

# 波导谐振腔集成馈电型波前调控 惠更斯超表面研究\*

黄帅<sup>1)</sup> 吴天昊<sup>2)</sup> 管春生<sup>3)</sup> 丁旭旻<sup>3)</sup> 吴昱明<sup>4)†</sup> 吴群<sup>3)</sup> 唐晓斌<sup>1)</sup>

1) (中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京 100041)

2) (河北半导体研究所, 石家庄 050051)

3) (哈尔滨工业大学, 电子与信息工程学院, 哈尔滨 150001)

4) (北京理工大学, 集成电路与电子学院, 北京 100081)

(2022年6月30日收到; 2022年7月30日收到修改稿)

本文针对一种波导谐振腔集成馈电型惠更斯超表面重点进行了波束调控方法研究. 通过合理地调节单元中电偶极子和磁偶极子的尺寸参数, 对惠更斯超表面单元的相位调控范围实现了接近  $360^\circ$  的相位覆盖, 并且保持了较高的传输效率. 研究中通过分析开口波导谐振腔馈电模式的谐振机理, 构建了具备集成馈电功能的开口波导谐振腔结构, 并表征了其电场极化特性, 掌握了口面电场分布规律. 在此基础上, 根据广义菲涅尔定律构建出具有不同相位梯度的惠更斯超表面单元阵列, 将其嵌入开口谐振腔, 从而保障波导内的电磁波定向辐射是采用一维惠更斯超表面机制工作. 仿真和实验结果均证明了所提出的波导谐振腔集成馈电超表面能有效地实现对辐射波方向的高效调控. 这种波导谐振腔加载超表面的方式不但能够实现对电磁波辐射角度的灵活调控, 提高电磁波调控的效率, 而且所设计的超表面具有结构紧凑的优点, 有利于系统的集成和小型化设计.

**关键词:** 谐振腔激励, 集成馈电, 超表面, 波束调控

**PACS:** 41.20.Jb, 42.68.Ay, 84.90.+a

**DOI:** 10.7498/aps.71.20221284

## 1 引言

近年来, 在微波领域作为研究热点的超表面 (metasurfaces) 在各个研究方向中展现出优异的性能. 超表面是通过将不同结构尺寸的亚波长单元, 按照需要的相位与幅度分布设计单元结构并进行多维排列所得到的一种二维人工电磁表面. 由于其对电磁波出色的调控能力, 超表面已被广泛应用于超透镜<sup>[1-3]</sup>、隐身<sup>[4,5]</sup>、全息<sup>[6-8]</sup>、通信<sup>[9-11]</sup>等领域. 根据惠更斯原理设计出的人工电磁表面——超表

面近年来广受追捧. 通过设计出特定单元结构来改变其等效磁阻抗与等效电导纳, 能够对不同结构单元的电磁响应进行调节<sup>[12-23]</sup>. 相对于其他种类的人工电磁表面, 惠更斯超表面单元在透射相位完整覆盖  $0-2\pi$  的范围的同时, 能够实现完美的透射效率. 因此, 惠更斯表面的高透射性能适合用来对电磁波波束进行方向和幅度上的调控. 鉴于惠更斯表面这些优异的电磁特性, 其现已被广泛应用于不同介质间的阻抗匹配<sup>[12]</sup>、电磁波束异常反射<sup>[13]</sup>、异常折射<sup>[14-17]</sup>、全息成像技术<sup>[18-22]</sup>、波束赋形<sup>[23]</sup>、函数运算<sup>[24,25]</sup>等领域.

\* 北京市自然科学基金 (批准号: 4212054)、国家自然科学基金 (批准号: 61871152, 62171153) 和 黑龙江省自然科学基金项目 (批准号: YQ2021F004).

† 通信作者. E-mail: wuyuming@bit.edu.cn

超表面与传统的电磁器件相比体现出了卓越的性能,但大多数超表面的馈电方式仍旧采用传统的外部平面波馈电,体积较大.为了提高馈电效率,降低加载超表面天线的整体剖面,如果馈电方式从平面波馈电转变为紧凑型馈电,不仅能够降低整体结构的剖面,还能降低能量损耗.这种低剖面、低能耗、可集成的紧凑型馈电超表面在微波波段有着巨大的应用潜力,如蒙皮天线设计、近场无线充能以及多路输入多路输出天线阵列等.2017年,东南大学崔铁军教授团队<sup>[26]</sup>设计出一种编码超表面,采用法布里-珀罗谐振腔天线实现了低散射高增益特性.具体通过对不同尺寸超表面单元结构相位赋予相应编码,设计其相位分布,进而将单元排列成 $9 \times 9$ 的编码超表面,并与法布里-珀罗谐振腔天线结合.2020年,美国宾夕法尼亚大学倪兴杰教授课题组<sup>[27]</sup>在介质波导上方加载具有相位调控功能的超表面单元,通过电磁波在介质波导中传播时的积累相位差以及超表面单元本身具有的相位调控特性,对耦合到自由空间的电磁波实现高自由度的调控.2021年崔铁军院士团队<sup>[28]</sup>设计了一种基于天线馈电形式的圆极化超表面单元,实现了多路输入多路输出(MIMO)通信、能量可控的路由和近场全息成像等功能.

