

文章编号: 2095-4980(2021)01-0001-06

## 基于编码超表面的双向太赫兹多波束调控器件

沈仕远, 王元圣, 池瑶佳, 马新迎, 杨青慧, 陈智, 文岐业

(电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731)

**摘要:** 基于相变材料二氧化钒( $\text{VO}_2$ )和编码超表面技术设计了一种双向太赫兹多波束调控器件。在 0.7 THz 下, 通过给予器件热激励控制  $\text{VO}_2$  的相变状态, 可使器件在反射和透射两种工作模式间切换。器件温度高于 68 °C ( $\text{VO}_2$  相变温度)时,  $\text{VO}_2$  相变为金属态, 器件工作在反射模式下, 对太赫兹波进行高效反射并将入射波分为多束能量近似、方向不同的波束。在常温下,  $\text{VO}_2$  为绝缘态, 器件工作在透射模式, 对太赫兹波进行高效透射。对反射和透射两个方向波束的动态调控使器件本身不再成为透射或反射波传输的阻碍。这种对太赫兹多波束的动态双向调控在太赫兹无线通信场景中非常有用。

**关键词:** 二氧化钒; 编码超表面; 动态波束调控; 双向; 太赫兹通信

**中图分类号:** TN761.1

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2020090

## Phase transition material based coding metasurface for two-way terahertz beam steering

SHEN Shiyuan, WANG Yuansheng, CHI Yaojia, MA Xinying, YANG Qinghui, CHEN Zhi, WEN Qiye

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

**Abstract:** A two-way terahertz beam steering device is designed and proposed based on phase change material vanadium dioxide( $\text{VO}_2$ ) and coding metasurface technology. At 0.7 THz, by giving the device thermal excitation to control the phase transition state of  $\text{VO}_2$ , the device can be switched between two working modes of reflection and transmission. When the device temperature is higher than 68 °C (the phase change temperature of  $\text{VO}_2$ ), the  $\text{VO}_2$  turns into metallic state, and the device works in reflection mode which means the device efficiently reflect and split the incident wave into several beams with similar energy and different directions. Under normal temperature,  $\text{VO}_2$  is in insulating state, and the device works in transmission mode to transmit terahertz wave efficiently. The dynamic control of beams in both directions of reflection and transmission makes the device itself no longer an obstacle to transmission of reflected or transmitted waves. This dynamic two-way control of the terahertz beam is very useful in terahertz wireless communication scenarios.

**Keywords:**  $\text{VO}_2$ ; coding metasurface; dynamic beam control; two-way; terahertz communication

随着无线网络的高速发展, 第六代(Sixth Generation, 6G)无线移动通信技术引起了学术界和工业界的广泛关注, 其具有超高的网络速率、超低的通信时延和更广的覆盖深度<sup>[1]</sup>。为满足 6G 多样化的应用场景需求, 如虚拟现实、全息通信、无线数据中心、无线回程网络等<sup>[2]</sup>, 迫切需要为未来 6G 通信系统开发新的频谱资源。纵观电磁频谱, 位于毫米波与光波之间的太赫兹频段, 具有传输速率高、全天时通信、波束对准相对容易等特点, 是新一代无线高速通信发展的必然选择<sup>[3]</sup>。太赫兹通信虽具有明显的优点, 但在实际通信应用场景中仍面临一些挑战: 太赫兹波具有严重的路径衰减和分子吸收损耗, 更适用于近距离无线高速通信场景; 太赫兹波的方向性强, 衍射差, 易于被障碍物阻挡。为解决太赫兹通信覆盖问题, 能够主动调控太赫兹波束的有源动态调控器件是必不可少的。

收稿日期: 2020-03-08; 修回日期: 2020-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61831012; 51572042); 科学挑战计划资助项目(TZ2018003)

作者简介: 沈仕远(1994-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹波束调控。email:shiyuanshen@qq.com

