

二氧化钒辅助的可切换多功能超材料结构

严德贤 陈欣怡 封覃银 陆紫君 张禾 李向军 李吉宁

A vanadium dioxide-assisted switchable multifunctional metamaterial structure

YAN De-xian, CHEN Xin-yi, FENG Qin-yin, LU Zi-jun, ZHANG He, LI Xiang-jun, LI Ji-ning

引用本文:

严德贤, 陈欣怡, 封覃银, 陆紫君, 张禾, 李向军, 李吉宁. 二氧化钒辅助的可切换多功能超材料结构[J]. *中国光学*, 2023, 16(3): 514–522. doi: 10.37188/CO.2022–0195

YAN De-xian, CHEN Xin-yi, FENG Qin-yin, LU Zi-jun, ZHANG He, LI Xiang-jun, LI Ji-ning. A vanadium dioxide-assisted switchable multifunctional metamaterial structure[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(3): 514-522. doi: 10.37188/CO.2022-0195

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0195>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超颖表面原理与研究进展

The principle and research progress of metasurfaces

中国光学 (中英文). 2017, 10(5): 523 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0523>

电磁编码超材料的理论与应用

Theory and application of coding metamaterials

中国光学 (中英文). 2017, 10(1): 1 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0001>

太赫兹偏振测量系统及其应用

Polarization sensitive terahertz measurements and applications

中国光学 (中英文). 2017, 10(1): 98 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0098>

电环形谐振腔表面几何参数对太赫兹超材料吸收体性能的影响

Influence of the geometric parameters of the electrical ring resonator metasurface on the performance of metamaterial absorbers for terahertz applications

中国光学 (中英文). 2018, 11(1): 47 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0047>

利用3D打印技术制备太赫兹器件

Fabrication of terahertz device by 3D printing technology

中国光学 (中英文). 2017, 10(1): 77 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0077>

石墨烯太赫兹波动态调制研究进展

Recent progress in terahertz dynamic modulation based on graphene

中国光学 (中英文). 2017, 10(1): 86 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0086>

文章编号 2097-1842(2023)03-0514-09

二氧化钒辅助的可切换多功能超材料结构

严德贤^{1*}, 陈欣怡^{1†}, 封覃银¹, 陆紫君¹, 张禾¹, 李向军¹, 李吉宁²

(1. 中国计量大学信息工程学院 浙江省电磁波信息技术与计量检测重点实验室,
浙江 杭州 310018;

2. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

† 共同第一作者

摘要:本文提出了一种基于二氧化钒(VO_2)相变特性的开口谐振环结构多功能超材料器件。该器件由 VO_2 填充的开口谐振环和中心放置十字的顶层、聚酰亚胺(PI)介质层和金属基底构成。 VO_2 在绝缘态时,可以实现交叉极化转换功能,在 0.48~0.87 THz 范围内,偏振转换率大于 90%。当 VO_2 为金属态时,该器件能够实现双频吸收和高灵敏度传感功能。在 1.64 THz 和 2.15 THz 频率处的吸收率大于 88%。通过改变样品材料的折射率,两个频率点处的传感灵敏度分别约为 25.6 GHz/RIU 和 159 GHz/RIU,品质因子 Q 分别为 71.34 和 23.12。所提出的超材料多功能器件具有结构简单、可切换功能和高效率极化转换等特性,在未来太赫兹通信、成像等领域都有潜在的应用价值。

关键词: 太赫兹超材料; 多功能器件; 吸收; 偏振转换; 传感

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0195

A vanadium dioxide-assisted switchable multifunctional metamaterial structure

YAN De-xian^{1*}, CHEN Xin-yi^{1†}, FENG Qin-yin¹, LU Zi-jun¹, ZHANG He¹, LI Xiang-jun¹, LI Ji-ning²

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Technology and Metrology of Zhejiang Province,
College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

† These authors contributed equally to this work

* Corresponding author, E-mail: yandexian1991@163.com

Abstract: In this paper, a multifunctional metamaterial device based on the phase transition properties of vanadium dioxide (VO_2) is proposed. The metamaterial structure consists of a top layer combined with VO_2 -filled Split Ring Resonator (SRR) and a metal cross, a polyimide (PI) dielectric layer, and a metal substrate. When the VO_2 is in the insulating state, the cross-polarization conversion function can be realized, and its Polarization Conversion Rate (PCR) is greater than 90% in the range of 0.48-0.87 THz. When the VO_2 is in the metallic state, the device can realize dual-frequency absorption and be applied in high-sensitivity sensing

收稿日期: 2022-09-19; 修订日期: 2022-10-19

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划资助项目(No. 202110356012); 国家自然科学基金(No. 62001444)

Supported by the National Project of Innovation and Entrepreneurship Training for Undergraduates (No. 202110356012); National Natural Science Foundation of China (No. 62001444)

functions. The absorption rates are higher than 88% at the frequencies of 1.64 THz and 2.15 THz. By changing the refractive index of the sample material, the sensing sensitivities at the two related frequencies are about 25.6 GHz/RIU and 159 GHz/RIU, and the Q-factors are 71.34 and 23.12, respectively. The proposed metamaterial multifunctional device exhibits the advantages of a simple structure, a switchable function, and high-efficiency polarization conversion, and provides potential application value in future terahertz communication, imaging and other fields.

