光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023121201

一种具有多种谐振模式的太赫兹超表面器件

马　勇[1]，徐应松[1]，盛宏远[1]，陈　鑫[1]，黎人溥[1]，陈前斌[1]，
周幸叶[2]，陈　沁[3]，Anthony Vickers[1,4]，Jehan Akbar[5]，马晓燠[6]*

（1. 重庆邮电大学 光电工程学院，重庆 400065；2. 河北半导体研究所，石家庄 050057；
3 暨南大学 纳米光子学研究院，广州 511443；4. 重庆太赫智芯科技发展有限公司，重庆 400060；
5. 哈扎拉大学，巴基斯坦 曼塞赫拉 21300；6. 四川文理学院 智能制造学院，四川 达州 635000）

摘　要： 设计了一种中心对称的分裂环形状超表面结构，该结构具有偏振不敏感和高品质因子的特性。通过理论和实验研究，深入分析了其谐振点的频谱特性，并确定了谐振峰的模式，包括LC、偶极和高阶谐振等。其中，几种高阶谐振模式表现出较高的高品质因数Q（约230），并且对超表面衬底材料的介电常数变化高度敏感。此外，还研究了具有不对称超表面结构的电磁性质，发现通过分别增加超表面结构沿水平轴（x轴）和垂直轴（y轴）的不对称性，可以产生和增强0.332 THz和0.210 THz的谐振。

关键词： 太赫兹；超材料；高品质因素；谐振模式

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2024)02－0181－07

THz-Metasurface Device with Multiple Resonance Modes

MA Yong[1], XU Yingsong[1], SHENG Hongyuan[1], CHEN Xin[1], LI Renpu[1], CHEN Qianbin[1],
ZHOU Xingye[2], CHEN Qin[3], Anthony Vickers[1,4], Jehan Akbar[5], MA Xiaoyu[6]

(1. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN;
2 Hebei Semiconductor Research Institute, Shijiazhuang 050057, CHN;
3. Institute of Nanophotonics, Jinan University, Guangzhou 511443, CHN;
4. Chongqing Taihe Zhixin Technology Development Co., Ltd., Chongqing 400060, CHN;
5. Hazara University, Mansehra 21300, PAK;
6. School of Intelligent Manufacturing, Sichuan University of Arts and Science, Dazhou 635000, CHN)

Abstract: An all-in-one design is presented for a polarization-insensitive metasurface with a centrally symmetric split-ring structure for generating various resonant modes. The types of resonant modes (LC, dipole, and higher order resonances) are identified and analyzed by investigating their spectroscopic properties theoretically and experimentally. Several higher-order resonant modes have significantly higher quality factors, Q (～230). These resonant modes are also highly sensitive to the dielectric properties of the surrounding material of the metasurface. Additionally, the EM properties of metasurfaces with asymmetric structures were also investigated. It was found that additional resonant modes at both 0.332 and 0.210 THz could be excited and strengthened by increasing the asymmetry of the metasurface structure along the

收稿日期：2023－12－12.

基金项目：新一代信息网络与终端省部共建协同创新中心项目；中国电科芯片技术（集团）有限公司量子实验室基金项目（6310001-2）；重庆邮电大学交叉学科和新兴领域重点专项项目（A2018-01）；重庆市基础与前沿研究项目（cstc2016jcyjA0301）；重庆市留学人员创业创新支持计划项目（cx2021011）；河北省杰青项目（F2021516001）；国家自然科学基金青年基金项目（61405001）.

* **通信作者：**马晓燠

horizontal (x-axis) and vertical axes (y-axis).

Key words: terahertz; metamaterial; high quality factors; resonant modes

0 引言

超表面器件是一种具有周期性平面排列特性的微结构器件,通过改变微结构的几何参数可实现器件电磁特性的调控[1-5]。目前,太赫兹技术的研究受到广泛关注,电磁调控是开发太赫兹光电器件的关键技术之一。超表面器件因其具有独特的电磁调控优势,能够突破现有技术难题,逐渐成为太赫兹技术研究的热点[6-10]。基于超表面结构的太赫兹传感器在生物样品的高灵敏检测等领域已得到应用[11-12]。

一方面,现有的太赫兹超表面传感器主要基于偏振敏感的周期结构,只能对特定偏振太赫兹波进行检测,因此器件的检测效率[13-14]或调制深度[15-16]有待进一步提高。为此,需要设计偏振不敏感超表面结构,使得入射太赫兹波的所有偏振分量能够被器件检测,从而提高检测灵敏度和检测效率。另一方面,单个谐振单元的几何参数优化是太赫兹超表面器件设计的关键,通过调整谐振单元几何参数,可以实现具有不同电磁特性的太赫兹超表面器件,从而满足各种应用需求[17-19]。具有高品质因子的谐振单元能够进一步提高太赫兹传感器的灵敏度。

