

吸波强度可调与线极化转换双功能 可重构超表面设计*

刘昱潇¹⁾ 李志豪¹⁾ 黄生祥²⁾ 高小惠²⁾ 邓联文^{1)†}

1) (中南大学电子信息学院, 长沙 410075)

2) (中南大学物理学院, 长沙 410083)

(2026 年 3 月 8 日收到; 2026 年 4 月 20 日收到修改稿)

通过集成可调谐元件设计多功能可重构超表面已成为研究热点. 本文设计一种可重构多功能超表面, 能实现线极化转换与吸波强度可调两种功能的集成和切换; 在设计中将 PIN 二极管集成于超表面单元内部, 通过同轴馈电结构对二极管工作状态实现独立调控; 向二极管施加同一偏置电压时, 超表面为中心对称结构, 此时超表面为吸波超表面且吸波强度可调, 对 4.08—9.12 GHz 微波的吸收率高于 90%, 相对吸收带宽达 68.1%, 可调范围超过 10 dB. 当向相邻二极管施加不同偏置电压时, 超表面的阻抗对称性被破坏, 此时的超表面为线极化转换功能状态, 在 4.11—9.03 GHz 频段的极化转换率 (PCR) 高于 90%; 在两种工作模式下超表面的角度及极化稳定性均达到 60°. 该双功能可重构的超表面在智能隐身及通信领域具有应用前景.

关键词: 超表面, 吸波强度, 线极化转换, 功能可重构**DOI:** 10.7498/aps.75.20260335**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260335

1 引言

近年来, 电磁超材料因其具有与传统材料不同的独特的电磁特性, 倍受研究者们关注^[1,2]. 作为电磁超材料的二维形式, 电磁超表面是由亚波长结构单元周期性排列组合构成, 能够对电磁波的相位、振幅和极化响应进行调控^[3]. 已有的电磁超表面研究已发现其具有诸多奇异效应, 例如极化转换、负折射率、电磁隐身、可重构超透镜、全息成像等^[4-10].

随着超表面技术的发展, 基于超表面的多功能电磁集成结构相继出现. 如可重构超材料, 根据可重构性能的实现途径不同可分为电可重构^[11]、机械可重构^[12]、光可重构^[13]以及热可重构^[14]. 机械可重构常见的方法有改变单元结构的尺寸参数、旋转角度或平移高度; 虽然方法简单, 但实现可重构

的速度慢、灵活性差. 光可重构和热可重构对外界条件的依赖性高, 不利于应用在条件多变的环境, 应用场景受限. 电可重构是将超材料与 PIN 二极管、变容二极管等有源器件结合, 通过调控有源器件的电压和电流而改变超材料的电磁特性, 从而实现对电磁波的操控. 与其他方法相比, 电可重构具有灵活性好、成本低、响应快、集成度高等优点, 目前, 在超表面中引入可调谐元件是实现多功能集成最具潜力的技术方案^[15-18].

Huang 等^[19]通过控制可调谐集总元件, 动态改变超表面的相位分布, 实现了波束偏转与极化转换. Xia 等^[20]利用 PIN 二极管设计了一种基于有损阶梯阻抗谐振器的超宽带柔性化且强度可调的微波吸收体. Zhang 等^[21]在超表面上加载 PIN 二极管, 实现了对传输相位和反射相位的动态调控, 进而产生波束相干、异常反射、RCS 缩减等多种电磁功能. Pitilakis 等^[22]将超表面与芯片集成设计,

* 湖南省重点研发项目 (批准号: 2023GK2055) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: denglw@csu.edu.cn

通过对集成电路施加适当偏置, 可实现完美吸收、波前调控等功能.

吸波强度可调控和极化状态可转换对目标的伪装隐身都具有重要作用, 但目前还少见将吸波强度可调与极化转换功能集成且可切换的超表面报道. 传统的吸波强度可调超表面一般采用阻抗环设计^[23]; 这种结构较为固定, 除可调谐器件外很难对其拓扑结构进行二次重构, 导致其极化转换特性固定; 阻抗环一般为中心对称结构 (各向同性), 导致其不具备极化转换功能. 另一方面, 固定不可调的极化转换不能应对复杂环境而使其应用受限.

本文设计一种加载 PIN 二极管的中心对称超表面, 不同于传统的串联馈电^[24]与并联馈电^[25], 本文通过同轴馈电^[26]方式以保证超表面的严格对称结构, 使表面结构与金属底板产生电势差, 并通过电感隔离, 防止高频电磁波通过金属过孔进入馈电层^[27]; 该结构可独立控制 PIN 二极管的等效阻抗, 当各二极管受到相同强度偏置电压时, 因表面中心对称而不产生极化转换效应; 此时的超表面具有良好吸波性能, 且通过改变电压使 PIN 二极管的等效阻抗发生变化, 从而实现吸波强度可调. 当各二极管受到不同强度激励时, 超表面的阻抗对称结构被破坏, 使超表面呈各向异性, 此时超表面具有良好线极化转换功能, 且通过改变电压使极化转换率可调. 超表面可以实现在吸波强度可调与极化转换两种功能间灵活切换.

2 双功能超表面结构设计与性能分析

2.1 结构设计

设计的超表面如图 1 所示, 超表面采用金属过孔的方式实现同轴馈电, 上表面金属图案成中心对称分布. 金属部分使用电导率 σ 为 5.8×10^7 S/m 的铜材. 在四角内侧嵌入 PIN 二极管, 在仿真时将二极管的正偏状态等效为一个小电阻. 通过改变电阻的大小模拟 PIN 二极管在不同偏置电压下的特性. 当二极管关断或反偏时, 将其等效为一个容值恒定的小电容, 本文设计的样件选择的 PIN 二极管型号为 Skyworks 公司生产的 SMP1302-079LF, 查阅 Skyworks 官网数据手册知, 导通时 PIN 二极管等效阻抗在 5—1000 Ω 间变化, 其中等效阻抗在 500 Ω 内的变化较为稳定, 截止时等效为容值为 0.3 pF 的小电容.