本文利用惠更斯表面单元对入射电磁波的透射幅度和透射相位具有高灵活调控特性,设计出相位能够覆盖 $2\pi$ 范围的超表面单元.根据广义斯涅耳定律,利用该单元构造具有特定相位梯度的超表面,将其与波导谐振腔馈电的模式结合起来.通过优化整体结构,提高馈电效率并获得电磁波的定向辐射功能,设计出能够扩大波导馈电超表面偏转角度的透镜,进一步拓展了惠更斯超表面在微波波段的应用.

## 2 惠更斯超表面单元设计

基于惠更斯原理设计的惠更斯表面单元结构自提出以来便受到了学术界广泛的关注并得以应用推广<sup>[12–23]</sup>.其核心原理在于通过在具有特定介电常数的低剖面介质两侧设计出等效电谐振结构与等效磁谐振结构,从而实现对散射的同极化电磁波的相位和幅度响应的有效调节.相比于传统的基于空间相位或传播相位的超表面,惠更斯超表面单元可以兼顾对透射幅度性能的调节,对电磁波调控

的灵活度更高.本文针对电谐振结构和磁谐振结构的设计进行研究,在确保单元的透射率高于0.9的同时,通过设计金属结构的尺寸,透射相位覆盖能达到 $326^\circ$ ,为后续的性能验证以及波导集成馈电超表面对电磁波波束偏转角度的调控奠定了基础.

传统的透射式惠更斯单元通常采用金属带条-介质-金属带条的层叠结构,其实相比于上下层金属单元结构之间通过金属通孔连接<sup>[29]</sup>,层叠结构单元的尺寸更小,剖面更低,加工起来更为方便,其透射率也更高.利用层叠型单元结构形式,作为本文工作面向具有高透射效率且具有相位调控能力的惠更斯表面单元初始设计如图1所示.这里建模仿真的惠更斯超表面单元由3部分组成,中间部分是介电常数 $\epsilon_r$ 为2.2的介质,厚度 $h$ 为1.5 mm,单元周期沿 $x$ 方向上长度 $a$ 为6 mm,沿 $y$ 方向上宽度 $b$ 为3.53 mm,沿 $z$ 方向上长度 $c$ 为5 mm.在介质材料上下两面分别是双开口金属环和单开口金属谐振环结构.金属材料厚度 $t$ 为0.035 mm,宽度 $w$ 为0.2 mm,开口长度 $g$ 为0.2 mm.在金属环两侧为空气层,在仿真中通过对空气层的厚度 $q$ 进行优化设计,发现当 $q = 1.75$  mm时,能获得较高的单元透射效率,且透射相位覆盖范围也能随之提高.同时这样的空气结构也能减小金属带条间的耦合,有利于降低单元之间的影响,使结果更加准确.

通过商业电磁仿真软件SIMULIA CST Studio Suite对该单元进行仿真.将图1中的惠更斯单元的 $x$ 方向和 $y$ 方向设置为周期边界条件, $y$ 极化的平面波沿着 $-z$ 方向入射.通过频域仿真器对其参数进行求解,仿真频带设置为5–15 GHz,中心频点为10 GHz.为了获得单元的透射响应,对具有固定尺寸( $L_e = 3.5$  mm,  $L_m = 2.7$  mm)进行了仿真,结果如图2(a)和(b)所示.从图2(a)和(b)可以看出,传输振幅在9 GHz和10.3 GHz处达到了峰值,分别为0.96和0.98,基本实现了全透射效果.为了进一步获得单元尺寸与单元的透射响应之间的关系,利用仿真软件对单元进行了扫参仿真.双开口金属谐振环长度 $L_e$ 在1.0–5.5 mm之间变化,单开口金属环长度 $L_m$ 在0.5–3.5 mm之间变化,间隔为0.1 mm.通过仿真数据分析,可获得透射率高于0.9且相位覆盖为 $326^\circ$ 的单元结构,满足所需的相位变化覆盖要求.如图2(c)和(d)所示,惠更斯超表面单元结构对透射效率以及透射相位

调控的关键参数为电谐振带条结构的水平长度  $L_e$ 、磁谐振带条结构的水平长度  $L_m$ 。扫参仿真研究发现, 当透射效率高于 90% 时, 透射相位分布在  $-171^\circ$ — $155^\circ$  内。为了进一步揭示惠更斯超表面的

工作原理, 对设计完成的惠更斯表面单元结构添加电场分布、磁场分布以及表面电流监视器, 在 10 GHz 频率下再次对单元进行仿真, 得到电谐振金属带条结构和磁谐振金属带条结构的表面电流

