

基于二氧化钒超材料的太赫兹波相位动态调控

崔琦, 陈哲*, 王岩

云南大学信息学院, 云南 昆明 650000

摘要 基于二氧化钒,提出了一种可以动态调控太赫兹波相位的复合超材料结构。仿真模拟结果表明:当二氧化钒由绝缘态相变为金属态时,结构可以在 1.15~1.65 THz 带宽范围内实现超过 140°的相移。通过引入多极子散射功率的计算,结合谐振中心频率处的电场和表面电流分布,深入研究了相移产生的物理机制。所提出的结构具有应用于太赫兹无线通信、传感以及太赫兹安检成像等领域的潜力。

关键词 材料; 太赫兹; 超材料; 相位调控; 可调谐; 二氧化钒

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0314001

1 引言

太赫兹(terahertz, THz)波是指频率范围位于红外和微波波段之间的电磁波,由于其独特的特性,在包括生物成像、雷达和宽带通信等领域中有着广泛的应用^[1-3]。超材料(metamaterial)是一种人工介质材料,它可以有效克服“太赫兹间隙”,进而推动太赫兹的应用^[4-5]。因此,利用超材料设计控制太赫兹波的基本装置如吸收器^[6-7]、滤波器^[8-9]和相位调制器^[10-11]等引起了人们越来越多的关注。

在上述器件中,太赫兹相位调制器件在无线通信、生物成像等领域具有广阔的发展前景,已经成为最重要的太赫兹波调控器件之一。2009年,Peralta等^[12]提出了一种太赫兹相位调制装置,该装置利用结构的极化敏感特性,在 0°~90°极化角入射条件下实现了 1 THz 处接近 60°的最大相移。2009年,Chen等^[13]提出了一种电控太赫兹相位调制器,通过控制外加电压,实现了 0.89 THz 处超过 33°的最大相移。随着石墨烯^[14-15]、二氧化钒^[16-18]等可调谐材料在太赫兹波调控装置中的出现,基于复合超材料的太赫兹相位调制结构有了更广泛的设计思路。二氧化钒作为一种相变材料,在外加热^[17]、电^[18]或

光激励^[19]下会发生从绝缘态到金属态的可逆转变,这就为太赫兹复合超材料器件大范围的动态调谐提供了可能。2018年,Zhao等^[19]给出了一种利用二氧化钒作为调控开关的相位调制器,通过控制二氧化钒的电导率,器件在 0.05 THz 的带宽内实现了接近 138°的最大相移量。2020年,Zhang等^[20]同样利用二氧化钒作为调控开关,提出了一种金属棒与开口方环结构组合的太赫兹相位调控装置,装置在 0.1 THz 的带宽内实现了接近 120°的相移。

基于三维电磁仿真(electromagnetic simulation, EM simulation)电场和表面电流研究超材料物理机制较为普遍,但具体的电磁问题较为复杂,通过多极子散射功率(power scattered by multipoles)^[21]可以进一步印证三维电磁仿真得到的结论。

本文基于二氧化钒超材料,实现了对太赫兹波相位的动态调控,采用分析电场与表面电流分布的方法,解释了相位动态调控的物理机制,并通过计算多级子散射功率进行了印证。当二氧化钒由绝缘态相变到金属态时,结构在 0.5 THz 的范围内产生了超过 140°的相移,最大相移量为 142°。为了证明其动态可调性,本文还给出了当二氧化钒电导率由 $\sigma = 1 \times 10^3$ S/m 变化到 $\sigma = 1 \times 10^4$ S/m 时的相位

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-06-09; 录用日期: 2021-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(62061051)、云南省基础研究计划(202001BB050056, 202101AT070187)、云南省光电信息技术重点实验室开放基金(YNOE-2018-02)、云南大学“东陆中青年骨干教师”培养计划(C176220200)

通信作者: *zhechen@ynu.edu.cn

变化。此时,结构在 0.51 THz 的范围内得到了超过 50° 的相移。

2 结构与方法

图 1 展示了所设计的基于二氧化钒的复合超材料太赫兹相位调制结构的单元结构以及结构中具体的参数分布。超材料的周期性单元的三维立体结构以及俯视图和侧视图如图 1 所示。首先如图 1(a) 所示,入射的平面波光源垂直于器件表面,其中 \mathbf{E} 为入射波电场强度, \mathbf{H} 为入射波磁场强度, \mathbf{k} 为自由空间的波矢,结构周期长为 $P=50\ \mu\text{m}$,宽为 $P_1=55\ \mu\text{m}$ 。该结构主要分为两层:无损的二氧化硅组成介质层,金属环与数条金属棒以及开口处的二氧化钒组成谐振层,这里金属材料选择有损耗的金,其电导率为 $\sigma_{\text{gold}}=4.56\times 10^7\ \text{S/m}$,圆环开口处的二氧化钒作为调谐“开关”。顶部由金构成的谐振层部分的厚度为 $t_s=1\ \mu\text{m}$,谐振层另一组成部分二氧化钒的厚度为 $t_g=0.5\ \mu\text{m}$ 。由无损的二氧化硅构成的下部介质层的厚度为 $t_m=3\ \mu\text{m}$,相对介电常数为 $\epsilon_d=3.9$ 。此外,如图 1(b) 所示,顶部谐振层中长金属棒的宽为 $W_1=2.5\ \mu\text{m}$,连接开口圆环的金属棒长度为 $W=23\ \mu\text{m}$ 。开口圆环结构的外半径为

