

一种实现中红外非对称传输的手征超表面设计

肖桐, 田昌会, 王军, 孟真, 范琦, 高志强, 谢晓伟, 田晓霞
(空军工程大学基础部, 陕西 西安 710051)

摘要: 为了研究手征超表面在中红外波段的非对称传输特性, 设计了一种基于L型结构的手征超表面单元。利用CST电磁软件进行仿真分析, 结果表明在68.92~88.68 THz范围内非对称传输参数大于0.8, 在73.25 THz处非对称传输参数达到极值为0.88, 由此可知该结构在中红外波段具有良好的非对称传输特性; 通过分析表面电流分布和透射场相位分布, 阐明了该手征超表面的极化选择性反射和交叉极化透射机理; 对单元结构手征强弱和非对称传输特性的关系进行了讨论, 并研究了介质层、金属层的厚度以及电磁波入射角度对非对称传输特性的影响。

关键词: 非对称传输; 手征超表面; 线偏振; 中红外

中图分类号: TN213 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)03-0272-07

Chiral Metasurface Designed for the Asymmetric Transmission of the Mid-infrared Band

XIAO Tong, TIAN Changhui, WANG Jun, MENG Zhen, FAN Qi, GAO Zhiqiang, XIE Xiaowei, TIAN Xiaoxia
(Department of Basic Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: To study the asymmetric transmission characteristics of the chiral metasurface in the mid-infrared band, a chiral metasurface unit based on an L-shaped structure is designed. A simulation analysis using CST electromagnetic software reveals that the asymmetric transmission parameter is greater than 0.8 in the range of 68.92-88.68 THz and reaches the extreme value of 0.88 at 73.25 THz. It can be observed that the structure exhibits good performance in terms of asymmetric transmission in the mid-infrared band. The polarization selective reflection and cross-polarization transmission mechanism of the chiral metasurface are clarified by analyzing the surface current distribution and phase distribution of the transmission field. The relationship between the chiral strength of the unit structure and the asymmetric transmission characteristics is also discussed. The influence of the thickness of the dielectric and metal layers and the incident angle of the electromagnetic wave on the asymmetric transmission characteristics is examined.

Key words: asymmetric transmission, chiral hypersurface, linear polarization, mid-infrared

0 引言

随着红外科学与技术的发展, 人们对控制红外辐射偏振状态的能力需求越来越高。相比于红外辐射的强度、相位、光谱等参量, 偏振参量携带了其独有的目标特征信息, 在红外成像、红外通信、红外预警、红外遥感等方面有着十分广泛的应用。偏振探测技术与传统的辐射学和光度学探测技术相比, 可以获取目标红外辐射的偏振强度值、偏振角、偏振度、偏振椭圆率以及辐射率等参数, 能够使被探测目标的信息量

更加充分^[1]。因此, 实现红外辐射偏振状态的精确操控对于红外技术有着重要意义。传统的偏振态控制主要由半波片和二色性晶体实现, 但这些器件往往尺寸较大, 不利于光子集成, 而且损耗大、效率较低^[2-3]。此外, 绝大部分自然界材料一般具有固定的折射率, 而且介电常数 $\epsilon > 1$ 、磁导率 $\mu \geq 1$ 。因此很长一段时间以来, 人们对电磁波的研究都只能局限在一个非常有限的范围内, 直到人们提出人工电磁材料(超材料)的概念^[4]。

超材料是指在亚波长尺度内对一种或多种亚波

收稿日期: 2020-07-08; 修订日期: 2020-07-28.

作者简介: 肖桐(1993-), 男, 回族, 宁夏固原人, 硕士研究生, 主要从事红外辐射特性与探测技术研究。E-mail: xt415574621@163.com.

通信作者: 田昌会(1963-), 男, 陕西合阳人, 教授, 博士, 主要从事红外辐射特性与探测技术研究。E-mail: tchtyb001@163.com.

