

文章编号 1004-924X(2011)05-0959-08

Y孔分形频率选择表面的设计

王珊珊^{1,2}, 高劲松^{1*}, 冯晓国¹, 赵晶丽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 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了将分形理论应用于频率选择表面(FSS)设计,使单屏 FSS 具有多频谐振特性,以进一步满足现代通信设备对多频带及集成化的要求。首先,以结构对称、抗交叉极化特性好的 Y 孔单元为例,经过递归、迭代产生二阶 Y 孔分形单元,给出计算单元几何分布的公式。然后,结合 Floquet 周期条件,应用全波周期矩量法得到描述 FSS 表面电流分布的电场积分方程,定量分析了入射电磁波在不同极化方式下 Y 孔分形 FSS 单元的极子长度、孔径宽度等结构参数及排布方式对其频率响应特性的影响。最后,采用成熟的镀膜、光刻工艺制备 Y 环分形 FSS 样品并在半电波暗室进行 FSS 传输特性测试。结果表明,第一谐振波长的经验估算值约为 $0.79 \times (4 \text{ 倍极子长度})$,孔径宽度 W 由 1 mm 增至 1.5 mm 时,带宽展宽了 650 MHz,角度稳定性对单元排布方式较敏感。得到的测试结果与数值结果一致,表明单屏分形 FSS 具有多频谐振的特性,其透过率及 -3 dB 带宽均可通过参数优化满足工程应用基本要求。

关键词:频率选择表面(FSS);分形单元;周期矩量法;多频带

中图分类号:TN957;TN713 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111905.0959

Design methods of Y aperture fractal FSS

WANG Shan-shan^{1,2}, GAO Jin-song^{1*}, FENG Xiao-guo¹, ZHAO Jing-li¹

(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. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10039, China)

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

Abstract: The fractal elements were exploited to design single layer Frequency Selective Surfaces (FSSs) as multi-band pass filters to meet the multi-band and integration requirements of the communication apparatus. Firstly, the geometry expression of a Y aperture fractal FSS with a symmetry structure and anti-cross polarization was proposed by recursion and iterative operations. Then, combined with Floquet theory and the full-wave periodic moment method, an electric field integral equation to describe the current distribution of the FSS surface was obtained to quantitatively analyze the frequency response of the lattice and the structural parameters of Y aperture fractal FSS, such as pole length, aperture width, and the different polarizations of incident electromagnetic wave. Finally, a FSS sample was achieved by the photolithography and experiments in the anechoic chamber. Experimental results show that the estimation empirical constant κ is 0.79 for designing the resonant frequencies of FSS and

收稿日期:2010-05-31;修订日期:2010-08-13.

基金项目:中国科学院国防创新基金资助项目(No. CXJJ-149);中国科学院优秀博士论文、院长奖获得者科研启动专项基金资助项目(No. 076231J070)

the bandwidth expands to 650 MHz when the width of aperture varies from 1.0 mm to 1.5 mm. Moreover, the effects of incident angle is highly sensitive to the lattice of the periodic unit cell. Obtained results are well coincident with that of theoretical calculation, which means the single-layer fractal FSS with multiband characteristics can satisfy the engineering requirements after parameter optimization.

Key words: Frequency Selective Surface(FSS); fractal element; Periodic Method of Moment(PMoM); multiband

1 引言

频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)是由谐振单元沿一定方向排列形成的周期性阵列平面结构,相当于一个对入射角、极化方式、频率均有选择作用的空间滤波器,在电磁频谱的各个波段都有着广泛应用^[1-3]。近年来,现代通信设备越来越需要集成化、可多频段工作的器件(如红外复合制导共口径天线的二向色镜、红外探测器、多频复用的副反射面天线、滤波器等),因此,结构简单、具有多频谐振特性的 FSS 已成为研究热点。