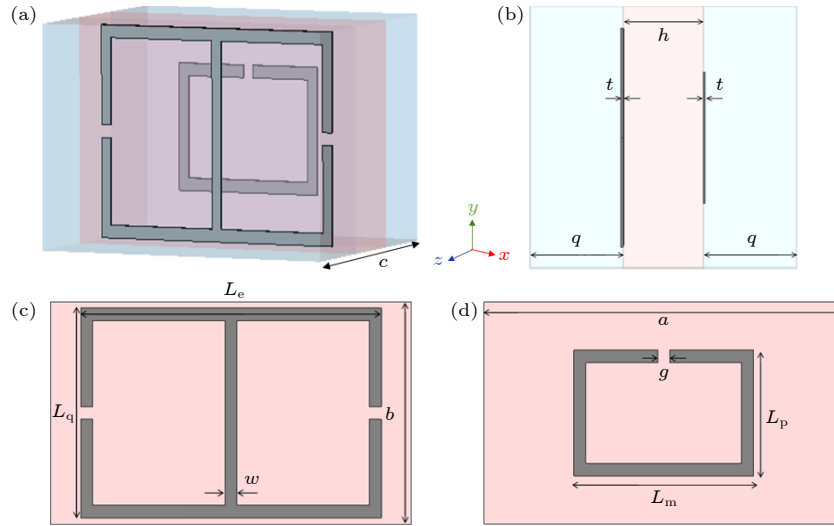


图 1 透射性惠更斯表面单元结构示意图 (a) 设计的透射式惠更斯表面单元; (b) 侧面结构示意图; (c) 电谐振结构示意图; (d) 磁谐振结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of transmissive Huygens' meta-atom: (a) The designed transmissive Huygens' meta-atom; (b) side view; (c) schematic diagram of electric dipole; (d) schematic diagram of magnetic dipole.

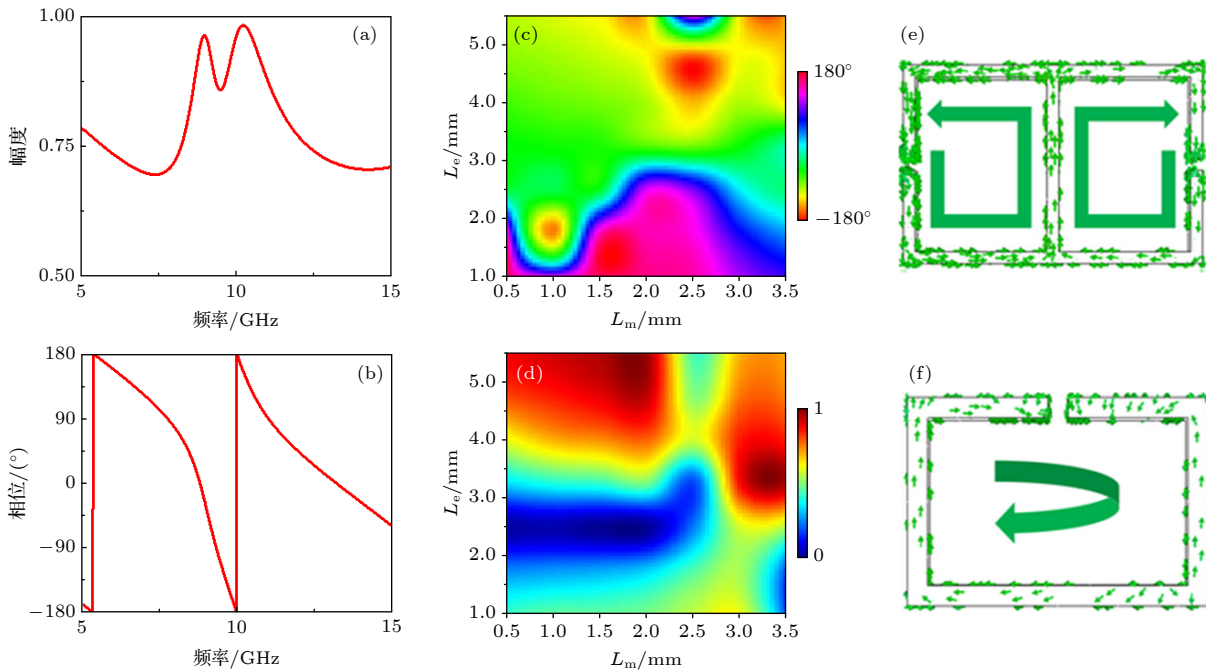


图 2 惠更斯超表面单元的透射响应与单元结构参数关系图 (a) 单元的传输幅度频谱图; (b) 单元的传输相位频谱图; (c) 不同结构尺寸的单元幅度响应分布图; (d) 不同尺寸结构的单元相位响应分布图; (e) 电偶极子电流分布; (f) 磁偶极子电流分布

Fig. 2. Transmission responses of the Huygens' meta-atom: (a) Transmission amplitude spectral of the unit cell; (b) transmission phase spectral of the unit cell; (c) transmission amplitude response of the meta-atom as functions of  $L_e$  and  $L_m$ ; (d) transmission phase response of the meta-atom as functions of  $L_e$  and  $L_m$ ; (e) current distributions on the electric dipole; (f) currents distributions on the magnetic dipole.

分布如图 2(e) 和 (f) 所示. 观察图示可知, 当  $y$  极化的平面波照射到基元上时, 基板两侧的金属部分会产生相应的感应电流: 开口环结构上的表面电流可等效为平行于  $x$  方向上的磁流元, 另一侧的 LC 等效电路谐振结构上的表面电流可等效为平行于  $y$  方向的电流元. 由此, 惠更斯单元就会等效为一个小型的惠更斯源, 验证了惠更斯超表面的工作机理.

