

文章编号 1004-924X(2010)06-1278-08

填充介质的厚屏频率选择表面传输特性

方春易^{1,2}, 张树仁¹, 卢俊¹, 汪剑波¹, 孙连春²

(1. 长春理工大学, 吉林 长春 130022;

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

摘要:为了改善厚屏频率选择表面(FSS)的滤波特性,实现 FSS 在雷达天线罩上的应用,设计了具有圆孔单元的厚屏 FSS 结构,并将其单元内填充介质,制备出了相应的实验件。理论分析时,首先建立等效问题;接着用 Floquet 定理将无限大厚屏 FSS 上所有阵列单元的场展开为无穷多个平面电磁波;然后在单元边界处强加边界条件;最后用矩量法求解等效的磁场积分方程。在微波暗室测试后,发现测试值与计算值基本一致。结果表明:中心频率的变化主要取决于单元间距、入射角和介电常数等 3 个参数;其中,当单元间距由 30 mm 增加到 36 mm,电磁波的入射角由 10°增加到 30°,填充介质的介电常数由 2.5 增加到 7.0 时,中心频率分别减小了 2.1,1.5,1.9 GHz;另外,单元直径增大使得带宽增加,当单元直径由 14 mm 增加到 17 mm,带宽增加了 1.2 GHz。可以看出,改善厚屏 FSS 的传输特性是多参数优化的问题,如果合理选择填充介质并适当选取其他参数,能够获得理想的传输特性。

关键词:厚屏频率选择表面;矩量法;传输特性;等效问题;边界条件

中图分类号:TN015;TN957 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101806.1278

Transmission properties of thick-screen frequency selective surface with filling dielectrics

FANG Chun-yi^{1,2}, ZHANG Shu-ren¹, LU Jun¹, WANG Jian-bo¹, SUN Lian-chun²

(1. *Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*

2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

Abstract: In order to improve the filtering characteristics of Frequency Selective Surfaces(FSSs) and to realize their applications to bandpass radomes, a thick-screen FSS with circle slot elements filled with dielectric materials was designed and a corresponding experimental FSS sample was produced. In theoretical analysis for the thick-screen FSS, an equivalent problem was established, then the Floquet's theorem was employed to expand the field from the infinite array elements into an infinite number of plane wave. Furthermore, the boundary condition was enforced at aperture boundaries, and the method of moments was used to solve the equivalent magnetic-field integral equation. A test was carried out in a microwave darkroom, and measured results show that it is in good agreement with calculated ones. The results show that the center frequency mainly depends on interelement spacings, incidence angles

收稿日期:2009-09-24;修订日期:2009-12-13.

基金项目:国家自然科学基金项目资助(No. 60478035)

and dielectric permittivities. When three parameters increase from 30 mm to 36 mm, 10° mm to 30° mm, 2.5 mm to 7.0 mm respectively, the center frequency can be reduced by 2.1, 1.5 and 1.9 GHz correspondingly. Moreover, the bandwidth is related to the shape of the element. When the diameter of element changes from 14 mm to 17 mm, it increases 1.2 GHz. It is concluded that improving transmission characteristics of thick-screen FSS is a task on optimizing various parameters. It can obtain optimal transmission properties by choosing filling dielectrics and other parameters appropriately.

Key words: thick-screen frequency selective surface; moment method; transmission property; equivalent problem; boundary condition

