



基于双层超表面的宽带、高效透射型轨道角动量发生器

高喜 唐李光

Wideband and high efficiency orbital angular momentum generator based on bi-layer metasurface

Gao Xi Tang Li-Guang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 038101 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20200975

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200975>

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

长周期多芯手征光纤轨道角动量的调制

Modulation of orbital angular momentum in long period chirally-coupled-cores fiber

物理学报. 2019, 68(6): 064211 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182036>

利用衍射光栅探测涡旋光束轨道角动量态的研究进展

Progress of detecting orbital angular momentum states of optical vortices through diffraction gratings

物理学报. 2018, 67(3): 034201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171899>

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Pancharatnam-Berry相位超表面的二维光学边缘检测

Two-dimensional optical edge detection based on Pancharatnam-Berry phase metasurface

物理学报. 2020, 69(1): 014101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191181>

圆柱型光纤螺旋线圈轨道角动量模式

Orbital angular momentum mode of cylindrical spiral wave-guide

物理学报. 2020, 69(5): 054207 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190997>

基于单层线-圆极化转换聚焦超表面的宽带高增益圆极化天线设计

Broadband circularly polarized high-gain antenna design based on linear-to-circular polarization conversion focusing metasurface

物理学报. 2017, 66(6): 064102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.064102>

基于双层超表面的宽带、高效透射型 轨道角动量发生器*

高喜† 唐李光

(广西科技大学电气与信息工程学院, 柳州 545006)

(2020年6月24日收到; 2020年8月21日收到修改稿)

提出一种宽带、高传输效率的双层超表面, 其单元结构是在介质层两边对称刻蚀结构参数相同的十字型金属贴片且将两层超表面沿 y 方向错位半个周期长度形成. 通过引入 y 方向的错位, 双层超表面的透射带宽得到大幅度提升. 同时, 采用等效电路理论分析了该双层超表面的带宽展宽机理. 在此基础上, 进一步结合 Pancharatnam-Berry 相位原理, 实现了宽带轨道角动量波束生成器. 实验和仿真结果表明, 在 11—12.8 GHz 的频率范围内, 器件能够将左旋圆极化波转换为携带轨道角动量的右旋圆极化波.

关键词: 双层超表面, 宽带, Pancharatnam-Berry 相位, 轨道角动量

PACS: 81.05.Xj, 07.05.Tp, 03.65.Vf, 74.25.Uv

DOI: 10.7498/aps.70.20200975

1 引言

1992年, 荷兰物理学家 Allen 等^[1]首次提出 Laguerre-Gaussian 激光束携带轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 的概念. 此后的研究发现, 携带轨道角动量的波束具有特殊的螺旋相位分布特性, 因此在粒子操控、信息传输、光学成像和光刻技术等方面具有广阔的应用前景^[2-6]. 另一方面, 由于不同模态的 OAM 波束具有正交性, 这使得它们在传播过程中互不干扰, 且每一种模态的 OAM 波束在独立携带信号传输的过程中相位分布保持稳定. 因此, 从理论上讲, 采用不同模态的 OAM 波束携带微波信号, 可以实现无穷多的信号传输通道, 这极大提高了频谱容量^[7,8]. 这一新技术为解决目前无线通信领域中频谱资源紧缺的问题提供了有效途径, 因此吸引了广大学者的研究兴趣. 要将 OAM 波束实际应用到无线通信领域中, 需要对 OAM 波束的产生方法进行研究. 目前, 产

生 OAM 波束的主要方法有以下几种: 1) 螺旋相位板^[8]; 2) 环形阵列天线^[9]; 3) 反射型螺旋抛物面天线^[10]. 可是, 这些方法都存在一些缺点, 如馈电结构复杂、天线尺寸大等. 为了解决这些问题, 研究人员又提出了一种新的方法, 即用超表面产生 OAM 波束^[11].

超表面是超材料的二维形式, 它是将亚波长单元结构在平面内进行周期或非周期排列形成的. 通过调节超表面单元的形状、结构参数和排列方式, 能够对电磁波的极化、振幅及相位等物理量进行有效调控^[12], 从而产生新的物理现象和应用. 利用超表面灵活调控电磁波的特点, 人们已经开发出了多种新型功能器件, 如偏振转换器^[13]、吸波器^[14]、平面透镜^[15]和全息成像等^[16]. 近年来, 超表面又被用来产生 OAM 波束^[17-19]. 由于超表面具有结构简单、重量轻、易加工、且易于与其他器件集成等优点, 因此在 OAM 波束生成方面具有不可替代的优势. 目前的研究主要是采用反射型超表面来形成 OAM 波束, 而对透射型 OAM 发生器的研究较

* 国家自然科学基金 (批准号: 61761010) 和广西自然科学基金 (批准号: 2018GXNSFAA281193) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gao_xi76@163.com

少. 基于此, 本文提出一种透射型超表面, 该结构是在介质板的两面分别刻蚀十字型金属结构, 同时将上下两层超表面沿 y 方向发生半个周期的位移形成. 通过将上、下两层超表面沿 y 方向错位半个周期, 有效拓展了电磁波的透射带宽, 且透射效率高于 90%. 在此基础上, 结合 Pancharatnam-Berry (P-B) 相位原理^[20], 按照一定规律旋转超表面结构单元, 并进行重新排列, 形成 OAM 波束发生器, 该器件能够在 11—12.8 GHz 的频率范围内将左旋圆极化波转换为携带 OAM 的右旋圆极化波.