综上所述,实现偏振不敏感和高品质因子谐振的太赫兹超表面传感器件是提高探测灵敏度的重要手段。为此,本文提出了一种能够同时支持多种不同谐振模式的太赫兹超表面结构并使用电磁仿真软件(CST Microwave Studio)对超表面结构进行了设计和分析。通过分析设计结构的透射频谱和电流密度分布,本文设计的太赫兹超表面器件实现了多个太赫兹谐振频率,分别为:0.14 THz(LC 谐振),0.39 THz(沿环的中心臂和右臂谐振的两个偶极谐振的激励),以及 0.44,0.45,0.46,0.47,0.48 和 0.49 THz(高阶偶极模)。本文系统地分析了该结构几何参数对器件电磁特性的影响,结果表明微小的几何参数变化对谐振频率和传输振幅的影响较小。本文也分析了结构不对称超表面器件的谐振特性。当间隙分别沿 x 和 y 方向位移时,在 0.33,0.21,0.36 和 0.43 THz 处发现了四个额外的尖锐谐振峰。在这些谐振中,最高的品质因数 $Q=230$ 是在 0.45 THz 处获得的,相应的带宽仅为 0.7 GHz。此外,当基底材料变得有损耗时,这些高阶偶极谐振模式就会消失。本文设计的样品采用纳米加工技术(光刻、金属蒸发)进行加工,并使用太赫兹时域光谱系统进行表征(光纤耦合太赫兹时域光谱仪和频谱仪)。实验结果与仿真结果基本一致。不同类型的谐振模式可能在多种应用中发挥重要作用:偏振不敏感的太赫兹探测。不对称结构超表面的尖锐谐振以及高 Q 值的谐振模式可用于高灵敏太赫兹传感器。

1 结构设计与仿真

如图 1 所示,本文设计的超表面结构由周期为 p 的谐振单元阵列组成。每个谐振单元包括介质衬底和方形金属结构(长度为 a)。介质衬底的材料为硅,其相对介电常数为 11.67,损耗约为 0。十字形金属线的间隙宽度为 d,以十字为中心,位于方形结构内部。表面金属材料为金(Au),其宽度为 w,厚度为 t。设定结构的几何参数初始值为:$p=200\ \mu m$,$a=174\ \mu m$,$d=2\ \mu m$,$w=5\ \mu m$,$t=0.2\ \mu m$。本文使用 CST Microwave Studio 中的频域求解器来仿真所设计的结构。单元边界条件为周期性边界。使用 x 或 y 偏振波的 Floquet 端口激励。设定入射光束的方向垂直于超表面。

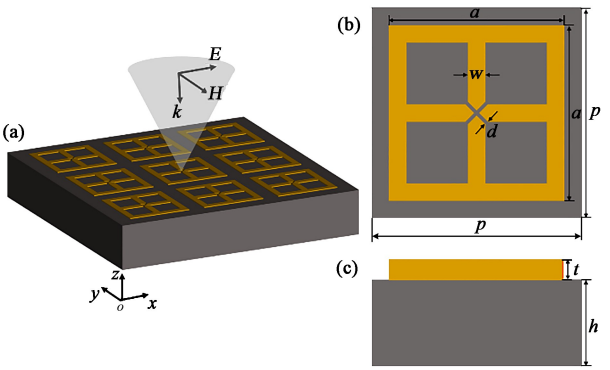


图 1 设计的太赫兹超表面器件结构示意图。(a) 三维结构;(b) 正视图;(c) 侧视图

图 2 给出了两种正交偏振模式(E_x 和 E_y 模式)在 0.1 THz 至 0.5 THz 频率范围内的透射频谱图。由于超表面结构的对称性,其电磁响应特性与入射太赫兹波的偏振状态无关。不同的谐振模式(编号为 P1~P8)如表 1 所示。每个谐振峰具有与谐振模式相对应的线宽。在这些模式中线宽 Δf 的

最大值为 105.1 GHz(对应 P2，0.394 THz 的谐振频率)，是 P1(0.140 THz 的谐振频率)的三倍。P1 和 P2 两个谐振峰的透射系数 T 最小，低于 0.040。与 P1，P2 相比，谐振模式 P3～P8 的谐振峰更加尖锐，线宽极小(小于 10 GHz)，并且它们的透射系数在 0.077 和 0.217 之间的范围内变化。本文通过分析超表面器件在电磁响应下的电流分布，进一步深入了解其谐振的物理机理。如图 3 所示，黑色箭头为电流的流向。在 P1 谐振的感应电流沿圆形方向流过整个环周边，同时在环间隙处积累电容电荷，电场强度在环间隙处最大，此处的谐振满足 LC 谐振的特征。如图 3(b)所示，谐振模式 P2 归因于两个偶极谐振的激发，谐振分别位于沿环的中心臂和右臂。P3～P8(图 3(c)～(h))是高阶偶极谐振模式。值得注意的是，这些谐振比低频谐振尖锐得多，线宽极小。如图 3(c)～(h)所示，P3～P8 的谐振有效面积较小，因此与 P1～P2 相比，它们与自由空间的耦合显著减小。这导致辐射损失的减少，从而产生非常尖锐的谐振峰[21]。在实际场景中，这些尖锐的谐振峰在多种场景中有着独特的应用价值，例如用于高灵敏度生物检测、窄带滤波和调制等。