$9\ \mu\text{m}$,宽度为 $W_2=2\ \mu\text{m}$,开口处方形二氧化钒的边长为 $W_3=2\ \mu\text{m}$,圆环结构中间的金属棒边长为 $W_4=6\ \mu\text{m}$ 。

由于二氧化钒是一种特殊的相变材料,为了更精准地模拟其特性,在太赫兹频段范围内,二氧化钒的相对介电常数可以用 Drude 模型^[18-19]导出:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2(\sigma)}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (1)$$

式中: σ 为设置的二氧化钒电导率; ω 为入射波的角频率; 二氧化钒材料的高频介电常数为 $\epsilon_\infty=12$; $\omega_p(\sigma)$ 为依赖于二氧化钒电导率的等离子体频率; 碰撞频率 $\gamma=5.75\times 10^{13}\ \text{rad/s}$ 。其中, σ 和 $\omega_p(\sigma)$ 与自由载流子的密度成正比。 $\omega_p(\sigma)$ 可以近似表示为 $\omega_p^2(\sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_0} \omega_p^2(\sigma_0)$, 其中 $\sigma_0=3\times 10^5\ \text{S/m}$, $\omega_p(\sigma_0)=1.4\times 10^{15}\ \text{rad/s}$ 。二氧化钒的相变过程受外加热^[17]、电^[18]或光激励^[19]影响。当处于室温环境下时,二氧化钒处于绝缘态,在仿真中将二氧化钒的电导率设为 $\sigma=10\ \text{S/m}$ 。当温度增加至 $68\ ^\circ\text{C}$ 时,二氧化钒将经历绝缘态-金属态的相变过程,电导率也会增加。当二氧化钒完全转变为金属态时,将二氧化钒的电导率设置为 $\sigma=2\times 10^5\ \text{S/m}$ ^[22]。

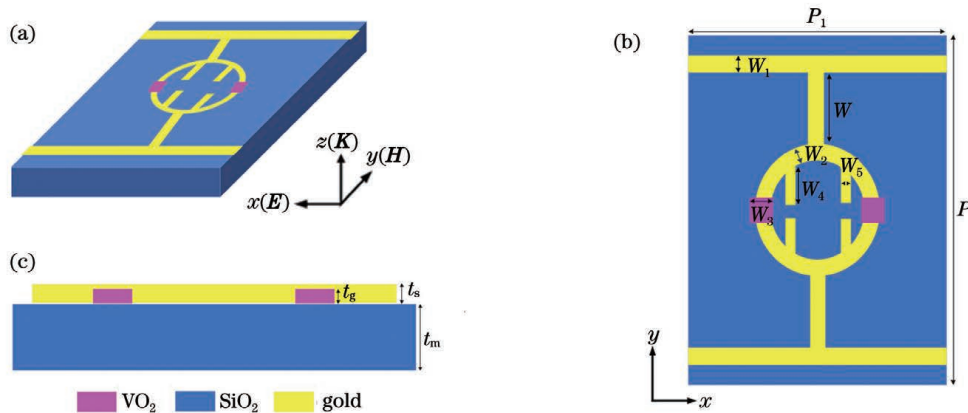


图 1 超材料相位调制单元的结构示意图。(a) 三维示意图;(b) 顶层结构图;(c) 二维示意图

Fig. 1 Structural diagrams of metamaterial phase modulation unit. (a) Three-dimensional diagram; (b) top structure diagram; (c) two-dimensional diagram

为了对所提出的基于二氧化钒超材料的太赫兹相位调控结构的光学特性进行研究,本文使用商业软件 CST Microwave Studio 对结构进行了仿真计算。在计算中,利用基于频域的有限元法(FEM),并使用自适应网格与局部网格细化提高数值仿真的精度。在 z 方向上选择开放性的边界条件,在 x 和 y 方向上选择周期性的边界条件。通过仿真模拟,可以得到在不同二氧化钒电导率下,相位调制结构

透射系数的相位曲线和幅度曲线,从而对结构的光学特性展开研究。

3 分析与讨论

在垂直于结构表面的入射电磁波下,通过数值仿真得到的所设计相位调制结构在不同电导率下的透射系数 S_{21} 的幅度曲线如图 2 所示。当二氧化钒处于绝缘态且其电导率设置为 $\sigma=10\ \text{S/m}$ 时,在仿

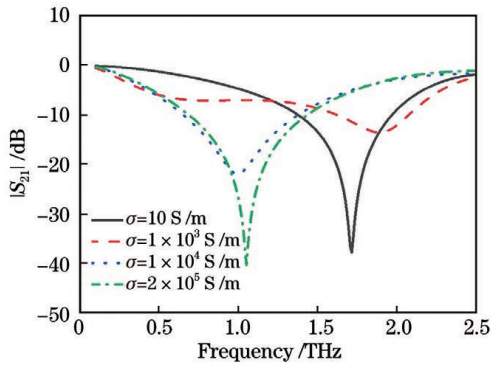


图 2 不同二氧化钒电导率下透射系数的幅度光谱
Fig. 2 Amplitude spectra of transmission coefficient under different vanadium dioxide conductivities

真区间内(0.1~2.5 THz), 1.71 THz 处产生了一个较强的谐振,其谐振点处的幅值为-38 dB。当二氧化钒的电导率变为 $\sigma=1 \times 10^3$ S/m 时,其谐振强度减小,谐振点处的幅值增大为-13 dB,中心频率变化为 1.88 THz。当二氧化钒电导率进一步增加,直至 $\sigma=1 \times 10^4$ S/m 时,谐振的中心频率明显红移,其谐振点处的幅值变为-21 dB,中心频率为 0.99 THz。最后,当二氧化钒处于金属态且电导率为 $\sigma=2 \times 10^5$ S/m 时,其谐振点处的幅值变为-40 dB,中心频率为 1.05 THz。对比整个仿真区

