

# 基于二氧化钒复合超表面的太赫兹带宽可调极化转换器

杨朝晖<sup>1</sup>, 江明珠<sup>1,2</sup>, 刘永琛<sup>1</sup>, 张隆辉<sup>1</sup>, 徐卫林<sup>1</sup>, 王月娥<sup>1</sup>, 胡放荣<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

<sup>2</sup> 桂林信息科技学院, 广西 桂林 541004

**摘要** 设计了一种基于二氧化钒( $\text{VO}_2$ ) 复合超表面的太赫兹带宽可调极化转换器。该转换器由  $\text{VO}_2$  复合超表面、聚酰亚胺(PI)介质层和金属基底构成。其中,  $\text{VO}_2$  复合超表面的单元结构包含一个金属圆环、两根金属棒和嵌在其中的一小块  $\text{VO}_2$ 。  $\text{VO}_2$  为绝缘态时, 转换器在 1.58~2.08 THz 范围内交叉极化的反射率可达 80% 以上, 极化转换率(PCR)大于 95%, 具有很强的极化转换效果。通过电触发生  $\text{VO}_2$  相变为金属态时, 交叉极化的反射率在 80% 以上的频段缩小为 2.04~2.08 THz, 此频段的 PCR 大于 95%。并且,  $\text{VO}_2$  相变使 PCR 在 95% 以上的相对带宽由 27% 降低到 1.9%。此外, 还分析了 PI 介质层厚度与入射极化角度对器件 PCR 的影响。其中, 当太赫兹波沿  $40^\circ \sim 55^\circ$  极化方向入射时, PCR 均高于 80%。这种带宽可调的宽带极化转换器在未来太赫兹通信、成像等领域有潜在的应用价值。

**关键词** 太赫兹技术; 二氧化钒; 复合超表面; 极化转换器; 带宽可调; 相变材料

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1714001

## 1 引言

极化是太赫兹波的重要特征参数, 在太赫兹通信<sup>[1]</sup>、成像<sup>[2]</sup>、传感检测<sup>[3]</sup>等领域有重要的应用价值。传统的极化控制器件利用的是材料的双折射特性<sup>[4]</sup>, 即双折射材料在两个正交的光轴上具有不同的折射率, 故太赫兹波在这两个方向会产生相位延迟。但是传统极化转换材料存在体积大、带宽窄等缺点, 不利于器件的集成化。

超表面, 是由平面亚波长单元组成的超薄材料, 具有许多传统材料所不具备的电磁响应特性。高性能的超表面是调控太赫兹波的关键, 例如: 移相器<sup>[5]</sup>、滤波器<sup>[6]</sup>、传感器<sup>[7]</sup>等。超表面有着普遍的各向异性与非均匀性, 可以很方便地用来实现极化方向的控制。2015 年, Liu 等<sup>[8]</sup>用单层金属结构的转换器实现了透射的正交极化转换, 在 0.91 ~

1.45 THz 范围内极化转换率(PCR)达到了 90%; 2019 年, Zheng 等<sup>[9]</sup>基于分形结构, 利用多频点叠加设计了反射式宽带极化转换器, 其 PCR 在 8~24 GHz 达到了 90% 以上。但是, 这些超表面极化转换器功能单一, 带宽固定, 无法实现动态调节。

超表面与可调介质相结合是一种有效地动态调节太赫兹波极化和幅值的方式, 常用的可调介质有半导体<sup>[10-13]</sup>、相变材料<sup>[14-17]</sup>、石墨烯<sup>[18-23]</sup>和微机电系统<sup>[24]</sup>。Li 等<sup>[14]</sup>使用相变材料锗锑碲(GST)提出了一种四分之一波片到半波片转换的超表面器件; Sun 等<sup>[18]</sup>构造了一种基于石墨烯电磁感应透明(EIT)现象的带通-带阻转换滤波器。

二氧化钒( $\text{VO}_2$ )是一种典型的可逆相变材料, 其在常温下为绝缘态, 当温度达到 68 °C 后相变为金属态。相变使  $\text{VO}_2$  的电导率发生了近 4 个数量级的变化, 而且温度下降后  $\text{VO}_2$  可以由金属态变回到

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-02-09; 录用日期: 2021-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(62065005)、广西自然科学基金(2020GXNSFDA238019, 2018GXNSFAA050043)、广西测试技术与仪器重点实验室项目(YQ21101)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划项目(2020YCXB04)

通信作者: \*hufangrong@sina.com

绝缘态。这种相变材料不仅可以通过热激励<sup>[25]</sup>,还可以通过电激励<sup>[26]</sup>和光泵浦<sup>[27]</sup>等多种操控方式使其发生相变,故 VO<sub>2</sub> 的应用领域非常广泛。Sanphuang 等<sup>[28]</sup>提出了一个 0.35 THz 的滤波器,通过加热 VO<sub>2</sub> 使其相变,实现滤波器的开关; Nouman 等<sup>[29]</sup>提出了一种基于 VO<sub>2</sub> 的滤波器,通过电触发 VO<sub>2</sub> 相变,响应频点发生频移,从而将透射圆极化波转化成线极化波。