Key words: terahertz metamaterial; multifunctional device; absorption; polarization conversion; sensing

1 引言

太赫兹(THz)波,指的是频率在 0.1 ~ 10 THz (波长为 30~3 000 μm)之间的电磁波,在长波段与毫米波相重合,在短波段与红外光相重合^[1-2]。超材料是人们对常规材料进行人工组合设计而成的一种电磁复合材料^[3-5]。在信息化进程不断深入的今天,随着太赫兹技术的迅速发展,基于太赫兹的超材料的应用拥有了更多可能性,在滤波器^[6]、调制器^[7-8]、偏振转换器^[9-10]、吸收器^[11]等许多方面的应用都受到了诸多关注。石墨烯^[12-13]、液晶(LC)^[14]、二氧化钒(VO_2)^[15]等可调谐材料的出现,为功能性超材料器件的开发提供了新的途径^[16]。 VO_2 作为一种典型相变材料,通过各种激励方式(如热、电等)可使其发生相变^[17],在温度变化时,其电导率会发生近 4 个数量级的变化,同时也会呈现出不同的状态,这使得 VO_2 适用于设计多功能超材料器件^[18]。

作为太赫兹系统的核心器件之一,太赫兹波偏振转换器能够有效调控和改变太赫兹波的偏振状态^[19],在光谱及太赫兹成像等应用中都有关键作用。近几十年来,研究者们在这方面进行了大量工作,各式各样的超材料偏振转换器被相继报道。相比于传统光学器件中起偏振转换功能的波片,基于超材料的偏振转换器具有损耗小、宽带响应、超薄、尺寸小易集成等诸多潜在优势^[20]。目前,大多数太赫兹偏振转换器普遍存在图层微结构复杂、制备困难等问题,如何设计结构简单、工作频带宽的偏振转换器仍是一项研究难题^[21]。He ZH H 等人提出了一种基于 VO_2 与石墨烯的简单超表面^[22],其灵敏度和品质因数(FOM)分别可以达到 1.7745 THz/RIU 和 23.61,可实现超高灵敏度传感器性能。Yan D X 等人提出了一种基于 VO_2 的太赫兹宽带线圆极化转换

器^[23],该转换器的极化转换比高于 0.9,带宽比值为 81%,工作频率范围为 0.912~2.146 THz。高鹏等人基于二氧化钒(VO_2)独特的相变性质,设计了一种带宽可调谐的多层超材料吸收器^[24]。作为宽带吸收器,在 2.3~5.3 THz 频率范围内的吸收率超过 90%;作为窄带吸收器,在 7.1 THz 处吸收率超过 99%,达到完美吸收效果。双吸收性能对入射光偏振都不敏感,入射角度的改变对吸收性能影响较小。

在上述研究的基础上,本文提出了一种基于 VO_2 相变特性的开口谐振环结构多功能超材料偏振转换器件。该器件通过改变 VO_2 材料电导率的方式实现多功能转换。当 VO_2 处于金属状态时,该结构为 VO_2 填充开口的金属环和中心放置十字的顶层、聚酰亚胺(PI)介质层组成的吸收器和高灵敏度传感器。当 VO_2 处于绝缘状态时,该结构主要为金属开口十字环顶层、PI 介质层、金属底层组成的偏振转换器,能够实现宽带线偏振-线偏振转换和多频点线偏振-圆偏振转换功能。本文的多功能超材料器件结构简单,增加了器件的实用性,为其他可调器件实现不同频段不同功能提供新的研究思路。

2 结构与仿真

本文提出的超材料多功能器件的单元结构如图 1(彩图见期刊电子版)所示。该单元结构从上至下依次是由 VO_2 填充的开口谐振环和金属十字结构构成的顶层结构、PI 介质层及底部金属层。本文使用 CST Microwave Studio 软件对提出的结构及其特性进行仿真研究。太赫兹波沿 $-z$ 方向垂直入射到超材料结构表面。仿真时,在 x 和 y 方向上添加单元周期边界,在 z 方向添加开放边界条件。

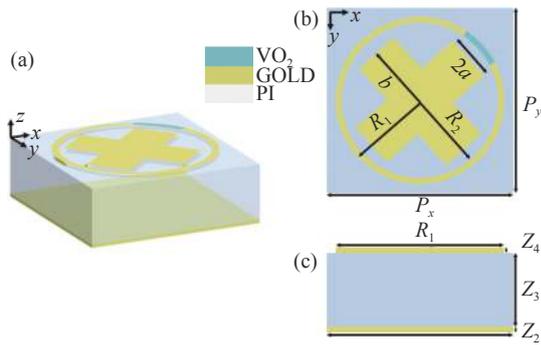


图 1 所提出的多功能超材料器件的结构示意图。(a)三维视图; (b)俯视图; (c)侧视图

Fig. 1 Structural diagram of the proposed multifunctional metamaterial device. (a) 3D schematic; (b) top view; (c) side view

参数优化之后, 设定其结构单元的周期 $P_x=P_y=100 \mu\text{m}$, 圆环开口角度 $\alpha=30^\circ$, 开口圆环外半径 $R_1=45 \mu\text{m}$, 开口圆环内半径 $R_2=42 \mu\text{m}$, 中心十字的较长边为 $b=32 \mu\text{m}$, 中心十字的较短边为 $a=10 \mu\text{m}$, PI 介质层的相对介电常数为 $\epsilon=3.5$, 损耗角正切值为 $\tan \delta=0.0027$, 厚度为 $Z_3=45 \mu\text{m}$ 。底层金属材料为金, 其厚度为 $Z_2=0.1 \mu\text{m}$, 电导率为 $\sigma(\text{gold})=4.09 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。根据之前的研究结果, 可以使用 Drude 模型来描述 VO_2 在太赫兹波段的特性^[25]。通过外部电场、光场和温度场的作用, 能够在较短的时间内改变 VO_2 的相变特性, 进而影响 VO_2 的电导率^[26]。在本文中, 当 VO_2 的电导率从小于 100 S/m 变化为高于 200000 S/m 时, VO_2 可以从绝缘态变化为金属态, 能够实现不同的功能。