分形的概念是由美国数学家 B. B. Mandelbort 在 20 世纪 70 年代提出的,适用于描述一些表面看来不规则但总体和局部具有相似性的图案^[4-5]。分形图形在有限空间内通过无限迭代可以容纳无限长曲线的特点可以有效减小图形的尺寸,将分形单元应用于 FSS 领域,不仅能减小起始单元尺寸,使设计小面积 FSS 成为可能,还可以利用分形单元的自相似性及迭代单元间的不同尺寸参数在单屏 FSS 上实现多频带通滤波器的设计。有关 FSS 的研究国内起步较晚,在实际工程中多采用国外研究较成熟的 FSS 单元,对 FSS 前沿关注度较低。国外自 1991 年起对分形单元在 FSS 领域的应用进行了探索,取得了一定的研究成果^[6],E A Parker 等通过折叠方形金属环和四阶 Hilbert 曲线成功实现了尺寸减小的频率选择表面单元;美国学者 B. Puente 等成功将分形 Sierpinski 单元应用于多频谐振的器件中;J. Romeu 和 Y. Rahmat-Samii 等全面分析了分形 FSS 与传统 FSS 相比具有的独特优势,并且于 2006 年将分形 FSS 的应用拓展至 THz 和红外波段,但目前分形 FSS 仍没有准确高效的设计方法。

带通型频率选择表面 Y 单元具有较好的抗

交叉极化特性^[7],对电磁波入射角度变化不敏感,在实际工程应用中易于实现平面设计的曲面转化。本文结合 Floquet 定理即周期边界条件,采用全波周期矩量法从分形 FSS 单元的物理模型入手,分析了 FSS 表面的电场分布,计算出 FSS 的透射系数,定量研究了在电磁波不同入射角度和极化方式下 Y 孔分形单元的尺寸参数及排布方式对其频率响应特性的影响,提供了 Y 孔分形单元的设计依据。最后,采用成熟的光刻工艺制备实验样件,并在微波暗室进行实验验证,为分形 FSS 实现工程应用提供了图形选择依据及设计方法。

2 分形 FSS 模型及理论计算

2.1 分形 FSS 模型

Y 孔分形单元如图 1 所示,由于单屏一阶 Y 孔只有一个谐振点,而三阶 Y 孔结构复杂对制作工艺要求高且第三谐振损耗较大,所以本文主要研究单屏二阶 Y 分形单元的设计方法及传输特性。

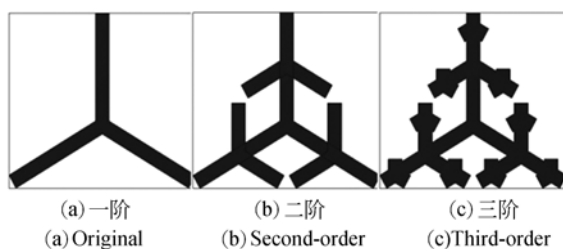


图 1 Y 孔分形单元示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Y aperture fractal FSS

分形单元的迭代次数决定了 FSS 的谐振频率个数,无介质加载时二阶 Y 孔只有两个谐振点,工程中可根据实际需要迭代任意次数,但最终受限于制作工艺。分形单元是由起始单元经过递归、迭代产生的,假设极子长度迭代比例为 F ,迭代单元几何关系可以表述为:

$$y_1 = F(x, y + \frac{F}{1.5 + F}), \quad (1)$$

$$y_{2,3} = F(x \pm \frac{1-F}{2}, y - \frac{1-F}{3+2F}), \quad (2)$$

$$Y_{n+1} = Y_n \cup y_1(Y_n) \cup y_{2,3}(Y_n), \quad (3)$$

式中, Y_{n+1} 为原始单元经过 $y_1 \sim y_3$ 变换并进行 $n+1$ 次迭代后的几何位置, 图 2 为二阶 Y 孔单元结构示意图, 黑色部分为金属铜, 单元尺寸参数为 $D_x=15 \text{ mm}$, $D_y=12.99 \text{ mm}$, $L_1=7.5 \text{ mm}$, $L_2=3.5 \text{ mm}$, $W=1 \text{ mm}$, $F=7/15$, 单元采用三角形栅格排布方式。