本文提出一种反射式 VO<sub>2</sub> 复合超表面太赫兹带宽可调极化转换器,通过电压或电流控制 VO<sub>2</sub> 的相变,实现了对太赫兹波极化的动态调控。

## 2 器件设计与仿真

器件单元结构如图 1(a)所示,由三层构成:金属底板、中间介质层和 VO<sub>2</sub> 复合超表面。转换器的

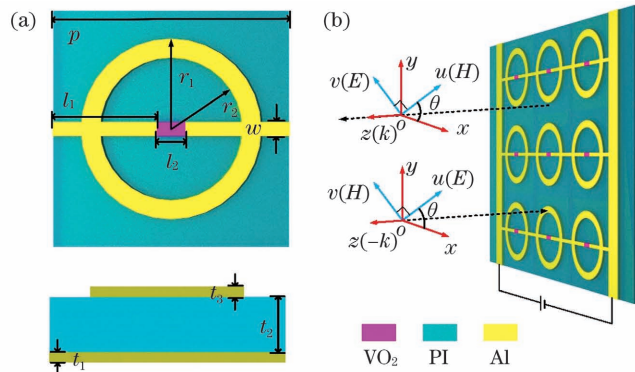


图 1 结构示意图。(a)单元结构的俯视图与侧视图;(b)器件整体示意图

Fig. 1 Schematic of the structure. (a) Top view and cross-section view of the unit cell; (b) schematic of the whole structure

使用全波电磁仿真软件 CST 微波工作室 2019 对转换器性能进行仿真, $x$  和  $y$  方向的边界条件都设置为周期性边界, $z$  方向为开放边界。太赫兹波垂直表面沿  $-z$  方向入射,极化角度设置为沿  $+x$  轴方向逆时针偏转  $\theta=45^\circ$ ,即  $u$  方向。转换器结构中金属铝(Al)的电导率设置为  $\sigma_{\text{Al}}=3.56 \times 10^7$  S/m。中间介质层 PI 的介电常数  $\epsilon=3.5+0.0027i$ 。VO<sub>2</sub> 的介电函数模型用 Drude 模型描述为<sup>[30]</sup>

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

其中  $\epsilon_{\infty}=12$  为高频相对介电常数, $\omega_{\text{p}}(\sigma)$  为与电导率有关的等离子体频率, $\sigma$  为 VO<sub>2</sub> 的电导率, $\gamma=5.75 \times 10^{13}$  为碰撞频率。此外, $\omega_{\text{p}}(\sigma)$  和  $\sigma$  都与自由载流子密度成正比。VO<sub>2</sub> 的等离子体频率与电导率关系可以近似地表示为

$$\omega_{\text{p}}^2(\sigma)=\frac{\sigma}{\sigma_{\text{ref}}}\omega_{\text{p}}^2(\sigma_{\text{ref}}), \quad (2)$$

谐振结构是由一个金属圆环和两根金属棒组成,两根金属棒中间嵌入一小块 VO<sub>2</sub>。其中单元尺寸  $p=100 \mu\text{m}$ ,金属基底厚度  $t_1=0.2 \mu\text{m}$ ,聚酰亚胺薄膜(PI)介质层厚度  $t_2=27 \mu\text{m}$ ,上层金属结构及 VO<sub>2</sub> 的厚度为  $t_3=0.2 \mu\text{m}$ ,金属圆外径  $r_1=38 \mu\text{m}$ 、内径  $r_2=30 \mu\text{m}$ ,金属棒长  $l_1=44 \mu\text{m}$ 、宽  $w=4 \mu\text{m}$ ,VO<sub>2</sub> 的长度为  $l_2=12 \mu\text{m}$ 。本研究设计的器件结构关于  $x$  轴和  $y$  轴对称,入射太赫兹波的极化方向若沿着  $x$  轴或  $y$  轴方向,很难实现极化转换,故需将  $xoy$  坐标系整体逆时针旋转一个角度  $\theta=45^\circ$ ,得到一个新的坐标系  $uov$ ,如图 1(b)所示。考虑到要采用电控加热触发 VO<sub>2</sub> 相变,结构设计时将单元间的金属棒相连。周期化的单元结构两端有金属电极,在电极上施加偏置电压或电流时产生的焦耳热可以触发 VO<sub>2</sub> 相变[图 1(b)]。

