

可切换频段的太赫兹编码超表面

汪静丽^{1*}, 杨志雄¹, 尹亮¹, 董先超¹, 万洪丹¹, 陈鹤鸣², 钟凯³¹南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏南京 210023;²南京邮电大学贝尔英才学院, 江苏南京 210023;³天津大学精密仪器与光电子工程学院教育部光电信息技术重点实验室, 天津 300072

摘要 依据 Pancharatnam-Berry (PB) 相位原理提出了一种可切换频段的太赫兹编码超表面, 其顶层是金属-二氧化钒 (VO_2) 复合结构层, 中间是聚酰亚胺介质层, 底部为纯金属反射层。编码超表面单元按不同的编码序列排列构成的编码超表面, 可以产生多种太赫兹波束形式, 并且随着 VO_2 的相变, 可以在不改变原波束形式的情况下实现从单频段到双频段的切换功能。通过设计不同的编码序列, 令编码超表面分别产生了涡旋波和散射波, 对于垂直入射的右旋圆极化波 (左旋圆极化波类似): 当 VO_2 处于绝缘态时, 在频段 1.17~1.37 THz 处可以产生与编码序列所对应的波束形式; 当 VO_2 相变为金属态时, 在 0.87~0.92 THz 和 1.4~1.6 THz 两个不同频段处分别获得与 VO_2 处于绝缘态时相同的波束形式, 进一步拓宽波束产生的频段。所提出的编码超表面利用了 VO_2 的相变特性增加了太赫兹工作的频段, 为实现频段可切换的太赫兹编码超表面提供了思路, 在太赫兹波束调控中的调频方面有一定参考意义。

关键词 光学器件; 太赫兹; 编码超表面; 二氧化钒; 可切换; 频段

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231283

1 引言

太赫兹波是频率在 0.1~10 THz、介于微波与红外之间的电磁波, 具有穿透性强、信息容量大、安全性高、可操纵性强等特点, 在远距离通信、安检成像、雷达探测、生物医学等领域有着广泛的应用前景^[1-4]。随着应用场景的不断增加, 迫切需要能够调控太赫兹波工作于多个频段的功能器件。

编码超表面作为调控太赫兹波的重要器件之一, 将其编码超表面单元的相位响应特性用二进制的数字编码来表征, 并对编码超表面单元按照编码序列排列, 从而达到对电磁波的灵活调控, 可以产生涡旋波、偏折波和聚焦波等多种形式的波束^[5]。但是, 传统的编码超表面一旦设计完成, 仅能在单一频点处产生波束形式, 这限制了编码超表面调控太赫兹波的工作范围^[6]。 VO_2 作为一种相变材料, 利用电、热和光等方式改变其温度, 即可实现相变功能, 被广泛运用于超表面的设计之中^[7]。目前为止, 有研究者利用 VO_2 并基于 PB (Pancharatnam-Berry) 相位原理实现了通过不同编码序列产生不同波束形式的功能^[8], 但是其工作频段单一, 无法切换; 又有研究者利用 PB 相位原理结合 VO_2 设计出了频率可切换的编码超表面, 实现了不同频点

的涡旋波产生, 但是其只在三个频点处有较好的效果, 这限制了其工作频率范围^[9]。因此, 拓宽编码超表面的工作频率范围且实现频段可切换极为重要。

本文将 PB 相位原理与 VO_2 相变特性相结合, 增大编码超表面的工作频率范围, 设计出频段可切换的太赫兹编码超表面。由于编码超表面单元按照一定的编码序列排列后, 所形成的编码超表面可产生与编码序列对应的特定波形, 因此本文以目前太赫兹超表面研究领域的热点——产生高容量的涡旋波和大雷达散射截面 (RCS) 缩减的散射波为例, 进行编码序列设计。仿真结果表明: 编码超表面对于右旋圆极化波 (RCP) 的入射, 不仅能够很好地产生与编码序列相对应的波束形式, 而且通过转变 VO_2 的相变状态还可以实现工作模式从单频段到多频段的切换。这种可灵活切换工作频段的太赫兹编码超表面在未来的太赫兹通信、雷达等领域有广阔的应用前景。

2 理论分析

由 M^2 个单元尺寸 D 相同、相位不完全相同的编码超表面单元组成的编码超表面, 可以调控入射的太赫兹波^[10], 远场函数可以表示为

收稿日期: 2023-07-18; 修回日期: 2023-09-01; 录用日期: 2023-10-07; 网络首发日期: 2023-10-17

基金项目: 国家自然科学基金 (12174199, 61571237)、江苏省自然科学基金 (BK20221330, BK20151509)、横向课题多功能太赫兹天线的研究资助项目 (2021外 323)

通信作者: *jlwang@njupt.edu.cn

$$f(\theta, \varphi) = f_e(\theta, \varphi) \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \exp \left\{ -i \left\{ \varphi'(m, n) + kD \sin \theta \left[\left(m - \frac{1}{2} \right) \cos \varphi + \left(n - \frac{1}{2} \right) \sin \varphi \right] \right\} \right\}, \quad (1)$$

式中： θ 和 φ 分别为俯仰角和方位角； k 为传播常数； $\varphi'(m, n)$ 是坐标 (m, n) 处单元的相位； $f_e(\theta, \varphi)$ 是每个编码超表面单元的方向函数。1-bit 编码超表面的 $\varphi'(m, n)$ 为 0 或者 π ；2-bit 编码超表面的 $\varphi'(m, n)$ 为 0、 $\pi/2$ 、 π 和 $3\pi/2$ ；3-bit 编码超表面的 $\varphi'(m, n)$ 为 0、 $\pi/8$ 、 $2\pi/8$ 、 $3\pi/8$ 、 $4\pi/8$ 、 $5\pi/8$ 、 $6\pi/8$ 、 $7\pi/8$ ，依此类推。波束远场的方向主要由编码超表面单元的相位决定，这样通过人为设计具有一定相位差的超表面单元，依据不同的编码序列排列，就可以实现不同形式的太赫兹波束。并且，随着 bit 数的增加，编码超表面调控太赫兹波的形式也更加灵活。PB 相位原理的提出使得编码单元的相位差能够得到精准调控^[11-12]。当入射波为圆极化波 (CP) 时，反射波与入射波的极化方式相同。超表面单元顶层结构的旋转角度为 α ，相应的相移为 $\pm 2\alpha$ ，其中 - 为左旋圆极化波 (LCP)，+ 为右旋圆极化波 (RCP)。基于此，本文采用 PB 相位原理设计了 3-bit 的太赫兹编码超表面，且由于 LCP 与 RCP 波入射到超表面时能够产生类似效果，因此文中对 RCP 波的入射进行了多波束以及多频点的分析。