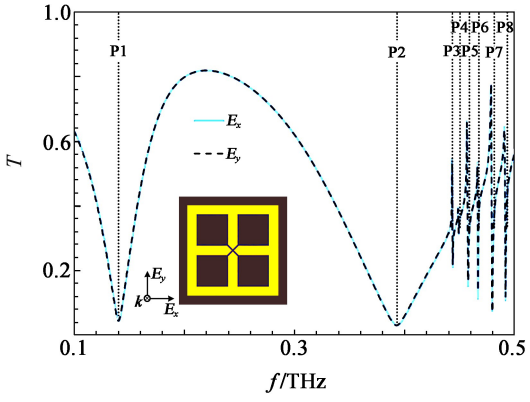


图 2　偏振正交入射波分量 E_x 和 E_y 的透射频谱

表 1　不同谐振模式的参数比较(* P9，* P10，* P11 和 * P12 是超表面不对称结构的共振模式，如图 7 所示)

谐振点编号	中心频率/THz	带宽/GHz	透射系数
P1	0.140	36.8	0.046
P2	0.394	105.1	0.030
P3	0.444	1.9	0.217
P4	0.449	0.7	0.314
P5	0.458	2.4	0.155
P6	0.467	0.8	0.116
P7	0.480	3.3	0.077
P8	0.492	2.1	0.116
* P9	0.334	23.1	0.134
* P10	0.215	15.2	0.226
* P11	0.360	70	0.040
* P12	0.434	16	0.075

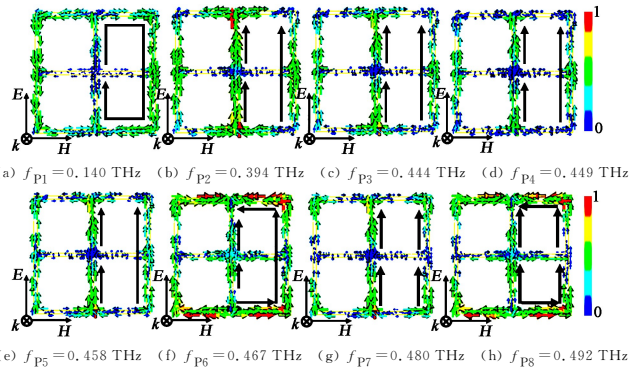


图 3　谐振电流的密度分布(箭头指示电流的方向)

本文进一步讨论超表面的电磁特性与其几何参数之间的关系。图 4 和图 5 分别为不同间隙宽度 d、金属层宽度 w、金属层厚度 t 和谐振环长度 a 的透射率云图和透射频谱。如图 5(a)和(b)所示，LC 谐振模式的谐振频率发生蓝移(高达 10 GHz)，并且随着间隙宽度 d 从 2 μm 增加到 22 μm 和金属层宽度 w 从 2 μm 增加到 6 μm 时，透射系数 T 降低(最低可达 0.01)。当 d 和 w 同时增加时，偶极谐振(P2)的频率表现出蓝移(高达 40 GHz)。虽然高阶谐振峰的频点位置没有移动，但是器件与自由空间的耦合增加导致了线宽显著增加。从物理机制方面分析，RLC 电路的谐振频率与电感和电容的平方根成反比。通过增加 d 和 w，超表面具有更小的电容和电感，从而具有更高的 LC 型谐振频率。随着环形谐振器的尺寸 a 从 170 μm 增加到 174 μm，透射频谱在整个仿真频率范围内显示出非常小的变化(小于 5 GHz)。然而，在 160 μm≤a≤190 μm 的较