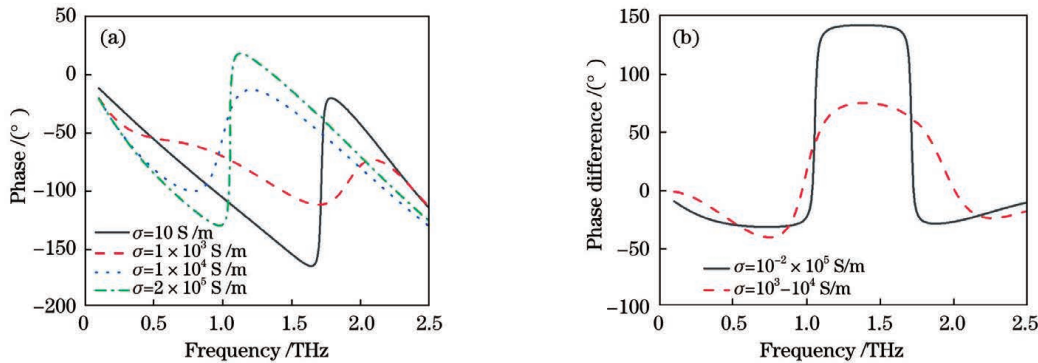


图 3 不同电导率下结构的相位光谱与相位差值图。(a)相位光谱;(b)相位差值图

Fig. 3 Phase spectra and phase difference graphs of structure under different conductivities. (a) Phase spectra; (b) phase difference graphs

为了探究相移产生的物理机制,本文还绘制了结构中谐振点处的电场和表面电流分布图。在超材料结构中,外加场的作用会在内部激励出电荷密度或者电流密度,其远场的响应可以等效为五种最强电/磁多极响应,进而对结构产生影响^[24-25],引起谐振的产生。所以,通过计算多级散射功率,对引发的

间内二氧化钒电导率的变化过程,可以明显发现,谐振强度经历了先减小后增大的过程,而谐振的中心频率也逐渐红移,并且电导率 $\sigma=10$ S/m 时所产生的谐振与 $\sigma=2 \times 10^5$ S/m、 $\sigma=1 \times 10^3$ S/m 与 $\sigma=1 \times 10^4$ S/m 时所产生的谐振存在强度相似、中心频率规律变化的特点,由 Kramers-Kronig 关系^[19]可知,此时的相位跳变量和中心频率也存在相应的变化,这就为相移量的动态调控提供了可能。

为了进一步展示结构中相位的动态可调性,二氧化钒电导率变化过程中透射系数的相位曲线和相位差值如图 3(a)和 3(b)所示。可以看到,当二氧化钒由绝缘态变化到金属态时,在透射模式下,结构在 1.15~1.65 THz 的范围内产生了超过 140°的相移,其最高相移量约为 142°。为了证明相位的连续可调性,以二氧化钒处于相变过程中的电导率为例,当电导率由 $\sigma=1 \times 10^3$ S/m 变化到 $\sigma=1 \times 10^4$ S/m 时,结构在 1.17~1.68 THz 的范围内得到了超过 50°的相移,这意味着通过二氧化钒的相变过程,结构可以实现相位连续的动态可调效果,并且相对带宽近乎不变。结构中二氧化钒的相变过程能够在极短的时间内完成,并且在反复的相变过程中,二氧化钒的相变特性不会损坏^[22-23]。

五种最强多极子的强度进行分析评估,可以判断多极在结构谐振中的作用,进而印证电场电流图中对谐振产生机制的判断。通过将电场和表面电流分布图与多级散射功率的计算结果进行对比,相移产生的物理机制可以得到进一步的印证。

电磁多极矩计算公式^[24-25]如下。

电偶极矩:

$$\mathbf{P} = \frac{1}{i\omega} \int \mathbf{j} d^3 r, \quad (2)$$

$$\text{磁偶极矩: } \mathbf{M} = \frac{1}{2c} \int (\mathbf{r} \times \mathbf{j}) d^3 \mathbf{r}, \quad (3)$$

$$\text{环偶极矩: } \mathbf{T} = \frac{1}{2c} \int [(\mathbf{r} \cdot \mathbf{j}) \mathbf{r} - 2r^2 \mathbf{j}] d^3 \mathbf{r}, \quad (4)$$

$$\text{电四极矩: } \mathbf{Q}_{\alpha, \beta}^e = \frac{1}{i2\omega} \int [r_{\alpha} j_{\beta} + r_{\beta} j_{\alpha} - \frac{2}{3} (\mathbf{r} \cdot \mathbf{j}) \delta_{\alpha, \beta}] d^3 \mathbf{r}, \quad (5)$$

$$\text{磁四极矩: } \mathbf{Q}_{\alpha, \beta}^m = \frac{1}{3c} \int [(\mathbf{r} \times \mathbf{j})_{\alpha} r_{\beta} + (\mathbf{r} \times \mathbf{j})_{\beta} r_{\alpha}] d^3 \mathbf{r}, \quad (6)$$