1 引言

频率选择表面(FSS)是由周期性排列的金属贴片单元,或金属屏上相同的缝隙单元所构成的一种二维周期阵列结构^[1]。FSS在微波、红外乃至可见光波段都有广泛的应用,其中采用FSS技术制作的带通雷达罩能够有效地降低飞机鼻锥方向的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS),从而实现探测雷达波的隐身^[2]。国外19世纪60年代开始了FSS的研究,很多学者提出了理论分析方法,其中包括变分法、互阻抗法、模匹配法、谱域法等^[3-7],现在相关的理论分析已很成熟,FSS的应用也发展到相当高的水平。据《AVI-ONIC MAGAZINE》报道,美国新一代隐身飞机F-22上已经采用了带通FSS技术制作的隐身雷达罩。由于FSS的用途涉及到军事技术,故近年国外有价值的科学实验与研究很少公开报道。国内开展FSS的研究较晚,多是参照国外的理论与分析方法,但对FSS的实际应用进行了一些研究,并取得了一定的成果^[8-11]。如,侯新宇^[12]等采用模匹配法分析了带有多层介质衬底的FSS频率响应技术,并且讨论了介质厚度变化对FSS传输特性的影响;冯林^[13]等利用等效电路法分析了夹在介质层中的FSS散射特性;武哲^[14]等利用广义散射矩阵级联方法进行了双层FSS电磁特性数值模拟研究;卢俊^[15]等应用Munk的思想理论设计了Y形单元和Y环形单元两种带通型FSS,并用镀膜和光刻技术制备了相应的试验件进行测试,对这两种基本单元的滤波特性进行了对比研究。从目前所掌握的国外资料和近几年国内研究的情况看,单屏FSS难以达到实际需要的指标,

FSS正由单屏向多屏级联发展,且由平面向曲面发展。但是当前的研究发现,多屏级联时单元的对准问题在工艺上极难解决,而且多屏在介质匹配后存在总厚度无形增大等弊病。针对上述问题,本文参考国外的理论与加工工艺,提出并设计了圆孔单元的厚屏FSS。在目前国内尚无关于厚屏FSS的研究的情况下,初步研究了将圆孔单元内填充介质后,单元直径、排布周期、电磁波入射角度、介质厚度以及介电常数等诸多参数变化对厚屏FSS传输特性的影响。

2 理论分析

圆孔单元的厚屏FSS结构,如图1所示。

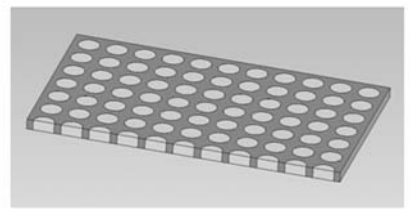


图1 圆孔单元厚屏FSS结构图

Fig. 1 Geometric structure of thick-screen FSS with circular-element

分析厚屏FSS时,将圆孔单元外的散射场用Floquet模展开,单元内的场用波导模展开,在FSS边界处强加电磁场边界条件,利用矩量法求解耦合积分方程后得出传输系数。如图2所示,将单元分为自由空间区A和C,波导区B;利用磁场边界条件—孔径上的磁流相等,将3个区域耦合;采用矩量法求出一个单元即可确定厚屏FSS的传输特性。