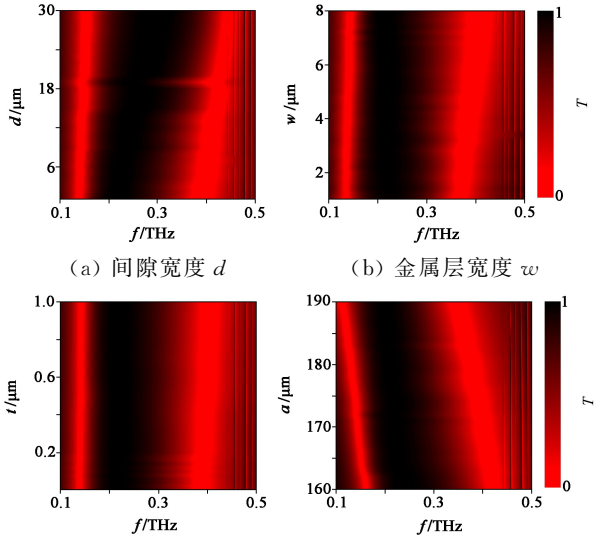


图 4　依赖于各种几何参数的模拟透射率云图

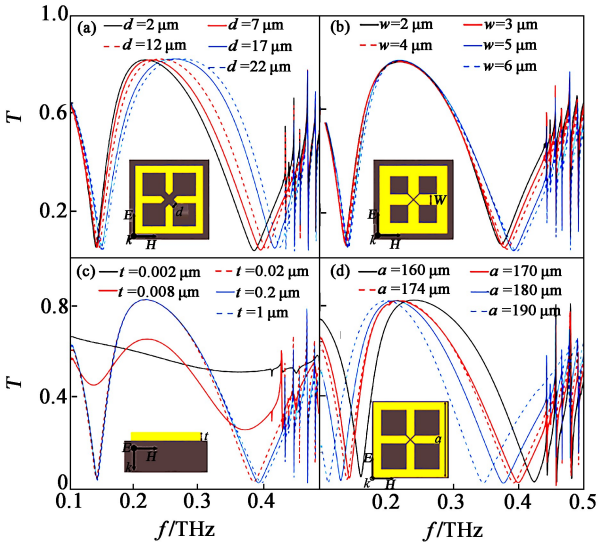
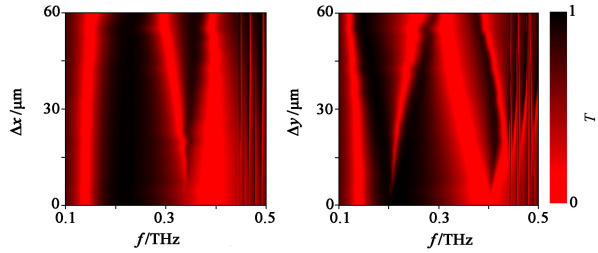


图 5 不同几何参数下的透射谱。(a) 间隙宽 d;(b) 金属层宽度 w;(c) 金属层厚度 t;(d) 谐振环路长度 a

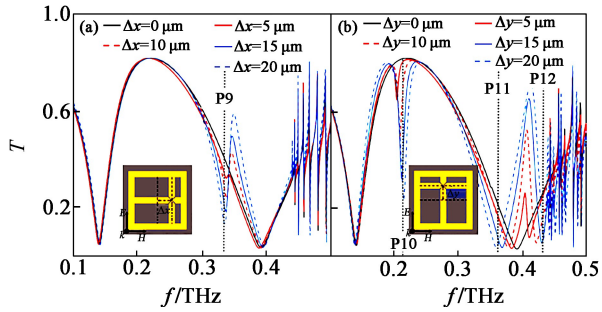
大长度范围内,LC 模式的谐振频率从 0.162 THz 移动到 0.112 THz。图 5(c)显示了不同金属厚度下的透射频谱,其中可以看出,随着金属厚度 t 的增加,谐振特征逐渐显现。

本文继续分析了间隙位置分别沿 x 和 y 方向位移时谐振的变化,结果如图 6 和 7 所示。对于两种情况(E_x 方向),入射波的电场都保持平行于环形谐振器的垂直臂。结果表明,当间隙位置沿 x 轴位移时,谐振模式 P1～P8 的谐振频率显示出非常小的变化(小于 5 GHz)。然而,高阶偶极谐振(P3～P8)的透射系数随着位移的增加而减小。通过观察电流分布可以发现,造成以上现象的原因是入射波和中心平行臂之间的耦合减小。随着位移的增加,在 0.332 THz 处出现另一个尖锐的谐振(P9)。当间隙位置沿 y 轴位移时,高阶偶极谐振 P3～P8 蓝移,并且在该谐振频率下的透射系数减小。偶极谐振 P2 变为初始谐振位置两侧的两个尖锐谐振峰(P11,P12),如图 6 和图 7(b)所示。随着位移的增加,观察到新的谐振峰,位于 0.210 THz 处(P10)。当位移(Δx 和 Δy)增加到 20 μm 时,谐振模式(P3)的透射系数下降到 0.04,P3 处的品质因数 $Q=140$。由于结构的对称性被破坏,谐振模式 P2 产生了劈裂,被分成 0.360 THz(P11)和 0.434 THz(P12)的两个偶极谐振。谐振峰的巨大变化和新谐振峰的出现的原因是超表面谐振单元的不对称性导致电荷分布不对称以及偶极振荡的改变和高阶谐振的激发,例如四极、八极、LC 谐振[22]。应该注意的是,随着间隙位置的移动,LC 谐振(P1)变化小于 3 GHz,这意味着这种谐振在很大程度上不受器件加工误差的影响。



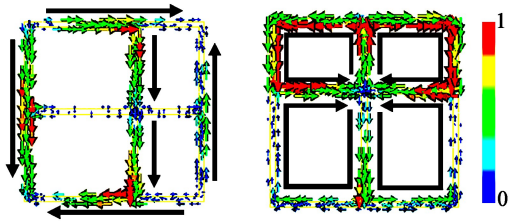
(a) Δx (b) Δy

图 6 中心十字开口偏移对透射性的影响



(a) 间隙的位置沿 x 轴位移 (b) 间隙的位置沿 y 轴位移

图 7 中心十字开口偏移对透射谱的影响



(a) $f_{P9}=0.332$ THz, $\Delta x=20$ μm (b) $f_{P10}=0.21$ THz, $\Delta y=20$ μm