2 物理模型

提出的双层超表面结构单元如图 1 所示, 图中黄色部分为金属铜. 它是将两个具有相同参数的十字型结构印制在介质层的两边, 同时将两个十字结构沿 y 方向错位半个周期长度 ($L_y = P/2$) 形成. 将该单元结构沿 x 方向和 y 方向周期延伸, 得到超表面结构. 其中, 介质板为介电常数 $\epsilon_r = 2.65$ 的 F4B, 其厚度为 $d = 2$ mm. 沿 x 方向和 y 方向的周期相等, 为 $P = 15$ mm, 其他结构参数为 $D_y = 11.2$ mm, $D_x = 5.2$ mm, $w_x = 1.5$ mm, $w_y = 1.6$ mm, $L_y = 7.5$ mm.

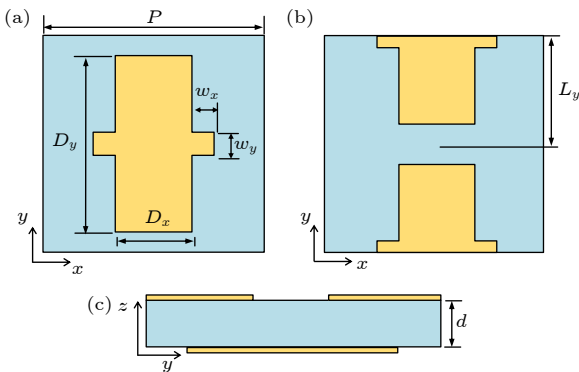


图 1 超表面单元的物理模型 (a) 上层结构俯视图; (b) 下层结构仰视图; (c) 侧视图
Fig. 1. Schematic of metasurface unit cell: (a) Top view; (b) bottom view; (c) side view of the unit cell.

为了分析超表面的电磁特性, 首先利用电磁仿真软件 (CST-2016) 对其进行仿真分析. 仿真过程中, 选取单元结构进行建模, 将 x, y 方向的边界设为周期边界以模拟周期结构, 电磁波沿 z 方向传播. 图 2 为仿真得到的 x 极化波及 y 极化波的透射系数和相位特性, 图中 t_{yy} 和 t_{xx} 分别表示 y 极化波以及 x 极化波的同极化透射系数; φ_{yy} 和 φ_{xx} 分别

表示同极化透射系数 (t_{yy} 和 t_{xx}) 的相位. 由图 2 可以看出, 在 11—12.85 GHz 的频率范围内, 该超表面对 x 和 y 极化波都具有很高的透射率 ($> 90%$), 且它们之间的相位差接近 180° . 同时进一步分析了超表面对圆极化波的响应特性. 图 3 为左旋圆极化波激励超表面单元时, 仿真得到的同极化和交叉极化的透射和反射系数. 图中 t 和 r 分别表示透射系数以及反射系数; 下标 L 以及 R 分别表示对应的入射波或透射波为左旋圆极化和右旋圆极化波, 如 r_{L-R} 表示左旋圆极化波的交叉极化 (右旋圆极化) 反射系数. 由图 3 可知, 在 11—12.85 GHz (相对带宽为 15.3%) 的频率范围内, 该超表面能将左

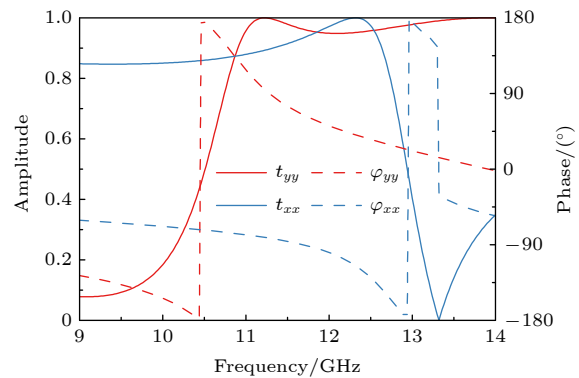


图 2 超表面对线极化波的响应 (t_{xx} 和 t_{yy} 为 x 极化波和 y 极化波的同极化传输系数的振幅, φ_{xx} 和 φ_{yy} 为同极化传输系数的相位)

Fig. 2. Amplitude and phase of co-polarized transmission coefficient, where t_{xx} and t_{yy} are amplitudes of co-polarized transmission coefficients for x - and y -polarized incident waves, and φ_{xx} and φ_{yy} correspond to the phase of t_{xx} and t_{yy} .

