

多频点多波束可调的全空间太赫兹编码超表面

杨志雄¹, 汪静丽^{1*}, 孙文俊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 提出了一种通过改变二氧化钒的相变状态,实现太赫兹波在透射、反射之间灵活切换且多频点多波束可调的全空间太赫兹编码超表面。仿真结果表明:当二氧化钒处于绝缘态时,在频率 $f_1=0.6$ THz的左旋圆极化波(LCP)垂直入射下,设计的编码超表面可以视为3-bit Pancharatnam-Berry(PB)几何相位编码超表面,产生透射的拓扑荷数为1的涡旋波;当二氧化钒处于金属态时,设计的编码超表面可以视为双频点独立可调的1-bit各向异性反射型编码超表面。频率 $f_2=0.5$ THz的正交线极化波(x 与 y 极化波)垂直入射时,该编码超表面可以产生两种不同形式的对称波束;频率 $f_3=0.85$ THz的正交线极化波垂直入射时,可以实现雷达散射缩减和对称波束。这对设计多功能的太赫兹波束调控器件有一定的借鉴意义。

关键词 表面光学; 太赫兹; 全空间; 可调; 编码超表面; 多波束

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231625

1 引言

太赫兹(THz)波束调控技术在通信、传感和成像等领域有着广泛的应用前景^[1],受到越来越多学者的关注。但是由于缺乏高性能的太赫兹功能器件,太赫兹技术的发展及应用受到了限制^[2]。超表面作为一种二维形式的人工电磁超材料,能够对太赫兹波产生很好的响应,结构简单、尺寸小、成本低,具有低剖面、低损耗、高效率的优势,是突破太赫兹技术限制的关键^[3]。随着数字化控制电磁波的编码超表面的提出^[4],各种形式的编码超表面作为调控太赫兹波的功能器件,成为了目前该研究领域的热点^[5-6]。

然而,传统的编码超表面在设计完成之后,功能单一,这进一步限制了其应用。为了使得编码超表面充分发挥作用,提出了各向异性的超表面^[7],使得编码超表面设计完成之后,可以对入射的正交极化波(x 和 y 极化波)分别进行调控;提出了频点无关的编码超表面^[8],可以分别调控不同频点的入射波以产生不同形式的波束;利用相变材料如二氧化钒(VO_2)可实现太赫兹波的透射和反射模式的切换^[9],从而达到电磁波全空间调控的目的。

尽管上述方法都能够提高编码超表面调控太赫兹波的能力,但是很少有研究将其结合,达到更进一步的调控。基于此,本文拟结合上文提及的方法,通过引入相变材料 VO_2 ,结合双频点独立可调的各向异性单元,在不同极化态的波源入射下,获得多频点且全空间波束可调的太赫兹编码超表面。当 VO_2 处于绝缘态时,可实现透射涡旋波的功能;当 VO_2 处于金属态时,可实现反射模式的双频点正交极化波的独立调控功能。将上述单元按照特定的编码序列排列,构成的太赫兹编码超表面可在三个不同频点处调控太赫兹波,产生5种不同的波束形式[包括波束分束、涡旋波生成、雷达散射截面(RCS)缩减等],并且可以灵活运用于各种场景,大大提高了太赫兹波的调控能力。

2 理论分析

相控阵根据天线单元间的相位差进行电磁波调控^[10],所设计的编码超表面由具有一定相位差、离散的编码超表面单元构成,因此其调控太赫兹波的原理与相控阵类似。以 N^2 个尺寸为 D 的单个单元构成的编码超表面为例。在太赫兹波的垂直入射下,远场散射函数可以表示为

收稿日期: 2023-10-08; 修回日期: 2023-11-27; 录用日期: 2023-12-01; 网络首发日期: 2023-12-11

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)、武汉光电国家研究中心开放基金(2022WNL0KF012)、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

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

式中： θ 为俯仰角； φ 为方位角； k 为传播常数； $f_e(\theta, \varphi)$ 为单个单元的远场函数； $\varphi(m, n)$ 为坐标在 (m, n) 单元的相位。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 $3\pi/2$ ，依此类推。远场波束的形成和编码超表面单元的相位相关，因此将设计的不同编码超表面单元依据不同的编码序列排列，在构成编码超表面后可以实现多种形式的太赫兹波束。

3 编码超表面单元设计与分析

3.1 编码超表面单元的设计

设计的编码超表面单元如图 1(a) 所示。单元的

周期为 $200 \mu\text{m}$ ，由 7 层结构组成。第 1 层是厚度 $t=1 \mu\text{m}$ 的顶层，其由 VO_2 组成的中心十字架结构（由两个矩形垂直交叉形成，矩形宽度 $w_1=30 \mu\text{m}$ ，水平和垂直臂长分别为 l_x 和 l_y ）和四角的半十字架结构（由两个矩形垂直交叉构成，矩形宽度 $w_2=30 \mu\text{m}$ ，水平和垂直臂长分别为 l_m 和 l_n ）组合而成；第 2、第 4 和第 6 层均为 SiO_2 介质层^[11]，其介电常数为 3.9，其中第 2 层的厚度 $h_1=45 \mu\text{m}$ ，第 4、6 层的厚度相同，均为 $h_2=80 \mu\text{m}$ ；第 3 层是 VO_2 层，其中嵌入了能按角度 α 旋转的金属裂环，其中 $r_1=10 \mu\text{m}$ ， $r_2=20 \mu\text{m}$ ， $r_3=80 \mu\text{m}$ ， $r_4=95 \mu\text{m}$ ，裂环开口角度 $a=10^\circ$ ， $b=45^\circ$ ，金属裂环和 VO_2 层厚度均为 $t=1 \mu\text{m}$ ；第 5 层和第 7 层相同，仅包含金属，其金属的形状和第 3 层中的金属裂环完全一样，厚度均为

