

文章编号 1004-924X(2005)02-0219-06

Y形和Y环形单元特性的实验对比研究

卢俊^{1,2,3}, 张靓³, 孙连春¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

摘要:采用镀膜和光刻技术设计并制备出了2种衬底厚度不同的Y孔单元和Y环孔单元的FSS,在 0° 和 45° 入射角下分不同的极化波进行了测试,经对比研究发现,在大角度入射下Y环单元FSS比Y孔单元FSS有更为稳定的中心频率,更窄的带宽;Y环单元FSS对垂直和水平极化波的适应性更强,滤波特性较Y孔单元FSS更明显;介质厚度的变化对Y孔中心频率、带宽的影响要比Y环单元FSS的大得多。所以,从中心频率、带宽随介质衬底厚度、入射角度、不同极化方式的变化情况看,Y环单元比Y孔有更稳定的性能。

关键词:频率选择表面;垂直极化;水平极化

中图分类号:O484.4⁺1 **文献标识码:**A

Experimental comparison of the characteristics of Y element and Y loop element

LU Jun^{1,2,3}, ZHANG Jing³, SUN Lian-chun¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences Changchun 130033, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*; 3. *College of Applied Sciences, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

Abstract: With filming technology and lithography, two sorts of FSS i. e. Y-aperture element FSS and Y-loop element FSS on different thickness substrates are presented. And the tests under two different polarized waves at 0° and 45° incidence angle are given. The results show that at wide angle, Y-loop element FSS has more stable center frequency and narrower bandwidth than Y-aperture element FSS; Y-loop element FSS is more adaptive to vertically and horizontally polarized wave than Y-aperture element FSS, and its filtering characteristic is more obvious as well; The center frequency and bandwidth of Y-aperture are much more influenced by the substrate thickness change than those of Y-loop element FSS. So from the changes in center frequency and bandwidth versus dielectric substrate thick-

ness, incident angle, direction of polarization, it can be seen that Y-loop element has more stable characteristics than Y-aperture.

Key words: frequency selective surface; vertical polarization; horizontal polarization

1 引言

频率选择表面(FSS)是由大量的导体贴片或金属屏开孔而形成的二维周期阵列结构^[1]。与电磁波相互作用产生明显的带阻(贴片型单元)或带通(孔径型单元)滤波特性。FSS已广泛地用于微波、红外直至可见光波段^[2-3]。特别是在实现飞机雷达舱隐身方面,目前是最佳选择^[4]。

在对FSS的长期研究中,人们发展了不同的基本单元图形,如Y形单元^[5]、Y环形单元、十字形单元、圆环单元^[6-7]等。影响FSS特性的参数是单元图形的尺寸、排列方式、介质衬底的性质、入射电磁波的极化方式及入射角度等。因此对FSS的分析设计是多参数的优选问题,也是计算电磁学的一个重要研究方向。国内开展这方面的研究较晚,且多限于理论分析。

本文应用MUNK^[8-9]提出的基本理论思想设计了Y形单元和Y环形单元的2种带通型FSS,并采用镀膜和光刻技术^[10]制备了相应的试验件进行测试,从实验出发对这两种基本单元的滤波特性进行对比研究,从而为工程应用,特别是在曲面上的应用提供可靠的实验依据。

2 设计模型

FSS最重要的指标之一是中心频率,影响中心频率的参数主要是单元的形状、尺寸、介质衬底的特性。进行具体的设计前要根据实际应用及衬底情况对中心频率进行估算,本文设计的2种FSS中心频率的估算依据是MUNK著作中提出的基础模型。

按照MUNK的基础模型,Y孔单元的

2个臂的长度之和接近半波长时将产生共振;Y环孔单元的周长接近一个波长时将产生共振。若设中心频率为 f_0 ,当加载介质时FSS中心频率将向低频漂移,如果在FSS单侧加载介电常数为 ϵ_r 的介质,则中心频率大致漂移到 $f_0/\sqrt{(\epsilon_r+1)/2}$ 处。根据这个模型设计了Y形和Y环形2种单元阵列的FSS,各参数标注如图1和图2。其中Y形单元阵列的各参数是 $L_1=5.5\text{ mm}$, $W=0.5\text{ mm}$, $D_1=D_2=10.5\text{ mm}$ 。Y环形单元阵列的各参数是 $L_1=7.5\text{ mm}$, $L_2=1.6\text{ mm}$, $W=0.45\text{ mm}$, $D_1=D_2=15.5\text{ mm}$ 。介质衬底厚度分为二种,一种是 $d=40\text{ }\mu\text{m}$,用于制备独立屏FSS,另一种是 $d=1.5\text{ mm}$ 。虽然衬底厚度不同,但是同一种介质,具有相同的介电常数和损耗。

