

激光与光电子学进展

超表面太赫兹双频带线极化转换器设计及分析

潘武, 李永瑞*, 张彬, 李海珠

重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065

摘要 提出了一种基于超表面结构的反射式太赫兹双频带线极化转换器, 采用典型“三明治”结构, 上下两层为金属层, 中间层为介质层, 实现了线极化波由 x 极化波到 y 极化波的有效转换。研究表明, 该极化转换器在 0.611~0.713 THz 和 1.335~1.364 THz 两个频带内极化转换率达到 90% 以上; 在 0.626~0.677 THz 和 1.340~1.360 THz 两个频带内极化转换率接近 100%, 实现了完美的线极化转换。利用表面电流分布, 详细阐明了其极化转换机制。基于干涉模型理论进一步计算得到的极化转换率与仿真值吻合。该极化转换器结构设计简单, 便于加工, 在太赫兹通信、成像和探测领域有着广泛的应用前景。

关键词 光谱学; 太赫兹; 超表面; 极化转换器; 双频带; 干涉模型

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221300

Design and Analysis of Metasurface Terahertz Dual-Band Linear Polarization Converter

Pan Wu, Li Yongrui*, Zhang Bin, Li Haizhu

College of Photoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications,
Chongqing 400065, China

Abstract In this study, a reflective terahertz dual-band linear polarization converter based on a metasurface structure is proposed. It adopts a typical “sandwich” structure. The upper and lower layers are metal layers, and the middle layer is a dielectric layer. Efficient conversion of x -polarized waves to y -polarized waves is realized. The results show that the polarization conversion rate of the polarization converter can reach more than 90% in the frequency bands of 0.611–0.713 THz and 1.335–1.364 THz. In the frequency bands of 0.626–0.677 THz and 1.340–1.360 THz, the polarization conversion rate is close to 100%, and perfect linear polarization conversion is realized. Using the surface current distribution, its polarization switching mechanism is elucidated in detail. The polarization conversion rate calculated based on the interference model theory agrees well with the simulation value. The polarization converter has a simple structural design, is easy to process, and has broad application prospects in the fields of terahertz communication, imaging, and detection.

Key words spectroscopy; terahertz; metasurface; polarization converter; dual band; interference model

1 引言

太赫兹 (THz) 波是指频率范围在 0.1~10 THz 的电磁波^[1], 其长波段与微波相重合, 短波段与红外波相重合, 在生物医学、安全检查和通信应用等领域都有着广阔的应用前景^[2]。极化是电磁波的一个重要特征参数, 反映电磁波在传输过程中电场矢量的振动状态。在太赫兹波的发射和反射过程中极化状态的转换能很好地避免传输过程中的外界干扰^[3]。

超表面^[4]为超材料的二维等价物, 是一种周期性

亚波长人工电磁介质, 因其具有负折射率、类电磁诱导透明效应和非线性效应等特性, 在太赫兹波极化转换器研究领域有着广泛的应用^[5]。2014年, Wen等^[6]设计了一款双开口环反射型超表面极化转换器实现了 0.44~0.76 THz 的交叉线极化转换, 且得到了较高的极化转换效率。2018年, Pan等^[7]设计了一款开口谐振环和一个镂空圆盘的反射型极化转换器, 在 0.584~1.352 THz 频带上实现了 80% 以上的极化转换率。随着对极化转换器的深入研究, 单频点及单频带极化转换器已经不能满足很多应用场景, 故研究方向逐渐

收稿日期: 2022-04-14; 修回日期: 2022-05-09; 录用日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-23

通信作者: *562747413@qq.com

转向双频/多频极化转换器的研究。2016年, Su等^[8]设计了一款双开口方环反射型极化转换器, 在 0.348 THz 和 0.640 THz 两个独立频点上极化转换率接近 100%, 实现了完美极化转换。2020年, Bilal等^[9]实现了 1.10 THz 和 2.13 THz 两个频点上的完美极化转换。上述太赫兹极化转换器都实现了较好的极化转换效果, 但由于目前对太赫兹双频极化转换器的研究较少, 现有的太赫兹双频/多频极化转换器件只能在窄带(相对带宽小于 1%)或单个频点上实现完美极化转换, 且不同极化转换频带的保护间隔(两个极化转换频带之间的距离)较小, 容易产生频带之间有用信号的互相干扰, 限制了其在太赫兹双信道通信、成像和探测方面的应用。

本文提出了一种各向异性“十”字型嵌套太赫兹线极化转换器, 采用经典的“三明治”结构, 顶层由“十”字型金属条嵌套构成, 中间为介质层, 底层为金属层。该结构在 0.611~0.713 THz 和 1.335~1.364 THz 两个频带内可将 x 线极化波转换为 y 极化波, 极化转换率达到 90% 以上, 相对带宽分别达到了 15% 和 2%。在 0.626~0.677 THz 和 1.340~1.360 THz 两个频带内的极化转换率均接近 100%, 实现了完美的线极化转换, 相对带宽分别达到了 8.0% 和 1.5%, 两个极化转换频带中心频率之间的保护间隔达到 0.7 THz, 且通过单独改变参数可以控制两个频带位置的偏移。

