



相变材料与超表面复合结构太赫兹移相器

龙洁 李九生

Terahertz phase shifter based on phase change material–metasurface composite structure

Long Jie Li Jiu-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 074201 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201495

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201495>

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

基于相变材料超表面的光学调控

Tunable metasurfaces based on phase–change materials

物理学报. 2020, 69(15): 154202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200453>

基于石墨烯的太赫兹波散射可调谐超表面

Graphene based tunable metasurface for terahertz scattering manipulation

物理学报. 2017, 66(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.204101>

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>

基于双开口谐振环超表面的宽带太赫兹涡旋光束产生

Broadband terahertz vortex beam generation based on metasurface of double–split resonant rings

物理学报. 2019, 68(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182147>

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>

相变材料与超表面复合结构太赫兹移相器*

龙洁 李九生†

(中国计量大学 太赫兹研究所, 杭州 310018)

(2020年9月8日收到; 2020年12月2日收到修改稿)

利用相变材料嵌入超表面组成复合结构实现太赫兹移相器, 该器件自上而下依次为二氧化钒嵌入金属层、液晶、二氧化钒嵌入金属层、二氧化硅层. 通过二氧化钒的相变特性和液晶的双折率特性同时作用实现对器件相位调控. 随着外加温度变化二氧化钒电导率发生改变, 器件的相位随之产生移动, 同样的对液晶层施加不同的电压导致液晶折射率发生变化, 器件相位也会有影响. 经过这两种介质共同作用, 最终实现对太赫兹波相位有效调控. 仿真结果验证了该移相器在频率 $f = 0.736$ THz 时, 太赫兹移相器的最大相移量达到 355.37° , 在 $0.731\text{--}0.752$ THz (带宽为 22 GHz) 频率范围相移量超过 350° . 这种基于相变材料与超表面复合结构为灵活调控太赫兹波提供了一种新思路, 将在太赫兹成像、通信等领域有着广泛的应用前景.

关键词: 超表面, 相变材料, 太赫兹, 动态调控

PACS: 42.25.Bs, 42.30.Lr, 87.50.U-, 42.70.Qs

DOI: 10.7498/aps.70.20201495

1 引言

近年来, 太赫兹技术在通信、安检、成像、光谱、生命医学、无损检测等领域有着越来越广泛应用^[1-3], 各类太赫兹波调控器件也层出不穷^[4-10], 这些器件主要集中对太赫兹波的频率、幅度和偏振态进行控制. 而作为太赫兹波重要参量之一的相位也逐渐成为热门研究课题, 因此开展太赫兹波段的移相器研究就显得意义重大. 当前, 国内外对太赫兹移相器研究已有部分报道如: 2004年, Chen等^[11]提出了由石英-液晶材料-石英结构的液晶磁控太赫兹移相器, 在频率为 1 THz 时最大相移量为 360° . 2011年, Grigoryeva等^[12]提出一种电磁双可调移相器, 构造的六铁氧体-铁电层状结构可以被用作移相器的波导元件. 2016年, Han等^[13]借助超材料设计了一种双层偶极子谐振结构太赫兹波移相器, 实现了 90° 的相位延迟. 同年, Chodorow

等^[14]提出一种氧化铟锡-光栅复合结构太赫兹移相器, 该移相器由石英-氧化铟锡电极-液晶-氧化铟锡电极-石英依次组成, 在 $f = 2.5$ THz 处实现最大相移量为 180° . 2018年, Ibrahim等^[15]利用机械方式驱动可调式完美磁导体, 通过压电致动器与微细加工组装形成一个移相单元, 实现 380° 相移. 2019年, Inoue等^[16]研究了一种聚合物-液晶复合结构太赫兹移相器, 通过改变聚合物浓度来控制相移量之间的平衡, 可以在频率为 0.4 THz 处实现 30° 相移量. 同年, Ji等^[17]利用铁磁液晶材料研制了一种偏振转换太赫兹移相器, 通过调节外加磁场大小来实现相位延迟, 实验结果表明该移相器在 $f = 1.45$ THz 能够实现 180° 相移. 然而上述报道的太赫兹移相器往往需要较大的介质厚度才能实现, 且不易于外部调控.

本文设计了一种相变材料嵌入超表面的复合结构实现太赫兹移相, 该器件自上而下依次为二氧化钒嵌入金属层、液晶、二氧化钒嵌入金属层、二

* 国家自然科学基金 (批准号: 61871355, 61831012).

† 通信作者. E-mail: jshli@126.com

氧化硅层. 通过改变外加温度使二氧化钒电导率发生改变, 使得太赫兹波传输通过器件的相位也随之产生变化, 最终实现太赫兹波相位有效调控. 当频率为 0.736 THz 时, 太赫兹移相器的最大相移量达到 355.37°, 在 0.731—0.752 THz (带宽为 22 GHz) 频率范围相移量超过 350°. 该太赫兹移相器具有器件结构尺寸小、相移量大、便于调控等优点.

