

基于超材料复合结构的太赫兹液晶移相器*

陈闻博¹⁾ 陈鹤鸣^{2)†}

1) (南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 南京 210023)

2) (南京邮电大学贝尔英才学院, 南京 210023)

(2021年12月27日收到; 2022年4月26日收到修改稿)

为了解决现存太赫兹移相器的损耗较大且不可控、相移量较小的问题, 本文设计了一种简易超材料复合结构实现的太赫兹移相器. 该器件由4层结构组成, 自上而下依次为L型金属谐振层、液晶层、弓型金属层、石英基底层. 通过在上、下金属层施加偏置电压, 改变液晶盒内液晶分子指向矢的偏转角 α , 从而改变液晶的有效折射率, 器件的相位也随之发生变化, 进而实现动态调控相位的目的. 仿真结果表明: 设计的太赫兹液晶移相器在1.68—1.78 THz间透射率可达0.968, 插入损耗低至0.3 dB; 当频率为1.7396 THz时, 其最大相移为 352.625° , 在1.7315—1.7396 THz (带宽为8.1 GHz) 频率内相移量超过 352° . 这种简易超材料多层结构为调控太赫兹波提供了一种新方法, 在太赫兹成像、传感等领域有广泛的应用前景.

关键词: 太赫兹, 超材料, 液晶移相器, 动态调控

PACS: 87.50.U-, 61.30.-v, 81.05.Xj, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.71.20212400

1 引言

超材料是一种由周期性排列的结构单元构成的人工复合材料, 可以通过调整谐振单元的结构来实现某些超常的电磁性质, 例如负折射率、负磁导率、电磁诱导透明、完美吸收等电磁现象^[1]. 自Landy等^[2]第一次提出由金属层-介质层-超材料层三层结构构成的超材料吸收器, 并从理论和实验角度证明超材料吸收器的效用后^[3], 类似“三明治”结构的超材料器件得到了广泛的研究. 近年来, 太赫兹技术在通信、成像、传感、安检、生命医学、无损检测等领域有着越来越广泛的应用^[4-6], 各类太赫兹波调控器件也成为被广泛研究的对象. 这些器件主要集中在研究太赫兹波的调幅、调相、调频、调偏振、调波前等^[7-9], 而目前常见的是通过超材料与不同材料体系、不同技术结合与不同驱动手段的方法^[10]来实现太赫兹频段的调控. 相位作为太赫兹波重要参量之一, 逐渐成为热门研究课题, 太赫

兹移相器广泛应用于太赫兹雷达、通信系统、仪器仪表、传感、实现空间扫描等诸多领域, 是一种用来调节太赫兹波相位的器件, 保证太赫兹波在相位变化的过程中损耗可控, 同时保障系统的输出功率达到满意的效果, 因此太赫兹波移相器的研究具有重要价值.

国内外已经开展了较多关于太赫兹移相器的研究. 2011年, Koeberle等^[11]提出了一种基于液晶的电可调谐移相器, 该移相器使用特定的电极结构, 能够在移相器的两个状态之间进行完全电调谐, 降低了即时设备的机械复杂性, 在1 THz下的相移量达到了 70° . 2015年Jost^[12]等设计了一款基于带状线结构的液晶移相器, 其工作频段为Ka波段, 基于低温共烧陶瓷加工技术实现, 该移相器在工作频率为30 GHz时的移相量为 60.9° , 损耗为6 dB, 品质因子(FOM)为 $10(^\circ)/\text{dB}$, 折合 360° 移相时, 损耗为36 dB. 2015年高盛等^[13]提出了一

* 国家自然科学基金(批准号: 61571237)和江苏省自然科学基金(批准号: BK20151509)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chhm@njupt.edu.cn

种基于单槽单元和液晶的可重构反射阵天线电调谐移相器, 利用向列液晶的介电特性, 减小外加电场在液晶层中的不均匀性, 降低了控制电压, 该器件的饱和偏置电压约为 10 V, 在 124.5 GHz 下的最大相移为 306° , 在 121.5—126.0 GHz 范围内, 相移大于 300° . 2019 年 Inoue 等^[14]提出了一种理想聚合物/液晶 (liquid crystal, LC) 复合结构的太赫兹移相器, 通过改变聚合物的浓度来调控相移量, 在 0.4 THz 的太赫兹波实现 30° 的相移, 其插入损耗约为 4 dB. 上述设计的 4 种器件存在插入损耗较大、相移量较小等问题, 离实际应用还有一定差距.

2020 年龙洁^[15]等利用相变材料 VO_2 嵌入超表面组成复合结构实现太赫兹移相器, 通过 VO_2 的相变特性和液晶的双折率特性同时作用调控器件的相位, 该器件在 $f = 0.736$ THz 下, 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° , 损耗约为 2 dB. 同年, Zhang 等^[16]通过亚波长介质梯度光栅的聚合物分散液晶结构, 实现了太赫兹各向异性有源操纵. 电场从 0 增大到 80 V 时, 该结构的相移量在 0.8 THz 附近从 π 变化到 0, 实现了可调谐太赫兹半波片的极化转换功能. 上述太赫兹移相器超材料结构单元存在结构较复杂、相移量较小、插入损耗较高、所需材料较多以及器件外部所加的驱动电压较高等不足.

本文提出了一种简易超材料多层结构实现的太赫兹移相器. 通过调节施加偏置电压, 改变液晶分子的偏转角 α , 使液晶的有效折射率变化, 从而改变太赫兹传输通过器件的相位. 该太赫兹移相器具有器件结构简单且尺寸较小、插入损耗低、相移量大、便于动态调控等优点.