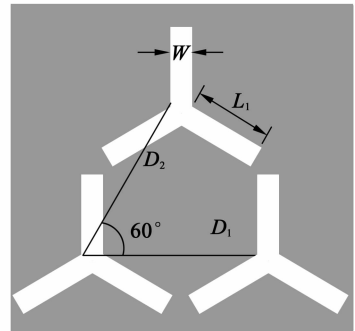


图 1 Y 单元阵列参数

Fig. 1 Parameters of Y element array

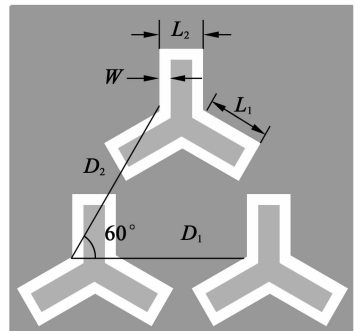


图 2 Y 环单元阵列参数

Fig. 2 Parameters of Y-loop element array

3 实验件的制备

FSS 的制备大多采用印刷电路板技术,在成品附铜板上刻蚀出 FSS 图形,其优势是工艺成熟、简洁,容易制备。但因衬底并非单一介质,介电常数不好估算,不容易分析问题。我们的方法是在衬底上直接镀加厚铜膜,采用光刻技术刻蚀出 FSS 图形,这样金属屏直接与衬底介质结合在一起,与理论模型完全吻合,有利于问题的分析。所制备的实验件阵列大小是 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 。图 3 和图 4 分别是 Y 环单元独立屏和 Y 环单元阵列照片的一部分。

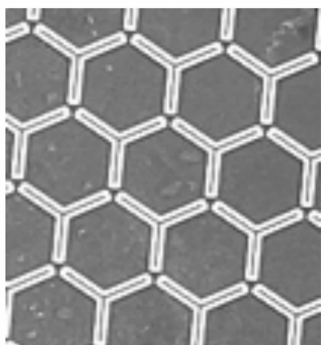


图 3 Y 环独立屏阵列照片

Fig. 3 Y-loop stand-screen array picture

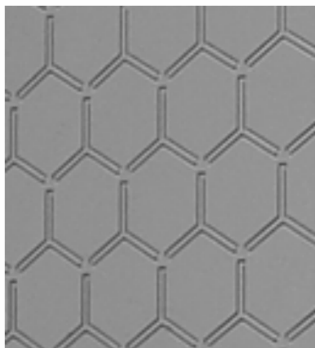


图 4 Y 环阵列照片

Fig. 4 Y-loop array picture

4 测试结果及分析

描述带通型 FSS 性能的 2 个最重要的指标是中心频率和带宽,因此主要就这两点进行对比研究。

4.1 Y 孔和 Y 环独立屏特性的对比

对 Y 孔和 Y 环独立屏在 $9 \sim 18\text{ GHz}$ 范围内,在电磁波正入射下分垂直(TE)和水平极化(TM)2 种情形进行了测试,测试结果如图 5 和图 6 所示,2 种独立屏的特性对比如表 1。

