

文章编号 1004-924X(2014)06-1430-08

基于十字单元的可调谐互补屏频率选择表面

焦健^{1,2}, 徐念喜¹, 冯晓国¹, 李玉东¹, 高劲松^{1*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为实现频率选择表面(FSS)工作频点的可调谐,将环型孔径 FSS 负载分离后形成感性表面与容性表面,利用两者之间的耦合机制设计了一种互补屏 FSS。建立了互补屏 FSS 等效电路模型,定性分析了它的变频机理。采用耦合积分方程法计算了负载贴片旋转角,耦合电介质厚度和相对介电常数对互补屏传输特性的影响。利用镀膜与光刻方法在耦合电介质两侧制备容性表面与感性表面,并用自由空间法测试 250 mm×250 mm 样件的传输特性。计算与测试结果均表明:当十字贴片从 0°旋转至 10°,互补屏 FSS 的谐振频点会从 18.2 GHz 向低频漂移至 14.8 GHz。当耦合电介质的物理厚度从 0.1 mm 变化到 1 mm 时,互补屏 FSS 的容性表面和感性表面之间的耦合效应逐渐消失。耦合电介质相对介电常数增加使互补屏间的耦合增强,其工作频点向低频漂移。实验显示:随着负载贴片旋转角的变化,互补屏 FSS 能够实现主动变频功能,为设计和制备主动 FSS 提供借鉴。

关键词:互补屏频率选择表面;耦合机制;容性表面;感性表面

中图分类号:TN957;TN761 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142206.1430

Tunable complementary frequency selective surfaces based on cross-elements

JIAO Jian^{1,2}, XU Nian-xi¹, FENG Xiao-guo¹, LI Yu-dong¹, GAO Jin-song^{1*}

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

Abstract: To tune the operating frequency of a Frequency Selective Surface (FSS), the load impedance of the loop slot FSS forms was separated to an inductive surface and a capacitive surface, and the coupling mechanism between the two surfaces was used to develop a Complementary FSS(CFSS). An equivalent circuit model of the CFSS was established and its tunable resonance mechanism was analyzed quantitatively. The influences of the rotating angle of the load patch, coupled dielectric thickness and the relative dielectric constant on the transmission characteristics of the CFSS were calculated accurately by using the coupled integral equation method, then the inductive surface and the capacitive surface were fabricated on both sides of the coupled dielectric by the coating and lithography methods.

收稿日期:2013-04-07;修订日期:2013-05-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61172012)

The transmission response of a 250 mm \times 250 mm CFSS prototype was measured by using the free space method. The calculated and measured results show that the CFSS resonance will be tuned from 18.2 GHz to 14.8 GHz by rotating the cross patch from 0 degree to 10 degree. The coupling effect between the capacitive surface and the inductive surface will disappear by increasing the physical thickness of the coupling dielectric from 0.1 mm to 1 mm. With increasing the relative dielectric constant of the coupling medium, the coupling between the CFSSs will be strengthened and the operating frequency will shift to lower frequencies. It concludes that the CFSS can realize the active resonance conversion function as the rotating angle changes, which provides references for the design and manufacture of active FSSs.

Key words: Complementary Frequency Selective Surface(CFSS); coupling mechanism; capacitive surface; inductive surface

1 引 言

频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)是由周期性排列的金属贴片单元(带阻型),或金属屏上周期性的开孔单元(带通型)构成的一种二维周期阵列结构^[1]。与电磁波相互作用时,FSS能够控制电磁波的传输和散射,实现能量的重新分配,使入射电磁波在谐振频点处发生全反射或全透射,表现出明显的滤波特性,因此被广泛应用于微波、红外以及可见光波段^[2-4]。

随着 FSS 技术的不断发展,目前具有变频功能的主动 FSS(Active Frequency Selective Surfaces, AFSS)已经成为国内外各研究机构的主要研究方向^[5]。AFSS 分为开关型和调谐型两类,通常以加载 PIN 二极管^[6]、变容二极管^[7]等集总元件,或 MEMS 开关^[8],光控介质基底^[9],机械调制^[10]等控制 FSS 的传输特性和调节 FSS 的工作频点。其中,加载 PIN 二极管的有源 FSS 通过控制偏置电压使 PIN 二极管处于导通或断开状态,从而实现 FSS 工作频点的开与关。加载变容二极管的有源 FSS 能实现连续调节 FSS 谐振频点。MEMS 开关通过改变 FSS 周期单元结构来调节 FSS 传输特性,主要用于可重构 FSS。光控介质基底的介电常数随光照强度变化,因此通过控制光强等外接激励源调节 FSS 谐振频点,实现 AFSS。文献[10]利用机械调节方法将 FSS 从平面结构调整三维立体结构,改变了 FSS 传输特性。

