

相位梯度超表面结构对电磁波束的操控研究

徐弼军^{1,2}

(1. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 20092; 2. 浙江科技学院 理学院, 杭州 310023)

摘 要: 针对相位梯度超表面在灵活操控电磁波方面的潜在应用,设计了一种新型的高阻抗相位梯度超表面结构,该结构通过改变高阻抗表面贴片单元的大小来控制反射波的相位变化。通过数值仿真计算表明,在10 GHz频段实现了对电磁波 22° 的反射偏转。由于厚度薄、重量轻,设计的相位梯度超表面单元拓展了超表面在微波领域的应用,从而为超表面对电磁波束的操控提供了新的方法。

关键词: 相位梯度;超表面;电磁波束;反射相位

中图分类号: O434.14;O441.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2016)03-0186-05

Study on control of electromagnetic beam by phase gradient metasurface structure

XU Bijun^{1,2}

(1. School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Sciences, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at the potential application of phase gradient metasurface in the flexible control of electromagnetic wave put forward a new type of high impedance phase gradient metasurface structure. The structure is designed to control the phase change of the reflected wave by changing the size of the high impedance surface patch unit. Numerical simulation results show that the 22 degree reflection deflection of electromagnetic wave is achieved in the 10 GHz frequency band. Because the thin thickness and light weight, the design expand the application of phase gradient metasurface in microwave field, and provide a new method for metasurface electromagnetic beam steering.

Keywords: phase gradient; metasurface; electromagnetic beam; reflection phase

超表面(metasurface)是超材料(metamaterial)的二维平面阵列形式,由具有亚波长尺寸的人工“原子”周期或者非周期地排列而成,其厚度远小于工作波长,是一种新型的人工电磁媒质。对于超表面结

收稿日期: 2016-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(615051642);浙江科技学院学科交叉预研专项项目(2015JC01Z)

作者简介: 徐弼军(1979—),男,浙江省兰溪人,高级工程师,博士研究生,主要从事微波材料研究。

构,人们可以通过自由设计单元结构、单元排列方式及单元各向异性,来控制等效媒质的媒质参数,从而实现自然界中不存在或者很难实现的介电常数和/或磁导率,进而控制电磁波。

近几年来,人工微结构超表面材料已成为超材料研究领域的热点和前沿。其中,相位梯度的人工微结构超表面,因其能对电磁波波前相位进行一定的操控而引起众多研究者的关注和深入研究。相位梯度人工微结构超表面材料,最早于2011年由Yu等利用超薄单层金属结构超表面的相位突变实现对光波的波束整形和传播方向的任意调控,给出了广义折反射定律(斯涅尔折射定律)^[1],并利用V字形周期阵列设计了相位梯度人工微结构超表面,产生了涡旋波束^[2]。之后,很多学者开始对相位梯度人工微结构超表面进行了大量研究。Pu等采用对称的T形周期性结构,成功设计了可以产生 $0\sim 2\pi$ 相位变化的超表面单元结构,实现了光束的异常反射^[3]。Wei等利用圆形多层金属谐振结构获得透射波的相位连续可调,通过对多层金属谐振结构空间分布合适设计,实现了高效率波束调控^[4]。孙彦彦等利用费马原理分析研究了相位梯度人工微结构超表面材料的相位突变情况^[5]。以Zhou为主要研究者的研究组利用H形金属结构设计了单层的反射相位梯度超表面,将垂直入射的电磁波耦合为表面电磁波,实现了特定频带内的一维电磁波反射聚焦^[6-7]。Wang等采用开口谐振环设计了反射型相位梯度人工微结构超表面,实现了将特定极化的入射电磁波高效地耦合为表面波^[8],并利用同极化反射超表面单元阵列,设计了高效的反射型圆极化相位梯度人工微结构超表面^[9]。李勇峰等利用圆极化波的同极化反射特性,按照一定空间阵列周期排布,设计了高效的相位梯度人工微结构超表面,实现了对左右旋入射波产生相反的相位梯度的功能^[10-11]。相位梯度人工微结构超表面所具有的特殊的物理特性的物理机制是,入射的电磁波与人工微结构超表面结构单元相互作用后形成了局域共振效应,产生的局域共振模式的层间耦合能在亚波长尺度上对入射电磁波进行一定的调控,从而实现对入射波束的波前控制和整形^[12-13]。与最初的人工微结构超材料相比较,这种超薄的二维阵列结构超表面,不仅能够实现负折射、深聚焦和波束偏转等奇特的物理现象,还具有体积小、易于加工、性能稳定等特点,因此在实际应用中具有很大的发展前景。