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JZ-40)。

长单元按照一定组合方式进行空间重塑,从而能够实现电磁参数人为设计并加以控制的一类新型人工电磁材料^[5]。而基于平面手征结构的超材料因其可以实现负折射率,具有巨大的旋光性、圆二色性以及不对称传输等特性引起了人们极大的关注^[6]。平面手征是指:一个平面结构不能通过平移和旋转操作而与它的镜像完全重合^[7]。作为超材料结构的一种,平面手征结构由于其表现出的独特传输性质而受到越来越多的关注,其中不对称传输现象为光的偏振控制提供了新的思路。2006年, Fedotov 等^[8]首次发现平面手征结构具有不对称传输的奇特性质——即入射方向相反的极化波具有不同透射波强度。

基于平面手征结构超材料的非对称传输器件是当下研究热点之一。利用非对称传输特性可以实现许多定制功能器件,如光隔离器、光循环器、圆(线)极化器、偏振旋转器、偏振谱滤波器以及手性开关等,且平面手征超表面可以做到小型化与集成化。但是现有的关于非对称传输的研究主要集中在微波^[9-10]以及太赫兹波段^[11-12],在红外波段研究较少。2010年, Menzel C.等^[13]首次通过三维手征结构实现了近红外波段内线偏振的不对称传输,完全打破了传输方向的对称性,非对称传输参数为0.2左右;2015年,刘德军等^[14]利用 H-h 型手征结构实现了 THz 波段的圆偏振和线偏振的非对称传输,非对称传输参数最大为0.56;2017年,邓飞唐等^[15]采用3层金属两层介质的结构,在近红外波段实现了非对称传输参数达到0.9的非对称传输,但相比之下该结构较为复杂。目前尚未有针对中红外大气窗口的非对称传输结构设计的研究报道。本文设计了一种在中红外波段内实现超宽带非对称传输的 L 型双面手征结构,该结构为上下两层金属贴片的三明治结构,相比现有报道的工作在近红外波段的3层金属两层介质的结构更加简单,可以实现 68.92~88.68 THz 范围内(带宽 19.76 THz)非对称传输参数大于0.8,峰值为0.88。

1 线极化波非对称传输理论分析

假设平面手征结构位于 XY 平面,入射线极化平面波沿 +Z 方向垂直入射,则入射波电场可表示为:

$$E^{\text{in}}(r,t) = \begin{pmatrix} I_x \\ I_y \end{pmatrix} e^{j(\omega t - kz)} \quad (1)$$

透射电磁波的电场为:

$$E^{\text{tr}}(r,t) = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} e^{j(\omega t - kz)} \quad (2)$$

式中: I_x 、 I_y 和 T_x 、 T_y 分别为入射波电场和透射波电场在 X、Y 方向的分量; $e^{j(\omega t - kz)}$ 为相位项。

对于上述式(1)和式(2)可以用电磁场传输方程联系起来,即:

$$E_i^{\text{tr}} = t_{ij} E_j^{\text{in}} \quad (3)$$

式中:下标 j 和 i 分别表示入射波和透射波的极化状态,既可以是 x 极化,也可以是 y 极化,由式(1)、(2)和(3)可以得出,透射波与入射波之间的传输关系为:

$$\begin{pmatrix} E_x^{\text{tr}} \\ E_y^{\text{tr}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{xx} & t_{xy} \\ t_{yx} & t_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x^{\text{in}} \\ E_y^{\text{in}} \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} E_x^{\text{in}} \\ E_y^{\text{in}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

可以得到线极化电磁波的琼斯 \mathbf{T} 矩阵,即传输矩阵为:

$$\mathbf{T}_{\text{lin}}^+ = \begin{pmatrix} t_{xx} & t_{xy} \\ t_{yx} & t_{yy} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{T}_{\text{lin}}^+$ 表示沿 +Z 方向传播的线极化波的传输矩阵; t_{xx} 、 t_{yy} 表示同极化透射系数; t_{xy} 、 t_{yx} 表示交叉极化透射系数。同时,根据互易定理,当电磁波沿 -Z 方向入射时,式(5)中 t_{xy} 与 t_{yx} 的幅值不仅会交换,而且会产生 180° 的相移,此时传输矩阵变化为:

$$\mathbf{T}_{\text{lin}}^- = \begin{pmatrix} t_{xx} & -t_{yx} \\ -t_{xy} & t_{yy} \end{pmatrix} \quad (6)$$

根据式(5)、(6)中 $\mathbf{T}_{\text{lin}}^+$ 和 $\mathbf{T}_{\text{lin}}^-$ 两个传输矩阵的区别,使用非对称传输参数 Δ 来表征非对称传输特性的强弱程度,定义 Δ 为:

$$\Delta = |t_{yx}|^2 - |t_{xy}|^2 \quad (7)$$

当 Δ 不为零,即 $t_{yx} \neq t_{xy}$ 时表现出非对称传输特性,因此对于产生线极化波非对称传输的结构有:

$$\Delta_{\text{lin}}^{(x)} = |t_{yx}|^2 - |t_{xy}|^2 = -\Delta_{\text{lin}}^{(y)} \quad (8)$$