2 极化转换器的设计与仿真

本文提出的线极化转换器采用金属-介质-金属的“三明治”结构, 顶层超表面结构和底层金属层由金(Au)构成, 中间介质层由聚酰亚胺(polyimide)构成, 其极化转换器及单元结构如图 1 所示。其单元结构周期 $p=120.0 \mu\text{m}$, 介质层厚度 $h=50.0 \mu\text{m}$, 底面金属层和表面金属层厚度均为 $t=0.3 \mu\text{m}$, 其余几何参数为: $l=50.0 \mu\text{m}$, $w=30.0 \mu\text{m}$, $a=34.0 \mu\text{m}$, $b=26.0 \mu\text{m}$, $c=5.0 \mu\text{m}$, $m=10.0 \mu\text{m}$, $n=15.0 \mu\text{m}$ 。

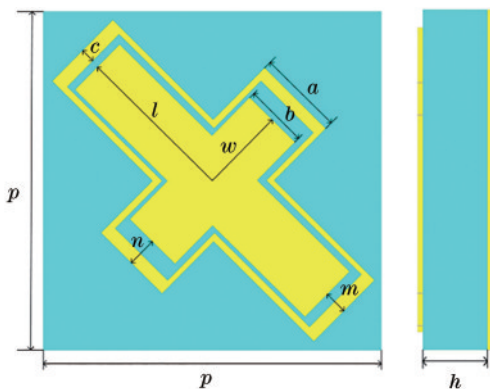


图 1 单元结构正视图与侧视图

Fig. 1 Front and side views of unit structure

2.1 仿真计算

利用电磁仿真软件 CST MICROWAVE STUDIO 2020 对该反射式极化转换器进行模拟仿真, 分析其极化转换性能。图 2 为 x 极化太赫兹波转换为 y 极化太赫兹波的示意图。仿真过程中, 在 x 和 y 方向使用周期性边界, 并分别使用 x 和 y 极化波入射至超表面。当入射波为 x 极化波时, 定义共极化系数和交叉极化系数分别为 r_{xx} 和 r_{yx} , 两系数表达式为

$$r_{xx} = \frac{E_{rx}}{E_{ix}}, r_{yx} = \frac{E_{ry}}{E_{ix}}, \quad (1)$$

式中: r_{yx} 中 x 表示入射电磁波极化方向, y 表示反射电磁波极化方向; E_{ix} 表示 x 极化入射波的能量幅值, E_{rx} 表示超表面 x 极化反射波的能量幅值; E_{ry} 表示 y 极化反射波的能量幅值, 由此定义线极化转换率 C_{PCR} 为

$$C_{\text{PCR}} = \frac{|r_{yx}|^2}{|r_{yx}|^2 + |r_{xx}|^2}. \quad (2)$$

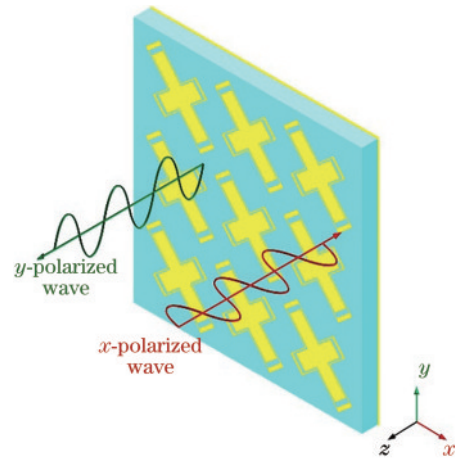


图 2 线极化器的极化转换示意图(由 x 极化波转换为 y 极化波)
Fig. 2 Schematic diagram of polarization conversion of linear polarization converter (x -polarized wave to y -polarized wave)

通过仿真分析获得的极化转换器的共极化和交叉极化反射系数曲线如图 3 所示。从图 3 可知, 交叉反射系数 r_{yx} 分别在 0.618~0.695 THz 和 1.337~1.363 THz 两个频带内达到了 0.8 以上, 共极化反射系数 r_{xx} 低于 0.2, 即在两个频带内大部分入射 x 极化波的能量转换为 y 极化波的能量。从图 4 给出的线极化转换率(PCR)可知, 极化转换器在 0.611~0.713 THz 和 1.335~1.363 THz 两个频带内 PCR 达到 90% 以上, 在 0.626~0.677 THz 和 1.340~1.360 THz 两个频带内 PCR 接近 100%, 实现了完美的线极化转换。

为便于分析 x 极化波入射到超表面后发生的极化转换原理, 将入射的 x 极化太赫兹波分解为 u, v 两个垂直方向上的极化分量, 建立如图 5 所示 uov 坐标系, 入射波为 x 极化波, 反射波为 y 极化波, 该两束波都可以分解为 u, v 两个方向上的线极化波, 入射波与反射波分别表示为