1 相位梯度超表面结构的模型设计与分析

1.1 基于高阻抗超表面结构单元模型设计

相位梯度超表面这些特殊的物理特性的物理机制是,入射的电磁波与人工微结构超表面结构单元形成了一定共振效应。对此本研究设计了基于高阻抗表面相位梯度表面结构,与普通人工微结构材料相比,高阻抗表面是一种金属接地板-介质材料-金属贴片三者混合型的二维周期性表面结构,同时金属接地板与周期排列的金属贴片通过金属化过孔相连,简称为蘑菇状高阻抗超表面结构。贴片可以是各种不同的形状,常用的贴片形状通常为正方形,其结构如图1所示:正方形蘑菇高阻抗超表面结构的介质材料的相对介电系数为2.2,结构单元的大小为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,厚度 h 为1.6 mm,下层金属地平面和上层金属正方格子贴片单元厚度 t 都为0.035 mm,下层金属地平面的边长 p 为10 mm,上层金属正方格子贴片边长 a 为一个变化值,金属化孔孔径 d 为1 mm。

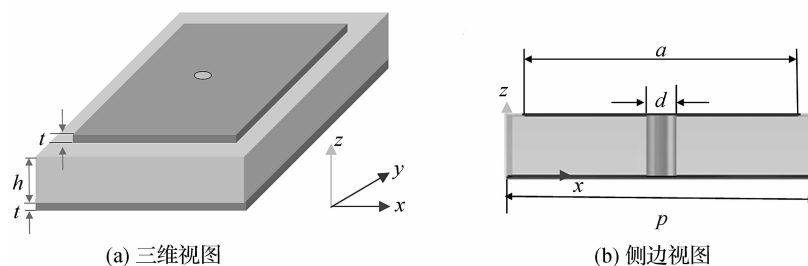


图1 高阻抗表面相位梯度表面结构示意图

Fig. 1 Schematic illustration of unit cell of high impedance phase gradient metasurface

1.2 相位梯度超表面结构阵列设计

相位梯度超表面结构,每一个结构单元均是亚波长结构,是一个正方形蘑菇状的高阻抗超表面结构,该结构由金属接地板-介质材料-金属贴片的亚波长谐振微腔构成,具有局域表面等离子激元共振和微腔效应,可以通过改变金属贴片边长 a 的大小,对入射的电磁波进行全相位($0\sim 2\pi$)的延迟调制。

一般情况下,相位梯度超表面通过 n 个相似超表面单元按一定的分布排列来实现 2π 相位变化。为了简化设计,选取了如表1所示的8种不同大小金属贴片的基本结构单元,可产生的相位延迟分别为 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4, 3\pi/2, 7\pi/4$ 的8个相位。

利用超表面微结构可以任意排列,将 $n(n=8)$ 个相位梯度超表面单元按相位大小均匀递增方法进行排列,构成一个超级单元阵列。如图2所示,设计了 6×8 的阵列分布,这样每一列得到相位梯度为 $\zeta = \frac{2\pi}{np} \frac{d\varphi}{dx}$,

P 为微结构单元的周期。通过改变相位梯度,可以随

意控制透射光波和反射光波的传播方向。即一共8种单元类型,经过一定的阵列排布设计和结构参数的优化,每列的相移单元结构相同,但不同列的贴片层尺寸不同,贴片层尺寸大小能够引起反射波的相位偏移,相邻列的不同类型的单元相隔 $\pi/4$ 相位,8个不同相位单元分别分布在8列区域内,共覆盖相位变化量0到 2π ,可以实现对入射光的全相位($0\sim 2\pi$)延迟调制,从而实现具有较高光能利用率的反射表面等离子激元超表面器件。

表1 金属贴片边长与相位变化的设计参数

Table 1 Design of parameters for size of patch defined in metal film and changes of phase

单元序列	贴片边长/mm	相位变化/(°)
1	1.85	0
2	3.92	45
3	6.02	90
4	6.70	135
5	7.48	180
6	7.92	225
7	8.32	270
8	9.85	315