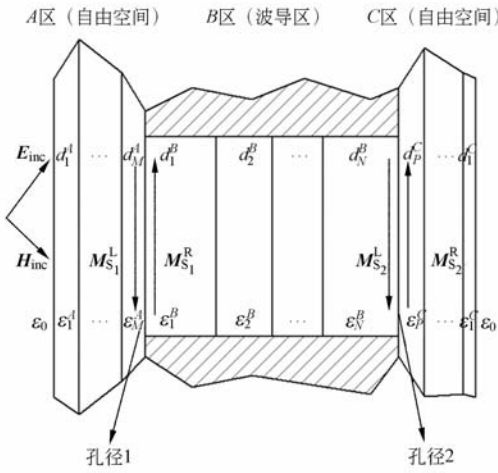


图 2 厚屏 FSS 结构分析图

Fig. 2 Analysis on geometric structure of thick-screen FSS

孔径 1 左边与右边磁场相等,可表示为

$$M_{S_1}^L = M_{S_1}^R, \quad (1)$$

同理,对孔径 2 有

$$M_{S_2}^L = M_{S_2}^R, \quad (2)$$

根据边界条件可推出

$$T_{inc} \langle e_i^1, H_{inc} \rangle^* = \sum_p A_p \sum_m Y_m^{MA} \frac{T_{1,1}^L}{2} \langle \sum_p e_p^1, h_m \rangle \langle e_i^1, h_m \rangle^* + \sum_p A_p \sum_n Y_n^{1B} \frac{T_{1,1}^R}{2} \langle e_p^1, h_n \rangle \langle e_i^1, h_n \rangle - \sum_q B_q \sum_n Y_n^{NB} \frac{T_{1,2}}{2} \langle e_q^2, h_n \rangle \langle e_i^1, h_n \rangle, \quad (3)$$

$$0 = \sum_p A_p \sum_n Y_n^{1B} \frac{T_{2,1}}{2} \langle e_p^1, h_n \rangle \langle e_j^1, h_n \rangle - \sum_q B_q \sum_m Y_m^{PC} \frac{T_{2,2}^R}{2} \langle e_q^2, h_m \rangle \langle e_j^2, h_m \rangle^* - \sum_q B_q \sum_n Y_n^{NB} \frac{T_{2,2}^L}{2} \langle e_q^2, h_n \rangle \langle e_j^2, h_n \rangle, \quad (4)$$

式中: h_m 为自由空间模函数; h_n 为磁场正交波导模基函数; $M_{S_1}^L, M_{S_1}^R$ 为磁流耦合模函数; H_{inc} 为入射波磁场; Y_m, Y_n 为介质层导纳; $e_i^1, e_p^1, e_j^1, e_j^2, e_q^2$ 为归一化正交磁流模函数; $T_{inc}, T_{1,1}^L, T_{1,1}^R, T_{1,2}, T_{2,2}^R, T_{2,1}, T_{2,2}^L$ 为传输系数 A_p, B_q 为待定系数。

3 计算结果及分析

设计了正方形排列的圆孔单元内填充介质,如图 3 所示。其中 S 为排布周期, d 为单元直

径。金属屏为铝板,厚度 t 为 1.5 mm。

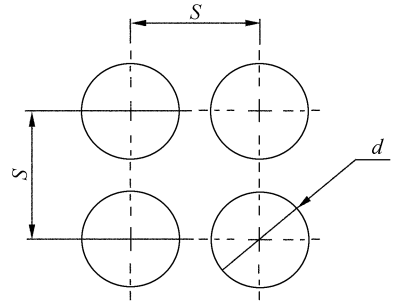


图 3 圆孔单元尺寸示意图

Fig. 3 Dimensions of circular-elements

3.1 圆孔直径对厚屏 FSS 传输特性的影响

研究了不同直径圆孔单元填充介质后对厚屏 FSS 传输特性的影响变化。其中排布周期 S 为 26.8 mm,电磁波正入射($\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$),圆孔直径 d 依次取 14 mm, 17 mm, 23 mm。采用矩量法进行仿真计算,结果如图 4,对比结果如表 1。当单元直径 d 为 14 mm,中心频率 f_0 为 9.6 GHz 时, -3 dB 带宽 W 为 1.3 GHz;当单元直径 d 增加到 17 mm,中心频率 f_0 为 9.1 GHz 时, -3 dB 带宽 W 为 2.5 GHz;中心频率仅仅减小了 0.5 GHz,而带宽却增加了 1.2 GHz。可以看出,单元内填充介质后,随着单元直径增加,中心频率大体上呈单调下降的趋势,而带宽以两倍速度增加。