由于太赫兹自身频谱的特殊性,传统成熟的微波和光学器件在调控太赫兹波方面的性能有限<sup>[4]</sup>。近年来,超表面的提出和发展为解决这一问题开辟了新的道路。超表面是一种二维的人工超材料,通过在亚波长厚度的基底上设计一定的金属或非金属结构,实现对电磁波的调控。特别地,可以通过设计具有一定相位分布的超表面,实现对波束的操纵,如涡旋光束<sup>[5]</sup>、光束偏转<sup>[6]</sup>、聚焦<sup>[7]</sup>、扩散<sup>[8]</sup>以及偏振转换<sup>[9]</sup>。2014年,东南大学的崔铁军等首次提出了数字编码超表面的概念<sup>[10]</sup>,将超表面的设计与数字编码相结合,使用‘0’和‘1’及其组合来表示不同相位的单元结构,并通过不同的方式排列实现对电磁波束的多种操纵,从而进一步简化了超表面结构的设计与优化。尽管对太赫兹波束进行操纵的超表面研究已经取得了很大的进展,但大多数编码超表面结构使用的是金属材料,功能单一,且无法对电磁波束实现动态调控<sup>[10-11]</sup>,不能很好地满足实际复杂的需求。同时,大部分的超表面器件只能对单一的透射波或反射波进行调控,在无需工作时,器件本身会由于其低反射或低透射的特性成为电磁波传输的阻碍。

为解决以上问题,本文使用经典的相变材料 VO<sub>2</sub> 来构建编码超表面,以对太赫兹波透明的蓝宝石作为基底,底面的反射层也使用 VO<sub>2</sub>。基于 VO<sub>2</sub> 的相变特性,该器件能够根据给予的热激励实现两种工作模式:反射模式和透射模式。在反射模式下,器件的功能相当于一个反射型分束器,工作频率为 0.6~0.73 THz;在透射模式下,器件对太赫兹波表现为高透射,器件本身不会成为太赫兹波传输的阻碍。本文设计的器件实现了对太赫兹波的双向动态调控,为太赫兹技术在未来的 6G 无线通信中的应用提供了新的思路。

## 1 器件设计与理论

本文设计的双向太赫兹多波束调控器件的结构和工作状态如图 1(a)所示,由图中可以看出,器件由 2 种不同的单元按一定的规律周期排列而成。常温下,器件工作在透射模式,当入射波照射到器件表面时,能够高效透射过去;当给予器件一定的热激励,使其温度高于 68 °C 时,器件工作在反射模式,对太赫兹波表现为高反射,此时当入射波垂直入射到器件表面时,器件将入射波分成多个能量近似、方向对称的波束反射出去。

构成器件的单元结构如图 1(b)所示。单元为 3 层结构,顶层为边长为  $w$ ,厚度为  $t_1$  的 VO<sub>2</sub> 方块,这种结构易于优化且对极化不敏感;中间的介质层为对太赫兹波透明的蓝宝石,厚度为  $h$ ;底层完全覆盖 VO<sub>2</sub> 薄膜,厚度为  $t_2$ 。整个单元的长为  $a$ 。VO<sub>2</sub> 薄膜在常温下为绝缘态,与单晶蓝宝石一样,对 1 THz 以下的太赫兹波都是透明的<sup>[12]</sup>。在 200 μm 厚度的蓝宝石晶体的两面均生长了 200 nm 厚的 VO<sub>2</sub> 薄膜,其对于 0.1~1 THz 内太赫兹波,透射率在 0.6~0.7 之间。可以预见本文所设计的器件在常温透射模式下,对 1 THz 下的太赫兹波表现为高透性。

器件的反射模式是依据编码超表面的原理进行设计。根据传统的相控阵天线理论<sup>[10-11]</sup>,在平面波垂直入射的情况下,超表面散射的远场函数可以表示为:

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

式中:  $\theta$  和  $\varphi$  分别为俯仰角和方位角;  $k$  为传播常数;  $D$  为超表面中  $M \times N$  个大小相同的子阵列边长;  $f_e(\theta, \varphi)$  为子阵列的远场函数;  $\varphi(m, n)$  为子阵列的相位,其值为 0° 或 180°。

如图 1 所示,单元分为 2 种,分别记为‘0’单元和‘1’单元,2 个单元间的相位差为 180°,其方向性函数  $Dir(\theta, \varphi)$  可以由式(2)给出:

$$Dir(\theta, \varphi) = \frac{4\pi |f(\theta, \varphi)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} |f(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi} \quad (2)$$