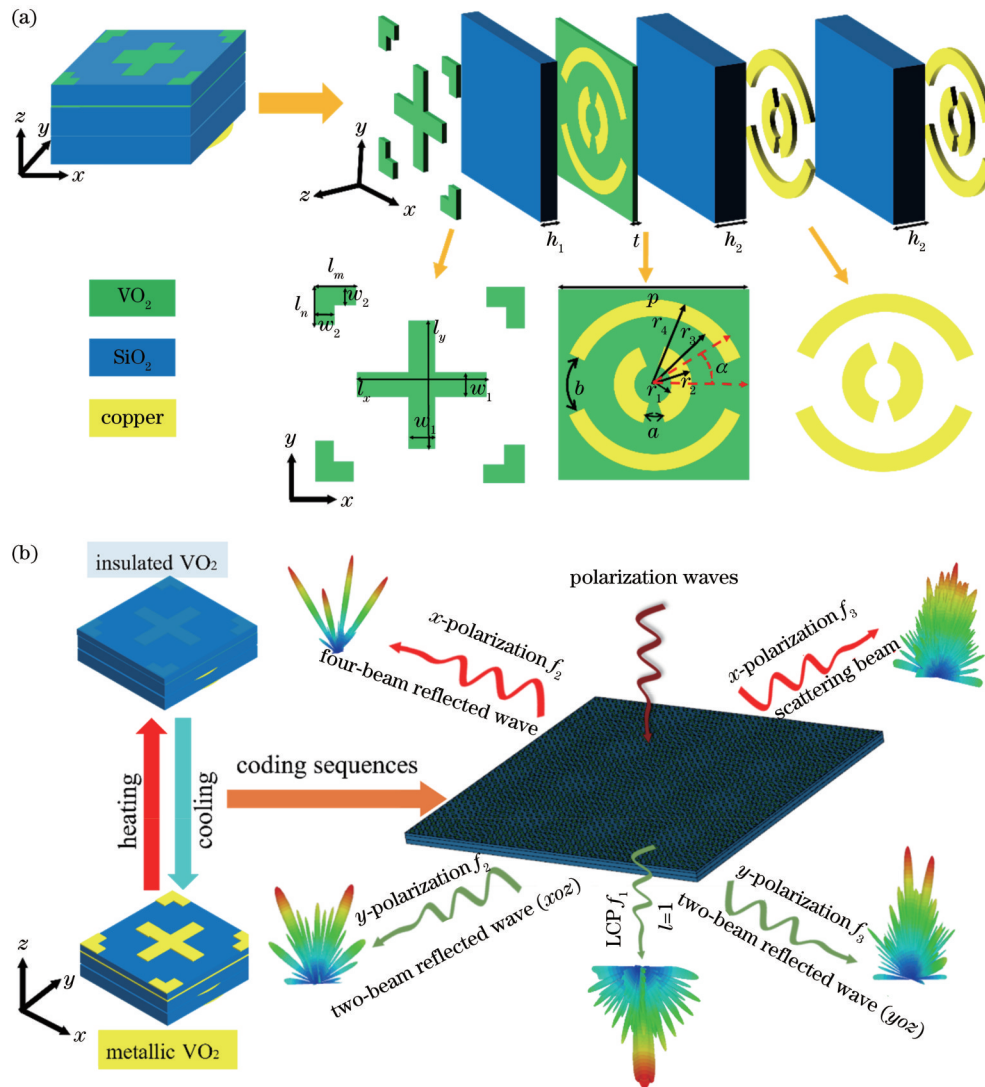


图 1 编码超表面。(a) 单元结构示意图；(b) VO_2 相变过程及产生的全空间多频点多波束

Fig. 1 Coding metasurface. (a) Schematic diagram of unit structure; (b) VO_2 phase change process and generated full-space multi-frequency multi-beam

$t=1\ \mu\text{m}$ 。

所提编码超表面单元中的十字架以及半十字架结构作为各向异性超表面设计中的经典结构^[12],可以用来对两个频点处的正交极化波分别进行独立调控;而金属裂环结构作为 PB 几何相位编码超表面中的常用结构,可以实现对圆极化波的高效调控^[13-14]。此外,如图 1(b)所示,可以通过恒温台的温控方式改变 VO₂ 的相变状态^[15],使其电导率在 200 S/m 的绝缘态和 $2\times 10^5\ \text{S/m}$ 之间切换^[16],实现单元在透射和反射模式间的切换,在一定的编码序列排列下产生多频点全空间的 5 种不同形式波束。下面利用 CST 电磁仿真软件对单元周期性仿真进行说明。

3.2 VO₂为绝缘态时编码超表面单元的透射特性

当 VO₂ 处于绝缘态时,其性能和介质无异^[17]。当太赫兹波垂直入射编码超表面时,对其产生影响的主要是第 3、第 5 和第 7 层中完全相同的金属裂环,单元为透射型单元。仿真结果表明:当 $f_1=0.6\ \text{THz}$ 的圆

极化波垂直入射到该编码超表面单元时,除了第 3 层、第 5 层和第 7 层中金属裂环上有电流分布,单元的其他部分均无电流。基于 PB 几何相位理论^[18],只要同时改变这 3 层中相同金属裂环的旋转角度 α ,其相位也会相应改变 2α 。将 α 按照 22.5° 的步长从 0° 到 157.5° 依次改变,可以获得从 0° 到 315° 的 8 个相位差依次为 45° 的 3-bit 编码超表面单元。

将金属裂环依次旋转后的编码超表面单元分别命名为 000、001、010、011、100、101、110、111。 $f_1=0.6\ \text{THz}$ 的圆极化波垂直入射至编码超表面时,幅度及相位响应如图 2 所示,不论是左旋圆极化波(LCP)还是右旋圆极化波(RCP)入射,8 个编码超表面单元均有较大的透射幅度,大于 0.7,并且相位差也严格满足 45° ,这符合 3-bit 编码超表面单元的设计要求。基于透射型单元的 PB 几何相位理论^[10],当 LCP 波垂直入射后,透射波将以 RCP 波形式出射,为方便分析,本文后续入射的圆极化波均为 LCP 波。