式中: $\Delta_{\text{lin}}^{(x)}$ 和 $\Delta_{\text{lin}}^{(y)}$ 分别对应于 x 和 y 极化电磁波入射时的非对称传输参数。

2 结构设计

目前常见的手征结构有 H-h 型结构^[14]、鱼鳞形结构^[8]、矩形环开口型结构以及更为复杂的三层金属两层介质型结构^[15],通过对各种形式手征结构的总结和分析,本文选择了结构简单、易于实现且手征较强的 L 型结构。如图 1 所示,所设计的单元结构为双面三明治结构,即上下两层 L 型金属贴片以及中间介质层组成。结构主体为可以紧密排列的四边形,上下两层金属贴片为尺寸参数相同的 L 型,由于 L 型的长臂

和短臂长度不同, 故两面金属贴片分别具有二维手征。每个结构单元背面金属贴片由正面贴片先在平面内顺时针旋转 90° , 再绕纵轴旋转 180° 而得, 如图 2 所示。这样得到的结构单元正反两面都具有手征。

该结构贴片材料选用金属金, 金在红外波段满足 Drude 模型, 其等离子体频率 $\omega_p/2\pi=2176$ THz, 碰撞频率 $\gamma/2\pi=6.5$ THz^[16]。贴片之间为介质层, 选用 $0.25\sim 9\ \mu\text{m}$ 宽波段红外透射材料 Y_2O_3 (三氧化二钇), 其介电常数为 3.06, 损耗角正切值为 0.001。优化后的结构参数为: $a=0.7\ \mu\text{m}$, $L_1=0.69\ \mu\text{m}$, $L_2=0.45\ \mu\text{m}$, $w=0.1\ \mu\text{m}$, $d=0.24\ \mu\text{m}$, $d_m=0.1\ \mu\text{m}$ 。

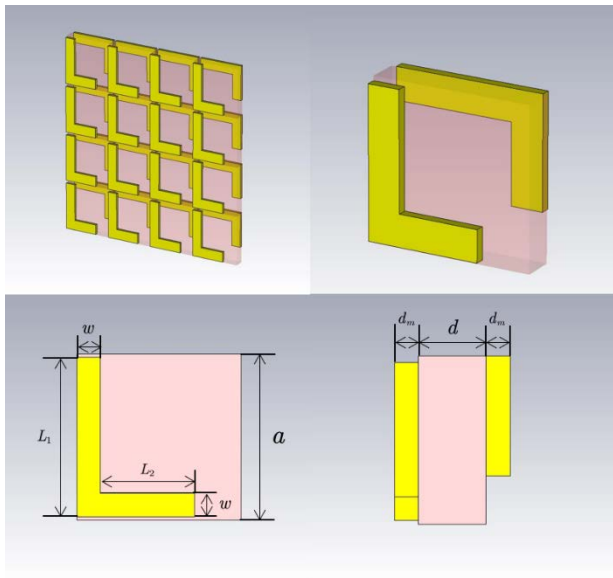


图 1 单元结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of unit structure

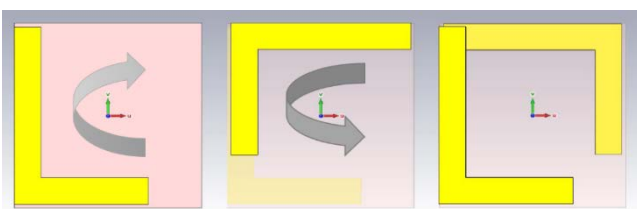


图 2 三维结构形成过程

Fig.2 The formation process of the 3D structure

3 仿真结果与分析

3.1 仿真结果

在 CST Microwave Studio 仿真软件中, 建立图 1 所示的结构模型, X、Y 方向上的边界条件设置为 unit cell, Z 方向的边界条件设置为 open (add space), 采用频域求解器。定义红外辐射从 +Z 方向入射到 -Z 方向出射为正向入射, 反之为反向入射, 在 $60\sim 100$ THz 内对 y 和 x 方向极化波正向入射进行数值仿真并提取 s 参数, 得到透射矩阵的 4 个参量, 如图 3 所示。

由图 3 可见, 在 $60\sim 100$ THz 内, 交叉极化透射系数 $t_{yx}\neq t_{xy}$, 说明该结构可以实现针对线偏振的非对称传输。通过数据分析可以得出, 在 $69.00\sim 88.48$ THz 范围内, $t_{xy}>0.9$ 同时 $t_{yx}<0.08$, 这表明当 y 极化辐射正向垂直入射时, 大部分透射波被交叉极化为垂直极化方向的辐射; 而当相同极化方向的辐射反向垂直入射时极化方向则几乎不会被改变, 从而该结构表现为针对线极化波的非对称传输。