其中  $\sigma_{\text{ref}}=3 \times 10^5$  S/m, $\omega_{\text{p}}^2(\sigma_{\text{ref}})=1.4 \times 10^{15}$  rad/s。VO<sub>2</sub> 相变前后电导率的变化范围为  $3 \times 10^2 \sim 3 \times 10^5$  S/m。

利用以上参数对转换器进行了仿真, $u$  极化方向入射波的仿真结果如图 2 所示。其中,图 2(a)为 VO<sub>2</sub> 绝缘态下同极化( $R_{uu}$ )与交叉极化( $R_{vu}$ )的反射率,图中实线表示的是交叉极化反射率,虚线表示的是同极化反射率。可以看出,1.58~2.08 THz 的带宽内同极化方向的反射率几乎为 0,交叉极化的反射率在 0.8 以上。图 2(b)是 VO<sub>2</sub> 金属态下同极化与交叉极化的反射率,同极化与交叉极化反射率的带宽同时变窄,幅值在 0.8 以上时交叉极化反射带宽缩小为 2.04~2.08 THz。

为了更好地评价转换器的极化转换效果,引入极化转换率(PCR)来描述极化转换的效率,表达式为

$$R_{\text{PC}}=\frac{|R_{vu}|^2}{|R_{vu}|^2+|R_{uu}|^2}。 \quad (3)$$

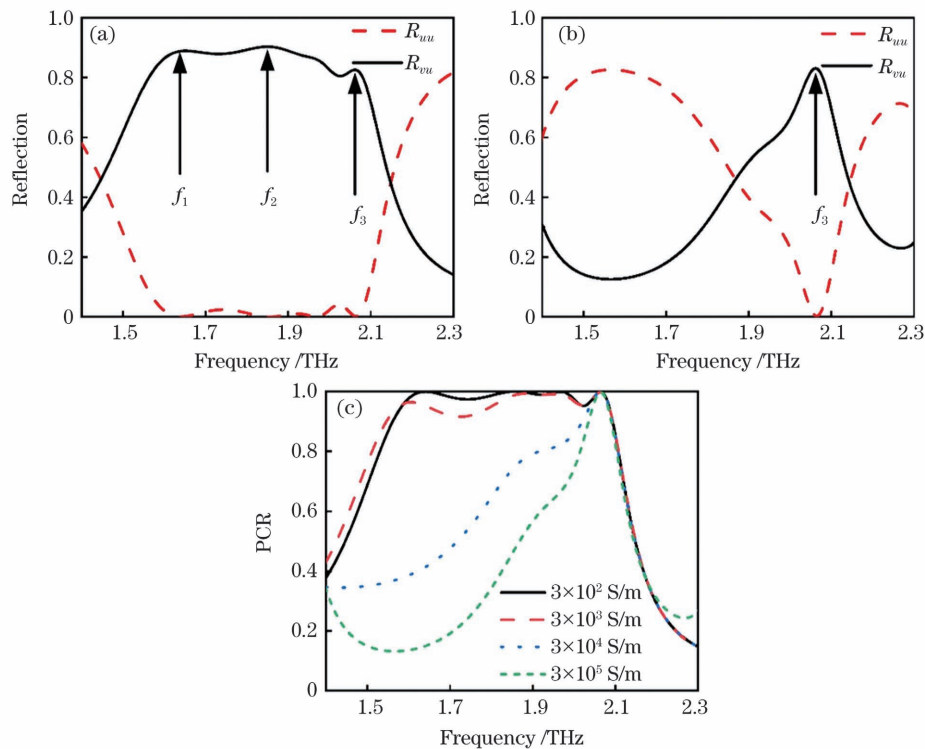


图 2  $u$  极化方向入射波的同极化方向反射率、交叉极化方向反射率与 PCR。(a) 相变前; (b) 相变后; (c) 计算得到  $\text{VO}_2$  不同电导率下的 PCR

Fig. 2 Reflection in the same polarization direction, cross-polarization direction and PCR for the  $u$ -polarization THz wave. (a) Before phase transition; (b) after phase transition; (c) PCR results for different conductivity of  $\text{VO}_2$

计算得到的  $\text{VO}_2$  在不同电导率下的极化转换率如图 2(c) 所示。可以看到,  $\text{VO}_2$  在绝缘态时, 器件有很高的极化转换率, 在 1.58~2.08 THz 范围内 PCR 达到了 95% 以上。相变过程中随着  $\text{VO}_2$  电导率增大, 1.58~2.04 THz 范围内的 PCR 随之减小, 2.04~2.08 THz 的 PCR 几乎保持不变。所以  $\text{VO}_2$  相变为金属态时, 器件的 PCR 在 95% 以上对应的频段减小为 2.04~2.08 THz。由此可知, 通过控制  $\text{VO}_2$  的相变, 可以实现对器件在高极化转换率下对应带宽的动态调控。