式中子阵列的远场函数  $f_e(\theta, \varphi)$  被消掉。从式(2)可以看出,通过编码超表面的子阵列单元,可以调控散射波。

对于图 1(c)和图 1(d)中提出的 2 种结构的编码序列,其远场表达式可分别简化为:

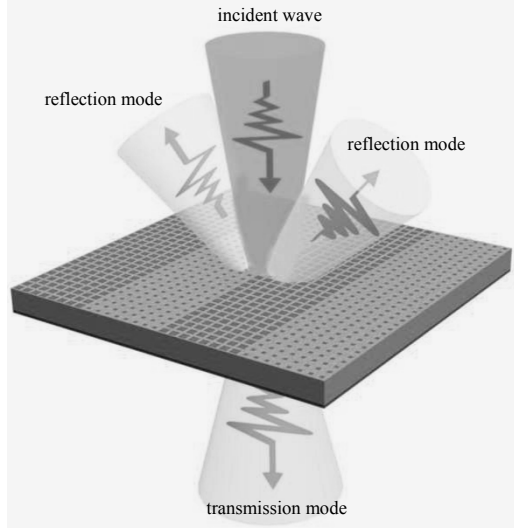
$$\begin{cases} |f_1(\theta, \varphi)| = C_1 |\sin \psi_1 + \sin \psi_2| = 2C_1 \left| \sin \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} \cos \frac{\psi_1 - \psi_2}{2} \right| \\ |f_2(\theta, \varphi)| = C_2 |\cos \psi_1 - \cos \psi_2| = 2C_2 \left| \sin \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} \sin \frac{\psi_1 - \psi_2}{2} \right| \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\psi_1 = \frac{1}{2} kD (\sin \theta \cos \varphi + \sin \theta \sin \varphi)$ ;  $\psi_2 = \frac{1}{2} kD (-\sin \theta \cos \varphi + \sin \theta \sin \varphi)$ ;  $C_1, C_2$  为常数。

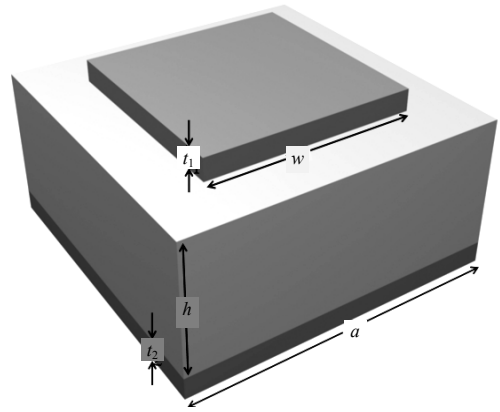
因此,对于编码序列 010101.../010101...的超表面,有:  $\left| \sin \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} \right| = 1, \left| \cos \frac{\psi_1 - \psi_2}{2} \right| = 1$ 。综述可得:  $\varphi_1 = 0^\circ$  或

180°,  $\theta_1 = \arcsin(\lambda/2D)$ ,  $\lambda$  为入射波长。说明该编码序列将产生 2 束关于  $yz$  平面对称的散射波。

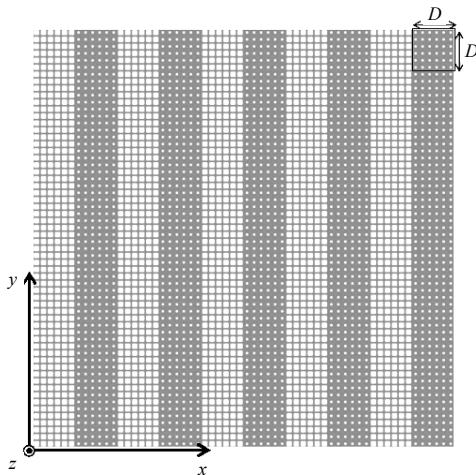
同样, 对于图 1(d)中的编码序列为 010101.../101010...的超表面, 可以得出  $\varphi_2=45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$  和  $315^\circ$ ,  $\theta_2 = \arcsin(\lambda/\sqrt{2}D)$ , 说明该编码序列将产生 4 束关于入射方向对称的散射波束。