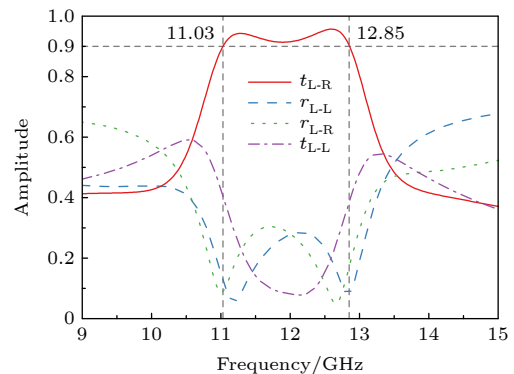


图 3 超表面对左旋圆极化波的响应 (t_{L-L} 和 t_{L-R} 为同极化和交叉极化传输系数, r_{L-L} 和 r_{L-R} 为同极化和交叉极化反射系数)

Fig. 3. Response for left-hand circularly polarized incident wave, where t_{L-L} and t_{L-R} are co- and cross-polarized transmission coefficients, and r_{L-L} and r_{L-R} are co- and cross-polarized reflective coefficients.

旋圆极化入射波转换成右旋圆极化透射波,且透射率高于 0.9. 通过上述仿真分析可知,本文提出的结构在 11—12.85 GHz 的宽频带范围内,对线极化波和圆极化波都具有高透射特性,且厚度超薄 ($d = \lambda_0/12.5$, λ_0 为工作频带的中心波长),其性能明显优于目前已报道的双层超表面.

3 宽带工作机理分析

上、下两层超表面在 y 方向存在半个周期的错位是本文提出的双层超表面的主要特点. 从下面的分析可以看出,这一特点是拓展双层超表面工作带宽的根本原因. 为了分析其物理机理,选取 $L_y = 0$ mm (双层超表面没有错位) 和 7.5 mm (双层超表面沿 y 方向错位半个周期) 两种情况,分析 x 极化波和 y 极化波的透射性能,结果如图 4 所示. 其中图 4(a) 为 y 极化波的透射系数,图 4(b) 为 x 极化波的透射系数. 由图 4 可知,当 L_y 从 0 mm 变为 7.5 mm 时, y 极化波的透射系数的幅度(实线)和相位(虚线)变化明显,而 x 极化波的透射系数基本不变. 进一步观察图 4(a) 还可以发现,在

11—12.85 GHz (橙色区域) 的频率范围内,当 L_y 从 0 mm 变到 7.5 mm 时, y 极化波的透射系数的相位基本保持不变,但透射率得到大幅度提高,从 0.1—0.4 之间提高至 0.9 以上,而 x 极化波的透射系数在该频段始终保持高透射特性. 这一特点,使得圆极化波在该频段也具有高透射性能(图 3).

进一步,从等效电路角度分析双层超表面的带宽展宽机理. 由于双层超表面间的介质层厚度为亚波长量级,因此它们之间会出现较强的电磁互耦现象. 为了考虑这种层间互耦效应,本文提出图 5(a) 所示的等效电路,其中 β 为电磁波在介质层中的传播常数, Z_{ii} ($i = 1, 2$) 为超表面的自阻抗, Z_{ij} ($i, j = 1, 2$) 为超表面层间的互阻抗(耦合阻抗). 这里利用互阻抗 Z_{ij} 来描述双层超表面的层间电磁互耦特性. 注意,假定双层超表面为无损耗系统,因此超表面的阻抗包括下文研究的介质层的阻抗都为纯虚数. 采用参考文献 [21] 中的方法,利用 CST 软件仿真得到 Z_{ii} 和 Z_{ij} , 并将其代入图 5(a) 所示的等效电路,即可获得等效电路的 S 参数. 图 5(b) 为等效电路的 S 参数与利用全波仿真得到的双层超表面的 S 参数的对比. 比较发现,它们具有很好的 consistency,证实了等效电路的精确性.

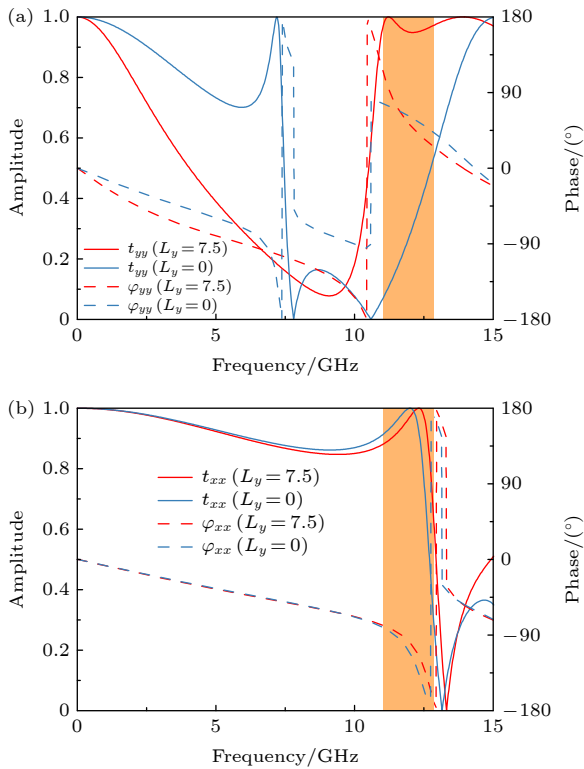


图 4 (a) y 极化波的透射系数; (b) x 极化波的透射系数
Fig. 4. (a) Transmission coefficient for y -polarized wave; (b) transmission coefficient for x -polarized wave.