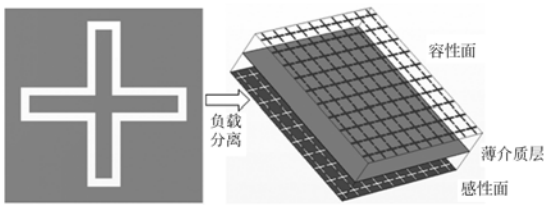
为实现工作频点可调谐的 FSS,本文将具有旋转对称性的十字环孔径 FSS 的负载阻抗分离,

形成由十字贴片阵列构成的容性表面和十字孔径阵列构成的感性表面,将它们分别加载在薄介质两侧构成互补屏频率选择表面(Complementary Frequency Selective Surfaces, CFSS)^[11]。十字贴片绕其中心旋转一定角度 α 会改变两互补屏间的耦合特性,并以此调节 CFSS 的工作频点,使它具有变频滤波功能。然后依据十字贴片阵列和十字孔径阵列的带阻和带通滤波特性以及互补屏耦合关系建立该 CFSS 的等效电路模型,分析 CFSS 变频的物理机理。利用耦合积分方程法计算其频响特性,包括十字贴片旋转角度 α 、耦合电介质厚度、相对介电常数等参数对 CFSS 传输特性的影响,以及该 CFSS 的角度稳定性和极化稳定性等。最后,采用自由空间法对 250 mm \times 250 mm 的 CFSS 样件进行了测试。计算与测试结果表明,旋转十字贴片能调节 CFSS 的谐振频点,实现变频滤波,从而为 AFSS 设计提供参考。

2 CFSS 设计与物理机理分析

谐振型 FSS 表面具有以储存电场能为主的等效电容和以储存磁场能为主的等效电感,利用“波结构”实现“路谐振”,因此电磁转换滤波结构必须包含电场能存储区域和磁场能存储区域。从具有带通滤波特性的十字环孔径结构出发,将十字贴片负载分离得到由容性表面和感性表面构成的 CFSS 结构。其中被分离出的十字贴片阵列为容性表面,十字孔径阵列为感性表面。容性表面贴片单元绕其中心点旋转 α 时,两互补屏间的耦合作用发生变化,此时 CFSS 的通带谐振频点规律性地漂移,具有变频功能。

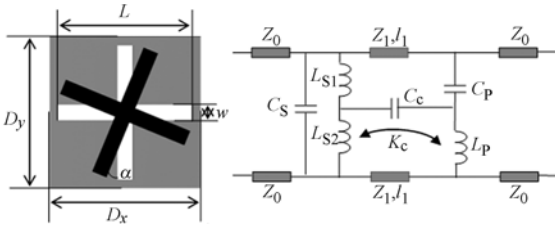
为简化 CFSS 设计和降低加工难度,调节负载分离后的十字孔径,使其单元尺寸与十字贴片负载一致,即构成自互补结构。负载分离过程如图 1 所示,所构成的自互补 CFSS 周期单元结构如图 2(a)所示。十字贴片阵列为带阻滤波结构,其等效电路为 LC 串联电路;而十字孔径阵列为带通滤波结构,其等效电路为 LC 并联电路。互补阵列间距很近使两阵列间存在电感互耦 K_C 和层间电容 C_C ,该 CFSS 的等效电路模型如图 2(b)所示。



(a)十字环形孔径 FSS (b)CFSS 的 3D 结构
(a)Cross-loop slot FSS (b)3D view of CFSS

图 1 负载分离设计流程

Fig. 1 Flow of load impedance separation



(a)CFSS 的周期单元结构 (b)CFSS 的等效电路模型
(a)Unit-cell of CFSS (b)Equivalent circuit model

图 2 CFSS 的周期单元结构和等效电路模型

Fig. 2 Unit cell and equivalent circuit model of CFSS

3 数值分析与计算

CFSS 结构属于近距离耦合互补屏,很多分析方法例如广义散射矩阵法以及多端口电路技术等在处理近距离阵列时所需的矩阵过大,所以受计算条件的限制^[12-14],因此本文选用耦合积分方程法。该方法从耦合本质出发,基于高阶本征模式相互作用(即凋落模耦合)建立方程组,并采用矩量法求解方程组,避免了矩阵过大^[15-16],具有计算速度快、收敛稳定性高等优点。