3 结果与讨论

3.1 VO_2 为绝缘态时超表面作为偏振转换器

当 VO_2 处于绝缘态时, 该结构可以看作是一个偏振转换器件, 能够实现线偏振-线偏振和线偏振-圆偏振转换。工作带宽和转换效率是超材料偏振转换器的重要性能指标。其中, 转换效率通常以偏振转换率(PCR)表征, 可以表示为^[27]:

$$PCR_1 = \frac{(r_{xy})^2}{(r_{yy})^2 + (r_{xy})^2}, \quad (1)$$

$$PCR_2 = \frac{(r_{yx})^2}{(r_{xx})^2 + (r_{yx})^2}, \quad (2)$$

式中: PCR_1 和 PCR_2 分别为横电 TE 模式下及横磁 TM 模式下的偏振转换率, r_{yy} 代表横电 TE 模式(电场沿着 y 方向)下的共极化反射系数, r_{xy} 代表 TE 模式下的交叉极化反射系数; r_{xx} 代表横磁 TM 模式(电场沿着 x 方向)下的共极化反射系数, r_{yx} 代表 TM 模式下的交叉极化反射系数。

基于优化后的几何参数, 在 VO_2 处于绝缘态(电导率为 20 S/m)时, 对 $0.2\sim 1.2 \text{ THz}$ 范围内的超材料结构进行仿真, 得到了两种模式下的共极化反射和交叉极化反射系数。由于该结构在 x 和 y 方向具有对称性, 在正常入射条件下, TE 模和 TM 模是简并的, 对偏振极化角不敏感, 故本文提出的结构在 TE 模 TM 模下共极化反射系数与交叉极化反射系数是相同的, 如图 2(a)(彩图见期刊电子版)所示。在 $0.48\sim 0.87 \text{ THz}$ 频率范围内, 共极化反射系数相对较低, 而交叉极化反射系数较高, 可以实现交叉偏振转换。在频率为 0.41 THz 和 1.0 THz 处, 交叉极化反射系数和共极化反射系数相等, 可以实现线偏振-圆偏振转换。图 2(b)(彩图见期刊电子版)给出了计算得

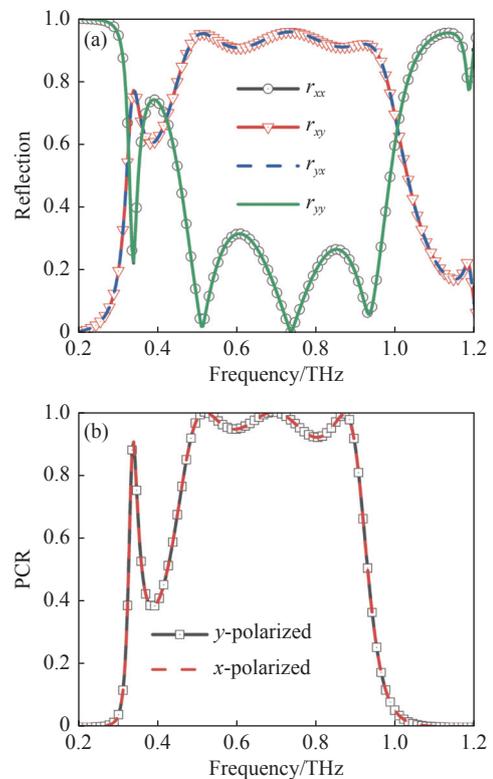


图 2 仿真得到的(a)反射系数和(b)不同偏振入射的 PCR
Fig. 2 (a) Reflection coefficients and (b) PCR for different polarized incident terahertz wave through simulation

到的偏振转换率。从图2(b)可以看出,在0.48~0.87 THz频率范围内,线偏振-交叉线偏振的偏振转换效率高于90%,并且在0.52 THz、0.66 THz和0.85 THz频率处的转换效率接近100%,能够实现完美线偏振-线偏振转换。由图2可知,在0.4 THz频点附近PCR曲线有明显的峰谷。这是由于在该频点附近存在线偏振-圆偏振转换,在该频点处线-线偏振转换效率受到交叉极化反射和共极化反射转换产生的电磁波极化偏移的影响导致偏振转换效率下降。同时,通过对0.41 THz和1.0 THz处的转换特性进行分析,可以发现在这两个频率处能够实现线偏振-圆偏振转换,可以将入射的线偏振太赫兹波转换为圆偏振太赫兹波。