3 单元结构的设计与仿真

对于反射型的编码超表面而言，构成它的编码超编码单元需要具有自由的相位调控能力。依据 PB 相位原理，就能够灵活设计出具有不同相位响应的编码超表面单元，其结构的设计条件为：垂直入射的 x 和 y 极化波，其同极化反射幅度较大且几乎一致，且两者的同极化反射相位差为 180° 。

本文设计的超表面单元如图 1 所示，由三层结构组成。顶层为心形结构，它由三个金属层半圆以及嵌入的 VO_2 构成，其中大圆的半径 $r_3=40 \mu\text{m}$ ，小圆的半径 $r_1=r_2=20 \mu\text{m}$ ，厚度均为 $t=0.2 \mu\text{m}$ ， $d_1=7 \mu\text{m}$ ， $d_2=10 \mu\text{m}$ ， $w=17.5 \mu\text{m}$ ， $d_3=5 \mu\text{m}$ ；中介质层为厚度 $h=20 \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺 (Polyimide)，其介电常数 $\epsilon_r=3.5$ ，正切损耗 $\tan \delta=0.0027$ ；底部是厚度为 $t=0.2 \mu\text{m}$ 的正方形金属层，其边长 $p=100 \mu\text{m}$ 。所设计的编码超表面单元可以采用分子束外延法结合金属化工工艺等进行制作^[13-14]，其 VO_2 的相变过程采用恒温台进行加热的方式^[15]，如图 1(c) 所示。

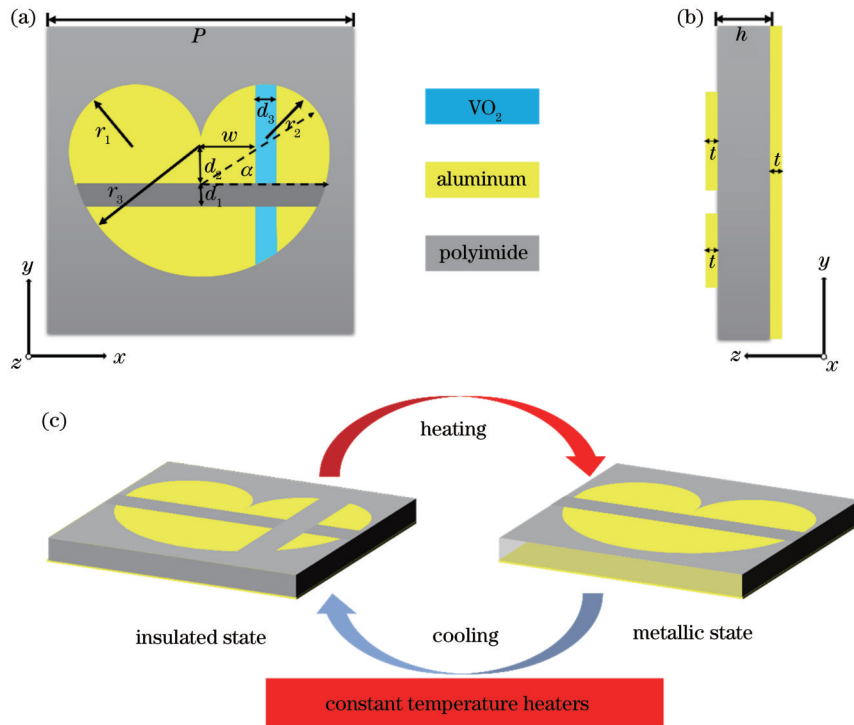


图 1 超表面单元结构。(a) 俯视图；(b) 侧视图；(c) VO_2 相变流程
Fig. 1 Metasurface unit. (a) Top view; (b) side view; (c) VO_2 phase change process

利用 CST 电磁仿真软件对图 1 的结构进行仿真，其仿真结果如图 2 所示。当 VO_2 处于绝缘态时，在 1.17~1.37 THz 频段，其 x 和 y 极化波的反射幅度均

较大并且相位差为 180° ，满足 PB 相位原理；当 VO_2 处于金属态时，在 0.87~0.92 THz 和 1.4~1.6 THz 这两个频段，其 x 和 y 极化波的反射幅度也均较大并且相

位差为 180° , 满足 PB 相位原理。

将最上层的心形贴片沿着 α 的角度依次逆时针旋转 22.5° , 一共得到了 8 个基于 VO_2 的编码超表面

单元, 分别命名为“0”、“1”、“2”、“3”、“4”、“5”、“6”、“7”, 并用不同颜色表示不同的单元, 如表 1 所示。

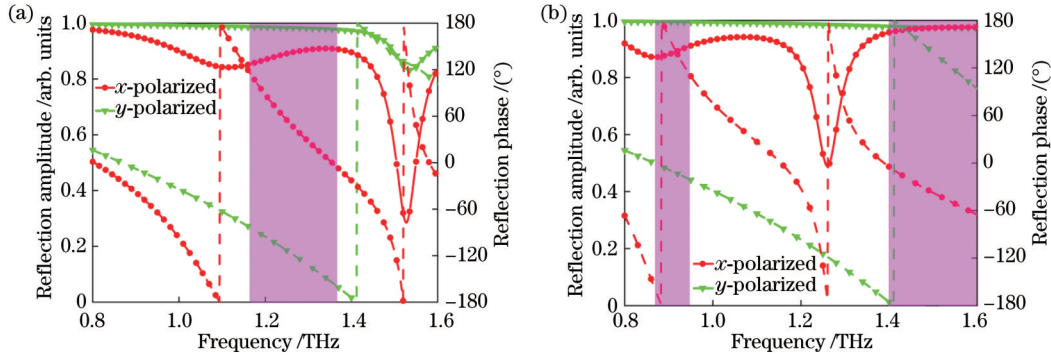


图 2 VO_2 处于不同状态下, x 和 y 极化波入射时的反射幅度和相位。(a) 绝缘态; (b) 金属态

Fig. 2 Magnitude and phase of reflection at incidence of x and y polarized waves under different states of VO_2 . (a) Insulated state; (b) metallic state

表 1 3-bit 编码超表面单元

Table 1 3-bit coding metasurface units

Name	0	1	2	3	4	5	6	7
Unit								
Angle α / (°)	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5
Phase / (°)	0	45	90	135	180	225	270	315
Color								

结合 VO_2 的两种相变状态, 对于垂直入射的 RCP 波, 上述单元会产生两种不同的响应状态, 其相位响应以及反射幅度如图 3 所示。从图 3(a)、(b) 中可以看出: 当 VO_2 处于绝缘态, RCP 波垂直入射至编码超表面单元, α 以 22.5° 的步宽从 0° 到 157.5° 变化时, 编码超表面单元的同极化反射相位差均为 45° ; 对于不同旋转角度 α , 其同极化反射幅度基本一致, 在 $1.17 \sim 1.37$ THz 范围内能达到 0.9 以上, 且在 1.2 THz 时反射幅度达到了最大, 该频段的 8 个单元符合 3-bit 编码超表面单元的设计条件^[16]。同样地, 在 VO_2 处于金属态时, 其反射幅度和相位如图 3(c)、(d) 所示, 8 个单元在 $0.87 \sim 0.92$ THz 和 $1.4 \sim 1.6$ THz 频段的同极化反射幅度也均大于 0.9, 在 0.88 THz 以及 1.4 THz 处的幅度较大, 并且反射相位差依次满足 45° , 同样符合 3-bit 的编码超表面单元设计条件。将设计的编码超表面单元按照一定的编码序列排列后, 当 VO_2 分别处于绝缘态和金属态时, 在所对应的工作频段处, 编码序列保持一致时, 产生的波束形式理论上也是一致^[17]。