式中： \mathbf{j} 为仿真中提取的位移电流； \mathbf{j}_{α} 和 \mathbf{j}_{β} 分别为笛卡儿坐标系下 α 与 β 部分的位移电流； c 和 ω 分别为真空中光的速度和角频率； \mathbf{r} 为位置矢量； \mathbf{r}_{α} 和 \mathbf{r}_{β} 分别为笛卡儿坐标系下 α 与 β 部分的位置矢量； $\delta_{i,j}$ 为克罗内克函数，其中下标 i 和 j 分别遍历笛卡儿坐标 α, β, γ 。将(2)~(6)式输入到仿真软件中，借助后处理模块提取各项变量在结构中的具体数据，本文对五种多极子的电磁多极矩进行了计算。通过得到的五种电磁多极矩，可以进一步计算出五种多极子的多极子散射功率^[25]。结构中，在外加场激励下等效的五种最强多极子分别是电偶极子 \mathbf{P} 、磁偶极子 \mathbf{M} 、环形偶极子 \mathbf{T} 、电四极子 \mathbf{Q}^e 、磁四极子 \mathbf{Q}^m 。由于是在笛卡儿坐标系下进行分析计算的，因此 $\alpha, \beta, \gamma = x, y, z$ 。

当二氧化钒电导率为 $\sigma = 10 \text{ S/m}$ 时，其谐振中心频率 1.71 THz 处的表面电流分布图(箭头表示方向)和电场图如图 4(a)、5(a)、6(a)所示。首先，

如图 4(a)所示，结构中心频率处的表面电流主要集中于上下两金属杆中和圆环开口处，其中上下金属棒中的表面电流强度较高，具有明显的电偶极子特征^[25]。圆环开口处的表面电流分布与上下金属棒中的表面电流分布不同。因此，为了进一步观察圆环开口处的表面电流分布，放大后的圆环处的表面电流分布图如图 5(a)所示，可以看到，金属棒与圆环内壁出现明显的环状电流，其具有明显的磁偶极子特征。如图 6(a)所示，结构中的电场主要集中于金属长杆与圆环开口处。由此可以初步判断，在入射电磁波的激励下，正负诱导电荷在超材料结构的两侧积累，进而在结构中产生电偶极子，而圆环开口处由于环向电流的产生，磁偶极子被激发，电偶极子与磁偶极子的共同作用激发了谐振层对入射电磁波的影响。在谐振中心频率处，谐振层对太赫兹波产生强烈的吸收或反射，从而引发偶极子共振^[25]。如图 7(a)所示，通过计算二氧化钒电导率为 10 S/m

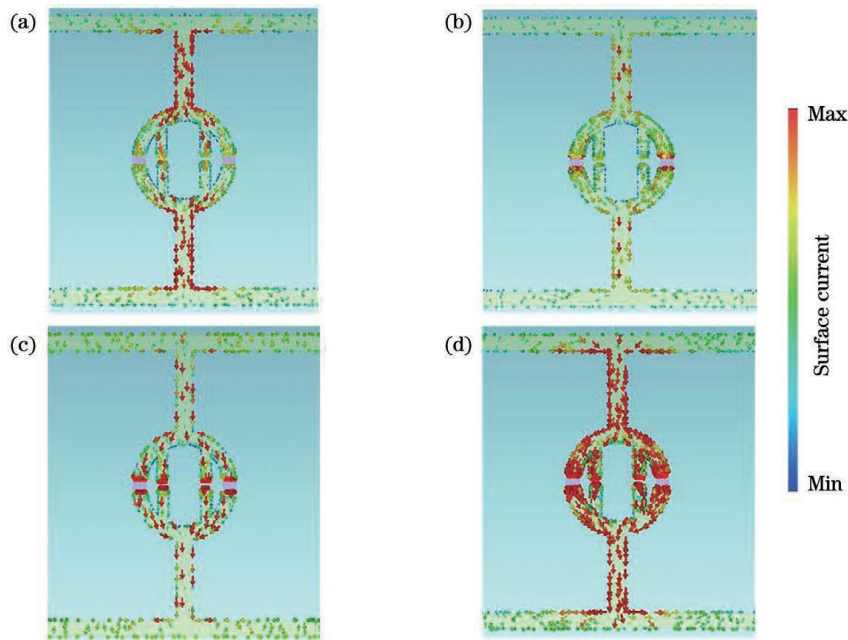


图 4 不同二氧化钒电导率下结构的表面电流分布图。(a) 10 S/m; (b) $1 \times 10^3 \text{ S/m}$; (c) $1 \times 10^4 \text{ S/m}$; (d) $2 \times 10^5 \text{ S/m}$
 Fig. 4 Surface current distributions of structure under different vanadium dioxide conductivities. (a) 10 S/m; (b) $1 \times 10^3 \text{ S/m}$; (c) $1 \times 10^4 \text{ S/m}$; (d) $2 \times 10^5 \text{ S/m}$