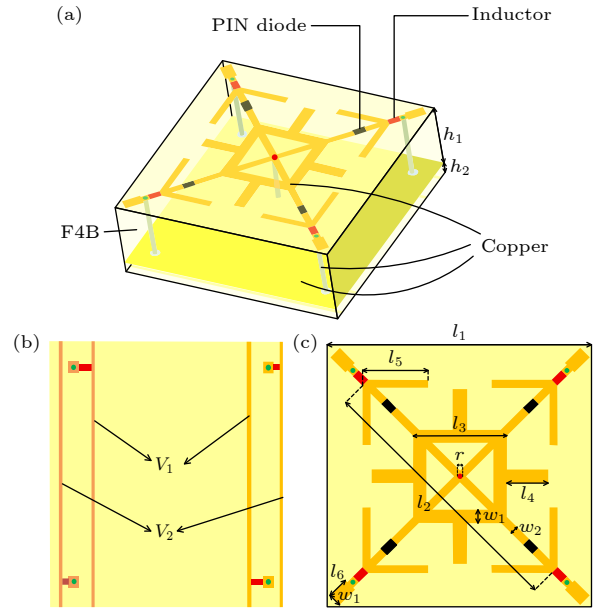


图 1 单元结构设计 (a) 三维结构; (b) 底部馈电层; (c) 俯视图

Fig. 1. Metasurface unit cell design: (a) Three-dimensional structure; (b) bottom feed layer; (c) top view.

在金属图案与过孔之间以及底部馈电线与过孔之间加载扼流电感, 将其设置为 52 nH 的电感, 以防止表面交变电流通过过孔流入馈电层^[27]. 介质衬底使用相对介电常数 ϵ_r 为 2.65, 损耗角正切值 $\tan\delta$ 为 0.0013 的 F4B. 中间层是铜质底板, 在仿真时设置为理想导体边界条件. 中心过孔连接底层底板并接地, 四角过孔透过底板并达到最底部馈电层, 图 2 是超表面在 2×2 单元时的馈电结构, 该结构可以对角 PIN 二极管施加相同偏置电压, 而对相邻 PIN 二极管施加不同的偏置电压, 以此实现超表面的多功能调控. 单元结构的各项尺寸参数如表 1 所示.

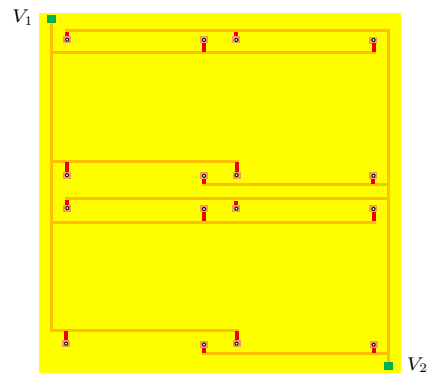


图 2 底部 2×2 时的馈线分布

Fig. 2. Distribution of the bottom feeder lines in the 2×2 configuration.

表 1 超表面的结构参数

Table 1. Parameters of metasurface.

参数符号	参数值/mm	参数符号	参数值/mm
l_1	20	w_1	1
l_2	20	w_2	0.6
l_3	7	h_1	6
l_4	3.1	h_2	1
l_5	4.924	r	0.18
l_6	1.6		

2.2 吸波强度可调功能

设计的超表面的吸波性能在 PIN 二极管处于不同等效阻抗下的反射系数曲线如图 3 所示. 超表面的最佳有效吸波频段为 4.08—9.12 GHz (相对带宽为 68.1%), 整体可调范围均大于 10 dB, 峰值可调范围达到 25 dB.

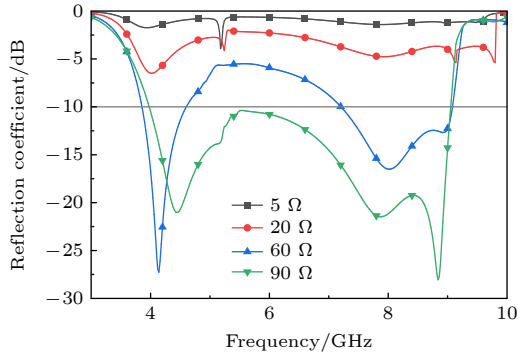


图 3 PIN 二极管在不同等效阻抗下超表面的反射系数曲线
Fig. 3. Reflection curves of metasurface with PIN diodes under different equivalent impedances.

图 4 为 PIN 二极管等效阻抗为 90 Ω 时, 两个谐振点附近频点 $f_1 = 4.25$, $f_2 = 8.25$ 表面电流密度 J 矢量分布图, 4 条金属臂电流密度分布均匀. 超表面的介质衬底使用相对介电常数 ϵ_r 为 2.65, 损耗角正切 $\tan\delta$ 为 0.0013 的 F4B, 与柔性介质材料相比, F4B 衬底可有效提升超表面的稳定性, 确保在宽入射角范围内, 超表面的吸波性能保持稳定. 由于可调性的“恶化模式”主要具备雷达特征调控的作用^[28], 在测试角度稳定性时, 应该优先考虑能否在大入射角时维持最优状态的稳定, 因此取 PIN 二极管等效电阻为 90 Ω.

如图 5(a) 所示, 在 60° 大入射角时超表面的吸波性能仍然稳定. 由图 5(b) 可知, TE 极化与 TM 极化下在小入射角时反射系数基本一致, 而在大入射角时存在一定差异.

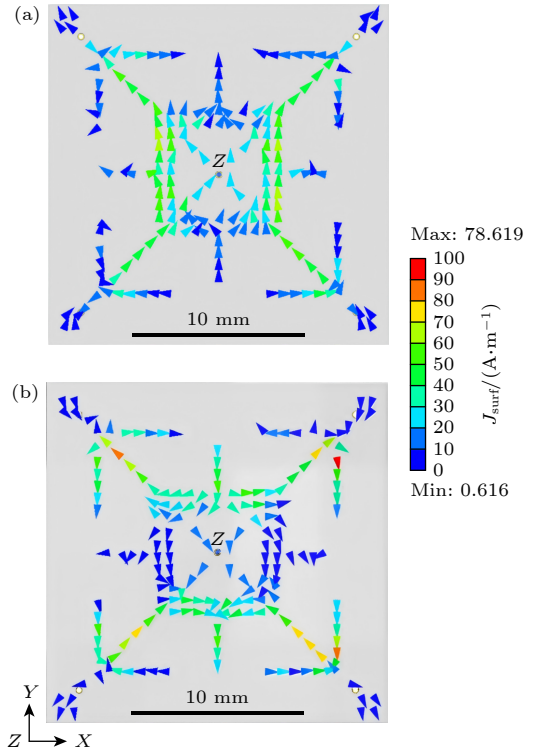


图 4 超表面的表面电流分布 (a) $f_1 = 4.25$ GHz; (b) $f_2 = 8.25$ GHz

Fig. 4. Metasurface surface current distribution: (a) $f_1 = 4.25$ GHz; (b) $f_2 = 8.25$ GHz.