### 3 波导谐振腔馈电梯度相位超表面

传统的超表面的馈电方式通常采用平面波照射, 这就要求发射天线与超表面之间满足一定的距离要求, 从而造成整体结构较大, 不易于系统集成. 为了实现所提出的波导谐振腔集成馈电惠更斯超表面对电磁波传播的调控, 本文创新地运用开口谐振腔作为超表面的馈源. 尺寸参数与电磁性能控制对应关系为: 其在水平方向上的宽边尺寸  $L_a$  与后续在口面上加载的超表面单元的周期结构长度以及数量有关, 其窄边厚度  $L_b$  与加载在该方向上的超表面单元数量有关. 对于波导的高度  $L_c$  需要满足  $L_c > 2\lambda$  的条件, 这样可以保证在开口口面上对不同位置的惠更斯单元可以获得近似于均匀分布的激励. SMA 端口应距离底部的高度设置为四分之一波长, 这是因为电磁波入射到底面再返回到原来位置所经过的总距离为两个四分之一波长, 即二分之一波长, 这样可以有效降低 SMA 处馈源的反射系数. 矩形开口谐振腔的基本结构如图 3(a) 和 (b) 所示. 这里选择窄边  $L_b$  尺寸为  $4 \times 3.53 \text{ mm} = 14.12 \text{ mm}$ , 沿着窄边可以放置 4 个超表面单元, 波导宽边的尺寸  $L_a$  的尺寸设计为  $16 \times 5 \text{ mm} = 90 \text{ mm}$ , 沿着宽边可以放置 16 个惠更斯超表面单元, 如 3(c) 所示.

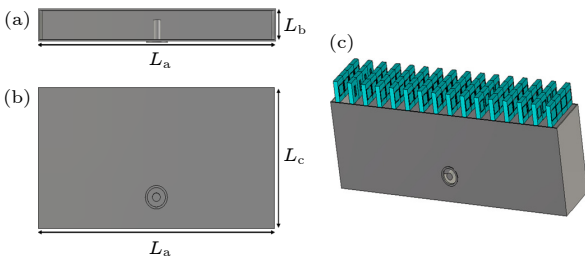


图 3 谐振腔馈电超表面示意图 (a) 波导俯视图; (b) 波导正视图; (c) 波导加载超表面示意图

Fig. 3. Schematic diagram of the cavity-excited metasurface: (a) Top view of the cavity; (b) front view of the cavity; (c) cavity-excited metasurface.

为了验证超表面阵列对导波辐射方向的调控能力, 利用仿真软件分别对空波导和加载了超表面的波导进行仿真, 仿真频率为 10 GHz. 为了对比性能, 利用仿真软件对没有加载超表面的空波导进行仿真, 得到其辐射场幅度与相位分布如图 4(a) 所示. 从其辐射场相位分布可以提取出波导开放边界口面上的相位分布. 首先利用惠更斯超表面单元对开口口面上的相位进行补偿, 使得开口口面上的相位分布完全一致. 将此时加载了超表面的波导记为天线 1, 此时电磁波的辐射方向将垂直于波导长边, 仿真所得到的近场电场幅度及相位分布图及远场方向图如图 4(b) 和 5(a) 所示. 在均匀相位分布的基础上, 通过叠加一个梯度相位可以对电磁波的辐射方向进行任意调控. 根据广义斯涅耳定律得知, 具有均一且连续的梯度相位差  $\phi$  的超表面满足公式:

$$n_t \sin \theta_t - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\phi}{dx}. \quad (1)$$

当超表面两侧介质相同时, 即均为空气的介电常数时,  $n_t = n_i$ . 当电磁波垂直照射到超表面时, 波束的偏折方向为

$$\theta = \arcsin \left( \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\phi}{dx} \right), \quad (2)$$

式中波长  $\lambda$  为 10 GHz 频率下的波长, 单元尺寸为  $5 \text{ mm} \times 3.43 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ , 按照 5 mm 间隔进行排列. 对于离散梯度相位可近似看成  $d\phi/dx = \Delta\phi/\Delta x$ , 其中  $\Delta\phi$  为相邻单元之间的相位差,  $\Delta x$  为相邻两超表面单元之间的间隔  $d$ . 本文选取相邻单元之间的相位差  $\Delta\phi$  为  $45^\circ$  和  $50^\circ$  的两组具有不同相位梯度的超表面结构作为典型案例研究, 将其加载于集成馈电的波导口面之上, 分别记为天线 2 和天线 3. 按照 (2) 式得出不同相位差下的辐射波束方向  $\theta$  分别为  $48.6^\circ$  和  $56.4^\circ$ . 对不同梯度相位的波导集成馈电超表面的电场能量进行分析, 由图 4(c) 和 (d) 中辐射近场电场分布及远场辐射方向图可以看出, 当在超表面加载了具有不同相位梯度的超表面阵列时, 电磁波可以被定向辐射到预设方向, 其波束辐射方向分别为  $46^\circ$  和  $59^\circ$ , 如图 5(b) 和 (c) 所示. 扫描结果和根据斯涅耳定律所获得的理论值吻合良好, 进一步证明了基于所设计超表面可以有效实现对波导内导波的定向辐射调控功能.