2 结构设计和原理分析

2.1 结构设计

本文设计的采用上下金属层结构超材料太赫兹液晶移相器结构如图 1 所示, 由 4 层结构组成, 从上到下依次为上层金属谐振层 (黄色)、液晶层 (浅蓝色)、下层金属接地层、石英基底层 (灰色). 图 1(a) 是该器件的周期结构图, 图 1(b) 是单元三维结构图, 图 1(c), (d) 分别表示上、下铜层结构俯视图. 铜的电导率 $\sigma_{\text{copper}} = 5.8 \times 10^7$ S/m; 上、下

铜层的单元周期长度为 $p_1 = 102 \mu\text{m}$, 上层厚度为 $h_4 = 2.3 \mu\text{m}$, 宽度 $p_2 = 11.0 \mu\text{m}$; 下层的厚度为 $h_2 = 3.1 \mu\text{m}$, $r_1 = 99.0 \mu\text{m}$, $r_2 = 43 \mu\text{m}$; 中间液晶层的单元周期长度为 $p_1 = 102 \mu\text{m}$, 其厚度为 $h_3 = 0.9 \mu\text{m}$; 石英基底层的相对介电常数 $\epsilon = 3.75$, 损耗正切 $\tan\delta = 0.0004$, 其周期长度为 $p = 144 \mu\text{m}$, 厚度为 $h_1 = 23 \mu\text{m}$.

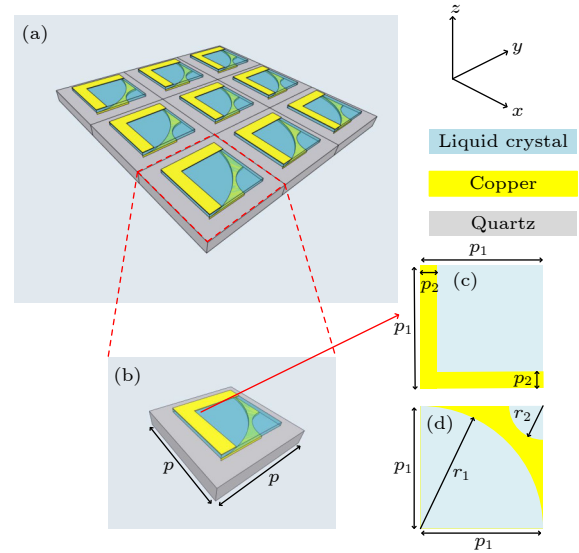


图 1 超材料太赫兹液晶移相器结构 (a) 周期三维结构; (b) 单元三维结构; 上层 (c) 和下层 (d) 金属结构俯视图
Fig. 1. Structure diagram of metamaterial terahertz liquid crystal phase shifter: (a) Periodic three-dimensional structure; (b) unit three-dimensional structure; top view of upper (c) and lower (d) unit structure.

2.2 原理分析

本文采用向列型液晶类型, 向列型液晶是一种各向异性材料, 液晶分子在不同外部环境下处于不同的状态分布时, 会呈现出不同的偏转角 α . 通过对液晶盒上下表面涂布取向层和外加电场的作用, 可以调控液晶分子长轴方向. 取向层的材料采用聚酰亚胺 (polyimide, PI), 通过摩擦取向来控制液晶分子的初始排布方向. 在未加偏置电压时, 液晶盒内的液晶分子只受到 PI 层摩擦, 在表面形成一个微观沟槽, 导致液晶分子的预对齐, 使液晶盒内的分子平行于摩擦方向, 即垂直于电场方向, 如图 2(a) 所示, 此时液晶分子的介电常数为 ϵ_{\perp} . 当施加偏置电压 V_{bias} 时, 液晶分子受到取向层和电场的共同作用. 随着所加偏置电压的提高, 电场逐渐成为主要影响因素, 在达到阈值电压 V_{th} 后, 液晶分子的介电常数为 ϵ_{\parallel} , 即平行于电场方向 (图 2(b)).

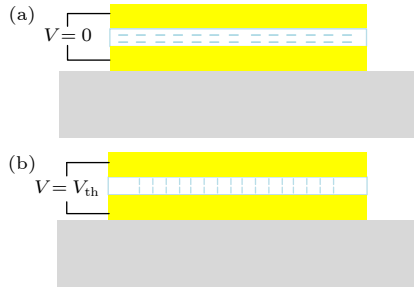


图 2 盒内液晶分子排列方向图 (a) $V = 0$, 液晶粒子未偏转; (b) $V = V_{th}$, 液晶粒子完全偏转

Fig. 2. The alignment direction of liquid crystal molecules: (a) $V = 0$, the liquid crystal particles are not deflected; (b) $V = V_{th}$, the liquid crystal particles are completely deflected.

采用 HFUT-HB01^[17] 型号液晶材料, 其性能参数如表 1 所列, 包括长短轴下介电常数、损耗角正切以及弹性形变系数. 液晶分子通过毛细原理或虹吸原理在真空条件下灌入液晶盒内^[17].

表 1 HFUT-HB01 型号液晶的材料性能参数

Table 1. Material performance parameters of HFUT-HB01 liquid crystal.