2 太赫兹移相器结构

本文提出的相变材料嵌入超表面组成复合结构太赫兹移相器三维结构如图 1(a) 所示, 其结构单元如图 1(b) 所示, 从上到下依次为二氧化钒嵌入上超表面复合结构 (上金属层)、液晶层、二氧化钒嵌入下超表面复合结构 (下金属层)、二氧化硅基体. 金属铜的电导率可表示为 $\sigma_{\text{copper}} = 5.8 \times 10^7$ S/m^[18], 金属铜 (黄色标注) 和二氧化钒 (橙色标注) 的厚度均为 0.2 μm , 二氧化硅基体的相对介电常数为 $\epsilon = 3.9$, 其厚度为 40 μm . 液晶层厚度为

20 μm . 二氧化钒嵌入上超表面复合结构 (上金属层) 如图 1(c) 所示, 上层二氧化钒构造了二氧化钒双矩形结构, 相应尺寸参数为: 单元周期为 $P = 110 \mu\text{m}$, $L_1 = 70 \mu\text{m}$, $L_2 = 25 \mu\text{m}$, $h_1 = 60 \mu\text{m}$, $h_2 = 15 \mu\text{m}$. 二氧化钒嵌入下超表面复合结构 (下金属层) 如图 1(d) 所示, 矩形缺口金属铜层嵌入 U 形结构二氧化钒, 相应尺寸参数为: $L_3 = 70 \mu\text{m}$, $h_3 = 40 \mu\text{m}$, $L_4 = 30 \mu\text{m}$. 由于顶层二氧化钒嵌入上超表面复合结构直接暴露空气中, 可以通过激光扩束辐照控温方法对顶层二氧化钒的温度进行调控. 对于加工在二氧化硅基体上的下层二氧化钒嵌入表面复合结构可以通过从底部辐照扩束激光对下层二氧化钒的控温. 最终整个相变材料嵌入超表面组成复合结构太赫兹移相器的相移量可以通过上下两路扩束激光进行切换控制. 本文采用 CST Studio Suite 软件进行器件仿真.

3 计算结果与讨论

二氧化钒作为一种相变材料, 外加温度发生改变时其电导率也随之发生变化. 当温度低于相变温度 68 °C 时, 二氧化钒为高阻态, 相对介电常数为 $\epsilon_i = 9$; 当温度高于相变温度 68 °C 时, 二氧化钒变为高导态, 在太赫兹频段内实现从电介质到金属态的转变^[19]. 其相对介电常数可以用 Drude 模型来描述^[20]:

$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{(\omega + i/\pi)\omega} \mathbf{i}, \quad \omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m^* \epsilon_0}, \quad (1)$$

式中 ω_p 表示等离子体的角频率, $\epsilon_i = \epsilon_\infty = 9$, 有效质量 $m^* = 2m_e$, m_e 是自由电子质量, 载流子密度 $N = 8.7 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, 载流子迁移率 $\mu = 2 \text{ cm} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 二氧化钒相变前后的电导率分别为 $\sigma = 200 \text{ S/m}$ 和 $\sigma = 2 \times 10^5 \text{ S/m}$. 本文所采用的液晶仿真参数分别为 $n_o = 1.52$ 和 $n_e = 1.78$ ^[21].

3.1 初始条件为上层 VO₂ 高导态 (电导率 $\sigma = 2 \times 10^5 \text{ S/m}$), 下层 VO₂ 高阻态 (电导率 $\sigma = 200 \text{ S/m}$), 液晶折射率 $n_o = 1.52$

为了探究二氧化钒电导率对移相器的相移量影响, 设定入射太赫兹波为 x 偏振态, 设置液晶初始折射率为 $n_o = 1.52$ (无外加电压), 最后随着二氧化钒介质发生相变, 液晶折射率也在外加电场条

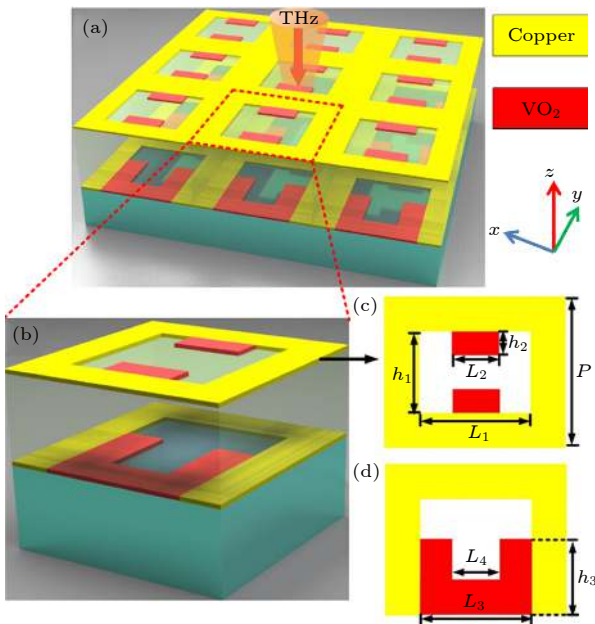


图 1 (a) 相变材料 (二氧化钒) 嵌入超表面组成复合结构太赫兹移相器示意图; (b) 太赫兹移相器单元三维结构; (c) 二氧化钒嵌入超表面复合结构 (上金属层); (d) 二氧化钒嵌入超表面复合结构 (下金属层)

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the proposed terahertz phase shifter based on vanadium dioxide embedded metasurface composite structure; (b) three-dimensional structure diagram of unit cell; (c) vanadium dioxide embedded metasurface composite structure (i.e. top layer); (d) vanadium dioxide embedded metasurface composite structure (i.e. bottom layer).