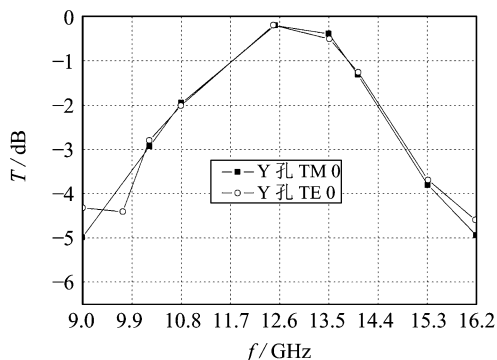


图 5 Y 孔独立屏 FSS 测试结果

Fig. 5 Measurement results of Y aperture stand-screen FSS

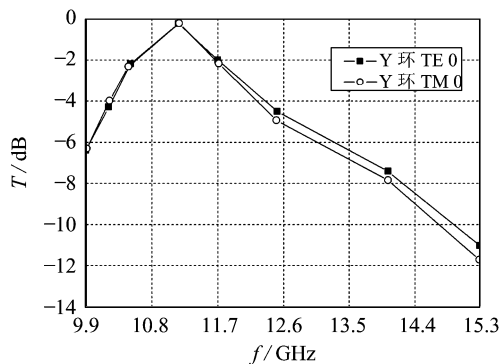


图 6 Y 环独立屏 FSS 测试结果

Fig. 6 Measurement results of Y-loop stand-screen FSS

电磁波垂直入射的情况下,Y 孔阵列的中心频率在两种极化方式下都是

表 1 $d=40\ \mu\text{m}$ 的独立屏对比Tab. 1 Comparison of the stand-screens with diameter of $40\ \mu\text{m}$

	Y 孔独立屏	Y 环独立屏
入射角	0°	0°
TE 波中心频率(GHz)	12.5	11.2
TM 波中心频率(GHz)	12.5	11.2
TE 和 TM 波 $-1\ \text{dB}$ 带宽(GHz)	2.1	0.5

12.5 GHz。Y 环阵列的中心频率是 11.2 GHz,可见,无论是 Y 孔独立屏还是 Y 环独立屏,中心频率都对极化方式均不敏感,各自的中心频率在不同的极化方式下都保持了一致性。并且 Y 孔和 Y 环有相近的透过率。但在 $-1\ \text{dB}$ 的带宽上有较大的区别,显然 Y 环较 Y 孔有更窄的带宽,Y 环较 Y 孔阵列有更好的滤波特性。

4.2 Y 孔和 Y 环阵列的对比

对 Y 孔和 Y 环阵列在 $6\sim 10\ \text{GHz}$ 频段进行了测试。并且对垂直和水平极化分别在 0° 、 45° 入射角下进行了测试,结果如图 7 和图 8。为了便于对比研究,将不同的极化和不同的入射角分开讨论。

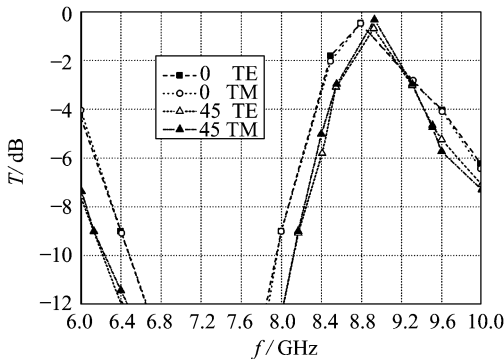


图 7 Y 环阵列的测试结果

Fig. 7 Measurement results of Y-loop array

4.2.1 不同极化波入射下的特性对比

首先,分别讨论不同极化波在不同角度下的特性。入射波为 TE 波时的特性对比如表 2。

可见,在 TE 波入射下,不同角度的中心频率不同,当角度增大时 2 种阵列的中

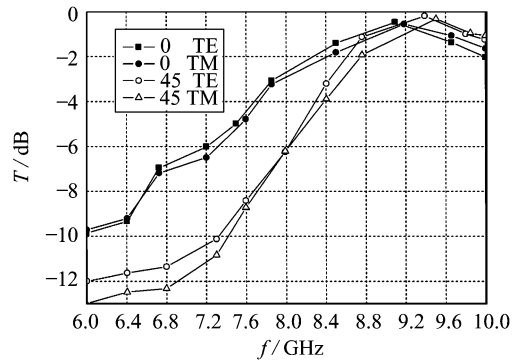


图 8 Y 孔阵列的测试结果

Fig. 8 Measurement results of Y aperture array

表 2 垂直极化波(TE)入射

Tab. 2 Incidence of vertical polarization wave (TE)

	Y 孔		Y 环	
入射角度	0°	45°	0°	45°
中心频率(GHz)	9.1	9.4	8.8	8.9
频率漂移(GHz)	0.3		0.1	
$-1\ \text{dB}$ 带宽(GHz)	1.26	1.02	0.24	0.17