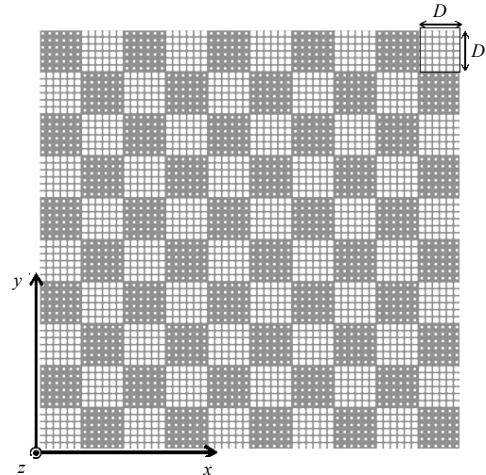
(a) illustration of two working modes and the structure of the device



(b) schematic diagram of unit structure



(c) top view of 010101.../010101... coded metasurface with 10×10 subarrays



(d) top view of 010101.../101010... coded metasurface with 10×10 subarrays

Fig.1 Structure of device and cell

图 1 器件及单元结构

目前对于 VO<sub>2</sub> 的相变控制, 使用较多的是热控、电控和光控方式。其中光控需要通过一定功率的激光对 VO<sub>2</sub> 进行照射, 成本较高, 且在实际应用中受环境影响较大。2000 年, 俄罗斯的 G Stefanovich 等<sup>[13]</sup>详细研究了 VO<sub>2</sub> 薄膜的电致相变和热致相变, 发现电致相变的弛豫时间在纳秒级别, 而相同条件下热致相变弛豫时间在微秒级别。2019 年, 文岐业教授团队和 Richard D. Averitt 的团队<sup>[14]</sup>合作通过对外置叉指电极施加偏置电压使 VO<sub>2</sub> 发生热致相变, VO<sub>2</sub> 从绝缘态相变到金属态以及相应的逆相变过程分别耗时 2.2 s 和 6 s, 2 个过程中 VO<sub>2</sub> 电导率的指数上升和衰减时间分别为 0.31 s 和 0.85 s。

## 2 器件仿真和分析

通过改变单元顶层 VO<sub>2</sub> 块的边长  $w$  来获得‘0’单元和‘1’单元, 实现以上效果。为了得到理想的器件效果, 使用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 对单元进行仿真, 入射波为 TE 模式, 在  $xy$  方向上使用 unit cell 边界条件,  $z$  方向为开放边界条件, 蓝宝石使用软件库中的 Alumina(96%)(lossy), 其相对介电常数为 9.4, 损耗角正切为 0.000 4。在 500 nm 波长附近, 目前文献报道的 VO<sub>2</sub> 薄膜在绝缘态的折射率  $n$  约为 3.11, 消光系数  $k$  约

为 0.5；在金属态下， $n$  约为 2.53， $k$  约为  $1.0^{[15]}$ 。VO<sub>2</sub> 在绝缘态和金属态下的电导率使用实际测得的生长在蓝宝石晶体上的 VO<sub>2</sub> 电导率 200 S/m 和  $1.25 \times 10^6$  S/m，两种状态下相对介电常数均设为  $10^{[14]}$ 。工作频率在 0.1~1 THz。通过参数扫描和优化，得出‘0’单元和‘1’单元的相应参数：两种单元的边长  $a=75 \mu\text{m}$ ，底层 VO<sub>2</sub> 厚度  $t_2=1 \mu\text{m}$ ，介质层蓝宝石高度  $h=30 \mu\text{m}$ ，顶层 VO<sub>2</sub> 块的厚度  $t_1=0.2 \mu\text{m}$ ，对于‘0’单元，顶层 VO<sub>2</sub> 块的边长  $w=49 \mu\text{m}$ ，对于‘1’单元， $w$  则为  $18 \mu\text{m}$ 。优化后两种单元的反射率和相位关于频率的曲线分别如图 2(a)~(b)所示。从图中可以清晰地看出，在 0.6~0.73 THz 之间，反射率基本保持在 0.8 以上，相位差保持在  $180^\circ$  附近。在 0.7 THz 时，‘0’单元和‘1’单元之间相位差刚好为  $180^\circ$ ，同时其反射率分别为 0.94 和 0.90，相差仅为 0.04，非常接近。TM 模式下反射率和相应的相位差与 TE 模式下相同，可见单元是偏振不敏感的。