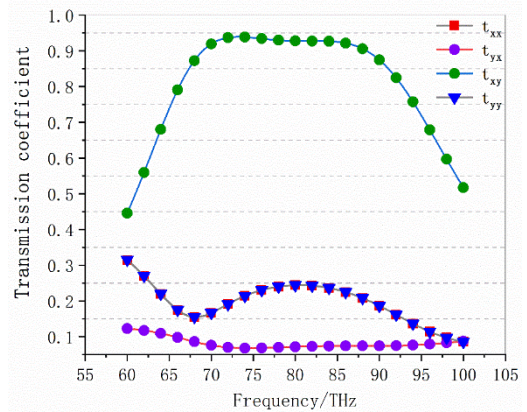


图 3 正向入射透射系数

Fig.3 The transmission coefficient of forward incidence

利用式(8)计算出非对称传输参数, 如图 4 所示。可以看到, 在 $65.84\sim 93.40$ THz 范围内, $\Delta_{\text{lin}}^{(y)}>0.6$, 带宽达到 27.56 THz, 其中在 $68.92\sim 88.68$ THz 范围内 $\Delta_{\text{lin}}^{(y)}>0.8$, 带宽达到 19.76 THz, 并在 73.25 THz 处 $\Delta_{\text{lin}}^{(y)}$ 达到极值为 0.88。这表明本文所设计的手征超材料结构在超宽带范围内实现了良好的非对称传输效果。

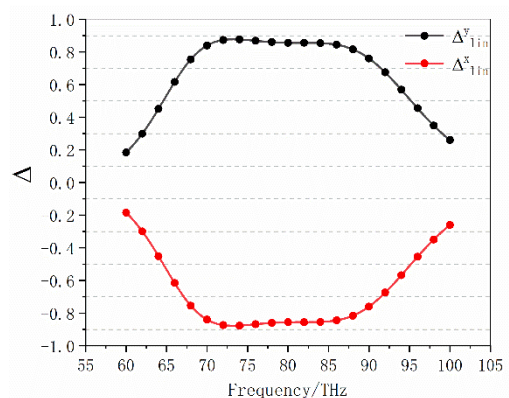


图 4 非对称传输参数

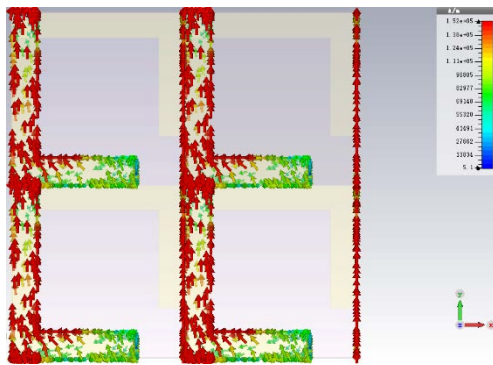
Fig.4 Asymmetric transmission parameters

3.2 非对称传输机理分析

非对称传输包含同一极化方向的波从结构正面入射时被反射而从反面入射时大部分透射并发生交叉极化两个方面, 在此不失一般性地以 y 方向极化波从正、反两面垂直入射为例对非对称传输机理进行分析。

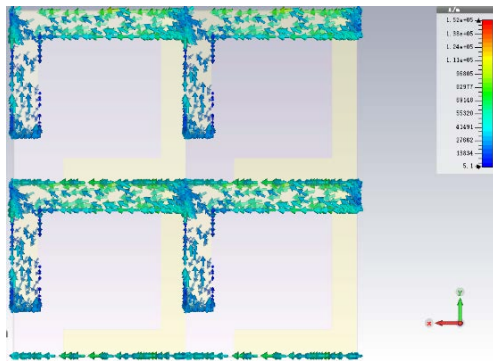
3.2.1 正面入射的反射机理

在 CST 软件中提取非对称传输参数取得峰值时的频点 73.25 THz 处表面电流分布如图 5 所示。图 5(a) 显示正面手征结构长臂上电流强度远大于短臂以及图 5(b)所示的反面电流强度。 y 方向的极化波激发长臂上的电子而产生电流,使得该方向的极化波发生反射。因此整体结构可以等效为以长臂金属条为主的透振方向为 X 方向的亚波长金属光栅。为了验证这一机理解释,对仅有正面 L 型金属贴片的结构进行仿真计算,得到图 6 所示的 y 极化波正向垂直入射的反射系数。由图 6 可知在 60~100 THz 范围内仅有正面 L 型结构便可实现 y 极化波的反射,这与亚波长金属光栅的等效解释是一致的。