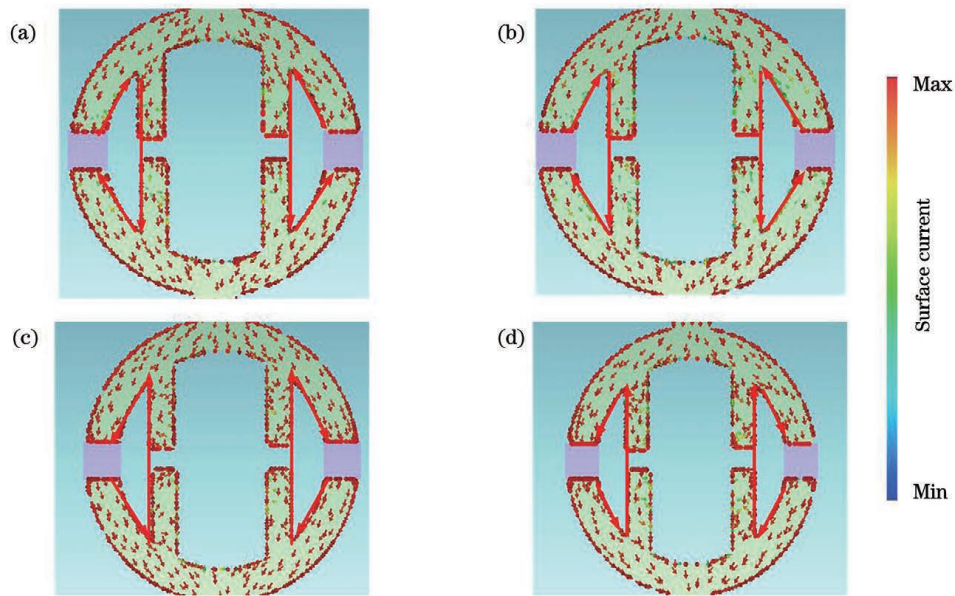


图 5 不同二氧化钒电导率下圆环结构中的表面电流分布图。(a) 10 S/m; (b) 1×10^3 S/m; (c) 1×10^4 S/m; (d) 2×10^5 S/m

Fig. 5 Surface current distributions in ring structure under different vanadium dioxide conductivities. (a) 10 S/m; (b) 1×10^3 S/m; (c) 1×10^4 S/m; (d) 2×10^5 S/m

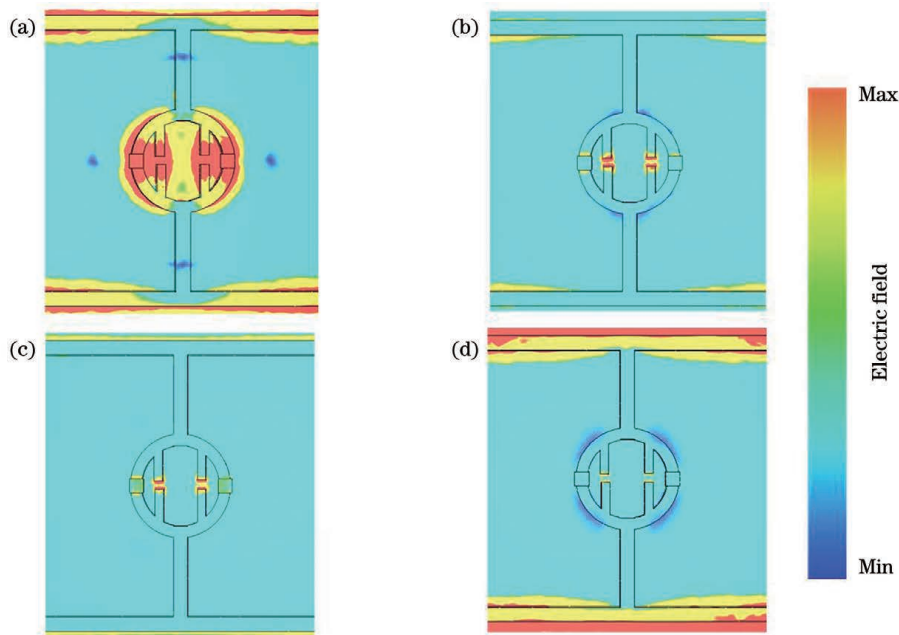


图 6 不同二氧化钒电导率下结构的电场分布图。(a) 10 S/m; (b) 1×10^3 S/m; (c) 1×10^4 S/m; (d) 2×10^5 S/m

Fig. 6 Electric field distributions of structure under different vanadium dioxide conductivities. (a) 10 S/m; (b) 1×10^3 S/m; (c) 1×10^4 S/m; (d) 2×10^5 S/m

时的多级散射功率,可以看到,在谐振中心频率 1.71 THz 处,电偶极子和磁偶极子的多级散射功率较其他多极子大 2~4 个数量级,因此可以判断其他多极子的激发并不会影响占主导地位的电偶极子和磁偶极子,结构中的谐振主要是由电偶极子和磁偶极子引起的。这一判断与由表面电流分布图和电