4 编码超表面的设计及仿真结果分析

将编码超表面单元按照不同的编码序列排列构成不同的编码超表面, 从而产生不同形式的波束, 进而可

灵活应用于各种不同的场景^[18]。本文以涡旋波束以及漫散射波束为例, 并结合 VO_2 的不同相变状态及对应的工作频段, 对产生的远场波束进行分析。

4.1 涡旋波束

涡旋波束是一种中心场强为零、相位波前呈螺旋分布的波束, 可用于高速通信及高分辨率成像等领域^[19]。只要将编码超表面单元按照一定的编码序列排列, 即按照一定的相位分布, 就可将其转化为具有不同拓扑荷数 l 的涡旋波束, 其相位分布^[20]为

$$\varphi(x, y) = l \arctan(y/x), \quad (2)$$

式中: (x, y) 是编码超表面单元在平面内的坐标。

本节拟采用 32×32 个如表 1 所示的编码超表面单元, 将其按照一定的编码序列排列, 组成编码超表面, 以产生涡旋波束。如图 4 所示, 编码超表面单元由 8 块相位差依次为 45° 的三角形区域 (每个单独区域的编码超表面单元相同) 组成, 其中每个编码超表面单元的编码对应表 1 所示的各个单元结构以及相位, 满足产生拓扑荷数 $l=1$ 的涡旋波束的相位分布, 即在一个波长传播距离上波前绕着中心旋转一周相位改变 360° ^[21]。

对 VO_2 处于不同相变状态时, 相应工作频点处的编码超表面进行仿真分析, 结果如图 5 所示。可以看

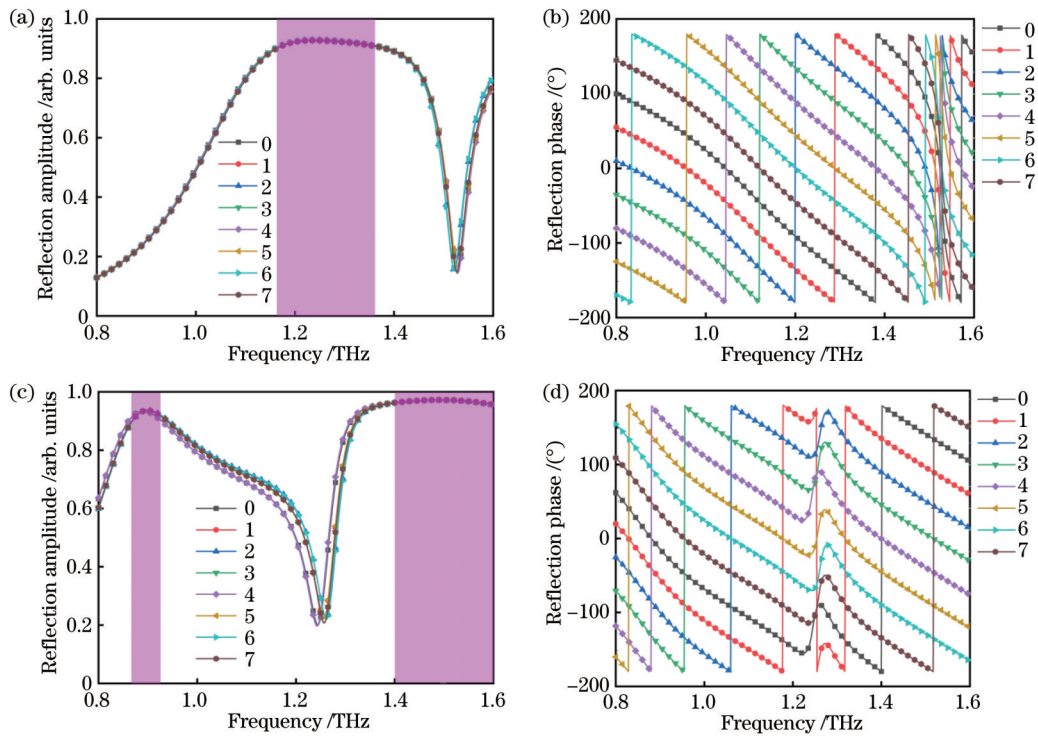


图3 RCP波垂直入射至编码超表面单元时,VO₂处于绝缘态和金属态的反射幅度和反射相位。VO₂处于绝缘态的(a)反射幅度和(b)反射相位;VO₂处于金属态的(c)反射幅度和(d)反射相位

Fig. 3 Reflection amplitude and reflection phase of VO₂ in insulated state and metallic state when RCP wave is incident perpendicularly to coding metasurface unit. (a) Reflection amplitude and (b) reflection phase when VO₂ is in insulated state; (c) reflection amplitude and (d) reflection phase when VO₂ is in metallic state

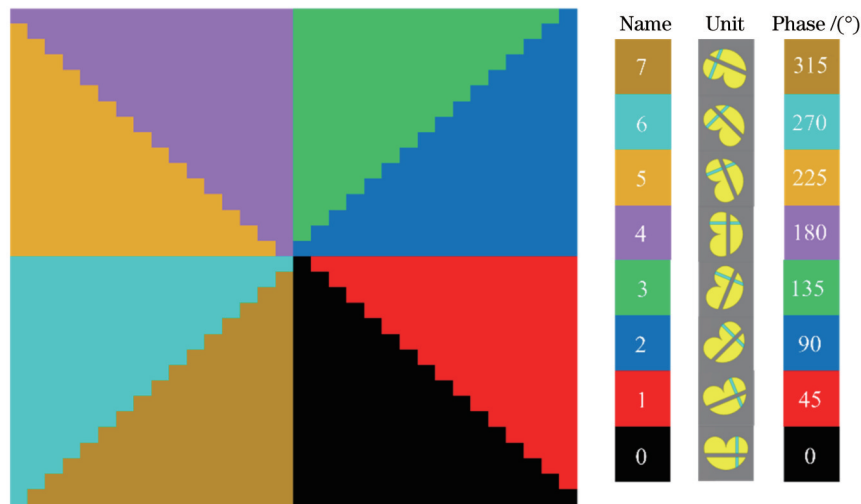


图4 拓扑荷数 $l=1$ 的涡旋波对应的编码序列

Fig. 4 Coding sequence corresponding to vortex beam with $l=1$

到:VO₂处于绝缘态时,1.2 THz的RCP波垂直入射至编码超表面的远场方向图如图5(a)所示,对应图4编码序列排列,此时编码超表面产生的远场波束的中心场强接近0,周围的场强分布则呈现出了高反射幅度的甜甜圈形式,并且从图5(d)中相位图可以看到,相位覆盖为360°,幅度及相位分布均满足拓扑荷数为1的涡旋波的波束形式。VO₂处于金属态时,0.88 THz