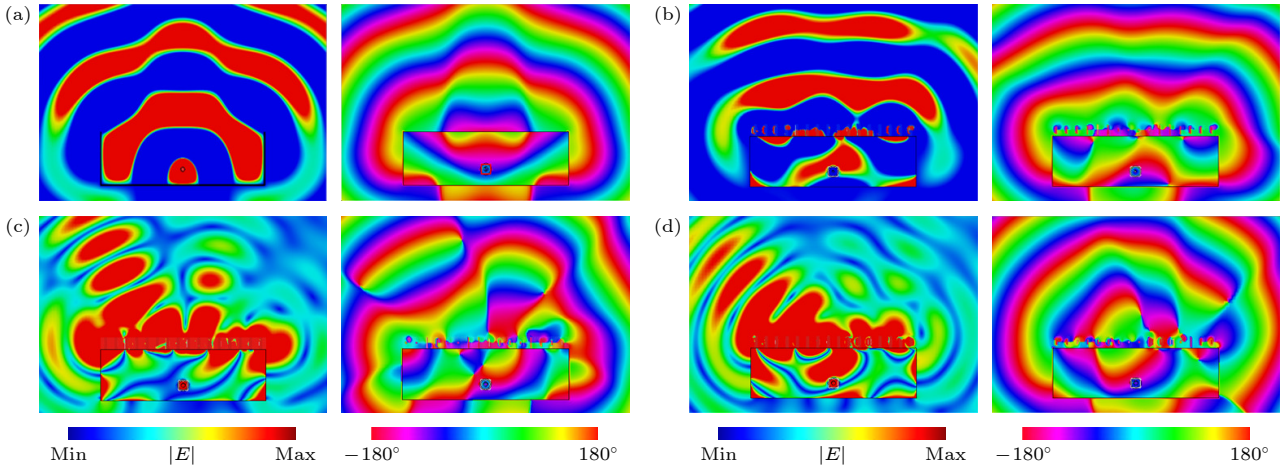


图 4 沿不同角度辐射的电场幅度及相位分布图 (a) 无超表面加载的波导; (b) 天线 1; (c) 天线 2; (d) 天线 3

Fig. 4. Electric field distributions of amplitude and phase along different angles: (a) Waveguide without metasurface loaded; (b) antenna 1; (c) antenna 2; (d) antenna 3.

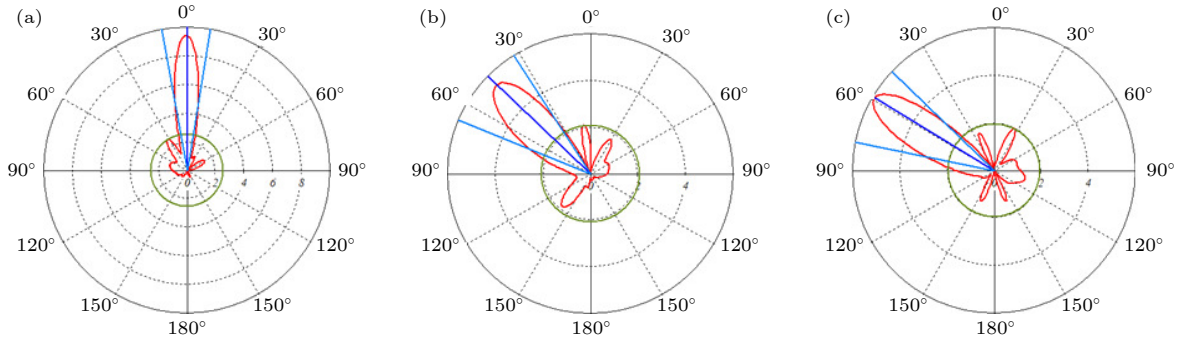


图 5 集成馈电波导口面加载不同梯度相位分布超表面结构的波束角度偏转方向图 (a) 天线 1; (b) 天线 2; (c) 天线 3

Fig. 5. Far-field pattern of the cavity-excited metasurface with different phase gradient: (a) Antenna1; (b) antenna 2; (c) antenna 3.

## 4 加工与测试结果

对所设计的开口波导以及加载惠更斯超表面阵列的天线 1、天线 2、天线 3 逐一进行了加工. 仿真分析中的空气层厚度需要通过设计卡槽将 16 组超表面单元固定住, 并按照特定位置摆放于矩形波导的正上方, 从而保证从 SMA 端口馈入的电磁波束能够辐射出去, 完成的加工的实物如图 6 所示.

将组装完成的波导超表面结构放置在微波暗室环境中测试, 如图 7 所示. 采用 SMA 端口馈电, 对从波导口面馈出的电磁波束的方向性进行测试. 通过对测试结果进行数据处理, 得到空波导以及波导口面加载不同梯度相位超表面的  $S_{11}$  参数曲线图, 如图 8 所示. 其中图 8(a) 为空波导方向图, 图 8(b) 和 (c) 分别为加载 3 种不同相位梯度超表面的  $S_{11}$  参数曲线图. 对上述几组波导口面加载超表面的结构微波暗室测试得到的  $S_{11}$  参数曲线

进行分析, 可以看出在 10 GHz 频率下, 微波暗室测试的  $S_{11}$  参数均低于 -10 dB, 即证实从 SMA 端口馈入的电磁波能够辐射出去. 对于空波导, 测试的  $S_{11}$  参数曲线在 10 GHz 附近均能保持低于 -10 dB, 且波动随频率变化较小. 这些结果验证了仿真设计所实现的超表面功能.

