

文章编号: 1671-7449(2026)04-0493-07

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(4): 493-499.

基于二氧化钒材料的可调太赫兹交叉极化转换器

黄育杰¹, 陈籽彤², 郝亚峰¹, 马富鹏¹, 武慧嘉¹, 朱璞¹, 李子唯¹, 牛文宇¹, 常雅宁¹,
冀煜堃¹, 田慧友¹, 李腾腾^{1*}, 刘美宏¹, 雷程¹, 梁庭¹

(1. 中北大学 宽禁带半导体超越照明材料与技术全国重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 钢研纳克检测技术股份有限公司, 北京 100081)

摘要: 太赫兹波因其独特的光谱特性与穿透能力, 在物质识别、无损检测及高速通信等领域具有重要应用价值。然而, 传统的太赫兹极化转换器存在工作频段固定、调制效率较低等问题。鉴于此, 提出一种基于二氧化钒(VO_2)复合超表面的可调谐太赫兹交叉极化转换器, 采用“工”字型铝片与 VO_2 片复合结构, 结合聚酰亚胺(PI)介质层与铝制反射背板, 并利用 VO_2 在68℃相变时的电导率跃迁特性, 实现对太赫兹波极化转换性能的动态调控。电磁仿真模拟结果表明, 室温下 VO_2 处于绝缘态时, 器件在1.31~2.15 THz频段内实现了交叉极化转换; 升温至相变温度以上后, VO_2 转变为金属态, 此时工作频段可灵活调制为1.40~2.10 THz, 同时在1.50~2.00 THz频段内, 极化转换效率(PCR)均高于99%, 展现出卓越的转换性能。当介质层厚度至19 μm 时, 器件能够在宽带特性与高转换率之间实现良好平衡, 且器件在0~20°斜入射角范围内极化转换效率绝对波动基本小于5%, 表现出良好的工程适应性。该极化转换器结构简单、便于加工且能实现极化转换工作频带的灵活调控, 在太赫兹波通信、成像等方面具有广阔的应用前景。

关键词: 太赫兹; 超表面; 极化转换; 动态调控; 二氧化钒

中图分类号: O436

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026052

引用格式: 黄育杰, 陈籽彤, 郝亚峰, 等. 基于二氧化钒材料的可调太赫兹交叉极化转换器[J]. 测试技术学报, 2026, 40(4): 493-499.

Huang Yujie, Chen Zitong, Hao Yafeng, et al. Tunable terahertz cross-polarization converter based on vanadium dioxide material[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(4): 493-499.

Tunable Terahertz Cross-Polarization Converter Based on Vanadium Dioxide Material

Huang Yujie¹, Chen Zitong², Hao Yafeng¹, Ma Fupeng¹, Wu Huijia¹, Zhu Pu¹, Li Ziwei¹, Niu Wenyu¹,
Chang Yaning¹, Ji Yukun¹, Tian Huiyou¹, Li Tengting^{1*}, Liu Meihong¹, Lei Cheng¹, Liang Ting¹

(1. State Key Laboratory of Widegap Semiconductor Optoelectronic Materials and Technologies,

North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. NCS Testing Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: Terahertz waves exhibit significant application value in fields such as substance identification, non-

【收稿日期】2025-10-13

【修回日期】2025-12-03

【录用日期】2025-12-30

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(62301509, 62405293, 62304209); 中国博士后科学基金资助项目(2025M770537); 山西省重点研发计划资助项目(202302030201001); 山西省基础研究计划资助项目(202303021212191)

【作者简介】黄育杰(2003—), 男, 硕士生, 主要从事光电超构器件及集成技术研究。E-mail: s202519024@st.nuc.edu.cn。

*【通信作者】李腾腾(1993—), 男, 副教授, 博士, 主要从事微纳光电材料与器件(探测传感方向)、太赫兹功能器件、基于第三代半导体材料的功率半导体器件、以及激光产业化应用技术研究。E-mail: litengteng@nuc.edu.cn。