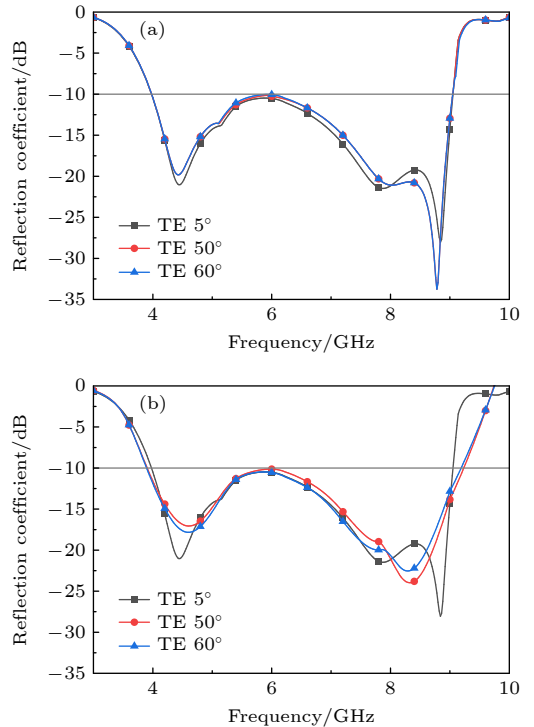


图 5 大入射角时超表面的反射系数 (a) TE 极化; (b) TM 极化

Fig. 5. Reflection coefficient of the metasurface at large incident angles: (a) TE polarization; (b) TM polarization.

2.3 线极化转换功能

当 $V_1 \neq V_2$ 时, 二极管两组对角的等效阻抗分别为 R_1 和 R_2 , 此时超表面的阻抗对称性被破坏, 超表面的工作模式由吸波可调转变为极化转换可调. 根据数据手册取 $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 500 \Omega$, 使相邻二极管等效阻抗具有较大差异. 此时超表面在 4—9 GHz 频段内的反射系数频率响应特性如图 6 所示. 在 4—9 GHz 范围内, 交叉极化反射系数 $|r_{xy}|$ 维持在 -5 dB (幅值约 0.56) 以上, 而同极化反射系数多数 $|r_{xx}|$ 处于 -10 dB (幅值约 0.32) 以下, 表明入射 x 极化波的能量已实现向 y 极化分量的转换.

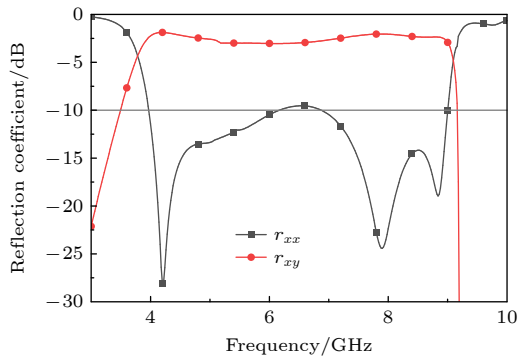


图 6 交叉极化与同极化反射系数曲线

Fig. 6. Cross-polarization and co-polarization reflection coefficient curves.

作为评估线极化转换性能核心指标的极化转换率 (polarization conversion ratio, PCR), 能反映交叉极化反射能量占总反射能量的比例, 可表示为

$$\text{PCR} = \frac{|r_{xy}|^2}{|r_{xx}|^2 + |r_{xy}|^2}. \quad (1)$$

PCR 的频率特性如图 7 所示, 4—9 GHz 频段内, 通过改变 V_1 与 V_2 可进一步实现相邻 PIN 二极

管之间的等效阻抗差异, 实现极化转换率可调, 极化转换率平均值高于 0.9, 峰值极化转换效率达 99%, 验证了该超表面具备线极化转换的强调控能力.

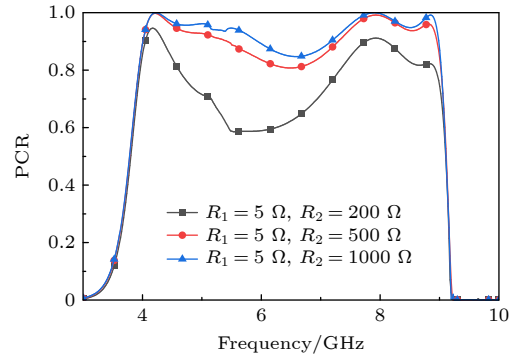


图 7 极化转换率曲线

Fig. 7. Polarization conversion ratio curve.

图 8 给出了 $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 500 \Omega$ 时超表面的表面电流密度 J 矢量分布图, 对比图 3 可知, 此时的对称性已经被完全破坏, 等效阻抗为 R_1 的两臂电流强度明显高于等效阻抗为 R_2 的两臂, 因此产生的各向异性使其具备极化转换功能, 通过改变 V_1 与 V_2 可进一步实现相邻 PIN 二极管之间的等效阻抗差异, 从而提高极化转换率.

考虑到该型号 PIN 二极管等效阻抗范围和二极管性能的稳定性, 取: $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 500 \Omega$; 此时超表面为 45° 取向的各向异性结构, 在入射角为 60° 时, 其极化转换结果如图 9(a) 所示. 超表面在个别频点出现了明显的震荡现象, 是因为设计的超表面结构是一种多模谐振结构, 正入射时简并的谐振模式 (基模、高阶模) 发生分裂, 不同模式在特定频点独立共振, 斜入射使谐振模式分裂耦合、激发高频寄生谐振, 同时局部阻抗匹配快速突变, 导致

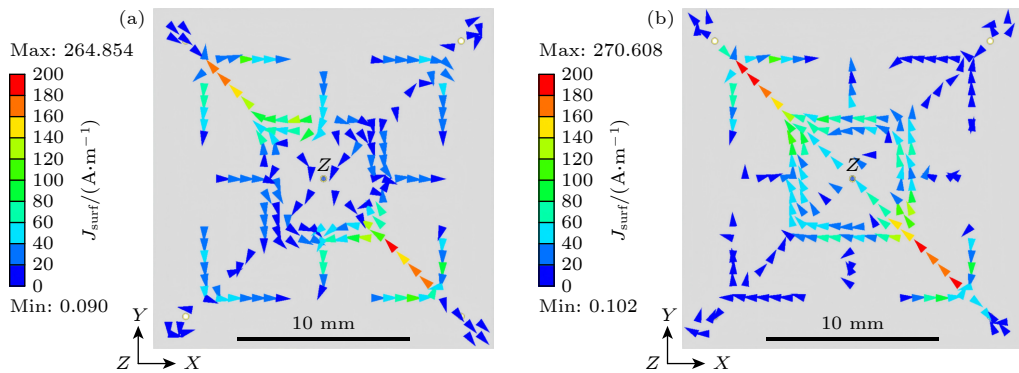


图 8 超表面的表面电流分布 (a) $f_1 = 4.25 \text{ GHz}$; (b) $f_2 = 8.25 \text{ GHz}$

Fig. 8. Metasurface surface current distribution: (a) $f_1 = 4.25 \text{ GHz}$; (b) $f_2 = 8.25 \text{ GHz}$.