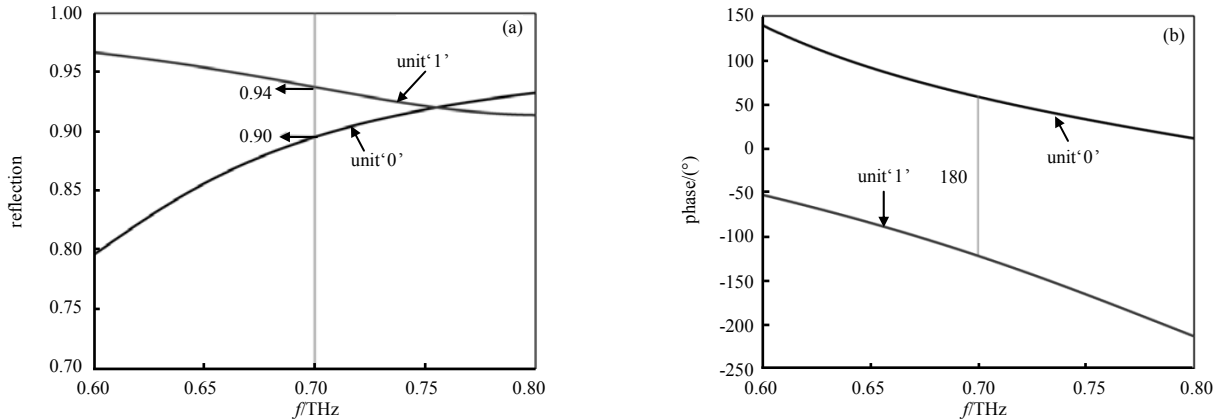


Fig.2 (a) reflection of units (b) phase of units  
图 2 (a) 单元反射率; (b) 单元相位

首先在  $x$  方向上对单元进行编码构成 1 bit 相位超表面,即按照图 1(c)中的 010101.../010101...序列进行编码。该编码超表面由  $10 \times 10$  个子阵列组成,每个子阵列由  $6 \times 6$  个‘0’单元或‘1’单元组成,此时  $D=450 \mu\text{m}$ 。图 3(a)显示了这种编码序列下的远场散射,可以清晰地看出反射波被器件主要分为两束,它们的方位角  $\varphi$  分别为  $0^\circ$  和  $180^\circ$ 。从图 3(b)中可以清楚地看到 2 个散射峰出现在  $\theta=-28^\circ$  和  $27.9^\circ$  处。同时,可以算出俯仰角为  $\theta_1=28.4^\circ$ ,两种计算方法得到的结果一致。

当保持编码序列而改变编码周期  $D=600 \mu\text{m}$ ,即改变子阵列的规模为  $8 \times 8$  时,其方位角没有变化,远场散射图和图 3(a)类似,只有俯仰角  $\theta$  变为  $\pm 20.7^\circ$ ,与公式计算出的  $\theta_1=20.9^\circ$  结果一致。

