THz波反射成像结果随MXene膜层厚度增加差异明显。如图6所示,在1、3、4、5、6层堆叠样品中,随着MXene膜层数的增加,界面的THz波成像信号强度逐渐减弱,根据前期数据分析可知,这是由于随着MXene膜层的堆叠,界面逐步向阻抗匹配状态逼近;在堆叠层数为6时,界面达到较为理想的接近阻抗匹配的效果,此时第二个反射波峰处于最小值,成像结果与反射光谱数据表现出良好的一致性;随着MXene膜层数的继续增加,成像结果显示反射强度增强的调控趋势,这

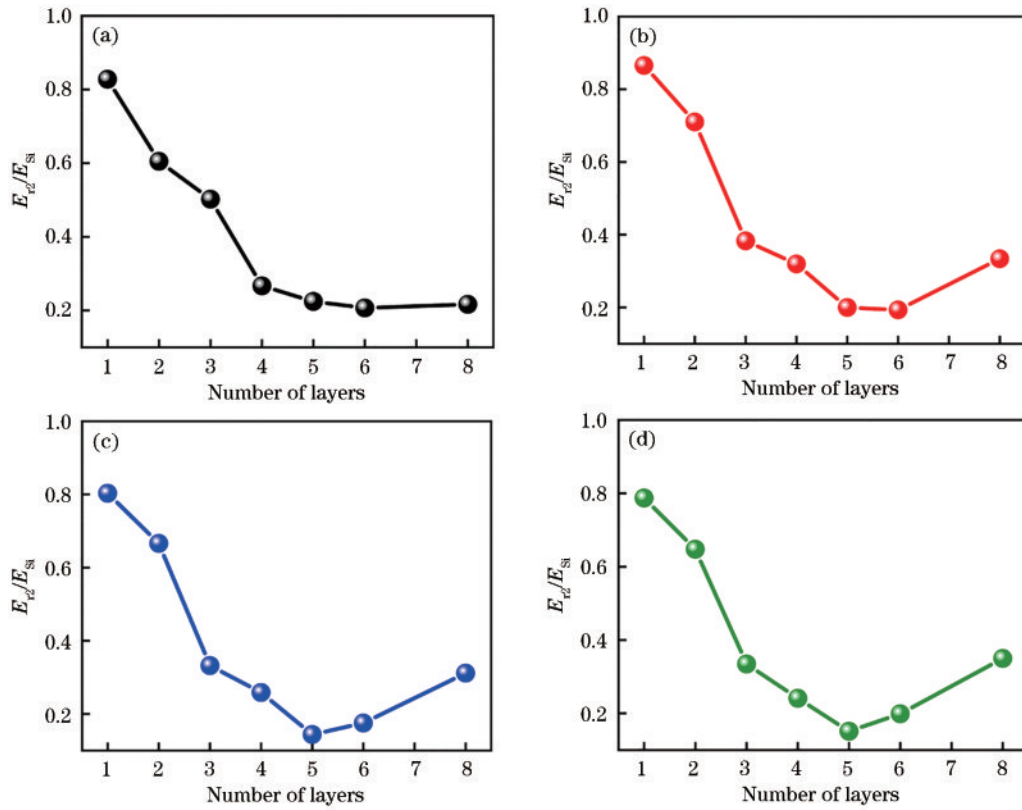


图 4 不同的入射角度下, Si/ MXene/ Air界面的 THz波反射强度归一化结果( $E_{r2}/E_{Si}$ )随MXene薄膜厚度的变化规律。(a) 30°; (b) 40°; (c) 50°; (d) 55°

Fig. 4 Schematic of the normalized THz reflected signals as a function of MXene with different stacking film layers under different angles. (a) 30°; (b) 40°; (c) 50°; (d) 55°