和1.2 THz的RCP波分别垂直入射至超表面产生波束的远场方向图如图5(b)、(c)所示。可以看到:0.88 THz[图5(b)]和1.4 THz[图5(c)]产生的波束形式均与图5(a)相同,并且相位覆盖同样满足360°,如图5(e)、(f)所示。换言之,编码超表面在一定的编码序列排列下,利用VO₂的相变功能实现了频点可切换的功能,这对波分复用有一定的参考意义。

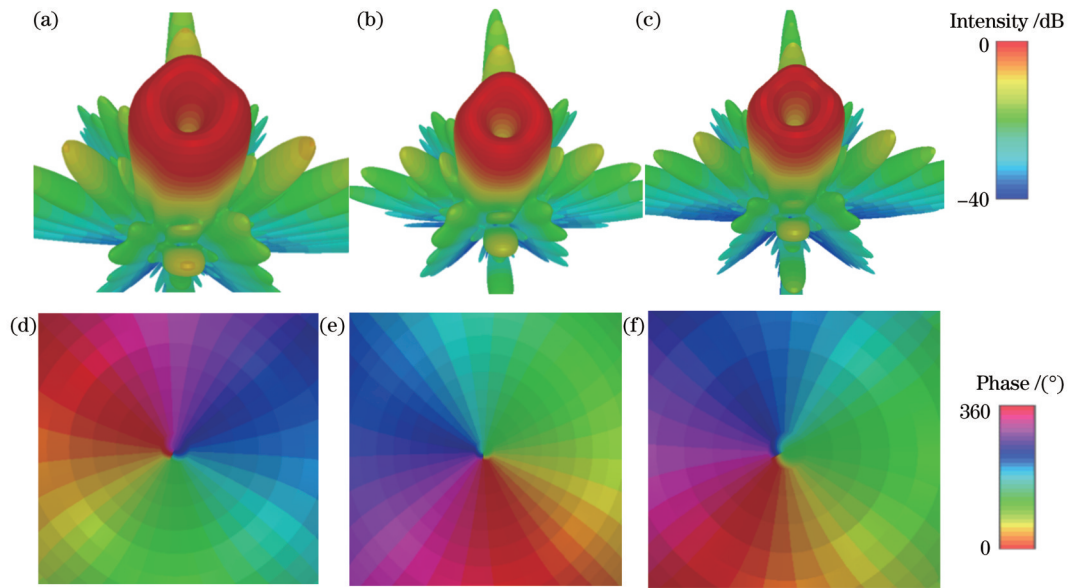


图 5 VO_2 不同状态对应频率下涡旋波的远场波束。(a)(d) VO_2 绝缘态下 1.2 THz; (b)(e) VO_2 金属态下 0.88 THz; (c)(f) VO_2 金属态下 1.4 THz

Fig. 5 Far-field beams of vortex waves at different frequencies for different states of VO_2 . (a)(d) VO_2 is in an insulated state at 1.2 THz; (b)(e) VO_2 is in metallic state at 0.88 THz; (c)(f) VO_2 is in metallic state at 1.4 THz

4.2 漫散射波束

RCS 是衡量目标雷达回波能力强弱的一个重要物理量, RCS 缩减的目的是减小目标的雷达散射截面积, 其在电磁隐身方面发挥着巨大作用。实现 RCS 缩减的方法分别有电磁波的吸收和漫散射^[22]。其中反射型的编码超表面按照无序的编码序列排列, 可以很好地将电磁波反射到各个方向, 从而形成漫散射波束, 达到 RCS 缩减的目的^[23]。

由能量守恒定律可知, 旁瓣波束的散射能量的增加, 可以对主瓣波束的能量起到很好的抑制作用, 从而缩减垂直方向的 RCS^[24]。因此本节将所设计的 3-bit 编码超表面单元进行了随机编码序列排列(图 6), 组成了反射型的编码超表面, 实现 RCS 缩减。值得注意的是, 这里的随机编码序列是利用软件 python 随机生成的, 避免了人为主观的随机排列, 能够更好地实现 RCS 缩减的目的。

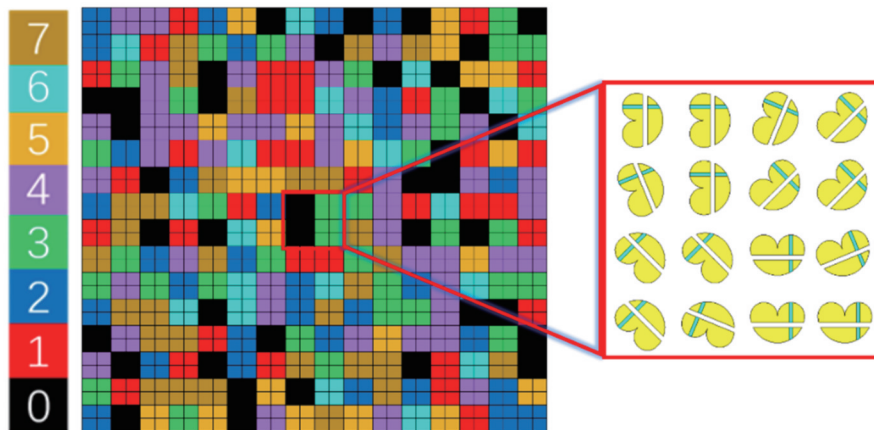


图 6 随机编码序列的编码超表面

Fig. 6 Coding metasurface with random coding sequence

VO_2 处于绝缘态且 1.2 THz 的 RCP 波垂直入射至超表面时, 其远场散射波束如图 7(a) 所示, 可以看到太赫兹波被无规则地反射到各方向, 实现了旁瓣波束能量增加, 抑制了主瓣波束。在此基础上, 将超表面与相同频率时同等面积金属板的散射特性进行对比, 如图 7(b) 所示, 可以看到金属板有很强的垂直反射的

主瓣波束, 而本文设计的随机编码序列排列的编码超表面在垂直方向的 RCS 缩减能达到 10 dB 以上, 对这种垂直反射主瓣波束起到了很好的抑制作用。当 VO_2 相变为金属态时, 0.88 THz 和 1.4 THz 的 RCP 波分别垂直入射到编码超表面的远场散射波束分别如图 7(c)、(e) 所示, 可以看到产生了与图 7(a) 一样的波束形