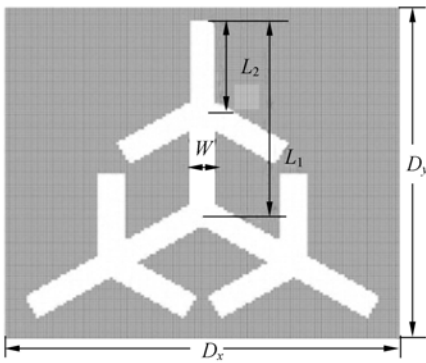


图 2 二阶 Y 孔单元结构尺寸
Fig. 2 Physical dimension of FSS unit cell

2.2 理论计算方法

FSS 作为一种电磁周期结构, 其辐射场可以由 Floquet 模展开^[7-8], 满足 Floquet 波动方程的解为一无穷求和式, 通过满足电磁场连续边界条件可形成 FSS 单元结构的电场积分方程:

$$\sum_{r=1}^2 \sum_{pq} (Y_{pq}^{(D)} + Y_{pq}^{(U)}) \psi_{pq}^r \iint_s \mathbf{E}_t \cdot \psi_{pq}^{r*} ds = 2 \sum_{r=1}^2 (A_{00}^r Y_{00}^r \prod_{k=1}^N U_0^k \phi_{00}^r), \quad (4)$$

定义:

$$U_p = k_0 \sin \theta \cos \varphi + \frac{2\pi p}{dx}, \quad (5)$$

$$V_{pq} = k_0 \sin \theta \sin \varphi - \frac{2\pi p}{dx \tan \alpha} + \frac{2\pi q}{dy}, \quad (6)$$

式中 ψ_{pq}^r 为完整的矢量 Floquet 模函数,

$$\psi_{pq}^r = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{dx dy}} \cdot \frac{V_{pq} \mathbf{x} - U_p \mathbf{y}}{T_{pq}} \psi_{pq}, & \text{TE}(r=1) \\ \frac{1}{\sqrt{dx dy}} \frac{U_p \mathbf{x} + V_{pq} \mathbf{y}}{T_{pq}} \psi_{pq}, & \text{TE}(r=2) \end{cases}, \quad (7)$$

其中, p, q 为 Floquet 模谐因子; k_0 为平面波的传播常数; θ 为 FSS 法向与电磁波入射方向的夹角;

φ 为入射方向在 FSS 平面的投影与 x 轴的夹角; α 为栅格角; dx, dy 为 FSS 平面的周期, U_p, V_{pq} 定义为切向 Floquet 波数; r 对应 TE 或 TM 模的值, 分别为 1 和 2; Y_{00}^r 代表自由空间导纳; A_{00}^r 为已知入射平面波的模系数; \mathbf{E}_t 为孔径内切向电场, S 为孔径面积, $Y_{pq}^{(1)}, Y_{pq}^{(2)}$ 分别表示从 FSS 屏法线两侧看去的等效导纳。结合周期边界条件用全波矩量法求解方程(4), 将切向电场 \mathbf{E}_t 用子域基函数中的 Rooftop 函数展开^[9], 这里的二阶 Y 孔选用对称模函数, 根据所得的基函数系数可以求出 FSS 结构的反射系数和透射系数。这种方法允许先计算一个谐振单元后再将其扩展, 当计算分形单元这种精细复杂单元时, 不仅可以节省时间, 而且在宽频段扫描情况下可有效节省计算机内存。

3 数值结果分析

谐振频率及 -3 dB 带宽是衡量带通型 FSS 频率响应特性的重要指标, 这里主要分析单元的尺寸参数及排布方式对分形 FSS 的谐振频率及带宽的影响, 总结其设计方法。单屏 FSS 基底是介电常数 $\epsilon=3.05$, 厚度 $d=0.02 \text{ mm}$ 的覆铜聚酰亚胺薄膜, 单元参数如上节所述。图 3 为采用上述方法分析二阶 Y 孔传输特性的数值结果, 电磁波正入射时, 二阶 Y 孔第一谐振频率 f_1 为 8 GHz , 第二谐振频率 f_2 为 22 GHz 。