在对空谐振腔和几组超表面的方向图测试发现, 天线 2 的方向图实测为 46°, 天线 3 方向图实测为 56°. 这些测试结果与理论分析和仿真结果吻合, 验证了波导集成馈电超表面对电磁波束方向性调控的可行性. 由图 9 可以得知在波导口面上方加载了超表面之后, 天线的增益在 4 dB 左右. 由图 9(b)–(d) 可以看出, 虽然波束被偏折到所设计的方向上, 但是波束能量不够集中, 这是由于在惠更斯单元仿真时, 单元都是被入射波垂直入射, 而当超表面加载到波导口面时, 单元实际上是处于斜入射的状态, 如图 4(a) 所示. 此时单元的实际相位

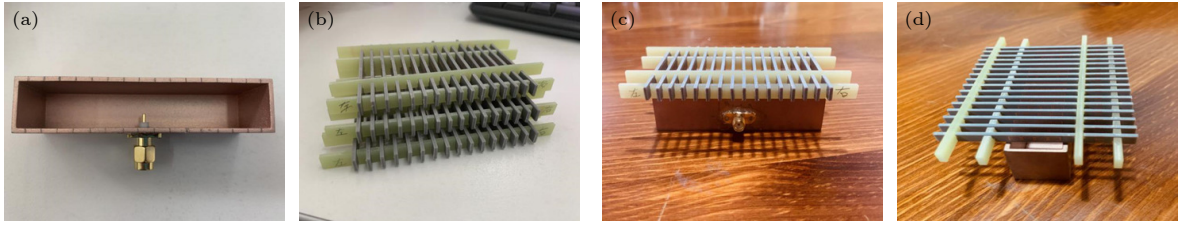


图 6 加工的开口矩形波导谐振腔及超表面实物图 (a) 矩形开口波导; (b) 不同相位梯度的超表面; (c) 波导加载超表面的正面结构示意图; (d) 波导加载超表面的侧面结构示意图

Fig. 6. The fabricated open cavity and metasurfaces: (a) Open cavity; (b) metasurfaces with different phase gradient; (c) front view of the cavity-excited metasurface; (d) side view of the cavity-excited metasurface.

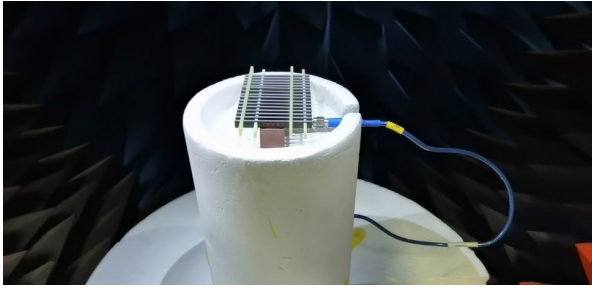


图 7 微波暗室测试环境

Fig. 7. The environment of the anechoic chamber.

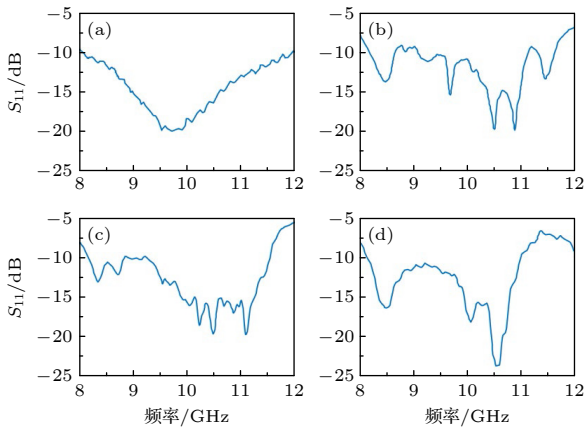


图 8 波导空馈和加载几组超表面测试得到的 S11 参数 (a) 不加载超表面的开口波导; (b) 天线 1; (c) 天线 2; (d) 天线 3

Fig. 8. Measured S11 parameters of open cavity and cavity-excited metasurface with different phase gradient: (a) Open cavity without metasurface; (b) antenna 1; (c) antenna 2; (d) antenna 3.

响应和理论设计值相比会出现一些偏差, 导致口面上的相位不再是理想的梯度相位分布, 因此造成了波束的能量不够集中. 在后续的研究中, 可以通过仿真得到单元在不同入射角下的相位响应, 再根据单元在波导口面上的位置确定其斜入射的角度, 挑选在该入射角度下满足所需相位的单元, 从而保证波导口面上的单元相位为理想的梯度分布, 进一步提升波束的增益. 为了更好地实现与电路系统的集

成以及共形化需求, 在后续的研究中可将波导替换为基片集成波导, 并将惠更斯更换为更易安装和集成的二维平面结构. 首先利用超表面对波导本身的传输相位进行补偿, 在此基础上叠加上一个梯度相位, 实现对电磁波辐射方向的调控.

