

基于 VO<sub>2</sub> 的太赫兹各向异性编码超表面\*汪静丽<sup>1)†</sup> 杨志雄<sup>1)</sup> 董先超<sup>1)</sup> 尹亮<sup>1)</sup> 万洪丹<sup>1)</sup> 陈鹤鸣<sup>2)</sup> 钟凯<sup>3)</sup>

1) (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, 南京 210023)

2) (南京邮电大学贝尔英才学院, 南京 210023)

3) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(2022 年 11 月 12 日收到; 2023 年 2 月 14 日收到修改稿)

设计了一种 3 层结构的太赫兹编码超表面, 其顶部是嵌入 VO<sub>2</sub> 的金属十字架结构, 中间是聚酰亚胺, 底部为纯金属. 利用该编码超表面的各向异性特点, 可以实现对正交极化波 ( $x$  极化波和  $y$  极化波) 的独立调控; 通过在编码超表面中引入 VO<sub>2</sub> 材料, 改变其相变状态, 可进一步增加调控的灵活性. 对设计的超表面进行建模仿真和分析, 结果表明: 对于垂直入射的 1 THz 正交极化波, VO<sub>2</sub> 处于绝缘态时, 设计的超表面可视为 2 bit 的各向异性编码超表面, 产生模式为 1 和 2 的涡旋波; VO<sub>2</sub> 处于金属态时, 设计的超表面可视为 1 bit 的各向异性编码超表面, 产生对称的 2 束反射波和 4 束反射波. 所提出的各向异性和相变材料结合的方法, 实现了同一超表面上产生多种不同形式太赫兹波束的功能, 一定程度上解决了超表面调控太赫兹波形式单一的问题, 为实现能够灵活应用于多种场景的多功能编码超表面提供了参考.

**关键词:** 太赫兹, 编码超表面, VO<sub>2</sub>, 各向异性**PACS:** 42.79.-e, 42.82.-m**DOI:** 10.7498/aps.72.20222171

## 1 引言

太赫兹波是频率在 0.1—10.0 THz、介于微波与可见光之间的电磁波<sup>[1]</sup>, 具有高分辨率、大信息容量以及易于波束聚焦等优点, 可应用于通信、雷达、检测<sup>[2–5]</sup>等领域. 随着太赫兹技术的发展, 对太赫兹波灵活调控的需求越来越急迫. 目前, 在太赫兹频段对其调控的方法有两类: 一种是直接利用自然界中的原材料制成太赫兹器件, 包括高阻硅透镜和偏振片等, 可实现对太赫兹波的波束聚焦和偏振态等的调制<sup>[6]</sup>, 但是器件结构复杂、尺寸较大、价格昂贵、可调谐性差. 另一种是采用人工材料超表面<sup>[7]</sup>, 通过灵活地设计超表面单元和其排列方式,

实现对太赫兹波的波前相位、幅度以及偏振的调控, 其具有结构简单、尺寸小、成本低、可调谐等优点, 成为人们研究的热点.

2014 年, 东南大学崔铁军课题组<sup>[8]</sup>在超表面的基础上, 提出了编码超表面的概念, 将超表面的单元特性和数字编码相结合, 进一步简化设计. 利用编码超表面对太赫兹波进行调控, 可产生涡旋波<sup>[9]</sup>、偏折波<sup>[10]</sup>和聚焦波等<sup>[11]</sup>. 但是, 上述编码超表面的结构一旦设计完成, 产生的波束形式单一, 对太赫兹波的调控能力有限, 大大限制了其应用. 随着若干新设计方法的提出, 在同一编码超表面上能够产生多种形式太赫兹波: 基于 5 层结构的编码超表面, 其可实现对不同频段、不同方向的入射波分别调控, 产生多种形式的透射波和反射波<sup>[12]</sup>;

\* 国家自然科学基金(批准号: 12174199, 61571237)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20221330, BK20151509)和多功能太赫兹天线的研究横向课题(批准号: 2021 外 323)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jlwang@njupt.edu.cn

基于各向异性的编码超表面, 其能够对入射的正交极化波进行独立调控, 在同一频点处产生两种不同形式的波, 对频谱的利用率更高<sup>[13,14]</sup>; 在编码超表面中引入 VO<sub>2</sub> 材料, 随着 VO<sub>2</sub> 从绝缘态到金属态的相变, 编码序列也随之改变, 产生波束的形式也发生转变<sup>[15,16]</sup>.

目前, 在编码超表面的设计中, 一般仅采用上述提及的某一种设计方法对太赫兹波进行调控, 有一定的局限性. 本文考虑能否将多种调控太赫兹波的方法结合, 实现在同一编码超表面上产生更多波束形式. 基于此, 拟在编码超表面中, 实现各向异性特性和引入 VO<sub>2</sub> 相变材料, 通过两者巧妙组合, 达到产生多种形式波束的目的. 结果表明: 当 1 THz 的正交极化波垂直入射, 且编码超表面具有

各向异性前提下, 使 VO<sub>2</sub> 在绝缘态和金属态之间变化, 分别产生了  $l = 1, 2$  的涡旋波和对称的 4 束反射波、2 束反射波. 此外, 若合理改变单元的编码形式以及编码序列, 还能实现其他的波束形式. 这种编码超表面在一定程度上提高了太赫兹波调控的灵活性, 为实现多功能的编码超表面提供了一种新思路.

## 2 理论分析

编码超表面调控太赫兹波的原理可根据传统的相控阵天线理论来解释, 以  $N \times N$  个周期相同且尺寸为  $D$  (本文中为单元边长  $p$ ) 的单元构成的编码超表面为例<sup>[17]</sup>. 在垂直平面波的入射下, 整个超表面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,  $\theta$  为俯仰角,  $\varphi$  为方位角,  $k$  为传播常数,  $f_e(\theta, \varphi)$  为单个单元的远场函数,  $\varphi(m, n)$  为第  $(m, n)$  个单元的相位. 方向图函数可以表示为

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

对于 1 bit 的编码超表面,  $\varphi(m, n)$  为 0 或  $\pi$ ; 对于 2 bit 的编码超表面,  $\varphi(m, n)$  为 0,  $\pi/2$ ,  $\pi$  和  $3\pi/2$ . 依据 (1) 式和 (2) 式可以得出, 产生波束远场的方向和超表面单元之间的相位有关<sup>[18]</sup>, 这样通过人为地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远场波束.