destructive testing, and high-speed communication due to their unique spectral characteristics and penetration capabilities. However, traditional terahertz polarization converters suffer from issues including fixed operating frequency bands and low modulation efficiency. To address these issues, a tunable terahertz cross-polarization converter based on a vanadium dioxide (VO_2) composite meta-surface is proposed. A composite structure of “工”-shaped aluminum patches and VO_2 sheets is employed, incorporating with a polyimide (PI) dielectric layer and an aluminum reflective backplane. By utilizing the conductivity transition property of VO_2 during phase transition at 68°C , dynamic control over the polarization conversion performance of terahertz waves is achieved. Electromagnetic simulation results show that when VO_2 is in an insulating state at room temperature, the device achieves cross-polarization conversion within the 1.31–2.15 THz frequency band. After heating above the phase transition temperature, VO_2 transforms into a metallic state, at which point the operating frequency band can be flexibly tuned to 1.40–2.10 THz. Meanwhile, within the 1.50–2.00 THz frequency band, the polarization conversion ratio is higher than 99%, demonstrating excellent conversion performance. Further studies reveal that a good balance between broadband characteristics and high conversion efficiency is obtained by optimizing the dielectric layer thickness to $19\text{ }\mu\text{m}$. Additionally, the PCR absolute fluctuation of the device is basically less than 5% within the oblique incident angle range of $0^\circ\text{--}20^\circ$, indicating good engineering adaptability. This polarization converter features a simple structure, ease of fabrication, and flexible regulation of the polarization conversion operating frequency band, holding broad application prospects in terahertz wave communication, imaging, and other related fields.

Key words: terahertz; metasurface; polarization conversion; dynamic tuning; vanadium dioxide

0 引言

太赫兹波是频率处于 0.1~10 THz 的电磁波,位于微波与红外波段之间,凭借着独特的物理特性,太赫兹波已成为电磁学领域备受瞩目的研究方向^[1]。太赫兹光子能量与物质分子的转动、振动能级跃迁能量高度匹配,使其具备显著的分子指纹光谱特征,进而能够实现物质成分的特异性精准识别。同时,太赫兹波对非极性材料具有良好的穿透性,相比 X 射线具有更低的光子能量,因此在无损检测与安全成像领域展现出独特优势^[2-4]。此外,在通信领域,太赫兹频段的宽频带特性为实现 100 Gbs 以上的超高速数据传输提供了理论可能,是推动 6G 及未来通信技术发展的重要频段^[5-8]。

极化转换技术作为太赫兹功能器件的关键核心技术,其本质是通过改变太赫兹波的偏振态来实现调控电磁波与物质相互作用^[9]。超表面作为一种亚波长尺度的人工电磁结构,通过精密设计超表面单元结构可实现对电磁波的高效调控,为太赫兹极化转换技术研究提供了新思路^[10]。近年来,基于超表面的极化转换器研究取得了一定的进展,如 Li 等^[11]提出的用于任意太赫兹极化旋转

和波前调控的消旋介电超曲面,以及赵哲等^[12]提出的基于外禀手性的可实现角度色散高效调控的太赫兹超构表面,均在光学功能器件领域具有重要应用价值。但静态结构的限制使超表面器件存在工作频段固定、调制效率低和结构体积大等瓶颈,难以满足动态场景下的多元化应用需求^[13-15]。将相变材料与超表面结合成为突破这一限制的关键路径,其中,二氧化钒(VO_2)凭借其在 68°C 时的低温绝缘态与高温金属态可逆相变能力,以及热、电、光多模态可触发的特性,在动态调控领域脱颖而出^[16]。2018 年, Wang 等^[17]提出了一种基于 VO_2 的可重构多功能超表面,能够在太赫兹频率范围内实现透射和反射模式切换,同时实现交叉极化和圆极化转换,具有很强的电磁波操纵潜力。2020 年, Yan 等^[18]设计了一种基于 VO_2 的可切换式器件,在高温条件下,该器件可实现 90% 以上的宽带吸收;在调控温度下降后,则切换为宽带线圆极化转换功能。2023 年, Yang 等^[19]设计了一种具有特定线性相位梯度及排序的 VO_2 超表面,实现了电可切换的光束动态控制。2025 年, Sun 等^[20]设计了一种以 VO_2 为核心材料的可逆交叉极化转换超表面,在 2.19~2.94 THz 范围内的极化转换效率高达 100%。