另外,由于超材料结构的工作性能在一定程度上受几何结构参数的影响,为得到最理想的参

数,本文研究了结构几何参数对工作性能的影响。在研究过程中,除一个待研究参数改变外,其他参数保持初始设置不变。分别研究了参数 b 、 Z_3 和 R_1 对偏振转换率的影响,如图3(彩图见期刊电子版)所示。如图3(a)所示,偏振转换器的工作带宽随着中心十字较长边长度 b 的增加而减小,带宽变窄,且较高频率处的完美偏振转换频率呈红移的趋势。由图3(b)可知,介质层厚度 Z_3 对该结构偏振转换率的影响较小。由图3(c)可知,当开口谐振环外半径 R_1 从43 μm 增加到48 μm 时,偏振转换带宽的低频部分受到的影响较大,偏振转换率降低,但高频部分的偏振转换带宽受到影响较小。基于上述分析,在现有的器件加工条件下,当结构参数在一定范围内变化时,对偏振转换性能的影响是可接受的。

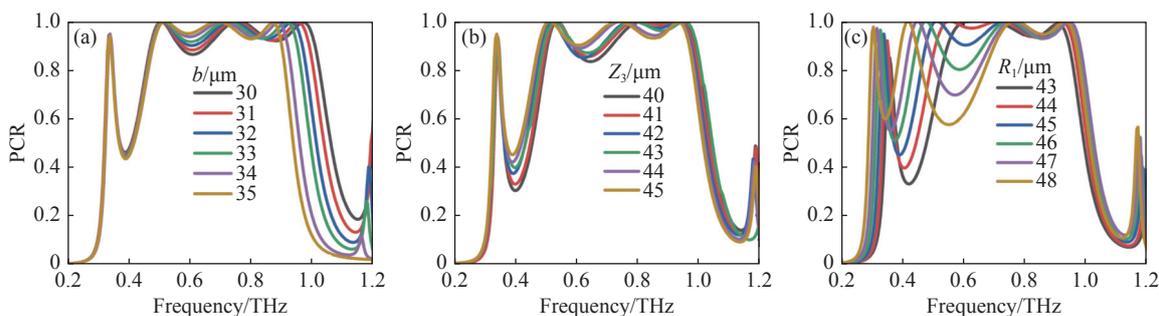


图3 当 VO_2 处于绝缘态时,结构参数(a)中心十字长边长 b ; (b)介质厚度 Z_3 以及(c)开口谐振环外半径 R_1 对偏振转换率的影响

Fig. 3 Effects of structural parameters (a) b ; (b) Z_3 and (c) R_1 on the PCR when the VO_2 is in the insulating state

上述分析结果表明,本文提出的超材料多功能偏振转换器件能够在较宽的频率范围内实现高效率的偏振转换。其可应用在医学成像、偏振转换器件的研制等方面。由于频谱资源充足,太赫兹通信具有比现有微波通信更高的数据容量,偏振和轨道角动量(OAM)复用可以进一步增加信息容量。通过偏振转换来操纵超表面的输出电磁场,可实现诸如平面透镜、光束偏转器、全息成像和涡旋波发生器等各种功能器件。

3.2 当 VO_2 处于金属态时超材料结构性能分析

当 VO_2 处于金属态时,由 VO_2 填充缺口的开口谐振环可以近似看作是一个圆环。此时,所设计的超材料结构可以实现双频吸收和传感功能。

3.2.1 金属态时作为双频吸收器

当 VO_2 处于金属态时,所提出的太赫兹超材

料能够实现吸收功能,并研究了其光学特性。通过仿真计算,得到了该结构的反射系数(S_{11})和透射系数(S_{21}),则该结构的电磁吸收率(A)可以表示为^[26]:

$$A = 1 - R - T - R_{\perp} \quad (3)$$

式中, A 、 R 和 T 分别表示吸收率、反射率和透射率,其中 $R=|S_{11}|^2$, $T=|S_{21}|^2$ 。此外,交叉极化波的反射 R_{\perp} 也需要考虑。在金属态 VO_2 薄膜存在的条件下,所研究的太赫兹频率范围内透射部分被抑制,本结构的透射始终为0。通过仿真计算,交叉极化反射 R_{\perp} 也可以被忽略。当 VO_2 处于金属态时,计算了超材料结构作为吸收器时的相关工作性能,以及相对阻抗的实部和虚部,结果如图4(a)(彩图见期刊电子版)所示,其中黑色实线表示吸收光谱 $A(\omega)$,蓝色和红色虚线分别表示吸

收器共极化反射和交叉极化反射。从图 4(a)中可以看出,在 1.64 THz 和 2.15 THz 频率处可以观察到 2 个不同的吸收峰,吸收率大于 88%。且 1.64 THz 处的吸收峰的带宽小于 2.15 THz 频率处的吸收峰带宽。

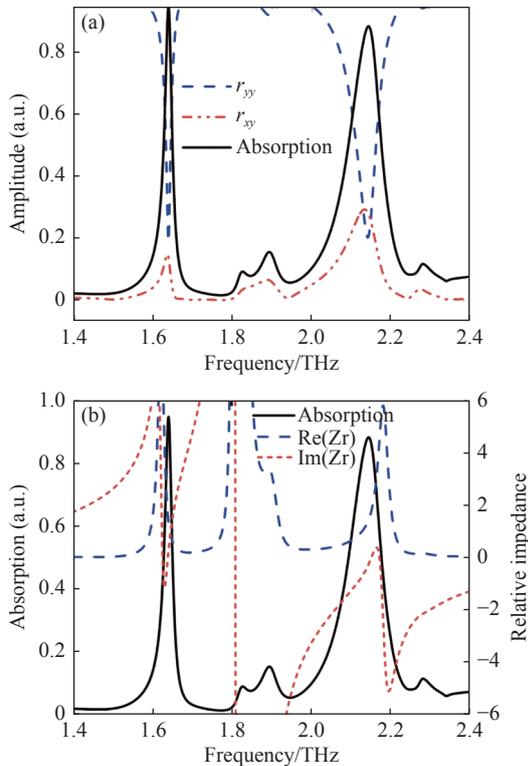


图 4 VO₂ 处于金属态时,所设计的超材料结构的吸收特性。(a)反射系数和吸收特性;(b)相对阻抗的实部和虚部

Fig. 4 Absorption properties of the designed structure when VO₂ is in the metallic state. (a) Reflection coefficient and absorption properties; (b) real and imaginary parts of relative impedance