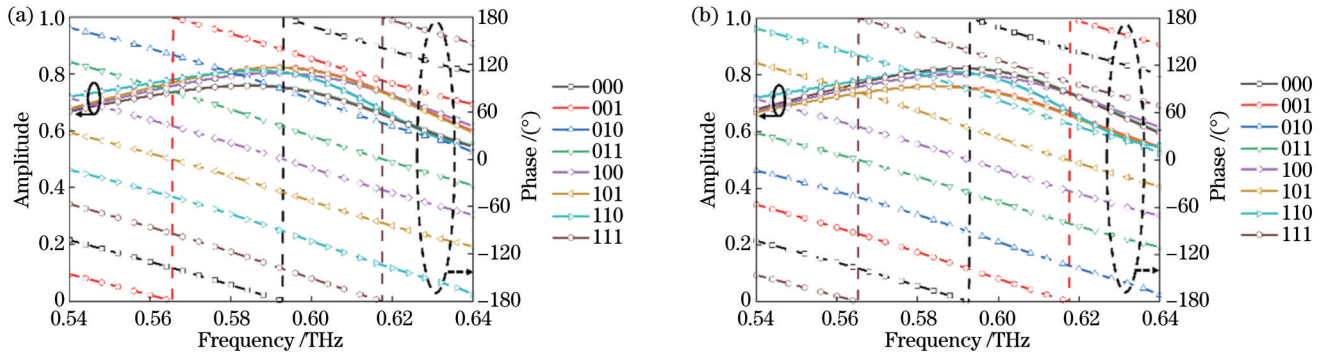


图 2 编码超表面单元的透射幅度以及相位。(a) LCP; (b) RCP

Fig. 2 Transmission amplitude and phase of coding metasurface unit. (a) LCP; (b) RCP

3.3 VO₂为金属态时编码超表面单元的反射特性

当 VO₂ 处于金属态时,其性能接近金属^[19]。此时,编码超表面单元的第 1 层可视为金属图形层;编码超表面单元的第 3 层则相当于纯金属层,太赫兹波垂直入射时将直接从该层反射,无法透射至单元的第 4 到第 7 层,单元为反射型单元。仿真结果表明:当 $f_2=0.5\ \text{THz}$ 的正交极化波垂直入射到编码超表面单元时,电流分布主要集中在第 1 层的中心十字架结构上,合适的 l_x 和 l_y 的尺寸将分别实现对 $f_2=0.5\ \text{THz}$ 的 x 极化波和 y 极化波的独立调控,中心十字架结构具有各向异性特性。当 $f_3=0.85\ \text{THz}$ 的正交极化波垂直入射到编码超表面单元时,电流分布主要集中在第 1 层四角的半十字架结构上, l_m 和 l_n 的尺寸将分别实现对 $f_3=0.85\ \text{THz}$ 的 x 极化波和 y 极化波的独立调控,四角十字架结构具有各向异性。

在 VO₂ 为金属态时,本文拟设计双频点独立可调的 1-bit 各向异性反射型编码超表面。根据上文分析,当 $f_2=0.5\ \text{THz}$ 的 x 极化波入射时,编码超表面中 l_y 、 l_m 和 l_n 的取值对其毫无影响,唯有中心十字架中 l_x 的大小

能够实现对 x 极化波的调控。当 l_x 分别为 $120\ \mu\text{m}$ 和 $160\ \mu\text{m}$ 时,如图 3(a)所示,2 个编码超表面单元 $0(f_2-l_{x1})$ 和 $1(f_2-l_{x2})$ 均有较大的反射幅度,并且相位差也严格满足 180° ,符合 1-bit 编码超表面单元的设计要求。对于单元 $0(f_2-l_{x1})$ 和 $1(f_2-l_{x2})$ 的命名,0 和 1 代表数字编码中的 0 和 1 单元,括号中 f_2 代表入射频率 $f_2=0.5\ \text{THz}$, l_{x1} 代表 $l_x=120\ \mu\text{m}$, l_{x2} 代表 $l_x=160\ \mu\text{m}$ 。当 $f_2=0.5\ \text{THz}$ 的 y 极化波入射时,中心十字架中 l_y 的尺寸改变能够对它产生影响,而 l_x 、 l_m 和 l_n 的取值对其毫无影响。将中心十字架中 l_y 分别取为 $120\ \mu\text{m}$ 和 $160\ \mu\text{m}$ 时,如图 3(b)所示,2 个编码超表面单元 $0(f_2-l_{y1})$ 和 $1(f_2-l_{y2})$ 均有较大的透射幅度(l_{y1} 代表 $l_y=120\ \mu\text{m}$, l_{y2} 代表 $l_y=160\ \mu\text{m}$),并且相位差也严格满足 180° 。同样地,在频点 $f_3=0.85\ \text{THz}$ 处,四角的半十字架结构也能够实现对正交极化波的独立调控。当 $f_3=0.85\ \text{THz}$ 的 x 极化波入射且 l_m 分别取为 $25\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ 时,如图 3(c)所示,2 个编码超表面单元 $0(f_3-l_{m1})$ 和 $1(f_3-l_{m2})$ 均有较大的反射幅度(l_{m1} 代表 $l_m=25\ \mu\text{m}$, l_{m2} 代表 $l_m=40\ \mu\text{m}$),并且相位差也严格满足 180° 。当 $f_3=0.85\ \text{THz}$ 的 y 极

化波入射且 l_n 分别取为 $25\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ 时,如图 3(d)所示,2 个编码超表面单元 $0(f_3-l_{n1})$ 和 $1(f_3-l_{n2})$ 均有较大

的反射幅度(l_{n1} 代表 $l_n=25\ \mu\text{m}$, l_{n2} 代表 $l_n=40\ \mu\text{m}$),并且相位差也严格满足 180° 。