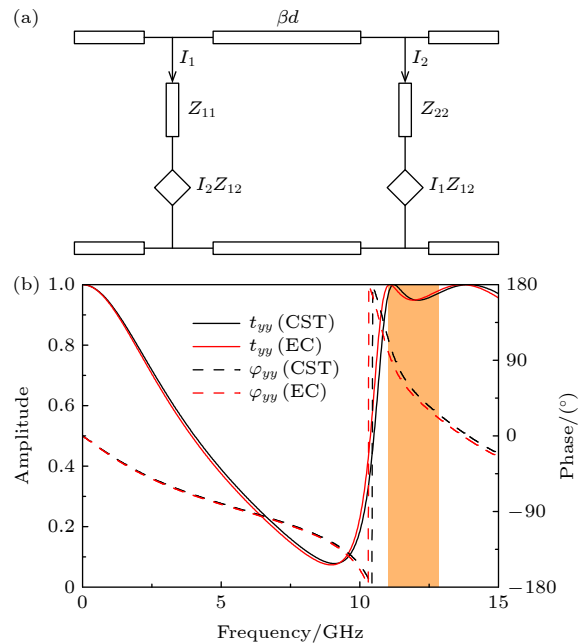


图 5 (a) 等效电路模型; (b) 由等效电路及 CST 仿真得到的 y 极化波的 S 参数

Fig. 5. (a) Equivalent circuit model; (b) transmission coefficients for y -polarized incident wave obtained from equivalent circuit (EC) modal and CST simulation.

另一方面, 等效电路模型中的 Z_{ii} 为超表面的自阻抗, 它主要受超表面自身的结构形式和几何参数影响, 而互阻抗 Z_{ij} 与介质层的厚度及超表面层的相对位置有关. 因此, 当双层超表面沿 y 方向发生 L_y 的错位后, 等效电路中的自阻抗 Z_{ii} 不变, 互阻抗 Z_{ij} 将发生变化. 为了证实这一点, 取 $L_y = 0$ mm 和 7.5 mm 两种情况, 对双层超表面的自阻抗 Z_{ii} 和互阻抗 Z_{ij} 进行了仿真计算, 结果如图 6 所示. 可以看出, 对于不同的 L_y , 自阻抗 Z_{11} 基本保持不变, 而互阻抗 Z_{12} 发生了很大的变化. 正是因为 Z_{12} 的这种变化, 极大地改善了超表面的传输性能.

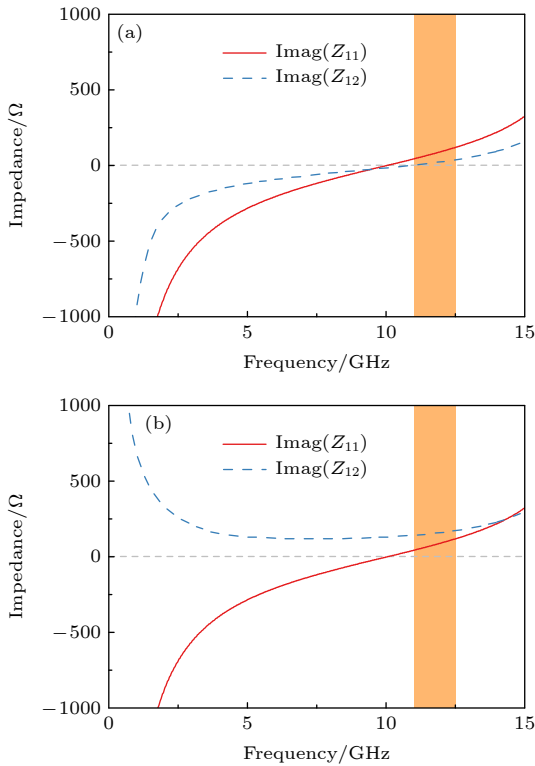


图 6 等效电路模型中的阻抗元素 (a) $L_y = 0$ mm; (b) $L_y = 7.5$ mm
Fig. 6. Impedance elements of equivalent circuit for different L_y : (a) $L_y = 0$ mm; (b) $L_y = 7.5$ mm.