件下最终变为 $n_e = 1.78$ (有外加电压)^[21]. 首先研究初始条件为上层 VO₂ 高导态 (即金属态, 电导率 $\sigma = 2 \times 10^5$ S/m), 下层 VO₂ 高阻态 (即绝缘态, 电导率 $\sigma = 200$ S/m) 随着外部温度改变最终条件为上层 VO₂ 高导态, 下层 VO₂ 高导态时太赫兹移相器的相移情况. 数值计算得到太赫兹移相器的相移和透射曲线分别如图 2(a) 和 (b) 所示. 由图 2(a) 可以看出, 所设计的太赫兹移相器在 0.732—0.75 THz (带宽为 18 GHz) 频段范围产生相移量大于 350°, 且该频段范围内相移量呈线性变化, 在频率 $f = 0.741$ THz 处实现最大相移量 357.2°. 从图 2(b) 可以看出, 在该频段范围内不同电导率下太赫兹波透射率变化趋势较稳定, 太赫兹波透射系数大于 0.75.

3.2 初始条件为上层 VO₂ 高阻态 (电导率 $\sigma = 200$ S/m), 下层 VO₂ 高导态 (电导率 $\sigma = 2 \times 10^5$ S/m), 液晶折射率 $n_o = 1.52$

本节研究分析初始条件为上层 VO₂ 高阻态 (电导率 $\sigma = 200$ S/m), 下层 VO₂ 高导态 (电导率 $\sigma = 2 \times 10^5$ S/m) 随着外部温度改变最终条件为上层 VO₂ 高导态, 下层 VO₂ 高导态时太赫兹移相器的相移量, 此时液晶折射率变为 1.78. 数值模拟计算得到太赫兹移相器的相移曲线和透射曲线分别如图 3(a) 和 (b) 所示. 由图 3(a) 可以看出, 所设计的太赫兹移相器在 0.73—0.734 THz (带宽为

4 GHz) 频段范围产生相移量大于 350°, 而且在频率 $f = 0.731$ THz 处最大相移量为 359.3°. 太赫兹波穿过移相器的透射系数如图 3(b) 所示, 在该频段范围内太赫兹波透射系数大于 0.75.

3.3 初始条件为上层 VO₂ 高阻态 (电导率 $\sigma = 200$ S/m), 下层 VO₂ 高阻态, 液晶折射率 $n_o = 1.52$

研究分析初始条件为上层 VO₂ 高阻态 (电导率 $\sigma = 200$ S/m), 下层 VO₂ 高阻态随着外部温度改变最终条件为上层 VO₂ 高导态 (电导率 $\sigma = 2 \times 10^5$ S/m), 下层 VO₂ 高导态时太赫兹移相器的相移情况, 此时液晶折射率变为 1.78. 数值模拟计算得到太赫兹移相器的相移曲线和透射曲线分别如图 4(a) 和 (b) 所示. 所设计的移相器在 0.73—0.734 THz (带宽为 4 GHz) 频段范围产生相移量 350° 以上, 该频段范围内相移量呈线性变化, 且在 $f = 0.731$ THz 处实现最大相移量 359.3°. 图 4(b) 所示移相器的透射系数保持在 0.75 以上, 该移相器的太赫兹波透射效果良好.

3.4 初始条件为上层 VO₂ 高导态 (电导率 $\sigma = 2 \times 10^5$ S/m), 下层 VO₂ 高导态, 液晶折射率 $n_o = 1.52$

研究初始条件为上层 VO₂ 高导态 (电导率 $\sigma = 2 \times 10^5$ S/m), 下层 VO₂ 高导态随着外部温度改变最终条件为上层 VO₂ 高阻态 (电导率 $\sigma =$

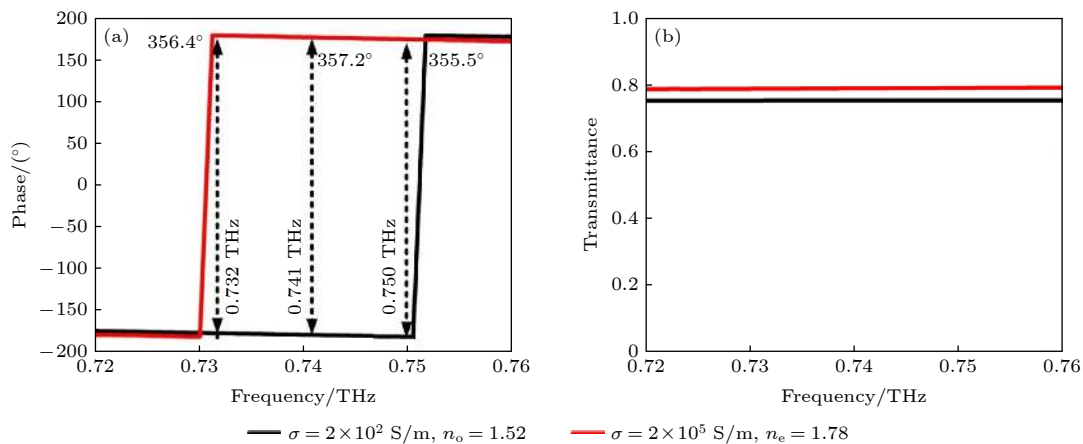


图 2 初始条件为上层 VO₂ 高导态, 下层 VO₂ 高阻态, 随着外部温度改变最终条件为上层 VO₂ 高导态, 下层 VO₂ 高导态时太赫兹移相器的相移曲线、太赫兹波透射系数: (a) 相移曲线; (b) 太赫兹波透射系数

Fig. 2. Phase shift and transmission coefficient of terahertz phase shifter. The initial conditions are high conductivity state of upper VO₂ layer and high resistance state of lower VO₂ layer. With the change of external temperature, the final conditions are high conductivity state of upper VO₂ layer and high conductivity state of lower VO₂ layer: (a) Phase shift; (b) transmission coefficient of terahertz phase shifter.