场图得出的结论相同。进一步观察,电偶极子的多级散射功率与磁偶极子的多级散射功率相差不到一个数量级,这一现象也符合由表面电流分布图得到的结论。

当二氧化钒电导率增大为 $\sigma = 1 \times 10^3$ S/m 时,如图 4(b) 所示,谐振中心频率 1.88 THz 处表面电

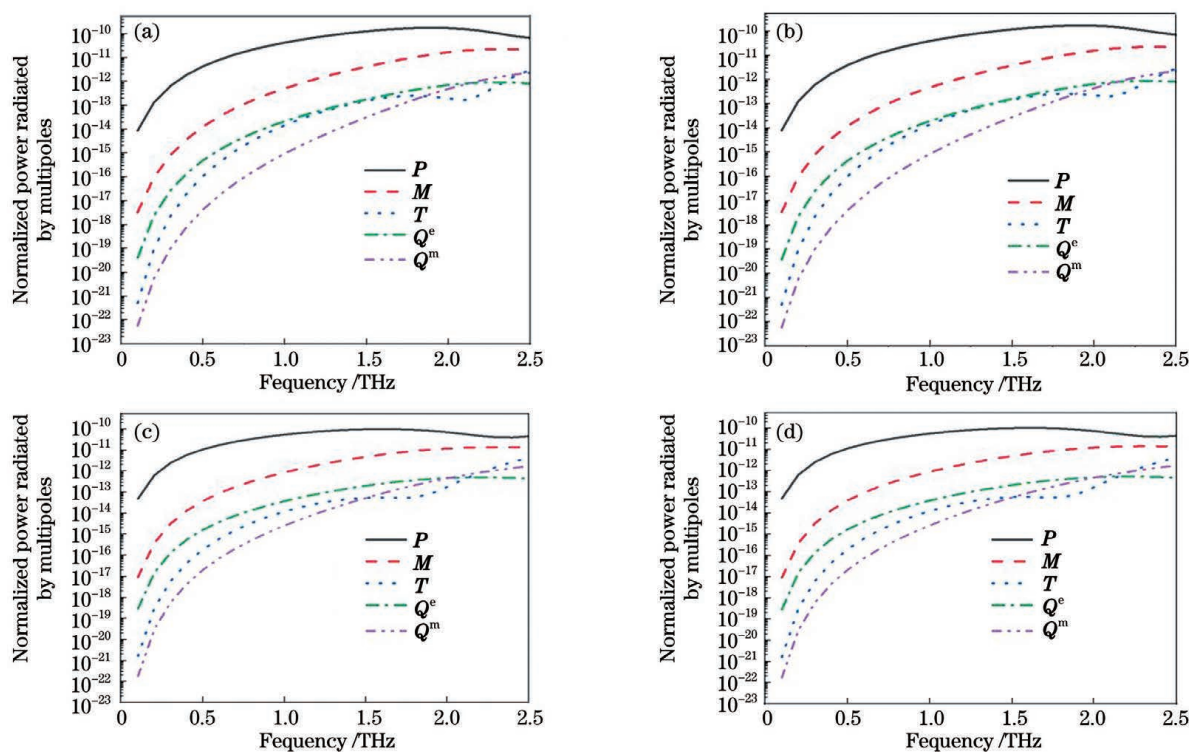


图 7 不同二氧化钒电导率下结构的多级散射功率图。(a) 10 S/m ; (b) $1 \times 10^3 \text{ S/m}$; (c) $1 \times 10^4 \text{ S/m}$; (d) $2 \times 10^5 \text{ S/m}$
 Fig. 7 Multipole scattering power plots of structure under different vanadium dioxide conductivities. (a) 10 S/m ;
 (b) $1 \times 10^3 \text{ S/m}$; (c) $1 \times 10^4 \text{ S/m}$; (d) $2 \times 10^5 \text{ S/m}$

流的强度相比于二氧化钒电导率为 $\sigma = 10 \text{ S/m}$ 时明显减弱,但表面电流仍聚集于上下金属棒中,电偶极子特征仍较为明显。如图 5(b)所示,同样放大观察圆环开口处的表面电流分布,其磁偶极子特征并没有消失。如图 6(b)所示,可以看到,结构中电场的分布相较于电导率为 $\sigma = 10 \text{ S/m}$ 时几乎没有变化,但是电场强度明显减弱。由表面电流分布图和电场图得出的结果符合二氧化钒电导率变化过程中透射系数幅度和相位的变化规律。除此之外,多级散射功率的计算结果同样印证了结构中电偶极子和磁偶极子的出现,如图 7(b)所示,在 1.88 THz 谐振中心频率处,电偶极子和磁偶极子的多级散射功率仍较其他多极子大 $2 \sim 4$ 个数量级,且此时磁偶极子的多级散射功率与电偶极子的多级散射功率相差不到 0.5 个数量级,证明在这一变化过程中,谐振的偶极子主导地位并没有改变,仍是电偶极子与磁偶极子的共同作用,且磁偶极子的作用明显增强。

当二氧化钒电导率变为 $\sigma = 1 \times 10^4 \text{ S/m}$ 时,圆环外开口处向金属态转变的二氧化钒将逐渐连通整个开口。如图 4(c)所示,结构中表面电流的整体流向趋势是自上而下,电偶极子特征明显,且开口处的环状电流依然存在。如图 5(c)所示,可以看到,相

比于绝缘态下的环状表面电流,由于二氧化钒将圆环开口处连通,此时环状表面电流的流向与之前相反,但其明显的磁偶极子特征并没有变化。观察图 6(c)所示的电场图,可以看到,电场主要集中于金属长杆与圆环内开口处,此时的电场强度与二氧化钒电导率为 $\sigma = 1 \times 10^3 \text{ S/m}$ 时的强度大致相似,这就证明二者的谐振强度大致相仿,这与幅度曲线和相位曲线中的结论相同。多级散射功率的计算结果如图 7(c)所示,在谐振中心频率 0.99 THz 处,电偶极子的多级散射功率和磁偶极子的多级散射功率仍较其他多极子大 $2 \sim 4$ 个数量级,但相较于绝缘态,此时电偶极子和磁偶极子之间的多级散射功率差值较大,接近 1.5 个数量级,这说明此时结构中的谐振仍是由电偶极子和磁偶极子主导的,但磁偶极子的影响已经大大减弱。

最后当二氧化钒完全转变为金属态时,如图 4(d)、5(d)、6(d)、7(d)所示,相较于二氧化钒电导率为 $\sigma = 1 \times 10^4 \text{ S/m}$ 时,结构中表面电流的强度、流向和电场的分布几乎没有发生改变,但表面电流和电场的强度明显增加,这对应于透射系数中谐振强度的增强、相位跳变量的增大,并且强度与二氧化钒处于绝缘态时近乎相同。此时结构的多级散射功