式,实现了 RCS 的缩减。进一步与纯金属板散射特性进行对比,如图 7(d)、(f)所示,垂直方向的 RCS 缩减同样达到了 10 dB 以上。因此,通过 VO_2 的相变,在三

个频点处,设计的编码超表面均调控太赫兹波,产生了相同的漫散射波束形式,实现了 RCS 缩减,这对于实现多频点的 RCS 缩减有一定参考价值。

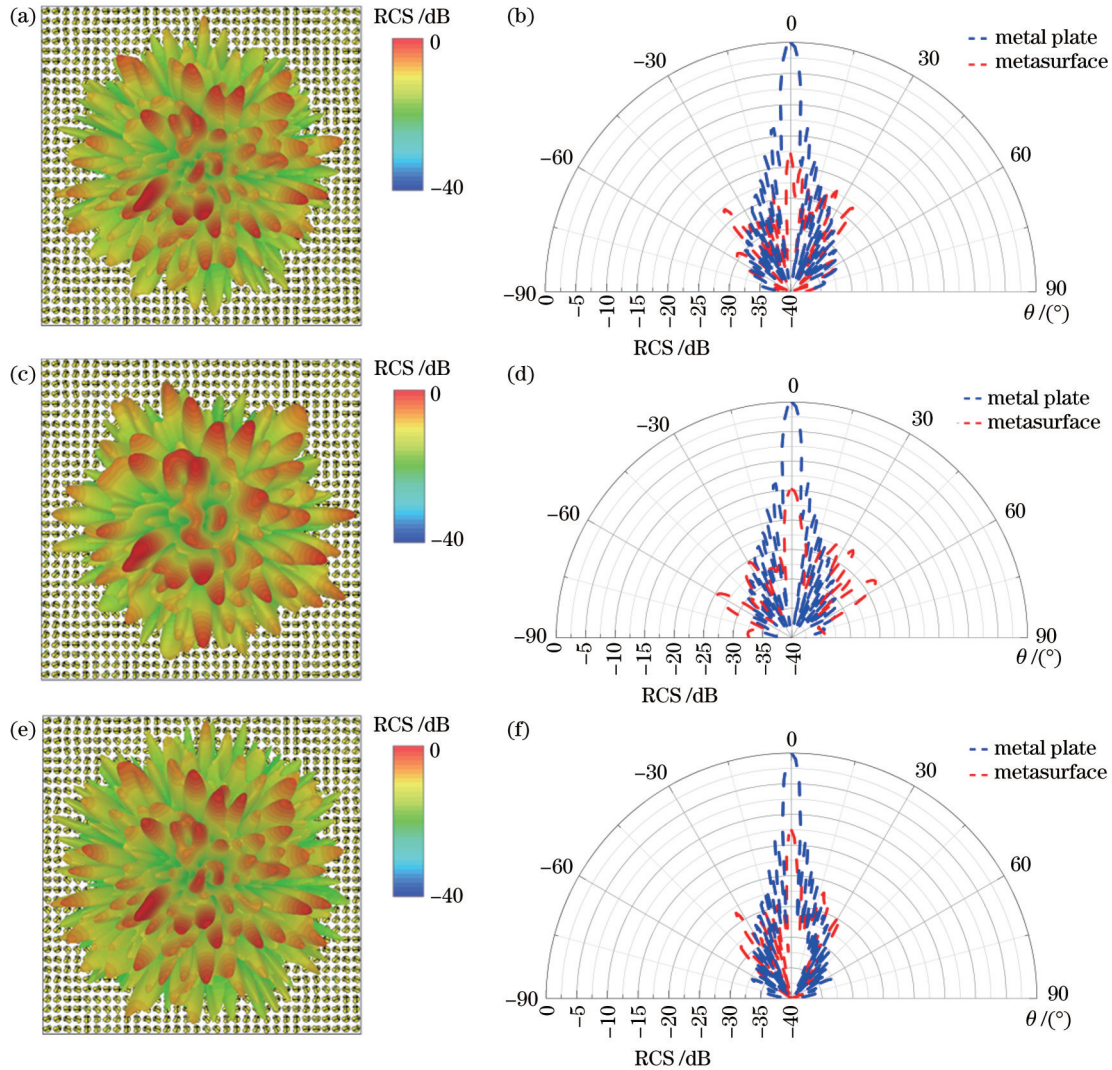


图 7 VO_2 不同状态下的超表面远场波束及与金属板的对比。 VO_2 绝缘态时 1.2 THz 超表面(a)远场方向图和(b)与金属板的对比; VO_2 金属态时 0.88 THz 超表面(c)远场方向图和(d)与金属板的对比; VO_2 金属态时 1.4 THz 超表面(e)远场方向图和(f)与金属板的对比

Fig. 7 Comparison of metasurface far-field pattern with metal plates in different states of VO_2 . (a) Far-field pattern and (b) comparison with metal plates for VO_2 in insulated state of 1.2 THz metasurface; (c) far-field pattern and (d) comparison with metal plates for VO_2 in metallic state of 0.88 THz metasurface; (e) far-field pattern and (f) comparison with metal plates for VO_2 in metallic state of 1.4 THz metasurface

5 频段可切换

上文设计的编码超表面利用了 VO_2 的相变特性,实现了在同一编码超表面从单个频点到双频点的扩展,并且产生相同波束形式的功能,但是这里仅讨论了在所设计的三个频段范围内的特殊值情况。由前文可知,当 VO_2 处于绝缘状态时,编码超表面单元在 1.17~1.37 THz 频段有较大的反射幅度,并且相位差严格满足 3-bit 的要求。当 VO_2 相变为金属态时,编码超表面单元在 0.87~0.92 THz 和 1.4~1.6 THz 均有较大的

反射幅度,并且相位差严格满足 3-bit 的要求。因此,将上述编码超表面单元按照特定编码序列排列后所构成的编码超表面,理论上应该在所提及的频段内均能实现相应的波束形式,本文通过大量仿真证实了这一点。

当 VO_2 处于绝缘状态时,在 1.17~1.37 THz 频段内,以随机抽取的 1.17 THz 和 1.37 THz 频率为例进行分析。1.17 THz 和 1.37 THz 的 RCP 波入射到如图 4 所示的编码序列排列的编码超表面时,产生了 $l=1$ 的涡旋波束,如图 8 所示,这与图 5(a)所示的 1.2 THz