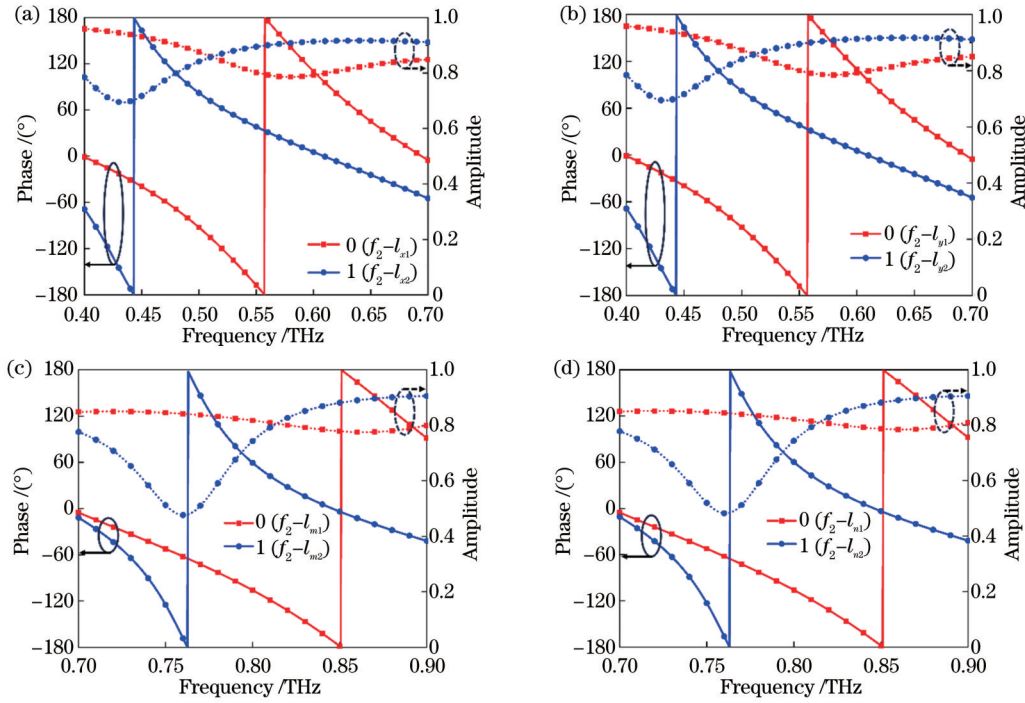


图 3 双频点的 1-bit 各向异性反射型编码超表面单元。(a) $0(f_2-l_{x1})$ 和 $1(f_2-l_{x2})$; (b) $0(f_2-l_{y1})$ 和 $1(f_2-l_{y2})$; (c) $0(f_3-l_{m1})$ 和 $1(f_3-l_{m2})$; (d) $0(f_3-l_{n1})$ 和 $1(f_3-l_{n2})$

Fig. 3 1-bit anisotropic reflective coding metasurface units with dual frequency points. (a) $0(f_2-l_{x1})$ and $1(f_2-l_{x2})$; (b) $0(f_2-l_{y1})$ and $1(f_2-l_{y2})$; (c) $0(f_3-l_{m1})$ and $1(f_3-l_{m2})$; (d) $0(f_3-l_{n1})$ and $1(f_3-l_{n2})$

4 编码超表面的设计及仿真结果分析

由前文可知: VO_2 为绝缘态且 $f_1=0.6\ \text{THz}$ 的 LCP 波入射到编码超表面时,利用金属裂环结构设计了 3-bit 的编码超表面单元; VO_2 为金属态且 $f_2=0.5\ \text{THz}$ 和 $f_3=0.85\ \text{THz}$ 的正交极化波入射时,利用十字架结构设计了双频点、具有各向异性的 1-bit 编码超表面单元。随着 VO_2 的相变,编码超表面单元从透射型向反射型转变,能够控制电磁波反射或者透射,实现全空间的编码超表面。

因此,本文设计了由 32×32 个编码超表面单元组成的编码超表面,如图 4(a)所示,其中插图给出了第 1 层和第 3 层的部分示意图。 VO_2 为绝缘态时,将第 3、第 5 和第 7 层中完全相同的金属裂环依次旋转后,形成 8 个 3-bit 的编码超表面单元,并按照编码序列 A[图 4(b)]进行排列,将形成透射涡旋波。注意,随着编码 A 的确定,所设计的编码超表面的第 3、第 5 和第 7 层中金属裂环的取向完全确定。 VO_2 为金属态且 $f_2=0.5\ \text{THz}$ 的 x 极化波入射时,将编码超表面单元 $0(f_2-l_{x1})$ 和 $1(f_2-l_{x2})$ 按照编码序列 B[图 4(c)]进行排列,将形成四束对称波。此时,编码超表面的第 1 层中 l_x 的尺寸完全确定。 $f_2=0.5\ \text{THz}$ 的 y 极化波入射时,将编码超表面单元 $0(f_2-l_{y1})$ 和 $1(f_2-l_{y2})$ 按照编码序列 C[图

4(d)]进行排列,将形成 xoz 面的两束对称波。此时,可以确定编码超表面的第 1 层中 l_y 的尺寸。 $f_3=0.85\ \text{THz}$ 的 x 极化波入射时,将编码超表面 $0(f_3-l_{m1})$ 和 $1(f_3-l_{m2})$ 按照编码序列 D[图 4(e)]进行排列,形成漫散射波,从而实现 RCS 缩减功能。此时,可以确定编码超表面的第 1 层中 l_m 的尺寸。 $f_3=0.85\ \text{THz}$ 的 y 极化波入射时,将编码超表面单元 $0(f_3-l_{n1})$ 和 $1(f_3-l_{n2})$ 按照编码序列 E[图 4(f)]进行排列,将形成 yoZ 面的两束对称波。此时,可以确定编码超表面的第 1 层中 l_n 的尺寸。由此可见,随着 5 种编码序列的逐一设计,编码超表面的第 3、第 5 和第 7 层中金属裂环的取向,以及编码超表面的第 1 层图形的结构参数 l_x 、 l_y 、 l_m 和 l_n 就完全确定。5 种波形的编码序列可根据实际需要自行设计,具有一定的灵活性。

通过调控 VO_2 的相变状态、改变入射波源的频率和极化态,在同一块编码超表面上融合了 5 种调控功能,且互不干扰。下面对该编码超表面的 5 种波束形式进行仿真与分析。

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^[20-21]。将 3-bit 的编码超表面单元按照如图 4(b)所示的编码序列 A 排列,在 VO_2 为绝缘态、 $f_1=0.6\ \text{THz}$ 的