PCR 在离散频点剧烈波动^[29]. 在 60°大入射角情况下, 这种现象难以避免. 但超表面的整体极化转换依旧稳定, 能保持目标频段的核心性能. 由图 9(b) 可知, TE 极化与 TM 极化下小入射角极化转化率曲线基本一致, 而在大入射角时有一定差异.

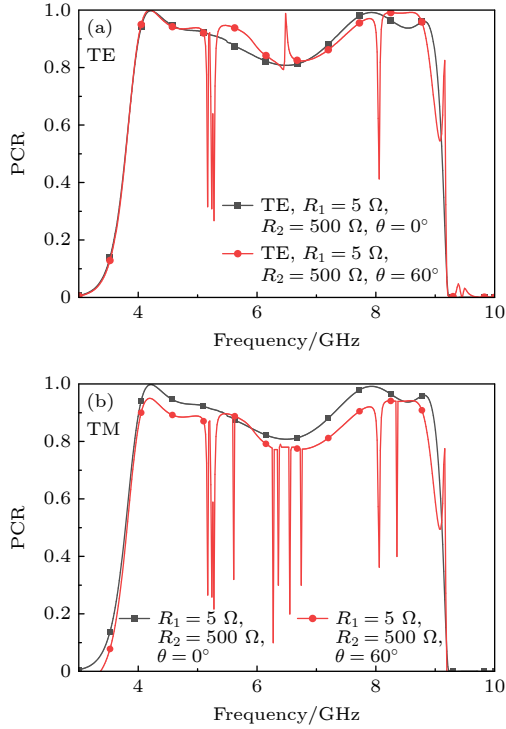


图 9 大入射角下超表面的极化转换率 (a) TE 极化; (b) TM 极化
Fig. 9. Polarization conversion ratio of the metasurface at large incident angles: (a) TE polarization; (b) TM polarization.

本文设计的可重构超表面综合性能与文献报道的同类型超表面的性能对比如表 2 所示. 本设计实现了吸波强度可调与线极化转换的多功能集成. 吸波模式下, 相对带宽为 68.1%, 可调范围为 10 dB; 极化转换模式下, 相对带宽为 67.9%, 极化转化率大于 90%, 两种功能下的角度稳定性均可达到 60°. 由表 2 的性能对比可知, 本设计相比已有的研究工作, 具备以下优势. 功能方面: 现有研究报道的可调超表面一般是实现单一功能或多种功能的静态可调, 本文在同一超表面上实现吸波强度和线极化转换强度的双功能动态可调与自由切换. 性能方面: 本设计的双功能有效相对带宽均达到 68% 左右, 优于多数同类型的单功能超表面的带宽水平, 同时两种模式的角度稳定性均达到 60°, 优于同类型研究工作报道的 20°—45°范围.

表 2 本文设计的超表面与文献报道的同类型超表面性能对比

Table 2. Performances comparison between the designed metasurface and those of the literatures.

文献	吸波 可调 功能	相对 带宽 /%	吸收强度 可重构范围 /dB	极化 转换 功能	相对 带宽/%	PCR /%	角度 稳定范围 /(°)
[24]	有	27.3	-20—0	无	—	—	—
[30]	有	86	-10—0	无	—	—	0—25
[31]	有	72.7	-10—0	无	—	—	0—20
[32]	有	47	-10—0	无	—	—	0—45
[33]	无	—	—	有	45	90	—
[34]	无	—	—	有	67	90	—
本文	有	68.1	-10—0	有	67.9	90	0—60

3 等效电路与物理机制分析

本文设计的超表面采用介质 F4B, 在高频环境下介电常数 $\epsilon_r = 2.65$, 其波阻抗计算如下:

$$Z_0 = \eta_0 / \sqrt{\epsilon_r} \approx 232 \ \Omega, \quad (2)$$

式中, η_0 为自由空间的波阻抗, 约为 377 Ω , 根据波阻抗与 S 参数可以计算出归一化阻抗:

$$Z = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \frac{\eta_0}{Z_0}. \quad (3)$$

当输入的归一化阻抗与自由空间的归一化阻抗一致时, 超表面可达到理想阻抗匹配, 由 (2) 式、(3) 式可得超表面吸波模式下 PIN 二极管等效阻抗为 90 Ω 时的归一化阻抗仿真结果, 如图 10 所示.

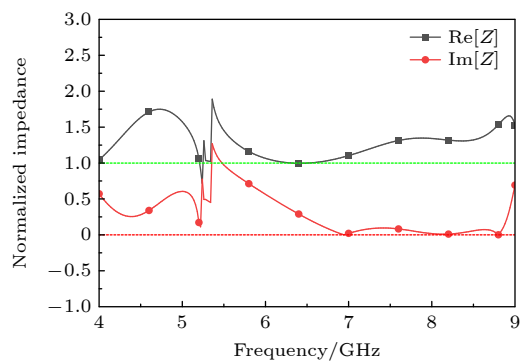


图 10 超表面的归一化阻抗
Fig. 10. Normalized impedance of metasurface.

设计的超表面在目标频段的阻抗非常接近 1+0j, 说明 PIN 二极管等效阻抗为 90 Ω 时, 超表面达到良好阻抗匹配, 因而具有良好吸波性能. 通过改变偏置电压, PIN 二极管的等效阻抗可在

1—500 Ω 间动态变化; 因高频下 PIN 二极管的寄生电容电感可以忽略不计, 当 PIN 二极管的等效阻抗发生变化时, 超表面的阻抗失配. 因此, 通过控制超表面的阻抗匹配程度, 可实现超表面的吸波强度可调.

在构建吸波状态的等效电路模型时, 设置频率范围为 2—10 GHz, 步长为 0.02 GHz. 根据“走线-电感”和“缝隙-电容”的原则构建等效电路并选取对应元件绘制电路图. 由于超表面图案较为复杂且呈中心对称, 将等效电路拆分为 4 组并联的金属臂对应等效 LC 电路结构.

在 LC 谐振电路中, 谐振频率与电容电感有如下关系:

$$f = 1/(2\pi\sqrt{LC}). \quad (4)$$

在构建等效电路时, 需要以 (4) 式为约束条件, 使等效电路的谐振频率与超表面电磁仿真时的谐振频率一致 (4.45 GHz 和 7.86 GHz).