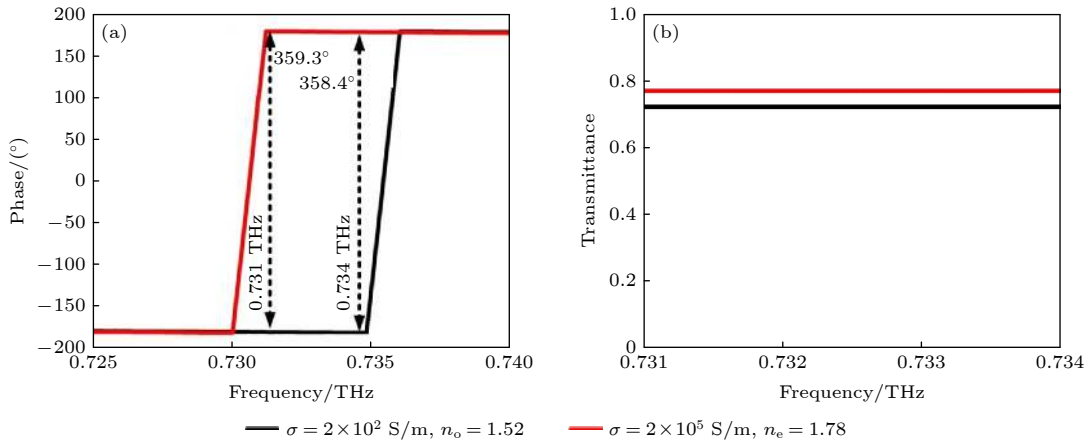


图 3 初始条件为上层 VO₂ 高阻态 (电导率 $\sigma = 200 \text{ S/m}$), 下层 VO₂ 高导态 (电导率 $\sigma = 2 \times 10^5 \text{ S/m}$), 随着外部温度改变最终条件为上层 VO₂ 高导态, 下层 VO₂ 高导态时太赫兹移相器的相移曲线、太赫兹波透射系数: (a) 相移曲线; (b) 太赫兹波透射系数
Fig. 3. Phase shift and transmission coefficient of terahertz phase shifter. The initial conditions are high resistance state of upper VO₂ layer and high conductivity state of lower VO₂ layer. With the change of external temperature, the final conditions are high conductivity state of both upper and lower VO₂ layers: (a) Phase shift; (b) transmission coefficient of terahertz phase shifter.

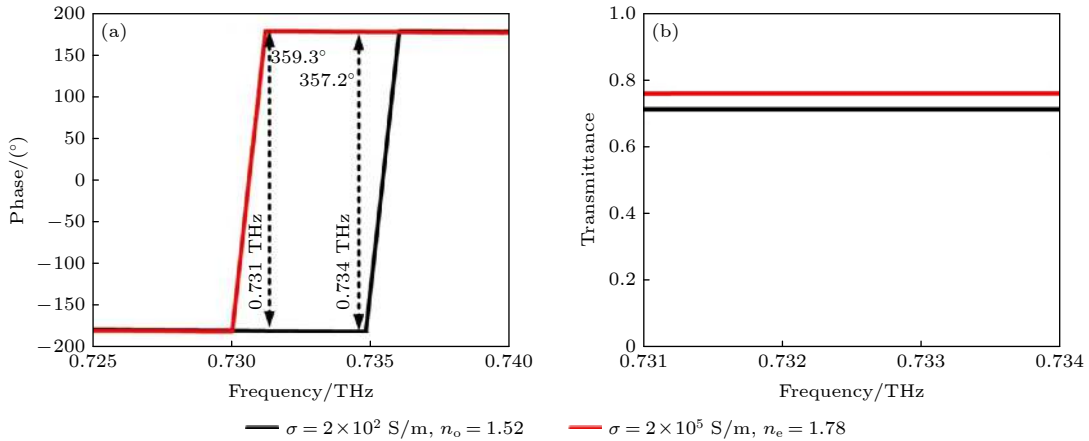


图 4 初始条件为上层 VO₂ 高阻态 (电导率 $\sigma = 200 \text{ S/m}$), 下层 VO₂ 高阻态, 随着外部温度改变最终条件为上层 VO₂ 高导态 (电导率 $\sigma = 2 \times 10^5 \text{ S/m}$), 下层 VO₂ 高导态时太赫兹移相器相移曲线、太赫兹波透射系数: (a) 相移曲线; (b) 太赫兹波透射系数
Fig. 4. Phase shift and transmission coefficient of terahertz phase shifter. The initial conditions are high resistance state of both upper and lower VO₂ layers. With the change of external temperature, the final conditions are high conductivity state of both upper and lower VO₂ layers: (a) Phase shift; (b) transmission coefficient of terahertz phase shifter.