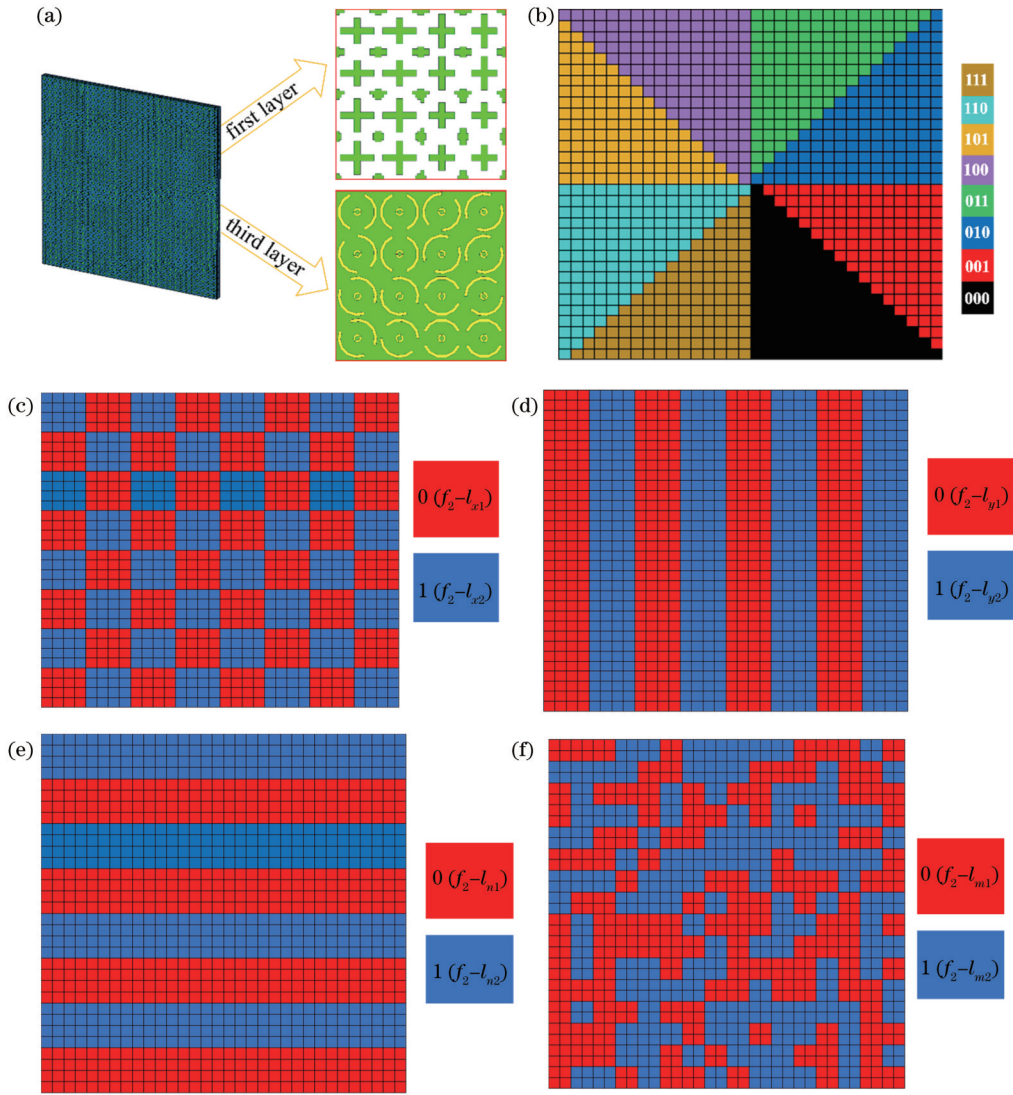


图 4 编码超表面。(a) 总体及部分示意图；编码序列(b) A、(c) B、(d) C、(e) D和(f) E

Fig. 4 Coding metasurface. (a) Overall and partial diagrams; coding sequences (b) A, (c) B, (d) C, (e) D, and (f) E

LCP波垂直入射时,所构成的编码超表面理论上会产生拓扑荷数为 $l=1$ 的RCP波构成的涡旋波束。经过仿真,得到远场散射如图5(a)所示。此时编码超表面中心的场强接近于0,周围的场强分布则呈现出了高

透射幅度的甜甜圈形式,并且从图5(b)相位图可以看到,相位呈现螺旋形态,覆盖相位达到 360° ,满足拓扑荷数为1的涡旋波的相位分布。

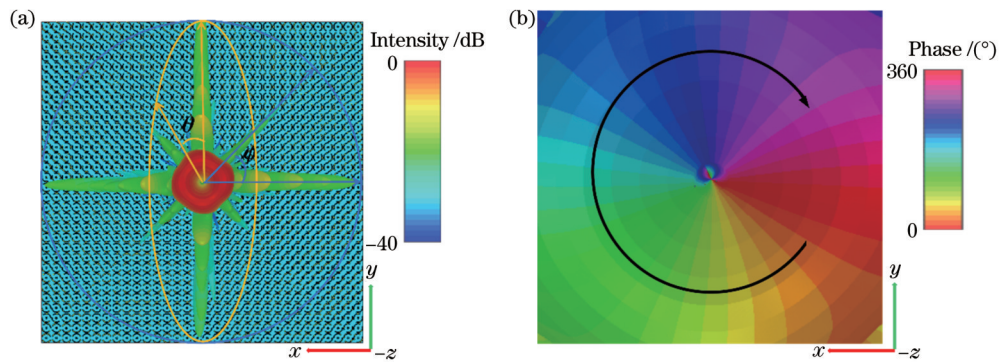


图 5 透射涡旋波。(a) 远场散射；(b) 相位

Fig. 5 Transmitted vortex wave. (a) Far-field scattering; (b) phase

4.2 波束分束

定向反射波束可以将电磁波反射到特定方向,控制和引导波束的传播方向,实现远距离通信、目标探测等^[22]。本文将单元按照编码序列 C 排列,构成编码超表面,其沿着 x 方向周期性编码,周期为 $1600\ \mu\text{m}$ 。当 $f_2=0.5\ \text{THz}$ 的 y 极化波垂直入射时,远场波束如图 6(a)所示,太赫兹波在 xoz 面上被均匀地反射到两个不同的方向,且其在 $y=0$ 截面处的电场如图 6(b)所示,