图 8 非对称结构超表面器件的电流分布

2 制备和实验

太赫兹超表面器件样品加工流程如图 9 所示。首先通过光刻技术在厚度为 670 μm 的硅衬底上对金属图案进行刻蚀。通过使用电子束蒸发技术沉积厚度为 30 nm 和 170 nm 的 Ti 和 Au 金属层。实验中共加工了 10 个不同几何参数的样品,样品参数如表 2 所示。

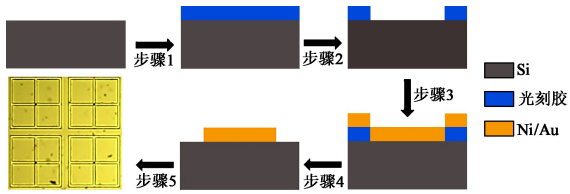
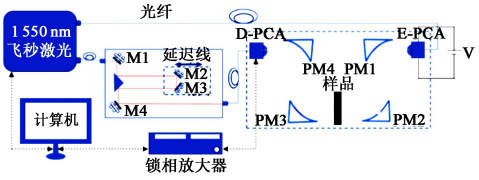


图 9 超表面样品的加工流程示意图

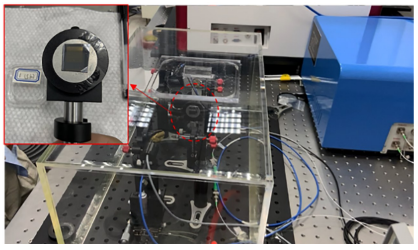
表 2　各样品的几何参数

序号	几何参数
1	$p=200\ \mu m, a=174\ \mu m, d=2\ \mu m, w=5\ \mu m$, and $t=0.2\ \mu m$
2	$p=200\ \mu m, a=174\ \mu m, d=22\ \mu m, w=5\ \mu m$, and $t=0.2\ \mu m$
3	$p=200\ \mu m, a=174\ \mu m, d=2\ \mu m, w=3\ \mu m$, and $t=0.2\ \mu m$
4	$p=200\ \mu m, a=174\ \mu m, d=2\ \mu m, w=7\ \mu m$, and $t=0.2\ \mu m$
5	$p=200\ \mu m, a=170\ \mu m, d=2\ \mu m, w=5\ \mu m$, and $t=0.2\ \mu m$
6	$p=200\ \mu m, a=180\ \mu m, d=2\ \mu m, w=5\ \mu m$, and $t=0.2\ \mu m$
7	$p=200\ \mu m, a=174\ \mu m, d=2\ \mu m, w=5\ \mu m, t=0.2\ \mu m$ and $\Delta x=0\ \mu m$
8	$p=200\ \mu m, a=174\ \mu m, d=2\ \mu m, w=5\ \mu m, t=0.2\ \mu m$ and $\Delta x=20\ \mu m$
9	$p=200\ \mu m, a=174\ \mu m, d=2\ \mu m, w=5\ \mu m, t=0.2\ \mu m$ and $\Delta y=0\ \mu m$
10	$p=200\ \mu m, a=174\ \mu m, d=2\ \mu m, w=5\ \mu m, t=0.2\ \mu m$ and $\Delta y=20\ \mu m$

使用光纤耦合太赫兹时域光谱系统(THz-TDS)对样品进行表征，系统原理图和实物照片如图 10 所示。其工作原理如下：光纤耦合激光器产生波长为 1 550 nm 的飞秒激光脉冲。脉冲持续时间、重复频率和平均功率分别为 100 fs，100 MHz 和 80 mW。激光脉冲被分成两束，一束用于泵浦太赫兹光电导发射器以产生太赫兹脉冲，另一束用于探测由太赫兹光电导接收器接收的太赫兹信号。样品的太赫兹时域信号由快速傅里叶变换(FFT)将样品的太赫兹时域信号转换为相应的频谱。该系统在 0.1～4 THz 的频率范围内，可实现 80 dB 的动态功率范围和 2 GHz 的频率分辨率。为了最大限度地减少水蒸气对太赫兹波的吸收，将系统的样品仓充入干燥的氮气。



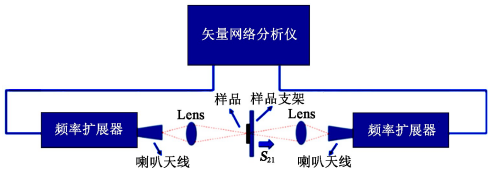
(a) 原理示意图



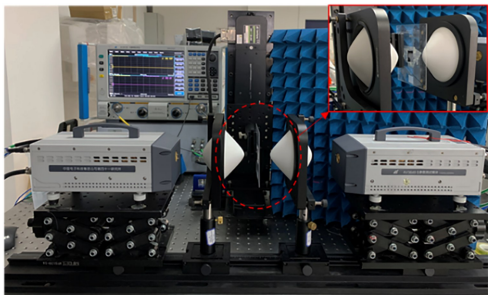
(b) 系统照片(样品支架放置在太赫兹光束的焦点位置)