假设该 FSS 平面向无穷大,金属表面为无限薄的理想导体,入射平面波以任意角度入射^[17]。根据 Floquet 定理,将自由空间和介质区域的横向电场和横向磁场用正交矢量 Floquet 模式展开。用 p, q 表示 Floquet 模式因子, $r=1, 2$ 表示 TE, TM 模式,则正交 Floquet 模式为:

$$\phi_{pq}^r = \frac{1}{D} \left[\frac{v_{pq}}{t_{pq}} e_x - \frac{u_{pq}}{t_{pq}} e_y \right] \cdot \exp[-j(u_{pq}x + v_{pq}y + \gamma_{pq}z)] \exp(\pm j\gamma_{pq}z), \quad (1)$$

式中: $D = (D_x D_y)^{1/2}$, $v_{pq} = k \sin \theta \cos \phi + \frac{2\pi P}{D_x}$,

$u_{pq} = k \sin \theta \sin \phi + \frac{2\pi q}{D_y}$, $t_{pq}^2 = v_{pq}^2 + u_{pq}^2$, $r_{pq}^2 = k^2 - t_{pq}^2$ 。其中 D_x, D_y 分别为 x, y 方向的周期, k 为入射电磁波的波数, θ 为电磁波的入射角, ϕ 为入射平面与 x 轴的夹角。

在各界面处 ($l=1, 2$), 利用标准电磁场边界条件得到一系列矢量模式积分方程组。通常各积分方程均以 Floquet 模式以及二元格林函数谱域展开 \tilde{G} 与表面电流谱域展开 \tilde{J}' 乘积的形式表示:

$$\underline{E}_l^{\text{inc}} = \sum_{pq} \left\{ \sum_{r=1}^M \tilde{G}_l^r \tilde{J}'^r \right\} \psi_{pq}, \quad l=1, 2. \quad (2)$$

其中: ψ_{pq} 为 Floquet 模式。当用横向电场振幅为 T_m^{inc} 的电磁波照射该频率选择表面时,有:

$$\underline{E}_l^{\text{inc}} = 2 \sum_{m=1}^2 \left(\prod_{i=1}^{3l-1} \tau_i \right) \eta_{m00}^1 T_m^{\text{inc}} \psi_{00} \underline{K}_{m00}, \quad (3)$$

其中: η 和 τ 分别为介质导纳和模式反射系数, $m=1, 2$ 分别代表 TE 模式和 TM 模式。式(2)是含有阵列间凋落模耦合因子的矩阵。将介质考虑在内后谱域格林函数为:

$$\tilde{G}_l^r = \frac{1}{(k_{tx})^2 + (k_{ty})^2} \times \begin{bmatrix} \xi_l^{1,r'}(k_{tx})^2 + \xi_l^{2,r'}(k_{ty})^2 & -k_{tx}k_{ty}(\xi_l^{1,r'} - \xi_l^{2,r'}) \\ -k_{tx}k_{ty}(\xi_l^{2,r'} - \xi_l^{1,r'}) & \xi_l^{2,r'}(k_{tx})^2 + \xi_l^{1,r'}(k_{ty})^2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: ξ 是与夹层介质及两层互补屏分开距离相关的参量, k_{tx} 和 k_{ty} 分别为入射电磁波传播常数在 x, y 方向上的分量。用矩量法将未知电流进行全域基函数展开,式(2)化简为矩阵形式,求解得到透射电场为:

$$\underline{E}^+(r, z) = \left(\underline{E}_2^{\text{inc}} - \sum_{r'=1}^2 \tilde{G}_2^{r'} \tilde{J}'^r \right) \tau e^{+j\beta_{pq}z} \psi_{00}(r). \quad (5)$$

通过联立式(5)和式(2)求得透射系数 t 。

依据 Munk 的描述, ξ 可表示为:

$$\begin{cases} \xi_l^{1,r'}(k_{lx})^2 + \xi_l^{2,r'}(k_{ly})^2 = \xi_{0re} + j\xi_{yl} \\ \xi_l^{2,r'} - \xi_l^{1,r'} = j|\xi_l^{2,r'} - \xi_l^{1,r'}| = j\xi_{y2} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)构建传输系数为 1 时的评价函数, 为:

$$\xi_{yl} = \xi_{0re} \sqrt{\left(\frac{|\xi_l^{2,r'} - \xi_l^{1,r'}|}{\xi_{0re}}\right)^2 - 1} \quad (7)$$