超表面的短金属微分支较小, 窄缝缝隙较小, 对应的谐振频率较低; 在低频时, 由于阻抗失配, 超表面不具备良好吸波性能; 在设计等效电路时, 可以忽略这些短金属微分支与窄缝, 将其简化如图 11 所示的等效电路.

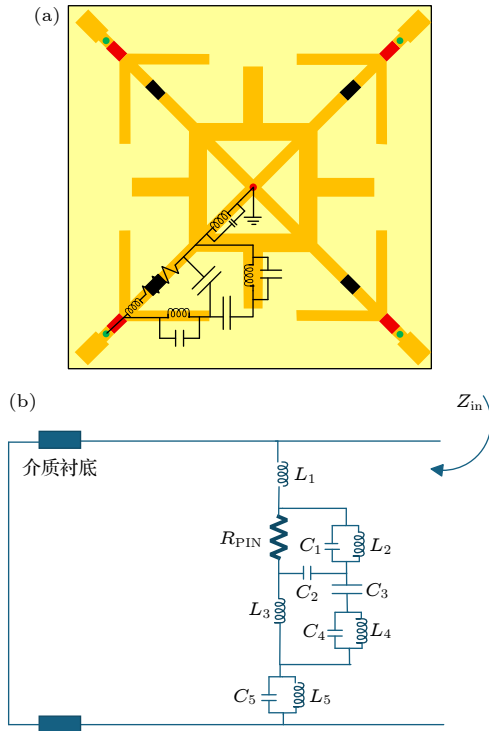


图 11 (a) 顶层与等效电路的对应关系; (b) 等效电路图
Fig. 11. (a) Corresponding relationship between the top layer and the equivalent circuit; (b) equivalent circuit diagram.

在明确等效电路元件分布后, 以 (2) 式—(4) 式为约束条件, 利用电路仿真软件对等效电路结果与电磁仿真中得到的数据进行拟合, 得到等效电路的各参数如表 3 所示. 基于等效电路的输出结果与超表面电磁场仿真结果的对比如图 12 所示.

表 3 等效电路各项参数

Table 3. Parameters of the equivalent circuit.			
参数符号	参数值/pF	参数符号	参数值/nH
C_1	0.128	L_1	27.86
C_2	0.041	L_2	17.92
C_3	0.082	L_3	9.14
C_4	0.207	L_4	4.38
C_5	0.097	L_5	12.47

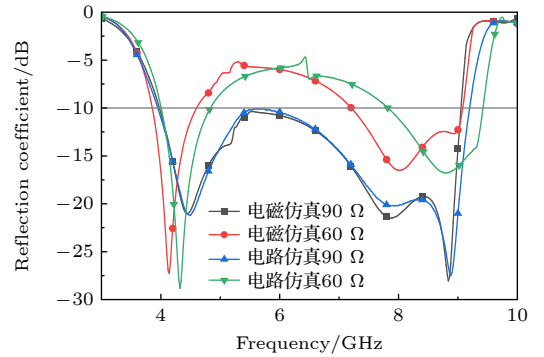


图 12 等效电路的输出结果与电磁仿真结果对比
Fig. 12. Comparison between the results of the equivalent circuit and the electromagnetic simulation.

当超表面处于极化转换功能时, 超表面能实现线极化转换功能主要源于亚波长单元对入射的线极化波正交电场分量的不对称电磁响应. 可利用表 2 中吸波状态得到的等效电路参数 (金属臂的等效电感) 对设计的超表面进行极化转换机理分析. 设入射波为沿 x 方向的线极化波, 将其分解为平行于对角导通二极管方向 (x' 方向) 和垂直于该方向 (y' 方向, 即另一组对角二极管) 的两个正交电场分量:

$$\vec{E}_{\text{inc}} = E_{x'} x' \vec{E}_{\text{inc}} = E_{x'} \hat{x}' + E_{y'} \hat{y}'. \quad (5)$$

低阻二极管支路 (x' 方向): 等效为低阻 R_1 与金属臂等效电感 L_{arm} 串联, 阻抗为

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_{\text{arm}}. \quad (6)$$

截止高阻二极管支路 (y' 方向): 等效为高阻 R_2 与金属臂等效电感 L_{arm} 串联, 阻抗为

$$Z_2 = R_2 + j\omega L_{\text{arm}}. \quad (7)$$

极化转换效率 (polarization conversion efficiency, PCE) 是表征超表面极化转换能量利用效率的核心指标, 具体指入射电磁波总能量中, 经超表面转换为目标极化状态的能量占比。

PCE 与前文所述的极化转换比 (PCR) 虽表征维度存在差异, 但均是超表面极化转换性能的核心评价指标; 其中 PCE 更聚焦能量转化的定量规律, 便于理论层面的机制推导. 故本文采用“极化能量转化效率+极化纯度 (PCE+PCR)”的联合表征策略阐释极化转换的物理机制。

PCE 的计算公式如下:

$$\text{PCE} = |\Gamma_1 - \Gamma_2|^2, \quad (8)$$

其中, Γ_1 , Γ_2 分别为两正交分量的反射系数, 其公式为

$$\Gamma_1 = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}, \quad \Gamma_2 = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0}. \quad (9)$$

在 (2) 式中已经求出 $Z_0 = 232 \Omega$, 进一步计算 PCE 可得到如下结果:

$$\text{PCE} = \left| \frac{R_1 + j\omega L_{\text{arm}} - 232}{R_1 + j\omega L_{\text{arm}} + 232} - \frac{R_2 + j\omega L_{\text{arm}} - 232}{R_2 + j\omega L_{\text{arm}} + 232} \right|^2. \quad (10)$$

通过计算得出当 $R_1 = R_2$ 时, $\text{PCE} = 0$, 此时超表面为吸波状态, 无极化转换. 当阻抗差距越大 (即 R_2/R_1 比值越大) 时, 正交分量的反射系数差异越大, 极化转换效率越高, 与图 6 的 PCR 曲线规律吻合; 以此模型设计的极化转换超表面并未采用传统几何不对称结构, 而是通过 PIN 二极管阻抗特性设计为阻抗不对称结构, 通过改变 R_2/R_1 比值动态调控超表面的 PCE.

4 实验测试

为进行实验验证, 加工制备了由 9×9 个单元组成、尺寸为 $180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 的样件. 介质基板为 F4B 材料, 其介电常数约为 2.65, 厚度为 7 mm, PIN 二极管选用 SMP1302-079LF, 扼流电感采用 SMD0603 封装. 利用弓形法测试装置和安捷伦矢量网络分析仪 N5230A 测量系统, 依照国家军用标准 GJB2038A-2011 对样件进行测试分析. 具体样件实物及测试平台如图 13 所示.