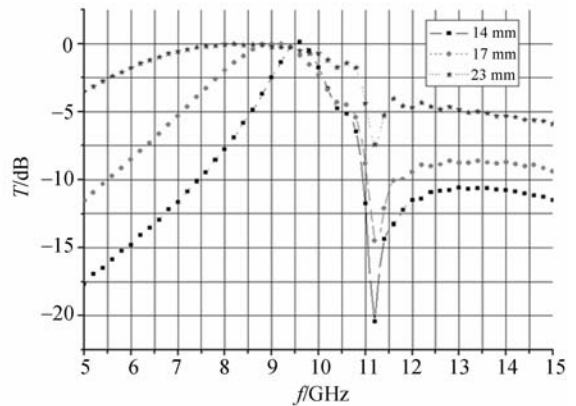


图 4 正入射不同直径圆孔单元下的传输特性

Fig. 4 Frequency response of FSS with circular-elements in different diameters under perpendicular incidence

表 1 FSS 传输特性随直径的变化

Tab. 1 Frequency response characteristics of FSS changed with diameters

单元直径 d /mm	中心频率 f_0 /GHz	-3 dB 带宽 W /GHz
14	9.6	1.3
17	9.1	2.5
23	8.7	5.6

3.2 单元间距对厚屏 FSS 传输特性的影响

研究了单元直径 d 为 20.28 mm, 电磁波正入射 ($\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$), 单元间距 S 依次取 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 λ_0 mm 时对 FSS 传输特性的影响。采用矩量法进行仿真计算, 结果如图 5, 对比结果如表 2。当单元间距 S 为 0.8 λ_0 mm (30 mm), 中心频率 f_0 为 9.2 GHz 时, -3 dB 带宽 W 为 6 GHz; 当单元间距 S 增加到 1.2 λ_0 mm (36 mm), 中心频率 f_0 为 7.1 GHz 时, -3 dB 带宽 W 为 0.9 GHz; 中心频率减小了 2.1 GHz, 带宽减小了 5.1 GHz。可以看出, 随着单元间距的增大, 中心频率迅速向低频漂移, 带宽也随之迅速变窄; FSS 传输特性随入射角变化稳定性变差, 并且出现了栅瓣。

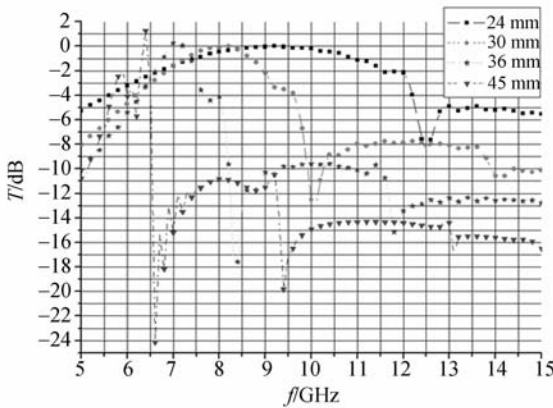


图 5 正入射不同单元间距下传输特性的变化

Fig. 5 Frequency response of FSS in various gaps under perpendicular incidence

表 2 FSS 传输特性随单元间距的变化

Tab. 2 Frequency response characteristics of FSS changed with gaps

单元间距 S /mm	中心频率 f_0 /GHz	-3 dB 带宽 W /GHz
24	9.2	6
30	8.2	2.6
36	7.1	0.9
45	6.4	0.3

3.3 电磁波以不同入射角入射对厚屏 FSS 传输特性的影响

研究了排布周期 S 为 26.8 mm, 单元直径 d 为 20.28 mm, 电磁波斜入射, 入射角 θ 依次取 10, 20, 30, 40, 50° 时对 FSS 传输特性的影响。采用矩量法进行仿真计算, 结果如图 6, 对比结果如表 3。当入射角 θ 为 10°, 中心频率 f_0 为 8.8 GHz 时, -3 dB 带宽 W 为 3.5 GHz; 入射角 θ 增加到 30°, 中心频率 f_0 为 7.3 GHz 时, -3 dB 带宽 W 为 0.3 GHz; 中心频率减小了 1.5 GHz, 带宽减小了 3.2 GHz。可以看出, 由于填充介质的失配造成了传输功率损耗, 当入射角增加时, 传输损耗增加, 中心频率迅速向低频漂移, 且漂移量较大, 同时带宽迅速变窄。