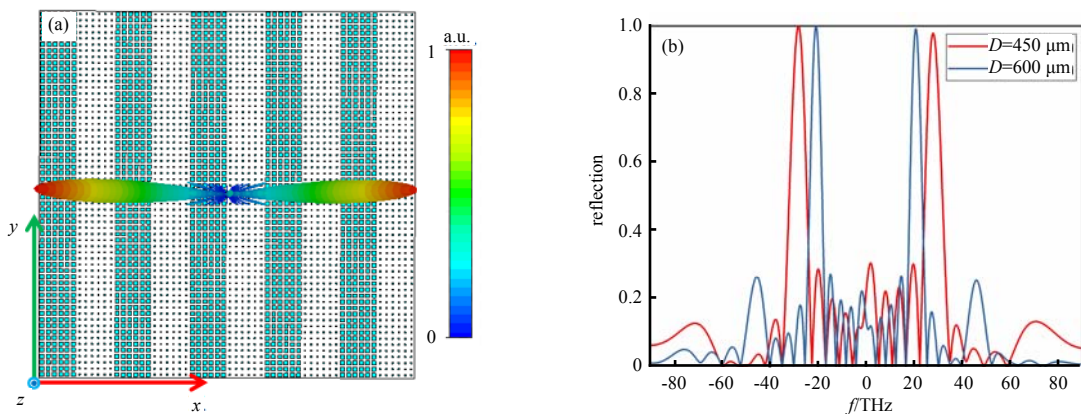


Fig.3 (a) normalized 3D far-field scattering of 010101.../010101... coded metasurface with  $10 \times 10$  subarrays while  $D=450 \mu\text{m}$ ; (b) energy distribution normalized with the maximum signal strength as 1 of different periods  $D$  under 010101.../010101... coded metasurface with  $10 \times 10$  subarrays at the azimuth angle of  $0^\circ$

图 3 (a)  $D=450 \mu\text{m}$  时,  $10 \times 10$  子阵列规模的 010101.../010101... 编码超表面归一化 3D 远场散射图; (b)  $10 \times 10$  子阵列规模的 010101.../010101... 编码超表面不同周期  $D$  在方位角  $0^\circ$  下以最大信号强度为 1 进行归一化处理得到的能量分布

接下来在  $x$  和  $y$  方向上都进行编码,即按照图 1(d)中的 010101.../101010...序列进行编码。编码超表面由  $10 \times 10$  个子阵列组成,每个子阵列的规模为  $6 \times 6$ ,此时  $D=450 \mu\text{m}$ 。在  $x$  方向上以 010101...的序列进行编码, $y$  方向上以 101010...的序列进行编码,这样得到一个棋盘状的编码超表面,如图 4(a)所示。在这种编码条件下,其远场

散射如图 4(b)所示。从图中可以看出,反射波主要有 4 束,其方位角与预期一致,在  $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$  和  $315^\circ$  的位置,俯仰角可以从图 4(b)中清楚地看出,在  $\pm 41.5^\circ$  处。用公式也可计算出相应角度  $\theta_2 = 42.3^\circ$ 。

同样,对  $010101\cdots/101010\cdots$  编码的序列改变其子阵列规模为  $8 \times 8$ ,周期  $D$  变为  $600 \mu\text{m}$ ,其方位角没有变化,远场散射图与图 4(a)类似,俯仰角  $\theta_2$  发生改变,从图 4(b)可以看出  $\theta_2$  变为  $\pm 29.9^\circ$ ,与理论计算得出的结果  $30.3^\circ$  在误差范围内。

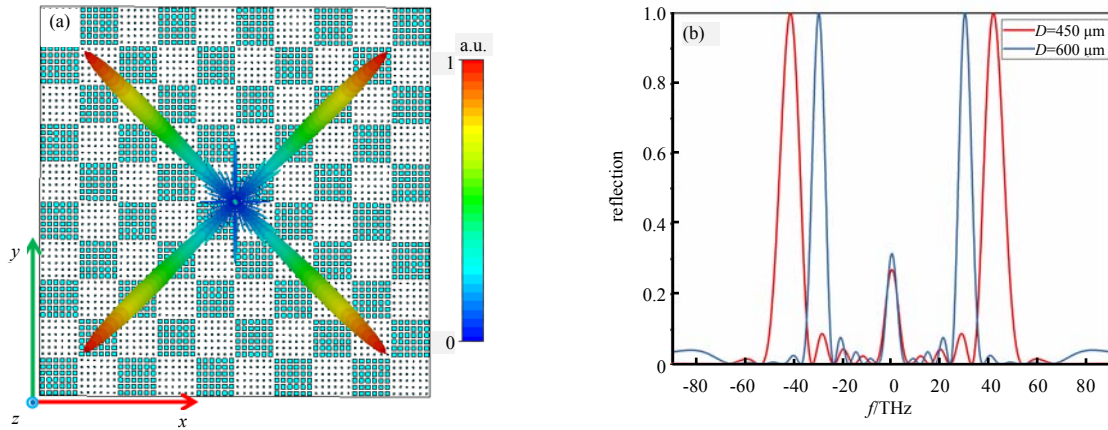


Fig.4 (a) normalized 3D far-field scattering of  $10101\cdots/101010\cdots$  coded metasurface with  $10 \times 10$  subarrays while  $D=450 \mu\text{m}$ ; (b) energy distribution normalized with the maximum signal strength as 1 of different periods  $D$  under  $010101\cdots/101010\cdots$  coded metasurface with  $10 \times 10$  subarrays at the azimuth angle of  $45^\circ$