## 3 单元结构的设计与仿真

本文拟在同一编码超表面上, 结合各向异性和 VO<sub>2</sub> 的相变特性, 产生多种形式的波束. 目前, 在超表面中实现各向异性, 一般会采用十字架结构<sup>[12-14]</sup>, 其思路是分别调整构成十字架结构的水平臂长和垂直臂长, 从而实现对正交极化波的独立调控. 基于此, 在本文的编码超表面单元设计中, 也将采用十字架结构, 获得各向异性特性. 此外, 将各向异性和相变特性巧妙结合的关键, 就是相变

前后都保留十字架结构, 并且其水平臂长和垂直臂长均会发生改变. 换言之, 相变前后, 编码超表面单元中均存在十字架结构, 具有各向异性特性; 相变前后, 编码超表面单元中的十字架结构尺寸不同, 从而具有不同的相位差, 可以构成不同 bit 的编码超表面. 按照上述思路所设计的基于 VO<sub>2</sub> 的各向异性编码超表面, 理论上能获得 4 种波束形式, 且 4 种波束的形式可通过编码序列的设计而灵活更改, 对 THz 波的调控更加自由.

设计的编码超表面单元如图 1 所示. 单元由 3 层结构组成: 顶层为十字架结构, 由两个矩形垂直交叉形成. 包含金属部分 (图 1 黄色部分) 和 VO<sub>2</sub> 部分 (图 1 蓝色部分) 的矩形宽度均为  $w = 20 \mu\text{m}$ , 厚度均为  $t = 0.2 \mu\text{m}$ , 仅含有金属的矩形长度分别为  $X$  和  $Y$ , 同时包括金属和 VO<sub>2</sub> 的矩形长度分别为  $M$  和  $N$ ; 中间介质层为厚度  $h = 20 \mu\text{m}$  的聚酰亚胺 (polyimide), 其介电常数  $\epsilon_r = 3.5$ , 正切损耗  $\tan \delta = 2.7 \times 10^{-3}$ ; 底部是厚度为  $t = 0.2 \mu\text{m}$  的正方形金属层, 其边长  $p = 120 \mu\text{m}$ .

VO<sub>2</sub> 是一种相变材料, 其相变温度是 68 °C, 利用电、热和光等方式即可实现相变功能, 并且其在相变前为绝缘态, 电导率  $\sigma = 200 \text{ S/m}$ ; 相变后为金属态, 电导率为  $\sigma = 2 \times 10^5 \text{ S/m}$ <sup>[19]</sup>. 为了更清楚地说明图 1 所设计的编码超表面单元的可行性,

需要验证:  $\text{VO}_2$  处于两种状态时, 是否都具有各向异性. 因此, 结合建模仿真, 观察  $\text{VO}_2$  处于不同状态时, 单元对于入射的正交极化波所产生的电流响应; 单元表面电流分布越明显, 表示受到正交极化波的影响越显著. 如图 2(a) 和图 2(b) 所示,  $\text{VO}_2$  处于绝缘态, 1 THz 的  $x$  极化波和  $y$  极化波入射至单元时, 电流分布分别集中于金属十字架的水平臂和垂直臂中. 注意: 十字架结构中的  $\text{VO}_2$  部分, 其表面均无电流分布. 如图 2(c) 和图 2(d) 所示, 当  $\text{VO}_2$  处于金属态, 1 THz 的  $x$  极化波和  $y$  极化波入射至单元时, 电流分布分别集中在金属和  $\text{VO}_2$  组合构成的十字架结构的水平臂和垂直臂中. 综上,  $\text{VO}_2$  状态的改变, 不仅改变了十字架结构的尺寸, 还保留了各向异性的特性.

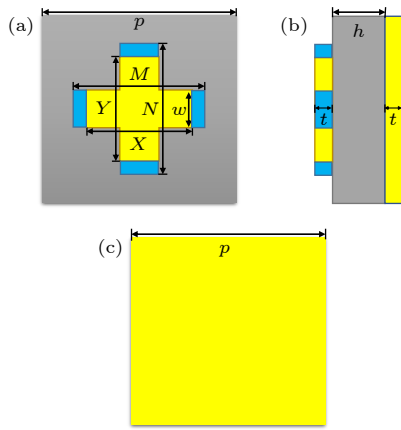


图 1 编码超表面单元结构 (a) 俯视图; (b) 侧视图; (c) 底部

Fig. 1. Schematic of the coding metasurface unit: (a) Top view; (b) side view; (c) bottom.

基于此, 在 0.5—1.5 THz 频率内, 继续对图 1 编码超表面单元进行建模仿真, 依据单元对于正交极化波入射所产生的反射幅度以及相位响应, 设计出了 8 个尺寸不同且基于  $\text{VO}_2$  的各向异性编码超表面单元, 并以数字加字母的形式对其命名, 在表 1 列出. 当  $\text{VO}_2$  分别处于绝缘态和金属态, 正交极化波 ( $x$  极化波和  $y$  极化波) 分别垂直入射至表 1 中

的 8 个编码超表面单元时, 其反射幅度与反射相位如图 3 所示, 可以归纳出如下结论.