心频率都向高频漂移,Y 孔阵列漂移了 0.3 GHz,Y 环阵列漂移了 0.1 GHz,显然 Y 环阵列中心频率的漂移要比 Y 孔的小,Y 环阵列的中心频率对角度变化的适应性比 Y 孔阵列好得多。无论是 0° 还是 45° 的 $-1\ \text{dB}$ 带宽,Y 环阵列的值都比 Y 孔的小得多,Y 环阵列具有更窄的带宽。当角度增加时,2 种阵列的带宽都相应的下降。

其次,TM 入射时的特性对比如表 3。

表 3 水平极化波(TM)入射

Tab. 3 Incidence of horizontal polarization wave (TM)

	Y 孔		Y 环	
入射角度	0°	45°	0°	45°
中心频率(GHz)	9.18	9.49	8.8	8.9
频率漂移(GHz)	0.31		0.1	
$-1\ \text{dB}$ 带宽(GHz)	1.33	0.86	0.24	0.1

入射波为 TM 波的情形与 TE 波入射时类似,角度由 0° 增加到 45° 时,中心频率都产生了漂移,Y 孔阵列漂移了 0.31 GHz,

Y环阵列漂移了 0.1 GHz。显然在这种极化方式下,当角度增大时 Y 环阵列中心频率仍然比 Y 孔阵列具有更好的稳定性。Y 环阵列的 -1 dB 带宽仍比 Y 孔阵列的小得多,当角度增加时,2 种阵列的带宽也都相应的下降了。

因此,从不同极化波下的中心频率特性及带宽特性随入射角的变化情况来看,Y 环阵列有着更稳定的中心频率和更窄的带宽。

4.2.2 不同入射角下的特性对比

下面将同一角度下 2 种阵列的特性做比较,考察 2 种阵列在相同入射角下对不同极化波的适应性。

电磁波 0° 入射时的特性对比如表 4。

表 4 电磁波 0° 角入射

Tab. 4 Electromagnetic wave with 0° angle incidence

极化方式	Y 孔		Y 环	
	TE 波	TM 波	TE 波	TM 波
中心频率(GHz)	9.1	9.18	8.8	8.8
频率漂移(GHz)	0.08		0	
-1 dB 带宽(GHz)	1.26	1.33	0.24	0.24

可见,在 0° 入射下,2 种阵列表现行为不同。Y 孔阵列在 2 种极化方式下的中心频率不同,TM 波中心频率较 TE 波向高频漂移了 0.08 GHz。而 Y 环阵列的 2 种极化波中心频率相一致,表现出很好的稳定性。Y 环的 -1 dB 带宽仍然比 Y 孔阵列窄得多,而且 2 种极化方式的带宽也保持了相对的稳定性。Y 孔阵列的带宽在 2 种极化方式下不同,TM 波的带宽变宽了。Y 环阵列对 2 种极化的 -1 dB 带宽相一致。

电磁波 45° 入射时的特性对比如表 5。

表 5 电磁波 45° 角入射

Tab. 5 Electromagnetic wave with 45° angle incidence

极化方式	Y 孔		Y 环	
	TE 波	TM 波	TE 波	TM 波
中心频率(GHz)	9.4	9.49	8.9	8.9
频率漂移(GHz)	0.09		0	
-1 dB 带宽(GHz)	1.02	0.86	0.17	0.1

当电磁波以 45° 角入射时,Y 孔阵列对 2 种极化波的中心频率仍然产生了 0.09 GHz 的漂移。而 Y 环阵列对 2 种极化波的中心频率相一致,有很好的稳定性。与 Y 孔阵列相比,Y 环阵列仍然有很窄的带宽。

从这 2 种角度的对比结果可以看出,无论是在 0° 还是 45° 角入射,Y 环阵列在 2 种极化下的中心频率都相一致,较 Y 孔阵列有稳定的中心频率和更窄的带宽。

4.3 不同衬底阵列的特性对比

将 Y 孔和 Y 环阵列的衬底及测试参数列于表 6 中。可见,在衬底厚度增加时,Y 孔阵列和 Y 环阵列的中心频率都向低频产生了漂移,这与理论一致。但显然在增加相同厚度的情况下 Y 孔阵列中心频率的变化比 Y 环阵列要大得多,Y 环阵列的 2 种极化波中心频率漂移了 2.4 GHz,而 Y 孔阵列的 2 种极化波中心频率分别漂移了 3.4 GHz 和 3.32 GHz,比 Y 环多漂移了近 1 GHz。当厚度增加时,2 种阵列的带宽均下降,这也与理论结论一致。