图 4 (a) 当  $D=450 \mu\text{m}$  时  $10 \times 10$  子阵列规模的  $010101\cdots/101010\cdots$  编码超表面归一化 3D 远场散射图; (b)  $10 \times 10$  子阵列规模的  $010101\cdots/101010\cdots$  编码超表面不同周期  $D$  在方位角  $45^\circ$  下以最大信号强度为 1 进行归一化处理得到的能量分布

### 3 应用场景分析

由于太赫兹波严重的路径损耗和分子吸收损耗导致太赫兹波的通信距离受到限制,使得室内太赫兹高速通信成为未来 6G 重要的应用场景之一<sup>[16]</sup>。室内的通信环境较为复杂,具有强方向性和弱衍射性的太赫兹波束很容易被室内的障碍物(如家具)阻挡,即主要在视距范围内进行传播。因此,增强室内太赫兹通信的覆盖能力尤为重要。在这种应用需求下,本文提出的双向太赫兹多波束调控器件能够协助太赫兹波束绕过障碍物,进而提高室内通信的覆盖能力。本文提出的双向太赫兹多波束调控器件有两种工作模式:反射模式和透射模式,反射模式下的分束可以协助太赫兹波绕开障碍物,实现多端通信;透射模式能够使器件本身不成为太赫兹波传输的阻碍,从而可以进一步扩展室内太赫兹通信的覆盖范围。下面就 2 个典型的室内通信场景,对波束调控器件的 2 种工作模式进行说明,如图 5(a)~(b)所示。

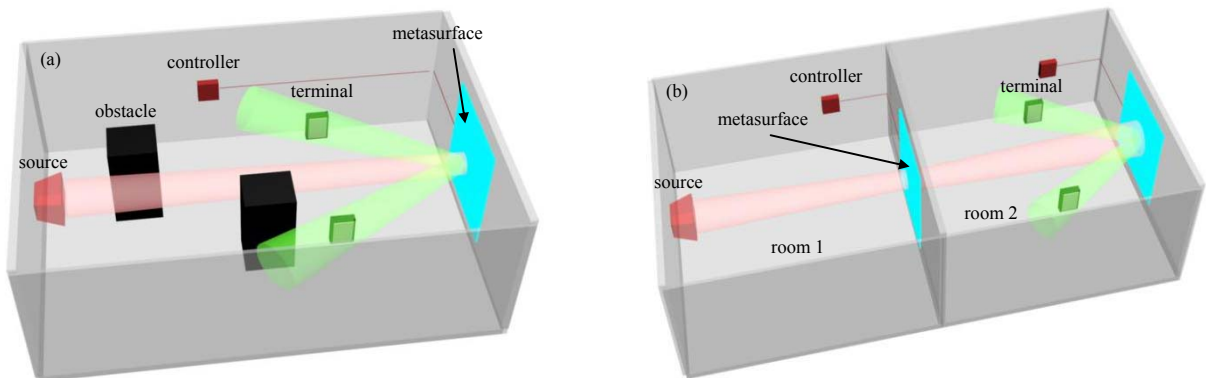


Fig.5 (a) application scenario of reflection mode; (b) application scenario of transmission mode

图 5 (a) 反射模式应用场景; (b) 透射模式应用场景

在图 5(a)所示的室内太赫兹通信场景中,房间内布设有一个信号源和 2 个通信终端,并在房间墙壁上贴附带有控制器的超表面。在房间内需要进行多个终端同时通信的情况下,通过操控控制器将超表面切换到反射模式,太赫兹波束经过超表面反射后分成多个波束,并且在信号源与通信终端之间的视距被障碍物阻挡的情况下,通过反射的方式绕开障碍物并与多个终端成功通信。