ε_{\perp}	$\tan\delta_{\perp}$	$\varepsilon_{//}$	$\tan\delta_{//}$	K_{11}/pN
2.47	0.02	3.60	0.02	25

液晶移相器实现相移的原理是通过加载外部电压调控液晶的介电常数改变相移常数 β 进而实现相移. 通过改变偏置电压 V_{bias} ($0 < V_{bias} < V_{th}$), 实现液晶层的介电常数在 ε_{\perp} 和 $\varepsilon_{//}$ 之间的变化; 而介电常数的变化是通过改变相移常数 β , 从而实现移相单元工作频段相位的连续调控. 移相器相位差分表达式为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi fl}{c} (\sqrt{\varepsilon_{//}} - \sqrt{\varepsilon_{\perp}}), \quad (1)$$

其中, f 表示移相器工作的频率, l 表示移相器的物理长度, c 代表光速. 由 (1) 式可知, 相位的变化取决于液晶材料介电常数的变化. 为了定性定量地研究向列相液晶的物理特性, 采用指向矢建模的方式来表征液晶的介电特性, 指向矢分布的变化代表了液晶分子的实时状态分布, 决定了液晶的有效介电常数, 直接影响了器件的相移调控的性能. 图 3 为液晶分子偏转示意图. 使用 CST Studio Suite 软件中介电张量公式材料模型来实现液晶分子在不同电压下的指向矢^[18], 液晶的介电常数张量可以用指向矢具体表示为^[19-21]

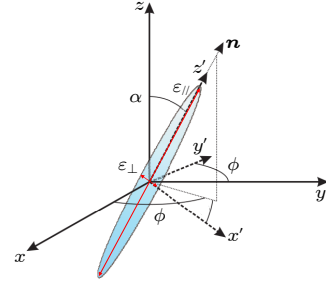


图 3 液晶分子偏转示意图

Fig. 3. Schematic diagram of the deflection of liquid crystal molecules.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \varepsilon_{\perp} \times \mathbf{I} + (\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_{//}) \times (\mathbf{n} \otimes \mathbf{n}),$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \varepsilon_{\perp} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + (\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_{//}) \times \begin{pmatrix} n_x^2 & n_x n_y & n_x n_z \\ n_x n_y & n_y^2 & n_y n_z \\ n_x n_z & n_y n_z & n_z^2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中 \mathbf{I} 为单位矩阵, $\mathbf{n} \otimes \mathbf{n}$ 为 \mathbf{n} 的并矢, 这里设置的电场处于 xoz 平面, 则 $n_x = \sin\alpha$, $n_y = 0$, $n_z = \cos\alpha$. α 是液晶指向相对于 z 轴 (电场方向) 的倾斜角 (见图 3), 因此 (2) 式可以化简为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{//} \sin^2\alpha + \varepsilon_{\perp} \cos^2\alpha & 0 & \frac{1}{2} (\varepsilon_{//} - \varepsilon_{\perp}) \sin 2\alpha \\ 0 & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ \frac{1}{2} (\varepsilon_{//} - \varepsilon_{\perp}) \sin 2\alpha & 0 & \varepsilon_{//} \cos^2\alpha + \varepsilon_{\perp} \sin^2\alpha \end{bmatrix}. \quad (3)$$

在 CST Studio Suite 中不可能模拟依赖于应用偏置场的 LC 导频方向, 偏置电压 V_{bias} 与倾斜角度 α 通过 Fredericks 电池模型联系起来, 通过调整 (3) 式中 α 的值, 即可实现偏置电压 V_{bias} 在 $0 - V_{th}$ 之间的变化^[22]. 其中使液晶分子开始偏转的电压 V_a 与所选液晶材料的本身参数 K_{11} 有关^[22]:

$$V_a = \pi \sqrt{\frac{K_{11}}{\varepsilon_0 \Delta\varepsilon}}. \quad (4)$$

而阈值电压 V_{th} 可以计算一维情况下的指向矢分布所需的微分方程. 该方程可以由 Euler-Lagrange^[23,24] 方程推导得到:

$$\frac{\varepsilon_0 \Delta\varepsilon E_z^2}{K_{11}} \sin\theta \cos\theta - \frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} = \frac{V_{th}^2}{V_a^2} \pi^2 \sin\theta \cos\theta - \frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} = 0, \quad (5)$$

其中, 偏置电压 V_{bias} 可以通过场强 E_z 来表示; 扭矩 $\tilde{z} = z/d$, d 为液晶层的厚度. 电势表达式为^[25]

$$\varphi = \int_0^1 \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r,zz}(\tilde{z})} D_z d\tilde{z}, \quad (6)$$

其中, $\varepsilon_{r,zz}(\tilde{z}) = \varepsilon_{r,\perp} \cdot \sin[\theta(\tilde{z})] + \varepsilon_{r,\parallel} \cdot \cos[\theta(\tilde{z})]$, D_z 为常数^[25].

3 性能分析

采用 CST Studio Suite 软件对器件性能进行仿真分析, 太赫兹波沿 z 轴负方向垂直入射, 施加电场方向沿 z 轴负方向. 本文主要研究的性能参数为插入损耗 (insertion loss, IL)、相移量与品质因数. 插入损耗定义为

$$\gamma = -20 \lg |T|, \quad (7)$$

其中, T 表示透射系数. 移相器品质因数 (FOM) 定义为最大相移量与插入损耗之间的比值^[26]:

$$F_q = \frac{\Delta\varphi_{\text{max}}}{\gamma}. \quad (8)$$

仿真计算得到的太赫兹移相器的透射曲线和插入损耗如图 4 所示, 器件在 1.68—1.78 THz 频段内的透射系数在偏置电压 $V = 0$ 与 $V = V_{\text{th}}$ 时均大于 0.94: $V = 0$ 时透射系数为 0.941; $V = V_{\text{th}}$ 时透射系数为 0.958. 在 1.68—1.78 THz 频段内的插入损耗值均小于 0.55 dB: $V = 0$ 时的插入损耗小于 0.53 dB; $V = V_{\text{th}}$ 时的插入损耗小于 0.37 dB. 这表明器件在不同偏置电压工作下透射系数的变化较稳定, 且在不同偏压下的损耗可控, 器件能够维持稳定工作, 满足所需移相器设计的性能要求.