下产生的涡旋波束形式是相同的;并且当这两个频点的 RCP 波入射到图 6 所示的随机编码超表面时,产生了如图 9 所示的远场散射波束,同样实现了漫散射,并

且这与图 7(a)所示的 1.2 THz 下产生的远场散射波束形式也是相同的。因此,VO₂处于绝缘态时,编码超表面的工作频段为 1.17~1.37 THz。

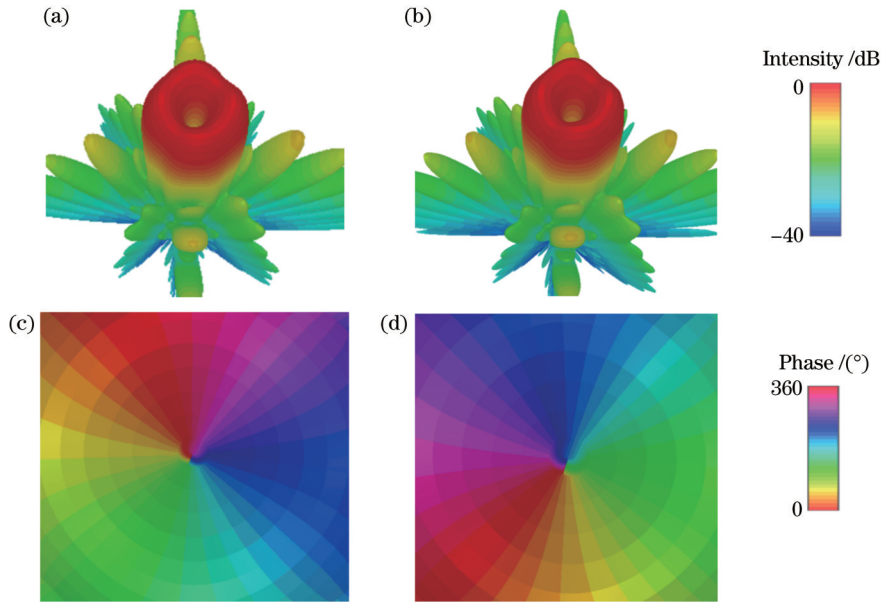


图 8 拓扑荷数为 1 的涡旋波束。(a)1.17 THz 和 (b)1.37 THz 的远场方向图; (c)1.17 THz 和 (d)1.37 THz 的相位

Fig. 8 Vortex beams with $l=1$. Far-field patterns at (a) 1.17 THz and (b) 1.37 THz; phases at (c) 1.17 THz and (d) 1.37 THz

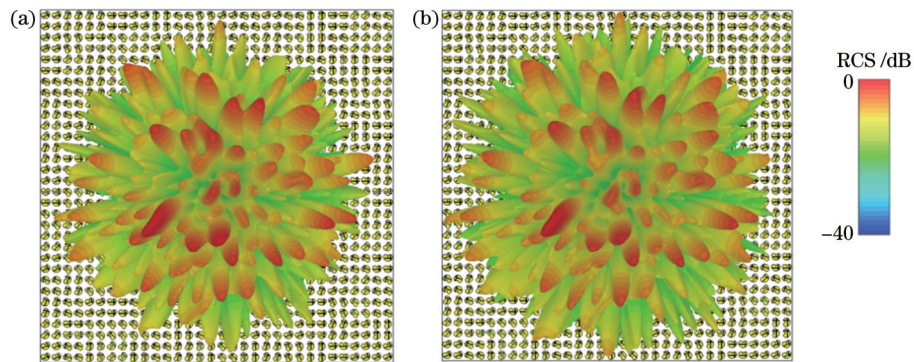


图 9 远场方向图。(a)1.17 THz; (b)1.37 THz

Fig. 9 Far-field patterns. (a) 1.17 THz; (b) 1.37 THz

当 VO₂ 相变为金属态时,分别在 0.87~0.92 THz 和 1.4~1.6 THz 双频段内,以随机抽取的 0.87 THz、0.92 THz、1.5 THz、1.6 THz 频率为例进行分析。按图 4 的编码序列排列,4 个频点的 RCP 波入射到编码超表面时,产生了如图 10 所示的远场波束,可以看到 4 个频点均呈现出中心场强为 0、四周场强较高的波形,并且相位的分布也是 360°,这与图 5(b)、(c)波束的涡旋波束形式以及相位分布相同。此外,当编码超表面的编码序列为图 6 所示的形式时,编码超表面在这 4 个频点的 RCP 波入射下的波形也是杂乱无章的[图 11(a)~(d)],这很好地符合了漫散射波束的要求,与图 7(c)、(e)的漫散射波束形式一致。因此,VO₂处于金属态时,编码超表面的工作频段为双频段,即 0.87~0.92 THz 和 1.4~1.6 THz。

综上,本文利用了 VO₂ 的相变特性,实现了频段可切换的太赫兹编码超表面,并实现了波束形式从单一频段到双频段的切换,增大了工作频率范围。超表面单元按照不同的编码序列排列会产生不同的太赫兹波束形式,可以根据实际需要设计不同的编码序列,具有一定的灵活性。值得注意的是,一旦编码序列确定,所产生的波束形式不变,利用 VO₂ 的相变特性可以实现工作频段的可切换,这有利于实现不同频段的 RCS 缩减,且其不同频段产生的涡旋波将在波分复用领域有较大的应用前景。

此外,将其他调控太赫兹波的编码超表面与本文进行对比,如表 2 所示。文献[7]利用了 VO₂,设计出了同一频点能够切换不同波束形式的编码超表面,但是其所需的编码超表面单元设计多样,相对复杂。文

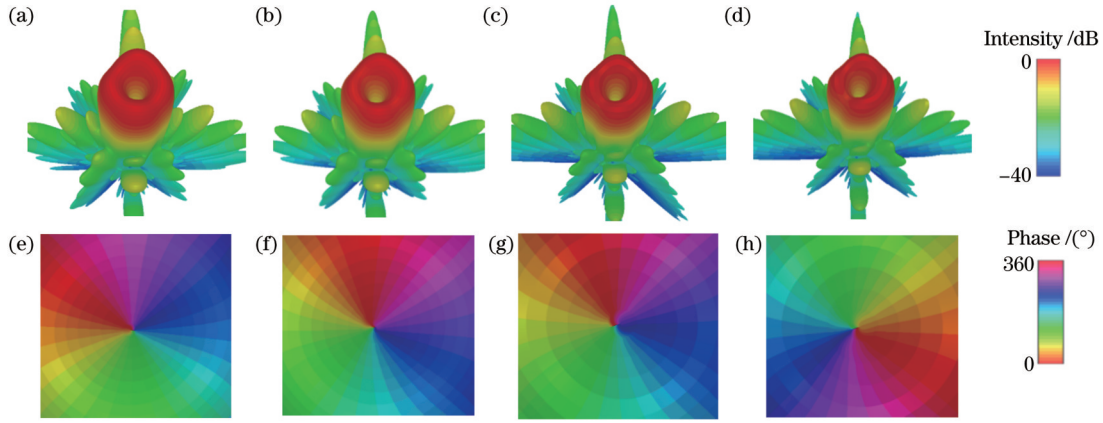


图 10 拓扑荷数为 1 的涡旋波束。(a) 0.87 THz、(b) 0.92 THz、(c) 1.5 THz 和 (d) 1.6 THz 的远场方向图；(e) 0.87 THz、(f) 0.92 THz、(g) 1.5 THz 和 (h) 1.6 THz 的相位
Fig. 10 Vortex beams with $l = 1$. Far-field patterns at (a) 0.87 THz, (b) 0.92 THz, (c) 1.5 THz, and (d) 1.6 THz; phases at (e) 0.87 THz, (f) 0.92 THz, (g) 1.5 THz, and (h) 1.6 THz