率计算结果如图 7(d) 所示,在谐振中心频率 1.05 THz 处,电偶极子和磁偶极子的多极散射功率较其他多极子大 2~4 个数量级,但与二氧化钒电导率为 $\sigma=1 \times 10^4$ S/m 时相比,磁偶极子与电偶极子的多极散射功率差值减小。此时,在二者的共同作用下,磁偶极子的作用再次开始增强。

综上所述,多极子散射功率的计算结果显示,由电场和表面电流分布图得到的结论与多级子散射功率计算结果相互印证,即:在二氧化钒的相变过程中,在相移带宽内,电偶极子与磁偶极子始终占据主导地位,结构中的谐振是由电偶极子与磁偶极子引起的,通过二者的相互作用,结构实现了相移量的产生和相移量的动态调谐。

最后为了考虑实际中的应用,对所提结构的角度依赖性进行了讨论。如图 8 所示,当入射角从 0° 增加至 80° 时,结构的调制带宽从 40° 附近开始减小。在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 的宽入射角范围内,所提超材料相位调制结构能够保持相对稳定的调制带宽。

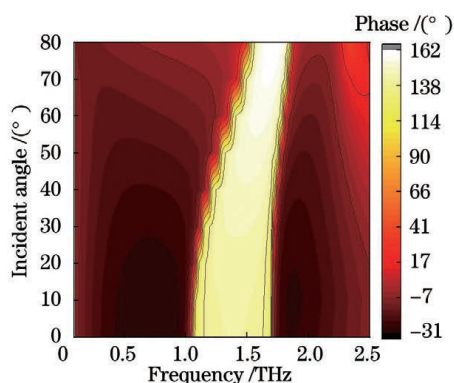


图 8 不同入射角下结构的相位差值图

Fig. 8 Phase difference graphs of structure under different incident angles

4 结 论

为了对透射太赫兹波进行相位动态调控,设计并理论证明了一种基于二氧化钒的太赫兹相位动态调控结构。数值仿真结果表明,在二氧化钒由绝缘态相变到金属态的过程中,结构在 1.15~1.65 THz 带宽范围内产生了超过 140° 的相移,最大相移量为 142° 。除此之外,在相变过程中,结构还在 1.17~1.68 THz 的范围内得到了超过 50° 的相移。这种相位变化可以动态调控,且调控过程中相对带宽变化不大。最后,利用谐振中心频率处的电场和表面电流分布,解释了所提结构产生相移的物理机制,并通过计算多极子散射功率对其进行了印证。

参 考 文 献

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] Rappaport T S, Xing Y C, Kanhere O, et al. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond[J]. IEEE Access, 2019, 7: 78729-78757.
- [3] Chen Z, Zhang B, Zhang Y, et al. 220 GHz outdoor wireless communication system based on a Schottky-diode transceiver [J]. IEICE Electronics Express, 2016, 13(9): 20160282.
- [4] Cai Y J, Xu K D, Feng N X, et al. Anisotropic infrared plasmonic broadband absorber based on graphene-black phosphorus multilayers [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3101-3112.
- [5] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, et al. Design, theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging [J]. Physical Review B, 2009, 79(12): 125104.
- [6] Li D M, Yuan S, Yang R C, et al. Dynamical optical-controlled multi-state THz metamaterial absorber [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0816001.
李达民, 袁苏, 杨荣草, 等. 动态光调控多态太赫兹超材料吸收器 [J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0816001.
- [7] Song Z, Wang K, Li J, et al. Broadband tunable terahertz absorber based on vanadium dioxide metamaterials [J]. Optics Express, 2018, 26(6): 7148-7154.
- [8] Zhu D W, Zeng R M, Tang Z T, et al. Design of multiband filter based on spoof surface plasmon polaritons [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 172401.
朱登玮, 曾瑞敏, 唐泽恬, 等. 基于人工表面等离子体激元的多频带滤波器设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 172401.
- [9] Gao W, Wang J Y, Wu Q N. Design and investigation of a metamaterial terahertz broadband bandpass filter based on dual metallic rings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0516001.
高万, 王建扬, 吴倩楠. 基于双金属环的超材料太赫兹宽频带通滤波器的设计与研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0516001.
- [10] Manceau J M, Shen N H, Kafesaki M, et al. Dynamic response of metamaterials in the terahertz regime: blueshift tunability and broadband phase modulation [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(2): 021111.