图 14 为实验样件的实测结果. 图 14(a), (b) 为吸波模式, 超表面在 TE 与 TM 极化下, 外加不同偏置电压下的反射系数. 可见, 随电压增大, PIN

二极管正向阻抗逐渐减小, 在目标频段的可调范围达 10 dB, TE 与 TM 极化下的超表面性能基本一致. 图 14(c), (d) 为线极化转换模式时超表面在 TE 与 TM 极化下的最佳交叉极化与同极化反射系数. $V_1 = 0.76 \text{ V}$, $V_2 = 0.52 \text{ V}$, 在该偏置电压下的等效阻抗 $R_1 \approx 5 \Omega$, $R_2 \approx 700 \Omega$. 图 14(e), (f) 为 60° 大入射角时 TE 与 TM 极化下两种模式的最佳反射系数, 与小入射角相比两种极化之间存在一定差异, 但总体性能较为接近.

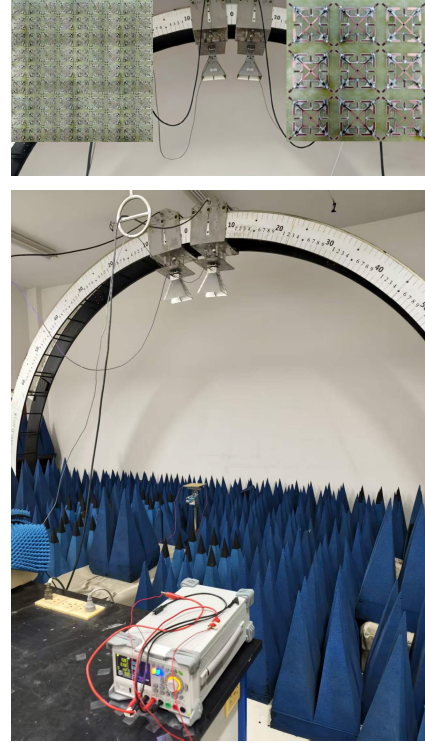


图 13 样件实物及实验测试平台

Fig. 13. Fabricated sample and the measurement platform.

可见, 实物样件的实验测试结果与仿真设计结果基本吻合. 部分误差可能由以下原因引起: 一方面来自介质基板介电常数与损耗正切的误差; 另一方面来自焊接二极管时引入的寄生电容与电感效应; 实验环境的高斯白噪声也可能引起一定误差.

5 结论

本文设计的双功能超表面通过电压调控 PIN 二极管等效阻抗, 实现吸波强度可调; 当超表面为阻抗对称结构 ($R_1 = R_2$) 时, 调控等效阻抗使超表面阻抗匹配或失配使吸波强度变化; 当超表面阻抗对称结构被破坏, 可通过电压调控 PIN 二极管等

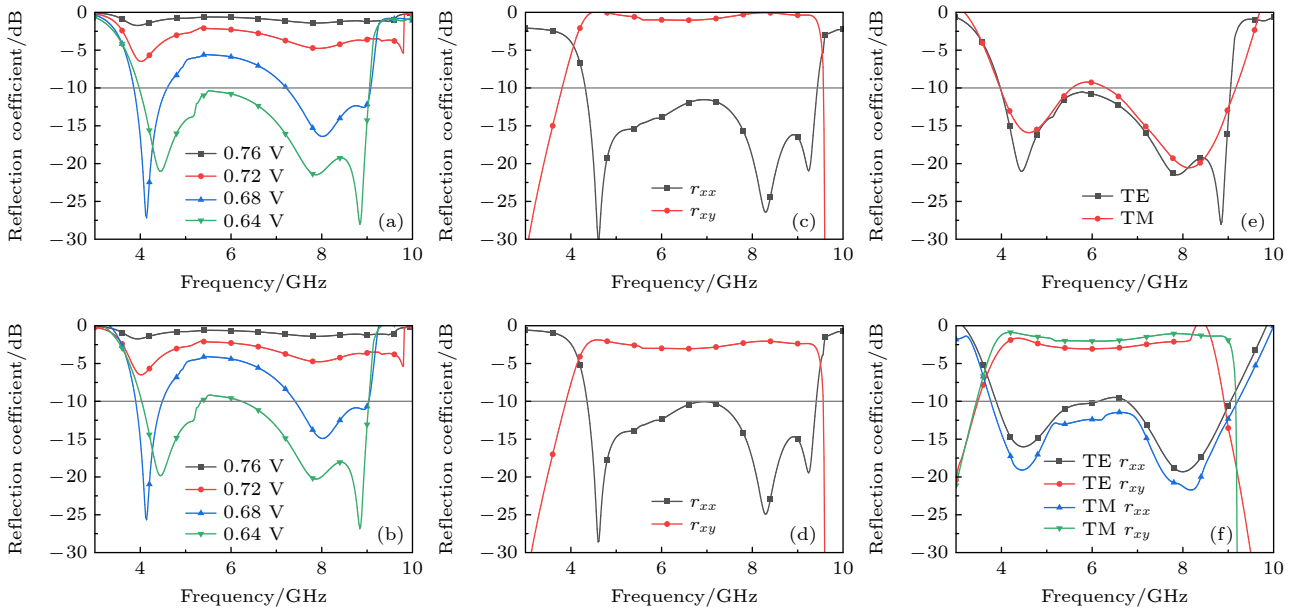


图 14 (a), (b) 不同偏置电压下 (a) TE 极化和 (b) TM 极化的反射系数; (c) TE 极化和 (d) TM 极化下的最佳交叉极化与同极化反射系数; (e) 60°入射时, TE, TM 极化下最佳反射系数; (f) 60°入射时, TE, TM 极化下最佳交叉极化与同极化反射系数

Fig. 14. (a), (b) Reflection coefficients under different bias voltages for (a) TE polarization and (b) TM polarization; (c), (d) optimal cross-polarization and co-polarization reflection coefficients under (c) TE polarization and (d) TM polarization; (e) optimal reflection coefficients under TE and TM polarization at incident angle of 60°; (f) optimal cross-polarization and co-polarization reflection coefficients under TE and TM polarization at incident angle of 60°.

效阻抗, 实现极化转化率可调, 极化转换效率会随着阻抗差距 (R_2/R_1 比值) 的增大而增大. 采用改变阻抗对称的方式实现极化转换功能, 相比传统设计采用的几何不对称方案更加灵活, 可以适应不同场景的动态调控; 在复杂环境中具备吸波强度和极化转换强度可调功能, 且具备一定的电磁波大入射角适应性与极化稳定性; 在目标雷达特征伪装隐身和提升通信链路传输效率与抗干扰能力方面具有应用前景.