当 $|\xi_l^{2,r'} - \xi_l^{1,r'}| = \xi_{0re}$ 时, CFSS 的导纳虚部为零, CFSS 阵列之间发生耦合作用时, 两层周期阵列之间属于临界耦合状态。

4 频响特性分析

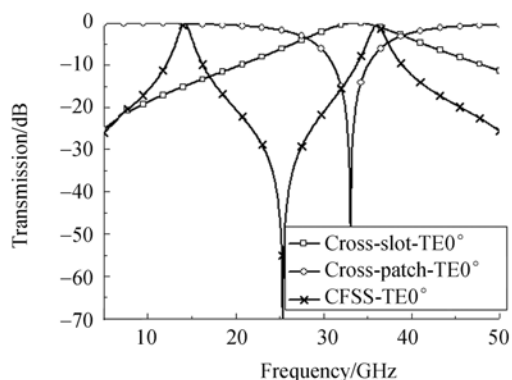
采用上述数值分析方法分析该 CFSS 的传输特性, 包括谐振频点随 α 的变化规律、耦合介质厚度、相对介电常数、入射电磁波的入射角度和极化方向对 CFSS 传输特性的影响。当 CFSS 在 Ku 波段谐振时, 依据评价函数获得传输系数为 1 的最佳初始结构, 如图 2(a) 所示: $L = 4.4 \text{ mm}$, $w = 0.5 \text{ mm}$, 且十字贴片阵列和十字孔径阵列具有相同的矩形栅格排布周期 $D_x = D_y = 5 \text{ mm}$ 。为不失普遍性, 选取介质厚度为 0.1 mm , 介电常数为 3, 损耗正切忽略不计。

4.1 CFSS 与独立屏传输特性对比

本节选取 $\alpha = 0^\circ$ 的 CFSS 结构, 并对比它与独立屏的传输特性差异。独立屏的十字贴片 FSS 和十字孔径 FSS 的单元结构参数与 CFSS 一致。当 TE 极化波垂直扫描时, 在 $0 \sim 50 \text{ GHz}$ 它们的频响特性曲线如图 3(a) 所示。

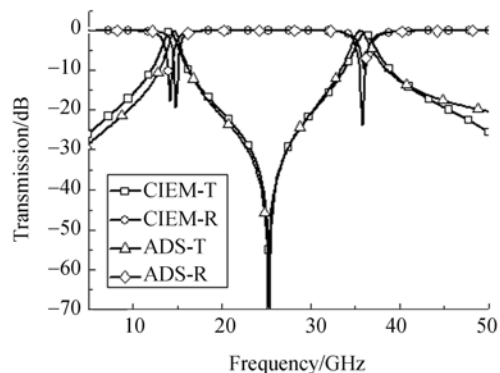
两自互补的独立屏 FSS 分别采用贴片结构和孔径结构, 在相同的谐振频点处分别具有全反射和全透射的滤波特性。与独立屏 FSS 相比, CFSS 基于容性表面和感性表面耦合机制滤波, 因此其主谐振频点出现在低频处^[11]。这使得 CFSS 避开栅瓣(wood 奇异)干扰频带, 具有良好的入射角度稳定性。

图 3(b) 为图 2(b) 所示等效电路图的 ADS 仿真与图 2(a) CFSS 结构的数值仿真结果, 两者吻合。其中, CIEM-T 和 CIEM-R 分别为通过耦合积分方程法得到的 CFSS 透过率和反射率, ADS-T 和 ADS-R 分别为 ADS 仿真得到的 CFSS 透



(a) CFSS 与独立屏传输特性对比

(a) Transmission responses of CFSS against freestanding FSS



(b) CFSS 模型的 ADS 与 CIEM 仿真结果对比
(b) Simulation result of ADS against CIEM

图 3 正入射时 CFSS 的传输特性

Fig. 3 Transmission characteristics of CFSS at normal incidence of TE wave

率和反射率。等效电路中各集总参数为: $Z_1 = 217.67 \Omega$, 电长度 $E = 2.97^\circ$, $f_0 = 14.225 \text{ GHz}$, $C_s = 0.295 \text{ pF}$, $C_p = 0.001 \text{ pF}$, $C_c = 0.048 \text{ pF}$, $L_{s2} = 0.1 \text{ nH}$, $L_p = 2.5 \text{ nH}$, $L_{s1} = 0.1 \text{ nH}$, $K_c = 1$ 。