本文提出了一种基于“工”字型铝片与 VO_2 复

合的可调谐太赫兹交叉极化转换器。利用温控 VO₂ 相变前后电磁响应的显著差异,实现了 1.31~2.15 THz 与 1.40~2.10 THz 频率范围内的精细化可逆高效动态调制,并在 0~20° 斜入射角范围内极化转换效率(Polarization Conversion Ration, PCR)绝对波动基本小于 5%,表现出良好的工程适应性。该极化转换器在太赫兹波通信、成像等方面具有广阔的应用前景。

1 器件设计与仿真

器件单元结构如图 1 所示,从上至下依次为金属铝与 VO₂ 复合的超表面功能层、聚酰亚胺(PI)介质层,以及金属铝基底。太赫兹波从复合超表面层射入,通过表面等离激元共振效应与材料相变特性对入射波进行调制^[21]。经过优化后,确定器件的单元结构尺寸参数为: $L_1=100\ \mu\text{m}$, $L_2=31\ \mu\text{m}$, $L_3=26\ \mu\text{m}$, $L_4=9\ \mu\text{m}$, $L_5=15.5\ \mu\text{m}$, $L_6=14\ \mu\text{m}$, $W_1=10\ \mu\text{m}$, $W_2=30\ \mu\text{m}$, $W_3=5\ \mu\text{m}$, $T_1=1\ \mu\text{m}$, $T_2=19\ \mu\text{m}$ 。

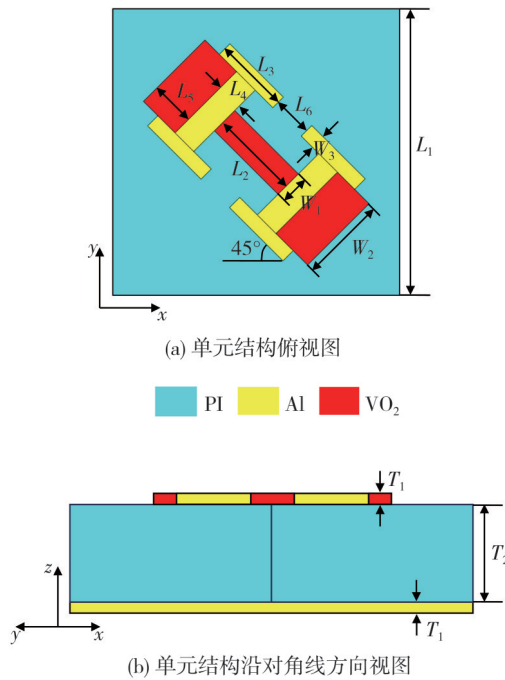


图 1 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure

为了分析验证所提出的可调谐太赫兹交叉极化转换器的具体性能,使用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 2020 对结构进行建模与数值仿真计算。在 x 和 y 方向上设置周期性边界条件,并在 z 方向上设置开放性边界条件,使用频域求解器来仿真器件的传输系数。在仿真时,PI 的相对介

电常数设置为 3.5,铝的电导率设置为 $3.56 \times 10^7\ \text{S/m}$ 。VO₂ 在绝缘态与金属态下的介电函数($\epsilon(\omega)$)通常采用 Drude 模型进行描述^[22]为

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2(\sigma)}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (1)$$

式中: σ 为 VO₂ 电导率; ω 为角频率; 高频相对介电常数 $\epsilon_{\infty}=12$; 碰撞频率 $\gamma=5.75 \times 10^{13}\ \text{rad/s}$; $\omega_p(\sigma)$ 为 VO₂ 的等离子体频率。 $\omega_p(\sigma)$ 与 σ 间的关系可以近似地表示为^[23]

$$\omega_p^2(\sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_0} \omega_p^2(\sigma_0), \quad (2)$$

式中: 直流电导率 $\sigma_0=3 \times 10^2\ \text{S/m}$; 升温后 $\sigma=3 \times 10^5\ \text{S/m}$; $\omega_p^2(\sigma_0)=1.4 \times 10^{15}\ \text{rad/s}$, 且 $\omega_p(\sigma)$ 和 σ 都与自由载流子密度成正比。