在图 5(b)所示的室内太赫兹通信场景中, 房间 1 和房间 2 的墙壁上贴附带有控制器的超表面, 房间 1 布设一个信号源而房间 2 没有安装信号源。如果需要房间 1 的信号源和房间 2 的通信终端进行通信时, 调整控制器将超表面切换到透射模式。在透射工作模式下, 太赫兹多波束调控器件自身不会成为通信的阻碍, 房间 1 内的信号源发出的太赫兹波束可以透过超表面与房间 2 的通信终端经过房间 2 内的超表面反射进行高速通信, 而不用部署多个信号源。因此, 本文提出太赫兹多波束调控器件不仅扩展了室内太赫兹通信的覆盖范围, 还降低了通信成本, 具有广泛的应用前景。

值得注意的是, 本文仅例举了 4 种编码, 实现不同方向和数量的反射波束的调控。还可以通过不同的编码, 实现多种数量和方向的太赫兹波束的调控, 这种简单的设计方式大大增加了器件对各种不同室内环境的适用性。

## 4 结论

利用  $\text{VO}_2$  的相变特性, 根据编码超表面的理论, 设计了一种双向太赫兹多波束调控器件。这种器件可以贴附于室内的墙体表面, 调控室内的太赫兹波束。同时通过改变超表面的编码序列, 可以方便地实现在器件的反射模式下, 将反射波分为不同数量和不同角度的波束。提出的双向太赫兹多波束调控器件结构简单, 设计和制备较为方便, 成本低廉。通过采用不同的编码序列, 可以灵活地改变调控波束的方向和数量, 大大增加了该器件对各种不同室内环境的适用性。

### 参考文献:

- [1] YASTREBOVA A, KIRICHEK R, KOUCHERYAVY Y, et al. Future networks 2030: architecture & requirements[C]// 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops(ICUMT). Moscow, Russia: IEEE, 2018: 1–8.
- [2] ZONG B, FAN C, WANG X, et al. 6G technologies: key drivers, core requirements, system architectures, and enabling technologies[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 18–27.
- [3] ELAYAN H, AMIN O, SHUBAIR R M, et al. Terahertz communication: the opportunities of wireless technology beyond 5G[C]// 2018 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking. Marrakech: [s.n.], 2018: 1–5.
- [4] YEN T, PADILLA W J, FANG N, et al. Terahertz magnetic response from artificial materials[J]. Science, 2004, 303(5663): 1494–1496.
- [5] GENEVET P, YU N, AIETA F, et al. Ultra-thin plasmonic optical vortex plate based on phase discontinuities[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(1): 13101.
- [6] WEI Z, CAO Y, SU X, et al. Highly efficient beam steering with a transparent metasurface[J]. Optics Express, 2013, 21(9): 10739–10745.
- [7] NI X, ISHII S, KILDISHEV A V, et al. Ultra-thin, planar, babinet-inverted plasmonic metalenses[J]. Light: Science and Applications, 2013, 2(4): e72.
- [8] GAO L, CHENG Q, YANG J, et al. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces[J]. Light: Science and Applications, 2015, 4(9): e324.
- [9] ARBABI A, HORIE Y, BAGHERI M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with sub-wavelength spatial resolution and high transmission[J]. Nature Nanotechnology, 2014, 10(11): 937–943.
- [10] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light: Science and Applications, 2014, 3(10): e218.
- [11] GAO L H, CHENG Q, YANG J, et al. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces[J]. Light: Science and Applications, 2015, 4(9): e324.
- [12] MANDAL P, SPECK A, KO C, et al. Terahertz spectroscopy studies on epitaxial vanadium dioxide thin films across the metal-insulator transition[J]. Optics Letters, 2011, 36(10): 1927–1929.
- [13] STEFANOVICH G, PERGAMENT A, STEFANOVICH D, et al. Electrical switching and Mott transition in  $\text{VO}_2$ [J]. Journal of Physics Condensed Matter, 2000, 12(41): 8837–8845.
- [14] SCHALCH J S, CHI Y, HE Y, et al. Broadband electrically tunable  $\text{VO}_2$ -metamaterial terahertz switch with suppressed reflection[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020, 62(8): 2782–2790.
- [15] BALBERG I, TROKMAN S. High contrast optical storage in  $\text{VO}_2$  films[J]. Journal of Applied Physics, 1975, 46(5): 2111–2119.
- [16] MA X, CHEN Z, CHEN W. Intelligent reflecting surface enhanced indoor terahertz communication systems[J]. Nano Communication Networks, 2020(24): 100284.