4.2 旋转十字贴片对 CFSS 频响特性的影响

十字单元具有旋转对称性, 其绕中心旋转周期为 90° , 但因十字孔径单元保持静止, 需考察的十字贴片旋转角度范围缩减至 45° 。选取 α 分别为 $0, 10, 20, 45^\circ$, 其他结构参数与上节一致, TE 极化波垂直入射时, α 对 CFSS 传输特性的影响如图 4 所示。当 α 从 0° 增加到 45° 时, CFSS 主谐振的谐振频点从 14.18 GHz 向低频漂移至 9 GHz 。 α 增加使两互补阵列间金属重叠区域面积

S 增加,从而导致两阵列间的互感增强和层间电容增大,两互补屏间耦合作用增强,CFSS 主谐振峰值向低频漂移。

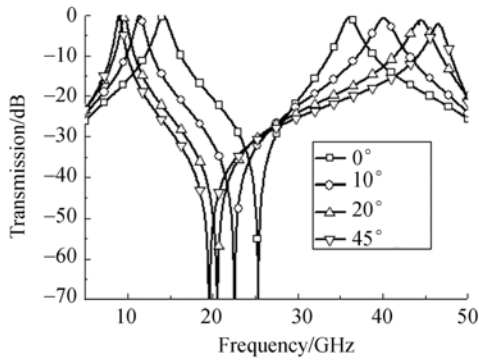


图 4 正入射时 α 对 CFSS 传输特性的影响

Fig. 4 Influence of α on transmission characteristics at normal incidence of TE wave

当十字贴片旋转时,两互补阵列间金属重叠区域面积 S 改变,这导致两近距离互补屏间的电感互耦和层间电容变化,即两互补屏的耦合强度变化,使 CFSS 谐振频点漂移。CFSS 谐振频点随 α 的变化规律性地漂移,该现象表明,CFSS 具有变频功能,尤其当 α 在 0° 至 20° 之间变化时,CFSS 的调谐效果显著。

4.3 耦合电介质对 CFSS 传输特性的影响

互补屏间强烈的耦合作用使 CFSS 具有较好的传输特性,如良好的角度稳定性以及工作频带远离栅瓣干扰^[11]。因此,耦合电介质(包括厚度和相对介电常数)亦为影响 CFSS 传输特性的关键参数。

选择旋转角度 $\alpha=10^\circ$,并忽略耦合电介质正切损耗。首先,在耦合电介质的相对介电常数为 3,厚度分别为 0.1,0.3,0.5,1,10 mm,TE 极化波正入射时,得到的 CFSS 传输特性曲线如图 5 所示。然后,在耦合电介质厚度为 0.1 mm,相对介电常数分别为 2,3 和 5,TE 极化波正入射时,得到的 CFSS 传输特性曲线如图 6 所示。

图 5 和图 6 表明,耦合电介质的物理厚度和相对介电常数是影响 CFSS 传输特性的关键参数。耦合电介质厚度增加会严重影响 CFSS 的耦合作用,当两互补屏间距从 0.1 mm 增加到 1 mm 时,CFSS 耦合作用逐渐减弱;当两屏间距离增加到 10 mm 时,耦合主谐振峰值消失,腔体谐振导

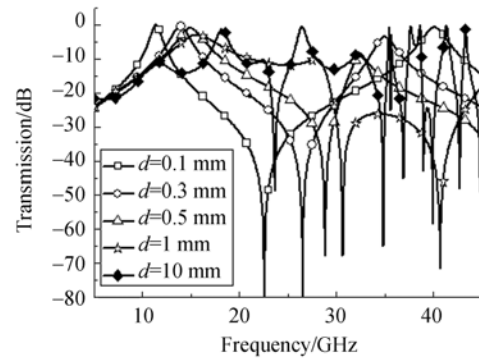


图 5 正入射时 d 对 CFSS 传输特性的影响

Fig. 5 Influence of d on transmission characteristics at normal incidence of TE wave