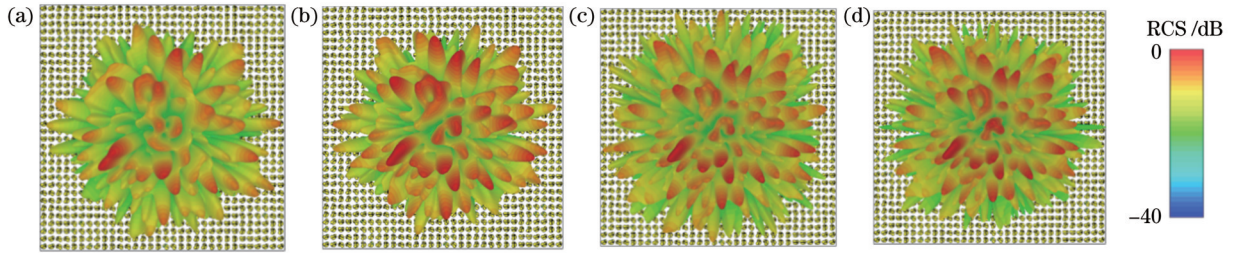


图 11 远场方向图。(a) 0.87 THz；(b) 0.92 THz；(c) 1.5 THz；(d) 1.6 THz
Fig. 11 Far-field patterns. (a) 0.87 THz; (b) 0.92 THz; (c) 1.5 THz; (d) 1.6 THz

献[9]利用 VO₂ 的相变特性和 PB 相位原理,设计了频点可切换的涡旋波发生器,其只需一种单元结构,但是工作频率范围受限。文献[20]基于 PB 相位原理设计了工作频段固定的超表面,讨论了多种不同编码序

列下实现太赫兹多波束调控的可行性,但是该设计缺乏一定的调控性。本文考虑将文献[7]和文献[17]的优点相结合,设计了可切换频段的太赫兹编码超表面。

表 2 编码超表面的设计及性能对比

Table 2 Comparison of design and performance of coding metasurface

Metasurface source	VO ₂	PB	Frequency	Switching beam forming at the same frequency
Ref. [7]	Yes	No	Single frequency	Yes
Ref. [9]	Yes	Yes	Three frequencies	No
Ref. [20]	No	Yes	Single band	No
Our work	Yes	Yes	Three bands	No

6 结 论

传统的编码超表面一般只能在单一频点处达到对太赫兹波的调控,极大地限制了波束调控的频率范围。本文则基于 PB 相位原理,并结合相变材料 VO₂,设计出了 3-bit 的编码超表面单元,通过不同的编码序列排列组成了多种编码超表面,当 RCP 波入射时,编码超表面可以调控太赫兹波,产生对应编码序列的波束形式。VO₂ 处于绝缘态时,其工作在单频段 1.17~1.37 THz; VO₂ 处于金属态时,其工作在 0.87~

0.92 THz 和 1.4~1.6 THz 双频段。这种基于 VO₂ 设计的频段可切换不改变波形的编码超表面,进一步拓宽了编码超表面工作的频段,为实现太赫兹波的调频提供了重要思路。

参 考 文 献

[1] 姚建铨, 李杰, 张雅婷, 等. 太赫兹波调控技术: 驾驭太赫兹之光[J]. 自然杂志, 2023, 45(1): 1-16.
Yao J Q, Li J, Zhang Y T, et al. Terahertz wave control technology: controlling terahertz light[J]. Chinese Journal of Nature, 2023, 45(1): 1-16.

[2] Zhang H S, Zhang H J, Liu W, et al. Energy efficient user

- clustering and hybrid precoding for terahertz MIMO-NOMA systems[C]//ICC 2020—2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), June 7-11, 2020, Dublin, Ireland. New York: IEEE Press, 2020.
- [3] 施辰君, 吴旭, 彭滢. 太赫兹成像技术在肿瘤检测中的应用[J]. 光电工程, 2020, 47(5): 190638.
Shi C J, Wu X, Peng Y. Applications of terahertz imaging technology in tumor detection[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(5): 190638.
- [4] 朱亦鸣, 施辰君, 吴旭, 等. 生物医学检测中太赫兹光谱技术的算法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0130001.
Zhu Y M, Shi C J, Wu X, et al. Terahertz spectroscopy algorithms for biomedical detection[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0130001.
- [5] Ma Q, Liu C, Xiao Q, et al. Information metasurfaces and intelligent metasurfaces[J]. Photonics Insights, 2022, 1(1): R01.
- [6] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e218.
- [7] 李佳辉, 张雅婷, 李吉宁, 等. 基于二氧化钒的太赫兹编码超表面[J]. 物理学报, 2020, 69(22): 228101.
Li J H, Zhang Y T, Li J N, et al. Terahertz coding metasurface based vanadium dioxide[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(22): 228101.
- [8] Li Z L, Wang W, Deng S X, et al. Active beam manipulation and convolution operation in VO₂-integrated coding terahertz metasurfaces[J]. Optics Letters, 2022, 47(2): 441-444.
- [9] 仲敏, 李九生. 频率可切换太赫兹涡旋波束产生器[J]. 物理学报, 2022, 71(21): 217401.
Zhong M, Li J S. Frequency-switchable terahertz vortex beam generator[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(21): 217401.
- [10] 戴耀威, 陈聪, 高鹏, 等. 基于空间编码结构光源的 2 bit 光控可编程太赫兹超表面[J]. 光学学报, 2023, 43(11): 1124004.
Dai Y W, Chen C, Gao P, et al. 2 bit optically controlled programmable terahertz metasurface based on spatially encoded structured light[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(11): 1124004.
- [11] Zhang H Y, Huang J J, Tian M, et al. 3-bit switchable terahertz coding metasurface based on Dirac semimetals[J]. Optics Communications, 2023, 527: 128958.
- [12] Wu X D, Cao H L, Peng J H, et al. Graphene-based Pancharatnam-Berry phase metasurface in the terahertz domain for dynamically independent amplitude and phase manipulation [J]. Optics Express, 2023, 31(2): 3349-3363.
- [13] 封翠银, 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): 387-403.
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): 387-403.
- [14] Liu X B, Wang Q, Zhang X Q, et al. Thermally dependent dynamic meta-holography using a vanadium dioxide integrated metasurface[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(12): 1900175.
- [15] 万彭倩, 文天龙, 张怀武. 基于超材料间相互作用的太赫兹动态调制器[J]. 电子测试, 2022(19): 103-106.
Wan P Q, Wen T L, Zhang H W. Terahertz dynamic modulator based on the interaction between metamaterials[J]. Electronic Test, 2022(19): 103-106.
- [16] Li Y Y, Fang B, Jin Y X, et al. Multi-function scattering beam regulation based on the superposition method of geometric phase coded metasurface sequences[J]. Optics Communications, 2022, 502: 127405.
- [17] He J L, Shi Z L, Ye S, et al. Mid-infrared reconfigurable all-dielectric metasurface based on Ge₂Sb₂Se₄Te₁ phase-change material[J]. Optics Express, 2022, 30(19): 34809-34823.
- [18] He J L, Dong J F. Research progress of tunable multifunctional metasurfaces[J]. Optical Communication Technology, 2022, 3: 60-66.
- [19] Zang X F, Zhu Y M, Mao C X, et al. Manipulating terahertz plasmonic vortex based on geometric and dynamic phase[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(3): 1801328.
- [20] 唐小燕, 柯友煌, 井绪峰, 等. 基于透射型几何相位编码超表面的太赫兹波束自由操控[J]. 光子学报, 2021, 50(1): 0116002.
Tang X Y, Ke Y H, Jing X F, et al. Free manipulation of terahertz wave based on the transmission type geometric phase coding metasurface[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(1): 0116002.
- [21] 郭姣艳, 李文宇, 孙然, 等. 基于双箭头超表面宽带太赫兹涡旋光束的产生[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2014003.
Guo J Y, Li W Y, Sun R, et al. Generation of broadband terahertz vortex beam based on double-arrow metasurface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2014003.
- [22] 徐红欣, 陈艳蕊, 周永金, 等. 动态调控电磁隐身表面[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 849-857.
Xu H X, Chen Y R, Zhou Y J, et al. Dynamically tunable electromagnetic stealth surface[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(6): 849-857.
- [23] Han X M, Xu H J, Chang Y P, et al. Multiple diffuse coding metasurface of independent polarization for RCS reduction[J]. IEEE Access, 2020, 8: 162313-162321.
- [24] 杨家稷, 程用志, 龚荣洲. 随机编码超表面的 RCS 缩减特性研究[J]. 电子元件与材料, 2018, 37(5): 88-94.
Yang J J, Cheng Y Z, Gong R Z. RCS reduction property of random coding metasurface[J]. Electronic Components and Materials, 2018, 37(5): 88-94.