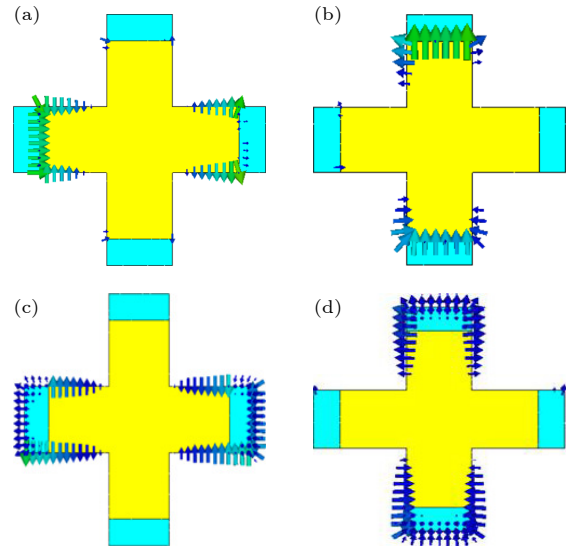


图 2  $\text{VO}_2$  处于绝缘态时,  $x$  极化波 (a) 和  $y$  极化波 (b) 单元的电流分布;  $\text{VO}_2$  处于金属态时,  $x$  极化波 (c) 和  $y$  极化波 (d) 单元的电流分布

Fig. 2. When  $\text{VO}_2$  is insulating state, surface current of  $x$ -polarized wave (a) and  $y$ -polarized wave (b) unit; when  $\text{VO}_2$  is metallic state, surface current of  $x$ -polarized wave (c) and  $y$ -polarized wave (d) unit.

1)  $\text{VO}_2$  处于绝缘态,  $x$  极化波入射时, 其反射幅度与反射相位仅和十字架结构中矩形的金属部分尺寸  $X$  有关. 单元中  $X$  值相等 (例如 1A 和 3A), 其相位响应就相同, 且反射幅度的变化保持一致, 这些单元可视为同一编码单元 [20]. 因此, 1A 和 3A 可视为相同编码的单元, 用符号 A 来命名; 同理, 1B 和 3B 为单元 B; 2C 和 4C 为单元 C; 2D 和 4D 为单元 D. 从图 3 可见, 在 1 THz 频点处, 单元 A, B, C, D 的反射幅度均大于 0.8, 其相位差依次为  $90^\circ$ . 同样,  $y$  极化波入射时, 其反射幅度与反射相位仅和十字架结构中矩形的金属部分尺寸  $Y$  有关. 即  $Y$  值相等的单元 (例如 1A 和 1B), 其相位响应就相同, 且反射幅度的变化保持一致, 这些单元可视为同一编码单元. 因此, 1A 和 1B 可视为

表 1 8 个编码超表面单元结构参数

Table 1. Structure parameters of eight coding metasurface units.

| 单元              | 1A | 1B | 2C | 2D | 3A | 3B | 4C | 4D |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $X/\mu\text{m}$ | 60 | 76 | 81 | 96 | 60 | 76 | 81 | 96 |
| $Y/\mu\text{m}$ | 60 | 60 | 76 | 76 | 81 | 81 | 96 | 96 |
| $M/\mu\text{m}$ | 76 | 76 | 96 | 96 | 76 | 76 | 96 | 96 |
| $N/\mu\text{m}$ | 76 | 76 | 76 | 76 | 96 | 96 | 96 | 96 |