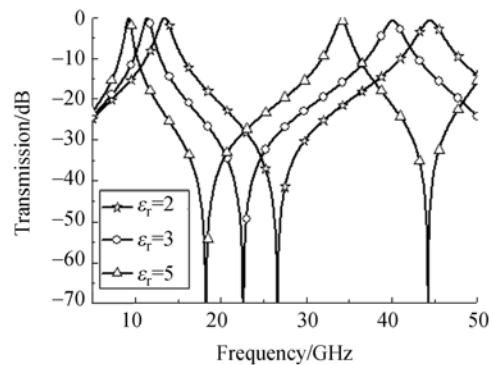


图 6 正入射时 ϵ_r 对 CFSS 传输特性的影响

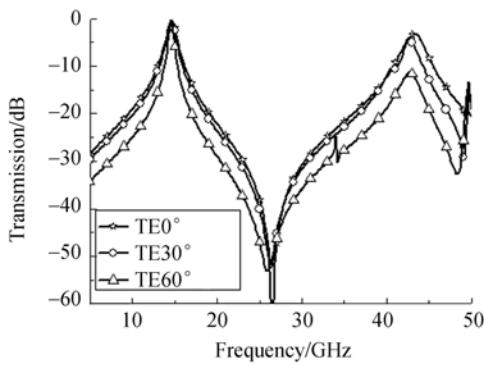
Fig. 6 Influence of ϵ_r on transmission characteristics at normal incidence of TE wave

致多峰值频点。增加耦合电介质和相对介电常数能增强 CFSS 耦合作用,使 CFSS 谐振频点向低频漂移。因此,耦合介质厚度和相对介电常数是设计优化 CFSS 的重要参量。

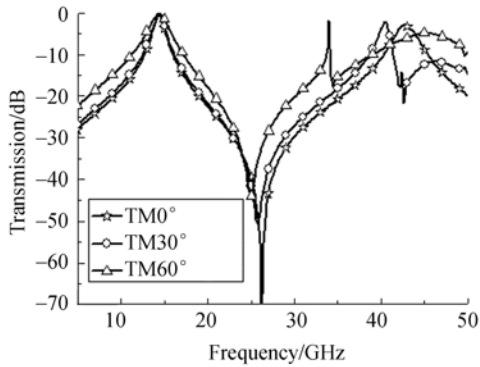
4.4 入射角度和极化方式对 CFSS 传输特性的影响

选取耦合电介质厚度为 0.1 mm,相对介电常数为 3,忽略损耗正切,在 TE 极化和 TM 极化平面电磁波分别以 0° , 30° 和 60° 照射 CFSS 时,得到其传输特性曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,该 CFSS 主谐振具有极好的角度稳定性和极化稳定性。入射角度增大,主谐振的峰值保持不变,带宽稍有减小。但当 TE 和 TM 极化波的入射角度过大时,高次谐振通带附近出现栅瓣,导致谐振频点透过率下降,失去角度稳定性。



(a) TE 极化波以不同角度入射时,CFSS 的频响特性
 (a) Transmission responses of CFSS for various incident angles of TE waves



(b) TM 极化波以不同角度入射时,CFSS 的频响特性
 (b) Transmission responses of CFSS for various incident angles of TM waves

图 7 入射角度和极化方式对 CFSS 传输特性的影响
 Fig.7 Influence of incident angles and polarizations on transmission characteristics

5 实验验证

受测试波段限制,介质层厚度不宜过薄,因此选择两层厚 0.024 5 mm,介电常数为 3,正切损耗为 0.005 的聚酰亚胺膜,用厚度为 0.045 mm,介电常数为 2.45,正切损耗为 0.005 的 EVA 胶将两层聚酰亚胺膜粘接在一起形成耦合电介质。由于 CFSS 结构的加工精度要求较高,需保证两周表面单元对准,因此采用成熟的光刻镀膜工艺,在耦合电介质两侧制备通带在 Ku 波段的十字贴片阵列和十字孔径阵列,CFSS 制备工艺流程如图 8 所示。图 9(a)为实验样品十字贴片阵列周期单元旋转前后的对比图,样品尺寸为 250 mm×250 mm。根据工艺要求,制作掩模板需要

预留尺寸,所制备的 CFSS 样品采用日本三丰 MF-D3017B 测量显微镜测量,其测量精度不大于 ±0.5 μm,周期单元结构的仿真参数为 $D_x = D_y = 4 \text{ mm}$, $L = 3.6 \text{ mm}$, $w = 0.5 \text{ mm}$,加工和测量误差能够控制在 ±1 μm 内。