利用以上参数对器件进行仿真,结果如图 2 所示。室温下,VO₂ 处于绝缘态,此时极化转换器在 1.31~2.15 THz 频段内表现出宽带交叉极化转换特性,交叉极化系数(r_{xy})的反射振幅值高于 90%,而共极化系数(r_{yy})的反射振幅值则始终低于 30%(见图 2(a))。当温度升高至 68 °C 及以上时,VO₂ 晶体结构由单斜相重构为金红石相,导致电导率发生显著改变^[24]。如图 2(b)所示,器件的工作频段被调制为 1.40~2.10 THz,在此范围内 r_{xy} 的反射振幅值大于 90% 与 r_{yy} 的反射振幅值小于 30% 的性能指标,实现了动态可调的交叉极化转换功能。

为了定量评估转换器的极化转换效果,引入 PCR 作为关键评价指标,定义为反射波中交叉极化分量与总反射能量的比值^[25],

$$PCR = \frac{|r_{xy}|^2}{|r_{xy}|^2 + |r_{yy}|^2}. \quad (3)$$

调制前后的器件 PCR 值如图 2(c) 所示,当入射波频率接近多谐振模式的交界区域时,模式间的耦合作用减弱,导致能量分配不均,同时,超表面与入射波的阻抗匹配程度出现短暂偏离,从而引发 r_{xy} 与 r_{yy} 的波动,导致 PCR 值在谐振模式交界频点出现轻微变化,但基本维持在 90%。经升温调制后,在 1.50~2.0 THz 工作频段内的 PCR 值均高于 99%,这是由于金属态 VO₂ 的形成,使结构的谐振模式更加集中,阻抗匹配的稳定性显著提升。综上所述,通过调控器件的相变特性,器件能够在高极化转换效率下实现对应带宽的动态交叉调控。

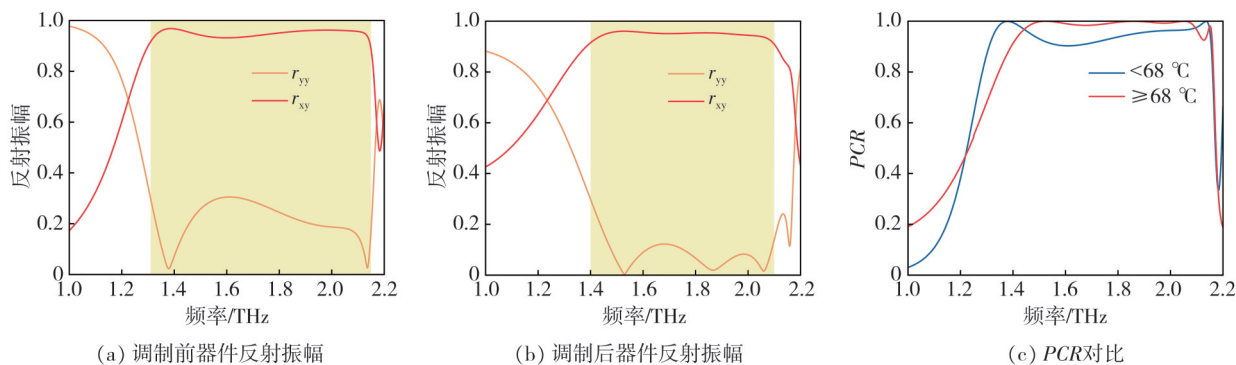


图2 温控前后器件同极化方向的反射振幅、交叉极化方向的反射振幅与PCR

Fig. 2 Reflection amplitudes in co-polarization direction, reflection amplitudes in cross-polarization direction, and PCR of device before and after temperature control

2 原理分析

对超表面结构进行表面电流分析可以阐明太赫兹波极化转换的物理机理及VO₂相变对极化转换的影响。表面等离子体激元是由电磁波与金属中的自由电子在界面处集体振荡相互耦合产生的一种表面波^[21]。不同频率的太赫兹波入射后,与超表面结构之间发生复杂的电磁相互作用。入射波的能量被超表面吸收、散射与重新辐射,在这个过程中,超表面结构中的金属材质部分与太赫兹波相互作用,激发结构表面的表面等离子体激元共振。依据表面等离子体共振理论,当入射太赫兹波频率与超表面结构的本征频率相契合,即满足共振条件时,自由电子的集体振荡强度会急