(a) 正面单元结构表面电流

(a) Surface current of the front element structure



(b) 反面单元结构表面电流

(b) Surface current of reverse element structure

图 5 75.25 THz 处表面电流分布

Fig.5 Surface current distribution at 75.25 THz

3.2.2 反面入射的交叉极化透射机理

图 7 展示了透射相位为 0° 时,在峰值频率 73.25 THz 处, y 方向极化波在离表面结构相同距离时的入射场和透射场的电场分布,揭示了极化转换的演变过程。

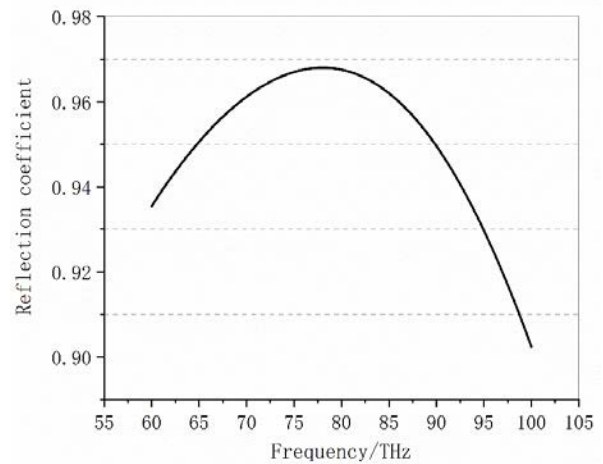


图 6 仅正面 L 型结构 y 极化波正向垂直入射的反射系数

Fig.6 The reflection and transmission coefficient of a single L structure with y polarized wave incident vertically

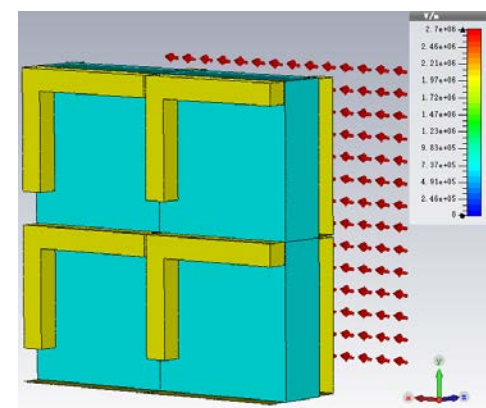
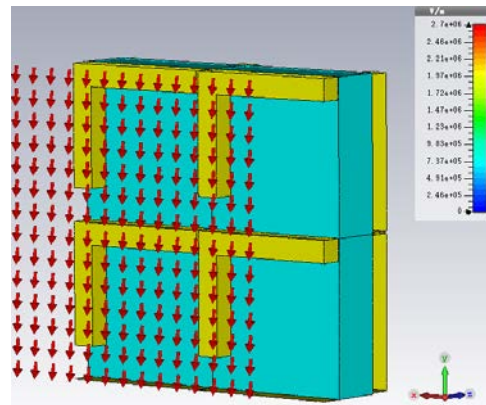