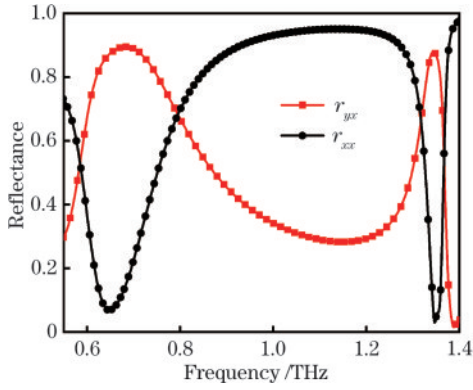


图 3 极化转换器的共极化和交叉极化反射系数(x 极化波入射)
Fig. 3 Co-polarization and cross-polarization reflection coefficients of polarization converter (x -polarized wave incidence)

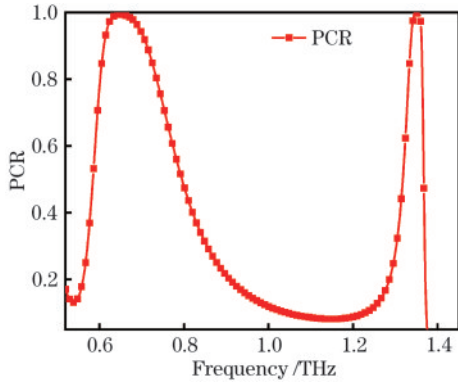


图 4 极化转换器的 PCR

Fig. 4 PCR of polarization converter

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{iv} + \vec{E}_{iu} = \vec{v}E_{iv}e^{i\theta_{iv}} + \vec{u}E_{iu}e^{i\theta_{iu}}, \quad (3)$$

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{rv} + \vec{E}_{ru} = \vec{v}E_{rv}e^{i\theta_{rv}} + \vec{u}E_{ru}e^{i\theta_{ru}}, \quad (4)$$

式中： E_{iv} 为 v 极化分量入射波的能量幅值； E_{rv} 为超表面 v 极化分量反射波的能量幅值； E_{iu} 和 E_{ru} 同理； θ_{iv} 为入射 v 极化波的相位值； θ_{rv} 为反射 v 极化波的相位值； θ_{iu} 和 θ_{ru} 同理。

设定 r_{vu} 和 r_{uv} 为 x 极化波入射后 v 和 u 方向上线极化波的反射系数，两个方向上反射波的相位分别为

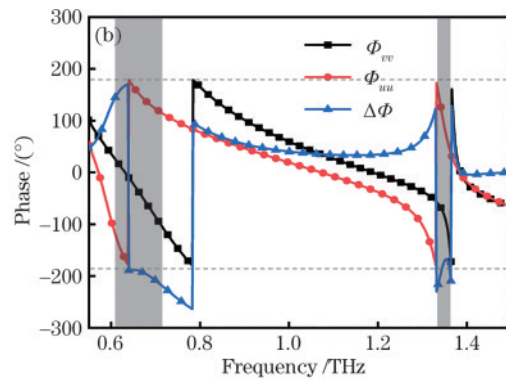
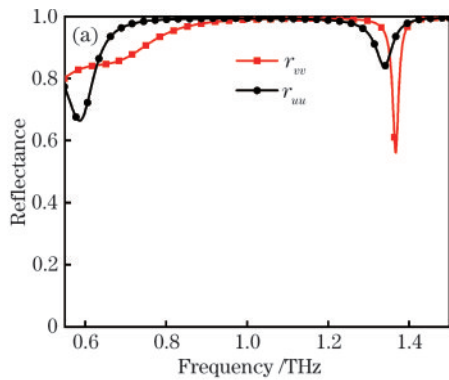


图 6 uov 坐标系中极化转换器的反射系数与相位变化。(a) uv 方向反射系数；(b) 相位及相位差

Fig. 6 Reflection coefficient and phase change of polarization converter in uov coordinate system. (a) Reflection coefficient in uv direction; (b) phase and phase difference

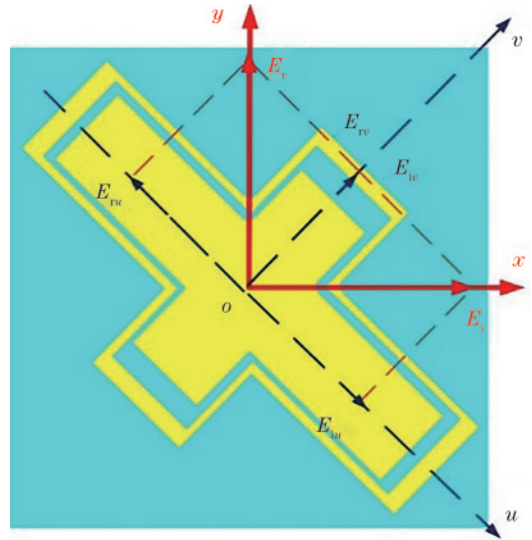


图 5 超表面在 uov 坐标系中的示意图

Fig 5 Schematic diagram of metasurface in uov coordinate system

Φ_{vv} 和 Φ_{uu} 。由极化转换原理可以得到线交叉极化转换条件是 $r_{vu}=r_{uv}$ ，且相位差 $\Delta\Phi=\Phi_{vv}-\Phi_{uu}=\pm 180^\circ$ 。图 6 给出了 uov 坐标系中线极化转换器的反射系数与相位变化情况，并用暗色区域标注出两个极化转换频带，在两个转换频带内反射振幅 $r_{vu}\approx r_{uv}$ ，相位差 $\Phi_{vv}-\Phi_{uu}\approx\pm 180^\circ\pm 30^\circ$ ，在此范围内均为可用线极化波^[10]，证明该极化转换器在两个频带实现了线极化转换。