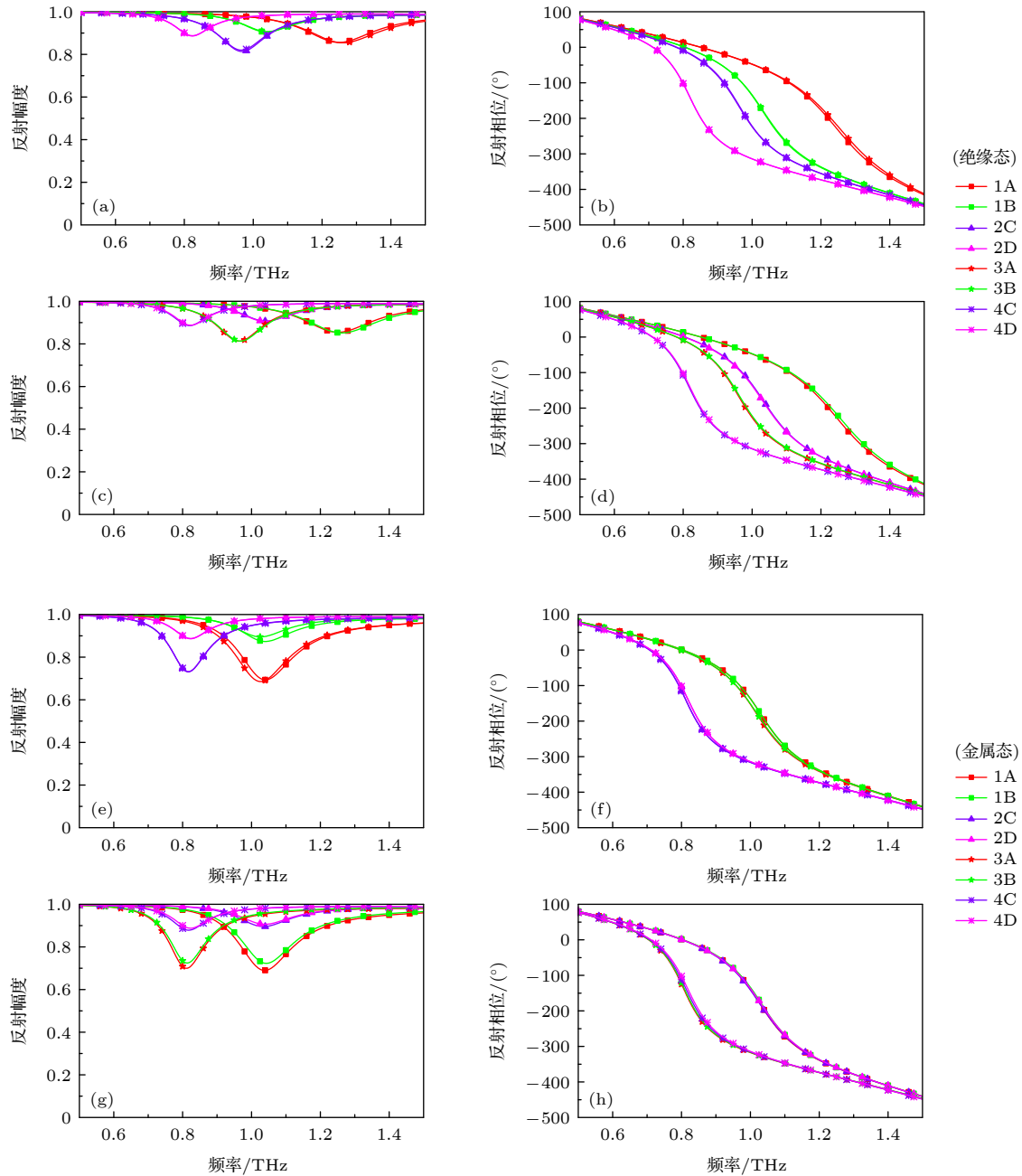


图3 (a)–(d)  $\text{VO}_2$  处于绝缘态时, 单元在正交极化波垂直入射下的反射幅度和反射相位 (a), (b)  $x$  极化波; (c), (d)  $y$  极化波. (e)–(h)  $\text{VO}_2$  处于金属态时, 单元在正交极化波垂直入射下的反射幅度和反射相位 (e), (f)  $x$  极化波; (g), (h)  $y$  极化波

Fig. 3. (a)–(d) When  $\text{VO}_2$  is insulating state, the reflection amplitude and phase of the units under the vertical incidence of the orthogonal polarized wave: (a), (b)  $x$ -polarized wave; (c), (d)  $y$ -polarized wave. (e)–(h) When  $\text{VO}_2$  is metallic state, the reflection amplitude and phase of the units under the vertical incidence of the orthogonal polarized wave: (e), (f)  $x$ -polarized wave; (g), (h)  $y$ -polarized wave.

相同的编码单元, 用数字 1 来命名; 同理, 2C 和 2D 为单元 2; 3A 和 3B 为单元 3; 4C 和 4D 为单元 4. 从图 3 可见, 1 THz 频点处, 单元 1, 2, 3, 4 的反射幅度均大于 0.8, 其相位差依次为  $90^\circ$ . 因此, 在  $\text{VO}_2$  处于绝缘态时, 单元 A, B, C, D 以及单元 1, 2, 3, 4 满足 2 bit 各向异性编码超表面单元的条件.

2)  $\text{VO}_2$  处于金属态,  $x$  极化波入射时, 其反射相位仅和十字架结构中矩形的金属部分尺寸  $M$  有关. 即  $M$  值相等的单元 (例如: 1A, 1B, 3A 和 3B), 其相位响应就相同, 且此时的反射幅度均大于一定的值, 这些单元亦可视为同一编码单元. 因此, 1A, 1B, 3A 和 3B 四个单元可视为相同编码的单元, 用字母 E 来命名; 同理, 2C, 2D, 4C 和 4D 为单元 F.



从图 3 可见, 1 THz 频点处, 单元 E 和 F 的反射幅度均大于 0.6, 相位差依次为  $180^\circ$ . 同样, 对于  $y$  极化波入射, 其反射相位仅和十字架结构中矩形的金属部分尺寸  $N$  有关. 即  $N$  值相等的单元 (例如: 1A, 1B, 2C 和 2D), 其相位响应就相同, 且此时的反射幅度均大于一定的值, 这些单元可视为同一单元. 因此, 1A, 1B, 2C 和 2D 四个单元可视为相同的编码单元, 用字母 G 来命名; 同理, 3A, 3B, 4C 和 4D 为单元 H. 从图 3 可见, 单元 G 和 H 的反射幅度均大于 0.6, 其相位差依次为  $180^\circ$ . 因此,  $\text{VO}_2$  处于金属态时, 单元 E, F 和单元 G, H 满足 1 bit 各向异性编码超表面单元的条件.

#### 4 编码序列设计及产生的波束形式

第 3 节给出了 8 个尺寸不同、基于  $\text{VO}_2$  的各向异性编码超表面单元. 在  $\text{VO}_2$  处于绝缘态时, 其满足 2 bit 各向异性编码超表面单元的设计要求, 若按照一定的编码序列排列, 即可构建 2 bit 各向异性编码超表面. 同样, 在  $\text{VO}_2$  处于金属态时, 其满足 1 bit 各向异性编码超表面单元的设计要求, 若按照一定的编码序列排列, 即可构建 1 bit 各向异性编码超表面. 特别地, 编码序列不同, 编码超表面所产生的波束形式也不同, 可根据实际需要设计编码序列, 实现对太赫兹波的灵活调控.

目前, 通过编码超表面调控太赫兹波产生涡旋波和散射波是研究热点 [21]. 对于前者, 其在波分复用、光通信领域有广阔应用 [22]. 携带轨道角动量 (OAM) 的涡旋波具有相位因子  $e^{il\varphi}$ , 其中  $\varphi$  为方位角,  $l$  是涡旋波的模式. 对于模式  $l = 1$  和  $l = 2$  的情况, 其表示在一个波长传播距离上波前绕着中心旋转一周相位分别改变  $360^\circ$  和  $720^\circ$  [23]. 因此, 若要通过超表面对波束的调控获得模式  $l = 1$  和  $l = 2$  的涡旋波, 只要按照上述相位分布分别设计编码序列即可. 对于后者, 其在雷达和隐身方面有广阔应用 [24]. 通过设计合理的编码序列, 超表面可实现对波束的角度偏转、定向辐射、RCS 缩减等功能. 例如, 编码超表面单元按照不同的周期性棋盘格形式的编码序列排列时 [25], 所构成的超表面可以分别产生对称的 2 束反射波和对称的 4 束反射波, 而随机的编码序列排列则能实现 RCS 缩减功能 [26].