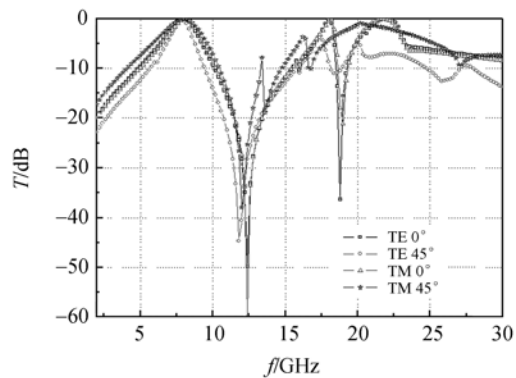
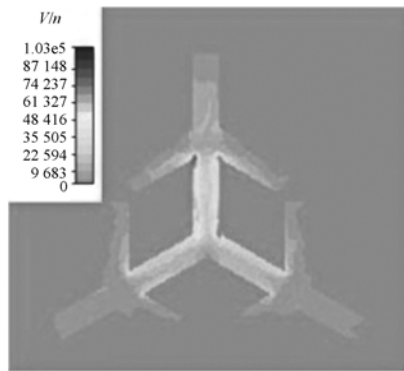


图 3 二阶 Y 孔在不同入射角度下的频率响应特性
Fig. 3 Frequency responses of FSS as different incident angles

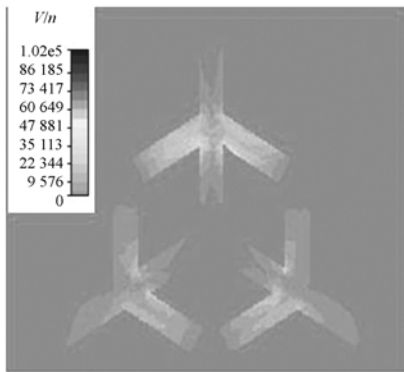
3.1 在不同极化方式下, W 不变, 迭代比例因子 F 改变对传输特性的影响

无论什么类型的单元, 其谐振频率都与其单元尺寸直接相关, L_1 与 L_2 的改变即比例因子 F

的改变会直接影响谐振频率的位置。一阶 Y 孔的谐振波长约等于极子长度 L_1 的 4 倍^[7,10],按上述参数估算,二阶 Y 孔 f_1 约为 10 GHz, f_2 约为 21.43 GHz, f_1 的估算结果与数值结果相差较大。这是因为对于 Y 孔分形 FSS,迭代单元与原始单元的面电流耦合,迭代单元 L_2 延长了 L_1 的有效电长度,如图 4 所示,所以需对二阶 Y 孔第一谐振频率 f_1 的估算公式进行经验修正。假设 $\lambda_1 = \kappa \times 4L_1$, κ 为经验常数,可通过研究极子长度的变化对谐振频率的影响总结出 κ 在该波段的经验取值。