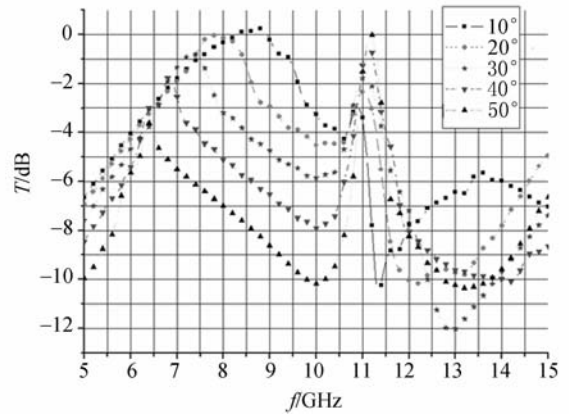


图 6 电磁波以不同入射角入射时传输特性的变化

Fig. 6 Frequency response of FSS in various incidence angles

表 3 FSS 传输特性随入射角的变化

Tab. 3 Frequency response characteristics of FSS changed with incidence angles

入射角 $\theta/(\circ)$	中心频率 f_0 /GHz	-3 dB 带宽 W /GHz
10	8.8	3.5
20	7.8	1.2
30	7.3	0.3
40	6.8	0.6
50	6.4	0

3.4 介质厚度不同对厚屏 FSS 传输特性的影响

研究了排布周期 S 为 26.8 mm, 单元直径 d 为 20.28 mm, 单元内填充介质的厚度 t_p 依次取 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 mm 时对 FSS 传输特性的影响。电磁波正入射时 ($\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$), 采用矩量

法进行仿真计算,结果如图 8,对比结果如表 5。当介质厚度 t_μ 为 0.3 mm,中心频率 f_0 为 8.8 GHz 时,-3 dB 带宽 W 为 4.1 GHz;当介质厚度 t_μ 增加为 0.9 mm,中心频率 f_0 为 8.6 GHz 时,-3 dB 带宽 W 为 4.3 GHz;中心频率减小了 0.2 GHz,带宽增加了 0.2 GHz;随着介质厚度 t_μ 增加为 1.2 mm,中心频率 f_0 为 8.3 GHz,-3 dB 带宽 W 为 4.0 GHz;中心频率减小了 0.3 GHz,带宽减小了 0.1 GHz。可以看出,填充介质的厚度对于中心频率的变化影响较小,而带宽基本单调增加,但达到一定数值后,介质厚度再增加,带宽呈现出单调减小的趋势。

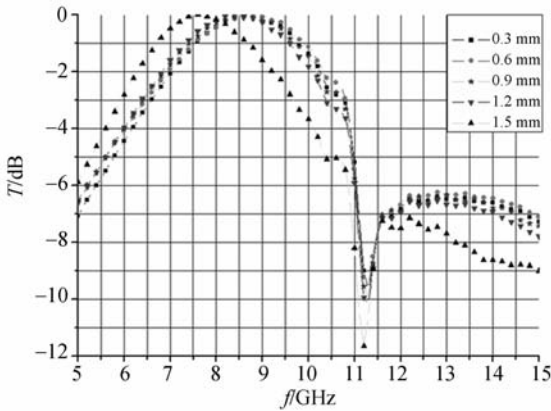


图 7 正入射介质厚度不同时传输特性的变化

Fig. 7 Frequency response of FSS in various thicknesses of filling dielectrics under perpendicular incidence

表 4 FSS 传输特性随介质厚度的变化

Tab. 4 Frequency response characteristics of FSS changed with dielectric thicknesses

介质厚度 t_μ /mm	中心频率 f_0 /GHz	-3 dB 带宽 W /GHz
0.3	8.8	4.1
0.6	8.8	4.3
0.9	8.6	4.3
1.2	8.3	4
1.5	7.6	3.8