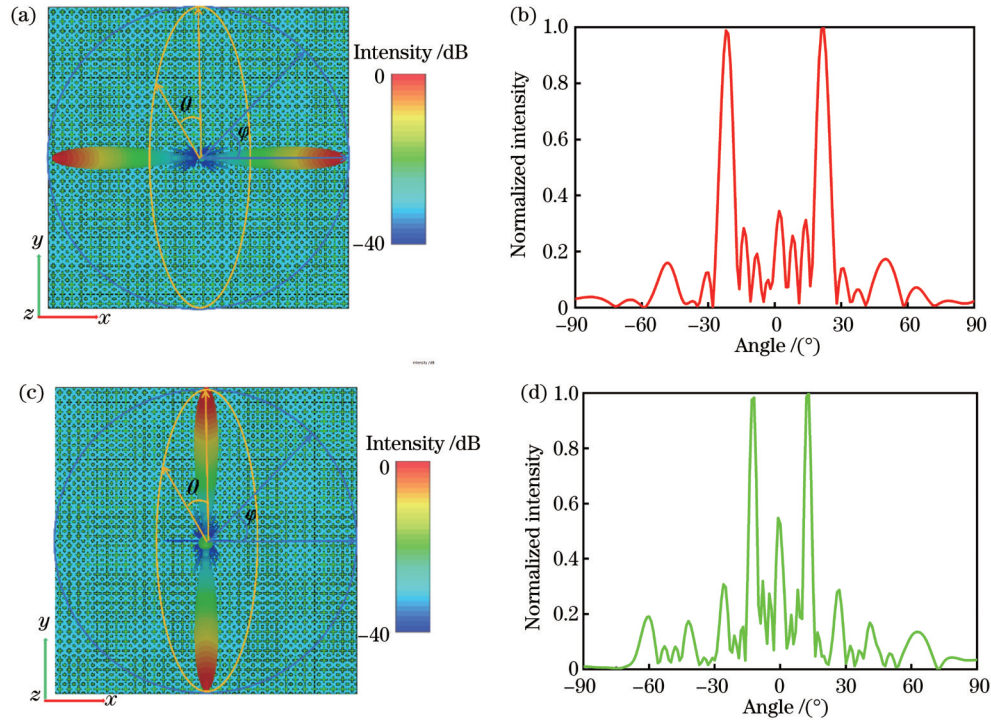


图 6 两束对称波束。 $f_2=0.5\ \text{THz}$ 时的(a)远场散射和(b)电场; $f_3=0.85\ \text{THz}$ 时的(c)远场散射和(d)电场

Fig. 6 Two symmetrical beams. (a) Far-field scattering and (b) electric field at $f_2=0.5\ \text{THz}$; (c) far-field scattering and (d) electric field at $f_3=0.85\ \text{THz}$

编码序列 C、E 均实现了波束的对称分束功能。为更加灵活地调控太赫兹波产生多波束多角度,可以进一步引入编码超表面的卷积理论^[24]。将 C 和 E 的编码序列进行卷积相加,产生的编码序列为 B,理论上可以产生对称四波束。

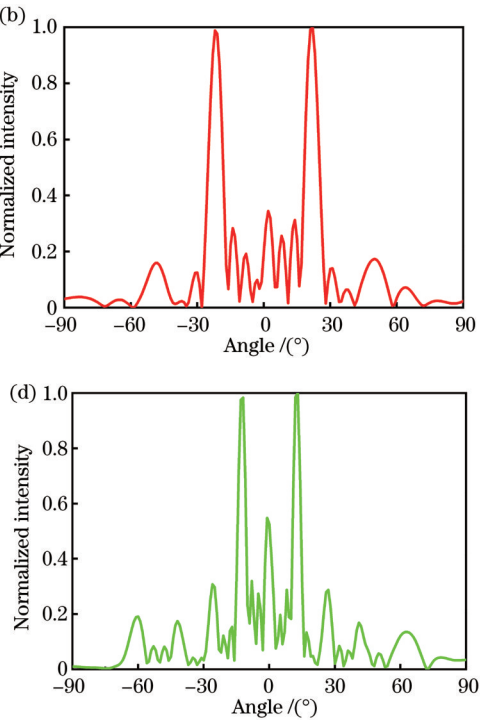
对卷积后编码超表面的远场波束进行仿真分析, $f_2=0.5\ \text{THz}$ 的 x 极化波垂直入射时,其远场波束如图 7(a)所示,与理论一致,产生了对称的四波束。波束的二维电场分布如图 7(b)所示,四波束的俯仰角 θ 均为 32.0° ,4 个方位角分别为 45° 、 135° 、 225° 和 315° ,均与理论计算的结果一致。

4.3 RCS 缩减

RCS 是衡量目标雷达回波能力强弱的一个重要物理量,减小目标的 RCS,可在电磁隐身方面发挥巨大作用^[25]。本文拟设计随机编码序列 D,通过将反射的电磁波打散到各个方向,形成漫反射,从而实现 RCS 缩减^[26]。

当 VO_2 处于金属态、 $f_3=0.85\ \text{THz}$ 的 x 极化波垂

直入射至编码超表面时,仿真结果如图 8(a)所示。从图 8(a)中出现许多散乱无序的波束,呈现出漫反射的特征。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,从而对垂直方向的 RCS 进行缩减^[27]。将该编码超表面与同等尺寸的金属板对照,如图 8(b)所示,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,对垂直反射主瓣波束起到了很好的抑制作用^[28]。



相较于表 1 所示的其他调控电磁波的编码超表面而言:文献[10]基于 PB 几何相位原理设计了透射型的编码超表面,仅实现了单一的波束调控;文献[29]基于各向异性设计了双频点独立的反射型编码超表面,仅考虑了半空间的反射型波束;文献[30]将相变材料 VO_2 和 PB 几何相位相结合,实现了对太赫兹波的透射、反射灵活调控,达到了利用同一编码超表面调控产生两种波束的效果,但集成度有待提高。本文通过合

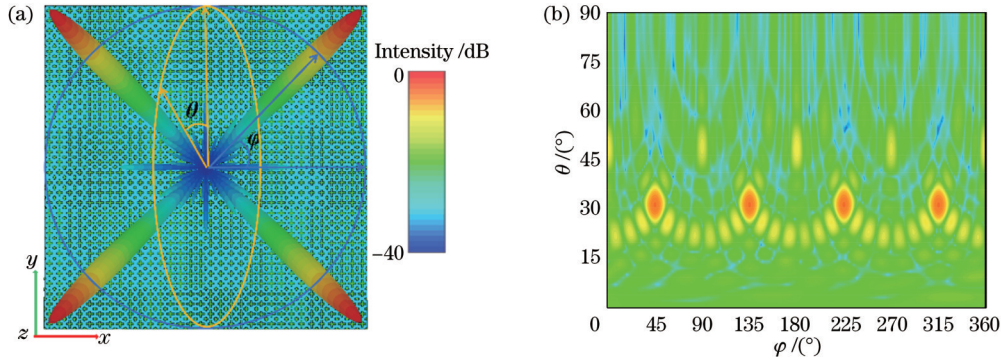


图 7 四束对称波束。(a) 远场散射;(b) 二维电场分布

Fig. 7 Four symmetrical beams. (a) Far-field scattering; (b) 2D electric field distribution