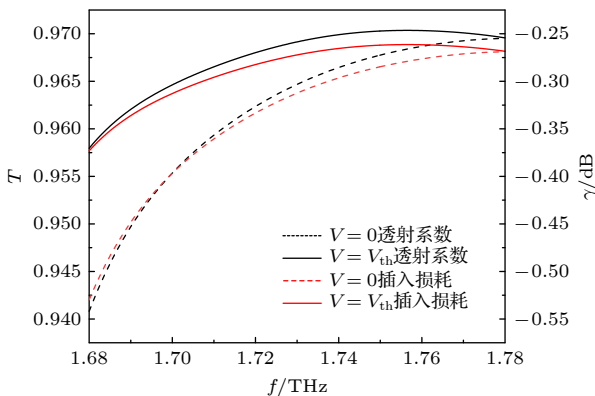


图 4 $V = 0$ 与 $V = V_{\text{th}}$ 时, 太赫兹移相器的太赫兹波透射曲线和插入损耗

Fig. 4. Terahertz wave transmission curve and insertion loss of the terahertz phase shifter when $V = 0$ and $V = V_{\text{th}}$.

图 5(a) 给出了太赫兹移相器在工作频段范围内的相移曲线, 可以看出, 设计的太赫兹移相器在频率为 1.7315 THz 的相移量为 352.129° , 频率为 1.7396 THz 的相移量为 352.625° , 并且在 1.7315—1.7396 THz (带宽为 8.1 GHz) 频段内相移量大于 352° . 太赫兹波穿过移相器的透射系数如图 5(b) 所示, 在该频段内太赫兹波的透射系数大于 0.96, 此时对应的插入损耗在 $V = 0$ 时为 0.35 dB, 施加电压达到阈值电压时, 插入损耗为 0.26 dB. 根据传输介质阻抗匹配原理^[27,28] 和 RLC 等效模型^[17], 该器件在 1.7315, 1.7396 THz 下的相对阻抗分别为 $1.039 + 0.02057j$, $1.033 + 0.01832j$ (在 Smith 圆图上对应的传输系数约为 0.83 和 0.87). 此时实部接近 1, 虚部接近 0, 说明入射波在与阻抗匹配时, 液晶层与上下层之间的匹配程度更高, 器件的反射较小, 因此透射系数相对较大. 根据 (7) 式可知, 器件的透射系数越大, 插入损耗越低.

不同偏转角 α 对应的相移曲线和透射系数分别如图 6(a), (b) 所示. 当施加不同偏置电压时,

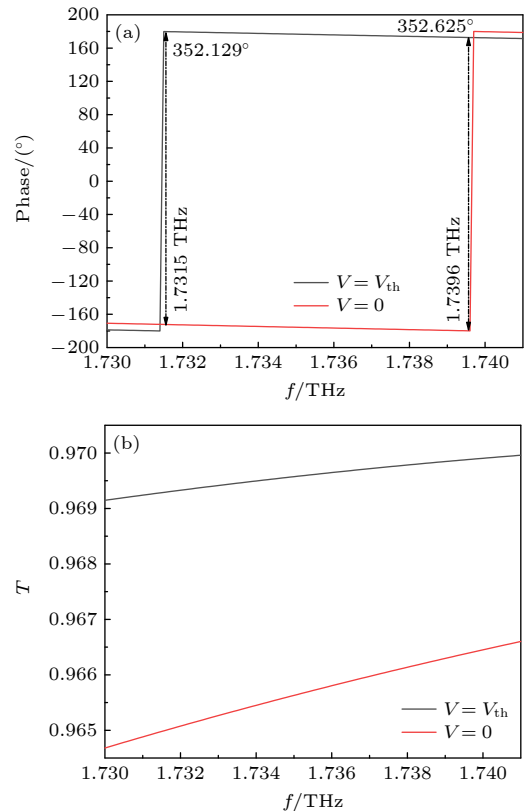


图 5 太赫兹移相器在工作频段 1.731—1.740 THz 内的相移曲线 (a) 和透射系数 (b)

Fig. 5. Phase shift curve (a) and transmission coefficient (b) of the terahertz phase shifter in the working frequency range of 1.731—1.740 THz.

液晶分子不同偏转角会对应不同的介电张量, 为了方便计算介电张量的值, 这里 α 分别取 0° , 15° ,

30° , 45° , 60° , 75° , 90° . 图 6(a) 表明在液晶分子处于不同偏转角 α 时, 太赫兹移相器在工作频段范

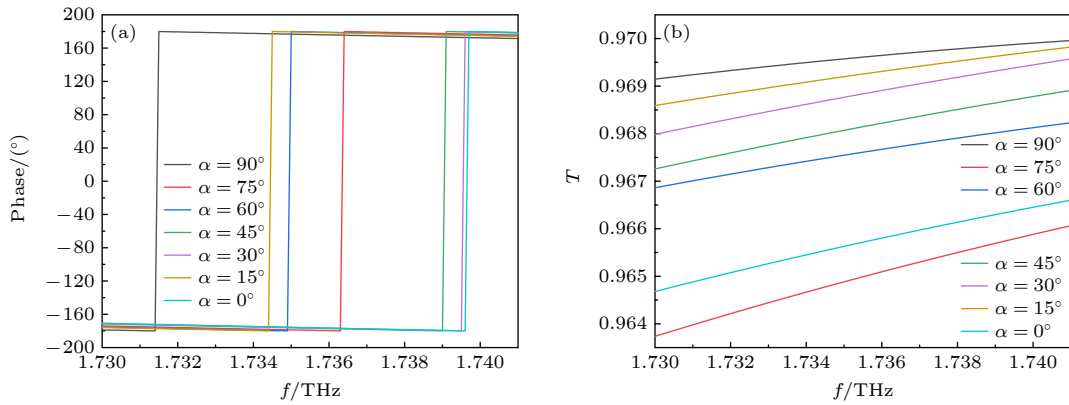


图 6 太赫兹移相器在工作频段范围内不同 α 对应的相移曲线 (a) 和透射系数 (b)

Fig. 6. Phase shift curve (a) and transmission coefficient (b) of the terahertz phase shifter in the working frequency.