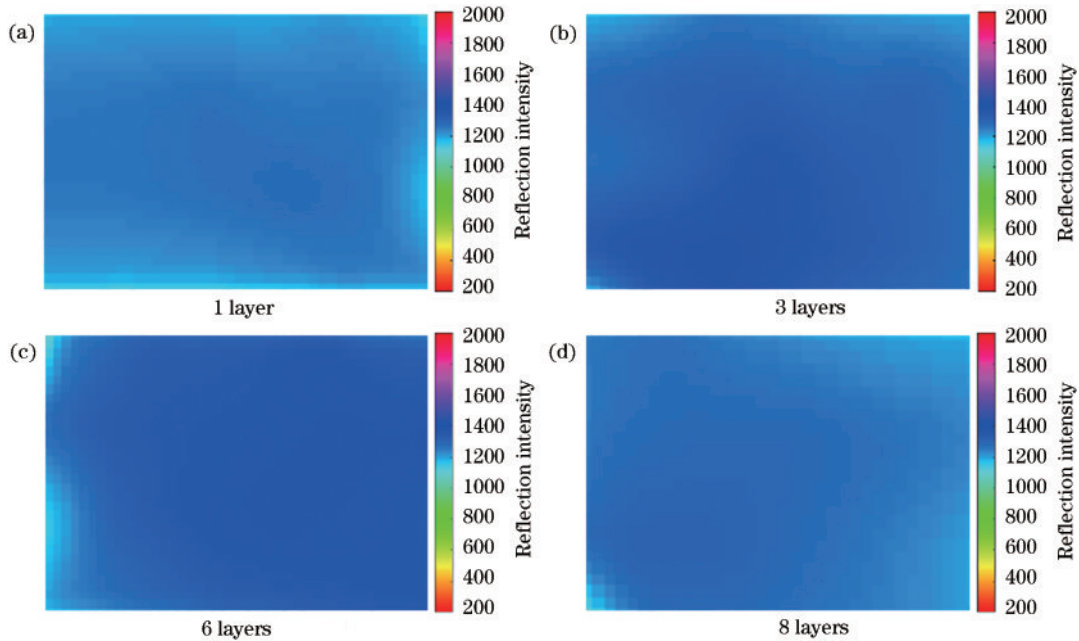


图 5 Air/Si界面处 THz波反射成像效果随Si衬底上MXene薄膜堆叠层数的变化情况。(a) 1层; (b) 3层; (c) 6层; (d) 8层

Fig. 5 THz reflection imaging result at the Air/ Si interface changing with MXene with different stacking film layers at Si substrate. (a) 1 layer; (b) 3 layers; (c) 6 layers; (d) 8 layers

与反射光谱数据中得到的相位相反且反射强度增强的结果相一致。综上所述,反射式 THz层析扫描成像较为直观地显示出不同层数 MXene薄膜的堆叠对

Si/MXene/Air界面 THz波反射信号的调控效果。

还进一步研究了MXene界面设计对样品 THz波透射强度的影响规律。如图 7(a)时域光谱所示,随着

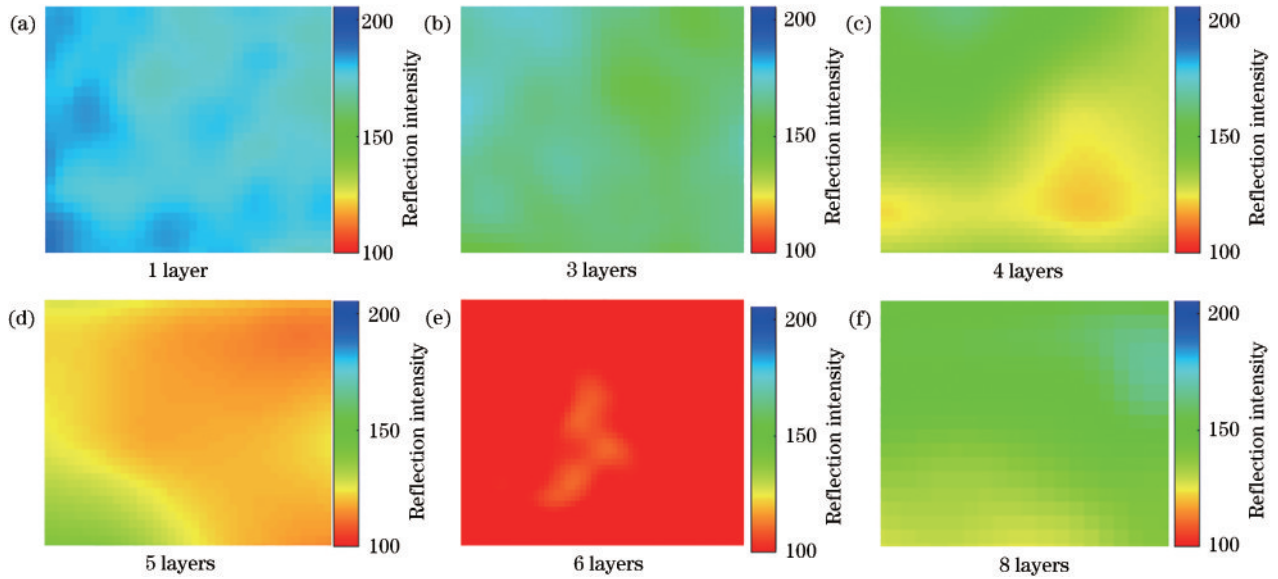


图 6 Si/MXene/Air 界面的 THz 波反射成像效果随 MXene 堆叠层数的变化情况。(a) 1 层; (b) 3 层; (c) 4 层; (d) 5 层; (e) 6 层; (f) 8 层