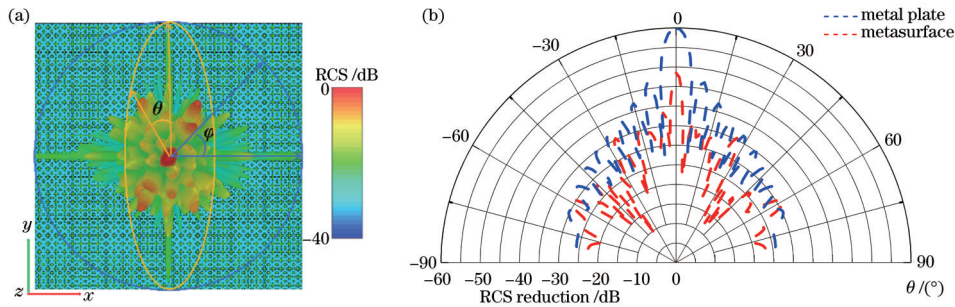


图 8 编码超表面。(a) 散射场分布图;(b) 与金属板的 RCS 缩减对比

Fig. 8 Coding metasurface. (a) Scattered field distribution; (b) comparison of RCS shrinkage with metal plate

理设计编码超表面单元,结合 VO₂ 的相变状态、入射波源的频率以及极化态的改变,实现了对太赫兹波反射和透射的全空间调控,在同一编码超表面上获得了 5 种波束形式,提高了编码超表面的集成度和调控能力。

等制备,并且在制作过程中需要精密的控制和多种微纳米加工技术的协同工作,通过显微镜、电子束、自动对准系统等进行结构对准可确保加工精度,具有可行性^[31-33]。

表 1 编码超表面的设计及性能对比

Table 1 Design and performance comparison of coding metasurface

Metasurface	VO ₂	PB	Anisotropy	All space	Frequency	Beam forms
Ref. [10]	No	Yes	No	No	One	One
Ref. [29]	No	No	Yes	No	Two	Six
Ref. [30]	Yes	Yes	No	Yes	Two	Two
Our work	Yes	Yes	Yes	Yes	Three	Five

5 结 论

传统的编码超表面工作频点单一以及调控太赫兹波的形式单一,没有达到充分利用编码超表面的目的。本文通过改变 VO₂ 的相变状态,结合 PB 几何相位原理以及双频点各向异性的十字架单元结构,实现了对不同频点处不同极化波的响应。设计了 3-bit 的透射型编码超表面序列,产生了透射的涡旋波束;利用 1-bit 的双频点各向异性反射型编码超表面序列,产生了多种形式的对称波束以及散射波束。所设计的 7 层结构的编码超表面可以采用电子束曝光结合分子束外延法

参 考 文 献

- [1] Wu J Y, Xu X F, Wei L F. Active metasurfaces for manipulatable terahertz technology[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(9): 094202.
- [2] Zhu H Y, Song Z Y. Switchable wavefront of mid-infrared wave using GeSbTe metasurfaces[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(4): 2237405.
- [3] 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.
- [4] 崔铁军, 吴浩天, 刘硕. 信息超材料研究进展[J]. 物理学报, 2020, 69(15): 158101. Cui T J, Wu H T, Liu S. Research progress of information metamaterials[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(15): 158101.
- [5] 胡孟霞, 王志强, 李向平, 等. 超表面偏振信息编码[J]. 中国激光, 2023, 50(18): 1813010. Hu M X, Wang Z Q, Li X P, et al. Metasurface polarization information encoding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(18): 1813010.
- [6] 李昕, 徐正琨, 杨静育, 等. 基于超表面的相位成像技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(2): 0200003. Li X, Xu Z K, Yang J Y, et al. Advances in phase imaging based on metasurfaces[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(2): 0200003.
- [7] Zhang L, Guo J, Ding T Y. Ultrathin dual-mode vortex beam

- generator based on anisotropic coding metasurface[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 5766.
- [8] Liu S, Cui T J, Xu Q, et al. Anisotropic coding metamaterials and their powerful manipulation of differently polarized terahertz waves[J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(5): e16076.
- [9] Yang L J, Li J S. Terahertz vortex beam generator carrying orbital angular momentum in both transmission and reflection spaces[J]. Optics Express, 2022, 30(20): 36960-36972.
- [10] 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.
- [11] Wang D J, He X J, Jiang J X, et al. Photoelectrically-excited terahertz metasurface for switchable and tunable broadband propagation and polarization manipulations[J]. Diamond and Related Materials, 2023, 131: 109570.
- [12] Hasani H, Tamagnone M, Capdevila S, et al. Tri-band, polarization-independent reflectarray at terahertz frequencies: design, fabrication, and measurement[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2016, 6(2): 268-277.
- [13] Li J, Zhang Y T, Li J N, et al. Amplitude modulation of anomalously reflected terahertz beams using all-optical active Pancharatnam-Berry coding metasurfaces[J]. Nanoscale, 2019, 11(12): 5746-5753.
- [14] Xu Q, Su X Q, Zhang X Q, et al. Mechanically reprogrammable Pancharatnam-Berry metasurface for microwaves[J]. Advanced Photonics, 2022, 4(1): 016002.
- [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. Dynamic terahertz modulator based on interaction between metamaterials[J]. Electronic Test, 2022(19): 103-106.
- [16] Wang H, Ling F, Zhang B. Tunable metasurfaces for independent control of linearly and circularly polarized terahertz waves[J]. Optics Express, 2020, 28(24): 36316-36326.
- [17] Li J S, Li S H, Yao J Q. Actively tunable terahertz coding metasurfaces[J]. Optics Communications, 2020, 461: 125186.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Yan Y, Xie G D, Lavery M P J, et al. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature Communications, 2014, 5: 4876.
- [21] Cheng J, Li W S, Li J S. Multifunctional reflection type anisotropic metasurfaces in the terahertz band[J]. Optical Materials Express, 2022, 12(5): 2003-2011.
- [22] 张磊, 刘硕, 崔铁军. 电磁编码超材料的理论与应用[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 1-12. Zhang L, Liu S, Cui T J. Theory and application of coding metamaterials[J]. Chinese Optics, 2017, 10(1): 1-12.
- [23] Pan Y B, Lan F, Zhang Y X, et al. Dual-band multifunctional coding metasurface with a mingled anisotropic aperture for polarized manipulation in full space[J]. Photonics Research, 2022, 10(2): 416-425.
- [24] Zhong M, Li J S. Multi-function terahertz wave manipulation utilizing Fourier convolution operation metasurface[J]. Chinese Physics B, 2022, 31(5): 054207.
- [25] Sun H Y, Gu C Q, Chen X L, et al. Broadband and broad-angle polarization-independent metasurface for radar cross section reduction[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40782.
- [26] Moccia M, Koral C, Papari G P, et al. Suboptimal coding metasurfaces for terahertz diffuse scattering[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 11908.
- [27] 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.
- [28] Saifullah Y, Yan G M, Feng X M. A four-leaf clover-shaped coding metasurface for ultra-wideband diffusion-like scattering [J]. Journal of Radars, 2021, 10(3): 382-390.
- [29] 韩俊杰, 钱思贤, 朱传名, 等. 基于双极化编码超表面生成的双模式轨道角动量[J]. 物理学报, 2023, 72(14): 148101. Han J J, Qian S X, Zhu C M, et al. Dual-mode orbital angular momentum generated based on dual-polarization coding metasurface[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(14): 148101.
- [30] Zhang D Q, Tao Y, Pan G M, et al. Switchable transmissive and reflective metadevices based on the phase transition of vanadium dioxide[J]. Optics Letters, 2022, 47(23): 6073-6076.
- [31] 封罩银, 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.
- [32] 胡跃强, 李鑫, 王旭东, 等. 光学超构表面的微纳加工技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(9): 20201035. Hu Y Q, Li X, Wang X D, et al. Progress of micro-nano fabrication technologies for optical metasurfaces[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(9): 20201035.
- [33] 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.