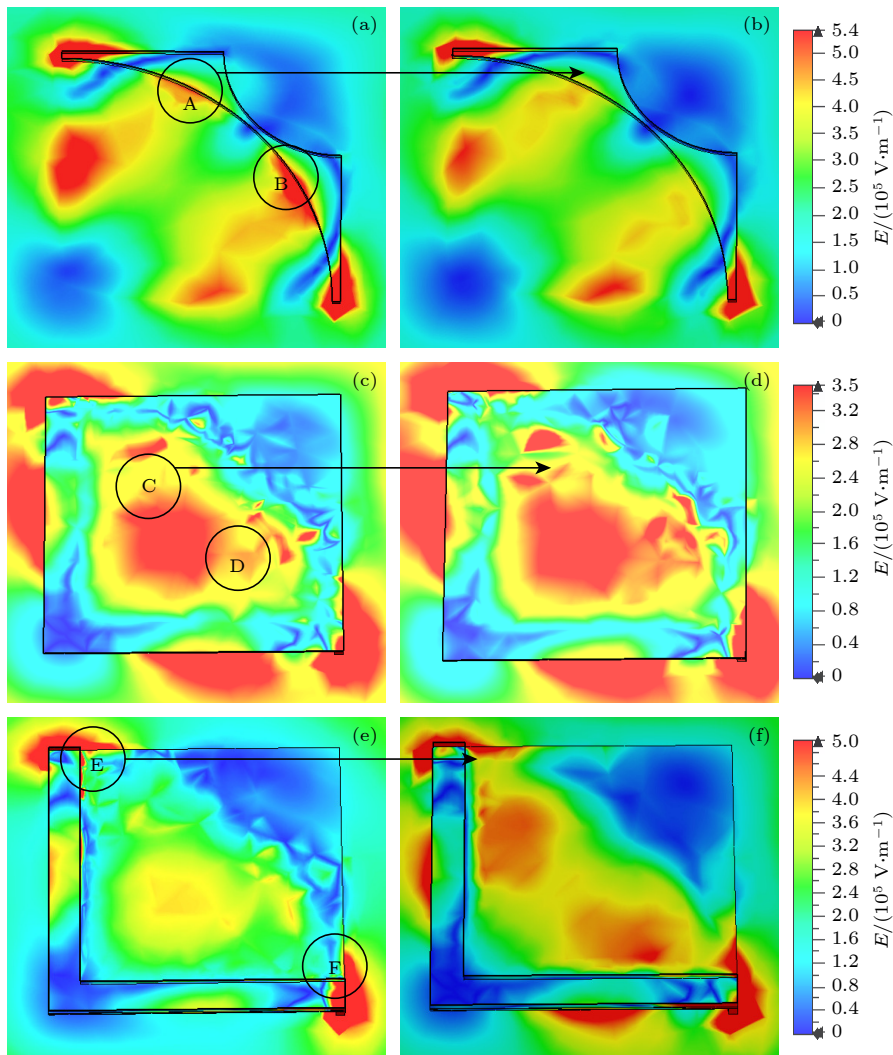


图 7 1.7315 THz 时 3 层结构电场能量分布图, 包括下金属层 (a) $V = 0$, (b) $V = V_{th}$; 液晶层 (c) $V = 0$, (d) $V = V_{th}$; 上金属层 (e) $V = 0$, (f) $V = V_{th}$

Fig. 7. Electric field energy distribution diagram of the three-tier structure at 1.7315 THz. Lower metal layer: (a) $V = 0$, (b) $V = V_{th}$; liquid crystal layer: (c) $V = 0$, (d) $V = V_{th}$; upper metal layer: (e) $V = 0$, (f) $V = V_{th}$.

围内只发生频点相位的突变,且随着角度 α 的增加,相位突变的工作频点也从 1.7396 THz ($V = 0$) 减小至 1.7310 THz ($V = V_{th}$),并未超出工作频段.此外,移相器的相移带宽逐渐变宽,带宽从 0.1 GHz ($\alpha = 30^\circ$) 拓宽至 8.5 GHz ($\alpha = 90^\circ$),而在 $\alpha = 45^\circ$, 频率为 1.7391 THz 时,太赫兹移相器的最大相移量为 359.4° (此时器件的带宽为 0.5 GHz).因此通过调整不同的偏置电压,改变 α 从 0° — 90° 的值,即可实现在工作频段 1.7310—1.7396 THz 达到所需的不同频点、不同带宽以及不同相移量内要求的移相器;而图 6(b) 表明在液晶分子处于不同偏转角 α 时,在工作频段 1.7310—1.7396 THz (带宽为 8.5 GHz) 该太赫兹移相器的透射率始终大于 96.3%.