200 S/m), 下层 VO₂ 高阻态时太赫兹移相器的相移情况, 此时液晶折射率变为 1.78. 数值模拟计算得到太赫兹移相器的相移曲线和透射曲线分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示. 所设计的移相器在 0.73—0.752 THz (带宽为 22 GHz) 频段范围产生 350° 以上的相移量, 该频段范围内相移量呈线性变化, 且在 $f = 0.731 \text{ THz}$ 处实现最大相移量 352.6°. 由图 5(b) 可以看出, 太赫兹波透过移相器的透射系数大于 0.75. 相比图 2—图 4 所示上下两层二氧化钒不同状态下的太赫兹波相移曲线, 可以看出 4 种组合状态下所设计移相器的相移量和透射系数均达到预期目标, 但是当上下两层结构的二氧化钒

均呈高导态时, 移相频段范围增加至 22 GHz.

上下层超表面嵌入的二氧化钒均呈高导态时, 移相器上下层超表面结构的电场能量分布如图 6 所示. 由图 6(a) 可以看出, 电流主要集中在上层金属结构的上下两个边缘处和下层二氧化钒边缘处, 而上层二氧化钒和下层金属电流较弱. 由图 6(b) 可以看出, 电场能量在上下金属结构边缘处均有分布, 还有一部分电场能量集中在上层二氧化钒位置, 另一小部分电场能量集中在下层二氧化钒位置. 进一步表明, 此时图 1 中移相器结构表现为双闭环谐振, 最大移相频率点位置为 0.752 THz, 与图 5 计算结果相吻合. 研究分析了二氧化钒电导率

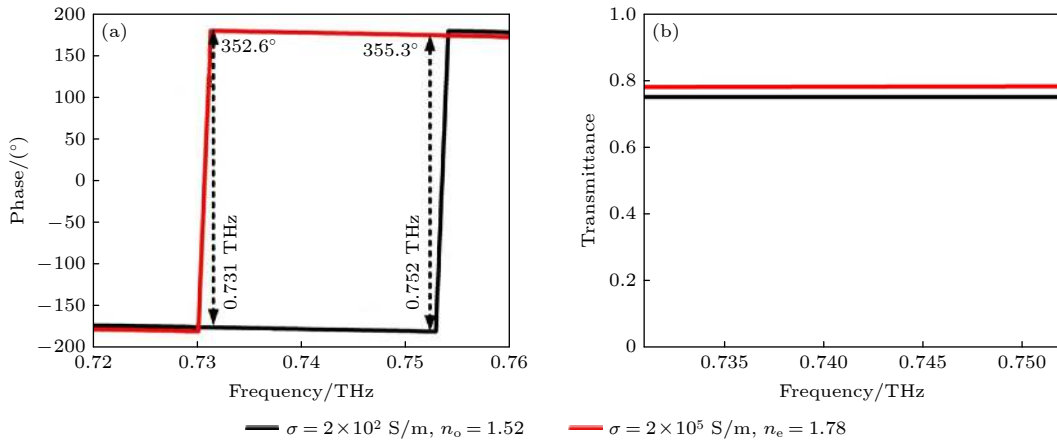


图 5 初始条件为上层 VO₂ 高导态 (电导率 $\sigma = 2 \times 10^5$ S/m), 下层 VO₂ 高导态, 随着外部温度改变最终条件为上层 VO₂ 高阻态 (电导率 $\sigma = 200$ S/m), 下层 VO₂ 高阻态时太赫兹移相器相移曲线、太赫兹波透射系数: (a) 相移曲线; (b) 太赫兹波透射系数
Fig. 5. Phase shift curve and transmission coefficient of terahertz phase shifter. The initial conditions are high conductivity state of both upper and lower VO₂ layers. With the change of external temperature, the final conditions are high resistance state of both upper and lower VO₂ layers: (a) Phase shift curve; (b) transmission coefficient of terahertz phase shifter.

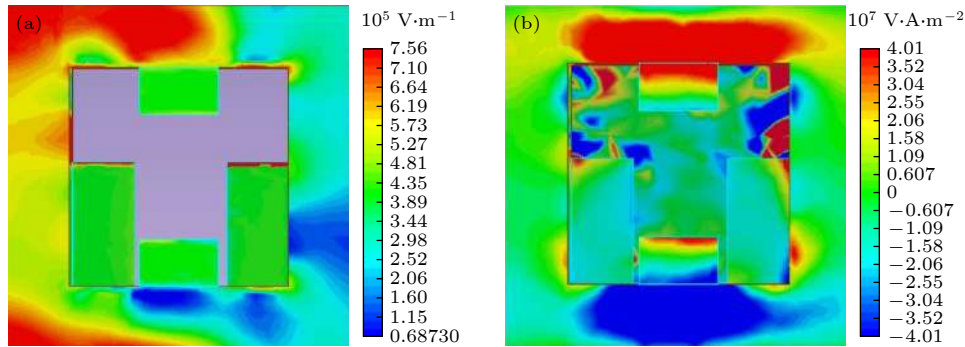


图 6 上下层超表面嵌入二氧化钒均呈高导态时, 移相器结构上层超表面、下层超表面电场能量分布图: (a) 上层超表面电场能量分布图; (b) 下层超表面电场能量分布图
Fig. 6. Electric field energy distribution at top layer and bottom layer, when vanadium dioxide in top and bottom metal layers are metallic state: (a) Top layer; (b) bottom layer.