为更准确地描述反射波的状态，根据光学中的斯托克斯公式，推导出反射式超表面的斯托克斯参量^[11]由下式表示：

$$S_0 = r_{xx}^2 + r_{yy}^2, \quad (5)$$

$$S_1 = r_{xx}^2 - r_{yy}^2, \quad (6)$$

$$S_2 = 2r_{xx}r_{yy}\cos\delta, \quad (7)$$

$$S_3 = 2r_{xx}r_{yy}\sin\delta, \quad (8)$$

式中， $\delta=\Phi_y-\Phi_x$ 是 r_{xx} 与 r_{yy} 之间的相位差，由此可以得出椭圆偏度 χ 和椭圆率(ellipticity) $\sin 2\chi$ 的计算式为

$$\sin 2\chi = S_3/S_0 \quad (9)$$

图 7 显示了椭圆率曲线变化情况,可以看到反射波的椭圆率在两个极化转换频带内约等于 0,证明了反射波为线极化波。

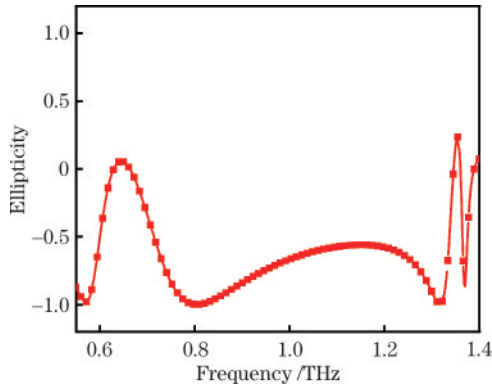


图 7 反射波的椭圆率曲线
Fig. 7 Ellipticity curve of reflected wave

2.2 原理分析

极化转换源于电磁波入射时结构表面产生的强电磁响应^[8],故在 CST 仿真软件中通过表面电流和电场监视器分析器件的工作原理。超表面的嵌套结构的各

向异性影响其表面电流分布,表面电流密度和磁流密度与电场和磁场关系^[12]的表达式为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}^T \\ \mathbf{M}^T \end{bmatrix} = i\omega \begin{bmatrix} \alpha_{ee} & \alpha_{em} \\ \alpha_{me} & \alpha_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}^T \\ \mathbf{H}^T \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{J} = [J_x J_y]^T, \quad (11)$$

$$\mathbf{M} = [M_x M_y]^T, \quad (12)$$

式中: J_x 、 J_y 和 M_x 、 M_y 分别是沿 x 和 y 方向的电流密度和磁流密度; i 是虚数单位; ω 是电磁波的角频率; \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 分别为电场强度和磁场强度; α_{em} 表示电磁极化率(表示电磁介质因响应外加电磁场而产生极化的能力)。超表面的等效阻抗 $Z(\omega)$ 为

$$Z(\omega) = \sqrt{\mu(\omega)/\epsilon(\omega)}, \quad (13)$$

式中, $\mu(\omega)$ 和 $\epsilon(\omega)$ 分别为超表面磁导率和介电常数。反射振幅 $R(\omega)$ 为

$$R(\omega) = [Z(\omega) - Z_0] / [Z(\omega) + Z_0], \quad (14)$$

式中, Z_0 为自由空间阻抗。

低频转换频带内选择一个谐振频点(0.649 THz),在高频转换频带内选择一个谐振频点(1.345 THz)观察其表面电流的分布情况。由图 8(a)可知,在 0.649 THz 频点上顶层表面电流与底层表面电流方