不同电压下太赫兹移相器上金属层、液晶层、下金属层的电场能量分布如图 7(a)—(e) 所示,其中图 7(a), (c), (e) 和图 7(b), (d), (f) 分别表示在 1.7315 THz 下液晶分子未开始偏转和完全偏转时的电场能量分布图.与未偏转状态比较,液晶层在区域 C, D 的电场能量明显增强,且金属层上下与液晶层交界的边缘处 E, F 区域的电场能量也有所增强,说明这两处的液晶分子在受到外加偏置电压的作用发生偏转,但左下与右上处的电场能量分布较少.根据仿真的电场能量图分析产生这种现象的原因可能是:本设计施加的电场为 xoz 平面,而超材料结构的非对称性设计在施加偏置电压时,左上和右下金属处金属层相互堆叠,导致电场能量较强,此处的液晶分子可以完全按照理想情况实现角度的偏转;而在其他地方,电场可能无法均匀分布至整个液晶盒的上下空间,导致在电场强度较弱的角落,部分液晶分子无法在施加偏置电压时发生旋转,无法达到理论上介电张量值,因此也会影响到

器件的相移性能.

为了进一步分析太赫兹波入射角 θ 对太赫兹移相器移相性能的影响,将研究计算 $\theta = 0$ — 80° 时,在 1.731—1.740 THz 内该移相器的相移量.对 θ 进行扫频分析,扫频的步长为 $\theta = 10^\circ$,仿真得到的相移曲线和透射系数如图 8(a)—(d) 所示.图 8(a), (b) 表明 θ 不同时,导致太赫兹移相器在所预定工作频段的相移量大大减少;图 8(c), (d) 透射曲线的变化较之前的透射曲线幅度相差较大,透射系数也大幅下降;而图 8(e) 显示当 $\theta = 50^\circ$ 时,移相器的工作频率区间从 1.7315 THz 红移至 1.7268 THz,相移量从 352.129° 提高为 353.553° ,总工作带宽依然为 8.1 GHz.如果能以太赫兹波垂直入射 ($\theta = 0^\circ$) 的条件下,施加偏置电压的同时调整器件的角度,使入射光形成某些特定角度,即可达到更大的带宽与相移性能,图 8(e) 从 $V = 0, \theta = 0^\circ$ 的工作带宽 8.1 GHz 拓宽至 $V = V_{th}, \theta = 50^\circ$ 的 12.8 GHz 工作带宽,且在 1.7268—1.7396 THz 的频段内相移量大于 347° .综上所述,不同太赫兹波入射角度对于器件整体透射率和相移量的影响较大,因此为了得到更好的透射系数和工作频段范围内的最大相移量,则需要选取合适的太赫兹波入射角度.

表 2 为本文设计的太赫兹移相器与其他移相器性能参数 [11,13–15,22] 的对比.可以看出,本文设计的液晶移相器在插入损耗、品质因子上较优于已有的基于液晶的移相器器件 1 个数量级,在工作带宽内的相移量 352° 也远远大于大部分器件.此外,相较于文献 [15, 22],设计的移相器工作带宽 8.1 GHz 较低,但比文献 [13] 的 4.5 GHz 略大.综上所述,该液晶移相器相较于其他基于液晶的移相器,具有结构简单、插入损耗较小、相移量较大以及利于实现外部调控等特点,具有一定的优势.

表 2 移相器主要性能参数比较

Table 2. Comparison of main performance parameters of phase shifters.

文献	γ/dB	$\Delta\varphi_{\max}/(^\circ)$	工作频率 f	带宽/GHz	相移量/ $(^\circ)$	F_q
本文	0.30	352.625	1.7396 THz	8.1	352	1175.40
[11]	—	70.000	1.000 THz	—	70	—
[13]	—	306.00	124.5 GHz	4.5	300	—
[14]	3.09	180.00	0.400 THz	—	180	58.25
[22]	5.50	387.00	25.00 GHz	10.0	—	70.36
[15]	2.00	355.37	0.736 THz	22.0	350	175.00