参考文献

- [1] Wang Y Z, Xu H X, Wang C H, Wang M Z, Wang S J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 134101 (in Chinese) [王彦朝, 许河秀, 王朝辉, 王明照, 王少杰 2020 *物理学报* **69** 134101]
- [2] Walser R M, Valanju A P, Valanju P M 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 119701
- [3] Glybovski S B, Tretyakov S A, Belov P A, Kivshar Y S, Simovski C R 2016 *Phys. Rep.* **634** 1
- [4] Han J F, Cao X Y, Gao J, Li S J, Zhang C 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 044201 (in Chinese) [韩江枫, 曹祥玉, 高军, 李思佳, 张晨 2016 *物理学报* **65** 044201]
- [5] Wang Z J, Liu T, Zhang F 2025 *J. Space Electron. Technol.* **22** 46 (in Chinese) [王政杰, 刘桐, 张帆 2025 *空间电子技术* **22** 46]
- [6] You Z, Wu G Q, Niu X Y 2025 *J. Radio Sci.* **40** 1162 (in Chinese) [尤政, 武广乾, 牛旭印 2025 *电波科学学报* **40** 1162]
- [7] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K 2004 *Science* **305** 788
- [8] Kaur K P, Upadhyaya T 2018 *IET Microw. Antennas Propag.* **12** 1428
- [9] Chen K, Feng Y J, Monticone F, Zhao J M, Zhu B, Jiang T, Zhang L, Kim Y, Ding X M, Zhang S, Alù A, Qiu C W 2017 *Adv. Mater.* **29** 1606422
- [10] Zheng G X, Muhlenbernd H, Kenney M, Li G X, Zentgraf T, Zhang S 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 308
- [11] Liu J Y, Duan Y P, Zhang T, Huang L X, Pang H F 2022 *Nano Res.* **15** 7498
- [12] Yi J J, Wei M Y, Lin M L, Zhao, X, Zhu L N, Chen X M, Jiang Z H 2022 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **70** 6804
- [13] Wang L S, Li Q G, Fu Q H, Ding X Y, Wang Y, Zhu W R 2023 *Photonics* **10** 1253
- [14] Wang L S, Xia D Y, Fu Q H, Wang Y, Ding X Y 2024 *Int. J. Mod. Phys. B* **38** 1253
- [15] Zuo W Q, Yang Y, He X X, Zhan D W, Zhang Q F 2017 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **16** 329
- [16] Han Y, Che W Q 2017 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **16** 74
- [17] Zhang C, Cheng Q, Yang J, Zhao J, Cui T J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 143511
- [18] Huang X J, Gao H H, He J H, Luan S Z, Yang H L 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 224102 (in Chinese) [黄晓俊, 高焕焕, 何嘉豪, 栾苏珍, 杨河林 2022 *物理学报* **71** 224102]
- [19] Huang C, Zhang C L, Yang J N, Sun B, Zhao B, Luo X G 2017 *Adv. Opt. Mater.* **5** 1700485
- [20] Xia H K, Deng L W, Huang S X, Liu Z X, Qiu L L, Zhu L 2024 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **72** 8554
- [21] Zhang C, Gao J, Cao X Y, Li S J, Yang H H, Li T 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 3301
- [22] Pitilakis A, Tsilipakos O, Liu F, Kossifos K M, Tasolamprou A C, Kwon D H, Mirmoosa M S, Manassis D, Kantartzis N V, Liaskos C, Antoniadis M A, Georgiou J, Soukoulis C M, Kafesaki M, Tretyakov S A 2021 *IEEE Trans. Antennas*

- Propag.* **69** 1440
- [23] Han Y C 2024 *M. S. Thesis* (Changsha: Central South University) (in Chinese) [韩雨晨 2024 硕士学位论文 (长沙: 中南大学)]
- [24] Tennant A, Chambers B 2004 *Smart Mater. Struct.* **13** 122
- [25] Song X Y, Bai X D, Zhu W R 2022 *ACS Appl. Electron. Mater.* **4** 1225
- [26] Wu L J, Zhong S M, Liu T J 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 6039
- [27] Guo Q X, Hao F S, Qu M J, Su J X, Li Z R 2024 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **23** 1241
- [28] Sun Z, Zhang L, Chen X Q, Wang H, Li Y 2025 *Nat. Commun.* **16** 589
- [29] Ye H, Zhang Y 2024 *Opt Express.* **32** 17103
- [30] Zhao H F, Zhao H N, Huang S X 2022 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **55** 344003
- [31] Zhao B, Huang C, Luo X G 2020 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **19** 982
- [32] Zhang Y L, Cao Z W, Jiang J J 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 1204
- [33] Qiu L L, Fang S G, Zhu L, Deng L W, Huang S X, Wu Y Y, Gao X H, Zhang X 2023 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **71** 2735
- [34] Shukoor M A, Dey S, Koul S K 2022 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **70** 5614

Design of a dual-functional reconfigurable metasurface with tunable absorption and switchable linear polarization conversion^{*}

LIU Yuxiao¹⁾ LI Zhihao¹⁾ HUANG Shengxiang²⁾

GAO Xiaohui²⁾ DENG Lianwen^{1)†}

¹⁾ (School of Electronic and Information Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

²⁾ (School of Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

(Received 8 March 2026; revised manuscript received 20 April 2026)

Abstract

Reconfigurable metasurfaces integrated with tunable active devices have become a prominent research hotspot in electromagnetic engineering, enabling dynamic and flexible manipulation of electromagnetic waves. However, many of the reported reconfigurable metasurfaces can only achieve single function, and a few multifunctional designs also face bottlenecks such as narrow operating bandwidth, poor angular stability, and complex bias control networks, which limit the practical applications in smart electromagnetic systems. To solve these problems, this paper proposes one compact and highly integrated reconfigurable metasurface, realizing integration and reversible switch of dynamically tunable microwave absorption and high-efficiency linear polarization conversion.

In the design, four SMP1302-079LF PIN diodes are embedded into the centrosymmetric metasurface unit, and a coaxial feeding structure with 52 nH choke inductor is adopted to independently control the working state of the diodes. The electromagnetic characteristics and working mechanism of the designed metasurface are systematically analyzed by full-wave simulation and theoretical calculation. When the same bias voltage is applied to all PIN diodes, the metasurface maintains a centrosymmetric structure and operates in the tunable absorption mode. The simulation results show that the absorptivity is larger than 90% in 4.08–9.12 GHz, with the relative bandwidth of 68.1%, and the absorption intensity can be tuned over 10 dB with a peak tuning range of 25 dB. When different bias voltages are applied to adjacent PIN diodes, the impedance symmetry of the metasurface is broken, and the metasurface switches to the linear polarization conversion mode. In this mode, the polarization conversion ratio (PCR) exceeds 90% in 4.11–9.03 GHz, and the peak PCR reaches 99%.