Tunable Terahertz Coding Metasurface with Switchable Frequency Bands

Wang Jingli^{*}, Yang Zhixiong¹, Yin Liang¹, Dong Xianchao¹, Wan Hongdan¹,
Chen Heming², Zhong Kai³

¹College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

²Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

³Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology, Ministry of Education, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract

Objective Terahertz waves are electromagnetic waves between microwave and infrared wave with the frequency of 0.1–10 THz and feature strong penetration, large information capacity, high security, and strong maneuverability. Additionally, they have extensive applications in remote communication, security imaging, radar detection, and other fields. With the increasing number of application scenarios, there is an urgent need for functional devices that can regulate terahertz waves in multiple frequency bands. As an important device to regulate terahertz waves, the coding metasurface is characterized by the phase response properties of the coding metasurface units by binary digital code and arranges the coding metasurface units according to the coding sequence to achieve flexible wave regulation. Meanwhile, it can generate various beam forms such as vortex waves, deflection waves, and focused waves. However, once a traditional coding metasurface is designed, it can only generate a beam form at a single frequency point, limiting the working frequency range of the coding metasurface. As a kind of phase change material, vanadium dioxide (VO₂) can change its temperature by electricity, heat, and light to achieve phase change function, and is widely applied to metasurface design. Some studies implement the function of generating different beam forms by different coding sequences, but the working frequency band is single and cannot be switched. Another study adopts the PB phase principle combined with VO₂ to design a frequency switchable coding metasurface, which achieves vortex wave generation at different frequency points. However, it only yields good results at three frequency points, limiting the working frequency range. Therefore, it is significant to broaden the working frequency range of the coding metasurface and achieve frequency band switching.

Methods First, a new type of coding metasurface unit is designed by combining the PB phase principle with the VO₂ phase transition characteristics. By rotating the unit at a certain angle and changing the phase transition state of VO₂, the reflection amplitude and phase in different working frequency ranges are studied. The conditions are as follows. When VO₂ is in an insulated state and a metallic state, it works in different frequency bands respectively and meets the conditions of 3-bit coding metasurface unit in the corresponding frequency band. Then, by taking the terahertz metasurface which can generate high-capacity vortex waves and high RCS reduced scattering waves as an example, a coding sequence is designed. Finally, the wave forms generated by the coding metasurface are simulated at different frequencies to study whether the beam form corresponding to the coding sequence can be generated. By changing the phase transition state of VO₂, switching of the operating frequency band can be achieved.

Results and Discussions By rotating the designed metasurface units (Fig. 1) counterclockwise in a step of 22.5° from 0° to 157.5°, eight metasurface units can be obtained (Table 1). The unit analysis based on the two phase transition states of VO₂ shows that when VO₂ is in an insulated state, the unit maintains a large reflection amplitude between 1.17 THz and 1.37 THz, and the phase difference of the eight units strictly meets a 45° phase difference. When VO₂ is in a metallic state, it maintains a large amplitude and a phase difference of 45° in sequence at 0.87–0.92 THz and 1.4–1.6 THz. Therefore, at all three frequency bands, the metasurface unit meets the design conditions for a 3-bit coding metasurface unit. The coding metasurface units are arranged according to a certain coding sequence, the coding metasurface formed by them can flexibly regulate terahertz waves, and its mechanism of regulating terahertz waves is similar to traditional phased array antenna theory (Formula 1). Therefore, the designed coding metasurface units are arranged according to the coding sequence that generates vortex waves with topological charge number 1 (Fig. 4) and scattered waves that can reduce RCS (Fig. 6). The results show that VO₂ can generate the same beams with the same coding sequence at different operating frequency bands under different phase transition states, and the operating frequency band can change with the phase transition state of VO₂.

Conclusions Based on the PB phase principle and phase change material VO_2 , we design the 3-bit coding metasurface units. A variety of coding metasurfaces are formed by different coding sequence arrangements, which can regulate terahertz waves to generate beam forms corresponding to the coding sequences. Under an insulated state, VO_2 works in a single frequency band of 1.17–1.37 THz, and it works in dual bands of 0.87–0.92 THz and 1.4–1.6 THz in a metallic state. The designed VO_2 based on coding metasurface can switch the frequency bands without changing the wave forms, and provide important ideas for frequency modulation of terahertz waves.

Key words optical devices; terahertz; coding metasurface; vanadium dioxide; switchability; frequency band