图 10　太赫兹时域光谱系统结构示意图及实物照片

使用太赫兹频域光谱系统再次验证从 THz-TDS 获得的结果，如图 11 所示。其中，一对带喇叭天线的频率扩展器(型号 AV3649)用于太赫兹信号的发送和探测；两个 PTFE 透镜将光束聚焦到样品和探测器上，其焦距分别为 50 mm 和 25 mm。系统的频率范围为 140～220 GHz，220～325 GHz 和 325～500 GHz，频率分辨率为 30 MHz。



(a) 系统构成原理图



(b) 基于矢量网络分析仪的频域太赫兹光谱系统照片

图 11　太赫兹频谱分析系统结构示意图及系统照片

图 12 和图 13 给出了样品的透射系数实验结果。该结果显示实验数据和仿真数据结果基本一致。E_x 和 E_y 偏振的透射频谱互相重合，表明超表面器件对于不同偏振态的太赫兹波响应没有区别，即表现为偏振不敏感。Fabry-Perot 干涉出现在几个频率位置，如图 12(a)所示。当间隙距离 d 从 2 μm 增加到 22 μm 时，谐振模式 P2 从 0.392 THz 蓝移到 0.440 THz，如图 12(b)所示。当金属宽度从 3 μm 增加到 22 μm 时，P2 的频率增加了 20 GHz，如图 12(c)所示。当长度从 170 μm 增加到 180 μm 时，P1 的频率减少了 20 GHz，如图 12(d)所示。如图 12(e)所示，Δx 从 0 增加到 20 μm，在 0.332 THz 处产生了新的谐振峰，而其他谐振峰保持不变。当 Δy 从 0 增加到 20 μm 时，也观察到了类似的结果，在 0.21 THz 处产生新的谐振峰。当不对称超表面的几何参数改变时，谐振模式 P1 没有发生任何变化。此外，在实验结果中没有观察到高阶谐振，分析认为这是由衬底材料的介电损耗所导致。为了分析这种影响，通过仿真分析了具有 Si 衬底损耗的样品的透射频谱，如图 14 所示。当引入衬底的损耗时，谐振模式 P3～P8 消失。LC 谐振和偶极谐振 P1～P2 保持一致。图 15 显示了硅衬底的不同损耗角正切下的透射频谱，结果表明，由于衬底损耗的增加，谐振峰逐渐消失。这种效应可能是由于在高阶谐振模式下吸收了局部表面等离子体谐振。上述结果表明，该超表面对损失高度敏感，可以用于检测损失场景，例如生物传感。

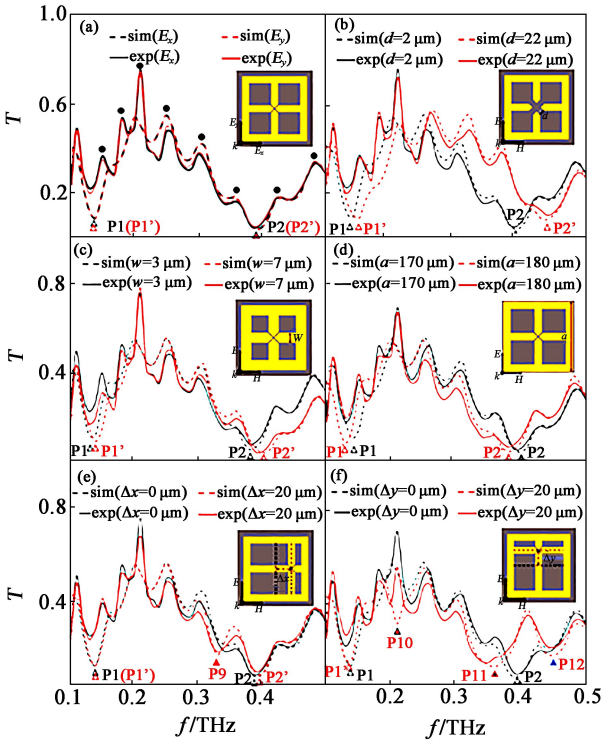


图 12 器件透射谱仿真和实验结果。(a) E_x 和 E_y 的极化；(b) d 从 2 μm 增加到 22 μm；(c) w 从 3 μm 增加到 7 μm；(d) a 从 170 μm 增加到 180 μm；(e) Δx 从 0 μm 增加到 20 μm；(f) Δy 从 0 μm 增加到 20 μm