综上, 拟设计合适的编码序列, 令提出的编码超表面能够产生  $l = 1$  和  $l = 2$  的涡旋波、对称的

2 束反射波和对称的 4 束反射波. 具体设计如下: 将  $20 \times 20$  个表 1 中的单元按照如图 4(a) 所示编码序列进行排列, 一共分为 8 个象限, 每个象限内的单元完全相同, 构成了基于  $\text{VO}_2$  的各向异性编码超表面, 如图 4(b) 所示. 当  $\text{VO}_2$  为绝缘态时, 根据之前的分析可知, 在正交极化波垂直入射时, 其为 2 bit 各向异性编码超表面. 换言之, 对于  $x$  极化波垂直入射的情况, 根据前文可知, 此时 1A 和 3A 可视为相同编码的单元 A; 1B 和 3B 为单元 B; 2C 和 4C 为单元 C; 2D 和 4D 为单元 D. 因此, 图 4(a) 的编码序列变成了如图 4(c) 所示的编码序列, 此时依然保持 8 个象限, 相邻两个象限相位差依次为  $90^\circ$ , 满足空间平面旋转一周对应  $720^\circ$ , 理论上可以产生模式  $l = 2$  的涡旋波. 对于  $y$  极化波垂直入射的情况, 根据前文可知, 1A 和 1B 可视为相同的编码单元 1, 2C 和 2D 为单元 2; 3A 和 3B 为单元 3; 4C 和 4D 为单元 4. 因此, 图 4(a) 所示的编码序列变成了如图 4(d) 所示的编码序列, 此时变为 4 个象限, 相邻两个象限的相位差为  $90^\circ$ , 满足空间平面旋转一周对应  $360^\circ$ , 理论上可以产生模式  $l = 1$  的涡旋波. 根据之前的分析可知, 当  $\text{VO}_2$  为金属态, 在正交极化波垂直入射时, 其为 1 bit 各向异性编码超表面. 换言之, 对于  $x$  极化波垂直入射的情况, 根据第 3 节可知, 此时 1A, 1B, 3A 和 3B 四个单元可视为相同编码的单元 E; 2C, 2D, 4C 和 4D 为单元 F. 因此, 图 4(a) 所示编码序列变成了如图 4(e) 所示的编码序列, 为 EF/FE 周期性的棋盘格编码序列排布方式, 理论上可以产生对称的四束反射波. 对于  $y$  极化波垂直入射的情况, 根据前文可知, 1A, 1B, 2C 和 2D 四个单元可视为相同的编码单元 G, 3A, 3B, 4C 和 4D 为单元 H. 因此, 图 4(a) 所示编码序列变成了如图 4(f) 所示的编码序列, 为 HG/HG 周期性的棋盘格编码序列排布方式, 理论上可以产生对称的两束反射波.

$\text{VO}_2$  为绝缘态时, 沿着  $z$  轴负方向垂直入射频率为 1 THz 的正交极化波到图 4(a) 所示的编码序列排列的编码超表面. 对于  $x$  极化波入射的情况, 编码序列如图 4(c) 所示, 其远场方向图以及相位分布分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示, 可看到此时编码超表面中心的反射波强度接近 0, 光强分布呈现甜甜圈形式, 相位覆盖为  $720^\circ$ , 符合模式为  $l = 2$  的涡旋波特性; 对于  $y$  极化波入射的情况, 编码序列如图 4(d) 所示, 其远场方向图及相位分布分别

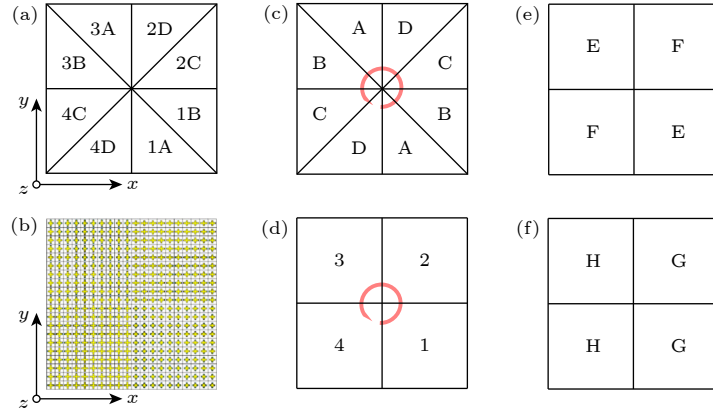


图 4 (a) 各向异性编码超表面编码序列; (b) 各向异性编码超表面示意图; (c), (d)  $\text{VO}_2$  为绝缘态,  $x$  极化波 (c) 与  $y$  极化波 (d) 垂直入射时的编码序列; (e), (f)  $\text{VO}_2$  为金属态,  $x$  极化波 (e) 与  $y$  极化波 (f) 垂直入射时的编码序列

Fig. 4. (a) Anisotropic coding metasurface coding sequences; (b) diagram of anisotropic coding metasurface; (c), (d)  $\text{VO}_2$  is insulating state, the coding sequence when the  $x$ -polarized wave (c) and  $y$ -polarized wave (d) are incident vertically; (e), (f)  $\text{VO}_2$  is metallic state, the coding sequence when the  $x$ -polarized wave (e) and  $y$ -polarized wave (f) are incident vertically.