Fig. 6 THz reflection imaging result at the Si/MXene/Air interface changing with MXene with different stacking film layers. (a) 1 layer; (b) 3 layers; (c) 4 layers; (d) 5 layers; (e) 6 layers; (f) 8 layers

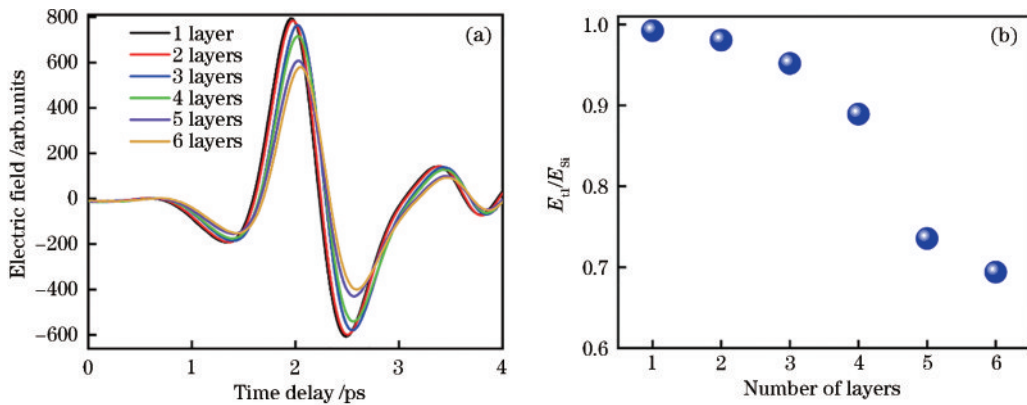


图 7 样品的 THz 波透射强度随 MXene 堆叠层数的变化趋势。(a) THz 波透射时域谱; (b) 透射强度归一化效果

Fig. 7 THz transmission intensity of the samples changing with MXene with different stacking film layers. (a) Time-domain spectra of THz-wave transmission; (b) normalized THz transmission

MXene 堆叠层数的不断增加, THz 透过率有一定的减小趋势, 其主要原因在于 MXene 膜层本身具有一定导电性, 在堆叠层数不断增加的情况下, 面电导也随之增加, 因此对 THz 波的透射会产生一定的减弱作用。以高阻硅衬底为参照, 对堆叠不同 MXene 层数的样品的透过率进行归一化处理, 得到了图 7(b) 所示的结果。其中纵坐标的  $E_{si}$  代表了高阻硅的 THz 透射强度,  $E_t$  代表高阻硅表面堆叠不同层数 MXene 膜层后的透过率大小。通过计算可以发现: 引入 MXene 膜层之后的样品透过率相比纯硅基衬底的透过率有轻微的下降; 当堆叠层数为 4 时, 透过率仅降低了 10%; 6 层 MXene 膜层的透过率相比纯硅基衬底的透过率仅降低了 30%, 但整体仍保持在 70% 左右。由此证明 MXene 膜层的引入在实现 THz 反射高效调控的同时仍保持良好的 THz 波透过率, 表明此设计在 THz 波调控器件

中具有广泛的应用空间。

## 4 结 论

采用界面自组装法在硅衬底上引入 MXene 膜层, 通过调节 MXene 的膜层厚度改变界面电导及相应的阻抗, 基于阻抗匹配原理, 实现了对 Si/MXene/Air 界面的 THz 波高效反射调控。在实验过程中将 THz-TDS 系统与层析成像技术相结合, 通过光谱信号重构成像直观观测出目标界面处对 THz 波的调控效果, 为 THz 调控研究提供了一个较为有效的表征测试方案。同时, 本工作在实现高效 THz 波反射调控的基础上, 对样品透射光谱进行研究分析, 当接近阻抗匹配理想状态时, 与空白 Si 衬底相比, Si/MXene/Air 界面的 THz 波反射强度衰减约 83%, 同时透过率仍保持在 70% 左右, 本工作在 THz 波调控领域具有广泛的应用前景。



## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Seifert T S, Jaiswal S, Barker J, et al. Femtosecond formation dynamics of the spin Seebeck effect revealed by terahertz spectroscopy[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2899.
- [3] Tang P R, Li J, Du L H, et al. Ultrasensitive specific terahertz sensor based on tunable plasmon induced transparency of a graphene micro-ribbon array structure [J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30655-30666.
- [4] Nagatsuma T, Ducourneau G, Renaud C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6): 371-379.
- [5] Ren A F, Zahid A, Fan D, et al. State-of-the-art in terahertz sensing for food and water security-a comprehensive review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 85: 241-251.
- [6] 吴晓君, 任泽君, 孔德胤, 等. 铌酸锂强场太赫兹光源及其应用[J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1914001.  
Wu X J, Ren Z J, Kong D Y, et al. Strong field terahertz light source of lithium niobate and its application[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1914001.
- [7] Zhu H F, Li J, Du L H, et al. A phase transition oxide/graphene interface for incident-angle-agile, ultrabroadband, and deep THz modulation[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2020, 7(24): 2001297.
- [8] Fan X Q, Li Y H, Chen S H, et al. Mechanical terahertz modulation by skin-like ultrathin stretchable metasurface [J]. *Small*, 2020, 16(37): 2002484.
- [9] 易南宁, 宗容, 龚江, 等. 基于二氧化钒-狄拉克半金属混合超材料的单/双波段可切换太赫兹吸波器[J]. *中国激光*, 2022, 49(3): 0314002.  
Yi N N, Zong R, Gong J, et al. Single-/ dual-band switchable terahertz absorber based on vanadium dioxide-dirac semi-metal hybrid metamaterial[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(3): 0314002.
- [10] 崔琦, 陈哲, 王岩. 基于二氧化钒超材料的太赫兹波相位动态调控[J]. *中国激光*, 2022, 49(3): 0314001.  
Cui Q, Chen Z, Wang Y. Dynamic manipulation of terahertz wave phase based on vanadium dioxide metamaterials[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(3): 0314001.
- [11] 谷建强, 王可蒙, 许祎, 等. 基于超材料的太赫兹光电导天线[J]. *中国激光*, 2021, 48(19): 1914004.  
Gu J Q, Wang K M, Xu Y, et al. Metamaterials-based terahertz photoconductive antennas[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(19): 1914004.
- [12] Huang Z Y, Chen H H, Huang Y, et al. Ultra-broadband wide-angle terahertz absorption properties of 3D graphene foam[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(2): 1704363.
- [13] Shui W C, Li J M, Wang H, et al.  $Ti_3C_2T_x$  MXene sponge composite as broadband terahertz absorber[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(21): 2001120.
- [14] Naguib M, Kurtoglu M, Presser V, et al. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of  $Ti_3AlC_2$ [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(37): 4248-4253.
- [15] Li Y B, Shao H, Lin Z F, et al. A general Lewis acidic etching route for preparing MXenes with enhanced electrochemical performance in non-aqueous electrolyte [J]. *Nature Materials*, 2020, 19(8): 894-899.
- [16] Sun R H, Zhang H B, Liu J, et al. Highly conductive transition metal carbide/carbonitride(MXene)/polystyrene nanocomposites fabricated by electrostatic assembly for highly efficient electromagnetic interference shielding[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(45): 1702807.
- [17] Mathis T S, Maleski K, Goad A, et al. Modified MAX phase synthesis for environmentally stable and highly conductive  $Ti_3C_2$  MXene[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(4): 6420-6429.
- [18] Li G J, Amer N, Hafez H A, et al. Dynamical control over terahertz electromagnetic interference shielding with 2D  $Ti_3C_2T_y$  MXene by ultrafast optical pulses[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(1): 636-643.
- [19] Choi G, Shahzad F, Bahk Y M, et al. Enhanced terahertz shielding of MXenes with nano-metamaterials [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(5): 1701076.
- [20] Wan H J, Liu N, Tang J, et al. Substrate-independent  $Ti_3C_2T_x$  MXene waterborne paint for terahertz absorption and shielding[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(8): 13646-13652.
- [21] Feng T D, Huang W X, Zhu H F, et al. Optical-transparent self-assembled MXene film with high-efficiency terahertz reflection modulation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(8): 10574-10582.
- [22] Zhou Y X, E Y W, Zhu L P, et al. Terahertz wave reflection impedance matching properties of graphene layers at oblique incidence[J]. *Carbon*, 2016, 96: 1129-1137.
- [23] Zhou Y X, E Y W, Ren Z Y, et al. Solution-processable reduced graphene oxide films as broadband terahertz wave impedance matching layers[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(11): 2548-2556.