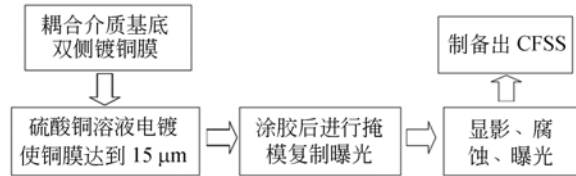
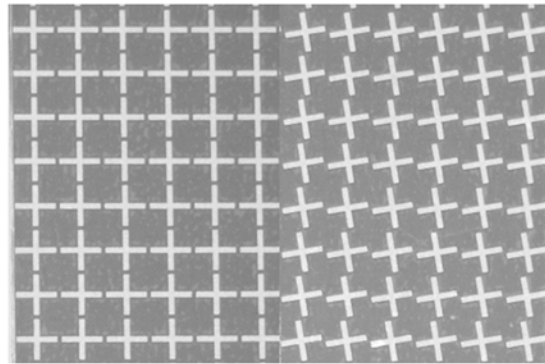
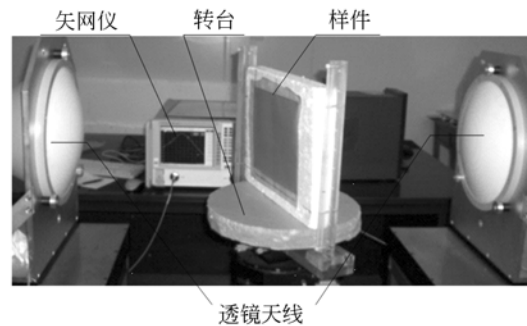


图 8 CFSS 制备工艺流程
 Fig.8 Process flow of CFSS



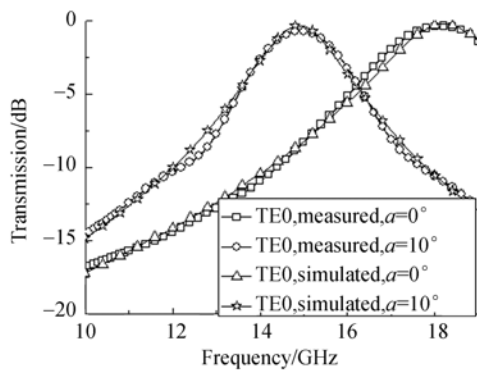
(a) 十字贴片阵列周期单元旋转前后对比
 (a) Comparison of periodic cross patch elements before and after rotations



(b) 自由空间法测试系统
 (b) Testing system of free space method

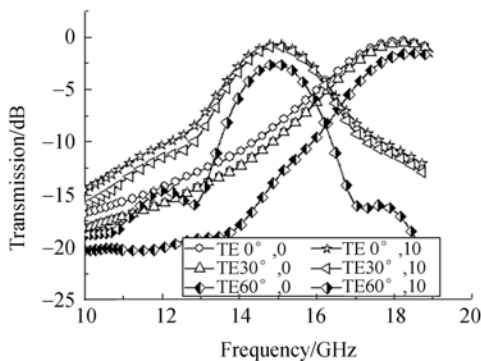
图 9 实验样品和测试系统
 Fig.9 Prototype and testing system

采用自由空间法在微波暗室中对 CFSS 样品进行传输特性测试,测试仪器主要包括矢量网络分析仪、透镜天线与转台等,如图 9(b)所示。CFSS 样品的测试结果如图 10 所示。其中,图 10(a)



(a) TE 极化垂直入射测试结果与仿真结果

(a) Measured and simulated results at TE normal incidence



(b) TE 极化 0, 30, 60 扫描测试结果

(b) Measured results at 0, 30, 60 incident angles of TE wave

图 10 CFSS 样件测试结果

Fig. 10 Measured results of CFSS prototype

为 TE 极化波垂直入射时, 十字贴片旋转 $0, 10^\circ$ 的 CFSS 传输特性测试和仿真结果; 图 10(b) 为 TE 极化波以 $0, 30, 60^\circ$ 入射时, 十字贴片旋转 $0, 10^\circ$ 的 CFSS 传输特性测试结果。在保证制备精度的前提下, 理论计算与实验测试结果基本一致, 十字贴片从 0° 旋转至 10° , CFSS 谐振频点从 18.2 GHz 向低频漂移至 14.8 GHz。这表明旋转十字贴片调节 CFSS 谐振频点的设计方法具有可行性和准确性。

6 结 论

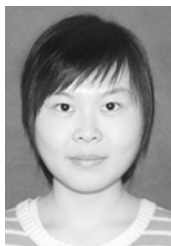
本文从十字环带滤波结构出发, 将十字贴片负载分离所获得的电容性表面和电感性表面分别加载在耦合电介质两层构成互补屏结构。互补屏间强烈的耦合作用使 CFSS 具有良好的角度稳定性和极化稳定性, 并且其主谐振频带远离栅瓣区域。利用耦合积分方程法精确计算了 CFSS 的传输特性。计算结果表明, 当耦合电介质厚度从 0.1 mm 增加到 1 mm 时, CFSS 耦合作用逐渐消失, 耦合电介质相对介电常数增加能增强 CFSS 耦合作用。计算与测试结果均表明, 十字贴片绕其中心旋转 10° 可改变 CFSS 谐振频点 3.4 GHz, 实现了变频功能, 能够为设计和制备 AFSS 提供参考。