Multi-Frequency and Multi-Beam Tunable Terahertz Coding Metasurface in Full Space

Yang Zhixiong¹, Wang Jingli^{1*}, Sun Wenjun¹, 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;

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

Abstract

Objective Terahertz waves refer to electromagnetic waves between microwave and infrared wave, which can be applied in different fields such as communication, sensing, radar, and imaging. Terahertz coding metasurface, as an important device for modulating terahertz waves, has the advantages of simple structure, small size, low cost, low loss, and high efficiency. The coding metasurface units are arranged according to a certain coding sequence, and by changing the phase difference between the units, the flexible modulation of terahertz waves can be achieved to generate various forms of beams. However, when the design of a general terahertz coding metasurface is completed, the function and operating frequency are relatively single. In order to fully utilize the coding metasurface, an anisotropic metasurface is proposed, which can regulate the incident orthogonal polarized waves separately. And a frequency independent coding metasurface has been proposed, which can separately regulate the incidence waves at different frequency points to generate different forms of beams. In addition, the phase change materials such as vanadium dioxide (VO₂) were used to achieve the switching of transmission and reflection modes of terahertz waves, thereby achieving the goal of full spatial modulation of electromagnetic waves. The above methods improve the ability of the coding metasurface to regulate terahertz waves, but the integration level still needs to be improved. Therefore, we integrate these technologies to achieve multi-frequency and multi-beam tunable terahertz coding metasurface in full space, greatly improving its ability to regulate terahertz waves.

Methods In this paper, a coding metasurface which can regulate the circular polarized waves and orthogonal polarized waves separately is proposed by combining the principle of PB geometrical phase as well as the frequency independence and anisotropy of double crosses. In addition, introducing the phase change material VO₂, flexible switching of terahertz waves between transmission and reflection is achieved by changing its phase change state. The details are as follows. When VO₂ is in an insulating state, the designed coding metasurface is a single-frequency-point 3-bit PB geometrical phase transmitting coding metasurface, which generates transmission-type vortex waves with topological charge number of 1. When VO₂ is in a metallic state, the designed coding metasurface is a dual-frequency-point independently adjustable 1-bit anisotropic reflective coding metasurface, which generates four symmetric beams, of which two symmetric beams on the *xoz* plane with RCS reduction and two symmetric beams are on the *yo**z* plane, respectively.

Results and Discussions The designed coding metasurface units (Fig. 1) with identical metallic split-ring structures in the third, fifth, and seventh layers are rotated from 0° to 157.5° in a step of 22.5° to obtain a total of eight coding metasurface units (Fig. 2). When VO₂ is in an insulating state and a circularly polarized wave with $f_1 = 0.6$ THz is incident, the units maintain a high transmission amplitude and strictly satisfy a phase difference of 45°. The design conditions for a 3-bit transmission type coding metasurface unit are met. Arranging them according to a certain coding sequence [Fig. 4(b)] can produce transmission-type vortex waves with topological charge number of 1 (Fig. 5). When VO₂ is in a metallic state and the orthogonal polarized waves of $f_2 = 0.5$ THz and $f_3 = 0.85$ THz are incident, a dual-frequency and anisotropic 1-bit reflective-type coding metasurface unit (Fig. 3) is designed by using the two cross structures. After arranging them according to a certain coding sequence [Figs. 4(c)-(f)], the perpendicular incidence of *y*-polarized wave with $f_2 = 0.5$ THz on the *xoz* plane produces two symmetric beams [Figs. 6(a) and 6(b)]. When a *y*-polarized wave with $f_3 = 0.85$ THz is incident vertically, two symmetric beams are generated on the *yo**z* plane [Figs. 6(c) and 6(d)]. When a *x*-polarized wave with $f_2 = 0.5$ THz is incident vertically, four symmetrical beams are generated [Figs. 7(a) and 7(b)]. When a *x*-polarized wave with $f_3 = 0.85$ THz is incident vertically, a diffuse scattering beam can be generated [Figs. 8(a) and 8(b)], realizing RCS reduction. The results show that with the rational design of the coding metasurface combined with the phase transition state of VO₂, the frequency of the incident wave source, and the

polarization state, the full space regulation of terahertz wave's reflection and transmission can be realized and five beam forms on the same coding metasurface can be obtained.

Conclusions In this paper, a coding metasurface with full space multi-frequency and multi-beam tunability is designed by changing the phase transition state of VO₂, combining the principle of PB geometrical phase and the cross unit structure with dual-frequency anisotropy. A 3-bit transmission coding metasurface with an operating frequency of $f_1 = 0.6$ THz is designed to produce a transmitted vortex beam. And a dual-frequency 1-bit anisotropic reflective coding metasurface with operating frequencies of $f_2 = 0.5$ THz and $f_3 = 0.85$ THz is designed to produce various forms of symmetric and scattered beams. This coding metasurface, which introduces phase change material and realizes full space multi-frequency multi-beam regulation by transmission and reflection, is important for designing multifunctional terahertz beam modulation devices.

Key words optics at surfaces; terahertz; full space; tunability; coding metasurface; multi-beam