变化时该移相器中的相移曲线, 如图 7 所示. 当电导率从 200 S/m 逐渐变化到 2×10^5 S/m 时, 移相器的相移范围逐渐变宽, 带宽可以由 2 GHz 拓宽至 22 GHz, 而相移量只发生轻微改变.

3.5 改变太赫兹波入射角

为了进一步分析太赫兹波入射角 θ 改变对该移相器的移相性能影响, 本文研究了太赫兹波入射角为 60°和 80°时该移相器的相移量. 在太赫兹波入射角度为 60°时, 该器件只有大约 7°的相移量 (如图 7 所示), 移相器的最大相移量和透射曲线如图 8(a) 和 (b) 所示. 由图 8(a) 可以看出, 二氧化钒从高阻态变化至高导态, 所设计的移相器在 1.08—1.16 THz (带宽为 90 GHz) 频段范围内均能产生 300°以上相移量, 相移量呈线性变化, 而且

在频率 $f = 1.14$ THz 处, 实现最大相移量 346.3°.

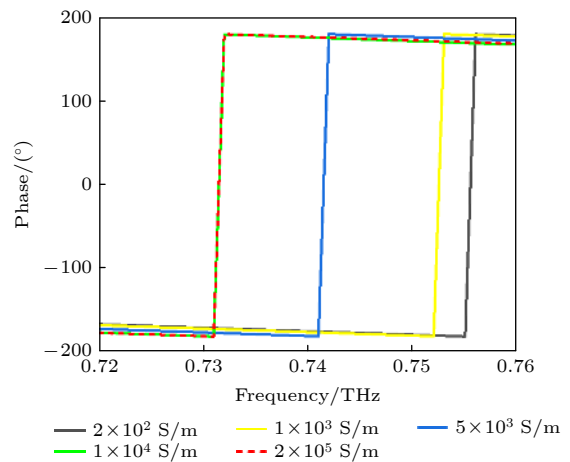


图 7 随二氧化钒电导率变化相移曲线

Fig. 7. Phase shift curve with the change of vanadium dioxide conductivity.

与图 5(a) 相比较 (带宽为 22 GHz), 发现移相频段范围有所增加, 但是最大相移量略有下降. 图 8(b)

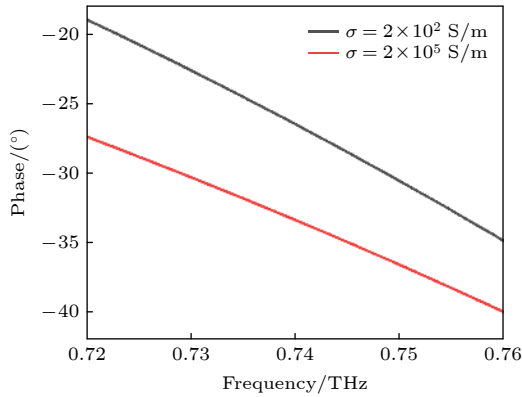


图 8 当入射角为 60°时, 原有最大移相频率范围 0.72—0.76 THz 内的相移变化

Fig. 8. Phase shift variation in the original maximum phase shift frequency range of 0.72 THz to 0.76 THz when the incident angle of terahertz wave is 60°.

所示的太赫兹波透射率与图 5(b) 相比也有所降低. 上述分析表明随着太赫兹波入射角增大, 移相器的

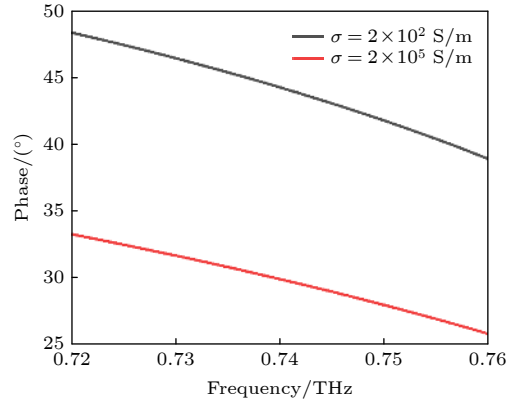


图 10 当入射角为 80°时, 原有最大移相频率范围 0.72—0.76 THz 内相移变化

Fig. 10. Phase shift variation in the original maximum phase shift frequency range of 0.72 THz to 0.76 THz when the incident angle of terahertz wave is 80°.