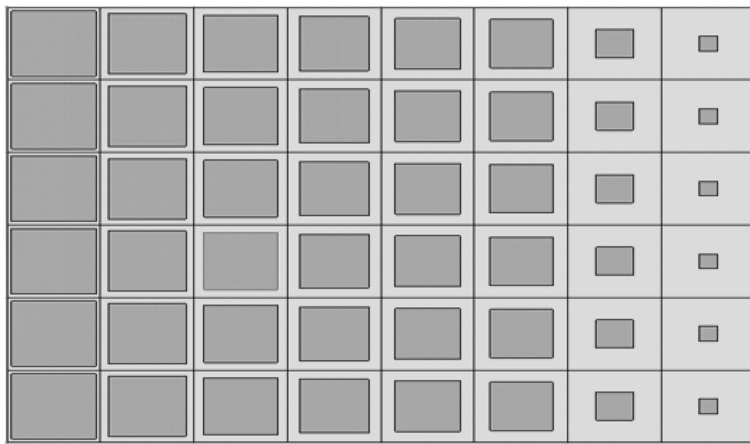


图2 相位梯度超表面 6×8 阵列设计图

Fig. 2 6×8 array design of phase gradient metasurface

2 高效的波束控制仿真计算

2.1 仿真计算的理论方法

为了分析一个高阻抗表面相位梯度表面结构贴片的辐射性能情况,采用近似腔模型的理论分析方法。这种近似模型是基于考虑金属贴片天线是一个介电加载谐振腔,在模型的复杂性和结果的精确度之间具有很好的匹配性。

当平面波正入射后,在 $x-y$ 面的电场分布分别为^[14]:

$$E_x = -j^n \frac{e^{-jk_0 r}}{2r} a h k_0 J_n(a k_0 \sqrt{\epsilon_r}) [e^{-j(n-1)\varphi} J_{n-1}(\gamma) - e^{-j(n+1)\varphi} J_{n+1}(\gamma)] \cos[\theta] =$$

$$A e^{-j(n-1)\varphi} - B e^{-j(n+1)\varphi}, \quad (1)$$

$$E_y = j^{n+1} \frac{e^{-jk_0 r}}{2r} ahk_0 J_n(ak_0 \sqrt{\epsilon_r}) [e^{-j(n-1)\varphi} J_{n-1}(\gamma) + e^{-j(n+1)\varphi} J_{n+1}(\gamma)] \cos[\theta] = -j[Ae^{-j(n-1)\varphi} + Be^{-j(n+1)\varphi}]. \quad (2)$$

式(1)和式(2)中的 A 、 B 分别为:

$$A = j^n \frac{e^{-jk_0 r}}{2r} ahk_0 J_n(ak_0 \sqrt{\epsilon_r}) \cos[\theta] J_{n-1}(\gamma),$$

$$B = -j^n \frac{e^{-jk_0 r}}{2r} ahk_0 J_n(ak_0 \sqrt{\epsilon_r}) \cos[\theta] J_{n+1}(\gamma).$$

其中: $\gamma = k_0 a \sin \theta$; k_0 为波矢; a 为方形贴片的边长; h 为介质材料的厚度; J_i 为第一类贝塞尔函数; i 为阶数。

2.2 仿真计算结果

使用 CST 微波仿真软件对相位梯度超表面结构阵列进行了全波仿真,当平面电磁波沿 z 方向垂直入射在顶部的金属贴片层上后,反射波沿着 z 方向传播,在 $x-y$ 面的电场分布符合式(1)和式(2)的电场分布方程,通过仿真和相应的计算可以获得平面电磁波反射后的场分布情况。图 3 显示的是 CST 微波仿真软件中反射波的电流场分布图,图中显示平面电磁波通过界面反射后的电流方向有一定的偏转,表明电磁波的波前能被有效地操控。图 4 显示的是正入射的平面电磁波场分布图和电磁波的反射偏转电场分布图,图中表明了反射后的电磁波具有一定的偏转现象产生,通过测量表明电磁波发生了 22° 的反射偏转。