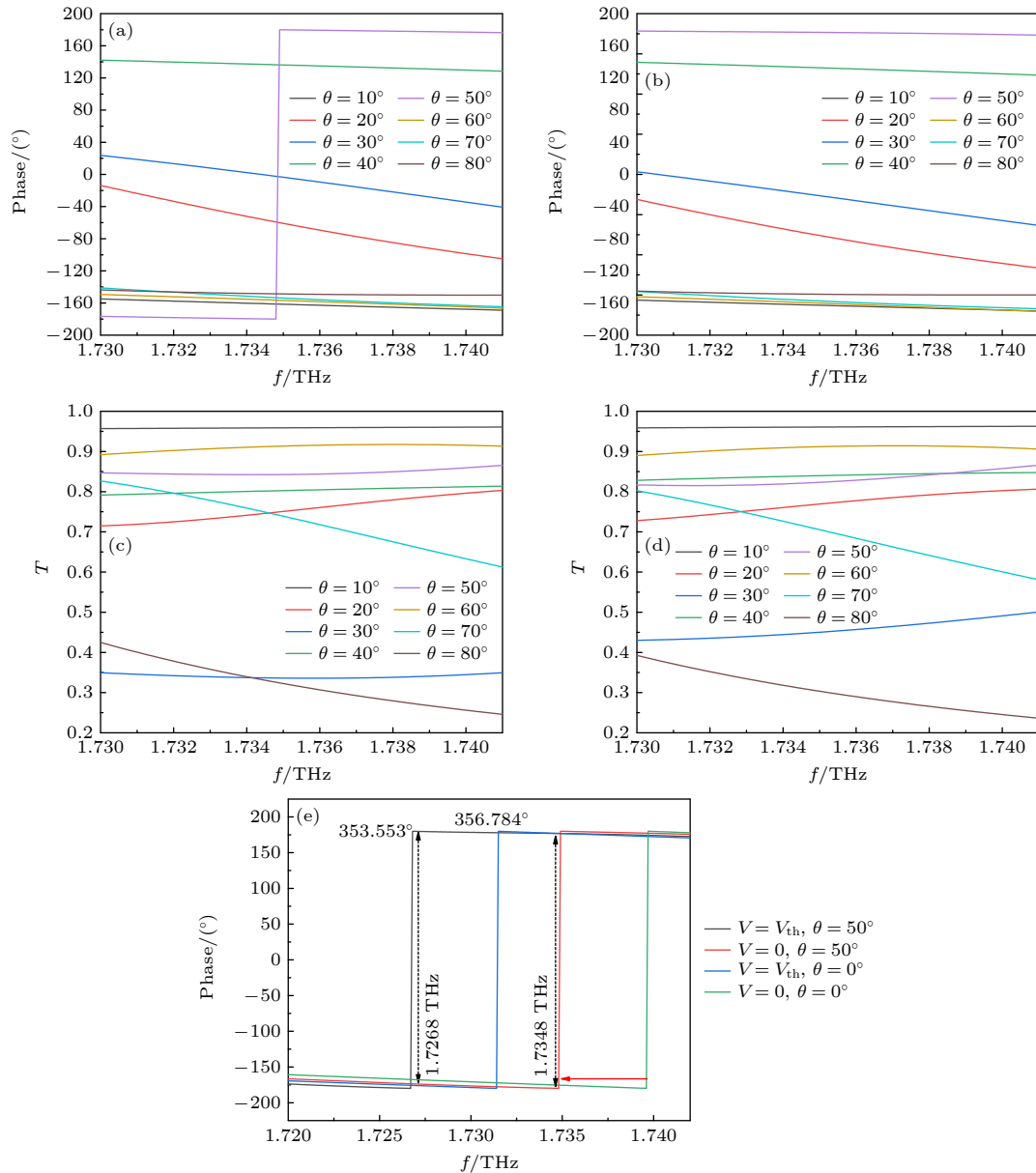


图 8 $\theta = 10^\circ\text{--}80^\circ$, 在 1.731—1.740 THz 内的 (a), (b) 相移曲线和 (c), (d) 透射系数 (a) $V = 0$; (b) $V = V_{th}$; (c) $V = 0$; (d) $V = V_{th}$; (e) $\theta = 50^\circ$ 时太赫兹移相器的相移量

Fig. 8. (a), (b) Phase shift curve and (c), (d) transmission coefficient with $\theta = 10^\circ\text{--}80^\circ$ at 1.731—1.740 THz: (a) $V = 0$; (b) $V = V_{th}$; (c) $V = 0$; (d) $V = V_{th}$; (e) phase shift amount of the terahertz phase shifter at $\theta = 50^\circ$.

4 结 论

本文提出了一种基于超材料简易多层结构的太赫兹波液晶移相器, 通过施加不同大小的偏置电压来改变液晶材料的有效折射率, 从而实现动态调控相位的目的. 仿真结果表明, 该设计在 1.7315—1.7396 THz (带宽为 8.1 GHz) 频率范围内可以达到 352° 的相移量, 且整体插入损耗低至 0.3 dB. 通过对器件上、下金属层与液晶层厚度等参数的仿真优化, 以及对入射角度及电场分布的分析可知, 调

整偏转角 α 与入射角 θ , 能使太赫兹移相器在预定工作段内的动态调制获得较好的效果. 与传统的移相器相比, 该移相器具有结构简单、插入损耗低、相移量较大、便于动态调控的优点, 同时可以降低器件加工工艺的难度和复杂性. 有望在太赫兹波雷达、相控阵天线、通信、传感领域具有广阔的应用前景.