图 7 入射场和透射场的电场分布

Fig.7 Electric field distribution of incident field and transmission field

为了进一步说明交叉极化透射的物理机理,在 XOY 平面内建立 $u-v$ 坐标系,与原 $X-Y$ 坐标夹角为 45° ,如图 8 所示。

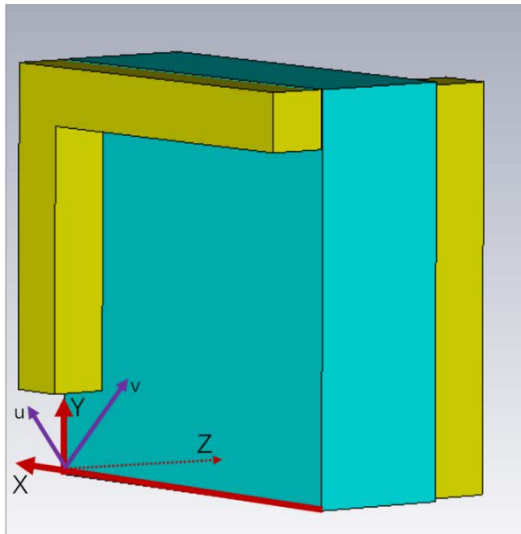


图 8 $u-v$ 坐标系的建立

Fig.8 Establishment of $u-v$ coordinate system

现分别对 u 、 v 极化方向的入射情况进行仿真实验，考察 u 、 v 极化入射时交叉极化透射相位，如图 9 所示。图中标出了频率点 65 THz、77.5 THz 以及 90 THz 处的相位角度，可以看到这几个频点处 u 、 v 两个方向的相位差都是基本等于 180° 。实际上，通过数据分析发现，在所研究的频率范围内，透射场在 u 、 v 方向的相位差总是十分接近 180° 。现考虑 y 极化波从反面入射时，将入射电场正交分解至 u 、 v 两个方向，可表示为 $E_i = (E_u \hat{u} + E_v \hat{v}) e^{-jkz}$ ，透射后，透射电场表示为 $E_t = (t_u E_u \hat{u} + t_v E_v \hat{v}) e^{-jkz}$ ，其中 t_u 和 t_v 分别表示透射系数，定义为 $t_{u(v)} = e^{i\Delta\psi_{u(v)}}$ ， $\Delta\psi_{u(v)}$ 表示透射场相位。根据上述分析，总有 $\Delta\psi_u - \Delta\psi_v \approx 180^\circ$ ，又由于 $u-v$ 坐标相比 $x-y$ 坐标旋转了 45° ，即有 $E_u = E_v$ ，因此透射场极化方向可以表示为 $-\hat{u} + \hat{v}$ 或 $\hat{u} - \hat{v}$ ，这与入射场极化方向 $\hat{u} + \hat{v}$ 始终垂直，此即交叉极化透射的机理。

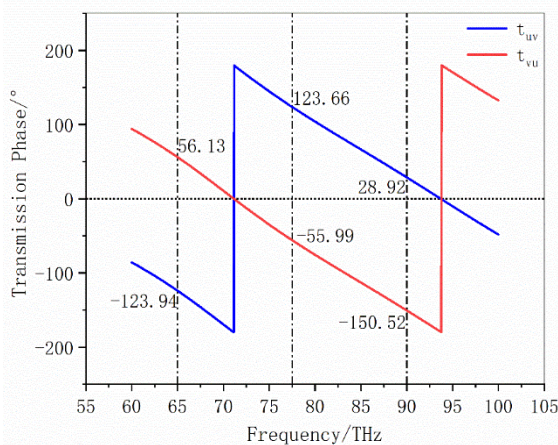


图 9 u 、 v 极化入射时交叉极化透射相位

Fig.9 Cross polarization transmission phase when u and v polarization incident

4 结构参数和入射角对传输特性的影响

通过仿真实验发现，L 型结构臂长、介质厚度和金属贴片厚度等尺寸参数以及入射角对传输特性均有一定影响。图 10 展示了短臂 L2、介质层厚度、金属贴片厚度以及入射角与非对称传输参数的关系，图中横轴均为频率，单位为 THz；纵轴 Δ 表示 y 极化波从正面垂直入射时结构的非对称传输参数。

4.1 手征强弱对传输参数的影响

分析模型结构可知，该结构手征性是由于两个臂长长度不一致引起的。为了研究非对称传输特性与结构手征强弱的关系，分别取 L 型结构短臂 L2 为 $0.15 \mu\text{m}$ 、 $0.25 \mu\text{m}$ 、 $0.35 \mu\text{m}$ 、 $0.45 \mu\text{m}$ 和 $0.55 \mu\text{m}$ 并进行仿真实验，仿真结果如下图 10(a) 所示。可以看到，以 $0.45 \mu\text{m}$ 为分界，当短臂长 L2 变小或者变大时，非对称传输参数峰值均会下降。进一步，分别对 L2 等于 0 和 $0.59 \mu\text{m}$ 时，即手征完全消失的情况进行仿真实验，如图 10(a) 所示，当手征完全消失时，非对称传输现象也消失了，这说明非对称传输的现象正是结构的手征所引起的。

4.2 介质层厚度对传输特性的影响

保持其他参量不变，分别取介质层厚度为 $0.22 \mu\text{m}$ 、 $0.23 \mu\text{m}$ 、 $0.24 \mu\text{m}$ 、 $0.25 \mu\text{m}$ 和 $0.26 \mu\text{m}$ 对结构进行仿真，结果如图 10(b) 所示。可以明显看到随着介质层厚度的增加非对称传输参数曲线朝着长波方向移动，而波形和峰值受介质层厚度的影响都很少。因此可以通过调节介质层厚度得到目标频带的宽带非对称传输器件。