(a) 8 GHz



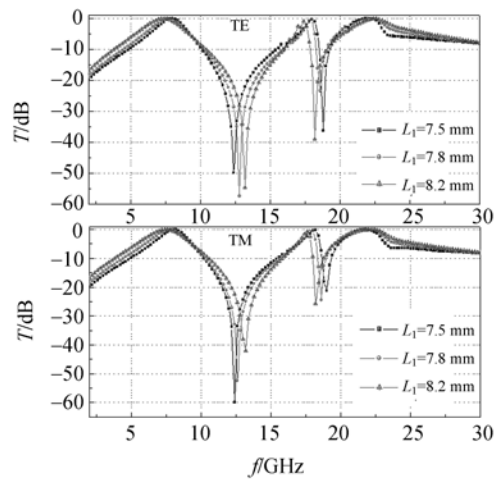
(b) 22 GHz

图 4 FSS 在谐振频率处的电场分布

Fig. 4 E-field distribution at resonant frequency

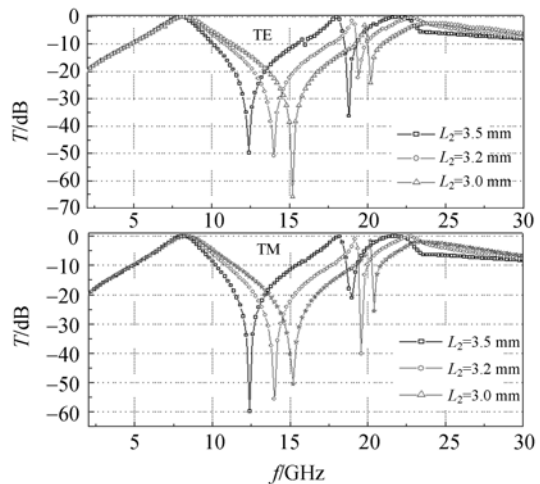
图 5 及表 1 为迭代比例因子 F 改变时分形 FSS 的传输特性,当 L_1 由 7.5 变为 7.8 和 8.2 mm, f_1 分别为 8,7.8,7.4 GHz,随着 L_1 的增大, f_1 共向低频漂移了 600 MHz 且对电磁波的极化方式不敏感; f_2 对应于入射波垂直极化和水平极化分别向高频漂移了 600,400 MHz。另外,谐振频率随着原始单元的增加漂移程度越来越大,透

过率基本不变。与此同时, L_1 的增加缩小了单元间距,带宽平均展宽了 700 MHz,水平极化的带宽变化更明显,寄生谐振的带宽平均减小 300 MHz。当 L_2 由 3.5 变为 3.2 和 3.0 mm, f_1 由 8 GHz 增至 8.2 GHz,共变化了 200 MHz,透过率基本不变,由于迭代单元调制作用的减小,带宽展宽了 300 MHz 左右;而 f_2 及寄生谐振对于迭代单元的改变较为敏感,随着 L_2 的改变, f_2 由 22 GHz 向高漂移到 24.4 GHz,透过率下降明显,平均下降了 2.45 dB。由此可见, f_1 受 L_1 与 L_2 共同影响,而 f_2 的传输特性则对 L_2 的变化非常敏感,在该波段 κ 应取值为 0.79。



(a) L_1 变化时 FSS 的频率响应特性

(a) Frequency responses as L_1 varies



(b) L_2 变化时 FSS 的频率响应特性

(b) Frequency responses as L_2 varies

图 5 迭代比例 F 改变时二阶 Y 孔的频率响应特性

Fig. 5 FSS characteristic responses with iterative factor F

表 1 迭代比例因子 F 对 FSS 传输特性的影响

Tab.1 Transmission characteristic changed with iterative factor F

(a) L_1 对 FSS 传输特性的影响对比

(a)Transmission characteristics with L_1 (GHz)

L_1 /mm	谐振频率				-3 dB 带宽			
	f_1		f_2		f_1		f_2	
	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM
7.5	8	8	22	21.8	2.00	2.64	2.00	2.65
7.8	7.8	7.8	22.2	21.8	2.28	2.74	2.30	3.22
8.2	7.4	7.4	22.6	22.2	2.69	3.30	2.78	3.48

(b) L_2 对 FSS 传输特性的影响对比

(b)Transmission characteristics with L_2 (GHz)

L_2 /mm	谐振频率				-3 dB 带宽			
	f_1		f_2		f_1		f_2	
	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM
3.5	8	8	22	21.8	2.00	2.00	2.67	2.60
3.2	8.2	8.2	22.8	22.8	2.30	2.30	2.55	2.55
3.0	8.2	8.4	24.4	23.4	2.38	2.50	2.46	2.78

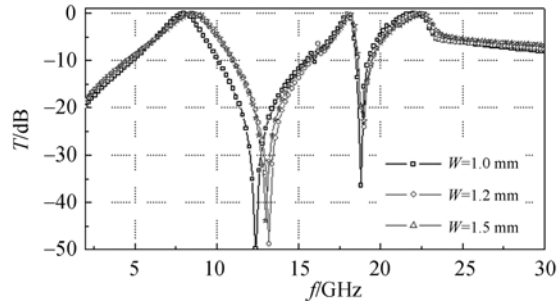
3.2 电磁波垂直入射,在不同入射角度下孔径宽度 W 对 FSS 传输特性的影响