参考文献

[1] Clough B, Dai J M, Zhang X C 2012 *Mater. Today* **15** 50

- [2] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207405
- [3] Chen J, Yang M S, Li Y T, Cheng D K, Guo G L, Jiang L, Zhang H T, Song X X, Ye Y X, Ren Y P, Ren X D, Zhang Y T, Yao J Q 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 247802 (in Chinese) [陈俊, 杨茂生, 李亚迪, 程登科, 郭耿亮, 蒋林, 张海婷, 宋效先, 叶云霞, 任云鹏, 任旭东, 张雅婷, 姚建铨 2019 物理学报 **68** 247802]
- [4] Vieweg N, Fischer B M, Reuter M, Kula P, Dabrowski R, Celik M A, Frenking G, Koch M, Jepsen P U 2012 *Opt. Express* **20** 28249
- [5] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, Beere H E, Linfield E H, Davies G A, Ritchie D A, Lotti R C, Rossi F 2002 *Nature* **417** 156
- [6] Jansen C, Wietzke S, Peters O, Scheller M, Vieweg N, Sallhi M, Krumbholz N, Jördens C, Hochrein T, Koch M 2010 *Appl. Opt.* **49** E48
- [7] Shaltout A M, ShalaeV V M, Brongersma M L 2019 *Science* **364** 3100
- [8] He Q, Sun S, Zhou L 2019 *Research* **2019** 1849272
- [9] Hashemi M R, Cakmakyapan S, Jarrahi M 2017 *Rep. Prog. Phys.* **80** 094501
- [10] Cong L Q 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 157 (in Chinese) [丛龙庆 2021 中国激光 **48** 157]
- [11] Koeberle M, Hoeffle M, Gaebler A, Penirschke A, Jakoby R 2011 *International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves* Houston, The United States, October 2–7, 2011 p1
- [12] Jost M, Strunck S, Heunisch A, Wiens A, Prasetiadi A E, Weickmann C, Schulz B, Quibeldey M, Karabey O H, Rabe T, Follmann R, Koether D, Jakoby R 2015 *European Microwave Conference* Paris, France, September 7–10, 2015 p1260
- [13] Gao S, Yang J, Wang P, Zheng A, Lu H, Deng G, Lai W, Yin Z 2018 *Appl. Sciences* **8** 2528
- [14] Inoue Y, Kubo H, Shikada T, Moritake H 2019 *Macromol. Mater.* **304** 1800766
- [15] Long J, Li J S 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 074201 (in Chinese) [龙洁, 李九生 2021 物理学报 **70** 074201]
- [16] Zhang X, Fan F, Zhang C Y, Ji Y Y, Wang X H, Chang S J 2020 *Opt. Mater. Express* **10** 282
- [17] Gao S 2020 *M. S. Thesis* (Hefei: Hefei University of Technology) (in Chinese) [高盛 2020 硕士学位论文 (合肥: 合肥工业大学)]
- [18] Yu X 2018 *M. S. Thesis* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [于雪 2018 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [19] Yaghmaee P, Karabey O H, Bates B, Fumeaux C, Jakoby R 2013 *Int. J. Antenn. Propag.* **10** 824214
- [20] Gennes P G D, Alben R 1975 *Phys. Today* **28** 54
- [21] Gaebler A, Moessinger A, Goelden F, et al. 2009 *Int. J. Antenn. Propag.* **6** 876989
- [22] Nickel M, Jiménez-Sáez A, Agrawal P, Gadallah A, Malignaggi A, Schuster C, Reese R, Tesmer H, Ploat E Wang D W, Schumacher P, Jakoby R 2020 *IEEE Access* **8** 77833
- [23] Blinov L M, Chigrinov V G 1994 *Electrooptic Effects in Liquid Crystal Materials* (New York: Springer Sci. Business Media) p1
- [24] Collings, Peter J 1998 *Am. J. Phys.* **66** 551
- [25] Gölden F 2010 *Ph. D. Dissertation* (Hesse: Technische Universität Darmstadt)
- [26] Wang J Q 2020 *M. S. Thesis* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology) (in Chinese) [王俊卿 2020 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [27] Smith D R, Dalichaouch R, Kroll N, Schultz S, McCall S L, Platzman P M 1993 *J. Opt. Soc. Am. B* **10** 314
- [28] Pozar D M 2012 *URSI Radio Science Bulletin* **342** 26

Terahertz liquid crystal phase shifter based on metamaterial composite structure*

Chen Wen-Bo¹⁾ Chen He-Ming^{2)†}

1) (*College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)

2) (*Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)

(Received 27 December 2021; revised manuscript received 26 April 2022)

Abstract

In order to solve the problems of large, uncontrollable insertion loss and small phase shift of the existing terahertz phase shifters, in this work a kind of terahertz phase shifter realized by a simple metamaterial composite structure is designed. The device is composed of four layers in structure, they from top to bottom, being an L-shaped metal resonance layer, a liquid crystal layer, a bow-shaped metal layer, and a quartz substrate layer. By applying a bias voltage to the upper metal layer and the lower metal layer, the deflection angle α of the director of liquid crystal molecules in the liquid crystal cell is changed, so that the effective refractive index of the liquid crystal changes, and the phase of the device also changes accordingly, thereby achieving the purpose of dynamic phase control. The performances of the upper metal layer, the lower metal layer and liquid crystal layer are optimized and compared with each other. The performance characteristics of the phase shifter under different values of deflection angle α and different values of incident angle θ are analyzed by frequency domain finite integration method. Through the simulation optimization and comparison of the size of the upper and lower metal layers and the thickness of the liquid crystal layer, the optimum is obtained. The simulation results show that the transmittance of the terahertz liquid crystal phase shifter can reach 0.968 in a frequency between 1.68–1.78 THz, and the insertion loss can be as low as 0.3 dB. When the frequency is 1.7396 THz, the maximum phase shift of the terahertz phase shifter is 352.625° . The phase shift exceeds 352° in a frequency range of 1.7315–1.7396 THz (Bandwidth is 8.1 GHz). This simple metamaterial multilayer structure provides a new method of controlling terahertz waves, and has broad application prospects in terahertz imaging, sensing and other fields.

Keywords: terahertz, metamaterials, liquid crystal phase shifters, dynamic control

PACS: 87.50.U-, 61.30.-v, 81.05.Xj, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.71.20212400

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61571237) and the Natural Science Foundation of the Jiangsu Province, China (Grant No. BK20151509).

† Corresponding author. E-mail: chhm@njupt.edu.cn



基于超材料复合结构的太赫兹液晶移相器

陈闻博 陈鹤鸣

Terahertz liquid crystal phase shifter based on metamaterial composite structure

Chen Wen-Bo Chen He-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 178701 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212400

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212400>

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

相变材料与超表面复合结构太赫兹移相器

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

物理学报. 2021, 70(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201495>

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>

基于双开口金属环的太赫兹超材料吸波体传感器

Double–opening metal ring based terahertz metamaterial absorber sensor

物理学报. 2022, 71(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212303>

太赫兹液晶材料与器件研究进展

Research progress of terahertz liquid crystal materials and devices

物理学报. 2019, 68(8): 084205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182275>

超材料赋能先进太赫兹生物化学传感检测技术的研究进展

Research progress of metamaterials powered advanced terahertz biochemical sensing detection techniques

物理学报. 2021, 70(24): 247802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211752>

烷基环己苯异硫氰酸液晶材料太赫兹波吸收

Terahertz wave absorption for alkylcyclohexyl–isothiocyanatobenzene liquid crystal materials

物理学报. 2019, 68(11): 116102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190209>