相对带宽定义为带宽宽度 ( $\nabla f$ ) 与中心频率 ( $f_0$ ) 之比, 即 ( $\nabla f/f_0$ )。计算得到  $\text{VO}_2$  相变前后, PCR 大于 95% 的相对带宽分别为 27% 与 1.9%。由此表明, 转换器可实现宽带极化转换。

### 3 理论分析

为了阐明太赫兹波极化转换的物理机理及  $\text{VO}_2$  相变对极化转换带宽的影响, 我们选取如图 2(a) 所示的三个谐振频点  $f_1 = 1.61$  THz、 $f_2 = 1.88$  THz 和  $f_3 = 2.07$  THz 进行研究。经过仿真, 得到这三个频点谐振结构与金属基底的电流分布如图 3 所示。

图 3(a)~(c) 是  $\text{VO}_2$  为绝缘态时, 谐振频率分别为 1.61, 1.88, 2.07 THz 对应的电流分布图。图 3(a) 表明, 在 1.61 THz 下谐振结构上的电流集中在两根金属横棒上, 并且谐振结构上的电流与金属基底上的电流方向相反, 形成了磁共振。图 3(b) 中是 1.88 THz 对应的电流分布, 谐振结构上的电流也集中在两根横棒上, 并且谐振结构与金属基底的电流方向相反, 也形成了磁共振。在这两个频点激发的磁共振与入射的  $u$  极化波耦合, 改变了反射波的极化方向。从 1.61 THz 与 1.88 THz 电流图中可以看出, 入射波在两根横棒上激发电流谐振, 由于  $\text{VO}_2$  分布在两根横棒的间隙中, 且处于绝缘态, 故其对谐振并不产生影响。图 3(c) 是 2.07 THz 的表面电流分布, 从中可以看出谐振结构的表面电流主要分布在圆环上, 从表面电流的方向判断, 圆环上产生了一对电偶极子, 并沿  $y$  轴方向激发了很强的电谐振。沿  $y$  轴的电谐振与入射电场的相互耦合改变了反射波的极化方向, 同时上层谐振结构与金属基底电流方向平行, 没有产生磁共振。综上所述, 转换器的宽带极化转换性能是由三个频点的谐振叠加来实现的。

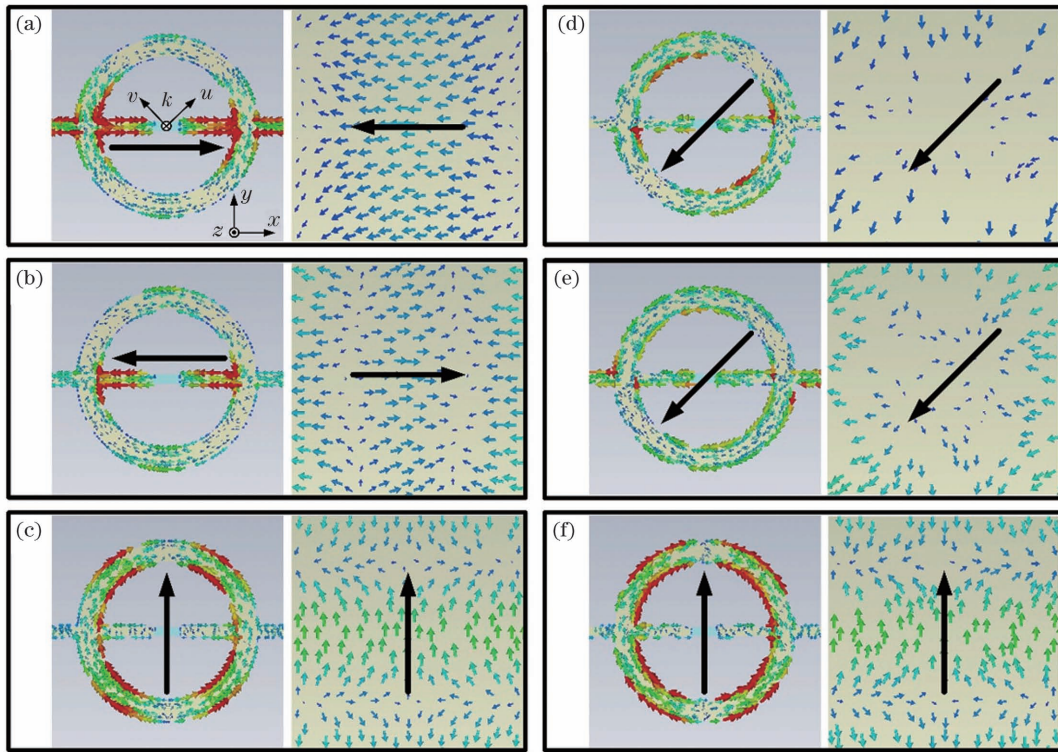


图 3 表面电流分布图。VO<sub>2</sub> 相变前, (a)  $f_1=1.61$  THz, (b)  $f_2=1.88$  THz, (c)  $f_3=2.07$  THz; VO<sub>2</sub> 相变后, (d)  $f_1=1.61$  THz, (e)  $f_2=1.88$  THz, (f)  $f_3=2.07$  THz