$L_1=7.5$ mm, $L_2=3.5$ mm 不变,图 6(a)为电磁波正入射时 W 由 1.0 mm 增至 1.5 mm 的 FSS 传输特性,由于迭代单元对原始单元有效电长度的影响减弱,谐振频率均向高漂移了 600 MHz, f_1 带宽展宽了 650 MHz, f_2 的带宽基本不变,随着 W 的增加, f_1 与 f_2 的变化速度趋势相反。图 6(b)是在不同入射角度情况下 FSS 的传输特性曲线,分形单元 f_2 对入射角度的变化非常敏感,当入射角为 30°时透过率下降了 4 dB 左右,带宽减小,分形 FSS 的带宽变化本质仍可由等效传输线特性阻抗的变化来说明,入射波为 TE 或 TM 极化时,带宽将以 $\cos \theta$ 或 $1/\cos \theta$ 的比例减小或增大(θ 为入射波与 FSS 法向的夹角)。

表 2 正入射时 W 对 FSS 传输特性的影响

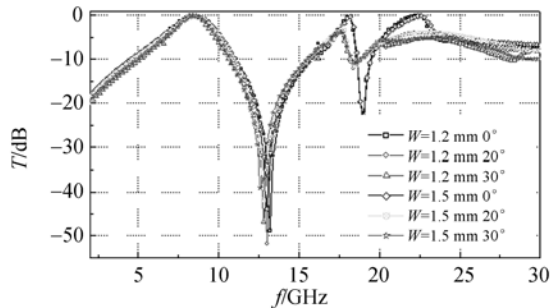
Tab.2 Effect of W varies on transmission characteristics in normal incidence (GHz)

W /mm	谐振频率		-3 dB 带宽	
	f_1	f_2	f_1	f_2
1.0	8	22	2	2.38
1.2	8.4	22.2	2.55	2.29
1.5	8.6	22.6	2.65	2.44



(a)正入射时 W 对 FSS 传输特性的影响

(a) Influence of W on transmission characteristics in normal incidence



(b)入射角度不同时 W 对传输特性的影响

(b) Influence of W on transmission characteristics in different incident angles

图 6 孔径宽度 W 对 FSS 传输特性的影响

Fig.6 FSS characteristic responses with widths of aperture

3.3 排布方式对传输特性的影响

单元排布方式的改变会导致单元间距的改变而影响单元间电流的耦合,从而影响 FSS 的传输特性,在大入射角范围时单元间距较大,会使传输特性恶化更为明显。

由图 7 可知,当入射波分别为垂直极化和水平极化、入射角由 0°变为 45°时,60°栅格排布的 f_1 始终不变,为 8 GHz,90°排布的 f_1 在 TE 极化时为 8 GHz, TM 极化时由 8.2 GHz 变为 8 GHz,降低了 200 MHz,透过率及 -3 dB 带宽基本没变;对于 f_2 ,无论入射波为何种极化方式,90°排布的寄生谐振均提前出现 400 MHz,由于寄生谐振的影响,电磁波 45°入射时 f_2 的传输特性急剧恶化,当正入射时,对应 TE、TM 极化,90°排布的透过率分别较 60°排布的小 0.042 dB 和 1.13 dB。可见,排布方式的不同对 FSS 的角度稳定性及透过率有很大的影响,所以对于二阶 Y 孔这种三极子单元应该排列成三角形栅格。

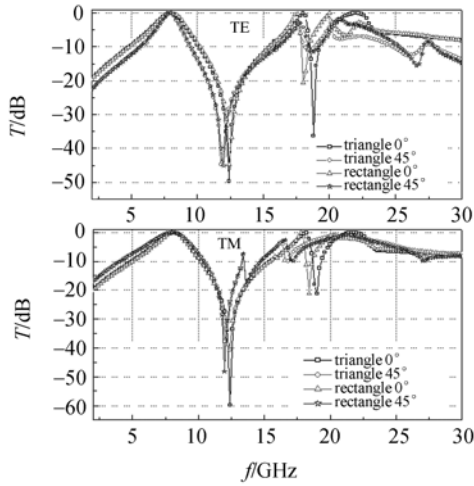


图 7 60°栅格与 90°栅格单元排布的传输特性对比
 Fig. 7 Comparison of transmission characteristics with different lattices