下面进一步分析耦合阻抗 Z_{12} 对超表面高透射性的影响机理. 为便于分析, 首先将图 5(a) 所示的电路转换为图 7(a) 所示的 π 型网络, 其中 $Z_{S,tl}$, $Z_{L,tl}$ 及 $Z_{R,tl}$ 分别为图 5(a) 中传输线 (βd) 的 π 型网络的元件值, 而 Z_L , Z'_S 及 Z_R 为不包含介质层的双层超表面的 π 型网络的元件值. 最后, 双层超表面的 π 型网络如图 7(b) 所示, 则等效电路的 S_{21} 参数为

$$S_{21} = \frac{1}{\left(1 + \frac{Z_0}{Z_p}\right) \left(1 + \frac{Z_s}{2Z_p} + \frac{Z_s}{2Z_0}\right)}, \quad (1)$$

其中的 Z_s 和 Z_p 满足下列关系:

$$Z_s = \frac{Z'_S \cdot Z_{S,tl}}{Z'_S + Z_{S,tl}}, \quad (2)$$

$$Z_p = \frac{Z_L \cdot Z_{L,tl}}{Z_L + Z_{L,tl}}, \quad (3)$$

式中, $Z'_S = \frac{Z_{11}^2 - Z_{12}^2}{Z_{12}}$; $Z_{S,tl} = \frac{Z_{11,tl}^2 - Z_{12,tl}^2}{Z_{12,tl}}$, $Z_{11,tl}$ 和 $Z_{12,tl}$ 分别为传输线的等效 π 型网络的自阻抗和互阻抗; $Z_L = Z_{11} + Z_{12}$; $Z_{L,tl} = -\frac{d}{2\omega\epsilon_0\epsilon_r}$.

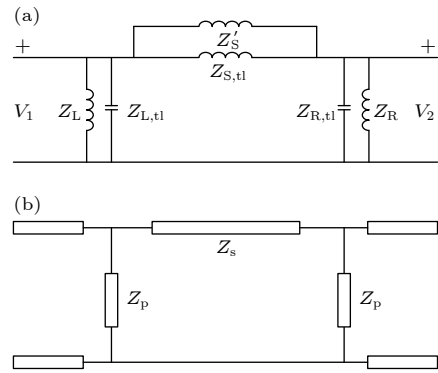


图 7 双层超表面的 π 型等效电路 (a) 精细结构; (b) 总结构
Fig. 7. π -type equivalent circuit for bi-layer metasurface: (a) Fine structure; (b) overall framework.

首先, 由方程 (2) 和方程 (3) 计算 Z_s 和 Z_p 随频率的变化, 结果如图 8 所示. 其中, 图 8(a) 为 $L_y = 0$ mm 的情况, 图 8(b) 为 $L_y = 7.5$ mm 的情况. 比较图 8(a) 和图 8(b) 发现, 在 11—12.5 GHz 的频率范围内 (橙色区域), 当 $L_y = 0$ mm 时, Z_s 和 Z_p 的虚部都大于零 (呈感性); 当 $L_y = 7.5$ mm 时, Z_p 的虚部大于零 (呈感性), 而 Z_s 的虚部小于零 (呈容性). 由方程 (1) 可知, 只有当 Z_s 和 Z_p 的虚部异号时, 才有可能使 S_{21} 取最大值, 实现高效传输. 进一步研究发现, 在 11—12.5 GHz 的频率范围内, Z_s 和 Z_p 近似满足 $\frac{Z_s}{2Z_p} + \frac{Z_s}{2Z_0} = 0$ (即图 7 所示的电路产生谐振的条件). 也就是说, 当两层超表面错位后, 有效改变了耦合阻抗 Z_{12} , 最终使得 Z_s 和 Z_p 在宽频带范围内近似满足 π 型网络的谐振条件, 从而有效拓展了器件的工作带宽.

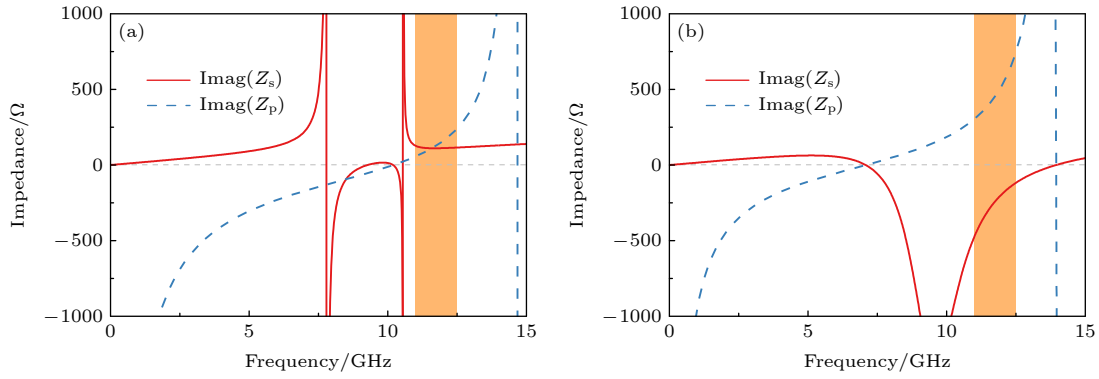


图 8 不同 L_y 值的情况下, Z_s 和 Z_p 随频率的变化关系 (a) $L_y = 0$ mm; (b) $L_y = 7.5$ mm.
 Fig. 8. Z_s and Z_p function as frequency for different L_y ; (a) $L_y = 0$ mm; (b) $L_y = 7.5$ mm.