3.5 不同介电常数对厚屏 FSS 传输特性的影响

最后,研究了排布周期 S 为 26.8 mm,单元直径 d 为 20.28 mm,单元内填充介质的介电常数 μ_r 依次取 2.5,4,7,11 时对 FSS 传输特性的影响。电磁波正入射时($\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$),采用矩量法进行仿真计算,结果如图 7,对比结果如表 4。当

介电常数 μ_r 为 2.5,中心频率 f_0 为 9.5 GHz 时,-3 dB 带宽 W 为 4 GHz;当介电常数 μ_r 增加到 7.0,中心频率 f_0 为 7.6 GHz 时,-3 dB 带宽 W 为 3.7 GHz;中心频率减小了 1.9 GHz,带宽减小了 0.3 GHz。可以看出,随着介电常数的增加,中心频率向低频漂移,并且变化的速度比随介质厚度的变化要快得多;同时带宽变窄。

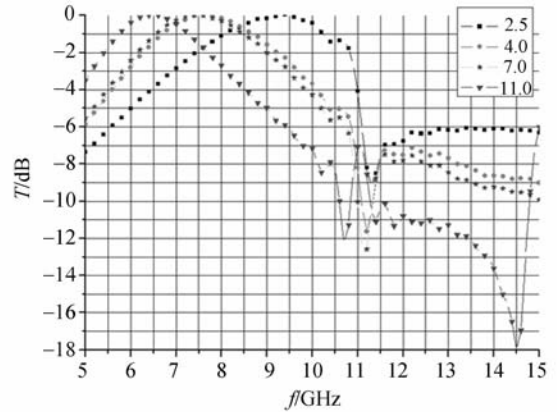


图 8 正入射不同介电常数的传输特性变化

Fig. 8 Frequency response of FSS in various dielectric permittivities under perpendicular incidence

表 5 FSS 传输特性随介电常数的变化

Tab. 5 Frequency response characteristics of FSS changed with dielectric permittivities

介电常数 μ_r	中心频率 f_0 /GHz	-3 dB 带宽 W /GHz
2.5	9.5	4
4.0	7.5	3.8
7.0	7.6	3.7
11.0	6.6	3

4 实验

对于大小为 500 mm×500 mm,厚度为 1.5 mm 的纯铝板(牌号:1060-H112),采用数控机械加工的方法,按照设计图纸的要求制作出厚屏 FSS 的所有圆孔单元。然后,将制备好的金属屏做净化处理,再将填充介质(介电常数为 4.0,损耗正切值 <0.015)在金属屏上的所有单元内模压成型。最后,去除金属屏上多余的介质材料,由此完成了厚屏 FSS 样件的制作。将制备好的实验件在微波暗室进行近场测试,图 9 与图 10 是微波暗室与测试系统。图 11 是入射平面波正入射时