下面将运用阻抗匹配理论阐明吸收器的工作机理。吸收器的相对阻抗的实部和虚部均可

由 S 参数反演法导出。吸收率和相对阻抗可表示为^[26]:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 = 1 - \left| \frac{Z_r - 1}{Z_r + 1} \right|^2, \quad (4)$$

$$Z_r = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11}(\omega))^2 - S_{21}^2(\omega)}{(1 - S_{11}(\omega))^2 - S_{21}^2(\omega)}}, \quad (5)$$

其中, Z_0 和 Z 分别表示空气和吸收结构的有效阻抗。 $Z_r = Z/Z_0$ 表示吸收结构和空气之间的相对阻抗。当吸收结构的阻抗和空气中的阻抗相匹配时,即 $Z_r = 1$ 时,超材料结构的吸收性能最佳。图 4(b) (彩图见期刊电子版)给出了所提出吸收器的吸收谱和相对阻抗实部和虚部。从图中可以看出,在 1.64 THz 和 2.15 THz 频率处的两个吸收峰附近,相对阻抗的实部逐渐接近于 1,虚部逐渐接近于 0,在这两个频率处实现了吸收器和空气之间的阻抗匹配。需要说明的是,由于所设计的超材料器件的单元结构具有对称性,当偏振角为 90° 时,能够得到大致相同的吸收特性,相关结果在文中没有给出。

当 VO₂ 处于金属态时,研究了部分几何参数 (b 、 R_1 、 Z_3) 对所设计超材料结构的太赫兹吸收特性的影响,如图 5 (彩图见期刊电子版) 所示。由图 5(a) 可以看出,超材料结构顶层中心十字长边长 b 的变化会引起吸收谐振峰的轻微红移,且随着 b 的增加,高频处的吸收也有轻微降低。从图 5(b) 能够看出,随着介质层 Z_3 从 43 μm 增加到 47 μm ,低频处的吸收峰具有一定程度的红移,且吸收率从接近 100% 下降到 70% 左右。相较于低频处的吸收峰,高频处的吸收峰表现出较为显著的红移现象,吸收率变化不大。从图 5(c) 可

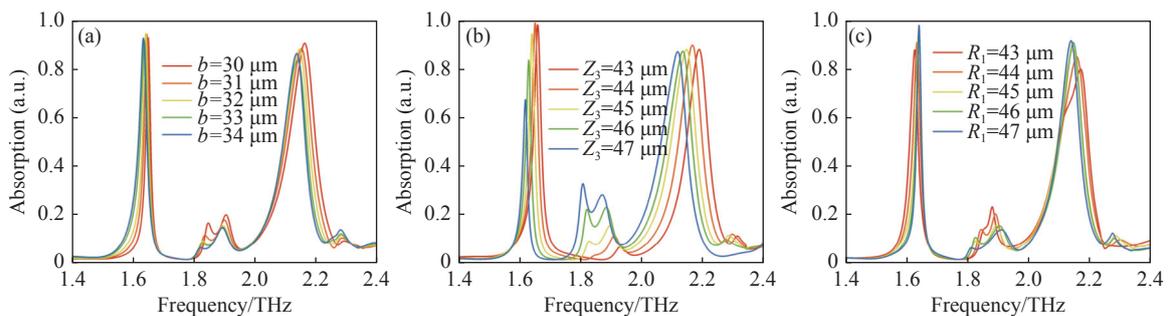


图 5 吸收器单元结构参数(a)中心十字长边长 b ; (b)介质层厚度 Z_3 ; (c)开口谐振环半径 R_1 对太赫兹吸收率的影响

Fig. 5 Effects of structural parameters (a) b ; (b) Z_3 and (c) R_1 on the absorption characteristics

可以看出,当顶层圆环结构外半径 R_1 从 $43\ \mu\text{m}$ 增加到 $47\ \mu\text{m}$ 时,低频处的吸收峰呈现轻微的蓝移现象,且吸收率略微升高,高频处的吸收峰出现轻微红移趋势,但吸收率增加明显。

为进一步研究本器件的吸收机理,研究了当入射太赫兹波为 TE 偏振波时,该吸收结构在两个吸收峰(1.64 THz 和 2.15 THz)处的顶层微结构的电场分布,如图 6(彩图见期刊电子版)所示。图 6(a)给出了频率为 1.64 THz 处微结构上的电场分布,该频率处的电场主要分布在中心十字结构的末端处,与底部金属薄膜层存在很强的耦合,引起了此频率处太赫兹波的吸收。而如图 6(b)所示,在频率为 2.15 THz 处,电场主要均匀分布在顶层的圆环结构上,导致此处太赫兹波的吸收。