4.3 金属层厚度对传输特性的影响

保持其他参量不变，分别取金属层厚度为 $0.08 \mu\text{m}$ 、 $0.09 \mu\text{m}$ 、 $0.10 \mu\text{m}$ 、 $0.11 \mu\text{m}$ 和 $0.12 \mu\text{m}$ 对结构进行仿真，结果如图 10(c) 所示。可以看到随着金属层厚度的增加非对称传输参数曲线带宽向低频方向缩窄，同时峰值有略微下降，因此综合带宽和峰值两个因素本文选取 $0.10 \mu\text{m}$ 作为金属层厚度最佳参数。

4.4 入射角度对传输参数的影响

考虑到在大多数情况下红外辐射并非垂直入射到器件表面，因此讨论入射角对传输参数的影响十分有必要。图 10(d) 为不同入射角度下非对称传输参数的变化情况。可以看到随着入射角度的增大非对称传输参数峰值变小，这主要是由于随着入射角的增加结构单元相对于入射波束的有效区域减小。综合来看在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内该结构具有较好的角度稳定性。

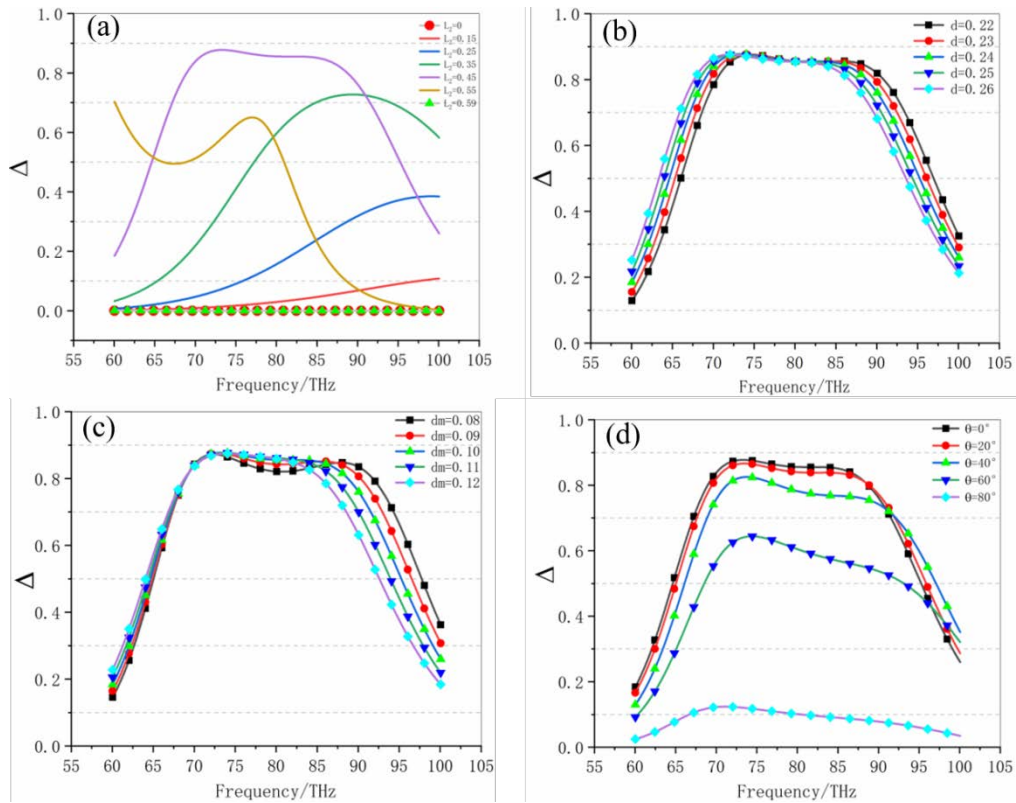


图 10 结构参数和入射角与非对称传输参数的关系: (a)短臂 L_2 变化; (b)介质层厚度变化; (c)金属层厚度变化; (d)入射角变化
 Fig.10 Influence of structural parameters on transmission characteristics: (a) Changes in short arm L_2 ; (b) Changes in the thickness of the dielectric layer; (c) Changes in the thickness of the metal layer; (d) Change in incidence Angle

5 结论

本文设计了一种 L 型双面手征超材料结构单元, 通过 CST 仿真发现该结构能够实现中红外大气窗口波段即 60~100 THz 范围内的线偏振非对称传输。通过改变单元结构参数发现该结构的非对称传输特性是 L 型金属贴片的手征引起的, 而且手征越强非对称传输参数越大, 在 73.25 THz 处非对称传输参数达到极值为 0.88。通过对不同介质层厚度和金属层厚度的仿真发现改变上述两个厚度可以获得不同频带和带宽的非对称传输参数曲线。改变入射角度时, 非对称传输参数峰值随着角度增大而下降, 但在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内峰值都能达到 0.6 以上, 说明该结构在一定范围内具有良好的角度稳定性。