剧增强,使得电流在结构表面的特定区域高度聚集,为太赫兹波的极化转换创造条件^[26]。

当VO₂处于绝缘态时,选取1.38、1.60和2.13 THz这3个关键频率点进行仿真,获取对应的表面电流分布,如图3(a)~(c)所示。由于绝缘态下VO₂的电导率极低,对表面电流分布的影响可以忽略不计,因此电流主要分布在两个“工”字型金属铝片上,且两个金属铝片的电流流向相同。从电磁学原理来看,这种同向电流分布使得两个金属铝片之间产生强烈的电磁耦合效应,进而引发高效的电流谐振。由此可推断这3个频率点及附近的高振幅是由两个金属铝片的同向电流谐振激发的,此外,3个频率点的高振幅谐振峰相叠加,有效拓宽了可调谐太赫兹交叉极化转换器的有效工作带宽。

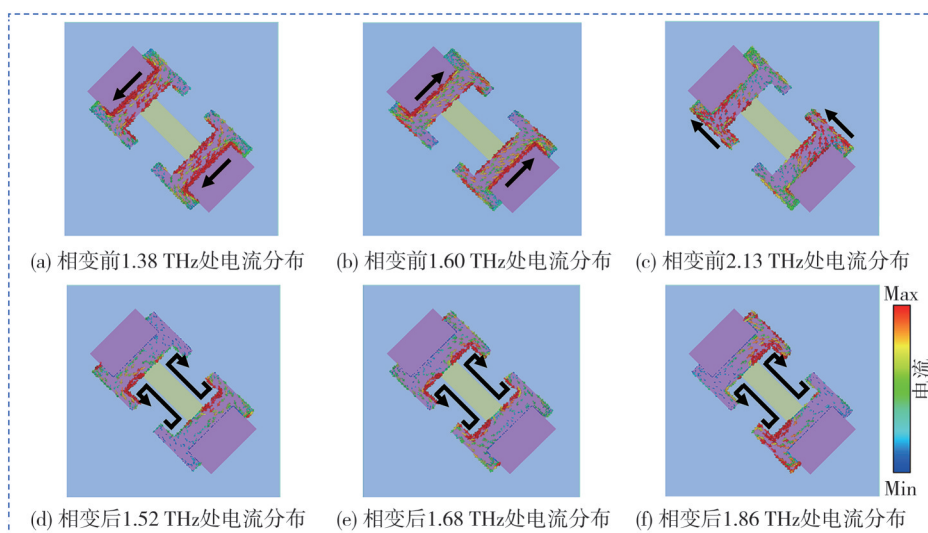


图3 器件表面电流分布

Fig. 3 Surface current distributions at specific points of device

VO₂相变为金属态后,电导率骤升至 10^5 S/m 。针对1.52、1.68和1.86 THz三处频率点进行仿真分析,得到结构表面的电流分布。中间倾斜的VO₂长

条因金属导通效应连接两端结构,形成了两个中心对称的开口谐振环(Split Ring Resonator, SRR)结构。这种环型电流回路可等效为经典的电感电容

(Inductor Capacitor, LC)谐振系统, 复合结构的开口间隙等效为电容, 开口环结构本身则等效为电感, 其谐振频率(f)^[27]为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

式(4)中的电容 C 为

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d}, \quad (5)$$

式中: ϵ_0 为真空介电系数; S 为电容的横截面积; d 为电容板的间距。式(4)中的电感 L 为

$$L = K_0 \frac{\mu_0 n^2 \pi a^2}{b}, \quad (6)$$

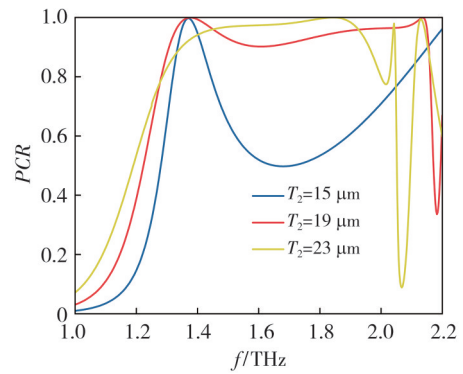
式中: K_0 为电感换算系数; b 为轴向长度; n 为线圈匝数; μ_0 为真空磁导率; a 为线圈半径。