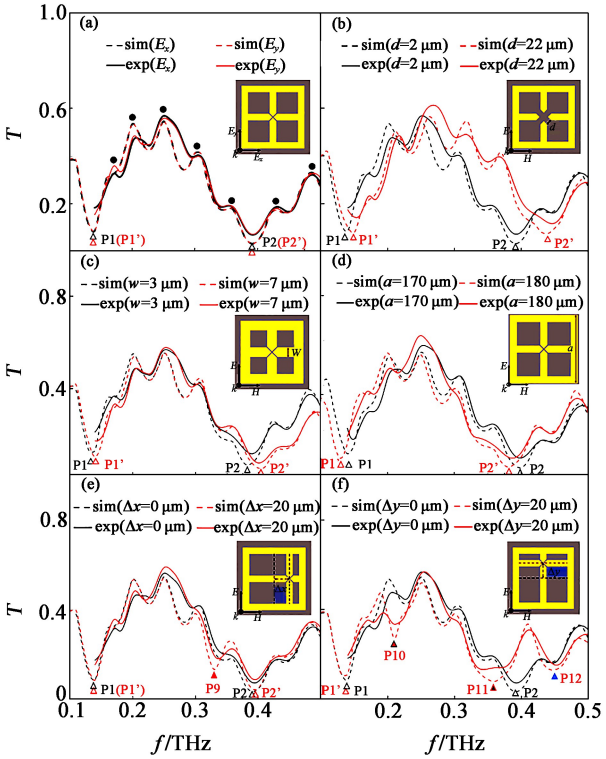


图 13 太赫兹光谱系统模拟和实验结果。(a) E_x 和 E_y 的极化；(b) w 从 2 μm 增加到 22 μm；(c) w 从 3 μm 增加到 7 μm；(d) a 从 170 μm 增加到 180 μm；(e) Δx 从 0 μm 增加到 20 μm；(f) Δy 从 0 μm 增加到 20 μm

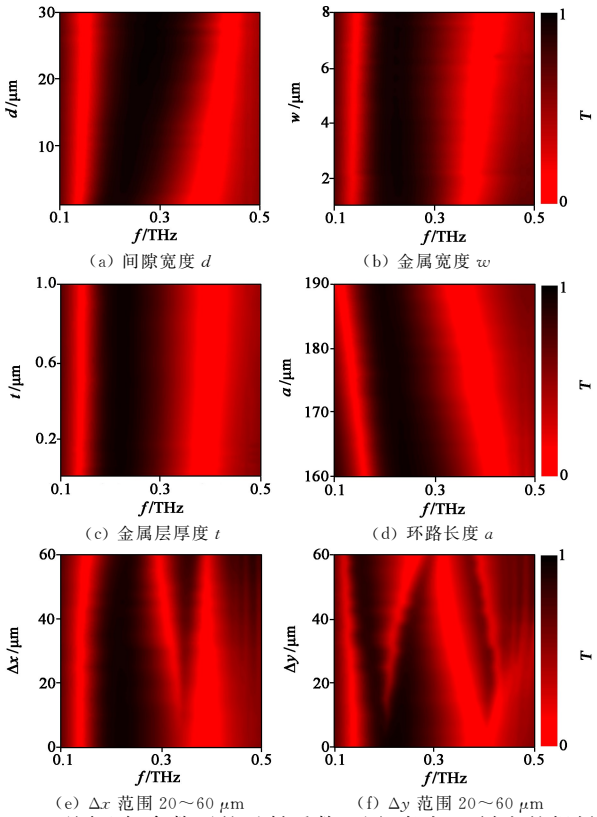


图 14 不同几何参数下的透射系数云图(考虑 Si 衬底的损耗)

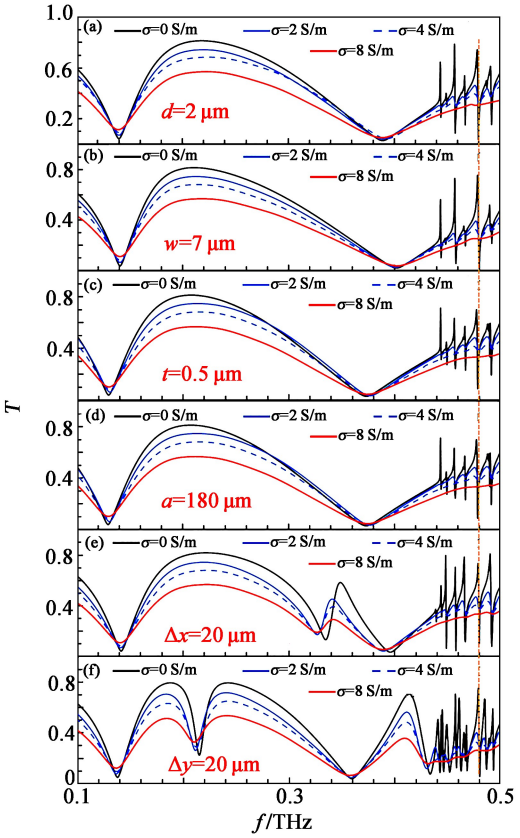


图 15 不同 Si 衬底损耗下的透射谱(p=200 μm，a=174 μm，w=5 μm，and t=0.2 μm，d=2 μm)。(a) d=2 μm，(b) w=7 μm，(c) t=0.5 μm，(d) a=180 μm，(e)Δx=20 μm，(f)Δy=20 μm