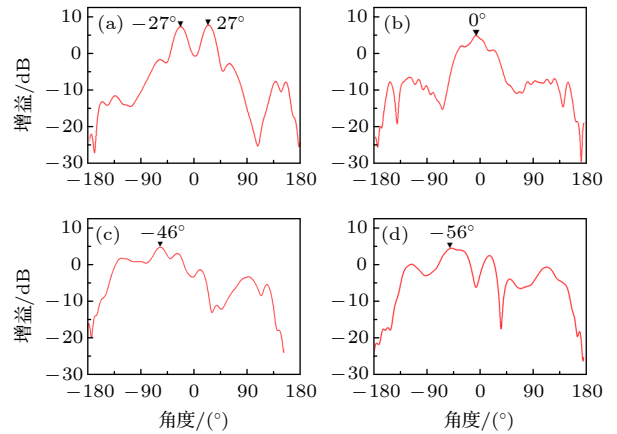


图 9 谐振腔馈电超表面 E 面测试方向图 (a) 谐振腔不加载超表面; (b) 天线 1; (c) 天线 2; (d) 天线 3

Fig. 9. E-plane far-field pattern of cavity-excited metasurface: (a) Cavity without metasurface; (b) antenna 1; (c) antenna 2; (d) antenna 3.

## 5 结 论

本文提出了一种高效率惠更斯超表面的设计方法, 通过优化电偶极子和磁偶极子的参数, 首先在单元设计上获得接近  $360^\circ$  的相位覆盖, 并保持较高的透射系数. 其次基于广义菲涅耳定律, 利用开口波导对超表面单元进行馈电, 解决了采用传统外部喇叭馈源结构所带来的系统整体剖面过高的问题, 在系统中的集成化和小型化研究方面开辟了一条新途径. 最后通过仿真和实验双重验证了不同的相位梯度超表面阵列对电磁波辐射的方向的高效调控的有效性. 本文所提出的基于波导集成馈电

的惠更斯超表面研究, 具有低剖面、小型化、可集成的优点, 为相关超表面与器件的协同应用设计提供了可行性思路。

## 参考文献

- [1] Aieta F, Genevet P, Kats M A, Yu N, Blanchard R, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 4932
- [2] Zou X, Zheng G, Yuan Q, Zang W, Chen R, Li T, Li L, Wang S, Wang Z, Zhu S 2020 *Photonix* **1** 2
- [3] Wang S, Wu P C, Su V C, Lai Y C, Chen M K, Kuo H Y, Chen B H, Chen Y H, Huang T T, Wang J H, Lin R M, Kuan C H, Li T, Wang Z, Zhu S, Tsai D P 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 227
- [4] Ni X, Wong Z J, Mrejen M, Wang Y, Zhang X 2015 *Science* **349** 1310
- [5] Chen P Y, Argyropoulos C, Alù A 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 233001
- [6] Zheng G, Mühlendernd H, Kenney M, Li G, Zentgraf T, Zhang S 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 308
- [7] Guan C, Liu J, Ding X, Wang Z, Zhang K, Li H, Jin M, Burokur S N, Wu Q 2020 *Nanophotonics* **9** 3605
- [8] Ding X, Wang Z, Hu G, Liu J, Zhang K, Li H, Ratni B, Burokur S N, Wu Q, Tan J, Qiu C W 2020 *Photonix* **1** 16
- [9] Zhang L, Chen M Z, Tang W, Dai J Y, Miao L, Zhou X Y, Jin S, Cheng Q, Cui T J 2021 *Nat Electron* **4** 218
- [10] Dai J, Tang W, Chen M Z, Chan C H, Cheng Q, Jin S, Cui T J 2021 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **69** 1493
- [11] Dai J Y, Tang W K, Zhao J, Li X, Cheng Q, Ke J C, Chen M Z, Jin S, Cui T J 2019 *Adv. Mater. Technol.* **4** 1900044
- [12] Dorrah A H, Chen M, Eleftheriades G V. 2018 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **66** 4729
- [13] Wong A M H, Eleftheriades G V 2018 *Phys. Rev. X* **8** 011036
- [14] Zhu B O and Feng Y 2015 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **63** 5500
- [15] Zhao R, Zhu Z, Dong G 2019 *Opt. Lett.* **44** 3482
- [16] Xu Y, Xu N, Liu H, Shan D, Song N, Gao J 2018 *J. Opt. Soc. Am. B-Opt. Phys.* **35** 1248
- [17] Jia S L, Wan X, Su P, Zhao Y J, Cui T J 2016 *Aip. Adv.* **6** 045024
- [18] Guan C, Wang Z, Ding X, Zhang K, Ratni B, Burokur S N, Jin M, Wu Q 2019 *Opt. Express* **27** 7108
- [19] Chen K, Feng Y, Monticone F, Zhao J, Zhu B, Jiang T, Zhang L, Kim Y, Ding X, Zhang S, Alù A, Qiu C W 2017 *Adv. Mater.* **29** 1606422
- [20] Wang Z, Ding X, Zhang K, Ratni B, Burokur S N, Gu X, Wu Q 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800121
- [21] Wang Z, Ding X, Zhang K, Wu Q 2017 *Sci. Rep.* **7** 9081
- [22] Zhao W, Jiang H, Liu B, Song J, Jiang Y, Tang C, Li J 2016 *Sci. Rep.* **6** 30613
- [23] Wan X, Zhang L, Jia S, Yin J, Cui T J 2017 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **65** 4427
- [24] Zhao Z, Wang Y, Guan C, Zhang K, Wu Q, Li H, Liu J, Burokur S N, Ding X 2022 *Photonix* **3** 15
- [25] Wang Z, Hu G, Wang X, Ding X, Zhang K, Li H, Burokur S N, Wu Q, Liu J, Tan J, Qiu C W 2022 *Nat. Commun.* **13** 2188
- [26] Li H, Li Y B, Shen J L, Cui T J 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 1902057
- [27] Guo X, Ding Y, Chen X, Duan Y, Ni X 2020 *Sci. Adv.* **6** eabb4142
- [28] Xu P, Tian H W, Cai X, Jiang W X, Cui T J 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2100569
- [29] Shi H, Wang L, Zhao M, Chen J, Zhang A, Xu Z 2018 *Mater* **11** 2448