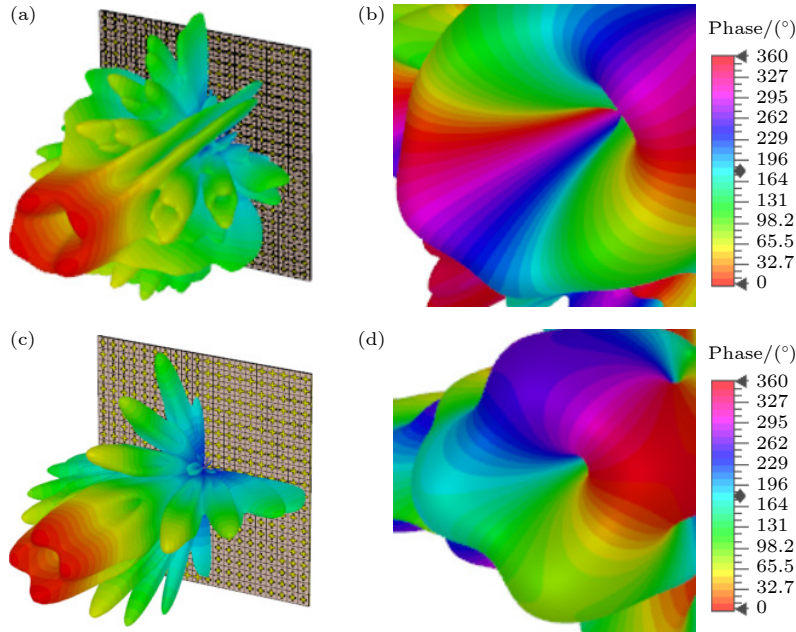


图 5 模式  $l=2$  的涡旋波 (a) 远场方向图; (b) 相位图. 模式  $l=1$  的涡旋波 (c) 远场方向图; (d) 相位图

Fig. 5. Vortex beam with mode  $l=2$ : (a) Far-field diagram; (b) phase diagram. Vortex beam with mode  $l=1$ : (c) Far-field diagram; (d) phase diagram.

如图 5(c) 和图 5(d) 所示, 此时光强分布依旧满足涡旋波特性, 相位覆盖为  $360^\circ$ , 符合模式  $l=1$  的涡旋波特性.

$\text{VO}_2$  为金属态时, 沿着  $z$  轴负方向垂直入射频率为 1 THz 的正交极化波到图 4(a) 所示的编码序列排列的编码超表面. 对于  $x$  极化波入射的情况, 编码序列如图 4(e) 所示, 其远场方向图如图 6(a) 所示, 垂直入射的光束被反射到四个对称的方向上, 产生了对称的四束反射波; 对于  $y$  极化波入射

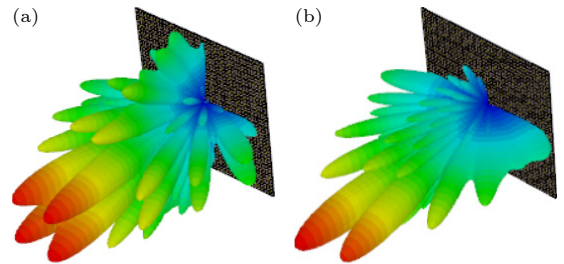


图 6 (a) 对称的 4 束反射波; (b) 对称的 2 束反射波

Fig. 6. (a) Symmetrical four-beam reflected wave; (b) symmetrical two-beam reflected wave.

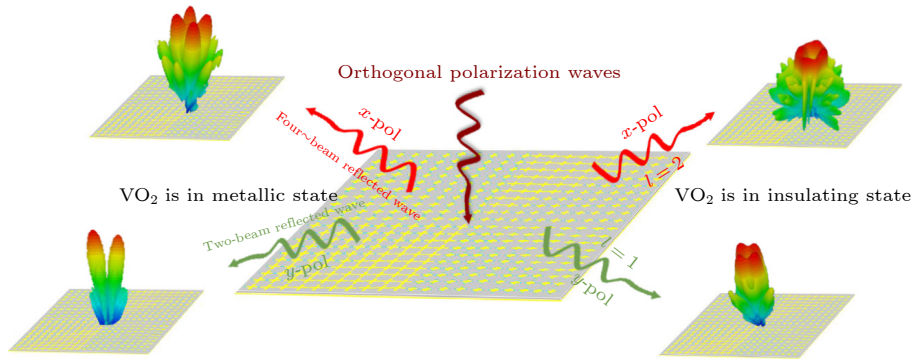


图 7 不同形式的远场波束

Fig. 7. Different forms of far-field beams.

的情况, 编码序列如图 4(f) 所示, 远场方向图如图 6(b) 所示, 垂直入射波束被反射到了沿  $y$  轴对称的两个方向上, 产生了对称的两束反射波.

综上所述, 通过改变设计的编码超表面上  $\text{VO}_2$  的不同状态, 对于同一频率正交极化波的垂直入射, 编码超表面的编码序列发生了改变, 从而远场波束的形式也随之改变. 一共产生了 4 种波束形式在表 2 列出, 相应的远场方向图如图 7 所示, 设计的编码超表面达到了能够灵活调控太赫兹波的目的.

表 2 不同状态下的波束形式  
Table 2. Beam form in different states.

| 正交极化波入射           |              |              |
|-------------------|--------------|--------------|
|                   | $x$ 极化波入射    | $y$ 极化波入射    |
| $\text{VO}_2$ 绝缘态 | $l = 2$ 的涡旋波 | $l = 1$ 的涡旋波 |
| $\text{VO}_2$ 金属态 | 对称的4束反射波     | 对称的2束反射波     |

此外, 表 3 列出了本文与其他利用编码超表面产生多波束方法的比较. 文献 [13, 15] 分别利用各向异性和  $\text{VO}_2$  的相变特性, 在同一编码超表面上均能产生两种形式的波束. 而本文是上述两种方法的有机结合, 因此可以在同一编码超表面上产生 4 种波束形式, 是其两倍. Pan 等 [12] 同样利用各向异性特性, 结合 5 层结构的编码超表面单元设计, 实现了在同一编码超表面上产生 3 种波束形式; 而 Wu 等 [27] 则通过增加编码超表面单元的层数, 利用 8 层结构的单元构成编码超表面, 从而获得了 6 种波束形式. 后两种方法均借助单元层数的增多, 增加所能产生的波束数目, 跟本文相比结构相对复杂, 且实际制作难度较大.

此外, 文献调研表明: 本文所设计的编码超表面可以采用分子束外延法结合金属化工艺等进行

制作, 具有加工可行性 [28,29]. 另外, 由于器件在工艺制作中会存在一定的偏差, 因此需考察工艺偏差对其性能的影响. 依次对编码超表面中十字架结构的参数  $w, X, Y, M, N$  进行误差分析, 使其分别具有  $\pm 1 \mu\text{m}$  的误差. 结果表明, 误差的存在对其性能影响不大 [12,30], 所提器件具有一定的容差性.