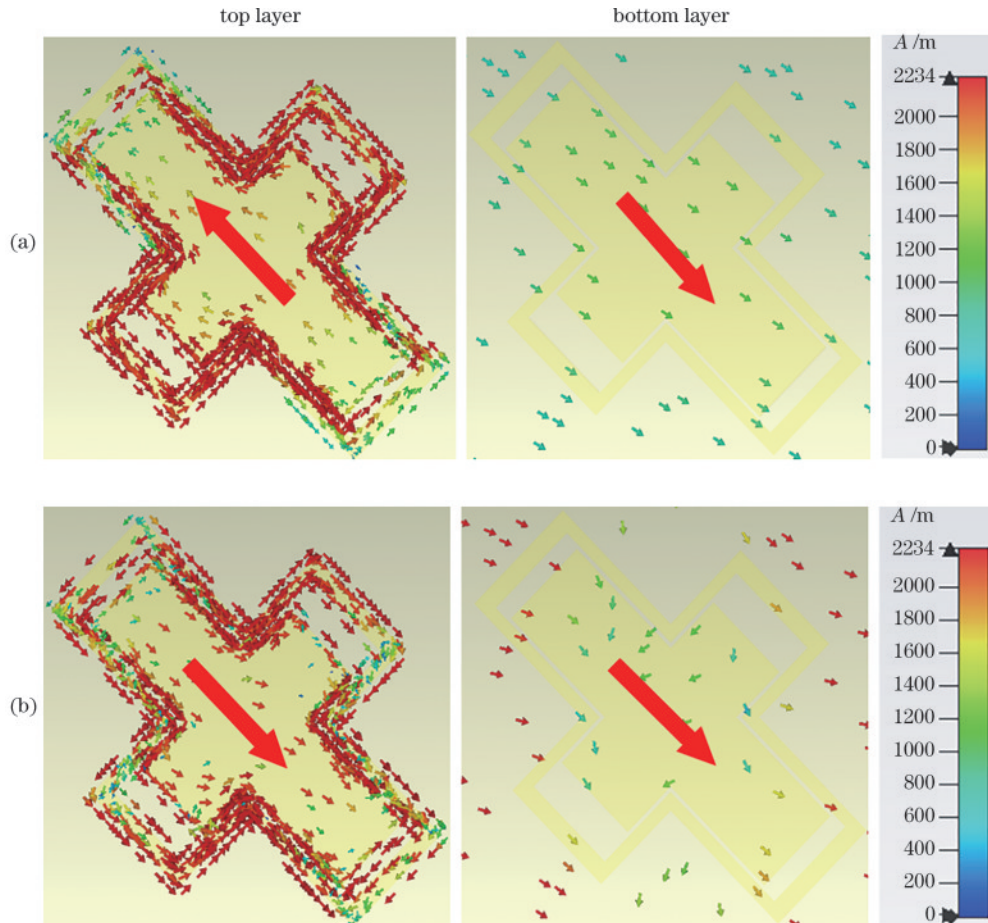


图 8 超表面上的表面电流分布。(a) 0.649 THz 表面电流分布;(b) 1.345 THz 表面电流分布

Fig.8 Surface current distributions on metasurface. (a) 0.649 THz surface current distribution; (b) 1.345 THz surface current distribution

向相反,在入射磁场周围产生磁偶极子,引起强烈的磁共振,产生与入射电场方向平行的磁场,实现交叉极化的转换,从而导致超表面结构的磁导率 $\epsilon(\omega)$ 迅速增大,即 $Z(\omega)$ 变大,使得 $Z(\omega) \gg Z_0$, 反射振幅 $R(\omega) \approx 1$ 。由图 8(b)可知,1.345 THz 谐振点位置的单元结构的顶层与底层电流方向相同,形成电偶极子,产生与入射电场方向垂直的感应电场,实现交叉极化转换。

为进一步证实本文提出的极化转换器的极化性能,将该极化转换器等效为一个类法布里-珀罗腔模型,极化转换器的极化转换频带主要来源于结构内部透射系数与反射系数之间的相长干涉与相消干涉的叠加^[13-15]。

法布里-珀罗多重干涉腔是将超表面结构等效为一种多重干涉谐振腔的理论模型,电磁波在腔内产生多次相互干涉可提高极化转换的效率。在超表面

结构中,当电磁波照射至表面金属结构时,部分电磁波透射进介质层(area 2),部分反射进入自由空间(area 1),由图 9 可知 x 极化波照射至上层金属表面时,一部分电磁波会发生极化转换从而产生交叉透射系数 \vec{t}_{yx21} 和同极化透射系数 \vec{t}_{xx21} ,发生转换的电磁波进入介质层传输同时产生相位差 $\beta = \sqrt{\epsilon} k_0 h$ (ϵ 为介质层介电常数, k_0 为自由空间波矢, h 为介质层厚度),经过底层金属板被全反射,反射系数 $\vec{r}_{22} = -1$ 。另一部分电磁波发生极化转换后会反射进入自由空间,即同极化反射系数 \vec{r}_{xx11} 和交叉极化反射系数 \vec{r}_{yx11} 。而在介质层内经过全反射的电磁波(同时含有 x 极化波和 y 极化波)重新到达顶层金属层,同样产生透射系数 (\vec{t}_{xx12} 、 \vec{t}_{yx12} 、 \vec{t}_{yy12} 和 \vec{t}_{xy12}) 和反射系数 (\vec{r}_{xx22} 、 \vec{r}_{yx22} 、 \vec{r}_{yy22} 和 \vec{r}_{xy22})。最终的反射系数与透射系数由多次干涉过程叠加而成,本文取腔内 10 次干涉过程叠加进行计算,计算式如下:

$$r_{xx} = \vec{r}_{xx11} - (\vec{t}_{xx21}\vec{t}_{xx11} + \vec{t}_{yx21}\vec{t}_{xy12})e^{i2\beta} + (\vec{t}_{yx21}\vec{r}_{xy22}\vec{t}_{xx12} + \vec{t}_{yx21}\vec{r}_{xy22}\vec{t}_{xy12} + \vec{t}_{xx21}\vec{r}_{xx22}\vec{t}_{xx12} + \vec{t}_{xx21}\vec{r}_{yx22}\vec{t}_{xy12})e^{i4\beta} - (\vec{t}_{xx21}\vec{r}_{xy22}\vec{r}_{yx22}\vec{t}_{xx12} + \vec{t}_{xx21}\vec{r}_{yx22}\vec{r}_{yy22}\vec{t}_{xy12} + \vec{t}_{xx21}\vec{r}_{xx22}\vec{r}_{yx22}\vec{t}_{xy12} + \vec{t}_{xx21}\vec{r}_{xx22}\vec{r}_{xx22}\vec{t}_{xx12} + \vec{t}_{yx21}\vec{r}_{yx22}\vec{r}_{yy22}\vec{t}_{xy12} + \vec{t}_{yx21}\vec{r}_{yy22}\vec{r}_{xy22}\vec{t}_{xx12} + \vec{t}_{yx21}\vec{r}_{yy22}\vec{r}_{xy22}\vec{t}_{xx12} + \vec{t}_{yx21}\vec{r}_{xy22}\vec{r}_{yx22}\vec{t}_{xy12})e^{i6\beta} + \dots, \quad (15)$$

$$r_{yx} = \vec{r}_{yx11} - (\vec{t}_{xx21}\vec{t}_{yx12} + \vec{t}_{yx21}\vec{t}_{xy12})e^{i2\beta} + (\vec{t}_{xx21}\vec{r}_{xx22}\vec{t}_{yx12} + \vec{t}_{xx21}\vec{r}_{yx22}\vec{t}_{yy12} + \vec{t}_{yx21}\vec{r}_{yy22}\vec{t}_{yy12} + \vec{t}_{yx21}\vec{r}_{xy22}\vec{t}_{yx12})e^{i4\beta} - (\vec{t}_{xx21}\vec{r}_{xx22}\vec{r}_{xx22}\vec{t}_{yx12} + \vec{t}_{xx21}\vec{r}_{xx22}\vec{r}_{yx22}\vec{t}_{yy12} + \vec{t}_{xx21}\vec{r}_{yx22}\vec{r}_{yy22}\vec{t}_{yy12} + \vec{t}_{xx21}\vec{r}_{yx22}\vec{r}_{xy22}\vec{t}_{yx12} + \vec{t}_{yx21}\vec{r}_{yy22}\vec{r}_{yy22}\vec{t}_{yx12} + \vec{t}_{yx21}\vec{r}_{yy22}\vec{r}_{xy22}\vec{t}_{yx12} + \vec{t}_{yx21}\vec{r}_{xy22}\vec{r}_{xx22}\vec{t}_{yx12} + \vec{t}_{yx21}\vec{r}_{xy22}\vec{r}_{yx22}\vec{t}_{yy12})e^{i6\beta} + \dots。 \quad (16)$$

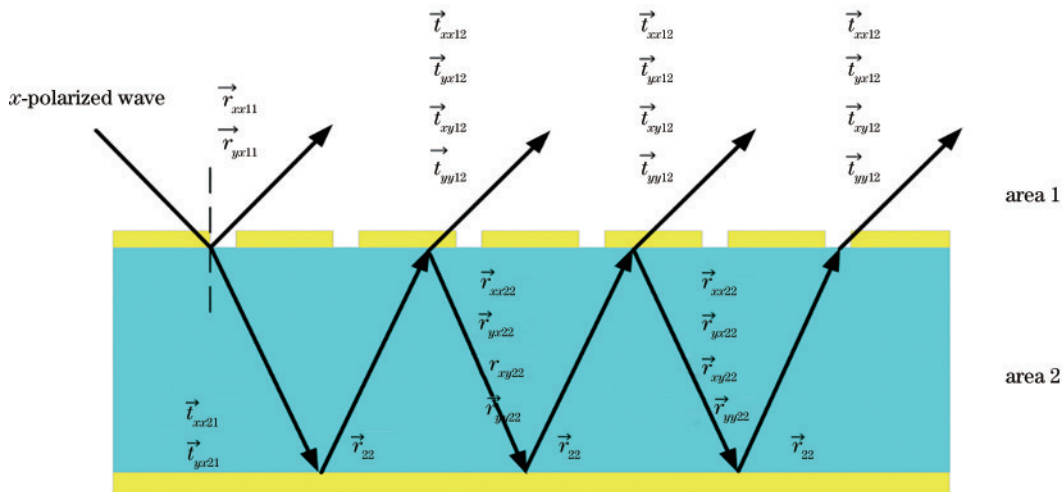


图 9 法布里-珀罗多重干涉模型
Fig. 9 Fabry-Perot multiple interference model

如图 10 所示,通过计算得到 PCR 的数值计算值与仿真值吻合(没有完全重合的原因是本文计算只取了干涉腔内 10 次反射的叠加系数,而腔内的叠加次数理

论上应为无限次),多重干涉腔模型很好地解释了该器件的极化转换现象。

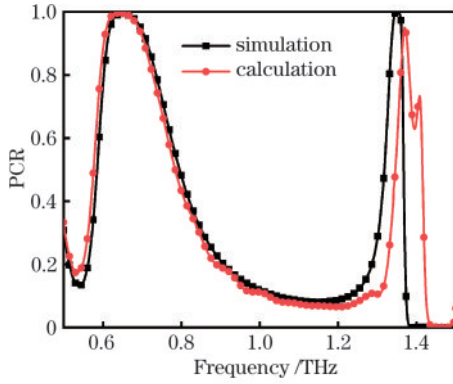


图 10 PCR 干涉模型数值计算与仿真计算值

Fig. 10 Numerical calculation and simulation calculation values of PCR for interference model