Fig. 3 Surface current distribution. Before VO<sub>2</sub> phase transition, (a)  $f_1=1.61$  THz, (b)  $f_2=1.88$  THz, (c)  $f_3=2.07$  THz; after VO<sub>2</sub> phase transition, (d)  $f_1=1.61$  THz, (e)  $f_2=1.88$  THz, (f)  $f_3=2.07$  THz

图 3(d)~(f)是 VO<sub>2</sub> 为金属态时,谐振频率分别为 1.61, 1.88, 2.07 THz 对应的表面电流分布图。在图 3(d)~(e)中谐振结构上表面电流并无明显的集中分布,且与金属基底电流方向相同,与入射波极化方向也相同,这使得在 1.61 THz 和 1.88 THz 处的极化转换率很低。这样的电流分布源于 VO<sub>2</sub> 为金属态,导通了断开的两根金属棒,导致 1.61 THz 和 1.88 THz 对应的极化转换效果变差甚至消失。图 3(f)中谐振结构上的表面电流主要分布在圆环上,沿 y 轴方向有一对明显的电偶极子,并且谐振结构与金属基底电流方向相同,没有发

生磁谐振。由图 3(e)和图 3(f)可知,VO<sub>2</sub> 相变对 2.07 THz 处的电流分布几乎没有影响,所以在此频点处转换器的极化转换效果也没有变化。这是由于 2.07 THz 的谐振是在圆环上的电谐振,金属横棒间隙处的 VO<sub>2</sub> 相变无法对其产生影响。

#### 4 介质厚度与极化角的影响

为了分析 PI 介质层的厚度对器件 PCR 的影响,在 1.3~2.5 THz 频率范围内,仿真了不同介质层厚度下的 PCR 变化,如图 4 所示。其中,图 4(a)是 VO<sub>2</sub> 相变前的 PCR 结果。当介质厚度  $t_2=21 \mu\text{m}$  时

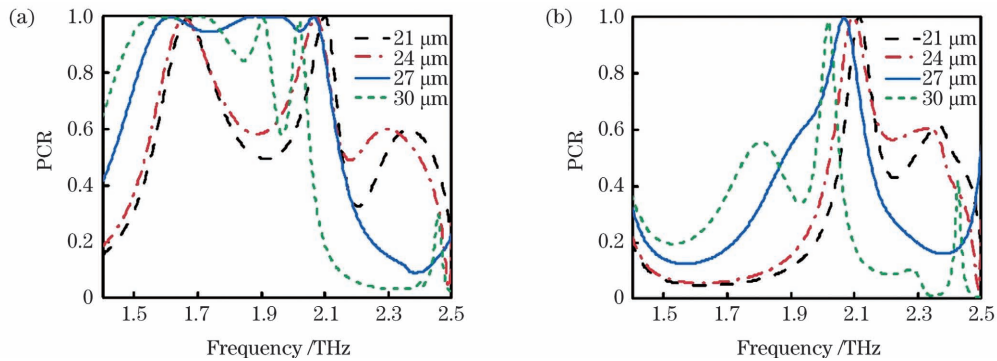


图 4 不同 PI 介质层厚度的 PCR。(a)相变前;(b)相变后

Fig. 4 PCR of PI dielectric layer with different thickness. (a) Before phase transition; (b) after phase transition

有三个谐振峰,随着厚度增加,三个谐振峰会发生红移,并在  $t_2 = 27 \mu\text{m}$  时叠加在一起产生宽带响应。当介质厚度增加至  $30 \mu\text{m}$  时,叠加效应减弱,带宽变小。图 4(b) 是  $\text{VO}_2$  相变后的 PCR 结果。器件的谐振响应随着介质层厚度的增加发生红移,大于  $1.8 \text{ THz}$  频段的响应相对于绝缘态变化很小,小于  $1.8 \text{ THz}$  频段的响应减弱甚至消失。这也从侧面证实了器件的宽带响应是由多频点谐振叠加而成的结论。