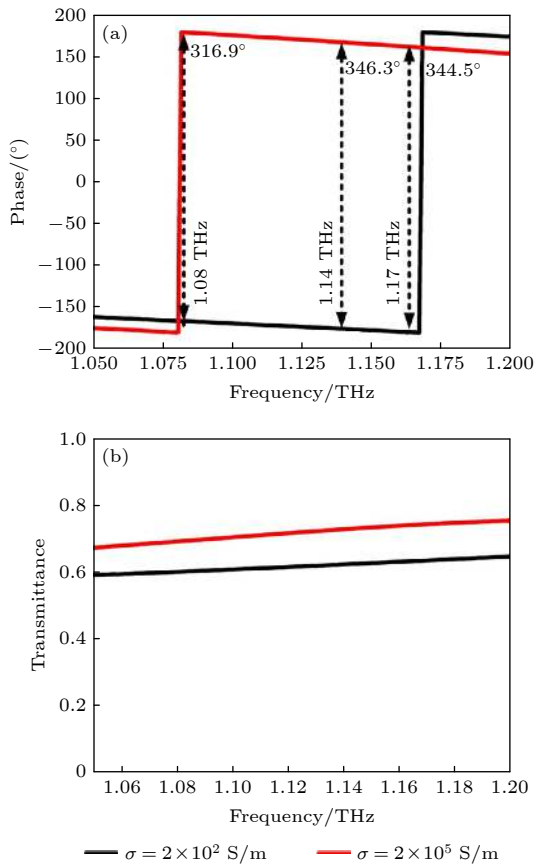


图 9 当太赫兹波入射角 $\theta = 60^\circ$ 时, 太赫兹移相器的最大移相频率点相移曲线、太赫兹波透射系数: (a) 相移曲线; (b) 太赫兹波透射系数

Fig. 9. Phase shift curve and terahertz wave transmission coefficient of the proposed terahertz phase shifter when the incident angle of terahertz wave is 60°: (a) Phase shift curve; (b) terahertz wave transmission coefficient.

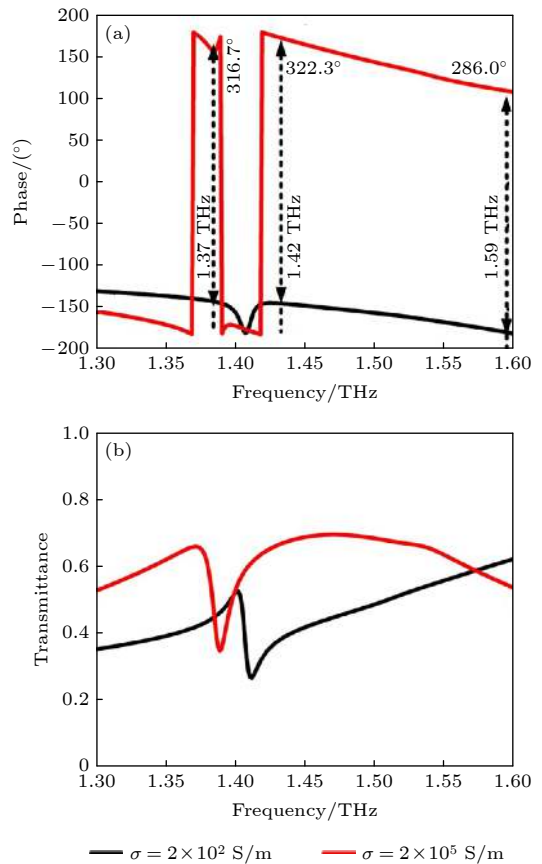


图 11 当太赫兹波入射角 $\theta = 80^\circ$ 时, 太赫兹移相器的最大移相频率点相移曲线、太赫兹波透射系数: (a) 相移曲线; (b) 太赫兹波透射系数

Fig. 11. Phase shift curve and terahertz wave transmission coefficient of the proposed terahertz phase shifter when the incident angle of terahertz wave is 80°: (a) Phase shift curve; (b) terahertz wave transmission coefficient.

最大相移量略有下降, 太赫兹波透射系数也随之减少. 当太赫兹波入射角度为 80° 时, 该移相器只有大约 15° 的相移量 (如图 9 所示). 移相器的最大相移量和透射曲线如图 10(a) 和 (b) 所示. 从图 10(a) 中可以看出, 移相器在 1.3—1.6 THz 频段范围内有双相移频段效果, 即出现了两个最大峰值, 第一个峰值在频率 1.37 THz 处产生相移量为 316.7° , 第二个峰值在频率 1.42 THz 处实现最大相移量 322.3° , 而且 1.42—1.59 THz (带宽为 160 GHz) 频段范围内均有 300° 以上相移量, 相移量呈线性变化. 图 10(b) 所示太赫兹波透射曲线的变化趋势与之前平稳的透射曲线大有不同, 透射系数相比图 5(b) 大幅降低, 表明太赫兹波入射角度对透射系数有着抑制作用, 为了获取较好的透射效果, 还需要选取合适的入射角度. 图 7—图 11 所示的计算结果也表明太赫兹波入射角对该移相器移相效果产生很大影响.

4 结 论

本文设计了基于相变材料嵌入超表面组成复合结构太赫兹移相器, 通过改变相变材料的温度能够对入射太赫兹波相移量进行动态调控. 仿真结果表明, 太赫兹移相器在 0.731—0.752 THz (带宽为 22 GHz) 范围内均可实现的超过 350° 相移量. 当 $f = 0.736$ THz 时, 最大相移量达到 355.37° . 改变相变材料的温度, 能够实现对太赫兹相移器控制, 最大相移量的频段的范围从 0.73—0.734 THz 变化到 0.73—0.752 THz. 该相移器具有结构简单、尺寸小、相移量大等优点, 将在太赫兹波雷达隐身、遥感、成像、探测和通信等领域具有广阔应用前景.