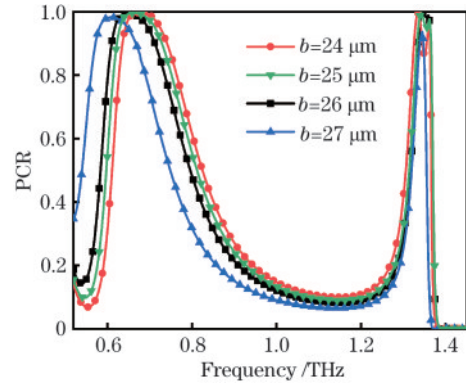


图 12 内部“十”字宽度 b 对 PCR 的影响

Fig. 12 Influence of inner cross width b on PCR

3 结构形态对极化转换性能的影响

3.1 嵌套式结构对极化转换性能的影响

本文提出的各向异性结构采用了嵌套式的设计, 分别对嵌套式结构的外框“十”字结构和内部“十”字结构单独进行仿真分析, 不同尺寸的结构使得谐振频带发生改变, 进行嵌套设计可以达到频带之间的耦合, 可以有效地实现带宽的扩展。

由图 11 可知, 内部“十”字结构提供 0.648 THz 和 1.297 THz 两个谐振频点, 外部“十”字框提供 1.009 THz 谐振频点。将结构的电磁效应等效为电感电容(LC)谐振电路, 将两部分结构进行嵌套合并后, 增加结构内等效电容和电感的数量, 由公式 $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 可知, 谐振频率会随着电容电感的改变而发生改变, 从而形成两个独立频带上的极化转换效果。

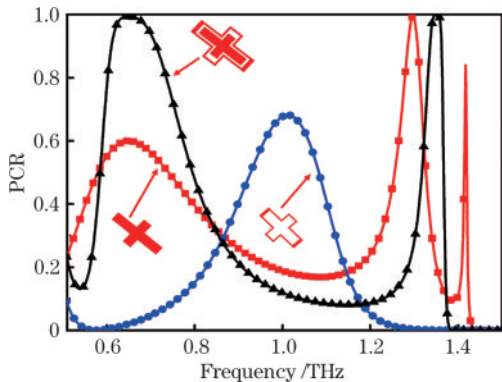


图 11 超表面嵌套结构几何分析

Fig. 11 Geometric analysis of nested structures of metasurfaces

3.2 嵌套结构间距对极化转换性能的影响

为便于分析嵌套间距对极化转换性能的影响, 保持其他参数不变, 通过改变内部“十”字结构的宽度 b 的值, 调整两嵌套结构之间的距离, 分别设置 b 为 24、25、26、27 μm , 得到如图 12 所示的内部“十”字宽度 b 对 PCR 的影响曲线。随着 b 的增加, 低频极化转换频

带出现红移的现象, 且带宽和 PCR 没有发生明显改变, 高频极化转换频带的带宽稍微变窄, PCR 出现较小幅度的下降。可以看出 b 的改变对高频转换频带影响较小, 而对低频转换频带有较大的影响, 这是因为随着内外结构间距的减小, 结构内外“十”字的耦合效应发生了改变, 导致谐振频带发生了红移。

另外, 为便于探讨嵌套间距 w 对极化性能的影响, 将 w 分别设置为 29、30、31、32 μm , 进行电磁分析, 得到如图 13 所示的不同 w 参数下 PCR 曲线的变化情况。从图 13 可知, 随着 w 的增加, 低频转换频带的带宽逐渐变窄, 极化转换率有所下降。而 w 的变化对高频极化转换频带影响较小, 但是随着 w 的减小, 高频极化转换频带的 PCR 会出现稍微降低。综合考虑 PCR 和工作带宽, 当 $w = 30 \mu\text{m}$ 时, 该极化转换器的工作性能最佳。

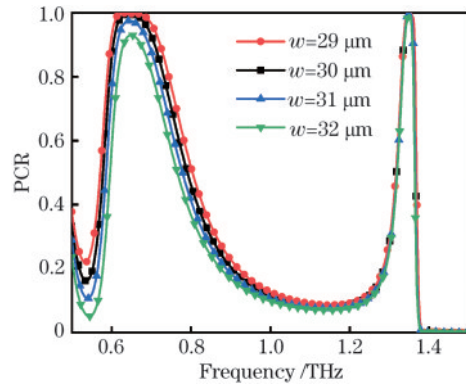
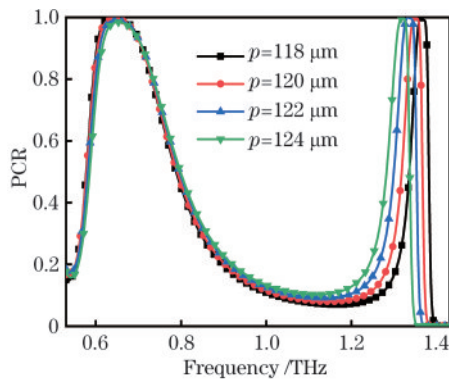