最后,本文对不同偏振(TE 偏振和 TM 偏振)入射太赫兹在不同入射角度时的吸收特性进行了研究。从图 7(a)(彩图见期刊电子版)可以看出,对于 TE 偏振入射太赫兹波,当入射角增加时,低

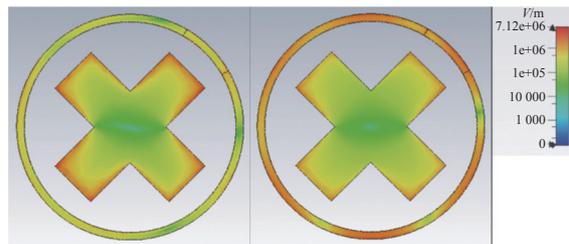


图 6 顶层微结构在谐振频率(a)1.64 THz 和(b)2.15 THz 处的电场分布

Fig. 6 Electric field distributions of the top microstructure at resonant frequencies of (a) 1.64 THz and (b) 2.15 THz

频处的吸收峰分裂为两个;高频处的吸收峰表现出红移趋势,且在入射角大于 20° 时,此处吸收峰的谐振逐渐转移到另一个吸收峰上。从图 7(b)(彩图见期刊电子版)可以看出,入射角度对 TM 偏振入射太赫兹波的影响较大,当入射角度大于 20° 时,吸收特性受影响较大,且分裂为多个频率范围的吸收区域。

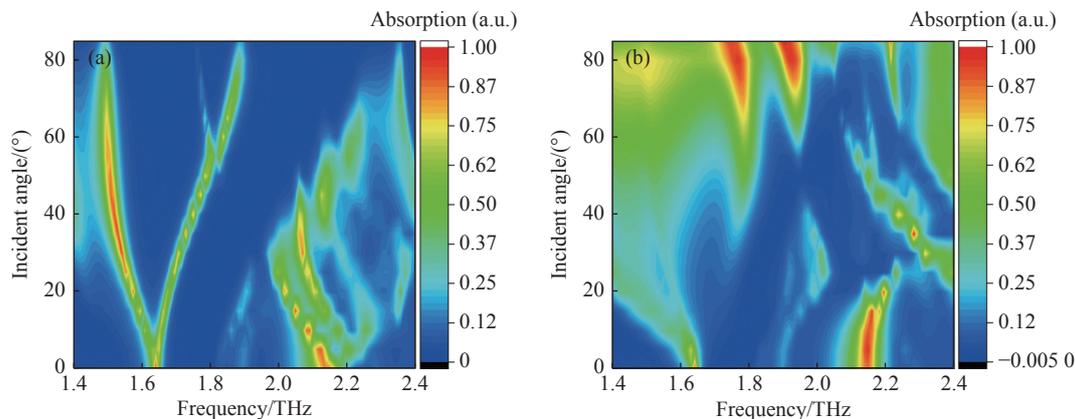


图 7 不同入射角的超材料结构吸收特性。(a)TE 偏振入射;(b)TM 偏振入射

Fig. 7 Absorption properties of metamaterial structure at different incident angles. (a) TE polarized incidence; (b) TM polarized incidence

3.2.2 金属态时作为传感器

根据太赫兹超材料的传输特性,本文提出的超材料结构能够对不同折射率的外部介质表现出良好的传感特性,可通过改变背景介质的折射率得到吸收的变化特性。由此,对该结构在 1.64 THz 和 2.15 THz 频率处的传感特性进行研究。将不同折射率的待测介质层设置在该超材料结构的顶层用来模拟传感样品环境。如图 8(a)(彩图见期刊电子版)所示,随着折射率从 1.0 增加到 1.25,两个吸收峰呈现红移的变化趋势,这表

明该结构对外界环境的介电常数比较敏感,所以这种结构在传感方面具有较大的应用潜力。灵敏度是衡量传感器静态特性的一个重要指标,可以通过灵敏度来衡量折射率传感器的性能。对于低频谐振频率 1.64 THz 处的吸收峰,通过线性拟合,可求得该谐振频率处的传感灵敏度约为 $25.6\ \text{GHz}/\text{RIU}$,如图 8(b)(彩图见期刊电子版)所示。对于较高谐振频率 2.15 THz 处的吸收峰,通过线性拟合可得该频率处的传感灵敏度约为 $159\ \text{GHz}/\text{RIU}$,如图 8(c)(彩图见期刊电子版)所

示。相比较而言,较高频率吸收峰处的传感灵敏度较高。传感器的质量因子 Q 可以表示为 $Q=f_0/\Delta f^{[28-29]}$, 其中, f_0 是谐振吸收峰的谐振频率, Δf 是谐振频率处的半高宽度。通过计算,在 1.64 THz 和 2.15 THz 处吸收峰的 Q 因子分别为 71.34 和 23.12。综上分析,与其他传统材料的传感器相比,该结构灵敏度高,传感性能良好,且响应速度优于传统传感器。该结构在金属态时,实

现的吸收和传感功能均可应用在能量采集和光学传感中,可拓展到太赫兹成像、检测等领域。基于超材料吸收器的生物传感可以通过增强局域电磁谐振,实现亚波长分辨,大大提高传感器的分辨率与灵敏度。目前基于超材料的太赫兹传感器已被广泛应用于蛋白质浓度检测、病毒检测、癌细胞及其标记物检测。