基于结构的各向异性导致器件的极化转换率

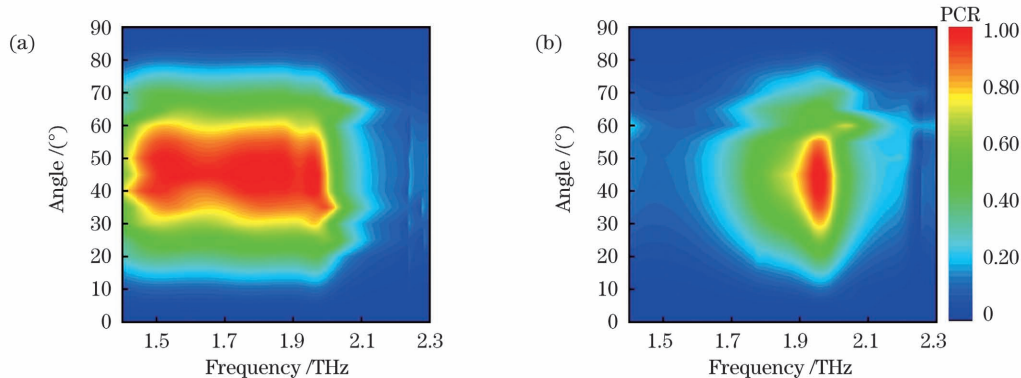


图 5 不同极化角度入射时的 PCR。(a)相变前;(b)相变后

Fig. 5 PCR changes with polarization angles. (a) Before phase transition; (b) after phase transition

## 5 结 论

利用相变材料  $\text{VO}_2$  温度升高后由绝缘态转化成金属态的相变特性,设计了一种反射式带宽可调太赫兹极化转换器,通过施加偏置电压或电流实现  $\text{VO}_2$  相变,使器件由多频点谐振叠加的宽带转化为单频点谐振,从而使交叉极化反射率在  $0.8$  以上的带宽由  $1.58 \sim 2.08 \text{ THz}$  变为  $2.04 \sim 2.08 \text{ THz}$ , PCR 大于  $95\%$  的相对带宽也由  $27\%$  降为  $1.9\%$ 。通过分析转换器的谐振结构与金属基底上的表面电流分布,解释了器件谐振机理以及相变导致带宽变化的原因。在此基础上,还分析了  $\text{VO}_2$  相变前后,介质厚度与入射太赫兹波极化角对 PCR 的影响。本文提出的这种控制太赫兹波极化转换的新方法,在未来太赫兹通信及成像领域具有潜在的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T. A review on terahertz communications research [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2011, 32 (2): 143-171.
- [2] Wang X, Cui Y, Sun W, et al. Terahertz polarization real-time imaging based on balanced electro-optic

(PCR)对角度比较敏感,仿真了极化角  $\theta$  从  $0^\circ$  增加到  $90^\circ$  的变化情况,得到 PCR 与极化角度的关系如图 5 所示。图 5(a)和图 5(b)中分别表示了  $\text{VO}_2$  相变前后的 PCR,可以看出无论是相变前还是相变后,PCR 的变化趋势大致相同,都是先增大后减小,并在  $45^\circ$  时达到最大值。 $\text{VO}_2$  相变前,在  $40^\circ \sim 55^\circ$  之间的 PCR 可达  $80\%$  以上,同时在这个角度范围内带宽宽度变化很小。 $\text{VO}_2$  相变后,极化角度在  $30^\circ \sim 55^\circ$  之间的 PCR 在  $80\%$  以上。这说明所提极化转换器在一定的角度范围内,有着很好的极化转换效果。

detection [J]. Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision, 2010, 27(11): 2387-2393.

- [3] Chen H L, Bian H T, Li J B, et al. Molecular conformations of crystalline L-cysteine determined with vibrational cross angle measurements [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2013, 117 (49): 15614-15624.
- [4] Wiesauer K, Jördens C. Recent advances in birefringence studies at THz frequencies [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2013, 34(11): 663-681.
- [5] Miao Z Q, Wu Q, Li X, et al. Widely tunable terahertz phase modulation with gate-controlled graphene metasurfaces [J]. Physical Review X, 2015, 5(4): 041027
- [6] Hu F R, Xu X, Li P. et al. Mechanically tunable metamaterials terahertz dual-band bandstop filter [J]. Chinese Physics B, 2017, 26(7): 074219.
- [7] Shih K, Lee C K, Chen C H, et al. Nanofluidic terahertz metasensor for sensing in aqueous environment [J]. Applied Physics Letters, 2018, 113 (7): 071105.
- [8] Liu W W, Chen S Q, Li Z C, et al. Realization of broadband cross-polarization conversion in transmission mode in the terahertz region using a