由图 3(d) 与图 3(f) 可知, 当频率点设定为 1.52 与 1.86 THz 时, 器件表面电流呈现显著的对角区域聚集现象。这种电流分布本质是 SRR 结构边角处的曲率效应引发局域场增强, 使得自由电子在电磁场驱动下形成高密度振荡电流, 进而激发强电磁共振, 对应器件在此频段展现出优异的 PCR 值^[28]。而频率为 1.68 THz 时的电流在双环上呈现均匀对称分布, 如图 3(e) 所示, 此时电荷振荡模式的空间对称性导致结构的电磁辐射损耗降低, 共振强度减弱, 使得该频率点的 PCR 值降低。

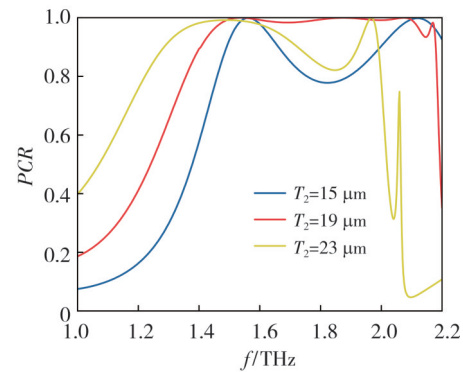
3 介质厚度与入射角对 PCR 的影响分析

在器件结构参数优化设计中, PI 介质层厚度的变化对极化转换器电学性能具有显著影响。针对 VO₂ 相变材料的双态特性, 本工作研究了 15~23 μm 范围内不同厚度(T_2)的 PI 介质层对器件 PCR 的影响。如图 4(a) 所示, 当 VO₂ 处于绝缘态且 T_2 为 15 μm 时, 由于薄 PI 层与超表面界面处缺陷密度较高, 导致介质层损耗角正切局部增大, 太赫兹波在不同频段的能量损耗差异显著, 进而引发 PCR 曲线的严重波动。当介质层 T_2 由 15 μm 增加至 19 μm 时, 界面缺陷密度降低使介质层的损耗角正切趋于均匀, 同时介质层厚度与太赫兹波波长的匹配度提升, 实现介电损耗与电磁耦合效率的平衡, PCR 值整体更加平稳, 且高于 90% 的频段范围较大。当 PI 厚度突破 19 μm 临界值继续增至 23 μm 时, 超表面界面损耗进一步降低, 但 PI 层体积增大导致太赫兹波在介质内传播路径延

长, 能量衰减加剧, 谐振模式发生失配, 工作频带被迫收窄至 1.35~1.95 THz。在金属态情况下(见图 4(b)), VO₂ 电导率的跃变使损耗机制从由介电损耗主导切换为由欧姆损耗主导, 介质层增厚引发 PCR 曲线的系统性低频迁移^[29], $T_2=19 \mu\text{m}$ 时依然展现出最优综合性能。仿真结果表明, 介质层厚度优化需兼顾材料相态特性与工作频段要求的双重约束。因此, 确立 $T_2=19 \mu\text{m}$ 作为最优参数, 为器件在宽频带、高效率工作模式下的结构设计提供了关键依据。



(a) 调制前不同 T_2 时 PCR 随 f 的变化



(b) 调制后不同 T_2 时 PCR 随 f 的变化

图 4 介质厚度对器件 PCR 影响

Fig. 4 Effect of dielectric thickness on device PCR

工程应用中, 入射波束偏离正入射方向的角度误差不可避免, 因此, 斜入射角对极化转换器转换效率的影响同样是需要考虑的重要因素^[30]。仿真入射角由 0° 增加至 20° 的变化情况, 得到器件 PCR 值与斜入射的关系如图 5(a) 与图 5(b) 所示。结果表明, 在该角度区间内, 绝缘态与金属态下的 PCR 值绝对对波动幅度基本小于 5%, 交叉极化转换功能表现出对斜入射 20° 范围内的不敏感性, 使器件在工程安装与波束扫描场景中具备一定的入射偏差容错。