显然在衬底增加相同厚度的情况下,Y 孔阵列特性的变化比 Y 环阵列激烈。特别是中心频率的漂移,Y 孔阵列中心频率对衬底厚度的变化要比 Y 环阵列敏感得多。因此,在同等情况下的 Y 环阵列要比 Y 孔阵列的中心频率稳定,带宽更窄。

表 6 不同衬底厚度的阵列在 0° 入射时的特性对比Tab. 6 Comparison of the characteristics of arrays on different-thickness substrates with same incidence of 0° angle

衬底厚度 极化方式 中心频率(GHz)	Y 孔				Y 环			
	$d=40 \mu\text{m}$		$d=1.5 \text{ mm}$		$d=40 \mu\text{m}$		$d=1.5 \text{ mm}$	
TE 波	TM 波	TE 波	TM 波	TE 波	TM 波	TE 波	TM 波	
12.5	12.5	9.1	9.18	11.2	11.2	8.8	8.8	
TE 波中心频率漂移(GHz)	3.4			2.4				
TM 波中心频率漂移(GHz)	3.32			2.4				
-1dB 带宽(GHz)	2.1	2.1	1.26	1.33	0.5	0.5	0.24	0.24

5 结 论

本文根据设计结果,采用镀膜和光刻技术制备出了 2 种衬底厚度不同的 Y 孔单元和 Y 环单元的 FSS,在 0° 和 45° 入射角下分不同的极化波进行了测试,经对比研究发现,在大角度入射下 Y 环单元 FSS 比 Y 孔单元 FSS 有更为稳定的中心频率,更窄

的带宽;Y 环单元 FSS 对垂直和水平极化波的适应性更强,滤波特性较 Y 孔单元 FSS 更明显;介质衬底厚度的变化对 Y 孔中心频率、带宽的影响要比 Y 环单元 FSS 的大得多。所以,从中心频率、带宽随介质衬底厚度、电磁波入射角度、不同极化方式的变化情况看,Y 环单元比 Y 孔单元有更稳定的性能。

参考文献:

- [1] WU T K. *Frequency selective surface and grid array*[M]. New York:Wiley, 1995.
- [2] MITTRA R, CHAN C H, CWIK T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces-A review[J]. *IEEE Proceedings*, 1988, 76(12): 1593-1615.
- [3] MACDONALD R, BOHRINGER K. Electrostatical deformable micro-frequency selective surface[J]. *SPIE*, 2002, 4809: 136-148.
- [4] 孙连春. 频率选择表面技术在导弹电子战中的应用[J]. *电子对抗*, 2002, 2(46): 1-3.
SUN L CH. Application of frequency selective surface technology in missile electronic warfare [J]. *Electromagnetic Countermeasure*, 2002, 2(46): 1-3.
- [5] AU P W B, MUSA L S. Parametric study of tripole and tripole loop arrays as frequency selective surfaces[J]. *IEEE Proceedings*, 1990, 137(5): 263-268.
- [6] PAUI K E, CHENG ZH. Fabrication of mid-infrared frequency-selective surfaces by soft lithography[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(25): 4557-4561.
- [7] PARKER E A, SIMPSON N E. Microwave and FSS in optically transparent conducting layers: performance of ring element arrays[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1997, 16(2): 61-63.
- [8] MUNK B A. *Frequency selective surface: theory and design*[M]. New York:Wiley, 2000.
- [9] 樊叔维. 任意槽形光栅衍射特性的矢量理论分析与计算[J]. *光学 精密工程*, 2000, 8(1): 5-10.
FAN SH W. Vector theory analysis and numerical calculation for any shape profile dielectric gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(1): 5-10.
- [10] 张立国, 陈迪. SU-8 胶光刻工艺研究[J]. *光学 精密工程*, 2002, 10(3): 266-269.
ZHANG L G, CHEN D. Research on SU-8 resist photolithography process[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 2002, 10(3): 266-269.

作者简介: 卢俊(1968—), 男, 吉林永吉人, 在读博士研究生, 主要从事薄膜光学及曲面 FSS 制备工艺的研究。E-mail: junlucc@126.com