表 3 编码超表面的设计方法及性能对比  
Table 3. Design methods and performance comparison of coding metasurface.

| 文献       | $\text{VO}_2$ | 各向异性 | 单元层数 | 波束形式的数目 |
|----------|---------------|------|------|---------|
| [12]     | NO            | YES  | 5    | 3       |
| [13]     | NO            | YES  | 3    | 2       |
| [15]     | YES           | NO   | 3    | 2       |
| [27]     | NO            | NO   | 8    | 6       |
| Our work | YES           | YES  | 3    | 4       |

## 5 结 论

传统的编码超表面一旦设计完成, 对太赫兹波的调控比较单一, 限制了超表面调控太赫兹波的形式. 本文在超表面上将十字架单元结构的各向异性特点与  $\text{VO}_2$  的相变特性相结合, 设计出了新的编码超表面单元, 并且对其编码序列进行合理设计. 通过控制  $\text{VO}_2$  的相变状态, 对于 1 THz 正交极化波垂直入射, 设计的编码超表面能够在  $\text{VO}_2$  相变前后分别产生两种模式的涡旋波和两种形式的反射波, 一共获得了 4 种不同的波束形式. 利用这种新型单元的特殊性质, 进行其他编码序列设计, 也可以产生其他组合形式的波束, 为设计能够灵活调控太赫兹波的编码超表面提供了新方法, 对实现波分复用功能也提供了新思路.

## 参考文献

- [1] Kleine Ostmann T, Nagatsuma T 2011 *J. Infrared Milli. Terahz Waves* **32** 143
- [2] Tonouchi M 2007 *Nature Photon.* **1** 97
- [3] Yang X, Pi Y M, Liu T, Wang H J 2018 *IEEE Sens. J.* **18** 1063
- [4] Yang Q, Qin Y, Zhang K, Deng B, Wang X, Wang H 2017 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **59** 2048
- [5] Nagel M, Haring B P, Brucherseifer M, Kurz H, Bosserhoff A, Büttner R 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 154
- [6] He J W, Dong T, Zhang Y 2020 *Infrared Laser Eng.* **49** 69 (in Chinese) [贺敬文, 董涛, 张岩 2020 红外与激光工程 **49** 69]
- [7] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [8] Cui T J, Qi M Q, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light-sci. Appl.* **3** e218
- [9] Bai Y H, Lü H R, Fu X, Yang Y J 2022 *Chin. Opt. Lett.* **20** 012601 (in Chinese) [白毅华, 吕浩然, 付鑫, 杨元杰 2022 中国光学快报 **20** 012601]
- [10] Huang H F, Xie S H 2021 *OSA Continuum.* **4** 2082
- [11] Li J H, Zhang Y T, Li J N, Li J, Li J T, Zheng C L, Yang Y, Huang J, Ma Z Z, Ma C Q, Hao X R, Yao J Q 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 228101 (in Chinese) [李佳辉, 张雅婷, 李吉宁, 李杰, 李继涛, 郑程龙, 杨悦, 黄进, 马珍珍, 马承启, 郝璇若, 姚建铨 2020 物理学报 **69** 228101]
- [12] Pan Y B, Lan F, Zhang Y X, Zeng H X, Wang L Y, Song T Y, He G J, Yang Z Q 2022 *Photonics Res.* **10** 416
- [13] Liu S, Cui T J, Xu Q, Bao D, Du L L, Wan X, Tang W X, Ouyang C M, Zhou X Y, Yuan H, Ma H F, Jiang W X, Han J G, Zhang W L, Cheng Q 2016 *Light Sci. Appl.* **5** e16076
- [14] Yu S X, Li L, Shi G M 2016 *Appl. Phys. Express* **9** 082202
- [15] Li Z L, Wang W, Deng S X, Qu J, Li Y X, Lü B, Li W J, Gao X, Zhu Z, Guan C Y, Shi J H 2022 *Opt. Lett.* **47** 441
- [16] Li J S, Li S H, Yao J Q 2020 *Opt. Commun.* **461** 125186
- [17] Yasir S, Yang G M, Xu F 2021 *J. Radars* **10** 382 (in Chinese) [Yasir Saifullah, 杨国敏, 徐丰 2021 雷达学报 **10** 382]
- [18] Tang X Y, Ke Y H, Jing X F, Bie X, Li C X, Hong Z 2021 *Acta Photon. Sin.* **50** 150 (in Chinese) [唐小燕, 柯友煌, 井绪峰, 别寻, 李晨霞, 洪治 2021 光子学报 **50** 150]
- [19] Wang H, Ling F, Zhang B 2020 *Opt. Express* **28** 36316
- [20] Li C Q, He C H, Song Z Y 2022 *IEEE Photon. J.* **14** 1
- [21] Yang H H, Cao X Y, Gao J, Li T, Li S J, Cong L L, Zhao X 2021 *J. Radars* **10** 206 (in Chinese) [杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 李桐, 李思佳, 丛丽丽, 赵霞 2021 雷达学报 **10** 206]
- [22] Bai X D 2020 *Results in Phys.* **18** 103334
- [23] Li J S, Chen Y 2022 *Appl. Opt.* **61** 4140
- [24] Yan X, Liang L J, Zhang Y T, Ding X, Yao J Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 158101 (in Chinese) [闫昕, 梁兰菊, 张雅婷, 丁欣, 姚建铨 2015 物理学报 **64** 158101]
- [25] Li J H, Zhang Y T, Li J N, Li J, Yang Y, Huang J, Ma C Q, Ma Z Z, Zhang Z, Liang L J, Yao J Q 2020 *Opti. Commun.* **458** 124744
- [26] Ren Z R, Liu Y Q, Wang Y, Lu L, Qi K N, Yin H C 2022 *IEEE Access* **10** 50479
- [27] Wu L W, Ma H F, Gou Y, Wu R Y, Wang Z X, Xiao Q, Cui T J 2022 *Nanophotonics* **11** 2977
- [28] Feng T Y, Qiu G H, Yan D X, Li J N, Li X J 2022 *Chin. Opt.* **15** 387 (in Chinese) [封覃银, 裘国华, 严德贤, 李吉宁, 李向军 2022 中国光学 **15** 387]
- [29] Liu X B, Wang Q, Zhang X Q, Li H, Xu Q, Xu Y H, Chen X Y, Li S X, Liu M, Tian Z, Zhang C H, Zou C W, Han J G, Zhang W L 2019 *Adv. Opt. Mater.* **12** 1900175
- [30] Zhang Z 2020 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [张璋 2020 博士学位论文 (天津: 天津大学)]