参考文献:

- [1] 蒙志君, 黄俊, 武哲, 等. 即贴型单层带通 FSS 的传输特性[J]. 光学精密工程, 2008, 26(7): 1247-1252.
MENG ZH J, HUANG J, WU ZH. Transmission properties of adhesive single-layer bandpass FSS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 26(7): 1247-1252. (in Chinese)
- [2] 贾宏燕, 高劲松, 冯晓国. 新型单元的频率选择表面[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2076-2080.
JIA H Y, GAO J S, FENG X G. Novel element frequency selective surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2076-2080. (in Chinese)
- [3] 贾宏燕, 高劲松, 冯晓国. 改变 Y 孔单元排列方式对 FSS 极化稳定性的影响[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 978-982.
JIA H Y, GAO J S, FENG X G. Influence on polarization independence of frequency selective surface by altering Y slot element arrangement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 978-982. (in Chinese)
- [4] 徐念喜, 高劲松, 梁凤超, 等. 利用电场和磁场耦合制备微型化频率选择表面[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2333-2341.
XU N X, GAO J S, LIANG F CH, et al.. Fabrication miniaturized-element frequency selective surfaces utilizing the coupling between electric and magnetic field [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2333-2341. (in Chinese)
- [5] DICKIE R, CAHILL R, GAMBLE H, et al.. Submillimeter wave frequency selective surface

- with polarization independent spectral responses [J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2009, 57(7):1985-1994.
- [6] PHILIPS B, PARKER E A, LANGLEY R J. Active FSS in an experimental horn antenna switchable between two beam widths[J]. *Electronics Letters*, 1955, 31(1):1-2
- [7] SANZ-LZQUIERDO B, PARKER E A, BATCHELOR J C. Dual-band tunable screen using complementary split ring resonators[J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2010, 58(11):3761-3765.
- [8] GIANVITTORIO J P, ZENDEJAS J, RAHMAT-SAMII Y, *et al.*. Reconfigurable MEMS-enabled frequency selective surfaces [J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(25):1627-1628.
- [9] VARDAXOGLU J C. Optical switching of frequency selective surface bandpass response[J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(25):2345-2346.
- [10] 王操. 单元可旋转的频率选择表面电磁散射特性研究[D]. 上海:上海交通大学, 2007.
WANG C. *Analysis of Electromagnetic Scattering Characteristics of Rotated Frequency Selective Structure*[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)
- [11] LOCKYER D S, VARDAXOGLU J C, SIMPKIN R A. Complementary frequency selective surfaces[J]. *IEE Proc. -Microw. Antennas Propag.*, 2000, 147(6):501-507.
- [12] SHULEY N V. High-order mode interaction in planar periodic structures[J]. *Proc. Inst. Elect. Eng. Microwave Antennas Propag. Ser. H*, 1984, 131:129-132.
- [13] JOHANSSON F S. Analysis and design of double layer frequency selective surfaces[J]. *Proc. Inst. Elect. Eng. Microwave Antennas Propag. Ser. H*, 1985, 132:319-325.
- [14] ORTA R, TASCONE R, ZICH R. Multiple dielectric loaded perforated screens frequency selective surfaces[J]. *Proc. Inst. Elect. Eng. Microwave Antennas Propag. Ser. H*, 1988, 135:75-82.
- [15] FERESIDIS A P, APOSTOLOPOULOS G, SERFAS N, *et al.*. Closely coupled merallodielectric electromagnetic band-gap structures formed by double-layer dipole and tripole arrays[J]. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 2004, 52(5):1154-1155.
- [16] WAKABAYASHI H, KOMINAMI M, KUSAKA H. Numerical simulations for frequency-selective surfaces with complementary elements [J]. *IEE Proc. -Microw. Antenna Propagation*, 1994, 141(6):477-482.
- [17] MUNK B A. *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*[M]. New York: Wiley, 2000

作者简介:



焦健(1987—),女,黑龙江齐齐哈尔人,博士研究生,主要从事频率选择表面及功能性薄膜材料的研究。E-mail: xinhe7hl@126.com

导师简介:



高劲松(1968—),男,吉林白城人,研究员,博士生导师,1989年于浙江大学获得学士学位,2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室主任,主要从事光学薄膜、红外金属网栅、频率选择表面等方面的研究。E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)