的

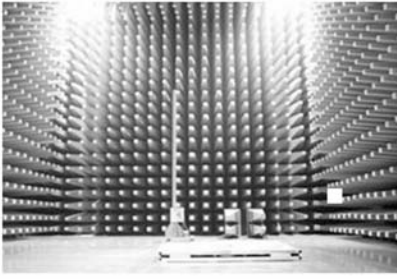


图 9 微波暗室

Fig. 9 Microwave darkroom

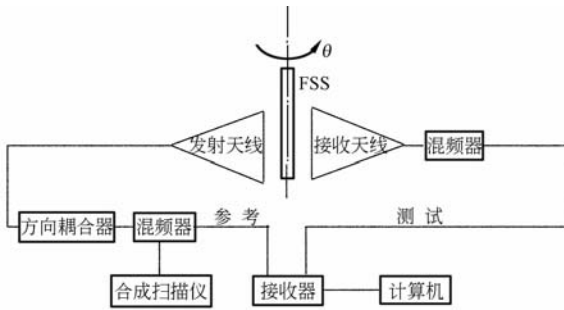


图 10 测试系统

Fig. 10 Measuring system

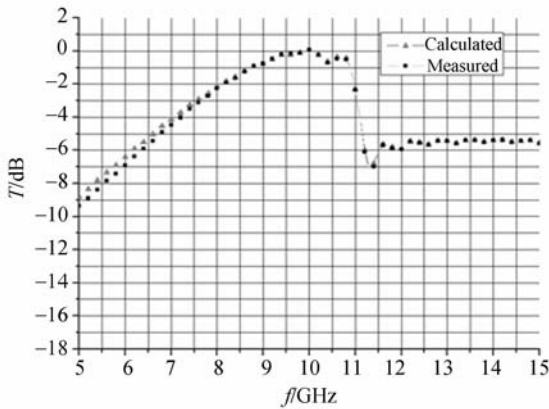


图 11 理论计算和实验结果比较

Fig. 11 Comparison between calculated values and measured results

测试曲线与理论计算曲线,其中排布周期 S 为 26.8 mm,单元直径 d 为 20.28 mm,通过对比可以看出,测试值与计算值基本相符。

5 结 论

本文设计了一种圆孔单元的厚屏 FSS,并在其单元内填充介质。对于厚屏 FSS 的研究,其单元是典型的波导结构单元,入射电磁波在特定形状的波导腔内以波导主模方式进行传输,而其他的次模在波导内衰减。这样可以调整单元的形状与大小来确定中心频率,然后再对该中心频率进行一定的处理。因此,可以说厚屏 FSS 与薄屏 FSS 的差别在于其上存在波导结构单元,其理论算法与实际测试曲线也不同。数值分析和实验结果表明,单元间距、入射角和介电常数对 FSS 中心频率影响的权值最高,单元直径对其带宽的影响权值最大。其中,当单元间距由 30 mm 增加到 36 mm,电磁波的入射角由 10° 增加到 30° ,填充介质的介电常数由 2.5 增加到 7.0 时,中心频率分别减小了 2.1, 1.5, 1.9 GHz;另外,单元直径增大使得带宽增加,当单元直径由 14 mm 增加到 17 mm,带宽增加了 1.2 GHz。因此,厚屏 FSS 的传输特性应是多参数优化问题,如果要达到理想的 FSS 传输特性,就需要对填充介质以及诸多参数进行综合的设计。本文通过对厚屏 FSS 的点滴分析与研究认为,厚屏 FSS 将会在今后曲面 FSS 的研究中具有一定的工程应用意义。

参考文献:

- [1] MUNK B A. *Frequency Selective Surface: Theory and Design*[M]. New York: Wiley, 2000.
- [2] 约翰·克劳斯,章文勋译. 天线(第三版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.
- [3] KRAUS J D, TRANSLATED. *Antennas: for all applications (third edition)*[M]. Beijing: Publish-

- ing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese)
- [3] WU T K. *Frequency Selective Surface and Grid Array*[M]. New York: Wiley, 1995.
- [4] SCHMIER R G, BUMIE G, LUCAS E W, et al. *Frequency Selective Radome* [P]. U. S: 5140338, 1992.
- [5] PAULRAJ A, NABAR R, GORE D. *Introduction*