3　结论

本文设计了一种具有多种谐振模式且偏振不敏感的太赫兹超表面器件。通过电磁仿真和实验验证比较了不同器件结构下的透射谱和电流密度分布。分析了各种谐振模式的特点。仿真和实验结果表明，通过改变超表面谐振单元的几何参数可以实现太赫兹超表面器件电磁响应的大带宽调控。谐振单元几何尺寸的变化对 LC 谐振频率和传输效率的影响很小，这有利于消除加工误差对器件性能的影响。几个高阶谐振模式具有更高的 Q 值（高达 230）且谐振模式对超表面衬底材料介电常数的损耗系统敏感。可以通过减小衬底材料厚度来消除衬底的太赫兹损耗和 Fabry-Perot 干涉。此外，还分析了具有不对称结构的超表面的电磁性质。结果表明，超表面结构沿水平轴（x 轴）和垂直轴（y 轴）不对称性的变化，可以激发和增强 0.332 THz 和 0.210 THz 的附加谐振模式。此类高阶偶极谐振和不对称诱导的四极谐振的高品质因子在生物传感、无损检测、调制和高品质滤波等场景中具有重要的应用。

参考文献：

[1] Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R. Plasmonic meta-atoms and metasurfaces[J]. Nature Photon., 2014, 8(12): 889-898.

[2] Chen H, Padilla W, Cich M J, et al. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator[J]. Nature Photon., 2009, 3: 148-151.

[3] Tittl A, Leitis A, Liu M, et al. Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces[J]. Science, 2018, 360(6393): 1105-1109.

[4] Liu S, Vabishchevich P, Vaskin A, et al. An all-dielectric metasurface as a broadband optical frequency mixer[J]. Nature Commun., 2018, 9: 2507.

[5] Faraji-Dana M S, Arbabi E. Compact folded metasurface spectrometer[J]. Nature Commun., 2018, 9(1): 1-8.

[6] Qu S W, Wu W W, Chen B J, et al. Controlling dispersion characteristics of terahertz metasurface[J]. Sci. Rep., 2015, 5(1): 1-6.

[7] Gao L H, Cheng Q, Yang J, et al. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces[J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(9): e324.

[8] Mueller J P B, Rubin N A, Devlin R C, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. Phys. Rev. Lett., 2017, 118(11): 113901.

[9] Miao Z, Wu Q, Li X, et al. Widely tunable terahertz phase modulation with gate-controlled graphene metasurfaces[J]. Phys. Rev. X, 2015, 5(4): 041027.

[10] Sensale-Rodriguez B, Yan R, Rafique S, et al. Extraordinary control of terahertz beam reflectance in graphene electro-absorption modulators[J]. Nano Lett., 2012, 12(9): 4518-4522.

[11] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. Nature Mater., 2014, 13(2): 139-150.

[12] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. Science, 2013, 339(6125): 1232009.

[13] Ni X, Emani N K, Kildishev A V, et al. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas[J]. Science, 2012, 335(6067): 427-427.

[14] Yan X, Yang M, Zhang Z, et al. The terahertz electromagnetically induced transparency-like metamaterials for sensitive biosensors in the detection of cancer cells[J]. Biosens. Bioelectron., 2019, 126: 485-492.

[15] Xu W, Xie L, Zhu J, et al. Terahertz biosensing with a graphene-metamaterial heterostructure platform[J]. Carbon, 2019, 141: 247-252.

[16] Mitrofanov O, Siday T, Thompson R J, et al. Efficient photoconductive terahertz detector with all-dielectric optical metasurface[J]. Appl. Photon., 2018, 3(5): 051703.

[17] Siday T, Vabishchevich P P, Hale L, et al. Terahertz detection with perfectly-absorbing photoconductive metasurface[J]. Nano Lett., 2019, 19(5): 2888-2896.

[18] Zhao Y, Wang L, Zhang Y, et al. High-speed efficient terahertz modulation based on tunable collective-individual state conversion within an active 3 nm two-dimensional electron gas metasurface[J]. Nano Lett., 2019, 19(11): 7588-7597.

[19] Kim T T, Kim H, Kenney M, et al. Amplitude modulation of anomalously refracted terahertz waves with gated-graphene metasurfaces[J]. Adv. Opt. Mater., 2018, 6(1): 1700507.

[20] Yuan Y, Bingham C, Tyler T, et al. Dual-band planar electric metamaterial in the terahertz regime[J]. Opt. Express, 2008, 16(13): 9746-9752.

[21] Yang S, Tang C, Liu Z, et al. Simultaneous excitation of extremely high-Q-factor trapped and octupolar modes in terahertz metamaterials[J]. Opt. Express, 2017, 25(14): 15938-15946.

作者简介：

马　勇（1980—），男，博士，副研究员，重庆邮电大学量子信息技术实验室主任，从事太赫兹器件与技术、光量子器件与技术的研究，已发表 SCI/EI 论文 65 篇；

马晓燠（1983—），男，博士，研究员，研究领域包括：自适应光学、微纳光学，以及光学测量。