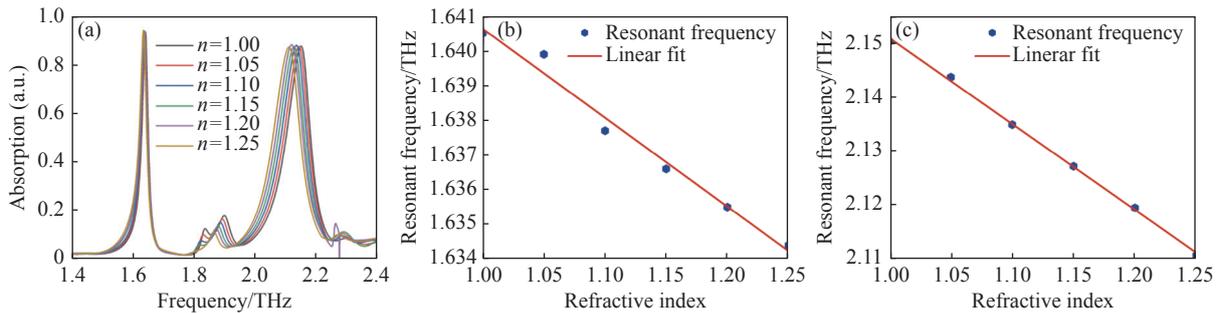


图 8 吸收器用作传感器时的性能分析。(a)吸收特性随待测样品折射率的变化情况;(b)1.64 THz 频率处的传感特性;(c)2.15 THz 频率处的传感特性

Fig. 8 Performance analysis of the absorber when it is used as a sensor. (a) The variation of absorption with the refractive index of the sample; (b) the sensing characteristics at the frequency of 1.64 THz; (c) the sensing characteristics at the frequency of 2.15 THz

4 结 论

本文提出一种基于 VO_2 相变特性的开口谐振环结构多功能超材料器件,该器件在 VO_2 处于不同条件下可实现功能切换。当 VO_2 处于绝缘态时,此结构作为偏振转换器可实现高效率的线偏振-线偏振转换,在 0.48~0.87 THz 频率范围内,偏振转换率大于 90%。当 VO_2 处于金属态时,可以实现双频吸收和高灵敏度传感功能。在 1.64 THz 和 2.15 THz 频率处具有 2 个不同的吸收峰,吸

收率大于 88%。接着研究了在这两个频率点处的传感特性,通过改变样品材料的折射率得出,两个频率点处的传感灵敏度分别约为 25.6 GHz/RIU 和 159 GHz/RIU,而两个频率点处的 Q 因子分别为 71.34 和 23.12,展现出优良的传感性能。同时还研究了结构参数对偏振转换性能和吸收性能的影响,从而为样品的实际加工提供参考。本文提出的超材料器件具有结构简单、调谐范围广、多功能应用等特点,大大提升了器件实用可行性,并为太赫兹波段多功能器件的研究提供了思路。

参考文献:

- [1] 蔡禾,郭雪娇,和挺,等.太赫兹技术及其应用研究进展[J].中国光学与应用光学,2010,3(3):209-222.
CAI H, GUO X J, HE T, *et al.*. Terahertz wave and its new applications[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(3): 209-222. (in Chinese)
- [2] 曹丙花,张宇盟,范孟豹,等.太赫兹超分辨率成像研究进展[J].中国光学,2022,15(3):405-417.
CAO B H, ZHANG Y M, FAN M B, *et al.*. Research progress of terahertz super-resolution imaging[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 405-417. (in Chinese)
- [3] YAN D X, WANG Y, QIU Y, *et al.*. A review: the functional materials-assisted terahertz metamaterial absorbers and polarization converters[J]. *Photonics*, 2022, 9(5): 335.
- [4] DRISCOLL T, KIM H T, CHAE B G, *et al.*. Memory metamaterials[J]. *Science*, 2009, 325(5947): 1518-1521.