- to *Space-Time Wireless Communications* [M]. Cambridge:Cambridge University Press, 2003.
- [6] JENSEN M A, WALLACE J W. A review of antennas and propagation for MIMO wireless communications[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2004,52:2810-2824.
- [7] KYRITSI P. Expression of MIMO capacity in term of waveguide modes[J]. *Electron Lett*, 2002, 38: 1057-1058.
- [8] 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.
L I 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)
- [9] 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 Q, FENG X G, GAO J S. 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)
- [10] 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*, 2007,15(6):978-982.
JIA H Q, GAO J S, FENG X G. Novel element frequency selective surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11):2076-2080. (in Chinese)
- [11] 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*, 2008,16(7):1247-1252.
MENG Z J, HUANG J, WU Z, *et al.*. Novel element frequency selective surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(7):1247-1252. (in Chinese)
- [12] 侯新宇,万伟,佟明安,等. 带有多层介质衬底 FSS 的损耗和带宽特性分析[J]. *微波学报*, 1999,15(4):366-370.
HOU X Y, WAN W, TONG M A, *et al.*. Analysis on the loss and bandwidth properties of FSS with multi-layer dielectric substrates[J]. *Journal of Microwares*, 1999, 15(4): 366-370. (in Chinese)
- [13] 冯林,阮颖铮. 介质层中频率选择表面散射特性分析[J]. *航空学报*, 15(9):1122-1125.
FENG L, RUAN Y Z. Analysis of FSS sandwiched in a dielectric sheet[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1994,15(9):1122-1125. (in Chinese)
- [14] 武哲,武振波. 双层 FSS 结构电性能研究[J]. *电子学报*, 2005,33(3):517-520.
WU Z, WU Z B. Research on electrical performance of Dual-Layer FSS configuration [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005,33(3):517-520. (in Chinese)
- [15] 卢俊,张靓,孙连春. Y 形和 Y 环形单元特性的试验对比研究[J]. *光学 精密工程*, 2005,13(2):219-224.
LU J, ZHANG J, SUN L C. Experimental comparison of the characteristics of Y element and Y loop element [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):219-224. (in Chinese)

作者简介:



方春易(1970—),男,吉林长春人,工程师,博士研究生,主要从事频率选择表面的研究与设计,以及机械制造和自动化方面的研究。E-mail:f_y_u@sina.com



卢俊(1968—),男,吉林永吉人,教授,2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事频率选择表面设计及曲面成型工艺的研究。E-mail:junlucc@126.com

导师简介:



汪建波(1978—),男,吉林长春人,讲师,2007年于吉林大学获得博士学位,主要从事频率选择表面的研究与设计以及低微物理与表面物理方面的研究。
E-mail:wangjianbo@126.com



张树仁(1950—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,主要从事机械制造及其自动化领域的教学和科研工作。E-mail:srzhang@cust.edu.cn



孙连春(1942—),男,吉林九台人,研究员,主要从事薄膜光学、镀膜、光刻、隐身技术等方面的研究。

●下期预告

980 nm 半导体激光器双布拉格光纤光栅波长锁定器

李毅^{1,2},黄毅泽¹,王海方¹,俞晓静¹,张虎¹,张伟¹,朱慧群^{1,3}

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院,上海 200093;

2. 上海市现代光学系统重点实验室,上海 200093;

3. 五邑大学 薄膜与纳米材料研究所,广东 江门 529020)

为了满足光纤放大器对半导体激光器的高性能要求,提出了由两个均匀布拉格光纤光栅组成的980 nm 半导体激光器波长锁定器的优化方法。运用耦合模理论推导了双布拉格光纤光栅的透射率和反射率的解析表达式和波长锁定器的增益方程。研究了两光栅之间的距离、光栅到激光器前端面的距离、光栅折射率、光栅折射率周期、光栅栅长和温度对激光器增益曲线的影响,并通过优化这些参数以达到最佳的锁模性能。测量了带双布拉格光纤光栅波长锁定器的非致冷半导体激光器的输出光谱和出纤功率。实验结果表明:高功率非致冷980 nm 半导体激光器在0~70 °C的波长漂移为0.5 nm,边模抑制比达45 dB以上,半峰值全宽度<1 nm。经优化设计的980 nm 半导体激光器双布拉格光纤光栅波长锁定器可满足光纤放大器对非致冷半导体激光器大功率、长寿命、高可靠性、小尺寸、标准化和低成本的要求。