4 宽带 OAM 发生器

在上述研究基础上, 结合 P-B 相位原理进一步实现了宽带 OAM 波束发生器, 结构如图 9(a)

所示. 该结构主要是将提出的超表面结构单元按照图 9(b) 划分的区域排列而成. 采用这种排列方式, 能保证圆极化波在高透射率的情况下形成螺旋相

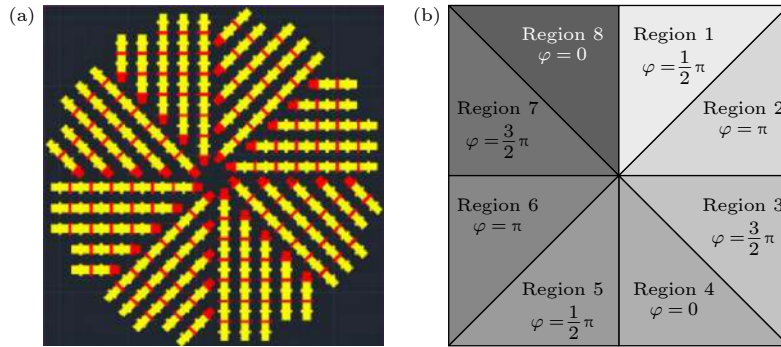


图 9 产生 OAM 波束的超表面 (a) 整体结构排布; (b) 区域分布示意图

Fig. 9. Metasurface for generating OAM wave beam: (a) The whole structure; (b) phase distribution.

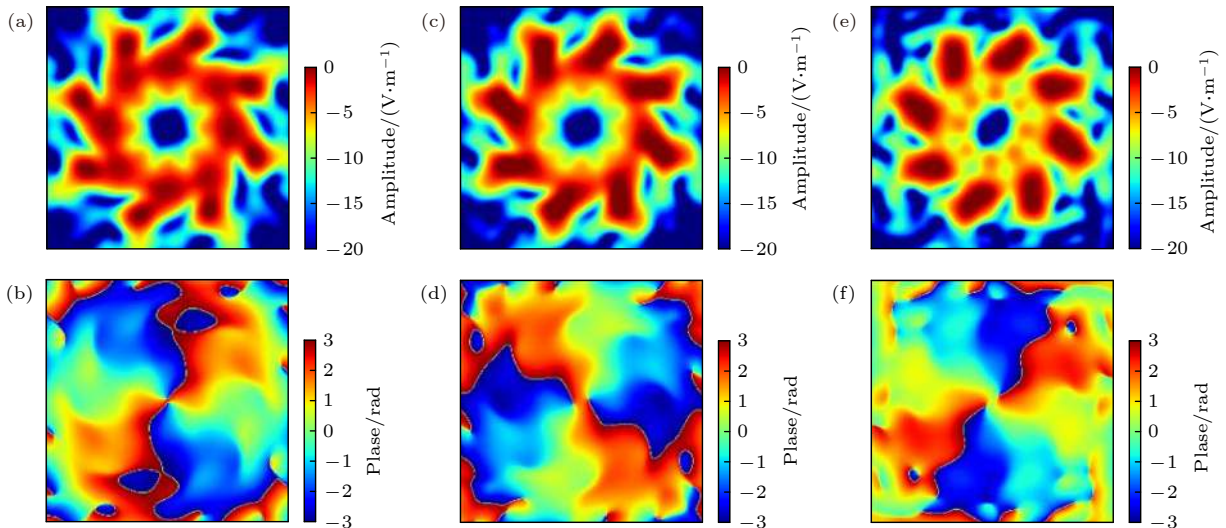


图 10 $z = 100$ mm 处, 仿真得到的 xoy 平面内的电场及相位分布 (a), (b) 11 GHz 处电场的振幅和相位; (c), (d) 11.9 GHz 处电场的振幅和相位; (e), (f) 12.8 GHz 处电场的振幅和相位

Fig. 10. Simulated amplitude and phase distributions of electromagnetic wave in xoy plane located at $z = 100$ mm: (a), (b) At 11 GHz; (c), (d) at 11 GHz; (e), (f) at 12.8 GHz.