- [11] Urade Y, Nakata Y, Okimura K, et al. Dynamically Babinet-invertible metasurface: a capacitive-inductive reconfigurable filter for terahertz waves using vanadium-dioxide metal-insulator transition[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 4405-4410.
- [12] Peralta X G, Smirnova E I, Azad A K, et al. Metamaterials for THz polarimetric devices[J]. *Optics Express*, 2009, 17(2): 773-783.
- [13] Chen H T, Padilla W J, Cich M J, et al. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(3): 148-151.
- [14] Yuan Y H, Chen X Y, Hu F R, et al. Terahertz amplitude modulator based on metasurface/ion-gel/graphene hybrid structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614016.
袁莹辉, 陈懿宇, 胡放荣, 等. 基于人工超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调幅器件[J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614016.
- [15] Liu P Q, Luxmoore I J, Mikhailov S A, et al. Highly tunable hybrid metamaterials employing splitting resonators strongly coupled to graphene surface plasmons[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8969.
- [16] Driscoll T, Kim H T, Chae B G, et al. Memory metamaterials[J]. *Science*, 2009, 325(5947): 1518-1521.
- [17] Zhang K, Zhang L, Duan D, et al. Wide band terahertz switch of undulated waveguide with VO₂ film coated inner wall [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4401-4407.
- [18] Leroy J, Crunteanu A, Bessadou A, et al. High-speed metal-insulator transition in vanadium dioxide films induced by an electrical pulsed voltage over nano-gap electrodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(21): 213507.
- [19] Zhao Y C, Zhang Y X, Shi Q W, et al. Dynamic photoinduced controlling of the large phase shift of terahertz waves via vanadium dioxide coupling nanostructures [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(8): 3040-3050.
- [20] Zhang Z J, Yang J B, Han Y X, et al. Actively tunable terahertz electromagnetically induced transparency analogue based on vanadium-oxide-assisted metamaterials [J]. *Applied Physics A*, 2020, 126(3): 1-11.
- [21] Papasimakis N, Fedotov V A, Savinov V, et al. Electromagnetic toroidal excitations in matter and free space [J]. *Nature Materials*, 2016, 15(3): 263-271.
- [22] Stefanovich G, Pergament A, Stefanovich D. Electrical switching and Mott transition in VO₂ [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2000, 12(41): 8837-8845.
- [23] Cavalleri A, Tóth C, Siders C W, et al. Femtosecond structural dynamics in VO₂ during an ultrafast solid-solid phase transition [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(23): 237401.
- [24] Huang Y W, Chen W T, Wu P C, et al. Design of plasmonic toroidal metamaterials at optical frequencies [J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1760-1768.
- [25] Guo L Y. Toroidal dipolar metamaterials and their characteristics [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2016.
郭林燕. 环形偶极子超介质的实现与特性研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2016.

Dynamic Manipulation of Terahertz Wave Phase Based on Vanadium Dioxide Metamaterials

Cui Qi, Chen Zhe^{*}, Wang Yan

School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650000, China

Abstract

Objective With the continuous development of terahertz (THz) technologies, it has been proven that THz technologies have a wide range of applications in the fields such as imaging, wireless communications, and spectroscopy. In order to fulfill the applications of THz technologies in these fields, how to improve the performance of the fundamental devices for manipulating THz waves remains a core technical issue. Among the devices that manipulate THz waves, modulators that can actively control the phases of THz waves are attracting a great deal of attention due to their potential applications in THz communications, imaging, and radar systems. Currently, the emergence of metamaterials provides new possibilities for THz applications. However, towards the future practical

applications of THz systems, there is still possible room of improvement for the metamaterial-based THz phase manipulation. Firstly, the phase change produced by the manipulation device can be further enlarged to meet the requirements of future practical applications. Second, it is highly requirable that the phase tuning process of the device can be relatively simple and flexible. Furthermore, there is a possibility of a further in-depth verification of the physical mechanism interpretation of phase changes. In this study, we report a metamaterial phase manipulation structure designed by the use of vanadium dioxide. It exhibits a good phase change performance with a relatively simple tuning scheme. The phase can be continuously and dynamically tuned through an external excitation. The multipole scattering power theory is employed to further validate the physical mechanism interpretation of phase changes. It is hoped that this research and design can be helpful for promoting the applications of THz technologies in the fields of wireless communications, sensing, and security imaging.

Methods The structure proposed in this study adopts a composite metamaterial structure incorporating gold and vanadium dioxide. The vanadium dioxide is placed on the gap structure of the gold acting as a connection "switch" to control the phase change in the structure. The performance of the designed structure is simulated by the use of the commercial software CST Microwave Studio based on the frequency domain finite element method (FEM). The transmission spectra both in the magnitude and phase aspects under different conductivities are studied. The phase change of the structure and the dynamic tuning process are analyzed as well. Based on the three-dimensional electromagnetic simulations, the calculation of the multipole scattering power is carried out. The calculation results of the multipole scattering power are compared with the surface current distributions to further verify the physical mechanism of phase changes of the designed structure.

Results and Discussions The proposed composite metamaterial structure incorporating gold and vanadium dioxide has a relatively large phase change. When vanadium dioxide is transformed from its insulating state to the metallic state, the structure can result in a phase change of more than 140° in the frequency range of 1.15–1.65 THz with the maximum change of 142° (Fig. 3). When the conductivity of vanadium dioxide is changed from 1×10^3 S/m to 1×10^4 S/m, the structure has a phase shift of more than 50° in the frequency range of 1.17–1.68 THz (Fig. 3). This means that through the state tuning process of vanadium dioxide, the dynamic phase manipulation can be achieved within a relatively stable bandwidth. This study uses the surface current and electric field distributions to explain the physical mechanism of the phase change of the structure (Figs. 4, 5 and 6). This paper also further verifies the physical mechanism of the phase change by introducing the calculation of the multipole scattering power (Fig. 7). Above all, the proposed structure can achieve a dynamic phase manipulation with a relatively large phase change and a good bandwidth performance.

Conclusions This paper proposes a composite metamaterial structure based on vanadium dioxide that can dynamically manipulate the phases of THz waves. The simulation results show that when vanadium dioxide is tuned from its insulating state to the metallic state, the structure can achieve a phase shift of more than 140° in the frequency range of 1.15–1.65 THz. By the use of the calculation of the multipole scattering power and the electric field and surface current distributions at the resonance frequencies, the physical mechanism of the phase shift is investigated. The proposed structure has potential applications in the fields of THz wireless communications, sensing, and security imaging.

Key words materials; terahertz; metamaterials; phase manipulation; tunability; vanadium dioxide