- single-layer metasurface [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 3185-3188.
- [9] Zheng Q, Guo C J, Vandenbosch G A E, et al. Ultra-broadband and high-efficiency reflective polarization rotator based on fractal metasurface with multiple plasmon resonances [J]. *Optics Communications*, 2019, 449: 73-78.
- [10] Zhang Y X, Zhao Y C, Liang S X, et al. Large phase modulation of THz wave via an enhanced resonant active HEMT metasurface [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(1): 153-170.
- [11] Li D M, Yuan S, Yang R C, et al. Dynamical optical-controlled multi-state THz metamaterial absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0816001.  
李达民, 袁苏, 杨荣草, 等. 动态光调控多态太赫兹超材料吸收器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0816001.
- [12] Meng Q L, Zhang Y, Zhang B, et al. Characteristics of optically tunable multi-band terahertz metamaterial absorber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(10): 101603.  
孟庆龙, 张艳, 张彬, 等. 光控可调谐多频带太赫兹超材料吸收器的特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(10): 101603.
- [13] Wang Y R, Liang L J, Yang M S, et al. Terahertz metamaterial based on controllable electromagnetic induced transparency structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 041603.  
王娅茹, 梁兰菊, 杨茂生, 等. 一种光控的电磁诱导透明太赫兹超材料 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 041603.
- [14] Li Y R, Luo J, Li X, et al. Switchable quarter-wave plate and half-wave plate based on phase-change metasurface [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 4600410.
- [15] Li T Y, Huang L L, Liu J, et al. Tunable wave plate based on active plasmonic metasurfaces [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 4216-4226.
- [16] Cao T, Wei C W, Simpson R E, et al. Broadband polarization-independent perfect absorber using a phase-change metamaterial at visible frequencies [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 3955.
- [17] Wang D C, Zhang L C, Gu Y H, et al. Switchable ultrathin quarter-wave plate in terahertz using active phase-change metasurface [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15020.
- [18] Sun H Y, Zhao L, Dai J S, et al. Broadband filter and adjustable extinction ratio modulator based on metal-graphene hybrid metamaterials [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(7): 1359-1369.
- [19] Amin M, Siddiqui O, Farhat M. Linear and circular dichroism in graphene-based reflectors for polarization control [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(2): 024046.
- [20] Quader S, Zhang J, Akram M R, et al. Graphene-based high-efficiency broadband tunable linear-to-circular polarization converter for terahertz waves [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(5): 4501008.
- [21] Zhou Y X, Huang Y Y, Jin Y P, et al. Terahertz properties of graphene and graphene-based terahertz devices [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614001.  
周译玄, 黄媛媛, 靳延平, 等. 石墨烯太赫兹波段性质及石墨烯基太赫兹器件 [J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614001.
- [22] Yuan Y H, Chen X Y, Hu F R, et al. Terahertz amplitude modulator based on metasurface/Ion-Gel/graphene hybrid structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614016.  
袁莹辉, 陈懿宇, 胡放荣, 等. 基于人工超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调幅器件 [J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614016.
- [23] Li H, Yu J, Chen Z. Broadband tunable terahertz absorber based on hybrid graphene-vanadium dioxide metamaterials [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0903001.  
李辉, 余江, 陈哲. 基于混合石墨烯-二氧化钒超材料的太赫兹可调宽带吸收器 [J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0903001.
- [24] Demir K, Unlu M. Miniature MEMS: novel key components toward terahertz reconfigurability [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2020, 29(4): 455-467.
- [25] Wen Q Y, Zhang H W, Yang Q H, et al. Terahertz metamaterials with VO<sub>2</sub> cut-wires for thermal tunability [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(2): 021111.
- [26] Ruzmetov D, Gopalakrishnan G, Deng J D, et al. Electrical triggering of metal-insulator transition in nanoscale vanadium oxide junctions [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(8): 083702.
- [27] Tian X M, Li Z Y. An optically-triggered switchable mid-infrared perfect absorber based on phase-change material of vanadium dioxide [J]. *Plasmonics*, 2018, 13(4): 1393-1402.
- [28] Sanphuang V, Ghalichechian N, Nahar N K, et al. Reconfigurable THz filters using phase-change material and integrated heater [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016, 6(4): 583-591.
- [29] Nouman M T, Hwang J H, Faiyaz M, et al.

Vanadium dioxide based frequency tunable metasurface filters for realizing reconfigurable terahertz optical phase and polarization control [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12922-12929.

[30] Wang S X, Kang L, Werner D H. Active terahertz chiral metamaterials based on phase transition of vanadium dioxide ( $\text{VO}_2$ ) [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 189.

## Tunable-Bandwidth Terahertz Polarization Converter Based on a Vanadium Dioxide Hybrid Metasurface

Yang Zhaohui<sup>1</sup>, Jiang Mingzhu<sup>1,2</sup>, Liu Yongchen<sup>1</sup>, Zhang Longhui<sup>1</sup>, Xu Weilin<sup>1</sup>, Wang Yue'e<sup>1</sup>, Hu Fangrong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

<sup>2</sup> Guilin Institute of Information Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