位分布, 从而实现 OAM 波束. 为了研究器件的工作性能, 对其进行电磁仿真分析. 仿真中, 采用左旋圆极化均匀平面波激励超表面. 选取 11, 11.9 和 12.8 GHz 为典型频率, 观察电场的振幅和相位在 $z = 100$ mm 处的 xoy 平面内的分布, 结果如图 10 所示. 可以看出, 电场强度呈空心环状分布, 而相位随着方位角由 0 变化到 4π . 根据电场的振幅和相位的分布特点可以推断, 透射波为携带拓扑荷 $l = 2$ 的涡旋波束. 为了实验验证超表面的电磁特性, 采用标准印刷电路板 (PCB) 技术制作了测试样品. 图 11 为加工得到的上层和下层超表面的照片. 同时, 利用近场测试系统对器件进行了测试, 结果如图 12 所示. 比较图 10 和图 12 发现, 实验结果与仿真结果有较好的一致性, 证实了器件的优良性能. 为了进一步突显器件的性能, 将其与已发表的相关工作进行了对比, 如表 1 所列. 通过比较发现, 本文提出的器件的整体性能较好, 尤其是工作带宽, 明显高于其他器件.

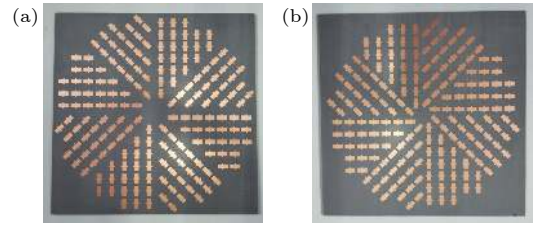


图 11 加工的实物图 (a) 正面; (b) 背面

Fig. 11. Photos of fabricated samples: (a) Top view; (b) bottom view.

表 1 与其他传输型超表面的性能对比 (λ_0 为中心频率对应的波长)

Table 1. Comparison with other transmissive metasurface.

参考工作	设计原理	单元的最大透射系数/%	相对带宽(透射系数 > 0.8)/%	厚度/ λ_0
[19]		91	3	0.05
[22]		92	5	0.05
[23]	P-B 相位	91	5	0.05
[24]		92	6	0.07
本工作		95	17.9 (> 0.8) 15.3 (> 0.9)	0.08

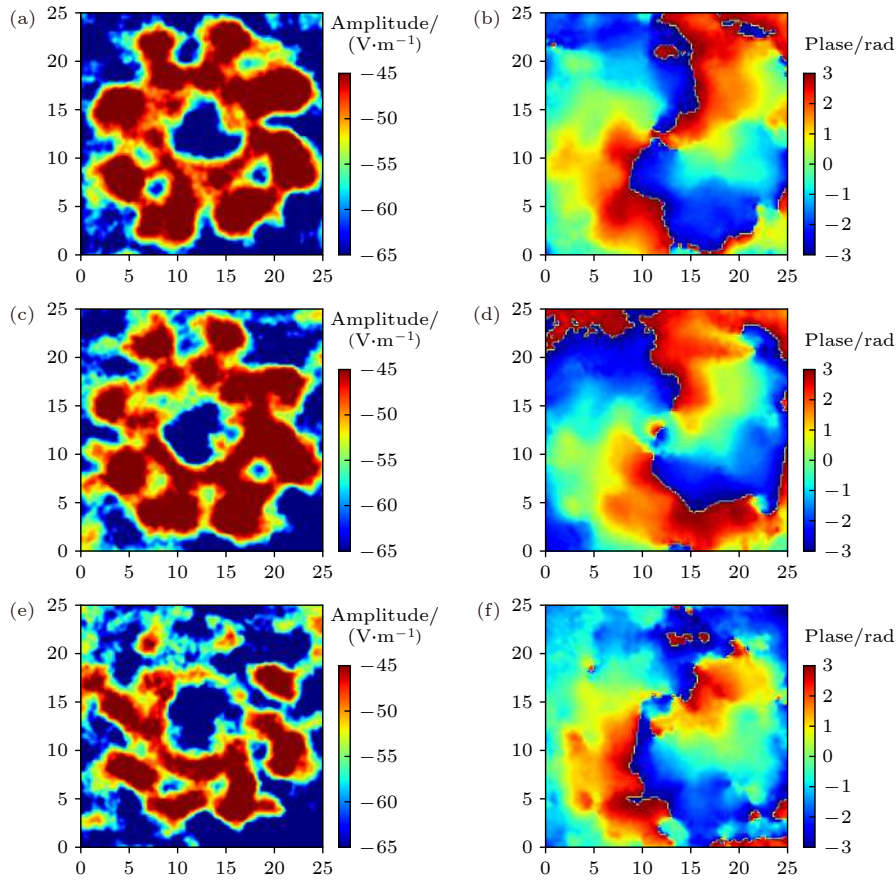


图 12 $z = 100$ mm 处, 测试得到的 xoy 平面内的电场及相位分布 (a), (b) 11 GHz 处电场的振幅和相位; (c), (d) 11.9 GHz 处电场的振幅和相位; (e), (f) 12.8 GHz 处电场的振幅和相位

Fig. 12. Measured amplitude and phase distributions of electromagnetic wave in xoy plane located at $z = 100$ mm: (a), (b) At 11 GHz; (c), (d) at 11 GHz; (e), (f) at 12.8 GHz.