- [5] 张检发, 袁晓东, 秦石乔. 可调太赫兹与光学超材料[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 349-364.
ZHANG J F, YUAN X D, QIN SH Q. Tunable terahertz and optical metamaterials[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 349-364. (in Chinese)
- [6] XU SH T, FAN F, WANG Y H, *et al.*. Intensity-tunable terahertz bandpass filters based on liquid crystal integrated metamaterials[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(30): 9530-9534.
- [7] LIU W W, XU J SH, SONG ZH Y. Bifunctional terahertz modulator for beam steering and broadband absorption based on a hybrid structure of graphene and vanadium dioxide[J]. *Optics Express*, 2021, 29(15): 23331-23340.
- [8] HUANG CH CH, ZHANG Y G, LIANG L J, *et al.*. Perovskite-based multi-dimension THz modulation of EIT-like metamaterials[J]. *Optik*, 2022, 262: 169348.
- [9] ZHANG H Y, YANG CH H, LIU M, *et al.*. Dual-function tuneable asymmetric transmission and polarization converter in terahertz region[J]. *Results in Physics*, 2021, 25: 104242.
- [10] 付尧, 李子乐, 郑国兴. 超构表面的振幅调控及其功能器件研究进展[J]. 中国光学, 2021, 14(4): 886-899.
FU R, LI Z L, ZHENG G X. Research development of amplitude-modulated metasurfaces and their functional devices[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 886-899. (in Chinese)
- [11] WU X L, ZHENG Y, LUO Y, *et al.*. A four-band and polarization-independent BDS-based tunable absorber with high refractive index sensitivity[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2021, 23(47): 26864-26873.
- [12] 黄成成, 张永刚, 梁兰菊, 等. 窄/宽带可切换的石墨烯-二氧化钒复合结构太赫兹吸波器[J]. 光学学报, 2022, 42(19): 1916001.
HUANG CH CH, ZAHNG Y G, LIANG L J, *et al.*. Narrow/broad band switchable Terahertz absorber based on graphene and vanadium dioxide composite structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(19): 1916001. (in Chinese)
- [13] 李向军, 候小梅, 程钢, 等. 基于柔性基底动态调焦石墨烯超表面聚焦反射镜的仿真研究[J]. 中国光学, 2021, 14(4): 1019-1028.
LI X J, HOU X M, CHENG G, *et al.*. Simulation on tunable graphene metasurface focusing mirror based on flexible substrate[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 1019-1028. (in Chinese)
- [14] 冀允允, 范飞, 于建平, 等. 太赫兹液晶可调谐功能器件[J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614006.
JI Y Y, FAN F, YU J P, *et al.*. Terahertz tunable devices based on liquid crystal[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614006. (in Chinese)
- [15] 曹瞰, 刘宽, 李阳, 等. 可调谐光学超构材料及其应用[J]. 中国光学, 2021, 14(4): 968-985.
CAO T, LIU K, LI Y, *et al.*. Tunable optical metamaterials and their applications[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 968-985. (in Chinese)
- [16] CHENG J R, FAN F, CHANG SH J. Recent progress on graphene-functionalized metasurfaces for tunable phase and polarization control[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(3): 398.
- [17] 李靖豪, 杨琬琛, 周晨昱, 等. 二氧化钒的相变调控特性及可重构超表面天线应用研究[J]. 无线电工程, 2022, 52(2): 317-325.
LI J H, YANG W CH, ZHOU CH Y, *et al.*. Research on metal-insulating transition of vanadium dioxide and its applications on reconfigurable metasurface antenna[J]. *Radio Engineering*, 2022, 52(2): 317-325. (in Chinese)
- [18] LIU M, KANG W J, ZHANG Y L, *et al.*. Dynamically controlled terahertz coherent absorber engineered with VO₂-integrated Dirac semimetal metamaterials[J]. *Optics Communications*, 2022, 503: 127443.
- [19] QIAO Q, WANG Y K, YANG G F, *et al.*. Broadband of linear-to-linear and double-band of linear-to-circular polarization converter based on a graphene sheet with a π -shaped hollow array[J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(9): 2952-2965.
- [20] YANG CH H, GAO Q G, DAI L L, *et al.*. Bifunctional tunable terahertz circular polarization converter based on Dirac semimetals and vanadium dioxide[J]. *Optical Materials Express*, 2020, 10(9): 2289-2303.
- [21] 付亚男, 张新群, 赵国忠, 等. 基于谐振环的太赫兹宽带偏振转换器件研究[J]. 物理学报, 2017, 66(18): 180701.
FU Y N, ZHANG X Q, ZHAO G ZH, *et al.*. A broadband polarization converter based on resonant ring in terahertz region[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(18): 180701. (in Chinese)
- [22] HE ZH H, LI L Q, MA H Q, *et al.*. Graphene-based metasurface sensing applications in terahertz band[J]. *Results in Physics*, 2021, 21: 103795.
- [23] YAN D X, FENG Q Y, YUAN Z W, *et al.*. Wideband switchable dual-functional terahertz polarization converter based

- on vanadium dioxide-assisted metasurface[J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(1): 014211.
- [24] 高鹏, 陈聪, 刘海, 等. 基于二氧化钒相变的可调谐超材料吸收器设计[J]. 量子光学学报, 2022, 28(1): 37-45.
GAO P, CHEN C, LIU H, *et al.*. Design of adjustable metamaterial absorber based on the phase transition of vanadium dioxide[J]. *Journal of Quantum Optics*, 2022, 28(1): 37-45. (in Chinese)
- [25] BAN SH H, MENG H Y, ZHAI X, *et al.*. Tunable triple-band and broad-band convertible metamaterial absorber with bulk Dirac semimetal and vanadium dioxide[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(17): 174001.
- [26] 封章银, 裘国华, 严德贤, 等. 基于二氧化钒宽、窄带可切换的双功能超材料吸收器研究[J]. 中国光学, 2022, 15(2): 388-404.
FENG Q Y, QIU G H, YAN D X, *et al.*. Wide and narrow band switchable bi-functional metamaterial absorber based on vanadium dioxide[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 388-404. (in Chinese)
- [27] QIU Y, YAN D X, FENG Q Y, *et al.*. Vanadium dioxide-assisted switchable multifunctional metamaterial structure[J]. *Optics Express*, 2022, 30(15): 26544-26556.
- [28] FENG Q Y, YAN D X, LI X J, *et al.*. Realization of absorption, filtering, and sensing in a single metamaterial structure combined with functional materials[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(15): 4336-4343.
- [29] FERRARO A, ZOGRAFOPOULOS D C, CAPUTO R, *et al.*. Guided-mode resonant narrowband terahertz filtering by periodic metallic stripe and patch arrays on cyclo-olefin substrates[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 17272.

作者简介:



严德贤(1991—), 男, 甘肃武威人, 副教授, 博士后, 主要从事太赫兹微波技术及器件。E-mail: yandexian1991@163.com



陈欣怡(1999—), 女, 浙江温州人, 硕士研究生, 就读于中国计量大学电子信息工程专业。E-mail: chenxinyi299088@163.com