图 13 结构参数 w 对 PCR 的影响

Fig. 13 Influence of structural parameter w on PCR

3.3 单元结构周期 p 对极化转换性能的影响

由 3.2 小节分析可知, 低频极化转换频带可由结构参数 b 进行控制, 对于第二个频带可通过改变单元结构周期 p 进行控制, 分别设置 p 为 118、120、122、124 μm , PCR 随 p 的变化情况由图 14 给出, 改变结构周期将引起单元之间耦合效应的改变, 从而使得谐振频率改变。由图 14 可以看出, 随着结构周期 p 的增大, 高频极化转换频带发生了明显红移, 而对低频转换频

图 14 单元结构周期 p 对 PCR 的影响Fig. 14 Influence of unit structure period p on PCR

带影响较小,这是由于 p 的变化引起了单元结构间的金属条之间的电容效应,从而导致了转换频带位置的改变。以上结果说明,通过改变参数 p 的数值,可以有效控制高频转换频带的位置。

4 结 论

基于经典各向异性“十”字型结构进行嵌套化处理,实现了在 0.1~2.0 THz 频段内的双频带线极化转换,相比于现有的只能在单一频点或窄带(相对带宽小于 1%)实现完美极化转换的双频极化转换器,本文提出的极化转换器在两个完美极化转换频带(0.626~0.677 THz 和 1.340~1.360 THz)的相对带宽均分别达到了 8.0% 和 1.5%,PCR 达到 90% 以上的两个频带(0.611~0.713 THz 和 1.335~1.364 THz)相对带宽分别达到了 15% 和 2%;对于双频带极化转换器,两频带之间的保护间隔尤其重要,能够保证两个频带之间信号传输的稳定性与互不干扰能力,本文提出的极化转换器两频带之间的保护间隔宽度达到 0.7 THz,保证了两个频带内信号传输的稳定性。该太赫兹线极化转换器在太赫兹通信、探测及成像领域具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

[1] Hossain Z, Mollica C N, Federici J F, et al. Stochastic interference modeling and experimental validation for pulse-based terahertz communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(8): 4103-4115.

[2] 徐德刚,王与焯,胡常灏,等. 光学太赫兹辐射源及其在脑创伤检测中的应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(19): 1914002.

Xu D G, Wang Y Y, Hu C H, et al. *Optical terahertz*

radiation sources and terahertz application in traumatic brain injury[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(19): 1914002.

- [3] Zhang S J, Li Z W, Xing F. Review of polarization optical devices based on graphene materials[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(5): 1608.
- [4] Keiser G R, Karl N, Liu P Q, et al. Nonlinear terahertz metamaterials with active electrical control[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(12): 121101.
- [5] Hashemi M R, Cakmakyapan S, Jarrahi M. Reconfigurable metamaterials for terahertz wave manipulation[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2017, 80(9): 094501.
- [6] Wen X W, Zheng J R. Broadband THz reflective polarization rotator by multiple plasmon resonances[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28292-28300.
- [7] Pan W, Shen D J, Yan Y J. Design of broadband polarization converter for terahertz waves[J]. *Optoelectronics Letters*, 2018, 14(6): 434-437.
- [8] Su H E, Lan F, Yang Z Q, et al. Terahertz multi-band reflective polarization converter based on TSRR metamaterial [C]//2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), October 18-21, 2016, Guilin, China. New York: IEEE Press, 2017: 206-209.
- [9] Bilal R M H, Baqir M A, Choudhury P K, et al. On the specially designed fractal metasurface-based dual-polarization converter in the THz regime[J]. *Results in Physics*, 2020, 19: 103358.
- [10] Nghia C, Nguyen M T, Nguyen N H, et al. Numerical design of a high efficiency and ultra-broadband terahertz cross-polarization converter[J]. *Materials Research Express*, 2021, 8(6): 065801.
- [11] Jing X F, Gui X C, Zhou P W, et al. Physical explanation of Fabry-Pérot cavity for broadband bilayer metamaterials polarization converter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(12): 2322-2327.
- [12] Kamal B, Chen J D, Yin Y Z, et al. Design and experimental analysis of dual-band polarization converting metasurface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(8): 1409-1413.
- [13] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. *Science*, 2013, 340(6138): 1304-1307.
- [14] Huang X J, Xiao B X, Yang D, et al. Ultra-broadband 90° polarization rotator based on bi-anisotropic metamaterial [J]. *Optics Communications*, 2015, 338: 416-421.
- [15] Gao X, Han X, Cao W P, et al. Ultrawideband and high-efficiency linear polarization converter based on double V-shaped metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(8): 3522-3530.