参考文献:

[1] 牛继勇, 李范鸣. 空间目标红外偏振特性分析[J]. 红外技术, 2015, 37(3): 200-203.
 NIU Jiyong, LI Fanming. Analysis of infrared polarization characteristics of space target[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(3): 200-203.
 [2] 金柯, 刘永强, 韩俊, 等. 基于超材料的中波红外宽带偏振转换研究[J]. 物理学报, 2017, 66(13): 81-85.
 JIN Ke, LIU Yongqiang, HAN Jun, et al. Broadband polarization

conversion in mid-wave infrared based on metamaterials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(13): 81-85.
 [3] 余福源. 手性和各向异性的超材料的偏振特性及应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
 YU Fuyuan. Polarization properties and applications of chiral and anisotropic metamaterials[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
 [4] 黄慈. 人工手征特异介质的电磁性质研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
 HUANG Ci. Research on Electromagnetic Properties of Artificial Chiral Specific Media[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
 [5] 张雅雯, 亓丽梅, 刘畅, 等. 超材料非对称传输器件研究[J]. 量子电子学报, 2018, 35(4): 385-394.
 ZHANG Yawen, QI Limei, LIU Chang, et al. Research on Metamaterial Asymmetric Transmission Device[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2018, 35(4): 385-394.
 [6] LI Z, Mutlu M, Ozbay E. Chiral metamaterials: from optical activity and negative refractive index to asymmetric transmission[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(2): 023001-023001.
 [7] 董建峰, 徐超, 徐键. 平面手征超常介质研究进展[J]. 材料导报, 2009, 23(1): 84-89.
 DONG Jianfeng, XU Chao, XU Jian. Research Progress of Planar Chiral Metamaterials[J]. *Materials Review*, 2009, 23(1): 84-89.
 [8] Fedotov V A, Mladyonov P L, Prosvirnin S L, et al. Asymmetric prop-

- agation of electromagnetic waves through a planar chiral structure[J]. *Phys Rev Lett.*, 2006, **97**(16): 167401.
- [9] Menzel C, Helgert C, Rockstuhl C, et al. Asymmetric transmission of linearly polarized light at optical metamaterials[J]. *Phys Rev Lett.* 2010, **104**(25): 253902.
- [10] ZHAO R, CHEN H Y, ZHANG L, et al. Design and implementation of high efficiency and broadband transmission-type polarization converter based on diagonal split-ring resonator[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2018, **161**: 1-10.
- [11] 赵铭茜, 程用志, 陈浩然, 等. 太赫兹波段双频带手征性超表面的设计[J]. *光学学报*, 2019, **39**(4): 333-341.
- ZHAO Mingxi, CHENG Yongzhi, CHEN Haoran, et al. Design of dual-band chiral metasurface in terahertz band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(4): 333-341.
- [12] 陈琦, 潘武, 王崇尹, 等. 太赫兹宽带非对称传输器件的研究[J]. *半导体光电*, 2019, **40**(4): 472-475.
- CHEN Qi, PAN Wu, WANG Cunyin, et al. Research on terahertz broadband asymmetric transmission devices[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2019, **40**(4): 472-475.
- [13] Menzel C, Helgert C, Rockstuhl C, et al. Asymmetric transmission of linearly polarized light at optical metamaterials[J]. *Phys Rev Lett.*, 2010, **104**(25): 253902.
- [14] LIU D J, XIAO Z Y, MA X L, et al. Asymmetric transmission of linearly and circularly polarized waves in metamaterial due to symmetry-breaking[J]. *Applied Physics Express*, 2015, **8**(5): 052001.1-052001.4.
- [15] TANG D F, WANG C, PAN W K, et al. Broad dual-band asymmetric transmission of circular polarized waves in near-infrared communication band[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(10): 11329-39.
- [16] 王斌科, 王可欣, 田昌会, 等. 一种新型红外频率选择表面[J]. *红外技术*, 2019, **41**(1): 22-26.
- WANG Binke, WANG Kexin, TIAN Changhui, et al. A novel infrared frequency selective surface[J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(1): 22-26.
- [17] 孙靓. 复合人工电磁材料实现电磁波非对称传输性能的研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- SUN Liang. Research on Asymmetric Transmission of Electromagnetic Wave by Composite Artificial Electromagnetic Materials[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.