5 结 论

本文提出并分析了一种新型、厚度超薄的双层超表面的传输特性. 通过将双层超表面沿 y 方向错位半个周期, 极大提高了 y 极化波在感兴趣频段内的传输效率. 在提高 y 极化波透射率的同时, x 极化波仍保持高透射率, 因此双层超表面对圆极化波也有很高的透射率. 同时, 从等效电路理论角度深入研究了双层超表面透射带宽拓展的物理机理. 进一步利用 P-B 相位原理, 实现了宽带、厚度超薄的 OAM 波束发生器, 仿真和实验结果证实了器件的性能.

参考文献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [2] Babiker M, Power W L, Allen L 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 1239
- [3] Tennant A, Allen B 2012 *Electron. Lett.* **48** 1365
- [4] Fahrbach F O, Simon P, Rohrbach A 2010 *Nat. Photonics* **4** 780
- [5] Yao A M, Padgett M J 2011 *Adv. Opt. Photonics* **3** 161
- [6] Duocastella M, Arnold C B 2012 *Laser Photonics Rev.* **6** 607
- [7] Thide B, Then H, Sjöholm J, Palmer K, Bergman J, Carozzi T, Istomin Y N, Ibragimov N, Khamitova R 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 087701
- [8] Tamburini F, Mari E, Thide B, Barbieri C, Romanato F 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 204102
- [9] Mohammadi S M, Daldorff L K, Bergman J E, Karlsson R L, Thide B, Forozesh K, Carozzi T D, Isham B 2009 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 565
- [10] Tamburini F, Mari E, Sponselli A, Thide B, Bianchini A, Romanato F 2012 *New J. Phys.* **14** 033001
- [11] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [12] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M 2013 *Science* **339** 1232009
- [13] Momeni H A S M A, Behdad N 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 525
- [14] Wakatsuchi H, Kim S, Rushton J J, Sievenpiper D F 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 245501
- [15] West P R, Stewart J L, Kildishev A V, Shalaev V M, Shkunov V V, Strohkendl F, Zakharenkov Y A, Dodds R K, Byren R 2014 *Opt. Express* **22** 26212
- [16] Ni X, Kildishev A V, Shalaev V M 2013 *Nat. Commun.* **4** 1
- [17] Yu S, Li L, Shi G, Zhu C, Shi Y 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 241901
- [18] Achouri K, Lavigne G, Caloz C 2016 *J. Appl. Phys.* **120** 235305
- [19] Chen M L N, Li J J, Sha W E I 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 396
- [20] Escuti M J, Kim J, Kudenov M W 2016 *Opt. Photonics News* **27** 22
- [21] Olk A E, Powell D A 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11** 064007
- [22] Akram M R, Mehmood M Q, Bai X, Jin R, Premaratne M, Zhu W 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1801628
- [23] Akram M R, Bai X, Jin R, Vandenbosch G A, Premaratne M, Zhu W 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 4650
- [24] Tang S, Cai T, Liang J G, Xiao Y, Zhang C W, Zhang Q, Hu Z, Jiang T 2019 *Opt. Express* **27** 1816

Wideband and high efficiency orbital angular momentum generator based on bi-layer metasurface*

Gao Xi[†] Tang Li-Guang

(School of Electrical and Information Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

(Received 24 June 2020; revised manuscript received 21 August 2020)

Abstract

A broadband and high-efficiency bi-layer metasurface is proposed in this paper. The unit cell of the metasurface is formed by symmetrically etching two cross-type metal patches on both sides of a dielectric plate. Furthermore, the two metal patches have a displacement of half a period along the y -axis. By employing the displacement, the transmission bandwidth of the bi-layer metasurface is significantly expanded. In order to obtain a physical insight into bandwidth broadening, a π -type equivalent circuit that presents the electromagnetic coupling between within the bi-layer metasurfaces is successfully extracted to investigate the influence of electromagnetic coupling on transmission performance. The results show that by shifting the metal patches along the y -axis by half a period, the coupling impedance (Z_{12} or Z_{21}) of bi-layer metasurface can be significantly modified, which further changes the electromagnetic coupling of the bi-layer metasurface. Correspondingly, the impedances Z_p and Z_s in the π -type circuit are changed to approximately meet the resonant condition of circuit in broadband, resulting in the bandwidth expansion of the proposed device. By using Pancharatnam-Berry phase theory, we redesign the proposed metasurface unit cell into a broadband orbital angular momentum generator. The simulation and measurement results verify that the bi-layer metasurface can convert a left-hand circularly polarized wave into a right-hand circularly polarized wave carrying orbital angular momentum in a frequency range between 11 GHz and 12.8 GHz, demonstrating the performance of device.

Keywords: bi-layer metasurface, broadband, Pancharatnam-Berry phase, orbital angular momentum

PACS: 81.05.Xj, 07.05.Tp, 03.65.Vf, 74.25.Uv

DOI: [10.7498/aps.70.20200975](https://doi.org/10.7498/aps.70.20200975)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61761010) and the Natural Science Foundation of Guangxi, China (Grant No. 2018GXNSFAA281193).

[†] Corresponding author. E-mail: gao_xi76@163.com