参考文献

- [1] Vieweg N, Fischer B M, Reuter M, Kula P, Dabrowski R, Celik M, Frenking G, Koch M, Jepsen P U 2012 *Opt. Express* **20** 28249
- [2] Kohler R, Tredicucci A, Beltram F, Beere E, Linfield H, Davies G, Ritchie D, Lotti R, Rossi F 2002 *Nature* **417** 156
- [3] Jansen C, Wietzke S, Peters O, Scheller M, Vieweg N, Salli M, Krumbholz N, Jördens C, Hochrein T, Koch M 2010 *Appl. Opt.* **49** E48
- [4] Xiang F, Huang W, Li D, Zhou L, Guo Z, Li J 2020 *Opt. Lett.* **45** 1978
- [5] Spada L, Vegni L 2016 *Opt. Express* **24** 5763
- [6] Li X N, Zhou L, Zhao G Z 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 238101 (in Chinese) [李晓楠, 周璐, 赵国忠 2019 物理学报 **68** 238101]
- [7] Li P, Liu J, Sun B, Huang N 2015 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **27** 752
- [8] Lai W, Yuan H, Fang H 2019 *J. Phys. D* **53** 125109
- [9] Xie J, Zhu W, Rukhlenko D, Xiao F, He C, Geng J, Liang X, Jin R, Premaratne M 2018 *Opt. Express* **26** 5052
- [10] Wang B, Wang G, Sang T, Wang L 2017 *Sci. Rep.* **7** 41373
- [11] Chen C, Pan C, Hsieh C, Pan R 2004 *14th International Conference on Ultrafast Phenomena*, Technical Digest (CD) WB6
- [12] Grigoryeva Y, Sultanov A, Kalinikos A 2011 *Electron. Lett.* **47** 35
- [13] Han Z, Ohno S, Tokizane Y, Nawata K, Notake T, Takida Y, Minamide H 2017 *Opt. Express* **25** 31186
- [14] Chodorow U, Parka J, Strzezysz O, Mazur R, Morawiak P, Pałka N 2017 *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **657** 51
- [15] Ibrahim A, Shaman N, Sarabandi K 2018 *IEEE Tran. Terahertz Sci. Technol.* **8** 666
- [16] Inoue Y, Kubo H, Shikada T, Moritake H 2019 *Macromol. Mater. and Eng.* **304** 563
- [17] Ji Y, Fan F, Xu S, Yu P, Chang J 2019 *Nanoscale* **11** 4933
- [18] Han J, Cao X, Gao J, Li J, Yang H, Zhang C, Li T 2019 *Opt. Express* **27** 34141
- [19] Zhang J, Yang B, Han X, He X, Zhang J, Huang J, Chen B, Xu Y, Xie L 2020 *Appl. Phys. A* **126** 199
- [20] Fan F, Hou Y, Jiang W, Wang H, Chang J 2012 *Appl. Optics* **51** 4589
- [21] Wang L, Lin W, Liang X, Wu B, Hu W, Zheng G, Jin B, Qin Q, Lu Q 2012 *Opt. Mater. Express* **2** 1314

Terahertz phase shifter based on phase change material-metasurface composite structure*

Long Jie Li Jiu-Sheng[†]*(Centre for THz Research, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)*

(Received 8 September 2020; revised manuscript received 2 December 2020)

Abstract

With its rapid development, the terahertz technology is widely used in radar, imaging, remote sensing and data communication. As one of terahertz wave devices, the terahertz phase shifter has become a research hotspot. The existing phase shifters have the disadvantages of large volume, high power consumption and small phase shifting. In the present work, a tunable terahertz phase shifter with liquid crystal and vanadium dioxide is proposed. It is composed of an upper vanadium dioxide embedded metal layer, a liquid crystal, a lower vanadium dioxide embedded metal layer, and a silicon dioxide substrate in sequence from top to bottom. The liquid crystal is sandwiched between the upper and lower vanadium dioxide embedded metal layer. The phase of the device can be controlled by both the phase transition characteristics of vanadium dioxide and the birefringence of liquid crystal. By changing the external applied temperature, the conductivity of vanadium dioxide is changed, and the phase of the device shifts accordingly. Likewise the refractive index of the liquid crystal changes under different externally applied voltages. Finally, the phase of the proposed device can be effectively controlled in a terahertz range by both externally applied temperature and voltage. The phase shift characteristics of the device are analyzed by using software CST studio. The results verify that the terahertz phase shifter can achieve a maximum phase shift of 355.37° at $f = 0.736$ THz and a phase shift is larger than 350° in a range of 0.731–0.752 THz (bandwidth 22 GHz). Therefore, compared with the traditional phase shifter, this kind of phase change material-metasurface composite structure provides a new idea for flexibly manipulating the terahertz beam. And it is expected to be widely used in terahertz imaging, terahertz wireless and other fields.

Keywords: metasurface, phase-change materials, terahertz, active modulation**PACS:** 42.25.Bs, 42.30.Lr, 87.50.U-, 42.70.Qs**DOI:** [10.7498/aps.70.20201495](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201495)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos.61871355, 61831012).

[†] Corresponding author. E-mail: jshli@126.com