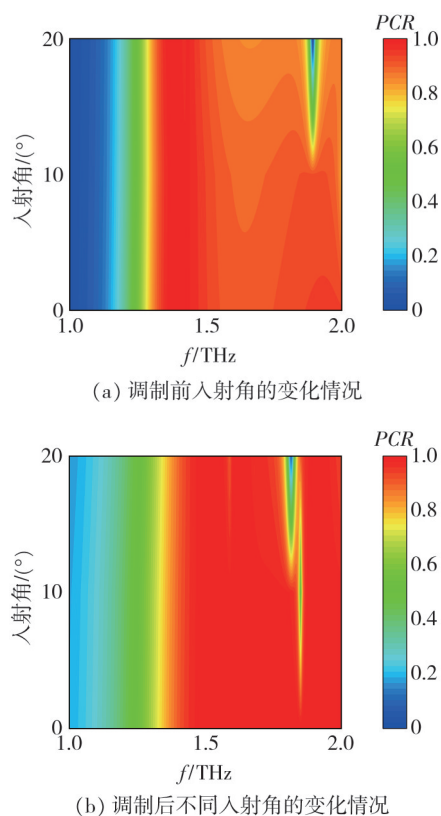


图5 入射角变化对器件PCR影响

Fig. 5 Effect of incident angle variation on device PCR

4 结 论

本文设计了一种基于VO₂复合超表面的可调谐太赫兹交叉极化转换器,通过“工”字型金属铝与VO₂的复合结构设计,实现了对电磁响应的精细调控。仿真结果表明,室温下VO₂处于绝缘态时,器件在1.31~2.15 THz频段内 r_{xy} 持续高于90%, r_{yy} 低于30%。升温至68℃以上时,VO₂转变为金属态,工作频段被调制为1.40~2.10 THz,且在1.50~2.00 THz关键频段内PCR值均高于99%。此外,优化后的PI介质层厚度为19 μm时,器件在绝缘态与金属态下均能平衡介电损耗与阻抗匹配。斜入射角在0~20°范围内,器件PCR值基本维持80%以上,对入射角度变化基本不敏感,具备良好的容错空间。该结构通过VO₂相变时电导率的阶跃变化实现频段动态调制,其表面电流分布及LC谐振机理验证了宽频转换的物理基础。工艺适应性方面,VO₂相变特性与结构参数的协同优化,降低了实际加工中对精度的严苛要求。综上所述,将该可调谐交叉极化转换器应用于太赫兹功能器件集成时,可通过动态调控极化转换频段来精细化提升信号抗干扰能

力,器件在1.3~2.1 THz频段内的高效宽带特性,为太赫兹通信、无损检测及安全成像等领域的动态极化调控提供了技术参考。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] 李腾腾, 朱璞, 郝亚峰, 等. 微结构太赫兹调制技术研究进展[J]. 测试技术学报, 2024, 38(5): 455-466.
Li Tengting, Zhu Pu, Hao Yafeng, et al. Advances in microstructured terahertz modulation techniques[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(5): 455-466. (in Chinese)
- [2] Zhang S, Niu W, Hao Y, et al. Microstructure-based terahertz sensing technology: from electromagnetic response enhancement to multi-scale detection [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2026, 17(1): 1-15.
- [3] Huang Y, Shen Y, Wang J. From terahertz imaging to terahertz wireless communications [J]. Engineering, 2023, 22: 106-124.
- [4] Bai P, Zhang Y, Wang T, et al. Broadband THz to NIR up-converter for photon-type THz imaging [J]. Nature Communications, 2019, 10: 3513.
- [5] Ma Z, Geng Z, Fan Z, et al. Modulators for terahertz communication: the current state of the art [J]. Research, 2019, 2019: 6482975.
- [6] Shi J, Li M, Tang L, et al. All-dielectric integrated meta-antenna operating in 6G terahertz communication window[J]. Small, 2024, 20(18): 2308958.
- [7] Ohkoshi S I, Tsuzuo Y, Yoshikiyo M, et al. Ultra-thin terahertz-wave absorber based on inorganic materials for 6G wireless communications[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(6): 9523-9529.
- [8] 弋浩凡. 基于信道测量和射线追踪的太赫兹信道特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2024: 26.
Yi Haofan. Terahertz channel characterization based on channel measurements and ray tracing[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024: 26. (in Chinese)
- [9] 李艳红, 廖萌萌, 冯杰. 太赫兹各向异性超材料极化调控器设计与实现[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(2): 372-379.
Li Yanhong, Liao Mengmeng, Feng Jie. Design and implementation of a THz anisotropic metamaterial