# Cavity-excited Huygens' metasurface for wavefront manipulation\*

Huang Shuai<sup>1)</sup> Wu Tian-Hao<sup>2)</sup> Guan Chun-Sheng<sup>3)</sup> Ding Xu-Min<sup>3)</sup>  
Wu Yu-Ming<sup>4)†</sup> Wu Qun<sup>3)</sup> Tang Xiao-Bin<sup>1)</sup>

1) (*China Electronic Technology Group Corporation (CETC), Beijing 100041, China*)

2) (*Hebei Semiconductor Research Institute, Shijiazhuang 050051, China*)

3) (*School of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

4) (*School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

( Received 30 June 2022; revised manuscript received 30 July 2022 )

## Abstract

In this paper, cavity-excited Huygens' metasurface is proposed for high-efficiency wavefront manipulation. By adjusting the length of electric dipole and magnetic dipole, the proposed Huygens' metasurface meta unit can provide nearly  $360^\circ$  phase coverage with sufficiently high transmission efficiency. Based on the analysis of the resonance mode of the cavity, the Huygens' metasurface has successfully performed its function by adopting integrated feeding method. According to the generalized Snell's law, metasurfaces with different phase gradients are designed. Combined with the cavity structure, one-dimensional Huygens' metasurfaces excited by cavity is realized, which can directionally emit the electromagnetic waves from the cavity. Both the simulation and experimental results show that the proposed cavity excited metasurfaces can effectively manipulate the direction of the emitted beam. Such a kind of cavity-excited metasurface can flexibly control the emission angle of the electromagnetic wave, reduce the energy loss and improve the efficiency of the electromagnetic wave. These designs have the advantages of compact, light and easy integration.

**Keywords:** cavity-excited, integrated feeding, Huygens' metasurface, wavefront manipulation.

**PACS:** 41.20.Jb, 42.68.Ay, 84.90.+a

**DOI:** [10.7498/aps.71.20221284](https://doi.org/10.7498/aps.71.20221284)

---

\* Project supported by the Beijing Natural Science Foundation(Grant No. 4212054), National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61871152, 62171153), and Heilongjiang Natural Science Foundation (Grant No. YQ2021F004).

† Corresponding author. E-mail: [wuyuming@bit.edu.cn](mailto:wuyuming@bit.edu.cn)



## 波导谐振腔集成馈电型波前调控 惠更斯超表面研究

黄帅 吴天昊 管春生 丁旭旻 吴昱明 吴群 唐晓斌

### Cavity-excited Huygens' metasurface for wavefront manipulation

Huang Shuai Wu Tian-Hao Guan Chun-Sheng Ding Xu-Min Wu Yu-Ming Wu Qun Tang Xiao-Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 224101 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221284

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221284>

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

基于超表面的多波束多模态太赫兹涡旋波产生

Multi-beam multi-mode vortex beams generation based on metasurface in terahertz band

物理学报. 2021, 70(18): 188701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210897>

编码超构表面实现双波束独立可重构

Independent dual-beam control based on programmable coding metasurface

物理学报. 2021, 70(17): 178102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210344>

基于反射超表面产生太赫兹涡旋波束

Terahertz vortex beam generation based on reflective metasurface

物理学报. 2019, 68(23): 238101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191055>

基于可调石墨烯超表面的宽角度动态波束控制

Dynamic beam-steering in wide angle range based on tunable graphene metasurface

物理学报. 2018, 67(18): 184101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180592>

基于双开口谐振环超表面的宽带太赫兹涡旋光束产生

Broadband terahertz vortex beam generation based on metasurface of double-split resonant rings

物理学报. 2019, 68(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182147>

一种复合型极化转换表面及其在天线辐射散射调控中的应用

Composite polarization conversion metasurface and its application in integrated regulation radiation and scattering of antenna

物理学报. 2020, 69(23): 234102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200797>