4 实验验证

采用成熟的光刻复制工艺,在 500 mm×500 mm 的覆铜聚酰亚胺薄膜上制作分形 FSS 并在微波暗室中对其传输特性进行测试验证。将 FSS 置于发射、接收天线中心(约为天线的焦平面)的转台上,发射、接收天线间距离为 1.8 m。图 8 为测试系统示意图,图 9 为测试样件,图 10 为 $L_1 = 7.5$ mm, $L_2 = 3.5$ mm, $W = 1$ mm,采用三角形栅格排布的 FSS 设计的测试曲线。因为测试是由两段天线(6~8 GHz, 8~12 GHz)共同完成,所以造成数据连接处的不平滑,在 7 GHz 附近有明显的抖动。电磁波正入射时,对应于 TE, TM 极化 f_1 为 8.18 GHz 和 8.11 GHz,与数值结果相

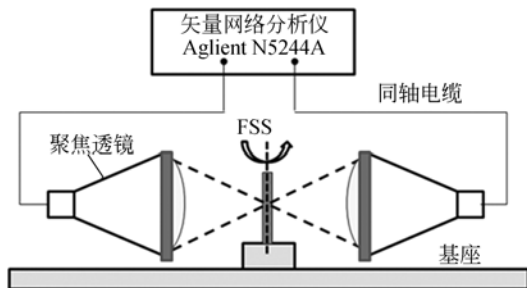


图 8 分形 FSS 传输特性测试系统
 Fig. 8 Test system of transmission characteristics

比,分别高漂了 180 MHz 和 110 MHz,透过率一致;30°入射时,谐振频率均向低漂移了 180 MHz 左右,透过率下降 0.4 dB,这是由于样件处于偏置状态,样件的大小对 FSS 边缘的散射场分布有一定的影响,测试结果与数值结果基本吻合。



图 9 二阶 Y 孔测试样件
 Fig. 9 Sample of FSS screen

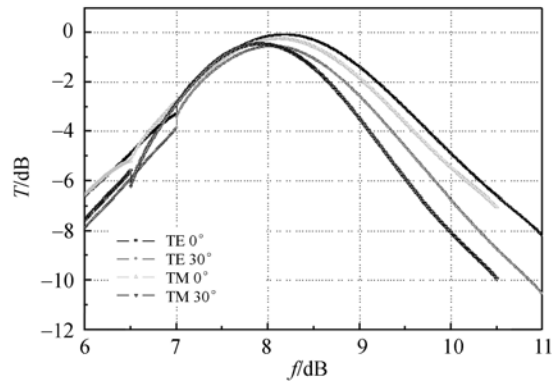


图 10 二阶 Y 孔的频率响应特性测试曲线
 Fig. 10 Measurements of FSS response

5 结 论

本文设计了一种 Y 孔分形单元及结构,采用全波周期矩量法对该结构进行了数值分析,研究了极子长度、孔径宽度、排布方式等参数对 FSS 传输特性的影响,并进行了实验验证。Y 孔分形 FSS 的第一谐振频率 f_1 主要由原始单元极子长度 L_1 决定, λ_1 约等于 $0.79 \times (4L_1)$ 。第二谐振波长 λ_2 约等于 $4L_2$, f_2 与寄生谐振的传输特性对

L_2 的变化较敏感;孔径宽度 W 的增加会明显减弱迭代单元与原始单元的耦合程度,谐振频率均向高频漂移 600 MHz 的同时 f 带宽被展宽 650 MHz;单元栅格排布方式的不同对 FSS 的透过率及角度稳定性有很大的影响,对于二阶 Y 孔这类三极子单元应该采用三角形排布方式。这里需要注意的是,分形 FSS 对入射角度的变化较为敏感,大入射角情况下 f_2 的传输特性在寄生谐振的

影响下恶化明显,但可以通过改变迭代比例因子和减小单元的周期间距的方法改善。分形单元涉及的结构参数及传输特性指标较普通 FSS 单元的多,这是一个多参数优化的问题。本文定量地将单元结构参数对其频率响应特性的影响进行了详细的数值分析和实验验证,为 Y 孔分形 FSS 的设计提供了经验及参数选择依据,以期早日实现分形单元的工程应用。

参考文献:

- [1] 李小秋,高劲松. Y 环单元 FSS 结构参数对频率特性的影响[J]. 光学精密工程,2006,14(6):1070-1075.
LI X Q, GAO J S. Effects of Y loop element FSS structure parameter on frequency response [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1070-1075. (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] 梅东牧,吕明云,蒙志君,等. 单层带通 FSS 的带内传输损耗机理[J]. 光学精密工程,2009,17(8):1958-1963.
MEI D M, LV M Y, MENG Z J, *et al.*. Mechanism of in-band transmission loss in single-layer bandpass FSS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1958-1963. (in Chinese)
- [4] 许戎戎. 基于集总元件加载和分形结构的多频频率选择表面研究[D]. 南京:南京理工大学,2009.
XU R R. *Study on Multi-band Frequency Selective Surfaces based on Lumped Element loadings and Fractal Structure*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [5] 帅昌浩. 基于分形理论的图形设计研究与应用[D]. 西安:西安科技大学,2008.
SHUAI CH H. *Research and Applications of Graphics Design Based on Fractal Theory*[D]. Xi'an: Xian University of Science and Technology, 2008.
- [6] ROMEU J, RAHMAT-SAMII Y. A fractal based FSS with dual band characteristics[J]. *Proc. IEEE Antennas and Propagation Soc. Int. Symp.*, 1999, 3:1734-1737.
- [7] MUNK B A. *Frequency Selective Surface: Theory and Design* [M]. New York: Wiley, 2000.
- [8] 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 Z J, HUANG J, WU ZH. Transmission properties of adhesive single-layer bandpass FSS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 26(7): 1247-1252. (in Chinese)
- [9] CHI H C, RAJ MITTRA. On the analysis of frequency selective surfaces using subdomain basis functions[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 1990, 38(1): 40-50.
- [10] 贾宏燕,冯晓国,高劲松. 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, FENG X G, GAO J S. Influence on polarization dependence of frequency selective surface by altering Y slot element arrangement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 978-982. (in Chinese)

作者简介:



王珊珊(1983—),女,山东烟台人,博士研究生,主要从事频率选择表面及功能性薄膜材料方面的研究。E-mail: michaela.1031@hotmail.com



冯晓国(1974—),男,吉林长春人,博士,副研究员,硕士生导师,1988年于吉林工业大学获得工学学士学位,2006年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得理学博士学位,主要从事光学精密仪器设计和雷达隐身薄膜材料等方面的研究。E-mail: fxxg@163.com

通讯作者:



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,主要从事光学薄膜、红外金属网栅、频率选择表面等功能材料方面的研究。E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn



赵晶丽(1962—),女,吉林长春人,高级实验师,主要从事光刻复制工艺的研究。E-mail: fxxg@163.com

●下期预告

14 nm 低原子序数材料多层膜的设计和制备

吴文娟¹,张 众²,朱京涛²,王凤丽²,陈玲燕²,周洪军³,霍同林³

(1. 上海应用技术学院 理学院,上海 201418; 2. 同济大学物理系 精密光学工程技术研究所,上海 200092; 3. 中国科技大学 国家同步辐射实验室,安徽 合肥 230029)

为了减小常规多层膜的带宽,提高多层膜的光谱分辨率,在极紫外和软 X 射线波段对采用低原子序数材料组成的多层膜进行了研究。首先,在 14 nm 波长处选取 3 种低原子序数材料对 Si/B₄C, Si/C 和 Si/SiC 组成多层膜。其次,用随机搜索的方法优化设计了这 3 种多层膜以及在此波段常用的 Mo/Si 多层膜。然后,用直流磁控溅射的方法制备 Si/B₄C, Si/C, Si/SiC 和 Mo/Si 多层膜。接着,用 X 射线衍射仪测量拟合多层膜的周期厚度。最后,用同步辐射测试多层膜的反射率。同步辐射测试结果显示, Mo/Si 多层膜的带宽最大为 0.57 nm, Si/SiC 多层膜的带宽最小为 0.18 nm, 结果与理论基本一致。实验结果表明,低原子序数材料多层膜的带宽要比常规 Mo/Si 多层膜窄,使用低原子序数材料组成多层膜可以提高多层膜的光谱分辨率。