- polarization regulator [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(2): 372-379. (in Chinese)
- [10] Hao X, Xu Q, Niu L, et al. Twisted stacking metasurface for complete amplitude and phase control of circularly polarized terahertz waves [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(12): 2400644.
- [11] Li J, Lu X, Li H, et al. Racemic dielectric metasurfaces for arbitrary terahertz polarization rotation and wavefront manipulation [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2024, 7(10): 240075.
- [12] 赵哲, 林展逸, 丁佳跃, 等. 基于外禀手性的太赫兹超构表面角度色散高效调控 [J]. *光电工程*, 2025, 52(8): 88-97.
Zhao Zhe, Lin Zhanyi, Ding Jialuo, et al. Efficient angular dispersions manipulation of terahertz metasurface based on extrinsic chirality [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2025, 52(8): 88-97. (in Chinese)
- [13] Fan F, Zhao D, Tan Z, et al. Magnetically induced terahertz birefringence and chirality manipulation in transverse-magnetized metasurface [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(24): 2101097.
- [14] Wang J, Wang X, Gao X, et al. Polarization insensitivity electromagnetically induced reflection in graphene metasurface [J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2021, 12(3): 362-368.
- [15] Xu Y, Xu Q, Zhang X, et al. Stereo metasurfaces for efficient and broadband terahertz polarization conversion [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(44): 2207269.
- [16] Ke Y, Wang S, Liu G, et al. Vanadium dioxide: vanadium dioxide: the multistimuli responsive material and its applications (small 39/2018) [J]. *Small*, 2018, 14(39): 1870178.
- [17] Wang L, Hong W, Deng L, et al. Reconfigurable multifunctional metasurface hybridized with vanadium dioxide at terahertz frequencies [J]. *Materials*, 2018, 11(10): 2040.
- [18] Yan D, Meng M, Li J, et al. Vanadium dioxide-assisted broadband absorption and linear-to-circular polarization conversion based on a single metasurface design for the terahertz wave [J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29843-29854.
- [19] Yang F, Tan T, Prakash S, et al. Reconfigurable wide-angle beam-steering terahertz metasurfaces based on vanadium dioxide [J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(9): 2302047.
- [20] Sun Y, Yang H, Zhu Y, et al. Multifunctional materials based on VO₂ for realizing dual-band absorption, cross-polarization conversion and asymmetric transmission [J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2025, 173: 116312.
- [21] Sain B, Kaner R, Prior Y. Phase-controlled propagation of surface plasmons [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(10): e17072.
- [22] Kim Y, Wu P, Sokhoyan R, et al. Phase modulation with electrically tunable vanadium dioxide phase-change metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(6): 3961-3968.
- [23] Koch D, Chaker M. The origin of the thermochromic property changes in doped vanadium dioxide [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(20): 23928-23943.
- [24] Shu F, Wang J, Peng R, et al. Electrically driven tunable broadband polarization states via active metasurfaces based on joule-heat-induced phase transition of vanadium dioxide [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(10): 2100155.
- [25] 陶翔. 基于超表面的太赫兹偏振调控器件研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
Tao Xiang. Research on terahertz polarization control device based on metasurface [D]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications, 2023. (in Chinese)
- [26] Komatsu K, Pápa Z, Jauk T, et al. Few-cycle surface plasmon polaritons [J]. *Nano Letters*, 2024, 24(8): 2637-2642.
- [27] Fu X, Shi L, Yang J, et al. Flexible terahertz beam manipulations based on liquid-crystal-integrated programmable metasurfaces [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(19): 22287-22294.
- [28] Guzelturk B, Belisle R A, Smith M D, et al. Terahertz emission from hybrid perovskites driven by ultrafast charge separation and strong electron-phonon coupling [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(11): 1704737.
- [29] Yang M, Yan X, Zhang Z, et al. Ultra-wideband low-loss control of terahertz scatterings via an all-dielectric coding metasurface [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2020, 2(4): 1122-1129.
- [30] Shi W, Gu J, Zhang X, et al. Terahertz bound states in the continuum with incident angle robustness induced by a dual period metagrating [J]. *Photonics Research*, 2022, 10(3): 810-819.