### Abstract

**Objective** Polarization is an important characteristic of terahertz (THz) waves and is widely applied in THz communications, imaging, sensing, detection, and other fields. Traditional THz polarization converters have large volumes, narrow bandwidths, and poor integration capabilities because they are based on the birefringence of materials. Metasurface polarization converters provide a potentially useful alternative. A metasurface is an ultrathin material comprising a planar array of subwavelength unit cells that can control THz waves with high performance. However, conventional metasurface polarization converters have a single function and a fixed bandwidth; thus, they cannot provide dynamic modulation. In this paper, we propose a THz-bandwidth, tunable polarization converter based on a vanadium dioxide ( $\text{VO}_2$ ) hybrid metasurface.  $\text{VO}_2$  is a typical phase-transition material that can change from an insulating state to a metallic state under an external optical, electrical, or thermal stimulus when its temperature exceeds  $68^\circ\text{C}$ . During the phase transition, its electrical conductivity increases by about four orders of magnitude. Our proposed device can modulate the polarization of a THz wave by dynamically controlling the phase transition of  $\text{VO}_2$ .

**Methods** The proposed polarization converter comprises three layers: a metal substrate, an intermediate polyimide (PI) dielectric layer, and a  $\text{VO}_2$  composite metasurface. The resonant structure of the converter comprises a metal ring, with two metal rods crossing a diameter, and a piece of  $\text{VO}_2$  embedded in the middle of the two metal rods. We used the full-wave electromagnetic simulation software CST Microwave Studio 2019 to simulate the performance of this converter. In the simulation, we used periodic boundary conditions in the  $x$ - and  $y$ -directions, and open boundary in the  $z$ -direction. The THz wave is incident normal to the surface from the  $-z$ -direction, and the polarization angle is set at a counterclockwise deflection of  $\theta = 45^\circ$  relative to the  $+x$ -axis. We obtained reflection amplitude spectra for co-polarization and cross-polarization from the simulation both before and after the  $\text{VO}_2$  phase transition and calculated the polarization conversion ratio (PCR) and the relative bandwidth of the device using the simulation results. We simulated the current distributions in both the resonant structure and the metal substrate to clarify the physical mechanism responsible for THz-wave polarization conversion and the effect of the  $\text{VO}_2$  phase transition on the polarization conversion bandwidth. We also analyzed the effects of the thickness of the PI layer and the polarization angle of the incident THz wave on the polarization conversion.

**Results and Discussions** When  $\text{VO}_2$  is in the insulating state, the reflection of the cross-polarization component exceeds 80% over the frequency range of 1.58–2.08 THz and PCR exceeds 95%. However, when the  $\text{VO}_2$  becomes metallic state under electrical triggering, the frequency band with a cross-polarization conversion rate above 80% is reduced to 2.04–2.08 THz, although the PCR in this frequency band remains above 95% (Fig. 2). The relative bandwidth with such a large PCR is thus reduced from 27% to 1.9%. We analyzed the current distribution at the three resonant frequency points  $f_1 = 1.61$ ,  $f_2 = 1.88$ , and  $f_3 = 2.07$  THz. When  $\text{VO}_2$  is in the insulating state, resonant frequencies occur at 1.61 and 1.88 THz because of polarization conversion caused by magnetic resonance of

the incident wave, while a third resonant frequency at 2.07 THz is due to polarization conversion caused by electric dipole resonance of the incident wave. The superposition of these three resonant frequencies forms a broad band. When VO<sub>2</sub> is in the metallic state, however, the magnetic resonances at 1.61 and 1.88 THz are eliminated, but the electric dipole resonance at 2.07 THz is not affected. Consequently, the band becomes a narrow-band resonance at this single frequency. We also analyzed the effects of the thickness of the PI dielectric layer and the incident polarization angle on PCR. When the polarization angle of the incident THz wave ranged from 40° to 55°, PCR was >80% (Fig. 5).

**Conclusions** We have designed a bandwidth-tunable THz polarization converter based on the phase-transition material VO<sub>2</sub>. When VO<sub>2</sub> is triggered to undergo phase transition, the device transforms from a multifrequency, resonance-superposition, broadband device to one with a single resonant frequency. Consequently, the bandwidth for which the cross-polarization reflectivity exceeds 0.8 changes from 1.58–2.08 THz to 2.04–2.08 THz; the relative bandwidth for which PCR is >95% thus decreases from 27% to 1.9%. By analyzing the resonant modes and the accompanying surface-current distributions, we can explain both the mechanisms responsible for the resonances in the device and the reason for the bandwidth change caused by the phase transition. We also analyzed the effects of the thickness of the dielectric medium and the polarization angle of the incident THz wave on the PCR before and after the phase transition of VO<sub>2</sub>. The proposed method has potential and important applications in THz communication, sensing, detection, and imaging systems.

**Key words** terahertz technology; vanadium dioxide; hybrid metasurface; polarization converter; tunable bandwidth; phase transition materials

**OCIS codes** 040.2235; 110.6795; 160.3918; 260.5430