**VO<sub>2</sub> based terahertz anisotropic coding metasurface\***Wang Jing-Li<sup>1)†</sup> Yang Zhi-Xiong<sup>1)</sup> Dong Xian-Chao<sup>1)</sup> Yin Liang<sup>1)</sup>Wan Hong-Dan<sup>1)</sup> Chen He-Ming<sup>2)</sup> Zhong Kai<sup>3)</sup><sup>1)</sup> (*College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)<sup>2)</sup> (*Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)<sup>3)</sup> (*Key Laboratory of the Ministry of Education on Optoelectronic Information Technology, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

( Received 12 November 2022; revised manuscript received 14 February 2023 )

**Abstract**

Terahertz (THz) wave has the advantages of high resolution, large information capacity, easy beam focusing, etc, and can be used in the fields of communication, radar, detection and others. Firstly, as a two-dimensional artificial electromagnetic metamaterial, the coding metasurface is proposed in the microwave band. It uses the digital coding of the electromagnetic wave phase to adjust electromagnetic waves. Subsequently, as an important way to regulate THz, the metasurface extends to terahertz frequency band and becomes a research hotspot. In this paper, we design a coding metasurface based on vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>) with anisotropic characteristics. It is composed of three layers, with a metal cross structure embedded in VO<sub>2</sub> at the top, polyimide in the middle, and pure metal at the bottom. The design of the cross shaped structure makes the coding metasurface unit anisotropic, which can provide complete and independent control of the orthogonally linearly polarized incident waves. The pure metal structure at the bottom can provide higher reflection amplitude for the incident wave. And VO<sub>2</sub> is introduced into the coding metasurface. As a phase change material, VO<sub>2</sub> can switch its properties between the insulating state and the metallic state, which further increases the flexibility of coding metasurface to regulate THz wave. Eight different coding metasurface units are designed in this work. They can be arranged according to a reasonable coding sequence to form a coding metasurface, which consists of 20×20 metasurface units with an overall size of 2.4 mm × 2.4 mm. Its coding sequence will be changed with the phase of VO<sub>2</sub>, thus forming a corresponding 1 bit or 2 bit coding metasurface, and the generated beam form changes accordingly. The finite-difference time domain method is used for modeling and implementing simulation, and the results are as follows. The 1-THz orthogonal linearly polarized wave is vertically incident on the coding metasurface. When VO<sub>2</sub> is in the insulating state, the designed metasurface can be regarded as an anisotropic 2 bit coding metasurface to generate dual-polarization orbital angular momentum (OAM) vortex beams. The *x*-polarized vortex wave has an OAM mode number of 2, and the *y*-polarized vortex wave possesses an OAM mode number of 1. When VO<sub>2</sub> is in the metallic state, the designed metasurface can be regarded as an anisotropic 1 bit coding metasurface to generate dual-polarization symmetrical beams. Four reflected waves are generated by incident *x*-polarized waves, and two reflected waves are created by incident *y*-polarized waves. The proposed method of combining anisotropy material and phase change material realizes the function of generating multiple THz beams in different forms on the same metasurface. The present results provide a reference for the implementation of multi-functional coding metasurface that can be flexibly applied to multiple scenes.

**Keywords:** terahertz, coding metasurface, VO<sub>2</sub>, anisotropy**PACS:** 42.79.-e, 42.82.-m**DOI:** 10.7498/aps.72.20222171

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12174199, 61571237), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant Nos. BK20221330, BK20151509), and the Horizontal Program of Research on Multifunctional Terahertz Antenna, China (Grant No. 2021external323).

† Corresponding author. E-mail: [jlwang@njupt.edu.cn](mailto:jlwang@njupt.edu.cn)

## 基于VO<sub>2</sub>的太赫兹各向异性编码超表面

汪静丽 杨志雄 董先超 尹亮 万洪丹 陈鹤鸣 钟凯

### VO<sub>2</sub> based terahertz anisotropic coding metasurface

Wang Jing-Li Yang Zhi-Xiong Dong Xian-Chao Yin Liang Wan Hong-Dan Chen He-Ming Zhong Kai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 124204 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222171

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222171>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于VO<sub>2</sub>的波束可调太赫兹天线

Beam steerable terahertz antenna based on VO<sub>2</sub>

物理学报. 2022, 71(18): 188703 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220817>

#### 基于二氧化钒的太赫兹编码超表面

Terahertz coding metasurface based vanadium dioxide

物理学报. 2020, 69(22): 228101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200891>

#### 太赫兹频率编码器

Terahertz frequency coding metasurface

物理学报. 2019, 68(10): 104203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190032>

#### 基于石墨烯编码超构材料的太赫兹波束多功能动态调控

Dynamic multifunctional control of terahertz beam based on graphene coding metamaterial

物理学报. 2018, 67(11): 118102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180125>

#### 基于反射超表面产生太赫兹涡旋波束

Terahertz vortex beam generation based on reflective metasurface

物理学报. 2019, 68(23): 238101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191055>

#### 强磁场在ZnCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>中诱导的各向异性太赫兹共振吸收

Anisotropic resonance absorptions induced by high magnetic field in ZnCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>

物理学报. 2020, 69(20): 207501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201507>