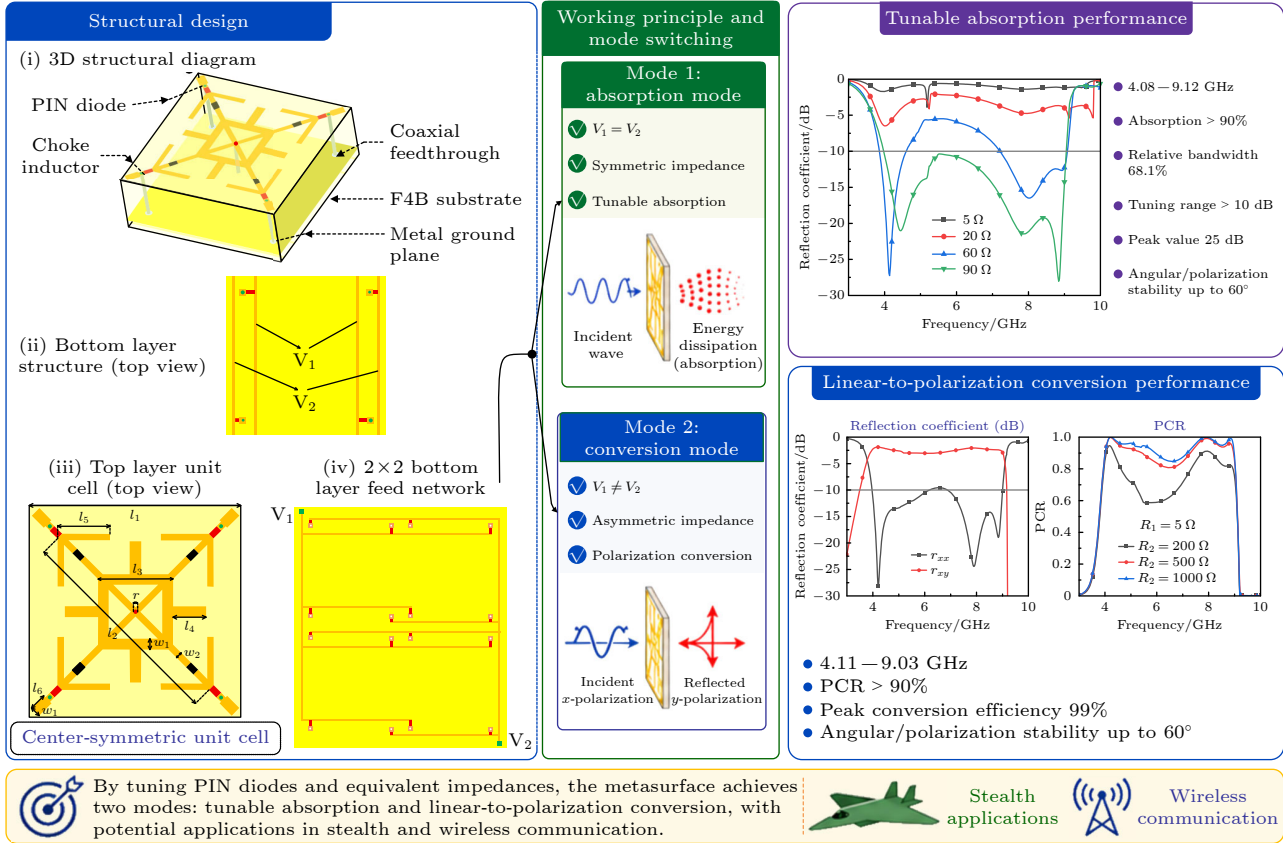
^{*} Project supported by the Key Research and Development Program of Human Province, China (Grant No. 2023GK2055).

[†] Corresponding author. E-mail: denglw@csu.edu.cn

The physical mechanism reveals that the polarization conversion relies on the electrically controlled asymmetric electromagnetic response, which is more flexible than the traditional geometric asymmetry design. In addition, the metasurface maintains stable performance with incident angles up to 60° for both TE and TM polarizations in two working modes, showing excellent angular and polarization stability.

A prototype with 9×9 units ($180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$) is fabricated and measured by the arch method following GJB2038A-2011 standard. The measured results agree well with the simulation data, verifying effectiveness of the design. The proposed metasurface has the advantages of compact structure, flexible function switch, wide bandwidth and strong angular stability, showing extensive application prospect in intelligent stealth, adaptive camouflage and anti-interference wireless communication systems.

Design of a dual-functional reconfigurable metasurface with tunable absorption and switchable linear polarization conversion



Keywords: metasurface, absorption strength, linear polarization conversion, reconfigurable

DOI: 10.7498/aps.75.20260335

CSTR: 32037.14.aps.75.20260335

吸波强度可调与线极化转换双功能可重构超表面设计

刘昱潇 李志豪 黄生祥 高小惠 邓联文

Design of a dual-functional reconfigurable metasurface with tunable absorption and switchable linear polarization conversion

LIU Yuxiao LI Zhihao HUANG Shengxiang GAO Xiaohui DENG Lianwen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 160705 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260335

CSTR: 32037.14.aps.75.20260335

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260335>

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

宽带多功能可重构极化转换超表面

Broadband multifunctional reconfigurable polarization conversion metasurface

物理学报. 2026, 75(15): 160705 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260343>

动态可调谐的频域多功能可重构极化转换超表面

Dynamically tunable frequency-domain multifunctional reconfigurable polarization conversion metasurface

物理学报. 2022, 71(22): 224102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221256>

透反双模态极化转换与超宽带吸收功能可调控太赫兹超表面理论设计

Theoretical design of tunable terahertz metasurfaces with dual-mode polarization conversion and ultra-broadband absorption functionality

物理学报. 2025, 74(13): 138701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241762>

宽带吸收与极化转换可切换的太赫兹超表面

Switchable ultra-broadband absorption and polarization conversion terahertz metasurface

物理学报. 2024, 73(14): 148701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240525>

线极化激励的双圆极化宽角度双波束扫描透射阵天线

Dual-circularly polarized wide-angle dual-beam scanning transmitarray antenna excited by linear polarization

物理学报. 2026, 75(14): 148701 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260267>

线极化与圆极化波均可吸收的太赫兹超表面

Terahertz metasurface absorbed by both linearly and circularly polarized waves

物理学报. 2023, 72(5): 057802 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221832>