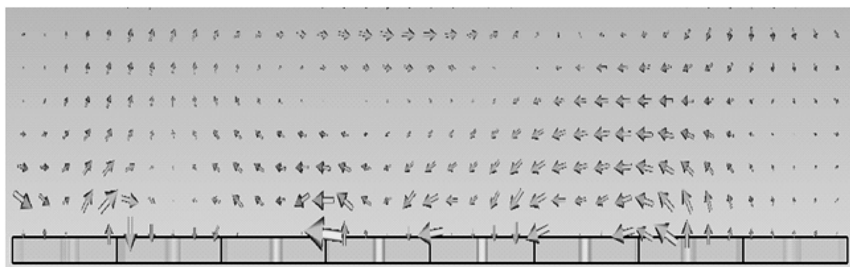
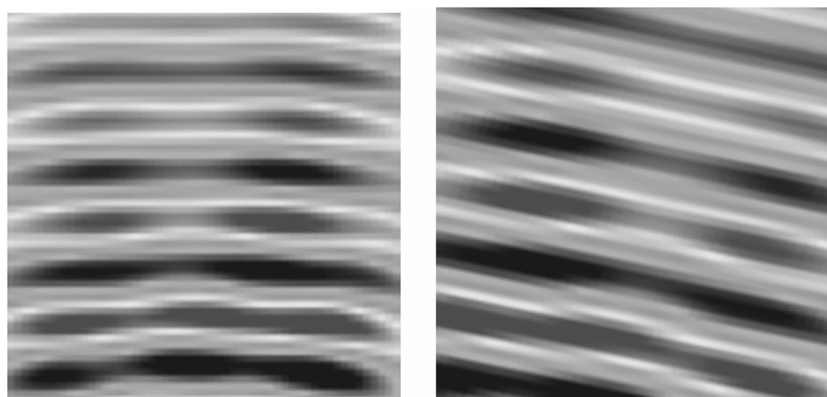


图 3 CST 仿真的电流场分布图

Fig. 3 Distribution of current field in CST simulation



(a) 正入射的平面电磁波电场分布

(b) 反射偏转后的电磁波电场分布

图 4 平面电磁波电场分布

Fig. 4 Distribution of electromagnetic field

3 结 语

本研究提出了一种基于高阻抗表面的超薄相位梯度超表面阵列结构,单元厚度仅为 1.67 mm,在特定 10 GHz 工作频段点,通过对超表面贴片单元的大小来控制反射波 $0 \sim 2\pi$ 范围内的相位变化,从而实

现了对电磁波波前的操控。通过数值仿真,表明当平面波正入射到由该单元组成的相位梯度超表面阵列后,能高效地进行反射,且对平面波产生了 22° 的反射偏转。由于厚度薄、重量轻,设计的单元阵列拓展了相位梯度超表面在微波领域的应用,从而为超表面对电磁波束的操控提供了新的方法,并具有很大的应用潜力。

参考文献:

- [1] YU N F, GENEVET P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(654):333.
- [2] YU N F, CAPASSO F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139.
- [3] PU M B, CHEN P, WANG C, et al. Broadband anomalous reflection based on gradient low-Q meta-surface[J]. *AIP Advances*, 2013, 3(5):052136.
- [4] WEI Z Y, CAO Y, SU X P, et al. Highly efficient beam steering with a transparent metasurface[J]. *Optics Express*, 2013, 21(9):10739.
- [5] 孙彦彦,韩璐,史晓玉,等. 用于相位突变界面的广义的反射定律和折射定律[J]. *物理学报*, 2013, 62(10):104201.
- [6] SUN S L, HE Q, XIAO S Y, et al. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5):426.
- [7] XIAO S Y, HE Q, QU C, et al. Mode-expansion theory for inhomogeneous meta-surfaces[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22):27219.
- [8] WANG J, QU S, MA H, et al. High-efficiency spoof plasmon polariton coupler mediated by gradient metasurfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(20):201104.
- [9] LI Y, ZHANG J, QU S, et al. Achieving wideband polarization-independent anomalous reflection for linearly polarized waves with dispersionless phase gradient metasurfaces[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(42):425103.
- [10] 李勇峰,张介秋,屈绍波,等. 宽频带雷达散射截面缩减相位梯度超表面的设计及实验验证[J]. *物理学报*, 2014, 63(8):084103-1.
- [11] 李勇峰,张介秋,屈绍波,等. 圆极化波反射聚焦超表面[J]. *物理学报*, 2015, 64(12):124102-1.
- [12] 刘晓波,施宏宇,陈博,等. 折射率梯度表面机理的研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(21):214201-1.
- [13] 侯海生,王光明,李海鹏,等. 超薄宽带平面聚焦超表面及其在高增益天线中的应用[J]. *物理学报*, 2016, 65(2): 027701.
- [14] BARBUTO M, TROTTA F, BILOTTI F, et al. Circular polarized patch antenna generating orbital angular momentum[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2014, 148: 23.